UNIVERSITE DE LILLE

ECOLE DOCTORALE SPI

INSTITUT D'ELECTRONIQUE DE MICROELECTRONIQUE ET DE NANOTECHNOLOGIE

Thèse

Présentée par :

Quentin Hivin

soutenue le : 25/06/2019

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université de Lille**

Discipline / Spécialité : Electronique-Photonique

MICRO-STRUCTURATION LASER POUR LE PACKAGING ELECTRO-OPTIQUE AVANCE

Président du jury :

Sophie Costil Professeur de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Rapporteurs :

Luca Varani Professeur de l'Université de Montpellier

Philippe Delaporte Directeur de Recherche CNRS, LP3, Marseille

Examinateur :

Jean-Emmanuel Broquin Professeur de l'Institut Polytechnique de Grenoble

Invités :

Jean-François Robillard Assistant Professeur à l'ISEN

Cédric Durand Ingénieur de Recherche STMicroelectronics, Crolles

Thèse co-dirigée par :

Emmanuel Dubois Directeur de Recherche CNRS, IEMN, Lille

Christophe Gaquière Professeur de l'Université de Lille

A mes grands-mères

REMERCIMENTS

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été financé par l'Université de Lille et la région Hauts-de-France. Il s'est déroulé au sein de l'Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN), qui fait parti du réseau français de micro et nano fabrication, RENATECH. Ces travaux ont été supportés par le laboratoire commun STMicroelectronics-IEMN et le gouvernement français à travers un projet ANR du programme PIA EQUIPEX LEAF ANR-11-EQPX-0025.

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de thèse, M. Emmanuel Dubois, Directeur de recherche au CNRS. Je lui suis reconnaissant pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise, sa sympathie, ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Son énergie et sa confiance ont été des éléments moteurs pour moi. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Je tiens aussi à remercier mon co-directeur de thèse, M. Christophe Gaquière, Professeur à l'Université de Lille, pour ses conseils et son attention sur mes travaux.

Il est très important pour moi de remercier tout particulièrement Didier Decoster, qui m'a permis de découvrir le métier de la recherche. Merci Didier pour toutes ces conversations personnelles et professionnelles, merci de m'avoir transmis cette passion scientifique au travers de très beaux moments. Un très grand merci Didier.

Merci aussi à tous les membres de l'équipe Microélectronique que j'ai côtoyé ces trois années, Valantina, Valeria, Justine, Di, Yun, Pascale, Jean François, Jean-Michel, Matthieu, Thierno, Tianqui, Arun, Jean Marc et Maciej. Pour leur sympathie et leur bonne humeur.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes du labo que j'ai côtoyé de près ou de loin, en effet, cette thèse n'aurait pas été possible sans l'aide des membres de la centrale de micro et nano fabrication, de la centrale de caractérisation et des services administratifs de l'IEMN avec qui j'ai eu le plaisir de travailler. Merci à Nora, Sylvie et Sylvie, Vanessa, Cathy, Bertrand, Ji-Pi, Mathieu, Etienne et à tous les autres.

Un merci tout particulier à Flavie avec qui j'ai eu le plaisir de passer beaucoup de temps dans la 'laser room'. Merci Flavie pour ton soutien, tes encouragements, ton aide précieuse et surtout pour ta bonne humeur. Merci aussi pour ces quelques soirées à siroter les bonnes bières de chez nous et le vin pétillant de Matteo.

Merci à tous mes comparses, passés avant moi en thèse, qui mon soutenu et montrés ce qu'il ne fallait pas faire pour réussir un projet comme celui-ci. Merci Thomas, Adrien, Boubakeur, Alain, Gaëtan, et Yann.

Évidemment je remercie aussi tous mes amis, Fanny, Thérèse, Lou, Max, Arnaud, les William et merci aussi à tous ceux que je n'ai pas cité. Merci à Charlène et Rabah pour toutes ces bières servies et ces longues conversations qui vous ont fait fermer le bar parfois très tard.

Un merci très spécial pour moi à la Smala. Merci Ju pour ces moments philosophiques intenses et ces 'mais enfaite, on est d'accord !'. Merci Matth pour tes blagues, 'typiquement', toujours très justes. Merci Willou, mon Papa Ganouche pour tous 'les instants de vie' que l'on a partagé et ceux que l'on partagera encore. Merci Dudu, Raph, Pauline, Margaux, François, Juliet, Justin, William. Vous avez toujours été là pour moi et vous m'avez aidé à garder la tête haute et les épaules droites dans n'importe quelles situations. Il est clair que sans vous cette aventure n'aurait pas été la même !

Merci aussi à Newton, notre boule de poils. Que de tendresse et de 'mignonitude', sans toi les journées de rédaction n'auraient pas eu la même saveur et la même douceur.

Merci à ma famille et ma belle-famille. Merci Maman et merci Papa c'est complètement grâce à vous que j'en suis là aujourd'hui. Votre soutien sans faille, la liberté que vous m'avez offerte et l'amour que vous m'avez donné m'a permis d'être ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain !

Pour finir je veux remercier Lauriane. Je suis conscient qu'il n'est pas toujours aisé de me suivre et toi tu m'as poussé, aidé, guidé, tu as écouté mes monologues scientifiques, tu m'as supporté et réussi à toujours trouver les mots justes pour m'accompagner dans ma folie de tous les jours. Merci !

TABLE DES MATIERES

REMERCIMENTS **5**

TABLE DES MATIERES **7**

INTRODUCTION GÉNÉRALE **11**

CHAPITRE 1 : PACKAGING DES TECHNOLOGIES ÉLECTRO-OPTIQUES INTÉGRÉES : CONTEXTE ET DÉFIS **15**

Sommaire 15
I. Introduction 17
II. Les technologies lasers 17
II.1. De la dualité onde-particule aux domaines d'applications des lasers *17*
II.2. Avantages des lasers pour le packaging microélectronique *21*
II.3. Spécificité du régime femtoseconde *22*
III. État de l'art des liens optiques dans les data-centers 22
III.1. Les data-centers *23*
III.2. Les liaisons des data centers *26*
III.3. Les différents formats de connecteurs *28*
III.4. Télécommunications grâce à l'optique intégrée *29*
IV. La loi de Moore et le packaging microélectronique 36
IV.1. Moore *36*
IV.2. More-Than-Moore *38*
IV.3. Différents types d'architectures pour le packaging micro-électronique *39*
V. L'intégration System-in-Package 42
V.1. L'intégration 2.5D *43*
V.2. L'intégration 3D *43*
V.3. Les techniques de report et d'interconnexion des puces *46*
V.4. Les interposeurs *48*
VI. Conclusion 51
Bibliographie 52

CHAPITRE 2 : DE LA THÉORIE DE L'INTERACTION LASER/MATIÈRE À L'UTILISATION DE LA PLATEFORME DE MICRO-USINAGE **59**

Sommaire 59
I. Introduction 61
II. Interaction laser / matière 61
II.1. Absorption linéaire et non linéaire *61*
II.2. Mécanismes d'interaction *62*
II.3. Chronologie de l'interaction *64*
II.4. Processus bref et ultra-bref *64*
III. Cas spécifique des matériaux diélectriques 66
III.1. Modifications structurales du verre irradié par un laser femtoseconde *67*
III.2. L'auto focalisation par effet Kerr *70*
III.3. Le plasma comme lentille divergente *74*

III.4. La filamentation *74*
III.5. Régime d'interaction laser femtoseconde dans les verres de silice fondue *75*
IV. État de l'art du micro-usinage laser du verre 75
IV.1. Techniques de fabrication des composants *76*
IV.2. Applications en photonique, les composants passifs *81*
V. Présentation de la plateforme de micro-usinage 84
V.1. Laser fibré dopé Ytterbium *84*
V.2. Mise en forme du faisceau *86*
V.3. Propriétés spatiales du faisceau laser *87*
V.4. La puissance moyenne en fonction du taux de répétition *90*
VI. Matériaux utilisés 90
VI.1. AF32 ..... *90*
VI.2. PCB *91*
VII. Outils de caractérisation 91
VII.1. MEB *91*
VII.2. Profilomètre optique *92*
VII.3. Banc de mesure de modes/pertes *93*
VIII. Conclusion 94
Bibliographie 96

CHAPITRE 3 : STRUCTURATION DE MATÉRIAUX PAR LASER FEMTOSECONDE POUR LA FABRICATION D'INTERCONNEXIONS 103

Sommaire 103
I. Introduction 104
II. Théorie sur la structuration des matériaux par laser femtoseconde 104
II.1. Absorption et transfert d'énergie dans les métaux *104*
II.2. Modifications permanentes du matériau *105*
II.3. Ablation de métaux par laser femtoseconde *108*
III. Étude expérimentale et caractérisations de la structuration d'interconnexions pour PCB 113
III.1. L'usinage de surface *114*
III.2. Technique alternative de fractionnement-décollement (Cut-Shot-And-Peel ; CSAP) *116*
IV. Conclusion 119
Bibliographie 120

CHAPITRE 4 : MODIFICATIONS STRUCTURALES DU VERRE PAR IRRADIATION LASER FEMTOSECONDE 123

Sommaire 123
I. Introduction 125
II. Base théorique de la modification structurale du verre induit par laser femtoseconde 126
II.1. Simulation de la densité d'énergie au voisinage du point focal *126*
II.2. Densification du verre par irradiation laser *128*
II.3. Mise en évidence de la densification du verre par photo-inscription *129*
III. Étude expérimentale et caractérisation de guides optiques fabriqués par inscription directe par laser femtoseconde dans du verre 132
III.1. Différentes techniques pour la photo-inscription de guides optiques dans du verre *132*

III.2. Banc de caractérisation ... *134*
III.3. Étude de l'influence des paramètres lasers sur la fabrication de guides optique par photo-inscription directe ... *137*
IV. Étude expérimentale et caractérisation de tranchées fabriquées par inscription directe et gravure chimique ... 146
IV.1. Méthodologie ... *147*
IV.2. Influence des paramètres lasers ... *147*
IV.3. Influence de la gravure HF ... *152*
V. Miroir photonique ... 155
V.1. Fabrication du miroir photonique ... *155*
V.2. Caractérisation du miroir photonique ... *157*
VI. Conclusion ... 159
Bibliographie ... 160

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES ... 163

Sommaire ... 163
I. Introduction ... 164
II. Synthèse des travaux de thèse ... 164
II.1. Chapitre I ... *164*
II.2. Chapitre II ... *165*
II.3. Chapitre III ... *166*
II.4. Chapitre IV ... *167*
III. Perspectives : champs d'application de l'inscription laser ... 168
III.1. Guides optiques dans des verres flexibles ... *168*
III.2. Composants photoniques 3D ... *170*
III.3. Marquage et stockage optique ... *171*
III.4. Puces de micro et d'opto-fluidique ... *172*
IV. L'inscription laser au service de la photonique intégrée et du packaging microélectronique pour l'interposeur verre ... 172
Bibliographie ... 175

ANNEXE I – CARTOGRAPHIE EXPERIMENTALE ... 177

Sommaire ... 177
I. Étude de l'influence du balayage en puissance pour trois vitesses sur la formation de tranchée après irradiation laser ... 178
II. Étude de l'influence du balayage en fréquence pour cinq vitesses sur la formation de tranchée après irradiation laser ... 180
II.1. De 20 à 200 kHz par pas de 20 kHz ... *180*
II.2. De 8 à 44 kHz par pas de 4 kHz ... *182*
III. Étude de l'influence du balayage en fréquence pour trois vitesses sur la formation de tranchée après irradiation laser et gravure au HF ... 184
III.1. Ligne UV ... *184*
III.2. Ligne GR ... *186*
III.3. Ligne IR ... *188*
IV. Étude de l'influence du balayage en fréquence sur la formation de tranchée inclinée après irradiation laser et gravure au HF ... 190

LISTE DES ACRONYMES…….193
TABLE DES FIGURES……195
PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES……..205
RESUME……....207
ABSTRACT……...……208

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le nombre de données à stocker et à traiter a considérablement augmenté ces dernières années notamment en raison du déploiement des systèmes connectés. Pour gérer toutes ces données, des data centers sont déployés partout dans le monde et sont interconnectés, notamment grâce à l'Internet fibré. Ces data centers, qui permettent le bon fonctionnement d'Internet, sont constitués de serveurs reliés entre eux par des liens électriques ou optiques. Plusieurs problématiques entourent le fonctionnement de ces centres de données. Tout d'abord leur consommation électrique qui est particulièrement importante, de part la consommation des serveurs mais aussi à cause des systèmes de refroidissement qui gèrent leur température. Vient ensuite un point crucial des data centers, la gestion du flux de données à traiter. Comment augmenter la capacité de traitement des data centers ? Comment augmenter la vitesse de traitement de ces données ?

Parallèlement, l'industrie des semi-conducteurs qui continue d'évoluer depuis plus de cinq décennies en suivant le rythme du modèle technico-économique de la loi de Moore. Que ça soit dans les ordinateurs, les smartphones ou encore les tablettes, les systèmes microélectroniques sont partout et de plus en plus complexes. Notamment l'émergence des objets connectés grâce à l'Internet des objets induit une croissance du nombre de fonctions pour un même système. On peut citer différents exemples : comme exemple, la domotique pour contrôler la consommation énergétique de son logement, les montres connectées qui permettent de suivre l'évolution de sa santé au moyen de différents capteurs, mais aussi sans parler des nouveaux systèmes d'intelligence artificielle implémentés dans certains systèmes intégrés qui peuvent servir à la reconnaissance faciale pour le déverrouillage de smartphone. Aujourd'hui, la miniaturisation, pour l'amélioration des performances des systèmes, n'est plus totalement au cœur de la recherche et de l'industrie microélectronique. La taille critique de gravure d'un transistor est passée sous le seuil de 10 nm et il devient très complexe de gérer la compacité, la reproductibilité, la variabilité et le rendement des processus de fabrication de ceux-ci. D'autres techniques doivent être mises en place pour continuer le développement des systèmes électroniques en introduisant un niveau accru de diversification des technologies dans une logique d'assemblage hétérogène. De nombreux travaux sont actuellement en cours pour le développement et le déploiement de nouvelles technologies de packaging microélectronique. Il existe notamment les technologies d'intégrations SiP (System in Package), qui combinent l'utilisation des techniques développées pour la fabrication de puces silicium et l'amélioration des techniques d'assemblage microélectronique en terme de multiplication de fonction, d'augmentation de la densité d'intégration et de diminution du coût de packaging des composants et systèmes. Des questions se posent donc légitimement : comment augmenter le nombre de fonctions des dispositifs tout en minimisant les coûts de fabrication ? Quels outils choisir, suffisamment fiables et reproductifs pour conserver la qualité des processus de fabrication déjà existants et actuellement utilisés en microélectronique ?

Depuis plusieurs années, l'émergence de systèmes laser sà sources ultra brèves a ouvert la porte à de nouveaux processus de fabrication dans de multiples domaines. La précision micrométrique et le non échauffement des pièces usinées dus à l'utilisation de sources femtosecondes a en effet permis le développement de nouvelles applications de façon simple, précise, fiable et répétable. L'une des applications les plus connues de l'utilisation de lasers femtosecondes est l'opération de la cornée, en médecine ophtalmique. Ces lasers sont également de plus en plus utilisés dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'automobile et l'instrumentation, mais peinent à pénétrer le secteur très conservateur

de la microélectronique. Les puissances crêtes particulièrement élevées de ce type de laser dues à la concentration de l'énergie sur une durée d'impulsion très courte permettent d'atteindre facilement le seuil d'ionisation des électrons, c'est-à-dire la pulvérisation du matériau à son point focal. L'intensité de l'irradiation que peut atteindre les lasers ultra-brefs permet donc le dépôt de l'énergie très rapidement de façon locale, délimitée par la spatialité du faisceau. Les lasers à impulsions ultra brèves permettent notamment de tirer parti de phénomènes d'optique non linéaire dans des milieux diélectriques transparents, ce qui en fait un outil hors normes pour l'usinage de ce type de matériaux. L'absorption multi-photonique, effet d'optique non linéaire, permet en effet de venir usiner des échantillons transparents à des longueurs d'onde du proche infra-rouge à l'ultra-violet de façon particulièrement précise. Les effets d'auto-focalisation et la création de plasma induisent, dans les conditions optimales la formation de filaments dans les matériaux. Ces filaments, peuvent être tantôt néfastes, tantôt utiles selon le type d'usinage souhaité. De plus les changements structuraux induits par un faisceau laser femtoseconde dans des matériaux transparents peuvent conduire à un réarrangement des chaînes moléculaires. Cette modification conduit à une densification du matériau et à un changement de son indice de réfraction, ce qui est particulièrement intéressant pour la création d'applications photoniques.

Afin de répondre aux différentes problématiques énoncées précédemment, ce travail de thèse porte sur l'utilisation d'un laser femtoseconde pour le développement et l'optimisation de processus de fabrication en microélectronique. Ce travail a notamment pour but d'étudier la structuration de matériaux diélectriques à l'échelle micrométrique pour le développement du packaging électro-optique de fonctions photoniques intégrées. En effet, la mise en place de nouveaux moyens de packaging multifonctionnel (électronique et photonique) s'inscrit pleinement dans le changement de paradigme de l'industrie des semi-conducteurs. En d'autres termes, le principal objectif de cette thèse est de démontrer la possibilité de structurer des échantillons de verre à l'aide d'un laser femtoseconde pour la conception d'interposeurs verre dédiés à l'intégration de transceivers électro-optiques. A cette fin, ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le Chapitre 1 traite des technologies lasers mises en œuvre dans le domaine du packaging microélectronique. Une brève description, de portée générale, sera donnée des lasers, d'abord en termes de principes physiques mis en jeux et ensuite d'un point de vue plus historique, des prémices des lasers aux sources lasers ultra-brèves d'aujourd'hui. Les différents avantages militant en faveur de l'utilisation des lasers en microélectronique seront décrits ainsi que les spécificités du régime femtoseconde.
Un état de l'art des liaisons optiques au sein des data-centers est donné dans la deuxième partie de ce chapitre. Celle-ci est une description des data-centers et des liaisons électriques et optiques qui les composent. Un paragraphe traitera des transceivers électro-optiques, qui permettent de transformer un signal optique en un signal électrique et inversement, qui sont des éléments clé de ces centres de données. Le multiplexage en longueurs d'onde ainsi que les circuits photoniques intégrés seront présentés pour décrire l'optique intégrée au service des télécommunications.
L'évolution de la microélectronique condensée par le modèle historique de la loi de Moore et l'émergence, à l'orée des années 2000, du paradigme de diversification repris sur le vocable More-Than-Moore seront décrits afin d'appréhender les défis technologiques qui nécessitent d'être relevés avant d'introduire le paradigme System-Moore qui se focalise sur l'amélioration des performances systèmes.
Pour terminer ce chapitre, une partie traitera de l'intégration SiP et des techniques d'interconnexions utilisées en packaging avancé. Le dernier paragraphe sera l'occasion de définir la plateforme d'intégration multifonctionnelle qu'est l'interposeur.

Dans le Chapitre 2, qui aborde l'interaction laser-matière de façon théorique, les différents mécanismes physiques qui régissent l'usinage laser bref et ultra-bref des matériaux pour la microélectronique seront présentés. Notamment l'absorption linéaire et non linéaire, les différents mécanismes d'interactions et la chronologie de ceux-ci.
La deuxième partie permet de rentrer plus en détail dans la description de l'interaction laser-matière dans le cas des matériaux diélectriques et constitue l'occasion de décrire les différents types de modification structurale des verres après irradiation par un faisceau laser femtoseconde. L'auto focalisation par effet Kerr ou encore la filamentation, deux mécanismes non linéaires notables seront décrits à ce stade.
La troisième partie du chapitre réserve un état de l'art du micro-usinage laser du verre par laser femtoseconde, en présentant les différentes variétés techniques utilisées pour la micro-structuration de ce matériau. Enfin plusieurs applications seront présentées dans différents domaines. Les dernières parties du chapitre sont consacrées à la plateforme de micro-usinage utilisée dans le cadre de cette thèse, en décrivant la source laser, le conditionnement du faisceau ainsi que les matériaux utilisés en passant par les différents moyens de caractérisation physiques et optiques.

Le Chapitre 3 est consacré à la structuration des matériaux par laser femtoseconde pour la fabrication d'interconnexions électriques. L'état de l'art de la structuration des matériaux métalliques sera donné plus en détails, notamment en décrivant le mécanisme d'ablation.
La seconde partie permettra de décrire deux études expérimentales de la structuration de couches minces métalliques pour la formation d'interconnexions électriques. Les deux techniques de fabrications seront présentées, analysées et des caractérisations d'échantillons seront montrées afin de pouvoir comparer ces deux procédés.

Le Chapitre 4 est consacré aux études expérimentales centrées sur la modification structurale du verre par irradiation laser femtoseconde. Une première partie adopte un point de vue théorique pour présenter notamment des simulations de densité d'énergie au point focal du laser en fonction des différentes optiques utilisées. L'étude expérimentale, divisées en deux parties, présente la formation et la caractérisation de guides optiques dans des échantillons de verre. La seconde porte sur l'impact des différents paramètres lasers sur la fabrication de tranchées en surface de substrats de verre. Une dernière partie permettra de présenter plus en détail la fabrication et la caractérisation optique de miroirs photoniques, résultant de l'étude sur les tranchées.

Le dernier chapitre présente une synthèse générale des travaux réalisés et propose aussi quelques perspectives à ce travail de thèse.

CHAPITRE 1 : PACKAGING DES TECHNOLOGIES ELECTRO-OPTIQUES INTEGREES : CONTEXTE ET DÉFIS

Sommaire

SOMMAIRE 15

I. INTRODUCTION 17

II. LES TECHNOLOGIES LASER 17

II.1. De la dualité onde-particule aux domaines d'applications des lasers 17

II.1.1. Principes de base du laser 18

II.1.2. Un peu d'histoire … 18

II.2. Avantages des lasers pour le packaging microélectronique 21

II.3. Spécificité du régime femtoseconde 22

III. ÉTAT DE L'ART DES LIENS OPTIQUES DANS LES DATA-CENTERS 22

III.1. Les data-centers 23

III.2. Les liaisons des data centers 26

III.3. Les différents formats de connecteurs 28

III.4. Télécommunications grâce à l'optique intégrée 29

III.4.1. Les fibres optiques en télécommunication 29

III.4.2. Le multiplexage en longueur d'onde 32

III.4.3. Les Circuits Intégrés Photoniques 34

IV. LA LOI DE MOORE ET LE PACKAGING MICROÉLECTRONIQUE 36

IV.1. Moore 36

IV.2. More-Than-Moore 38

IV.3. Différents types d'architectures pour le packaging micro-électronique 39

V. L'INTÉGRATION SYSTEM-IN-PACKAGE 42

V.1. L'intégration 2.5D 43

V.2. L'intégration 3D 43

V.3. Les techniques de report et d'interconnexions des puces 46

V.3.1. Les Through Silicon Vias 46

V.3.2. Les techniques d'assemblage 47

V.3.3. Les techniques de report type 'Flip Chip' 48

V.4. Les interposeurs 48

V.4.1. Les interposeurs Si 49

V.4.2. Les interposeurs organiques *49*
V.4.3. Les interposeurs verre *50*
VI. CONCLUSION **51**
BIBLIOGRAPHIE **52**

I. Introduction

Dans ce chapitre, il sera question de l'apport des technologies lasers dans le domaine du packaging en microélectronique. Le terme 'packaging' peut être traduit par 'encapsulation'. Dans un premier temps une brève description de l'histoire et des principes physiques de bases qui régissent le fonctionnement des lasers sera donnée. Les différents types de lasers utilisés pour le micro-usinage et leurs spécificités seront décrits, en étayant plus particulièrement le discours sur les lasers à impulsions ultra-brèves, matériel utilisé lors de cette thèse. Une seconde partie traitera plus particulièrement du packaging en microélectronique et en photonique, en partant de la loi de Moore jusqu'au développement des interposeurs. Un état de l'art des connections optiques et plus particulièrement des connexions très haut débit pour les data centers sera exposé. Après la description des circuits intégrés électroniques et photoniques les différentes technologies de mise en boîtier seront définies, en partant des architectures planaires jusqu'à l'intégration 3D, pour terminer par la présentation des interposeurs de verre.

II. Les technologies lasers

L'utilisation des lasers est aujourd'hui particulièrement répandue, dans de nombreux domaines, aussi variés que la médecine, la biologie, la mécanique ou encore l'instrumentation. Grâce à l'évolution des sources lasers, de nouvelles voies de recherche fondamentale et appliquée ont été ouvertes, notamment en exploitant les caractéristiques particulières des interactions laser/matière en régime non linéaire pour des sources lasers à impulsions ultra-brèves.
De telles sources lasers sont, par exemple de plus en plus utilisées pour le micro-usinage, que ça soit en laboratoire ou en industrie [1]. En particulier, l'avènement des lasers à impulsions ultra-courtes permet, en plus d'éviter l'échauffement de la pièce à usiner, d'exploiter certains phénomènes d'optique non-linéaires tel que l'ionisation des matériaux à grand gap optique [2]. L'utilisation de ces phénomènes d'optique non-linéaires est presque indépendante du type de matériau que l'on veut façonner [3]. Le fait que l'interaction laser/matière soit athermique, dans la limite d'un taux de répétition raisonnable, permet de travailler sur un volume restreint de matière et donc d'obtenir des usinages d'une précision micrométrique.
Il est aussi à noter que l'emploi des sources lasers femtosecondes est particulièrement simple, efficace et flexible en termes de mise en œuvre, ce qui permet à de plus en plus d'applications industrielles de voir le jour, notamment pour la découpe et le perçage de substrat, de matériaux divers, comme des métaux [4], ou des diélectriques [5].

II.1. De la dualité onde-particule aux domaines d'applications des lasers

Des lecteurs blue ray à l'opération de la myopie dans le domaine médicale, en passant par le perçage, le soudage industriel ou encore par le LIDAR (LIght Detection And Ranging), le laser est un composant photonique utilisé, par tous, dans de nombreux domaines d'application. Dans cette partie, il sera question de la description des principes physiques de base, qui rentre en compte dans le fonctionnement des lasers, ainsi que de la description chronologique de l'histoire de ceux-ci. Les différents types de lasers seront décrits succinctement, notamment les sources lasers femtosecondes.

II.1.1. Principes de base du laser

Pour parler des lasers il faut revenir à ce qu'est la lumière. Huygens, dans son 'Traité de la lumière' [6] en 1690, décrit celle-ci comme étant composée d'ondes. On peut définir une onde comme la propagation d'une perturbation qui fait varier les propriétés locales du milieu qu'elle traverse de manière réversible. Huygens démontre que les ondes lumineuses peuvent interférer et créer un front d'onde. Newton, en 1704 dans 'Opticks' [7], définit plutôt la lumière comme un flot de corpuscules. Cette théorie permet à Newton d'expliquer la réfraction, la réflexion et la dispersion de la lumière dans un prisme. Il faudra attendre Einstein en 1905, pour formuler le postulat de l'existence de quanta d'énergie et surtout De Broglie en 1924 pour révéler la double nature de la lumière, à la fois ondulatoire et corpusculaire.
Le laser (light amplification by stimulated emission of radiation) est un composant photonique, basé sur l'amplification de lumière par émission stimulée de radiation. L'émission stimulée est une interaction entre la matière et la lumière, où un atome déjà excité va émettre deux photons, totalement identiques après l'absorption d'un second photon. En multipliant le nombre d'atomes excités dans l'enceinte, on va pourvoir obtenir la création d'un faisceau de lumière, possédant des photons tous identiques. Les lasers émettent un rayonnement spatialement et temporellement cohérent. Un laser est la somme d'un milieu amplificateur et d'une cavité optique, alimenté par une source de pompage. Le principe général de fonctionnement d'un laser, illustré en Fig. 1.1, peut donc être résumé comme suit : on alimente un milieu à l'aide d'une source de pompage, ce milieu va émettre un faisceau laser qui va se réfléchir sur les miroirs d'une cavité résonnante. Les multiples réflexions du faisceau dans la cavité participent à l'amplification, par émission stimulée, de celui-ci. Le rayonnement laser est émis par le miroir de sortie qui est semi-transparent.

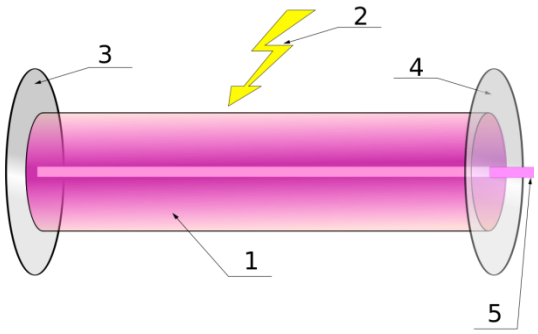


Fig. 1.1 : Principe de fonctionnement d'un laser [8], 1 - milieu excitable 2 - énergie de pompage 3 - miroir totalement réfléchissant 4 - miroir semi-réfléchissant 5 - faisceau laser

II.1.2. Un peu d'histoire …

En 1917 Einstein énonce le principe théorique d'émission stimulée, en 1958 c'est le principe théorique du maser par Townes et Schawlow et Basov et Prokhorov. Charles Townes, recevra le prix Nobel de physique en 1964 pour les concepts qu'il a développés et qui ont mené à la fabrication de masers et de lasers. En 1960, le laser à rubis pulsé (λ=694 nm), illustré en Fig. 1.2, fonctionnant à -196 °C est inventé par Maiman [9]. Même si celui-ci se dégrade particulièrement rapidement [10], cette expérience reste la première démonstration qu'il est possible d'obtenir un faisceau de lumière, amplifié, monochromatique et rectiligne, gouverné par des mécanismes de mécanique quantique.



Fig. 1.2 : Théodore Maiman et le premier laser [11]

Le laser CO_2, le laser à fibre et le laser Nd :Yag sont inventés la même année, en 1964 [12]. La première application médicale à lieu en 1961 avec la destruction d'une tumeur de la rétine par Campbell et Koester avec un laser à rubis [13]. En 1965, le perçage de filière de diamant de 4.7 mm de diamètre sur 2 mm de profondeur constitue la première application industrielle utilisant un laser. En 1966, sont inventés les lasers à colorant [14][15], dont les milieux amplificateur**s** sont des solutions chimiques, qui permettent de modifier la longueur d'onde des lasers en fonction de la concentration des solutions. Ces lasers ont notamment permis des avancées dans le domaine de la spectroscopie car ils permettent de balayer un large spectre de longueurs d'onde. L'optique non linéaire, étudiant les modifications des propriétés optiques des matériaux irradiés par laser, et l'optique quantique naissent de l'exploitation de la puissance des faisceaux lumineux émis par les lasers. Depuis 1964, vingt-quatre prix Nobel relatifs aux technologies lasers ont été décernés et on peut citer particulièrement le Nobel 2018 décerné à Donna Strickland, Gérard Mourou [16] et Arthur Ashkin. Les deux premiers chercheurs ont travaillé sur la mise au point de l'amplification par dérive de fréquence (CPA Chirped Pulse Amplification), une méthode de génération d'impulsions lasers ultra courtes et très intenses. La génération de ces impulsions est permise par l'espacement dans le temps des nombreuses fréquences formant les impulsions ultra-courtes qui possèdent de faibles puissances. Puis celles-ci sont comprimées afin de les amplifier [17]. Ce principe est utilisé dans la source laser femtoseconde mise en œuvre durant ce travail de thèse et sera décrit plus précisément dans le chapitre 2.

Les différents types de lasers peuvent être classés en fonction des milieux amplificateurs utilisés, les lasers gazeux, liquides et solides. Pour pomper les lasers à gaz on utilise un courant électrique. Le milieu amplificateur, gazeux, est alors excité par collision avec les électrons. Ces lasers ont des longueurs d'onde très fines spectralement mais on peut trouver des lasers à gaz couvrant l'ensemble du spectre optique, de l'ultra-violet au proche infrarouge. On peut citer, parmi les plus utilisés les lasers à excimère, les lasers à argon ou encore les lasers CO_2. Ceux-ci sont particulièrement utilisés dans l'industrie pour leur grande efficacité et permettent notamment le traitement de matériaux. Pour ce qui est des lasers liquides, que l'on appelle plus communément les lasers à colorant, le pompage est optique et utilise des lampes à arc ou d'autres lasers, à gaz ou solide. Ces lasers utilisent des molécules organiques dans des solvants, mélanges qui doivent être changés régulièrement, et couvrent tout le spectre visible. Pour terminer, les lasers à l'état solide se classent en deux familles, les lasers à semi-conducteur (diodes laser), pompés électriquement et les lasers utilisant des cristaux ou des verres, pompés optiquement. Les diodes lasers sont des lasers particulièrement compacts et très efficaces qui utilisent l'émission stimulée pour recombiner les paires électrons-trous dans des semi-conducteurs qui peuvent être de nature diverse (GaN,

AlGaAs etc.) en fonction de la longueur d'onde souhaitée, allant de l'ultraviolet au proche infrarouge. Ces lasers possèdent deux défauts majeurs : la qualité spatiale des faisceaux obtenus est mauvaise et il n'est pas possible de les utiliser en mode déclenché. Les autres lasers à l'état solide utilisent des matrices, cristallines ou amorphes, dopées avec des ions (Nd^{3+}, Yb^{3+}, Ti^{3+} etc.) qui permettent d'obtenir un effet laser. Ils sont pompés optiquement par d'autres lasers et émettent dans le rouge ou le proche infrarouge.

Les domaines d'applications des lasers sont multiples. On retrouve en effet des lasers dans l'industrie automobile, par exemple pour découper les carrosseries de voitures, ou pour le soudage de différents éléments. En aéronautique, on procède au décapage de peinture et aussi à de la fabrication additive pour certains supports d'articulation. Dans le domaine de l'électronique, on retrouve les lasers pour le soudage du châssis métallique, le soudage des composants, le marquage des boîtiers, pour la lithographie des composants de microélectronique, pour la découpe du verre d'écran des Smartphones. Les lasers sont aussi particulièrement utilisés dans le domaine médical, que ça soit pour le traitement des yeux avec la chirurgie de la cornée ou le décollement de la rétine mais aussi pour procéder au dé-tatouage et pour la fabrication additive de prothèses. La Fig. 1.3 montre la répartition des différentes applications industrielles des lasers en 2017.

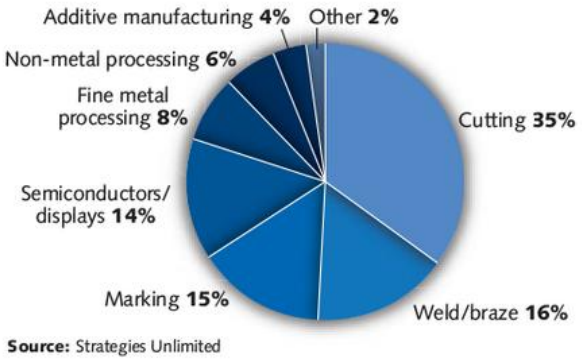


Fig. 1.3 :Répartition des applications industrielles des lasers en 2017 [18]

Aujourd'hui, le marché des lasers représente plus de 12.3 milliards de dollars [18], que ça soit pour les télécommunications ou le stockage des données ou le traitement des matériaux, qui représente près de 30 % du marché. Les différents segments du marché des lasers sont présentés Fig. 1.4.

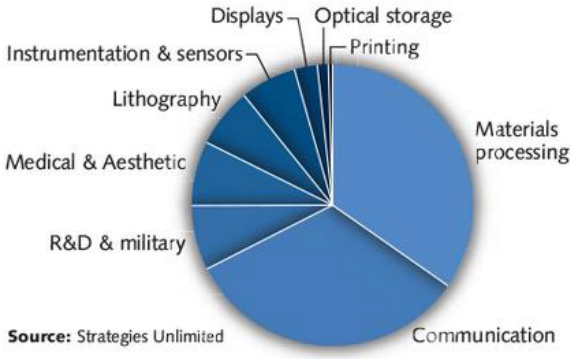


Fig. 1.4 : Segments du marché des lasers en 2017 [18]

II.2. Avantages des lasers pour le packaging microélectronique

La miniaturisation des puces semi-conductrices et de leur packaging, qui est schématisé Fig. 1.5, pour le développement des appareils électronique grand public, tel que les Smartphones, les tablettes et autres objets connectés a ouvert la voie au déploiement des technologies lasers au sein de l'industrie microélectronique. En effet le besoin croissant de développer des pistes d'interconnexion de plus en plus fines, pour assembler des puces, de plus en plus petites, le plus rapproché possible sur des circuits nécessite des techniques d'une grande précision. En plus de cette grande précision, les lasers ont la capacité unique de pouvoir travailler sur tous les types de matériaux [3] et les processus d'interactions sont ajustables. Ils sont particulièrement utilisés pour le micro-usinage pour le packaging microélectronique [19][20][21].

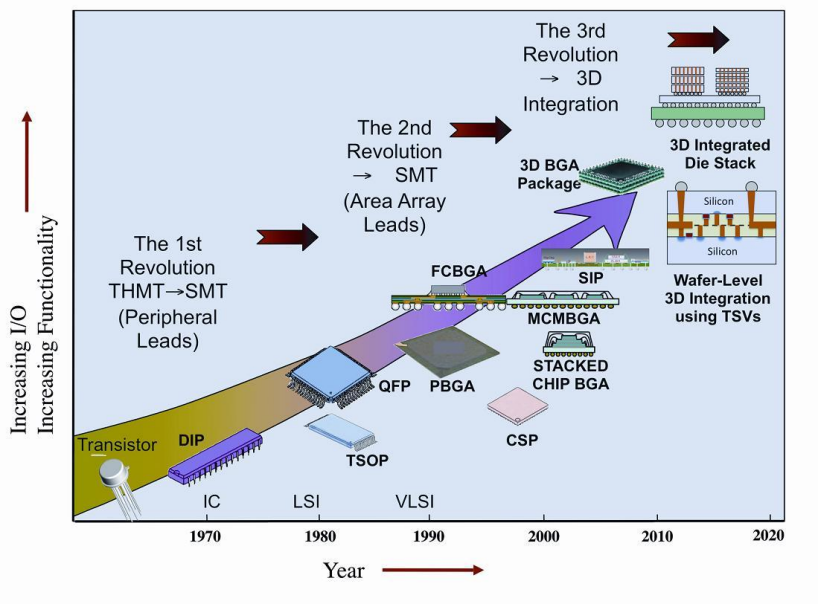


Fig. 1.5 : Évolution des packagings microélectroniques de 1970 à 2020 [22]

On peut citer plusieurs exemples d'applications dans lesquels les lasers sont actuellement utilisés, la découpe de haute précision de puces [23], dont un exemple est présenté Fig. 1.6, la création de via traversant [24][25][26], notamment pour la création de contacts électriques dans des circuits imprimés multicouches ou dans les interposeurs [27]. Les lasers sont aussi employés pour la gravure directe de motifs sur des PCBs (Printed Circuit Board), ou encore pour la structuration de surface [28], [29]. Plusieurs types de lasers sont actuellement utilisés dans l'industrie microélectronique, et notamment pour le packaging des composants. On peut citer les laser CO_2, Nd :Yag , les excimères [30] et les lasers à impulsions brèves, voir ultra-brèves comme les lasers nanosecondes [31], picosecondes [32] ou femtosecondes [33].

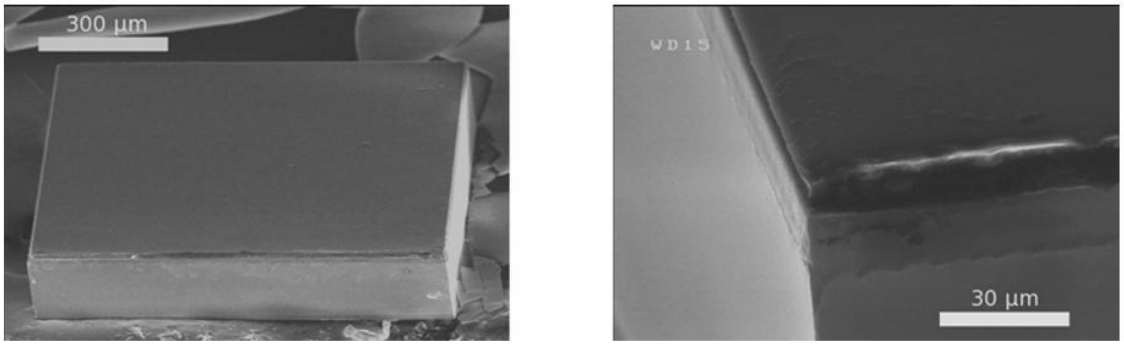


Fig. 1.6 : Photographies MEB d'une puce de verre découpée avec un laser femtoseconde [23]

II.3. Spécificité du régime femtoseconde

Historiquement, ce sont plutôt les lasers Nd :Yag qui sont utilisés pour le micro-usinage des métaux et les lasers à excimères pour l'usinage des polymères. Les lasers CO_2 et YAG, sources infrarouges, ont la particularité d'utiliser des effets purement thermiques lors de leur utilisation en micro-usinage.
L'utilisation des sources lasers à impulsions ultra-courtes permet l'usinage de n'importe quel type de matériau. En effet les matériaux les plus durs [34], comme le diamant ou le saphir [35], et les matériaux sensibles à la chaleur, comme les polymères peuvent être découpés. Des applications de texturation, à l'échelle micro ou à l'échelle nanométrique, et de fonctionnalisation de surfaces sont aussi permises grâce aux lasers à impulsions courtes [29]. Des surfaces super hydrophobes [36], imitant les propriétés des feuilles de lotus ou des surfaces noires, du 'black metal' [37] peuvent être obtenues par structuration de surface à l'aide de ce type de laser. Les impulsions ultra-brèves permettent aussi la modification de matériaux transparents dans leur volume [38]. En effet, grâce à des phénomènes d'optiques non linéaire et à de très fortes intensités il est possible de venir modifier la structure de matériaux dans leur volume sans endommager la surface. Le matériau devient absorbant au point focal du faisceau laser par absorption multi-photonique. On peut ainsi modifier la densité et l'indice de réfraction des matériaux [39]. Une des applications, l'inscription de guides optiques dans des verres borosilicates sera traitée plus loin. Ces applications ouvrent la voie à l'inscription de composants photoniques 3D dans l'épaisseur d'échantillon de verre [40]. Les très grandes performances de ces lasers en termes de précision et de non échauffement du matériau usiné, permettent aussi de pouvoir découper du verre, rapidement et proprement [23]. Il est possible à l'aide d'une mise en forme du faisceau particulière d'utiliser les effets d'optique non linéaire pour créer des filaments qui servent de 'lames optiques' [41]. L'industrie de la microélectronique est très en demande de ce type d'application notamment pour la découpe des écrans de Smartphones ou de tablettes.

III. État de l'art des liens optiques dans les data-centers

Le domaine des communications est en perpétuelle croissance, que cela soit pour Internet mais aussi dans le domaine des nouveaux objets connectés intelligents (IoT), qui nécessitent plus de jeux de données que les recherches web conventionnelles. Un rapport d'IBM [42] montre que 90 % des datas de 2016 ont été créées les deux années précédentes, ce qui confirme la récente explosion des données à traiter au sein des datas centers. Pour pallier l'augmentation de datas à traiter, plusieurs pistes se dégagent. Dans un premier temps, la 'désagrégation' des ressources informatiques (processeurs, mémoires etc.), qui

nécessite des bandes passantes élevées et des interconnexions entre dispositifs plus importants, va permettre aux systèmes d'être plus efficaces, évolutifs et flexibles, tout comme l'informatique orientée donnée [43]. Au niveau des composants microélectroniques, l'utilisation des MCPs (Many-Core Processors, processeurs multi cœurs) permet l'augmentation de la capacité de traitement d'une puce, malgré le fait que la fréquence d'horloge d'un transistor ait atteint une limite [44]. L'amélioration des packagings 2.5D et 3D permet l'augmentation des bandes passantes entre les puces, notamment pour les interfaces mémoires à haute bande passante (HBM , High Bandwidth Memory) [45].
A cause de la basse densité en bande passante et des importantes pertes de transmissions des interconnexions électriques, le déploiement des fils électriques, en tant que liaisons au sein des data centers est limité. Les interconnexions optiques, associées à la photonique sur silicium, sont, quant à elles, de bon candidats pour les liaisons des data centers et sont particulièrement étudiées [46][49]. En effet, les signaux optiques, comparés aux signaux électriques, sont particulièrement intéressants à utiliser de par leurs propriétés exceptionnelles que sont : une bande passante importante, peu de latence, une consommation électrique faible et de faibles interférences. De plus l'utilisation de l'électronique sur silicium, qui est particulièrement bien connue, est avantageuse par ses avantages industriels, en termes de ressource, de design, de test ou encore en termes de fabrication.
Cette partie propose une description des data-centers et des interconnexions associées ainsi que des technologies de télécommunications utilisant l'optique intégrée, notamment les fibres optiques.

III.1. Les data-centers

Ces vingt dernières années ont vu l'augmentation exponentielle du transit des données, issues notamment des réseaux sociaux, du 'Cloud' et de l'internet des objets (IoT, Internet of Things). La prise en charge de ces données se fait au travers des 'data-centers', des centres de données composés de baies de stockage qui peuvent s'étendre de 50 m² jusqu'à 600 000 m². Le plus grand d'entre eux, celui de Kolos, est actuellement en construction, à Ballangen, en Norvège [50].
Quand un utilisateur envoie une requête, par exemple pour lire une vidéo sur un Smartphone, un paquet est envoyé par Internet vers le serveur approprié d'un data-center. Il est à noter que, pour une requête, de multiples serveurs sont nécessaires, comme par exemple lors d'une recherche sur Internet. La Fig. 1.7 montre l'architecture typique des data centers actuels. Le réseau d'interconnexion de ces centres de données est basé sur la commutation électronique de paquets (EPS). Les serveurs hébergés dans un rack sont connectés, avec des liaisons à 1 Gbit/s à un commutateur (ToR, Top-of-the-Rack Switch). Les commutateurs ToR servent, dans le même temps, de connexion avec la couche d'agrégation avec des liens de 10 Gbit/s. Des commutateurs d'agrégation permettent la liaison entre la couche cœur et la couche d'agrégation, toujours avec des liens de 10 Gbit/s. Les commutateurs de la couche cœur assurent la communication vers l'extérieur des data centers, via Internet, à l'aide du commutateur passerelle, le gateway [51].

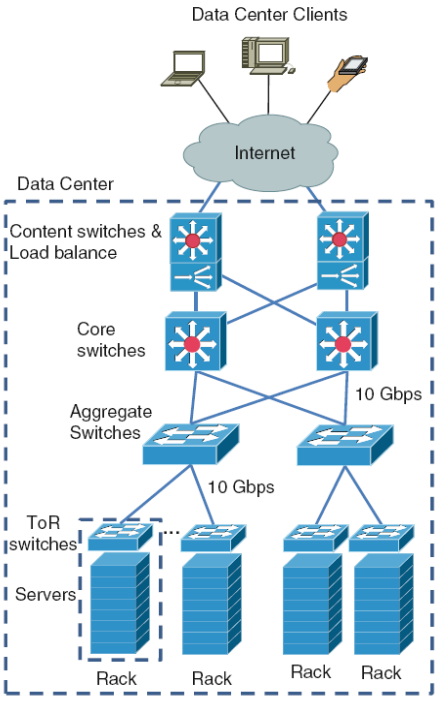


Fig. 1.7 Architecture typique d'un data center [52]

Quotidiennement des milliards de données sont stockées et/ou échangées dans plus de 7 500 data centers. Comme le montre la Fig. 1.8, le trafic des données au sein des data centers est de 10.8 zettaoctets en 2018 et se projette à 15.3 zettaoctets en 2020. Entre 2015 et 2020, l'augmentation du trafic des données au sein des data-centers va être multipliée par trois.

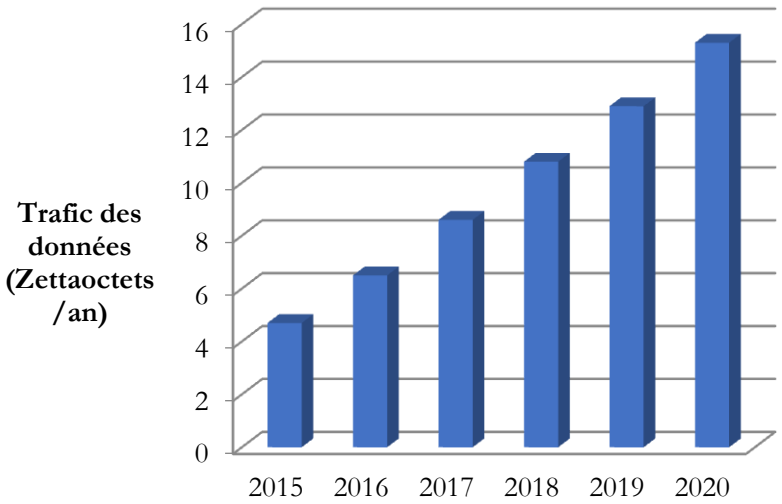


Fig. 1.8 : Augmentation du trafic des données au sein des data centers de 2015 à 2020 [53]

Jusque 2012, la miniaturisation des composants électroniques a permis l'augmentation du stockage, un gain de place et une simplification des câblages mais a, dans le même temps, augmenté le budget calorifique des baies. L'augmentation du trafic de données au sein des data-centers s'accompagne de l'augmentation de la taille et surtout de l'augmentation de la consommation électrique de ceux-ci et pousse la recherche à développer des systèmes se focalisant sur l'efficacité énergétique afin de contrebalancer la

hausse de puissance utilisée dans les centres de données. Par exemple en 2007, Greenpeace [54] a estimé la consommation électrique globale des data centers à 330 milliards de kWH, la même consommation électrique que le Royaume Uni la même année [55], ce qui représentait 14 % des émissions de gaz à effet de serre [56]. De plus les applications émergentes, tel que le 'cloud computing', requièrent aussi des data centers plus puissants, induisant une consommation électrique plus importante [57].
De plus, l'augmentation des données nécessite des bandes passantes importantes, et des temps de latences faibles. Aujourd'hui, les composants télécoms à 100 Gb/s sont largement mis en œuvre au sein des data-centers et sont progressivement remplacés par des composants pouvant atteindre 200 Gb/s. Dans un futur proche, le débit cible sera de 400 Gb/s, voir 800 Gb/s. En plus de l'amélioration des performances des processeurs, la capacité des réseaux, en termes de débit total supporté, doit aussi être augmentée, tout en minimisant la consommation électrique. Le Tab. 1.1 présente l'évolution de la tendance des performances des centres de données de 2012 à 2020 [58][59]. Il met en évidence la nécessité d'introduire les communications par fibres optiques an sein des data centers pour pallier à l'augmentation de la consommation électrique, tout en atteignant des débits très élevés [60].

Année	Performances des processeurs (PFlops)	Débit total des data centers (Po/s)	Consommation d'énergie maximale (MW)
2012	10	1	5
2016	100	20	10
2020	1000	400	20

Tab. 1.1 : Évolution de la tendance des performances au sein des data centers de 2012 à 202 [58][59]

L'augmentation du trafic des données au sein de centres de données est à mettre en relation avec l'augmentation du marché des dispositifs de photonique sur silicium. La Fig. 1.9, une étude réalisée par Yole, présentée par le comité International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) dans [61], montre cette évolution de 2013 à 2024. Le Compound Annual Growth Rate (CGAR) ou taux de croissance annuel composé (TCAC) pour les composants de photonique sur silicium devrait progresser de 27.4 % de 2014 à 2020, ce qui correspond à une augmentation de 497.53 millions de dollar US, et pourrait atteindre 38 % (augmentation de 700 millions de dollar US) en 2024. Cette augmentation est due au fait que la photonique sur silicium est devenue, ces dernières années, une alternative particulièrement intéressante à la microélectronique pour l'intégration de composants bas coût focalisés sur les vitesses de transmission importantes et sur l'intégration complexe de produits variés, comme les guides optiques, les modulateurs ou les photodétecteurs.

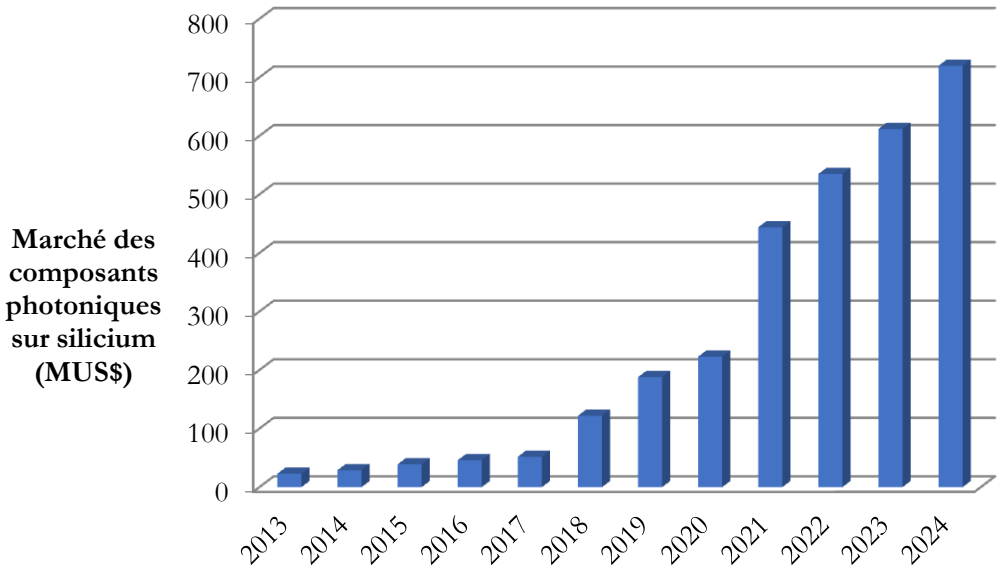


Fig. 1.9 : Évolution du marché des dispositifs de photonique sur silicium de 2013 à 2024 [61]

Tous ces besoins mènent à un changement drastique et progressif du fonctionnement et de l'infrastructure des data-centers. La structure de ceux-ci devant développer des plus grands niveaux d'intégration que ça soit pour le calcul, le stockage ou la mise en réseaux des données. L'évolution des data-centers, à moindre coût, pour pallier la hausse de la demande en termes de stockage, et ou d'échange de données, par exemple au sein du Cloud, nécessite des recherches, à la fois sur les composants des centres et aussi et surtout sur les liaisons qui les composent.

De multiples voies sont envisagées afin d'améliorer le fonctionnement des data centers, notamment dans les technologies d'assemblage et de packaging des composants microélectroniques. La photonique intégrée [62] en constitue un axe privilégié pour répondre à la demande en bande passante et nécessaire à l'augmentation du débit de transfert de données. Plusieurs pistes d'amélioration de la photonique intégrée peuvent être cités :

i) L'essor du packaging hétérogène SIP, POP, en développant des briques technologiques telle que les TSV
ii) L'amélioration des transceivers électro optique en travaillant sur les interposeurs Si et verre.

III.2. Les liaisons des data centers

Les technologies de l'optique sont tout indiquées pour être utilisées comme interconnexions au sein des data centers. En effet, les interconnexions optiques possèdent les propriétés nécessaires, que sont les bandes passantes importantes, notamment pour des fibres optiques monomodes, qui seront décrites plus loin, pour les connexions à courtes et longues distances, de 10 m à 20 km. Les composants optoélectroniques doivent se trouver au plus proche des unités de calcul afin d'atteindre des vitesses de communication suffisantes pour le perfectionnement des systèmes au sein des data centers, c'est-à-dire des débits et des bandes passantes importantes, ainsi qu'une consommation électrique et un coût le plus bas possible.

Les lasers VCSELs (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) et les fibres optique multimodes jouent déjà un rôle important, pour la communication à 10 Gb/s, au sein des data centers [63]. Cependant, l'association des VCSELs et des fibres optiques multimodes est limitée pour la montée en bande passante des interconnexions à cause de la dispersion modale des fibres, ce point sera discuté plus en détail plus

loin. Pour pallier ce problème, d'autres types de lasers et de fibres optiques monomodes peuvent être utilisés, notamment les lasers à cavités courtes [64] et les lasers intégrants une lentille sur la surface émettrice [65]. Ces technologies, bien que limitées dans le spectre, permettent d'améliorer la bande passante des dispositifs en conservant la diminution de l'électricité consommée et le gain de coût induit par l'utilisation des VCSELs. Malgré le fait que le silicium ne soit pas le matériau de prédilection pour la fabrication de laser, de nombreux composants ont été développés pour améliorer la photoniques sur Si et permettre le développement de ces technologies pour l'amélioration des performances et de la flexibilité des datas centers. On peut citer la fabrication de photo-détecteurs Ge [66], de modulateurs Si à haute vitesse [67] et de lasers Si/Ge [68].
La transmission par fibre optique est une technologie particulièrement utilisée dans les data centers. En effet, les fibres optiques ont un coût de transmission en débit particulièrement bas. De plus, les fibres optiques présentent une faible atténuation autour de 1.55 µm. Un câble optique comprenant plusieurs fibres optiques monomodes peut atteindre une bande passante élevée obtenue grâce au multiplexage en longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing). Cela consiste à multiplexer, c'est-à-dire, faire circuler plusieurs signaux à des longueurs d'onde différentes au sein de la même fibre optique et de les dé-multiplexer, les séparer à la sortie du dispositif, cette technique sera explicitée en section III.4.2.

Plusieurs types de liaisons haute vitesse sont utilisés dans les data-centers, chacune de ces liaisons ayant des spécificités différentes. Les DACs (Direct Attach Copper), sont des liaisons de cuivre peu coûteuses dont la longueur n'excède pas 3 à 7 mètres. Les AOCs (Active Optical Cable), sont des liaisons optiques pouvant être utilisées jusqu'à 30 mètres. Pour couvrir des distances plus importantes, des transmetteurs optiques sur un seul ou plusieurs canaux sont employés, tel que les SR (Short Range), les SR4 (Short Range à 4 canaux) et les PSM4 (Parallel single-Mode transceivers), respectivement utilisés pour des liaisons jusqu'à 100 et 500 mètres. Ces liaisons sont plus complexes et donc bien plus onéreuses à mettre en place. Les plus longs transmetteurs, CWDM4 (Coarse Wavelength Division Multiplexer 4 Channels) utilisent le multiplexage de deux signaux optiques. Ils sont utilisés pour des connexions de 500 mètres. Enfin pour joindre des systèmes distants de plus de dix kilomètres, ce sont les LR4 (Long Range 4 Channels) qui sont employés. Les différents types de liaisons haute vitesse sont assez nombreux. Celles-ci ne remplissent pas toutes les mêmes spécificités, malgré l'ambition commune d'être peu coûteuses, de transmettre le maximum de données le plus rapidement possible et de transmettre ces données sur des distances très variées (du mètre à plusieurs centaines de kilomètres). Ces différentes liaisons sont récapitulées Fig. 1.10.

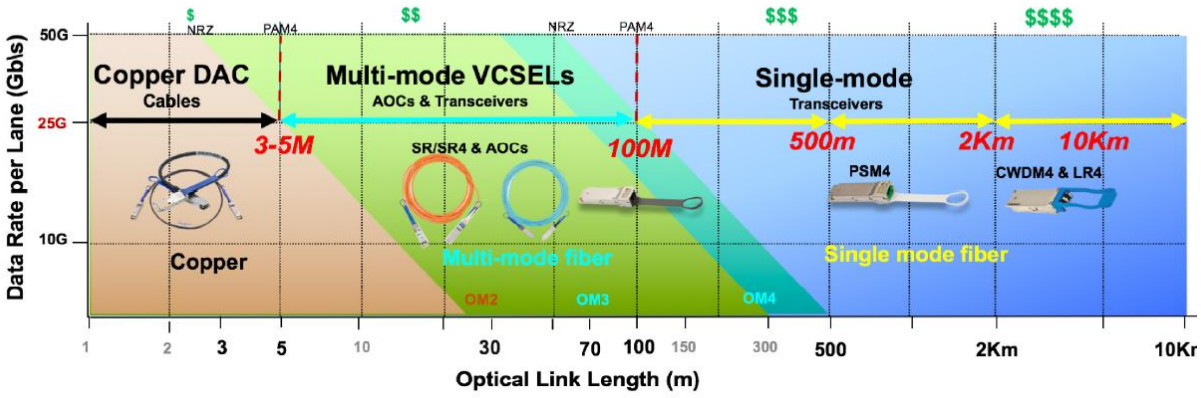


Fig. 1.10 : Graphique présentant les relations entre prix, rapidité et longueurs des différentes liaisons utilisées dans les data centers [69]

La popularité des DACs vient à la fois de leur prix et de leur très faible consommation électrique. Cependant, pour une plus grande portée, des technologies nécessitant des alignements au micron existent, mais sont plus onéreuses. Le coût important de ces liaisons est induit par la difficulté technologique de l'alignement actif des fibres monomodes sur les composants photoniques dans les connecteurs. La fabrication à grande échelle, réduisant les coûts, des transceivers et des fibres optiques monomodes tend à rendre les technologies photoniques de plus en plus communes. De plus, la concentration des data centers et le besoin incessant d'augmenter leurs performances pousse au développement de nouveaux sujets de recherche sur le déploiement de réseaux innovants. Repenser l'architecture classique des data centers est un de ces sujets. La désagrégation [70] consiste à repenser de façon globale la manière dont fonctionne les data centers pour créer des éléments modulaires et assemblables. Le développement des technologies de photonique avancée pourrait permettre de réexaminer la nature des cartes à circuits imprimés des data centers et d'augmenter leur efficacité et leur capacité de stockage. Pour cela il est nécessaire d'étudier la possibilité d'intégrer des composants photoniques bas coût, c'est-à-dire de concevoir des composants photoniques sans contrainte d'alignement et utilisant des matériaux peu onéreux.

III.3. Les différents formats de connecteurs

Les liaisons des data centers étant majoritairement bidirectionnelles, il est nécessaire d'utiliser des connecteurs entre celles-ci et les circuits imprimés contenus dans les baies. Les connecteurs peuvent différer à chaque extrémité des AOCs. Les connecteurs entre l'interface physique sur la machine et les câbles réseaux sont composés de transceivers. Transceiver est un terme anglo-saxon qui provient de la contraction de « TRANSmitter » et « recEIVER », dans cette thèse on préférera ce terme à « émetteurs récepteurs » en français.

Les SFP (Single Formfactore Pluggable), les SFP+ et les QSFP (Quad Small Formfactor Pluggable) sont les principaux connecteurs, utilisés pour connecter les liaisons haute vitesse aux serveurs. Ils permettent d'obtenir un débit de 1 à 5 Gbit/s et allant jusqu'à 10 Gbit/s pour les SFP et les SFP+. Les QSFP sont des interfaces à 4 canaux de 10 Gbit/s, ce qui donne un débit de 40 Gbit/s. Enfin il existe les CXPs (12 eXtended capability Pluggable) contenant 12 canaux et pouvant atteindre théoriquement un débit de 120 Bit/s [71]. Ces connecteurs sont récapitulés dans le Tab. 1.2.

Connecteurs	Nombre de canaux	Débit (Gbit/s)
SFP	1	1-5
SFP+	1	10
QSFP	4	40
CXP	12	120

Tab. 1.2 : Récapitulatif des différents types de connecteurs [71]

Le développement des transceivers à plus grand débit est une des clés pour l'amélioration des performances des data centers. La course au débit mène aujourd'hui à rechercher des solutions pour des transceivers à 400 GBit/s [72] bas coût, à basse consommation énergétique et compacts.

Un défi technique important réside dans le développement des transceivers monomodes, en effet leur fabrication est compliquée et nécessite du matériel de pointe, ce qui implique un coût particulièrement élevé. Les technologies de fabrication des fibres optiques multimodes et des connecteurs LC (Lucent Connector) pour les liaisons AOCs sont quant à elles, bien connues et maitrisées. Le coût de telles liaisons

est donc déjà au plus bas. On peut noter une différence importante de prix pour une liaison DAC de 3 mètres, une centaine d'euros, par rapport à une liaison AOC, avec une fibre optique monomode et un transceiver QSFP, de 10 kilomètres, qui coute entre 4 000 et 5 000 euros.

III.4. Télécommunications grâce à l'optique intégrée

L'avènement de la fibre optique et surtout du multiplexage en longueur d'onde a permis l'essor des télécommunications optiques ces dernières années. Celles-ci sont constituées d'une part des éléments d'émission et de réception de la lumière ainsi que de fibres optiques pour la transporter mais aussi d'autres éléments, notamment les composants permettant la mise en place de la WDM. En plus des éléments purement optiques ou optoélectroniques, les télécommunications par optique intégrée sont permises grâce à l'emploi d'éléments purement électroniques permettant de traiter, de moduler et ou d'amplifier les signaux émis et reçus.

III.4.1. Les fibres optiques en télécommunication

Les télécommunications à longue distance sont aujourd'hui permises par l'utilisation de fibres optiques. Un système de télécommunication basé sur l'utilisation de fibres optiques consiste en un laser, qui produit un signal optique modulé en fonction de l'information à transmettre, cette information étant un signal électrique appliqué à un modulateur optique. Le signal optique est envoyé dans une fibre optique, qui permet le guidage de l'information jusqu'à sa destination. Un photo-détecteur, placé au bout de la fibre optique permet de recevoir le signal lumineux et de le convertir en un signal électrique. Le signal électrique obtenu est identique au signal électrique de base. L'avantage de l'utilisation de la lumière comme moyen de transmission d'information est le fait que celle-ci a une fréquence très importante par rapport aux autres techniques de communication. Ceci induit une bande passante de communication très élevée, de plus, plus la bande passante d'un système de communication est importante, plus la capacité de transmission des données est élevée.

L'énergie lumineuse se propageant dans une fibre optique est constituée d'un éventail de longueurs d'ondes, ce qui induit une dispersion optique dans le milieu des différentes composantes fréquentielles de l'énergie se propageant. Cette dispersion optique correspond à la différence de vitesse de propagation des différentes composantes fréquentielles de l'énergie dans la fibre. Si l'énergie lumineuse transmise dans la fibre est porteuse d'une information, cette information va être déformée par la différence de vitesse des différentes composantes fréquentielles de l'énergie. Plus la distance à parcourir est importante et plus la déformation de l'information sera grande, de plus, plus l'étalement en longueur d'onde est importante et plus la dispersion sera grande. La dispersion dans les fibres optiques est responsable de la diminution de la bande passante de celle-ci, c'est à dire de sa capacité à transporter l'information [73]. L'effet de la dispersion dans une fibre optique sur une impulsion d'un signal optique est présenté Fig. 1.11. La modulation d'une source laser conduit à la formation d'un signal optique, contenant une information et peut être représentée comme un train d'impulsions. Initialement, le signal est un train d'impulsions claires et distinctes envoyé dans une fibre optique. Au cours de la propagation du signal dans celle-ci, la dispersion intervient et les impulsions s'élargissent. Au cours de la propagation dans la fibre, les impulsions sont tellement élargies qu'elles se confondent, la communication échoue.

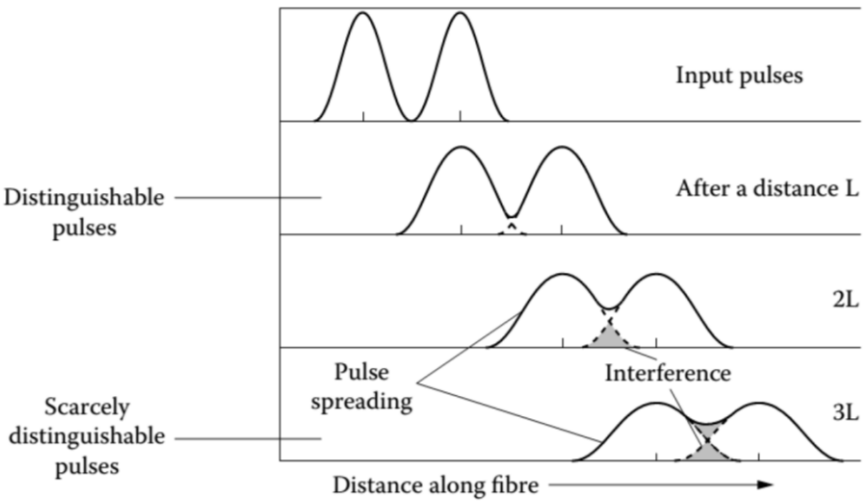


Fig. 1.11 : Effet de la dispersion dans une fibre optique sur une impulsion d'un signal optique [73]

Pour une certaine puissance de dispersion, l'élargissement des impulsions va augmenter linéairement avec la distance.

$$\frac{\Delta\tau}{L} = Constante \tag{1-1}$$

Où Δτ est l'élargissement d'une impulsion et *L* la longueur de la fibre optique. Le débit binaire de la fibre de longueur *L* peut être porté sur ~1/Δτ. En effet, l'espace entre deux impulsions, Δτ, va se resserrer avec la dispersion quand l'élargissement sera égal à Δτ.
Donc :

$$BL = Constante \tag{1-2}$$

B est le débit binaire admissible en impulsions par seconde.
La dispersion induit donc une limitation de bande passante en fonction de la distance de propagation. Plus la distance sera grande et plus la bande passante, qui peut être transmise dans la fibre optique, sera faible et vice versa.
Pour pallier le problème de dispersion optique en télécommunication, les sources lasers, ainsi que les longueurs d'ondes de transmission et les matériaux pour la fabrication des fibres optiques doivent être très soigneusement choisi. Plusieurs types de dispersions existent dans les guides optiques, dont font parties les fibres optiques : la dispersion modale, la dispersion des matériaux et la dispersion chromatique. Ici, il sera question de décrire plus précisément la dispersion modale qui joue un rôle très important dans le choix des fibres optiques pour les liaisons dans les data-centers. Quelques mots seront donnés pour expliquer succinctement la dispersion chromatique.

III.4.1.1 La dispersion modale

La dispersion modale résulte de la différence de vitesse des modes se propageant dans une fibre optique. Dès lors, la dispersion modale n'existe que dans les fibres optiques, ou les guides optiques multi-modes. La dispersion modale résulte directement de la structure de la fibre et de la façon dont l'énergie de propagation est distribuée au sein des différents modes. La dispersion modale peut varier en fonction des conditions locales de la fibre, notamment si il y a présence de courbures ou de joints. Il est possible de

calculer la différence de vitesse entre le mode le plus rapide et le mode le plus lent sur une certaine distance. En effet, le mode le plus rapide est celui qui voyage tout droit (en bleu sur la Fig. 1.12.a), sa vitesse sera c_0/n_1 avec n_1 l'indice de réfraction de milieu de propagation (n_2 étant l'indice de réfraction de la gaine du guide). Le mode le plus lent (en rouge sur la Fig. 1.12(a)) est celui qui va se réfléchir, avec un angle limite, à la frontière entre le cœur et la gaine du guide, sa vitesse est donc $(c_0/n_1)\sin\theta_c$ avec θ_c l'angle critique.
Comme :

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \tag{1-3}$$

On peut calculer les deux temps de propagation des deux modes dans la fibre (τ_f pour le mode le plus rapide et τ_s pour le mode le plus lent) :

$$\tau_f = L\frac{n_1}{c_0}\ ; \tau_s = \frac{Ln_1^2}{c_0 n_2} \tag{1-4}$$

Donc :

$$\Delta\tau = \frac{L}{c_0}\frac{n_1}{n_2}(n_1 - n_2) \tag{1-5}$$

Comme :

$$n_1 \sim n_2 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \sim 0.01\right) \tag{1-6}$$

Alors :

$$\Delta\tau = \frac{L}{c_0}\Delta n \tag{1-7}$$

Avec Δn est la différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine de la fibre. Il est alors possible de détermine BL :

$$BL = \frac{c_0}{\Delta n} \tag{1-8}$$

La dispersion modale est donc particulièrement importante pour des fibres multimodes sur des longues distances. Pour minimiser la dispersion modale, et donc maximiser la bande passante, dans les fibres multimodes, il faut diminuer le nombre de modes se propageant dans celles-ci. Les fibres monomodes, dont une illustration est donnée Fig. 1.12.c, sont donc logiquement les meilleurs supports pour transporter une information en télécommunications. Il est à noter qu'il est possible de réduire la dispersion modale dans les fibres multimodes, en utilisant des fibres à gradient d'indice, dont une illustration de la forme d'une impulsion d'entrée et de sortie est présentée Fig. 1.12.b.

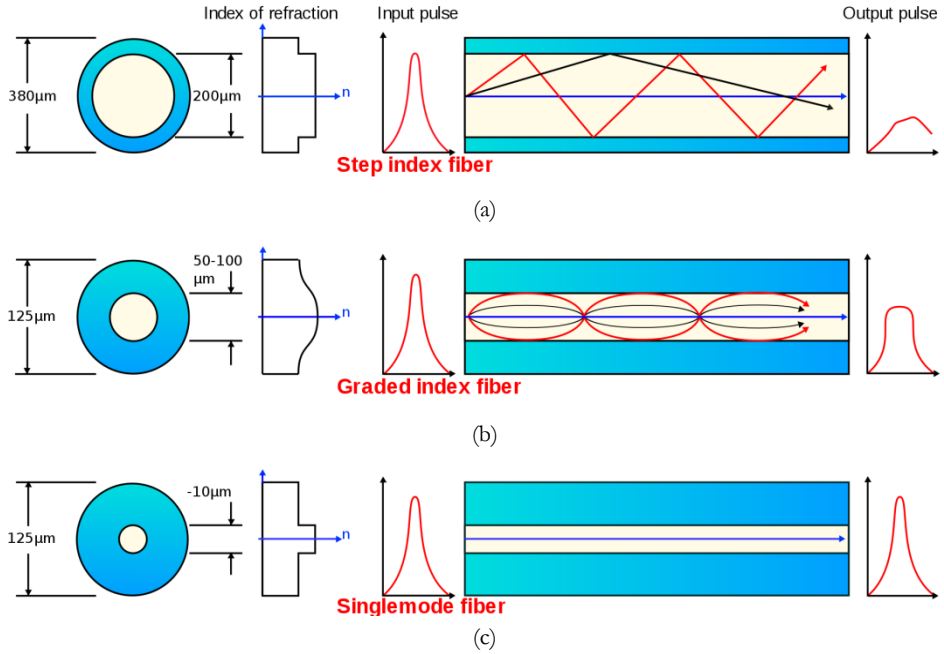


Fig. 1.12 : Illustration de la forme de l'impulsion d'entrée et de sortie pour différents types de fibres optiques : (a) fibre multimode, (b) fibre multimode à gradient d'indice et (c) fibre monomode [8]

III.4.1.2 La dispersion chromatique

La dispersion chromatique correspond, dans les guides d'ondes optiques et donc dans les fibres optiques, aux variations de temps de propagation des différentes longueurs d'onde se propageant dans le milieu. Les fibres optiques n'étant pas rigoureusement monochromatiques, les différentes longueurs d'ondes qui se propagent dans celles-ci 'voyagent' à des vitesses différentes. Cette dispersion entraine donc un élargissement des impulsions qui sont envoyées dans les fibres et qui peuvent se superposer. La superposition des longueurs d'ondes due à la dispersion chromatique entraine des interférences et rend le décodage de l'information impossible. Les fibres optiques utilisées aujourd'hui en télécommunications sont dépourvues de dispersion modale, puisque celles-ci sont monomodes, mais la dispersion chromatique et l'atténuation des fibres sont des facteurs limitant la bande passante. De plus, les signaux multiplexés dans une même fibre ne se propagent pas non plus à la même vitesse, à cause de la dispersion chromatique, leur réception est donc décalée. Dans les fibres optiques monomodes, la dispersion chromatique est pratiquement nulle à la longueur d'onde de 1.3 µm et l'atténuation est de zéro aux alentours de 1.55 µm. C'est pour cela que cette plage de longueurs d'onde est particulièrement utilisée pour les télécoms.

III.4.2. Le multiplexage en longueur d'onde

Afin d'augmenter les débits de communication, il est possible d'utiliser le multiplexage de longueur d'onde (WDM, Wavelength Division Multiplexing). Cette technique, présentée Fig. 1.13, consiste à utiliser toute la largeur de la bande passante de la fibre optique pour transmettre le maximum de données. Le multiplexage en longueur d'onde consiste à cumuler plusieurs canaux, de longueurs d'onde différentes, à l'entrée d'une fibre optique et de les diviser, les dé-multiplexer à la sortie de celle-ci.
Pour multiplexer des sources optiques entre elles, il faut d'abord modifier les longueurs d'onde des sources à l'aide de transceivers. Les flux d'informations sont codés par modulation de phase ou d'amplitude. On peut noter que, de façon générale, les équipements servant au démultiplexage des sources optiques sont

des éléments d'optique passifs, comme des réseaux de diffraction et fonctionnent comme des filtres de longueurs d'onde.

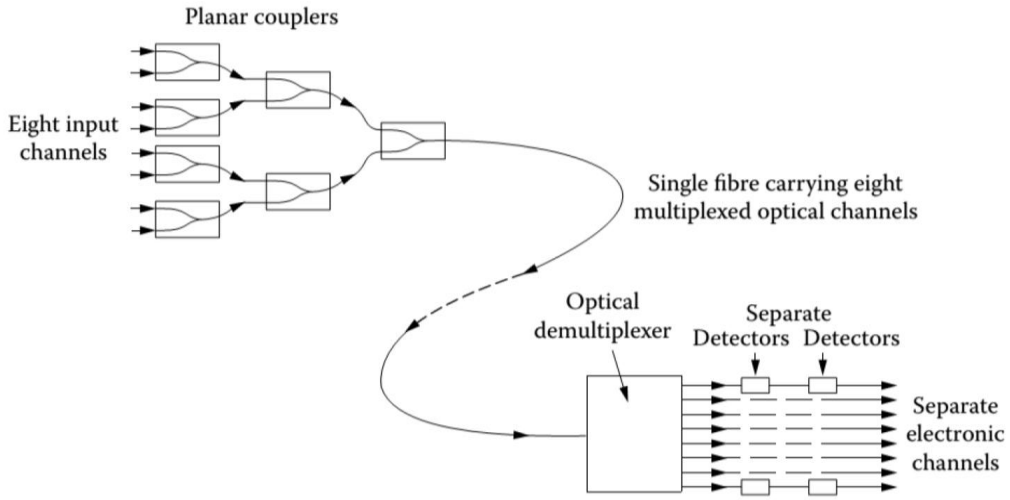


Fig. 1.13 : Technique de fonctionnement du multiplexage et du démultiplexage en longueur d'onde [73]

Il existe le Coarse WDM (CWDM) pour la transmission de données sur des courtes distances. Le CWDM permet d'obtenir 18 canaux de 20 nm de largeur, ce qui permet une dérive des longueurs d'onde et diminue les contraintes liées à son installation, tout en étant peu couteuse.
On peut aussi utiliser le Dense WDM (DWDM), où l'espacement des nombreux canaux (160 canaux) est restreint (0.1 nm). On utilise surtout le DWDM pour les liaisons particulièrement longues, comme les liaisons transocéaniques. Le DWDM est plus coûteux à mettre en place que le CWDM, en effet cette technique nécessite l'utilisation de sources lasers particulièrement stables permettant d'être utilisées à des longueurs d'onde spectralement fines.
L'Array Waveguide Grating (AWG) est un composant de photonique qui est largement utilisé dans les systèmes de multiplexage en longueurs d'onde. Ces systèmes sont particulièrement intéressants. En effet, ils sont capables de multiplexer de nombreuses longueurs d'onde, tout en augmentant la capacité de transmission des réseaux optiques.
Ce composant fonctionne à l'aide des interférences des ondes lumineuses de longueurs d'onde différentes. Les AWGs permettent de multiplexer des canaux de plusieurs longueurs d'onde dans une unique fibre optique à la sortie du dispositif. Ils peuvent aussi servir à démultiplexer les longueurs d'onde pour retrouver, à la sortie du réseau de communication, des canaux d'une longueur d'onde unique. La Fig. 1.14 présente le principe de fonctionnement des AWGs.

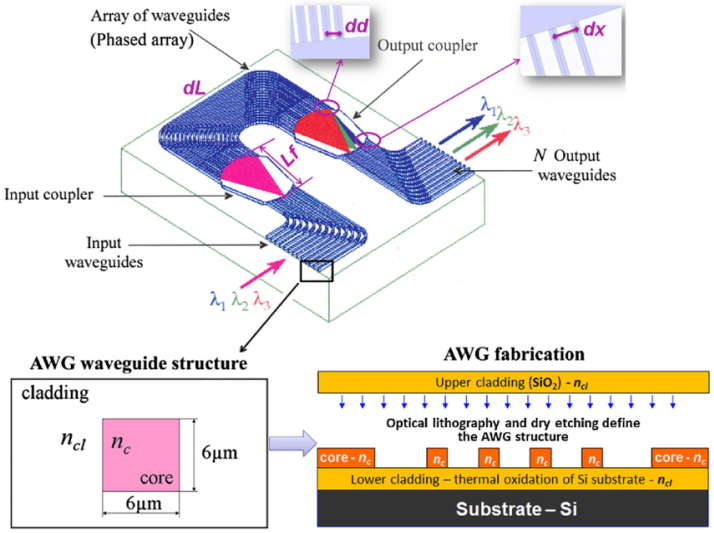


Fig. 1.14 : principe de fonctionnement des AWGs [74]

Les AWGs conventionnels en silicium sont des circuits photoniques fabriqués par dépôt de couches de silice dopées ou non sur un substrat de silicium. Les AWGs sont composés de plusieurs parties : des entrées optiques et des sorties, une zone de propagation en espace libre et un 'grating waveguides'. Le 'grating waveguides' est constitué de nombreux guides optiques espacés d'une longueur qui s'incrémente. Un signal optique est injecté dans le dispositif à l'aide d'une fibre optique. Ce signal est difracté dans le coupleur d'entrée. Après son passage dans la zone d'espace libre, la lumière illumine, avec une distribution Gaussienne le 'grating waveguides'. Chaque longueur d'onde de la lumière couplée dans le 'grating waveguides' est soumis à un changement de phase, due à l'incrémentation de la longueur entre les guides optiques. A la sortie du dispositif les longueurs d'onde sont séparées dans plusieurs guides optiques.

III.4.3. Les Circuits Intégrés Photoniques

C'est Miller [75] qui en 1969 pose les bases de l'optique intégrée en faisant le postulat d'utiliser les briques technologiques développées pour la microélectronique afin de concevoir à grande échelle des circuits intégrés photoniques (PIC).

Ces dernières années, nous avons assisté au développement de la photonique intégrée sur silicium, qui consiste à l'intégration des fonctions photoniques aux circuits électroniques. Cette technologie permet de développer des applications de communication et de calcul à très grande vitesse, notamment pour les incorporer dans les data centers. La Fig. 1.15 présente un schéma de l'intérieur d'un transceiver électro optique (One Chip) que l'on peut retrouver dans un data center. Le transceiver est composé d'un PCB sur lequel plusieurs dispositifs sont présents, comme un contrôleur et une diode laser. Ce qui nous intéresse est la présence d'un BOSA (Bidirectional Optical SubAssembly), sur lequel sont assemblés une fibre optique monomode et un PIC.

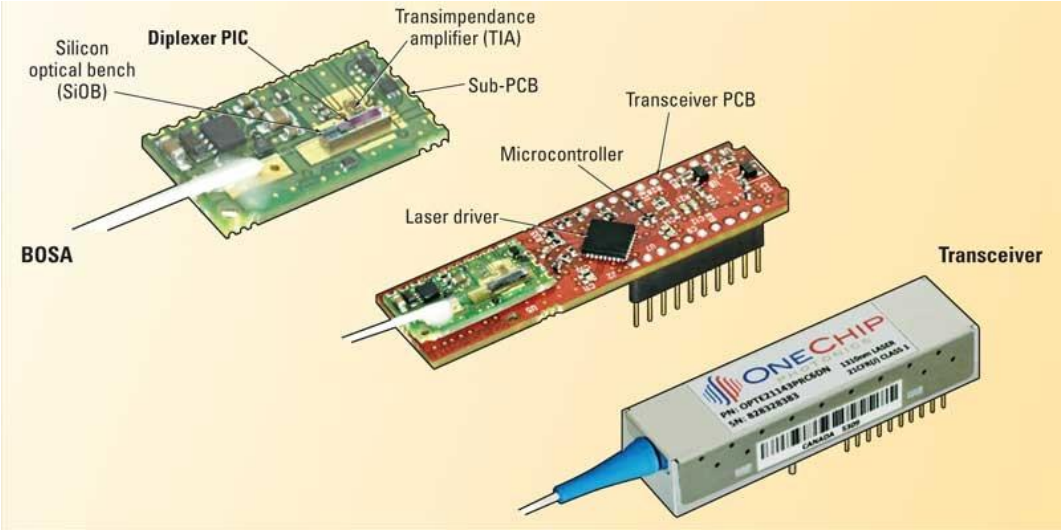


Fig. 1.15 : Structure physique d'un transceiver électro optique (One Chip) avec sa PIC sur le BOSA [76]

L'idée est d'utiliser les techniques de fabrication de la microélectronique classique pour créer des composants de photonique intégrée. Les PIC, comme les EIC suivent donc un développement parallèle pour augmenter la densité d'intégration et améliorer la modularité des composants.

Depuis l'avènement des data-centers, le déploiement des réseaux fibrés jusqu'à l'habitat et des HPC (High Performance Computing) la taille du marché a permis le développement des PICs (Photonic Integrate Circuit). Stewart E. Miller a inventé le concept d'optique intégrée dans [75], mais ce sont ces dernières années que les technologies PIC ont connu un réel engouement et un développement en forte croissance. En effet, suivant la loi de Moore en photonique, les puces sont de plus en plus petites et de plus en plus performantes. On peut citer différentes fonctions permises par les PICs : l'émission, à l'aide de lasers accordables, la réception avec des photodiodes (PD), mais aussi la modulation de signaux (QPSK, Quadruple Phase Shift Keying), le multiplexage [77] etc.

Le développement des PICs, qui sont des éléments clés pour l'utilisation des AOCs dans les data-centers, laisse entrevoir une solution tout optique pour palier au problème de la densification, en réduisant les surfaces, à la surconsommation électrique mais aussi à l'allongement des liaisons et à la baisse des coûts. En effet, en réponse aux besoins en bande passante et en puissance dans les réseaux, l'industrie des télécoms développe des technologies en fibres optique de haute capacité et en multiplexage de longueurs d'onde basées sur des lasers fonctionnant à 1550 nm [78]. Les AOCs qui utilisent des VCSELs apparaissent au sein des centres de données et des supercalculateurs. Néanmoins pour permettre le développement des connecteurs bas coût à de hautes bandes passantes, des plus hauts niveaux d'intégration sont nécessaires. Pour cela, de grands progrès ont été faits dans le domaine de la photonique sur silicium pour des applications d'interconnexion de façon complémentaire aux technologies de fabrication des semi-conducteurs CMOS [79].

Les composants photoniques issus de technologie VLSI (Very Large Scale Integrated) ont la capacité de réduire le temps de latence, le prix et la consommation électrique des liaisons dans les architectures réseaux d'interconnexions que ne possèdent pas les liaisons électriques seules. En effet, les liaisons optiques permettent des installations de câblage plus simple en diminuant l'importance de l'optimisation de la longueur de connexion [80]. En exemple, 'HyperX' est un réseau d'architecture évolutif qui utilise des composants photoniques, permettant l'utilisation de mise en boîtier bas coût, et qui permet une balance entre la consommation électrique, les performances et la complexité de câblage dans des data centers [81].

Les transceivers silicium permettent la transmission d'information sur plusieurs canaux. De façon générale, dans les transceivers photoniques silicium, une onde laser continue est modulée par un modulateur silicium externe. Il existe deux façons principales de moduler le signal laser : l'utilisation d'un interféromètre Mach-Zehnder (MZI) et les modulateurs à anneaux résonants.
Les MZIs sont les modulateurs les plus simples et les plus robustes et sont les plus utilisés dans les produits de photoniques sur silicium mais sont relativement larges et ont une consommation électrique importante [82]. Les modulateurs à anneaux résonnants possèdent des avantages comparés aux MZIs : une taille moins importante, une faible consommation électrique et la possibilité d'être utilisés pour le multiplexage de longueurs d'onde [83]. Néanmoins, en plus de leurs problèmes de robustesse, de fiabilité et de leur sensibilité à la chaleur [84], il est nécessaire de trouver des solutions aux problèmes de mise en boîtier de ces composants, notamment sur la fabrication des Through Silicon Vias [85], pour permettre leur mise sur le marché.

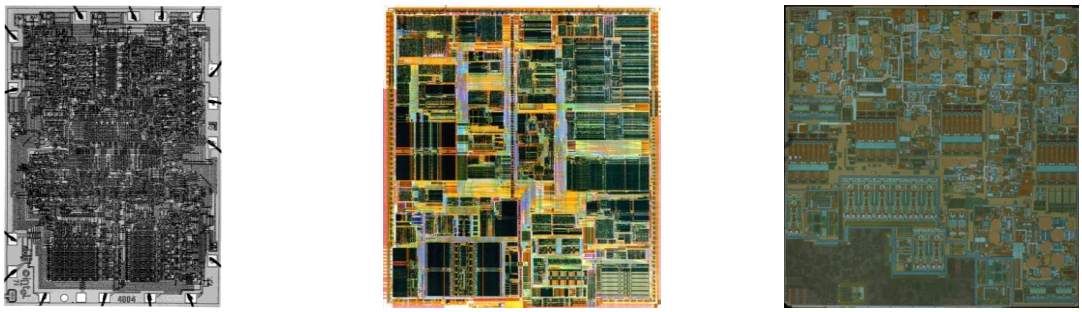
IV. La loi de Moore et le packaging microélectronique

Le packaging microélectronique est le lien entre les ICs et le système électronique. Il permet d'incorporer les différentes fonctions et technologies pour faire fonctionner le système dans son ensemble [86]. Le packaging microélectronique permet d'interconnecter des puces semi-conductrices avec l'environnement extérieur, comme des circuits intégrés, à l'aide de pins. La mise en boîtier est aussi l'occasion de protéger les puces, que ça soit contre les impacts mécaniques, la corrosion chimique ou encore de la lumière extérieure. Les boîtiers en microélectronique ont aussi une fonction de dissipation de la chaleur qui est produite par les systèmes.
Pour bien comprendre l'évolution du packaging en microélectronique, il est important de redéfinir le contexte du développement de l'industrie des semi-conducteurs. Celle-ci est en perpétuelle mutation afin de pallier aux limites de plus en plus importantes qu'elle doit affronter, que ce soit en termes de bande passante ou d'encombrement. D'abord obéissant à la loi de Moore, l'industrie de la microélectronique doit maintenant remédier à la fin de la réduction de la taille du transistor pour continuer le développement des systèmes électroniques. De plus, l'utilisation intense du Cloud, des applications pour smartphones, le stockage de masse et l'Internet des Objets, induisent le déploiement des connexions optiques très haut débit dans les data centers. Cette évolution technologique induisant l'augmentation de la quantité de données à traiter impose de nouvelles contraintes à la fabrication des transceivers électro-optique. En effet, La 'Royal Society' prévoit dans son rapport de février 2016 [87] que la demande en termes de débit de données va surpasser l'offre en 2023. Ce phénomène est la saturation du réseau Internet, qui est appelé 'Capacity Crunch'. Pour pallier cela des nouvelles techniques de packaging sont mises en place, tel que l'intégration 3D ou encore l'essor des interposeurs verre.

IV.1. Moore

C'est en 1947 qu'a été inventé le transistor [88] : un composant semi-conducteur, généralement à trois électrodes, qui permet de contrôler un courant et générer un gain en tension ou courant sur son terminal de sortie. Ce composant électronique, allié aux circuits intégrés et aux circuits imprimés (PCBs, Printed Circuit Bord), est fondamental pour le fonctionnement de tous les systèmes électroniques utilisés aujourd'hui. En 1971, Intel fabrique le premier microprocesseur de l'histoire : le microprocesseur Intel 4004. Celui-ci était composé de 2 300 transistors et il mesurait 10 mm (Fig. 1.16.a), ce qui permettait à

l'ordinateur qui le possédait d'opérer 90 000 opérations par seconde. A cette époque Gordon E. Moore émet une prédiction sur l'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs.



(a) (b) (c)

Fig. 1.16 : (a) Photographie du premier processeur en 1971, le Intel 4004, avec 2300 transistors, (b) photographie du Intel Pentium IV, de 2001 avec 40 millions de transistors et (c) photographie du Qualcomm Snapdragon 835, de 2016 avec 3 milliards de transistors

Cette prédiction deviendra 'la loi de Moore', qui énonce, en 1965, que le nombre de transistors sur une puce de silicium double tous les deux ans [89]. La Fig. 1.17 présente une représentation graphique de l'augmentation du nombre de transistors par puce de 1971 à 2016. Sur le graphique, on observe aussi, pour la même période, l'évolution de la vitesse d'horloge des transistors. Aujourd'hui, un processeur d'ordinateur haut de gamme, intègre plus d'un milliard de transistors. La loi de Moore est particulièrement bien illustrée par les nouveaux System On Chip (SoC), qui sont composés de milliards de transistors par puce et qui permettent l'utilisation d'objets connectés divers, fonctionnant à travers le Cloud et Internet.

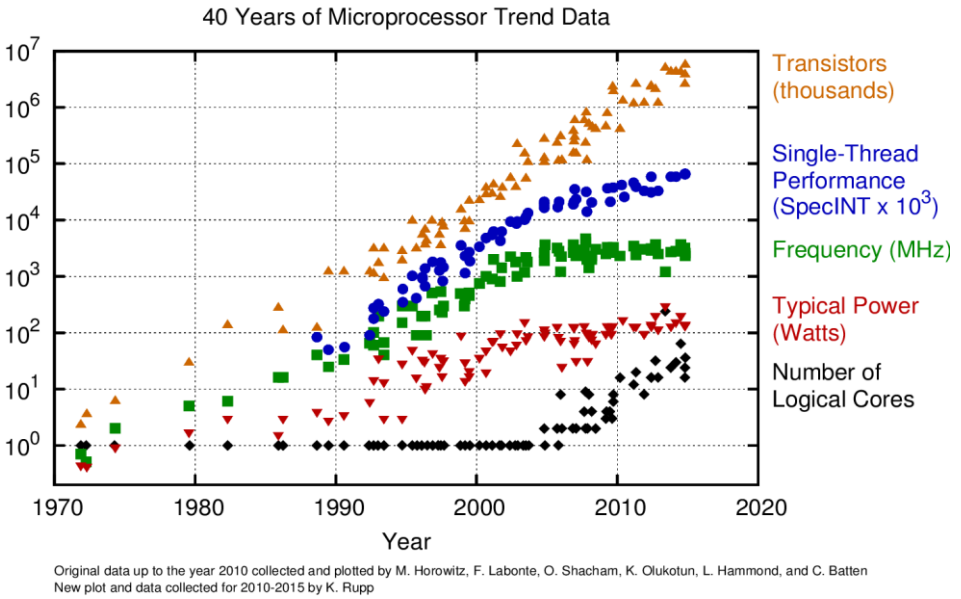


Fig. 1.17 : Représentation graphique de la loi de Moore : (i) évolution du nombre de transistor par microprocesseur (courbe orange) (ii) évolution des performances d'un single-thread (courbe bleue) (iii) évolution de la fréquence des microprocesseurs (courbe verte) (iv) évolution de la puissance des transistors (courbe rouge) (v) évolution de nombre de cœur des micro-processeurs (courbe noire)

L'accroissement du nombre de transistors dans les microprocesseurs a permis une explosion de la puissance de calcul des ordinateurs. Néanmoins, l'augmentation du nombre de composants impose une diminution de la taille de ceux-ci. De nombreux composants et systèmes ont été inventés, le nombre de

niveaux d'interconnexions a augmenté et des techniques de fabrication ont été développées pour poursuivre l'amélioration des systèmes microélectroniques.
La volonté de persister dans la diminution de la taille des composants, le 'More Moore' (MM) fait que la finesse actuelle de la gravure des transistors est de 10 à 7 nm. Ceci induit une augmentation de la température des puces et rend leur fabrication coûteuse, notamment à cause de l'utilisation de nombreuses étapes de masquage. La réduction de taille des transistors est donc de moins en moins rentable. De plus, il semble difficile de descendre en dessous de 5 nm, qui plus est, à partir de 2 nm le transistor ne respectera plus les règles classiques de la physique mais sera plutôt régi par la physique quantique. En effet, à partir de ces dimensions, l'électron est capable de franchir une barrière de potentiel par effet tunnel. La grille du transistor ne pourrait plus contrôler la circulation des électrons de la source vers le drain. L'année 2016 a donc signée la fin de la 'loi de Moore' [44] et de nouveaux défis technologiques sont à relever afin de permettre le maintien de la révolution numérique en cours depuis plus de 40 ans. Toutes ces difficultés conduisent l'industrie de la microélectronique à se tourner vers un nouveau champ de développement, où la miniaturisation des composants et l'amélioration des performances laissent la place au développement de nouvelles fonctionnalités sur la même puce, le 'More-Than-Moore' (MtM) [90][91].
Le nouveau développement technologique de l'industrie microélectronique s'articule autour de trois axes [92] :

i) Les solutions d'intégration silicium : l'intégration de nouveaux dispositifs sur une puce silicium, en développant les technologies de fabrication des puces sur silicium permettant la diversification des fonctions des puces.
ii) Les solutions de packaging : l'intégration de composants dans un même boîtier, ce qui nécessite le déploiement de solutions pour la fabrication de packaging innovants.
iii) Les solutions System-in-Package (présenté en section V) : l'intégration hétérogène, de plusieurs puces les unes sur les autres ou les unes à côté des autres dans un boîtier unique. Ces solutions sont la combinaison des deux précédentes et nécessitent à la fois le développement de solutions durant la fabrication des puces mais aussi l'amélioration des architectures de mise en boîtier.

IV.2. More-Than-Moore

Avant 2016, l'industrie de la microélectronique a poussé la puissance de calcul des micro-processeurs en augmentant toujours le nombre de transistors par puce ce qui permettait le développement de logiciels toujours plus puissants. La fin de la loi de Moore, en 2016 [44], signe le début d'une nouvelle progression pour l'industrie des semi-conducteurs. C'est la naissance du paradigme 'More-Than-Moore'. L'un des vecteurs essentiels du MtM est d'augmenter le nombre de niveaux d'intégration des systèmes en exploitant le packaging microélectronique pour intégrer de multiples puces de nature homogène ou hétérogène dans un seul boîtier.
De nombreux exemples de systèmes faisant appel à la co-intégration hétérogène afin de répondre à des besoins existent. Ces systèmes, pouvant comprendre des NEMS, des MEMS (Nano ou Micro ElectroMechanical SystemS) des composants de puissance, différents capteurs, ou encore des composants RF (Radio Fréquence), permettent une large diversification de fonctionnalités au sein du même système.
La Fig. 1.18, illustre et formalise les développements parallèles de l'ITRS [61]. La stratégie est de combiner à la fois les avantages du 'More Moore', c'est-à-dire continuer dans la miniaturisation des transistors CMOS et les avantages du 'More-Than-Moore', la diversification des fonctions au sein du même système.

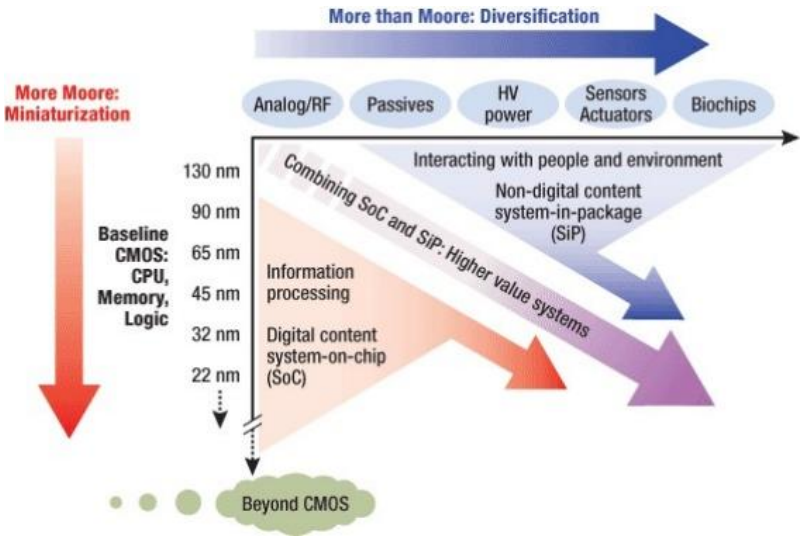


Fig. 1.18 : Graphique montrant l'évolution en parallèle du 'More Moore' et le 'More-Than-Moore' [61]

En d'autres termes, l'important avec les technologies MtM est d'améliorer l'intégration au niveau du système pour associer des puces de nature et de fonction différentes dans un unique boîtier, cela en exploitant les technologies du packaging microélectronique.

IV.3. Différents types d'architectures pour le packaging micro-électronique

Depuis déjà plusieurs années, de nouveaux systèmes convergents qui additionnent des fonctions hétérogènes tel que calcul, communication, capteur électronique de puissance, photonique, etc. émergent et se développent. L'intégration hétérogène de technologies très diversifiées se manifeste notamment dans les objets connectés et autres smartphones, qui permettent avec un unique produit de communiquer (voix et vidéo), de se localiser (GPS) et parfois de contrôler sa santé grâce à différents capteurs. Dans les années 1990 (Fig. 1.19), le packaging microélectronique assurait essentiellement une fonction de protection, de dissipation thermique et d'interconnexion de composants actifs ou passifs. Le développement des systèmes convergents pousse l'industrie microélectronique à améliorer le packaging de ces systèmes.

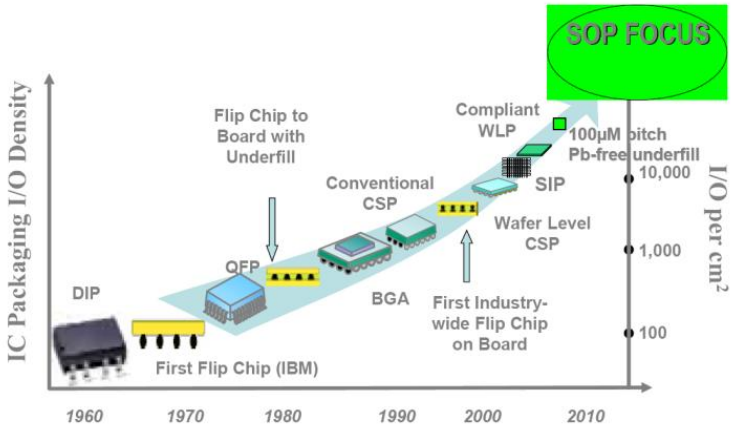


Fig. 1.19 : Évolution des tendances du packaging microélectronique [93]

La Fig. 1.20 présente les prévisions de Yole Développement, du marché pour les packagings avancés entre 2017 et 2023. Celui-ci représenterait 39 milliards de dollar (US) en 2023 [94], c'est-à-dire une hausse de

CAGR de 7 % dans la période considérée, avec, comme premier secteur d'activité, l'électronique portable pour les smartphones et les tablettes.

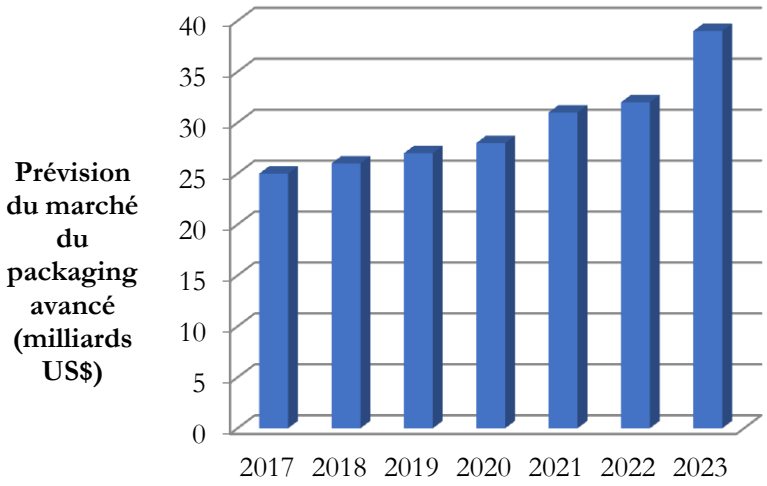


Fig. 1.20 : Évolution du marché des packagings avancés de 2017 à 2023 [94]

La Fig. 1.19, décrit l'évolution des différents types de boîtiers utilisés en microélectronique depuis les années 1960. Depuis les années 2000, l'évolution du packaging en microélectronique est conduite par la volonté d'obtenir des systèmes compacts et performants, pour satisfaire la demande pour les objets connectés, sans fil et portables tels que les smartphones et les tablettes. Un exemple de réalisation est le développement des technologies WLP (Wafer Level Packaging), comme le CSP (Chip Scale Package), pour l'amélioration des interconnexions, permises par l'essor de la technologie flip-chip. Sur la Fig. 1.19, une technologie émergente qui sera décrite en section V est représentée : les SIP (System-In-Package).
La Fig. 1.21 résume les différents types d'architectures de packaging en microélectronique (SOC, MCM, SIP et SOP).

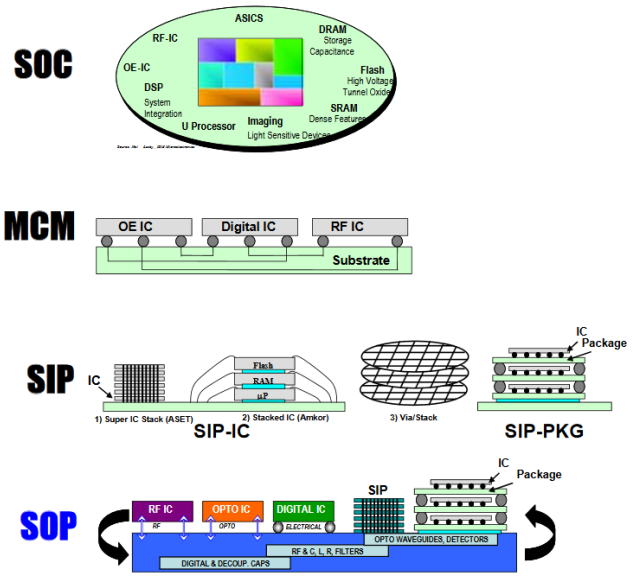


Fig. 1.21 : Synthèse des différents types d'architectures utilisés en packaging microélectronique : i) SOC basé sur l'utilisation d'une unique puce ii) MCM basé sur l'interconnexion de différents modules iii) SIP basé sur l'empilement de puce ou de packaging pour améliorer l'encombrement des package iv) SOP basé sur l'optimisation des interconnexions entre les packaging et les puces tout en miniaturisant les systèmes [93]

La demande du grand public pour des systèmes électroniques plus puissants, moins encombrants, avec une faible consommation et une multiplication du nombre de fonctionnalités pousse l'industrie de la microélectronique à développer des systèmes avec des spécifications avancées et diversifiées en diminuant le temps et le coût de fabrication. Pour y parvenir plusieurs architectures planaires existent. Il est possible de regrouper sur une même puce des fonctions différentes à l'aide de procédés compatibles, c'est le System-On-Chip (SOC). Les SoC sont des circuits intégrés qui associent tous les composants d'un système électronique. Généralement, ce type d'architecture contient une unité de calcul (CPU, Central Processing Unit), de la mémoire, du stockage et des ports d'entrée et de sortie.
Les SOCs sont constitués d'une partie active, le bloc silicium Front End-Of-Line (FEOL) comprenant les dispositifs intégrables tels que transistors, diodes, capacités, résistances. La partie passive des SOC, le bloc Back End-Of-Line (BEOL) comprend le réseau d'interconnexion permettant de relier le SOC à l'environnement extérieur par câblage. Les interconnexions du BEOL sont constituées de plusieurs niveaux, fabriqués dans le support diélectrique qui permet la bonne isolation électrique et la tenue mécanique du système. Les niveaux d'interconnexion sont des lignes métalliques reliées électriquement les unes aux autres par des vias traversant le diélectrique. La Fig. 1.22 présente la schématisation des liens entre BEOL et FEOL.

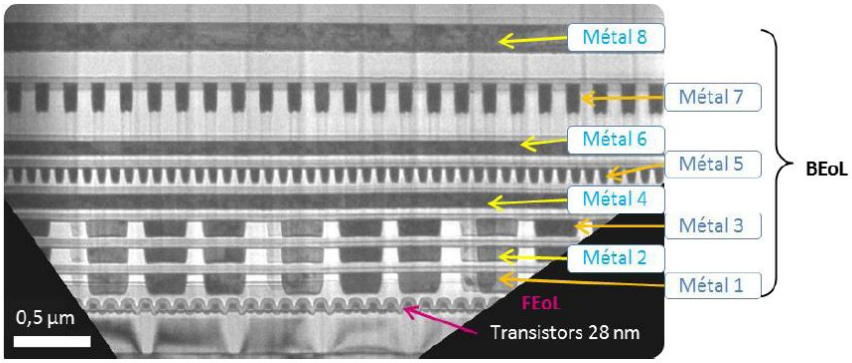


Fig. 1.22 : Schématisation des liens entre BEOL et FEOL [95]

L'utilisation des System-On-Chip permet d'intégrer différentes fonctions sur la même plateforme silicium de façon horizontale. L'intérêt est de pouvoir obtenir un composant unique comportant de multiple fonctions telles que le calcul, la communication, l'intégration de micro processeurs, d'interrupteurs, de guides, de filtres, d'antennes et de mémoire, ou d'intégrer des capteurs. Les SOCs peuvent être particulièrement compacts et légers et être produits en masse. Une des limitations principales des SOCs est que, pour pouvoir obtenir toutes ces fonctions sur une unique puce, le temps de design est particulièrement long et la fabrication de système est considérablement onéreuse, notamment en ce qui concerne l'intégration des divers circuits actifs tels que les transistors CMOS, SiGe ou encore les OEIC (OptoElectronic Integrated Circuit) qui nécessite différents voltages et l'utilisation de plusieurs niveaux de masque à la fabrication. L'intégration de systèmes complexes sur une plateforme silicium nécessite beaucoup de tests couteux et complexes. De plus, les différentes couches sont parfois incompatibles en termes d'optimisation des procédés.
Les avantages de cette architecture sont la diminution de l'encombrement et sa faible consommation énergétique [96]. Un exemple populaire de cette architecture est le Raspberry Pi, illustré Fig. 1.23, un microordinateur contenu sur un circuit intégré. Néanmoins, le fait d'intégrer des fonctions différentes sur la même puce est très complexe et nécessite un savoir-faire avancé qui rend cette technologie très

onéreuse pour une grande production [97]. Il est aussi à noter que quand une fonction est endommagée, toute la carte est à remplacer.

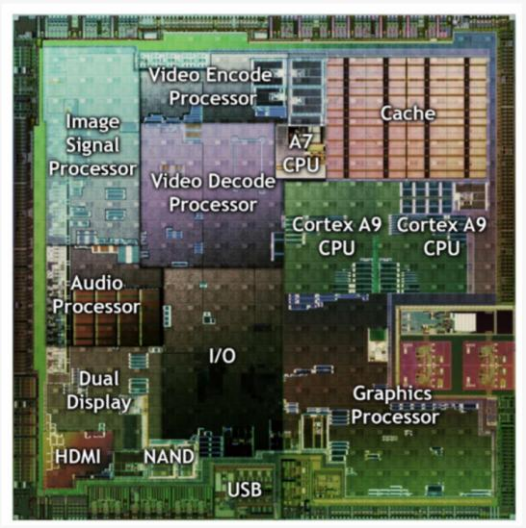


Fig. 1.23 : Illustration d'un SOC [98]

V. L'intégration System-in-Package

Dans la littérature, les SiPs sont définis comme l'intégration 2.5D et 3D. Ces technologies sont la combinaison du développement technique des puces sur silicium et de l'amélioration des processus de fabrication du packaging. L'intégration 2.5D et 3D se base sur l'augmentation de la densité de fonction au sein d'un même boîtier et sur la diminution du coût des fonctions et du packaging. Pour développer l'intégration 2.5D et 3D, de nombreux travaux sont nécessaires afin de développer les briques technologiques manquantes pour le déploiement de ces technologies. De plus l'intégration SiP requiert le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles architectures de puces.

On peut différencier l'intégration 2.5D et l'intégration 3D par le fait que la première est l'association de plusieurs puces, les unes à côtés des autres dans un même boîtier. La seconde utilise des briques technologiques comme la fabrication de TSV (Through Silicon Vias) pour intégrer plusieurs puces, les unes sur les autres dans le boîtier.

Intégrer des puces les unes à côtés des autres dans un unique packaging permet de diminuer la taille des interconnexions entre les composants, diminuer leur nombre et améliore le facteur de forme finale. Ce qui revient à améliorer les performances et diminuer la consommation électrique des systèmes, tout en diminuant les coûts de fabrication. Il est aussi à noter que la multiplication des puces les unes à côtés des autres peut permettre une multiplication des fonctions du système et donc l'améliorer en permettant des applications diverses et variées, entre autres l'addition de mémoire au microprocesseur [99]. Dans les années 60, des modules hybrides intégraient déjà plusieurs puces et des fonctions passives, le plus souvent sur des substrats en céramique. Dans les années 80 et 90, les Multi-Chip-Modules [100] (MCM) ont été développés. Ce sont des modules où, chaque fonction est fabriquée séparément puis regroupée au sein du même boîtier. Des composants aux fonctions hétérogènes, avec des procédés de fabrication complètement différents peuvent être assemblés sur un même substrat puis interconnectés par différents moyens techniques. Ces exemples montrent que l'idée de l'intégration de plusieurs puces dans un même boîtier n'est pas récente. La différence avec l'approche SiP réside dans le fait qu'en intégration 2.5D et 3D,

les boîtiers obtenus ont une densité d'interconnexion particulièrement importante, permettant la mise en parallèle de différentes couches métallisées, ce qui simplifie le design.

V.1. L'intégration 2.5D

La Fig. 1.24 illustre le concept d'intégration SiP 2.5D comportant deux puces sur un interposeur de silicium. Un interposeur est un substrat passif permettant les interconnexions électriques et/ou optiques entre les puces. Une description plus complète de ces dispositifs sera faite en section V.4. La Fig. 1.24 montre la présence de microbilles de soudure (microbumps, uBumps) qui réalisent la connexion électrique entre le substrat et l'interposeur.

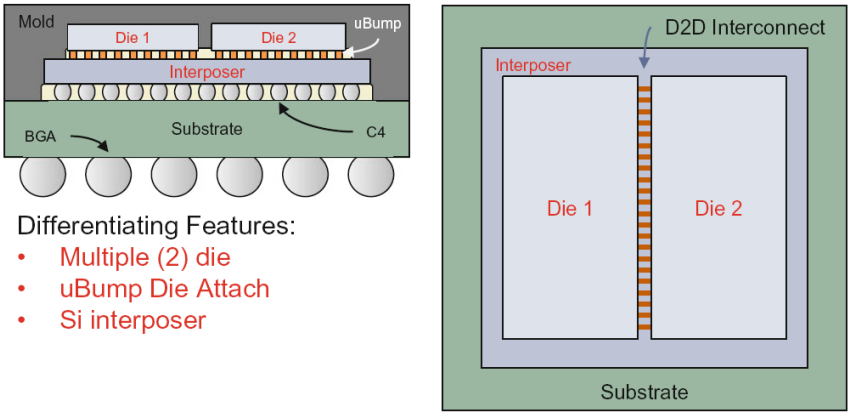


Fig. 1.24 : Schéma de l'intégration 2.5D avec une vue sur le côté et une vue sur le dessus d'un SiP composé de deux puces sur un interposeur Si [99]

Cette stratégie de mise en boîtier comporte plusieurs avantages par rapport aux circuits imprimés sur lesquels sont reportés plusieurs circuits intégrés. En effet, au niveau du système, les performances sont meilleures, de par le fait que les puces sont rapprochées et donc les interconnexions plus courtes ce qui induit moins de puissance consommée. De plus, le facteur de forme est amélioré car des strates de mise en boîtier peuvent être éliminées ainsi que leurs interconnexions avec le PCB.
Au niveau du composant, l'utilisation de puces multiples permet une optimisation de fabrication de chacune d'entre elles, ce qui permet aussi une meilleure adaptabilité et une meilleure modularité. Le coût d'un SiP 2.5D possédant les mêmes fonctions complexes, pour une même application, est donc moins coûteux qu'un SoC.

L'intégration 2.5D est utilisée pour les calculateurs hautes performances, pour assembler les mémoires HBM (High Bandwidth Memory) et les processeurs sur des interposeurs Si, par exemple dans certains produits Radeon [101]. D'autres industriels utilisent et commercialisent aussi des boîtiers utilisant l'intégration 2.5D, comme dans des applications réseaux ou graphiques [102]. Ce type d'assemblage leur permet d'obtenir de très bonnes performances en fonction des applications souhaitées pour des coûts intéressants.

V.2. L'intégration 3D

L'intégration en trois dimensions est une technologie particulièrement intéressante. En effet, elle permet l'intégration de nombreuses puces en réduisant la taille des interconnexions électriques. Cette

technique de mise en boîtier permet d'obtenir un grand nombre d'interfaces parallèles, d'excellente performance, un facteur de forme très intéressant et peu de puissance consommée. Le facteur de forme est défini comme le volume occupé par les puces sur le PCB. Avec l'intégration 3D, les puces sont superposées les unes sur les autres, le facteur de forme est donc amélioré. L'intégration 3D est directement liée à la possibilité de développer une grande densité de TSV dans les puces à packager. Un exemple de mise en boîtier utilisant l'intégration 3D est présenté Fig. 1.25. Deux puces sont superposées, la 'die 1' comporte des TSVs afin que la 'die 2' puisse être interconnectée électriquement avec le substrat. Les contacts électriques entre les deux puces sont assurés par des piliers métalliques tier-to-tier (T2T) uBumps.

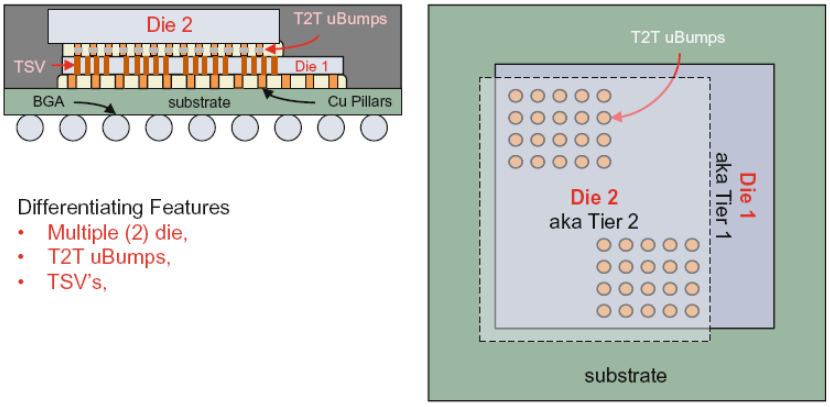
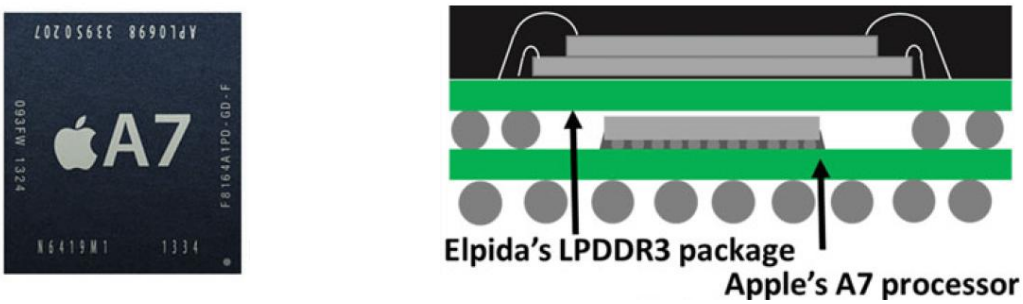


Fig. 1.25 : Schéma de l'intégration 3D avec une vue sur le côté et une vue sur le dessus d'un SiP composé de deux puces [99]

Plusieurs types de SiP 3D existent, par exemple, les mémoires PoP qui sont constitués d'un boîtier de mémoire placé sur le dessus d'un boîtier logique, on retrouve notamment ce type de SiP dans les smartphones. Il est possible d'utiliser l'intégration 3D pour assembler des systèmes composés de barre de mémoire ou des puces mises en boîtier sur des packagings logiques, reliées électriquement par des fils métalliques, réalisés par 'bonding' [103][104][105] ou par FOWLP (Fan Out Wafer Level Packaging) [106][107][108]. L'utilisation de cette technologie permet aussi d'intégrer des puces analogiques sur d'autres types de composants. Par exemple l'IPhone 5S, commercialisé en 2013, contient une mise en boîtier de mémoire Elpida, reliée par 'wire bondig' à la puce Apple A7. Un schéma de système PoP est présenté Fig. 1.26, ce système permet notamment d'améliorer le facteur de forme et les performances du système [109].



(a) (b)

Fig. 1.26 : (a) Vue sur le dessus du packaging PoP Apple A7 et (b) schéma de la section de coupe de cette mise en boîtier [109]

Différents types d'intégration 3D sont donc possibles telles que l'intégration 3D SiP homogène qui permet d'intégrer par superposition des puces de nature identique et permet d'améliorer la densité de bits. On peut citer les SiP Memory on Memory (MoM), pour l'implémentation de mémoires [110] qui sont d'ores et déjà commercialisées. Et aussi les SiP Logic-on-Logic (LoL) qui nécessitent le développement de T2T plus denses pour être déployées par l'industrie.
L'intégration 3D SiP hétérogène, consiste à superposer au sein du même packaging des puces de natures différentes, qui tireront leurs bénéfices, en termes de coût ou de consommation électrique, en fonction de l'application souhaitée. Il est possible d'intégrer des capteurs sur des circuits logiques (Sensor-on-Logic), par exemple dans la plupart des Smartphones, un capteur d'image CMOS est intégré et packagé directement par 3D SiP sur un circuit logique [111]. D'autres types d'intégration 3D SiP existent, tel que l'intégration de circuits analogiques sur des circuits logiques (Analog on Logic), ou de circuits mémoires sur des circuits logiques (Memory on Logic), qui constituent les fonctions de bases pour tous les systèmes informatiques.

Pour accéder à l'intégration 3D l'accent est mis, au sein de l'industrie de la microélectronique, sur le développement des TSVs, briques technologiques nécessaires pour la superposition et l'interconnexion des puces. Cependant insérer des TSVs dans des puces remet en cause l'environnement complet du produit, conduisant au développement de nouveaux procédés pour la fabrication et le design des puces. L'intégration 3D est donc actuellement limitée par la difficulté de mettre en place des interconnections dans l'axe de l'empilement. De plus la diminution de la surface des modules de l'électronique 3D mène à des problèmes concernant le management des transferts de chaleur dans les assemblages. Des transferts de chaleur important peuvent donc apparaitre entre les modules d'électronique 3D et l'environnement extérieur de ceux-ci par convection et conduction [100].

Les objectifs de l'intégration SiP, 2.5D ou 3D, est de développer une méthodologie universelle pour associer les différentes infrastructures associées. En effet, de multiples problèmes apparaissent dès lors que plusieurs puces sont associées dans un même boîtier. Cette méthodologie a pour but d'optimiser la mise en boîtier des puces pour la diminution des coûts, de la consommation électrique et l'amélioration des performances, en termes de bande passante, de transfert thermique ou de résistance mécanique pour les systèmes microélectroniques. La Fig. 1.27 résume les contraintes associées aux différents concepts de packaging.

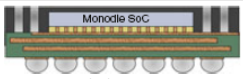
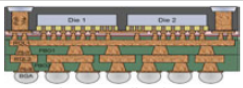
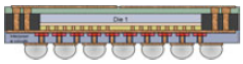
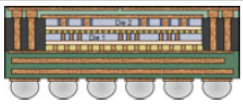
Concept		Constraint	Vehicle
2D	Mono-die SoC	***Monodie Si* = Continue System integration through More Moore CMOS scaling** • Assume CMOS More-Moore continues… – no new disruptive constraints on Si devices – Cost-performance-power curve carries on	 Substrate Package
2.5D	2.5D interposer	***Functional partition* = Split Die with existing subsystem blocks assigned to a given die** • Assume CMOS has no new constraints • Must enable D2D interconnect for required BW • Minimize disruption to the architecture and design	 Interposer with wires
3D	3D interposer	***Feature partition* = enable "near" subfunction with system blocks assigned to suitable chip-set die** • Assume CMOS cannot support (some) analog • Must enable physical proximity	 Interposer with wires + more ?
3D	3D LoL	***IP partition* = enable tight interface between system or SoC functions assigned to suitable die** • Assume CMOS has constraints (e.g. no HV I/Os) • Must enable interface between IP on different die • Disruption to digital design environment	 3D Logic-on-Logic Stack

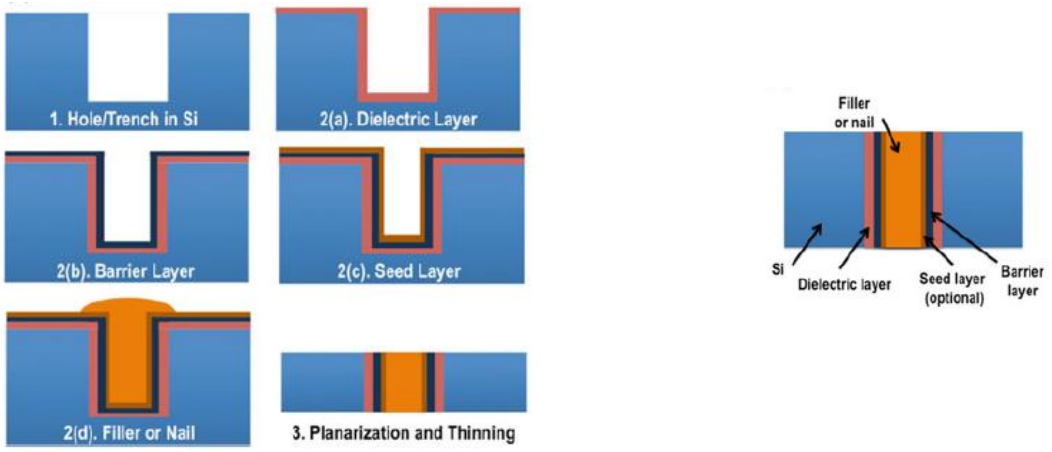
Fig. 1.27 : Résumé de différentes architectures utilisables pour l'intégration SIP avec leur différentes contraintes et leurs opportunités d'intégration associées [112]

V.3. Les techniques de report et d'interconnexion des puces

Afin d'assembler électriquement les puces fabriquées à leur environnement extérieur au sein d'un boîtier, il est nécessaire de créer des interconnexions électriques. Il existe différents types d'interconnexion électrique. Celle-ci va être employée en fonction des propriétés que l'on souhaite pour le système mais aussi en fonction de l'espace disponible ou de l'architecture des puces.

V.3.1. Les Through Silicon Vias

Comme nous l'avons dans le paragraphe précédent, le développement des TSVs est une brique technologique particulièrement importante pour la pénétration de l'approche SiP 3D dans les systèmes microélectroniques. En effet, sans TSV il serait impossible de relier électriquement les puces se trouvant au plus haut des assemblages superposés. Les TSVs forment une connexion entre la face avant et la face arrière d'une puce Si. Le premier brevet associé à ce concept date de 1964 [113], de nombreuses techniques ont été développées pour fabriquer des trous et les remplir de métal dans des puces silicium. La Fig. 1.28 présente les différentes étapes de fabrication des TSVs



(a) (b)

Fig. 1.28 (a) Schéma des différentes étapes de la fabrication des TSVs : (i) gravure de trous dans un substrat de silicium, (ii) dépôt d'une couche diélectrique, (iii) dépôt du liner, (iv) dépôt d'une couche d'accroche pour la métallisation, (v) métallisation et (vi) planarisation et polissage et (b) schéma du résultat de la fabrication d'un TSV[114]

Le plus souvent les trous sont formés par gravure. Pour cela il est possible d'utiliser le procédé Bosch, qui consiste en une série de gravures plasma et de passivations. Ensuite les TSVs formés doivent être isolés de la matrice de silicium à l'aide d'un revêtement diélectrique appelé 'liner'. Ce 'liner' est une couche mince et conforme à la géométrie des TSVs. Celui-ci ne doit pas comporter de craquelures et doit avoir une épaisseur uniforme sur toute la longueur du TSV considéré. Après le dépôt du liner, les trous sont remplis avec un matériau conducteur. Le plus souvent on utilise du cuivre (Cu) pour ses performances électriques, ou du tungstène (W), notamment utilisé pour des processus à haute température. Généralement le Cu est déposé par électrodéposition après avoir déposé une couche de Ti/TiN. Pour obtenir une bonne planéité des vias formés, une étape de CMP (Chemical and Mechanical Planarisation) est ajoutée et permet d'obtenir un polissage à l'entrée et à la sortie des vias.

V.3.2. Les techniques d'assemblage

Pour le report des puces dans l'assemblage le 'bonding', qui est traduisible par 'collage' ou 'câblage', est particulièrement utilisé. Le 'bonding' est une technologie permettant d'interconnecter électriquement une puce à son environnement extérieur (boîtiers ou PCBs). C'est la technique la moins coûteuse pour créer des interconnexions électriques en packaging microélectronique [115]. Le câblage est réalisé à l'aide d'un fil de matériau conducteur, tel que l'aluminium, l'or ou le cuivre d'un diamètre d'une vingtaine de microns. Trois techniques de bonding existent : le compliant (conforme) bonding, le wedge bonding et le ball bonding.

Le compliant bonding consiste à créer un lien entre un fil d'or et un matériau conforme, comme l'aluminium, à l'aide d'une forte pression et d'un transfert de chaleur entre les deux matériaux [116].

Le wedge bonding est une technique communément utilisée dans l'industrie microélectronique qui permet de créer des interconnexions en utilisant de l'énergie ultrasonique et de la pression. La Fig. 1.29 présente une photographie de deux wedge bondings sur un transistor KSY34.

Cette technique diffère du ball bonding qui elle utilise une combinaison de chaleur, de pression et d'énergie ultrasonique à chaque extrémité du fil de matériau conducteur pour créer l'interconnexion entre la puce et son environnement extérieur.

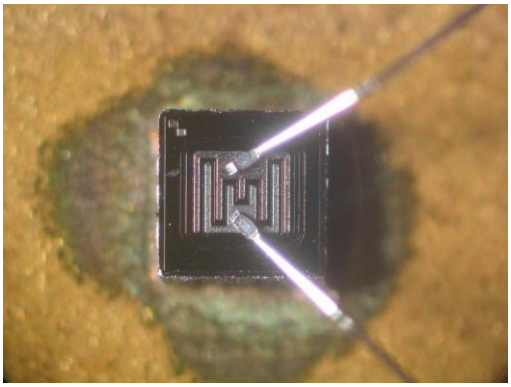


Fig. 1.29 : Photographie de deux 'wedge bonding' sur un transistor KSY34 [8]

V.3.3. Les techniques de report type 'Flip Chip'

D'autres techniques existent pour interconnecter électriquement les circuits intégrés ou d'autres systèmes microélectroniques avec un boîtier : le flip chip, aussi connu comme 'controlled collapse chip connection' (C4), dont le résultat est schématisé en Fig. 1.30, est une technique qui consiste à interconnecter des puces semi-conductrices dans des assemblages complexes à l'aide de billes de soudure (bumping), déposées sur les plots métalliques de la puce et du bloc externe. Les billes de soudures sont placées sur les plots métalliques des puces, celles-ci sont retournées et positionnées avec les billes métallisées. Le système est placé sur une plaque chauffante afin de fondre les billes de métal et obtenir une bonne connexion électrique. Le flip chip est avantageux, notamment pour obtenir des assemblages plus petits et pour la diminution de l'inductance du système, permettant une plus grande rapidité de transfert de signal.

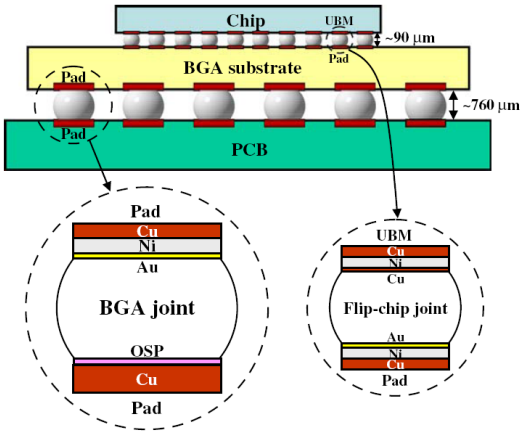


Fig. 1.30 : Schéma montrant deux types de joints utilisés en packaging microélectronique, le BGA joint et le Flip chip joint [117]

V.4. Les interposeurs

Les interposeurs sont des substrats passifs, fonctionnels qui permettent d'intégrer et d'interconnecter plusieurs puces, qui peuvent être de nature très différentes, sur le même support. Cette technologie se situe entre l'intégration 2D et l'intégration 3D et elle ne nécessite pas certaines briques technologiques non matures à ce jour [118].

L'un des avantages des interposeurs est de pouvoir le fonctionnaliser. Nous montrerons dans la suite de cette thèse qu'il est possible d'intégrer des guides optiques dans des interposeurs verre pour des

interconnexions photoniques directement dans le packaging. Cette fonctionnalisation des interposeurs est particulièrement intéressante pour la création de transceivers électro-optique intégrables dans les liaisons des data-centers présentées précédemment.

V.4.1. Les interposeurs Si

Historiquement ce sont les interposeurs Si qui sont les plus utilisés pour la fabrication de SiP 2.5D. En effet, le matériau étant bien connu et le plus utilisé en microélectronique, le Si est le candidat parfait pour remplir le rôle d'interposeur. On peut citer plusieurs produits comportant des SiP 2.5D utilisant les interposeurs Si comme Xilinx Virtex [119], AMD Radeon Pro [101] et certains produits de TSMC [120]. Les industriels de la microélectronique possédant déjà les infrastructures et les plateformes de fabrication Si, c'est l'interposeur pour l'intégration SiP 2.5D de prédilection.

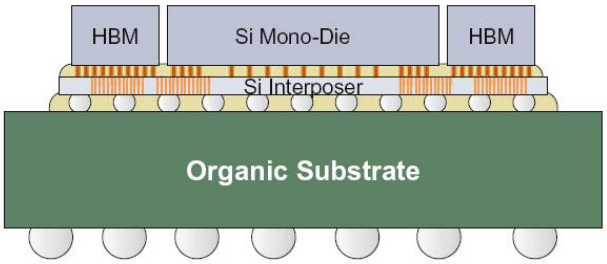


Fig. 1.31 : Exemple d'un SiP 2.5D avec un interposeur Si [99]

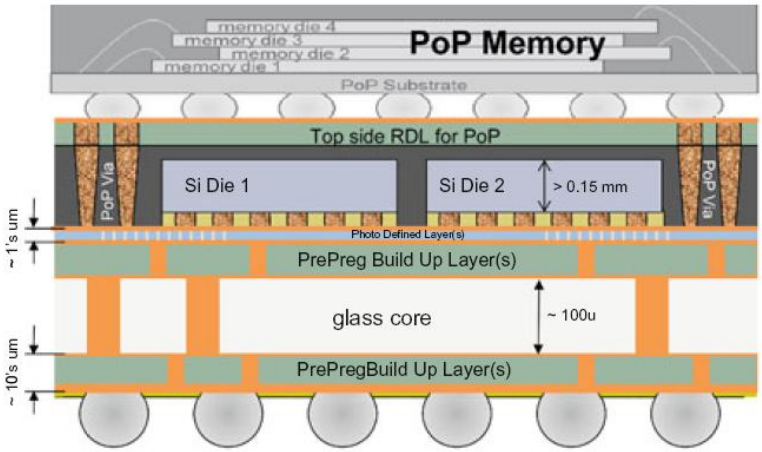
L'interposeur Si, dont un schéma est présenté Fig. 1.31, permet d'intégrer des composants actifs et passifs avec une grande densité. Cependant son prix, relativement onéreux à cause de la limitation des tailles de wafers, cantonne son emploi aux applications hautes performances. En d'autres termes, les interposeurs Si sont utilisables pour de nombreuses applications, pour un large panel de puces où le bénéfice est suffisant pour couvrir le prix de ce type d'intégration.
Il est tout de même à noter que certains interposeurs Si dit 'low cost' existent [121] et visent à pouvoir utiliser l'intégration 2.5D pour des applications mobiles. Ce type d'interposeur Si 'low cost' coûte moins cher à fabriquer mais est aussi très complexe à concevoir.

V.4.2. Les interposeurs organiques

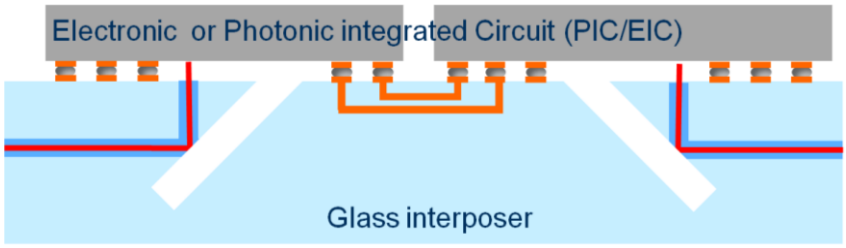
Les interposeurs les plus utilisés sont les interposeurs organiques. Leur fabrication, similaire à celle des PCB est assez simple à mettre en place et les vias nécessaires pour les interconnexions électriques des puces peuvent être réalisés par laser ou mécaniquement. Cette simplicité de fabrication associée à la possibilité de réaliser beaucoup d'interposeurs organiques sur le même panneau permet à cette technologie d'être assez abordable. Les faiblesses de ce type d'interposeurs sont : leur faible capacité d'intégration due à leur faible stabilité dimensionnelle qui ne permet pas un espacement assez fin entre les puces et leur différence de coefficient thermique très éloignée de celle des puces silicium. Cette différence de coefficient thermique d'expansion peut induire de très forte contraintes thermomécaniques [99].

V.4.3. Les interposeurs verre

Le verre est certainement le meilleur matériau pour la fabrication d'interposeurs. En effet, grâce à ses propriétés exceptionnelles, il est de plus en plus utilisé en microélectronique [122][123][124][125]. Le verre a une haute résistivité électrique (entre 10^{12} et 10^{16} Ω.cm), peu de pertes diélectriques, un cross talk optique équivalent au silicium, une très bonne stabilité chimique, une grande résistance mécanique et surtout un coût très bas dû au fait qu'il est utilisé en panneaux de grande dimension.
La Fig. 1.32.a présente un exemple de SiP avec un interposeur en verre et Fig. 1.32.b un interposeur verre comportant des composants photoniques passifs, pour la redistribution de signaux optiques en son sein. Sur l'une des tranches, on peut injecter un signal optique dans un guide optique enterré dans le substrat de verre. Ce signal est directement réinjecté, à l'aide d'un miroir photonique intégré, dans la puce PIC positionnée à la surface de l'interposeur, elle-même reliée électriquement à une puce de commande (EIC).



(a)



(b)

Fig. 1.32 : (a) Schéma d'un SiP comportant un interposeur verre [99] et (b) Schéma d'un interposeur verre avec des fonctions photoniques passives

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le principe de fonctionnement des lasers et leur utilisation pour le micro-usinage, notamment dans le domaine du packaging microélectronique. Les sources à impulsions ultra-brèves telles que les lasers femtosecondes qui sont d'excellents candidats pour le déploiement des nouvelles technologies pour le packaging dans l'industrie des semi-conducteurs. Les lasers femtosecondes étant particulièrement précis, sans effet thermique collatéral (HAZ), peuvent travailler n'importe quels matériaux.

Nous avons également discuté des limites de la loi de Moore et évoqué que le déploiement des technologies de câblage optique très haut débit nécessite de repenser les racks de data centers. Des solutions adaptées voient le jour, telles que la désagrégation ou le perfectionnement des transceivers électro-optique qui compose les AOCs. L'augmentation du débit et de la bande passante des transceivers, ainsi que la diminution de leur consommation énergétique, de leur coût et l'amélioration de leur compacité ont été abordés. Les architectures planaires, particulièrement coûteuse ne semblent pas être une approche favorable à l'augmentation du débit et donc de la bande passante. L'intégration 3D nécessitant des briques technologique encore très coûteuse et non maitrisée car elle requière le développement de techniques très complexes de fabrication. En effet, les SIPs 3D, sont des boîtiers de microélectronique où les puces silicium sont superposées les unes sur les autres et sont connectées électriquement à l'aide de TSV (Through Silicon Vias) ou de câblages filaires décrits précédemment. Les avantages de cette technique sont la réduction de la longueur des connections électriques et la diminution de l'encombrement du système. De plus, les puces superposées peuvent être de natures hétérogènes, celles-ci ayant subi des processus de fabrication différents sont ensuite empilées à l'aide de technologie de report. Le développement de plusieurs briques technologiques, comme la fabrication des TSV, l'amincissement des wafers silicium et les techniques de report de puces sont nécessaires à l'intégration 3D pour son plein essor [126]. L'intégration 3D tire parti du gain en encombrement dû à la superposition des puces et se positionne de manière complémentaire au 'More Moore' et 'More-Than-Moore' étant donné l'utilisation de la miniaturisation des transistors CMOS pour l'empilement des puces et permet la diversification des fonctions en utilisant des techniques de report comme le flip chip.

Une alternative est proposée ici, elle permet de profiter du gain de place grâce à l'empilement des puces et de la bonne connaissance des technologies pour son déploiement. Néanmoins, la densité d'intégration sera moindre qu'avec les architectures 3D. C'est l'approche 2.5D, où il est nécessaire d'utiliser un substrat intermédiaire d'assemblage, c'est-à-dire un interposeur.

L'intégration 2.5D, utilisant des interposeurs est une alternative particulièrement intéressante. En effet, cette technique pourrait à terme permettre d'intégrer des puces photoniques et électroniques sur le même substrat, tout en s'affranchissant des contraintes d'alignement de la fibre optique due à l'utilisation de PICs. L'utilisation du verre comme interposeur est, quant à lui, un excellent choix, le verre ayant des propriétés particulièrement adaptées au traitement électro-optique, par exemple sa résistance mécanique mais aussi sa flexibilité lui permet d'être intégré facilement pour le packaging de transceivers. En plus de ses propriétés chimiques et mécaniques, il est à noter que le verre permet, à l'aide de laser femtoseconde, d'être modifié dans son volume, notamment pour contenir des guides optiques, qui permet la liaison entre une fibre optique et une PIC.

Bibliographie

[1] A. K. Dubey and V. Yadava, "Experimental study of Nd:YAG laser beam machining—An overview," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 195, no. 1–3, pp. 15–26, Jan. 2008.

[2] G. Savriama, V. Jarry, L. Barreau, C. Boulmer-Leborgne, and N. Semmar, "Laser micro-cutting of wide band gap materials," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1464, no. 2012, pp. 169–178, 2012.

[3] E. G. Gamaly, A. V. Rode, B. Luther-Davies, and V. T. Tikhonchuk, "Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics," *Phys. Plasmas*, vol. 9, no. 3, pp. 949–957, Mar. 2002.

[4] S. Nolte *et al.*, "Ablation of metals by ultrashort laser pulses," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 14, no. 10, p. 2716, Oct. 1997.

[5] F. Hendricks, J. A. der Au, and V. V. Matylitsky, "High aspect ratio microstructuring of transparent dielectrics using femtosecond laser pulses: method for optimization of the machining throughput," *Appl. Phys. A*, vol. 117, no. 1, pp. 149–153, Oct. 2014.

[6] H. C., "Treatise on Light," *Science*. 1913.

[7] I. Newton. (1642-1727), "Opticks," 1704.

[8] "Wikipedia, the free encyclopedia." .

[9] T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby," *Nature*, vol. 187, no. 4736, pp. 493–494, Aug. 1960.

[10] J. Hecht, *City of light: the story of fiber optics*. Oxford University Press, 2004.

[11] CNRS, "Le laser, histoire d'une découverte lumineuse | CNRS Le journal," 2015. .

[12] J. E. Geusic, H. M. Marcos, and L. G. Van Uitert, "Laser oscillations in Nd doped yttrium aluminium, yttrium gallium and gadolinim garnets" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 4, no. 10, pp. 182–184, May 1964.

[13] F. Fankhauser and S. Kwasniewska, *Lasers in ophthalmology : basic, diagnostic, and surgical aspects : a review*. Kugler Publications, 2003.

[14] F. P. Schäfer, "1. Principles of dye laser operation," 1973, pp. 1–89.

[15] F. J. (Frank J. . Duarte, L. W. Hillman, P. F. Liao, and P. Kelley, *Dye Laser Principles : With Applications*. Elsevier Science, 1990.

[16] CNRS, "Gérard Mourou, prix Nobel de physique 2018 | CNRS Le journal," 2018. .

[17] D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, vol. 56, no. 3, pp. 219–221, Dec. 1985.

[18] Laser Focus World, "Laser Focus World - January 2018 - Annual Laser Market Review & Forecast: Lasers enabling lasers," 2018. .

[19] W. Han, "Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging," *Dr. Diss. (All Diss. All Years)*, May 2004.

[20] R. V. Shenoy, K.-Y. Lai, and E. Gusev, "2.5D Advanced System-in-Package: Processes, Materials and Integration Aspects," *ECS Trans.*, vol. 61, no. 3, pp. 183–190, Mar. 2014.

[21] Z. Illyefalvi-Vitéz, "Laser processing for microelectronics packaging applications," *Microelectron. Reliab.*, vol. 41, no. 4, pp. 563–570, 2001.

[22] Electronics Cooling, "Update on JEDEC Thermal Standards | Electronics Cooling," 2012. .

[23] G. Savriama, J. Mendez, L. Barreau, C. Boulmer-Leborgne, and N. Semmar, "Crack-free laser dicing of glass in the microelectronics industry," *J. Laser Appl.*, vol. 25, no. 5, p. 052010, 2013.

[24] T. Matsumura, T. Nakatani, and T. Yagi, "Deep drilling on a silicon plate with a femtosecond

laser: experiment and model analysis," *Appl. Phys. A*, vol. 86, no. 1, pp. 107–114, Nov. 2006.

[25] M. Yonemura, S. Kato, K. Hasegawa, and H. Takahashi, "Formation of through holes in glass substrates by laser-assisted etching," *J. Laser Micro Nanoeng.*, vol. 11, no. 2, pp. 143–146, 2016.

[26] S. Butkus, D. Paipulas, R. Sirutkaitis, E. Gaižauskas, and V. Sirutkaitis, "Rapid cutting and drilling of transparent materials via femtosecond laser filamentation," *J. Laser Micro Nanoeng.*, vol. 9, no. 3, pp. 213–220, 2014.

[27] V. Sukumaran *et al.*, "Through-package-via formation and metallization of glass interposers," in *2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2010, pp. 557–563.

[28] C. Hairaye, "Fonctionnalisation de surfaces par microstructuration laser," no. Umr 7357, 2017.

[29] D. Correa, J. Almeida, G. Almeida, M. Cardoso, L. De Boni, and C. Mendonça, "Ultrafast Laser Pulses for Structuring Materials at Micro/Nano Scale: From Waveguides to Superhydrophobic Surfaces," *Photonics*, vol. 4, no. 1, p. 8, 2017.

[30] A. A. Tseng, Y.-T. Chen, C.-L. Chao, K.-J. Ma, and T. P. Chen, "Recent developments on microablation of glass materials using excimer lasers," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 45, no. 10, pp. 975–992, Oct. 2007.

[31] J. Lopez, F. Salin, M.-C. Hernandez, and M. Faucon, "Micro-usinage nanoseconde UV ou femtoseconde : état de l'art et comparaison," *J. Phys. IV*, vol. 108, pp. 13–17, Jun. 2003.

[32] J. Lopez *et al.*, "Comparison of picosecond and femtosecond laser ablation for surface engraving of metals and semiconductors," vol. 8243, no. February, p. 82430O, 2012.

[33] K. Sugioka and Y. Cheng, "Femtosecond laser three-dimensional micro-and nanofabrication," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 1, no. 4, 2014.

[34] X. C. Wang *et al.*, "High quality femtosecond laser cutting of alumina substrates," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 6, pp. 657–663, Jun. 2010.

[35] A. Yadav, H. Kbashi, S. Kolpakov, N. Gordon, K. Zhou, and E. U. Rafailov, "Stealth dicing of sapphire wafers with near infra-red femtosecond pulses," *Appl. Phys. A*, vol. 123, no. 5, p. 369, May 2017.

[36] M. Martínez-Calderon, A. Rodríguez, A. Dias-Ponte, M. C. Morant-Miñana, M. Gómez-Aranzadi, and S. M. Olaizola, "Femtosecond laser fabrication of highly hydrophobic stainless steel surface with hierarchical structures fabricated by combining ordered microstructures and LIPSS," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 374, pp. 81–89, Jun. 2016.

[37] A. Y. Vorobyev and C. Guo, "Black metals through femtosecond laser pulses," in *AIP Conference Proceedings*, 2012, vol. 1464, no. 1, pp. 397–401.

[38] H. Huang, L.-M. Yang, and J. Liu, "Femtosecond fiber laser direct writing of optical waveguide in glasses," *Nanophotonics Macrophotonics Sp. Environ.*, vol. d, p. 81640B--81640B--8, 2011.

[39] J. W. Chan, T. Huser, S. Risbud, and D. M. Krol, "Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses.," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 21, pp. 1726–1728, 2001.

[40] V. Maselli *et al.*, "3D photonic devices at telecom wavelengths fabricated by a femtosecond oscillator - art. no. 61080W," *Commer. Biomed. Appl. Ultrafast Lasers VI*, vol. 6108, p. 61080W, 2006.

[41] S. Butkus, D. Paipulas, D. Kaškelyte, E. Gaižauskas, and V. Sirutkaitis, "Improvement of cut quality in rapid-cutting of glass method via femtosecond laser filamentation," *J. Laser Micro Nanoeng.*, vol. 10, no. 1, pp. 59–63, 2015.

[42] IBM, "Big Data Analytics | IBM Analytics," 2016. .

[43] Intel, "Intel, Facebook Collaborate on Future Data Center Rack Technologies | Intel Newsroom," 2013. .

[44] M. M. Waldrop, "The chips are down for Moore's law," *Nature*, vol. 530, no. 7589, pp. 144–147,

Feb. 2016.

[45] Joonyoung Kim and Younsu Kim, "HBM: Memory solution for bandwidth-hungry processors," in *2014 IEEE Hot Chips 26 Symposium (HCS)*, 2014, pp. 1–24.

[46] I. Young *et al.*, "Optical technology for energy efficient I/O in high performance computing," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 10, pp. 184–191, Oct. 2010.

[47] L. Chen, K. Preston, S. Manipatruni, and M. Lipson, "Integrated GHz silicon photonic interconnect with micrometer-scale modulators and detectors," *Opt. Express*, vol. 17, no. 17, p. 15248, Aug. 2009.

[48] K. Raj *et al.*, ""Macrochip" computer systems enabled by silicon photonic interconnects," 2010, p. 760702.

[49] G. Kim *et al.*, "Low-voltage high-performance silicon photonic devices and photonic integrated circuits operating up to 30 Gb/s," *Opt. Express*, vol. 19, no. 27, p. 26936, Dec. 2011.

[50] Mark Zaffagni, "Le plus grand datacenter du monde sera construit en Arctique," 2017. .

[51] L. A. Barroso, J. Clidaras, and U. Hölzle, "The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines, Second edition," *Synth. Lect. Comput. Archit.*, vol. 8, no. 3, pp. 1–154, Jul. 2013.

[52] C. Kachris, K. Kanonakis, and I. Tomkos, "Optical interconnection networks in data centers: recent trends and future challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 9, pp. 39–45, Sep. 2013.

[53] Cisco Global Cloud Index, "Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016–2021 White Paper - Cisco," 2018. .

[54] Greenpeace, "Make IT Green: Cloud computing and its contribution to climate change - Greenpeace International," 2010. .

[55] Greenpeace, "How Clean is Your Cloud? - Greenpeace International," 2012. .

[56] SMART 2020, "SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age | The Climate Group," 2008. .

[57] C. Kachris and I. Tomkos, "A Survey on Optical Interconnects for Data Centers," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 1021–1036, 2012.

[58] P. K. Pepeljugoski *et al.*, "Low Power and High Density Optical Interconnects for Future Supercomputers," in *Optical Fiber Communication Conference*, 2010, p. OThX2.

[59] M. A. Taubenblatt, "Optical Interconnects for High-Performance Computing," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 448–457, Feb. 2012.

[60] C. Kachris and I. Tomkos, "Power consumption evaluation of all-optical data center networks," *Cluster Comput.*, vol. 16, no. 3, pp. 611–623, Sep. 2013.

[61] I. S. Devised *et al.*, "International Technology Roadmap for Semiconductors Executive Summary," 2009.

[62] J. E. Cunningham *et al.*, "Integration and Packaging of a Macrochip With Silicon Nanophotonic Links," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 3, pp. 546–558, May 2011.

[63] T. Anan *et al.*, "High Speed 1.1-μm-Range InGaAs-Based VCSELs," in *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2008, pp. 1–3.

[64] T. Fukamachi *et al.*, "95 °C uncooled and high power 25-Gbps direct modulation of InGaAlAs ridge waveguide DFB laser," 2009.

[65] K. Shinoda *et al.*, "25-Gb/s Multichannel 1.3-μm Surface-Emitting Lens-Integrated DFB Laser Arrays," *J. Light. Technol. Vol. 29, Issue 19, pp. 2899-2905*, vol. 29, no. 19, pp. 2899–2905, Oct. 2011.

[66] L. Vivien *et al.*, "42 GHz pin Germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator waveguide," *Opt. Express*, vol. 17, no. 8, p. 6252, Apr. 2009.

[67] A. Liu *et al.*, "Recent development in a high-speed silicon optical modulator based on reverse-biased pn diode in a silicon waveguide," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 6, p. 064001, Jun. 2008.

[68] J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L. C. Kimerling, and J. Michel, "Ge-on-Si laser operating at room temperature," *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 5, p. 679, Mar. 2010.

[69] Mellanox, "New Developments in Data Center Cables and Transceivers," 2017.

[70] Y. Urino, T. Nakamura, and Y. Arakawa, "Silicon Optical Interposers for High-Density Optical Interconnects," Springer, Berlin, Heidelberg, 2016, pp. 1–39.

[71] J.-M. Mur, "Panorama des cordons optiques actifs ou AOC - active optical cables," *Photoniques*, no. 52, pp. 46–51, Mar. 2011.

[72] F. Chang *et al.*, "First Demonstration of PAM4 Transmissions for Record Reach and High-capacity SWDM Links Over MMF Using 40G/100G PAM4 IC Chipset with Real-time DSP," *Opt. Fiber Commun. Conf,* 2, Mar. 2017.

[73] A. J. Rogers, *Essentials of Photonics, Second Edition.* CRC Press, 2008.

[74] D. Seyringer, P. Schmid, M. Bielik, F. Uherek, J. Chovan, and A. Kuzma, "Design, simulation, evaluation, and technological verification of arrayed waveguide gratings," *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 7, p. 071803, Jan. 2014.

[75] S. E. Miller, "Integrated Optics: An Introduction," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no. 7, pp. 2059–2069, Sep. 1969.

[76] Lightwave, "PIC-based transceivers enable cost-effective 1G to 10G PON migration - Lightwave," 2010. .

[77] P. Dong, G.-H. Duan, Y.-K. Chen, and D. T. Neilson, "Merits and Potential Impact of Silicon Photonics," 2016, pp. 397–420.

[78] A. R. Chraplyvy, A. H. Gnauck, R. W. Tkach, and T. Li, "High-Capacity Optical Transmission Systems," *J. Light. Technol. Vol. 26, Issue 9, pp. 1032-1045*, vol. 26, no. 9, pp. 1032–1045, May 2008.

[79] R. G. Beausoleil, "Large-scale integrated photonics for high-performance interconnects," in *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, 2011, pp. 326–327.

[80] D. Liang, M. Fiorentino, and R. G. Beausoleil, "VLSI Photonics for High-Performance Data Centers," 2016, pp. 489–516.

[81] J. H. Ahn, N. Binkert, A. Davis, M. McLaren, and R. S. Schreiber, "HyperX," in *Proceedings of the Conference on High Performance Computing Networking, Storage and Analysis - SC '09*, 2009, p. 1.

[82] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, "Silicon optical modulators," *Nat. Photonics*, vol. 4, no. 8, pp. 518–526, Aug. 2010.

[83] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature*, vol. 435, no. 7040, pp. 325–327, May 2005.

[84] C. Li *et al.*, "Silicon Photonic Transceiver Circuits With Microring Resonator Bias-Based Wavelength Stabilization in 65 nm CMOS," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 49, no. 6, pp. 1419–1436, Jun. 2014.

[85] A. P. Knights *et al.*, "Comb-laser driven WDM for short reach silicon photonic based optical interconnection," in *The 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*, 2012, pp. 210–212.

[86] I. Szendiuch, "Development in Electronic Packaging – Moving to 3D System Configuration."

[87] A. D. Ellis, N. Mac Suibhne, D. Saad, and D. N. Payne, "Communication networks beyond the capacity crunch," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 374, no. 2062, p. 20150191, Mar. 2016.

[88] J. Bardeen and W. H. Brattain, "The Transistor, A Semi-Conductor Triode," *Phys. Rev.*, vol. 74, no. 2, pp. 230–231, Jul. 1948.

[89] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from Electronics, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff.," *IEEE Solid-State Circuits Soc. Newsl.*, vol. 11, no. 3, pp. 33–35, Sep. 2006.
[90] S. J. Wind *et al.*, ""More-than-Moore" White Paper," *Nature*, vol. 3, no. 2, pp. 758–62, 2012.
[91] G. Q. Zhang and A. J. van Roosmalen, "The Changing Landscape of Micro/Nanoelectronics," in *More than Moore*, Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 1–31.
[92] R. Radojcic, "Introduction," in *More-than-Moore 2.5D and 3D SiP Integration*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 1–4.
[93] R. R. Tummala, "Packaging: past, present and future," *2005 6th Int. Conf. Electron. Packag. Technol.*, pp. 3–7, 2005.
[94] Yole, "Yole developpement for immediate release: Advanced packaging technologies are key for semiconductor innovation," pp. 1–4, 2018.
[95] S. Gousseau, "Caractérisation in operando de l'endommagement par électromigration des interconnexions 3D : Vers un modèle éléments finis prédictif," Jan. 2015.
[96] Pete Bennett, "The why, where and what of low-power SoC design | EE Times." .
[97] "The Great Debate: SOC vs. SIP | EE Times," 2015. .
[98] "NVIDIA's Tegra 2 - LG Optimus 2X & NVIDIA Tegra 2 Review: The First Dual-Core Smartphone," 2011. .
[99] R. Radojcic, "More-than-Moore Technology Opportunities: 2.5D SiP," in *More-than-Moore 2.5D and 3D SiP Integration*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 5–67.
[100] R. W. Johnson, M. Strickland, N. Msfc, N. Jpl, R. W. Johnson, and D. Gerke, "3-D Packaging: A technology Review," Jun. 2005.
[101] AMD, "High Bandwidth Memory | AMD," 2016. .
[102] eSilicon, "Custom 2.5D/HBM2 ASIC Design & Packaging | eSilicon," 2016. .
[103] Amkor, "FlipStack® CSP - Amkor Technology," 2016. .
[104] ASE, "ASE Technology Holding," 2016. .
[105] Fujitsu, "Fujitsu Group Integrated Report 2016 - Fujitsu Global," 2016. .
[106] Merritt, "EE Times | Electronic Engineering Times | Connecting the Global Electronics Community," 2016. .
[107] T. Braun *et al.*, "Foldable Fan-Out Wafer Level Packaging," in *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2016, pp. 19–24.
[108] STATS ChipPAC, "STATS ChipPAC - eWLB (a FOWLP Technology)," 2016. .
[109] J. H. Lau, "Status and Outlooks of Flip Chip Technology."
[110] JEDEC, "JEDEC." .
[111] R. Radojcic, "More-than-Moore Technology Opportunities: 3D SiP," in *More-than-Moore 2.5D and 3D SiP Integration*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 69–115.
[112] R. Radojcic, "More-than-Moore Design Eco-System," in *More-than-Moore 2.5D and 3D SiP Integration*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 117–157.
[113] "Methods of making thru-connections in semiconductor wafers," Dec. 1964.
[114] P. Kumar, I. Dutta, Z. Huang, and P. Conway, "Materials and Processing of TSV," 2017, pp. 47–69.
[115] V. Valenta *et al.*, "Design and experimental evaluation of compensated bondwire interconnects above 100 GHz," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 7, no. 3–4, pp. 261–270, Jun. 2015.
[116] Alexander Coucoulas, "Compliant Bonding, Alexander Coucoulas, 1970 Proceeding Electronic Components Conference, Awarded Best Paper," 1970. .

[117] C. E. Ho, S. C. Yang, and C. R. Kao, "Interfacial reaction issues for lead-free electronic solders," in *Lead-Free Electronic Solders*, Boston, MA: Springer US, 2006, pp. 155–174.
[118] Ivo Bolsens, "2.5D ICs: Just a Stepping Stone or a Long Term Alternative to 3D? - PDF," 2011. .
[119] Xilinx, "3D ICs," 2016. .
[120] tsmc, "Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited," 2016. .
[121] T. Kang and A. Yee, "A comparison of Low Cost Interposer Technologies," 2013.
[122] V. Sukumaran, T. Bandyopadhyay, V. Sundaram, and T. Rao, "Low-cost thin glass interposers as a superior alternative to silicon and organic interposers for packaging of 3-D ICs," *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 2, no. 9, pp. 1426–1433, 2012.
[123] S. R. McCann, V. Sundaram, R. R. Tummala, and S. K. Sitaraman, "Flip-chip on glass (FCOG) package for low warpage," in *2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2014, pp. 2189–2193.
[124] T. Huang, V. Sundaram, P. M. Raj, H. Sharma, and R. Tummala, "Adhesion and reliability of direct Cu metallization of through-package vias in glass interposers," in *2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2014, pp. 2266–2270.
[125] Y.-H. Chen *et al.*, "Low Cost Glass Interposer Development," *Int. Symp. Microelectron.*, vol. 2014, no. 1, pp. 000397–000401, Jan. 2014.
[126] "Chip Scale May June 2016," 2016. .

CHAPITRE 2 : DE LA THEORIE DE L'INTERACTION LASER/MATIERE À L'UTILISATION DE LA PLATEFORME DE MICRO-USINAGE

Sommaire

SOMMAIRE 59

I. INTRODUCTION 61

II. INTERACTION LASER / MATIÈRE 61

II.1. Absorption linéaire et non linéaire 61
II.2. Mécanismes d'interaction 62
II.2.1. Processus thermique 62
II.2.2. Processus photochimique 63
II.2.3. Processus thermomécanique 63
II.3. Chronologie de l'interaction 64
II.4. Processus bref et ultra-bref 64
II.4.1. Nanoseconde 65
II.4.2. Picoseconde et femtoseconde 65

III. CAS SPECIFIQUE DES MATÉRIAUX DIÉLECTRIQUES 66

III.1. Modifications structurales du verre irradié par un laser femtoseconde 67
III.1.1. La photo-ionisation 68
III.1.2. L'ionisation par avalanche électronique 68
III.1.3. Le plasma d'électrons libres 69
III.1.4. La densification et le changement d'indice 70
III.2. L'auto focalisation par effet Kerr 70
III.2.1. Analyse des conditions de diffraction 70
III.2.2. Analyse de la condition d'auto-focalisation 72
III.3. Le plasma comme lentille divergente 74
III.4. La filamentation 74
III.5. Régime d'interaction laser femtoseconde dans les verres de silice fondue 75

IV. ÉTAT DE L'ART DU MICRO-USINAGE LASER DU VERRE 75

IV.1. Techniques de fabrication des composants 76
IV.1.1. Fabrication de structure en 3D 76
IV.1.2. Fabrication de guides optiques 78
IV.1.3. Polymérisation à deux photons 78
IV.1.4. Applications en micro fluidique 78

IV.1.5. Applications en opto-fluidique *80*
IV.2. Applications en photonique, les composants passifs 81

V. PRÉSENTATION DE LA PLATEFORME DE MICRO-USINAGE 84

V.1. Laser fibré dopé Ytterbium 84
V.1.1. La génération des impulsions femtosecondes *84*
V.1.2. L'utilisation de la seconde et troisième harmonique *85*
V.2. Mise en forme du faisceau 86
V.3. Propriétés spatiales du faisceau laser 87
V.3.1. Équations de propagations *87*
V.3.2. Approximation Gaussienne *88*
V.3.3. La fluence d'un faisceau Gaussien *89*
V.4. La puissance moyenne en fonction du taux de répétition 90

VI. MATÉRIAUX UTILISÉS 90

VI.1. AF32 90
VI.2. PCB 91

VII. OUTILS DE CARACTÉRISATION 91

VII.1. MEB 91
VII.2. Profilomètre optique 92
VII.3. Banc de mesure de modes/pertes 93

VIII. CONCLUSION 94

BIBLIOGRAPHIE 96

I. Introduction

Dans ce chapitre les différents processus qui interviennent dans l'interaction laser/matière sont passés en revue. L'absorption linéaire et non linéaire d'un faisceau de lumière focalisée, les mécanismes d'interactions ainsi que leur chronologie sont décrits. L'interaction lumière/verre est particulièrement développée pour permettre une bonne compréhension des phénomènes physiques intervenant dans les différentes expérimentations détaillées dans ce manuscrit. Les différentes modifications structurales du verre en fonction de l'énergie d'un laser femtoseconde sont présentées. La densification et le changement d'indice du verre, l'effet Kerr optique et l'effet de filamentation sont également décrits.
La deuxième partie du chapitre présente un état de l'art sur les différentes techniques de fabrication de composants dans le verre à partir de laser femtoseconde, concernant des domaines pluridisciplinaires aussi variés que la micro-fluidique, l'opto-fluidique et les composants passifs, fabriqués pour des applications photoniques.
Dans la troisième partie la plateforme de micro-usinage qui a été utilisée lors de cette thèse sera présentée en décrivant la source laser femtoseconde et la mise en forme du faisceau.
Pour terminer, une description des matériaux utilisés et des techniques de caractérisations seront présentées.

II. Interaction laser / matière

II.1. Absorption linéaire et non linéaire

Il existe deux modes d'absorption laser [1]. En premier lieu, l'absorption linéaire, où l'énergie électromagnétique est absorbée par la matière et se transforme en énergie interne. Ce mécanisme d'absorption peut entrainer une modification du matériau par élévation de la température.
En second lieu, l'absorption non linéaire apparait lorsque la densité locale d'énergie déposée dans le matériau est particulièrement élevée et que la durée d'incubation est extrêmement courte (< 1ps). Dans ce cas, un mécanisme d'ionisation du milieu prend place par absorption de l'énergie de plusieurs photons par un unique électron ou par un mécanisme d'ionisation par avalanche entre plusieurs électrons photo excités.

En ce qui concerne les verres, seuls les modes d'absorption non linéaire rentrent en compte pour une gamme de longueurs d'onde supérieure à ~300 nm. Il existe deux types d'ionisation de la matière :

i) L'ionisation multi photonique
ii) L'ionisation par avalanche (collisions électroniques)

L'ionisation de la matière a lieu quand un électron absorbe assez d'énergie pour être excité de la bande de valence à la bande de conduction du matériau. L'électron devient libre et participe à un mécanisme d'emballement ou claquage qui peut induire une restructuration locale de la matière :

i) Par changement d'indice de réfraction
ii) Par endommagement permanent du matériau
iii) Par enlèvement de matière

La Fig. 2.1 montre l'effet de l'irradiation d'un faisceau laser femtoseconde sur les matériaux transparents.

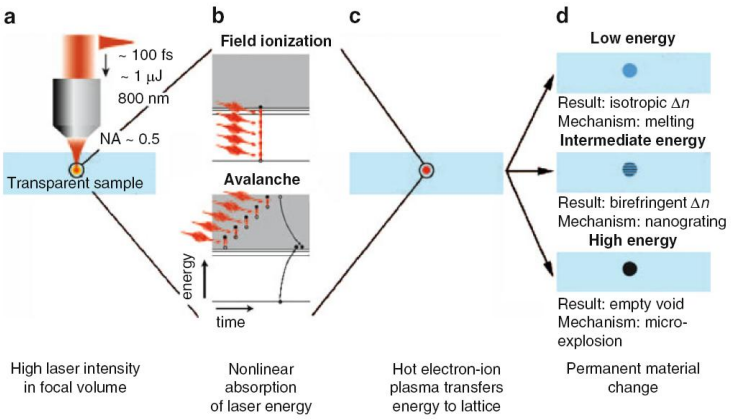


Fig. 2.1 : Illustration des interactions laser/matériaux transparents [1]

II.2. Mécanismes d'interaction

Plusieurs mécanismes d'interaction interviennent dans l'interaction laser/matière. Les différents types de processus sont passés en revue ci-après.

II.2.1. Processus thermique

Pour tous les matériaux absorbant la longueur d'onde considérée, allant de l'ultra-violet (UV) au proche infra-rouge (IR), on peut considérer le faisceau laser comme une source de chaleur. Lorsque l'interaction est suffisamment longue, l'énergie déposée localement est propagée au reste du matériau par conduction thermique conduisant à la formation d'une zone affectée thermiquement (ZAT). La ZAT est due à la fusion et la vaporisation du matériau induit par l'apport de chaleur intense et localisé du faisceau laser. Le matériau est expulsé sous forme de vapeur et de gouttelettes surfondues, qui peuvent se redéposer au voisinage de la région usinée. L'évolution de la ZAT dépend des paramètres du milieu et du faisceau laser qui entre en interaction. La longueur de diffusion thermique et la profondeur d'absorption permettent de différencier deux types de régimes du processus thermique pendant l'interaction laser/matière. Le régime surfacique, où l'absorption est forte et où le profil thermique est particulièrement dû aux propriétés thermiques du milieu. Quand la profondeur d'absorption est bien supérieure à la longueur de diffusion thermique, le régime d'échauffement volumique est également mis en jeu. Ici, ce sont les propriétés d'absorption optique du milieu, la conductivité thermique et la chaleur spécifique qui induisent le profil de température. L'énergie lumineuse est transférée aux électrons libres qui cèdent eux-mêmes leur énergie au réseau d'atomes par une succession de collisions électron-électron et électron-phonon. En résumé, comme le montre la Fig. 2.2, les processus d'interactions thermiques ont un taux d'ablation élevé et sont caractérisés par une ZAT étendue. La dilatation du matériau induit par l'échauffement va générer une onde de choc en amont du plasma et une onde acoustique se propage dans la cible.



(a) (b)

Fig. 2.2 : Représentation schématique du processus thermique par irradiation laser ; (a)absorption et diffusion de la chaleur dans le matériau cible et (b) fusion, vaporisation et expulsion de la matière

II.2.2. Processus photochimique

Lorsque l'énergie est déposée optiquement et qu'elle mène à la rupture de liaisons chimiques, le processus est qualifié de photochimique ou de photo-ablation. Ce mécanisme d'interaction est particulièrement présent lors de l'irradiation laser en UV pour laquelle l'énergie des photons est comparable à celle des liaisons covalentes des matériaux. L'absorption d'un seul photon par un électron de valence permet la dissociation des molécules par cassures des liaisons moléculaires du matériau. La matière est expulsée sous forme de gaz et de fragments moléculaires, ce qui induit une ZAT faible, comme le montre la Fig. 2.3. Il est nécessaire que le matériau absorbe la longueur d'onde employée pour que la photo-ablation entre en jeu. On utilise particulièrement l'ablation photochimique pour les matériaux avec des liaisons covalentes, comme les polymères ou les tissus biologiques.



(a) (b)

Fig. 2.3 : Représentation schématique du processus d'irradiation laser photochimique ; (a) absorption et rupture des liaisons de valence du matériau cible et (b) émission et détente du plasma

II.2.3. Processus thermomécanique

Le processus photomécanique consiste à éliminer un revêtement d'un substrat. L'irradiation laser induit l'augmentation de la température ionique entre le plasma et le matériau cible alors que la diffusion thermique n'a pas commencée dans le matériau. Un gradient de pression apparait et induit la propagation d'une onde de choc. La propagation de cette onde va créer un effet destructif. Le matériau va subir une dilatation, entrainant la génération d'une onde mécanique qui fragilise le réseau et entraine une fracture.

L'onde de compression créée par irradiation lumineuse engendre une discontinuité qui provoque un cisaillement et qui permet d'expulser le matériau à éliminer.

II.3. Chronologie de l'interaction

L'interaction laser/matière peut être de nature extrêmement différente en fonction du temps de l'interaction. Comme le montre la Fig. 2.4, entre 100 fs et 100 ps, il y a absorption du rayonnement par pénétration optique, les électrons sont excités par les photons du faisceau laser. Jusqu'à une seule nanoseconde, la température diffuse dans le matériau. Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons libres va induire une succession de chocs électron-électron et électron-phonon au sein du réseau d'atomes, cette thermo-diffusion forme la ZAT. La propagation des effets thermiques et thermo-mécaniques va créer une onde acoustique au sein du matériau. Quand il y a formation d'un cratère, c'est l'ablation. Des particules se détachent et forment un panache, il peut y avoir interaction entre le plasma créé et la surface du matériau. Après ablation la retombée de matière expulsée peut intervenir.

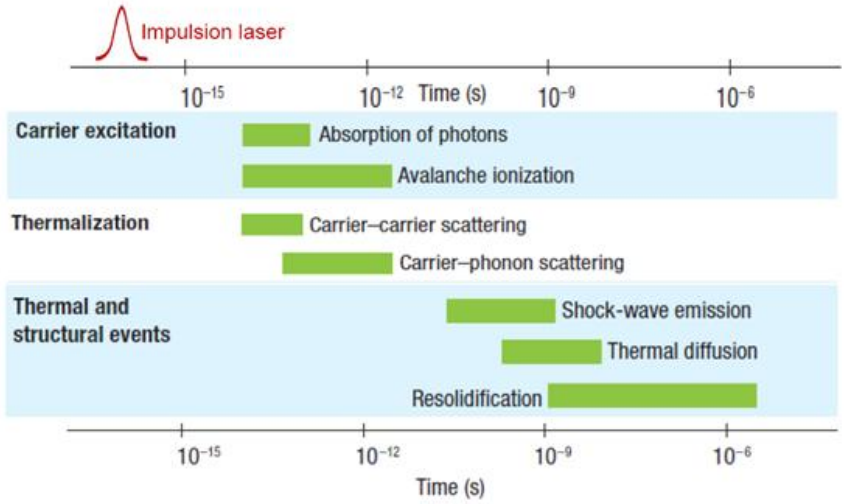


Fig. 2.4 : Échelle de temps des effets physiques qui apparaissent lors de l'interaction laser matériau transparent en régime femtoseconde [2]

II.4. Processus bref et ultra-bref

On parle d'impulsions brèves voire ultra-brèves quand la durée de l'impulsion est inférieure à 10 picosecondes. Ces temps d'impulsion sont inférieurs au temps de diffusion de la chaleur dans les matériaux. Ces types d'impulsions permettent de diminuer considérablement les effets thermiques dans les matériaux irradiés par laser. En effet, la matière est ablatée avant que la diffusion thermique ait pu avoir lieu à l'extérieur du volume impacté par le faisceau laser. La matière arrachée entraine avec elle la chaleur résiduelle résultant de l'exposition, conduisant ainsi à un effet thermique sur la cible amoindri. On peut considérer selon les matériaux que la transition entre le régime thermique et le régime ultra-bref est de l'ordre de 1 à 5 picosecondes.

Concrètement, les sources lasers à impulsions ultra-brèves permettent d'obtenir une très grande qualité d'usinage grâce à son extrême précision, à une très faible rugosité et au faible endommagement qu'il cause au matériau non irradié. De plus le développement récent de ce type de sources permet aujourd'hui d'atteindre des taux de répétition de l'ordre du mégahertz et une puissance moyenne d'une dizaine de Watts. Ces performances confèrent aux lasers à impulsions ultra-courtes la possibilité d'ablater autant de

matière que les lasers qui travaillent en régime thermique et de surpasser ces lasers en termes de qualité d'usinage.

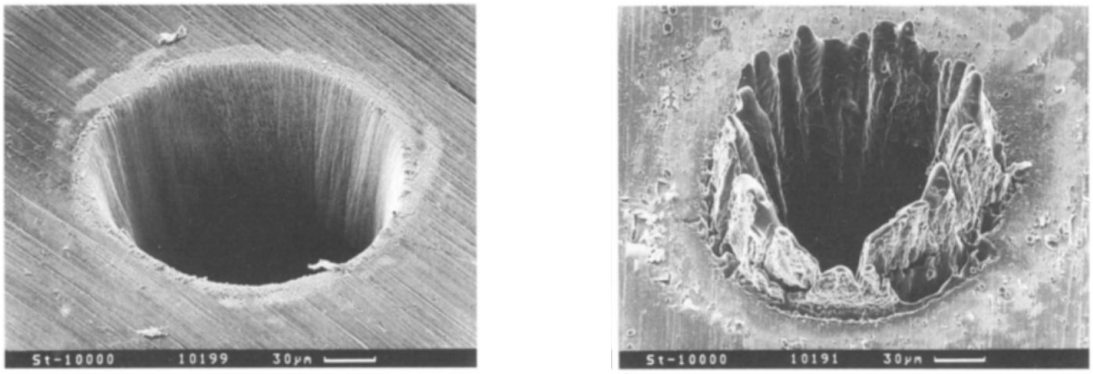
II.4.1. Nanoseconde

Pour des impulsions de l'ordre de la nanoseconde, le processus d'ablation est essentiellement thermique. L'apport de chaleur dû à l'irradiation laser provoque la fusion et la vaporisation du matériau. La zone usinée est donc marquée par les microgouttes en surfusion rejetées avec de la vapeur pendant l'exposition laser. Ce processus thermique est provoqué par l'absorption du faisceau laser par les électrons périphériques qui induit une conduction thermique et un transfert d'énergie vers la matrice du matériau usiné. Les procédés nanosecondes sont rapides et conviennent parfaitement à certaines applications comme la découpe de silicium. Cependant, cette technique d'usinage possède plusieurs défauts. La ZAT est très importante par rapport à la taille du faisceau et une onde acoustique est créée pendant l'usinage. Cette onde acoustique**,** due à la forte température créée au sein du matériau**,** peut contraindre mécaniquement celui-ci et créer des fissures. Cette onde acoustique peut également être responsable d'un découplage entre le laser et le matériau traité. Un écrantage du faisceau laser par le panache d'ablation et le matériau cible, induit une perte d'efficacité du procédé [3].

II.4.2. Picoseconde et femtoseconde

La diminution du temps d'impulsion, notamment en régime picoseconde et femtoseconde, induit une diminution des effets thermiques. La matière est arrachée de la cible avant que la température ne diffuse dans le matériau non irradié. Quand on diminue le temps d'impulsion, la ZAT va avoir tendance à diminuer, la zone de matière fondue également. Des effets d'optiques non linéaires peuvent apparaitre[3].
L'intérêt d'utiliser des sources lasers à impulsions ultra-brèves comme les lasers femtosecondes est que le processus d'ablation fait intervenir des phénomènes d'optiques non linéaires, ce qui, en plus de la très grande intensité du faisceau, va permettre un processus quasi athermique. Pour des durées d'impulsions très courtes, l'absorption multi photonique va conduire certains électrons à rentrer en collision avec le réseau et donc leur transmettre de l'énergie. Le temps d'impulsion étant très inférieur au temps de diffusion thermique (10 ps), la ZAT est considérablement réduite par rapport à un laser nanoseconde. En plus de la grande précision gagnée par la réduction de la zone fondue, en utilisant ce type de laser, il n'y a pas d'écrantage, malgré la très grande pression et la température atteinte pendant l'irradiation. En effet, l'expulsion de la matière et l'absorption sont asynchrones. Quand l'intensité est trop importante, il peut y avoir un claquage optique dans l'air sur le plan de focalisation. Ce claquage dans l'air génère un plasma qui peut venir gêner l'usinage en déformant la forme du faisceau et en induisant des effets d'auto-focalisation, de défocalisation ou de filamentation. Ces effets sont tantôt négatifs, tantôt bénéfiques et le bon contrôle du faisceau par le réglage des paramètres lasers est nécessaire pour optimiser l'usinage [3].

La Fig. 2.5 montre les cratères d'ablation obtenus dans les travaux pionnier de Chikov et al., en 1996, sur de l'acier de 100 μm d'épaisseur pour une impulsion (a) de 200 fs et (b) de 3.3 ns. On peut observer une nette différence de typographie des cratères. Celui obtenu avec une impulsion femtoseconde étant beaucoup plus propre avec une forme cylindrique bien définie. Le cratère obtenu pour une impulsion nanoseconde est très irrégulier avec de nombreuses imperfections dues au re-dépôt de matière pendant l'interaction laser matière.



(a) (b)

Fig. 2.5 : Cratères d'ablation obtenus dans une plaque d'acier de 100 µm d'épaisseur pour, une impulsion à 780 nm (a) de 200 fs, 120 µJ et (b) de 3.3 ns, 1mJ[4]

III. Cas spécifique des matériaux diélectriques

Les lasers à impulsions ultra-courtes sont de plus en plus utilisés en microélectronique pour leurs propriétés, en particulier : l'exploitation de phénomènes d'optique non linéaire, leur fiabilité et leur simplicité de mise en œuvre. Il est à noter qu'en microélectronique les lasers femtoseconde sont particulièrement utilisés pour la structuration de surface, l'ablation sélective et la découpe à haute précision, sans générer de zone affectée thermiquement. Les différents mécanismes concernant l'influence d'impulsions lasers ultra-brèves sur le comportement de matériaux diélectriques et plus particulièrement sur le verre vont être décrit. La Fig. 2.6 met en exergue les différences fondamentales associées à la qualité d'usinage des impulsions lasers longues et ultra-brèves. Pour des impulsions lasers longues, l'usinage est caractérisé par une ZAT étendue avec des redépôts et la formation de microfissures dans le matériau. Pour des impulsions ultra-brèves, la ZAT est minimisée.

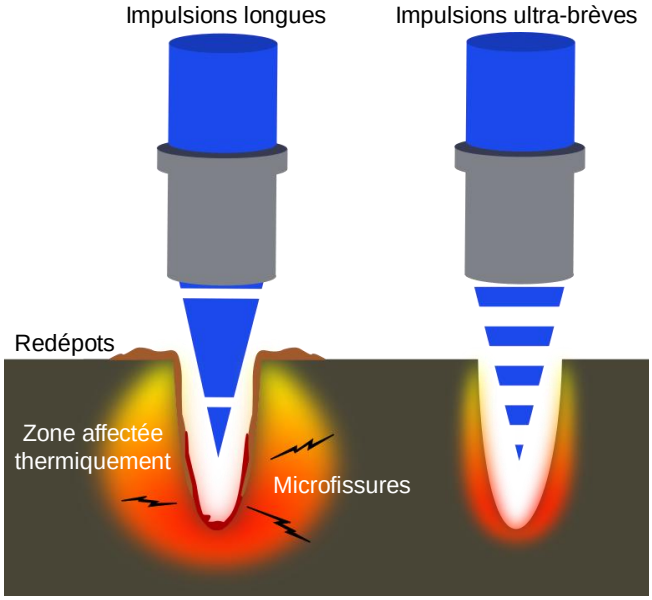


Fig. 2.6 : Différences entre la qualité d'usinage pour l'utilisation d'impulsions longues et d'impulsions ultra-courtes sur la micro-structuration par laser ; (i) pour des impulsions longues, la ZAT est étendue et il y a des redépôts à la surface de la cible ainsi que la formation de microfissures dans le volume du matériau ; (ii) pour des impulsions ultra-courtes, la ZAT est minimisée

Pour des intensités de faisceau importantes, comme celles utilisées au cours de cette thèse, un phénomène de filamentation peut apparaitre. Lors de l'irradiation laser dans des verres, la filamentation se caractérise par la formation d'un filament d'un diamètre de quelques microns à quelques dizaines de microns [5] sur une distance importante. La Fig. 2.7 montre la formation d'un filament de 40 μm de long dans un échantillon de verre AF32, obtenu avec une puissance moyenne de 2 W, un taux de répétition de 36 kHz et une vitesse de balayage de 2 mm/s en UV.

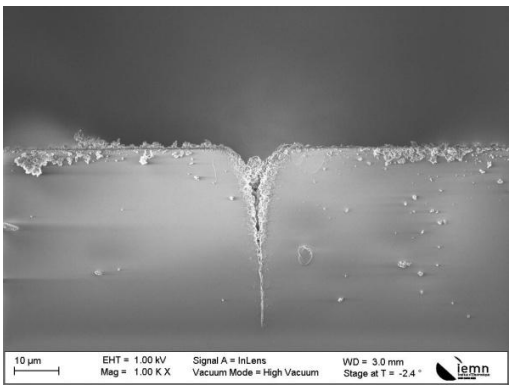


Fig. 2.7 : Photographie MEB d'un filament obtenu dans un substrat de verre AF32 irradié à une puissance moyenne de 2W, un taux de répétition de 36 kHz et une vitesse de 2mm/s en UV

La filamentation laser peut être décrite par l'action de deux effets physiques non linéaires :

i) L'effet Kerr optique qui contrebalance la diffraction du faisceau et tend à le focaliser sur lui-même.
ii) L'ionisation et la création d'un plasma limitant l'intensité du faisceau.

L'effet Kerr joue le rôle d'une lentille d'autant plus convergente que l'intensité laser est grande. Le plasma, créé par ionisation, agit comme une lentille divergente ou bien absorbante en défocalisant le faisceau et joue le rôle d'une lentille d'autant plus divergente que sa densité est élevée. Une compétition entre la focalisation par effet Kerr, la diffraction et la défocalisation par le plasma va entrainer la filamentation. Quand l'intensité du faisceau n'est plus assez grande, le filament s'interrompt. Le phénomène de filamentation sera décrit plus précisément dans la section III.4.

III.1. Modifications structurales du verre irradié par un laser femtoseconde

Les modifications structurales des verres, tels que le changement d'indice ou la densification, qui induit une augmentation du taux de gravure du verre au HF, sont des phénomènes complexes qui ne sont pas encore totalement expliqués aujourd'hui. Nous nous attachons ici à présenter les mécanismes physiques qui régissent les changements structuraux des verres sous l'effet d'une irradiation par laser femtoseconde. Le changement d'indice de réfraction et la densification des verres interviennent suite à la resolidification de ceux-ci quand ils sont irradiés par un faisceau laser femtoseconde. On identifie deux points cruciaux pour la compréhension des changements structuraux des diélectriques : l'excitation des électrons par le faisceau laser et la relaxation du matériau après l'irradiation. Les verres étant des matériaux transparents aux longueurs d'onde considérées, la bande interdite entre la bande de valence et la bande de conduction est supérieure à l'énergie des photons utilisés en régime femtoseconde. L'excitation des électrons, initialement dans la bande de valence, est donc fortement non linéaire et est régie par la photo-ionisation du milieu, suivi d'une ionisation par avalanche et de la création d'un plasma d'électrons libres.

III.1.1. La photo-ionisation

Keldysh [6] décrit les deux régimes que sont l'ionisation multi-photonique et l'effet tunnel comme étant les deux modes de la photo-ionisation. Le paramètre de Keldish permet de savoir lequel des deux modes est dominant. Ce paramètre dépend de la fréquence ω du laser utilisé, de son intensité I au point focal, de la valeur énergétique du gap E_g du matériau irradié, de l'indice de réfraction n de celui-ci, il s'exprime par :

$$\gamma = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{m_e c n \varepsilon_0 E_g}{I}} \tag{2-1}$$

où m_e est la masse de l'électron, c est la vitesse de la lumière et ε_0 est la permittivité du vide. La Fig. 2.8 présente les différents mécanismes de photo-ionisation d'un atome.

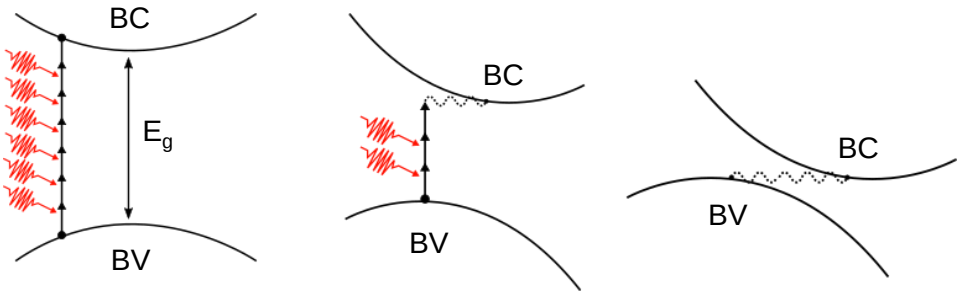


Fig. 2.8 : Les différents mécanismes de photo-ionisation d'un atome

Selon l'intensité du laser on distingue 3 régimes de photo-ionisation :

i) L'ionisation multi-photonique, qui se produit pour une intensité faible du faisceau laser ($I < 10^{14}$ W/cm²), est l'absorption simultanée de plusieurs photons par un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction du matériau.

ii) L'ionisation par effet tunnel, qui se produit pour des intensités supérieures à 10^{18} W/cm², c'est-à-dire pour des champs extrêmement intenses et des longueurs d'onde importantes, modifie la structure de bande des matériaux diélectriques. Dans cette configuration de bande hors d'équilibre, la déformation du potentiel électronique permet, dans un cristal, le transfert d'un électron de la bande de valence jusqu'à la bande de conduction par effet tunnel. Il est à noter que, pour des matériaux à grand gap optique comme les diélectriques à base de SiO_2, l'effet tunnel ne peut exister qu'en régime hors d'équilibre menant à une déformation importante des bandes d'énergies.

iii) Le régime intermédiaire d'ionisation se produit pour des intensités de faisceau comprises entre 10^{14} W/cm² et 10^{18} W/cm². Ce type d'ionisation est une combinaison des deux mécanismes décrit précédemment. L'intensité extrême, rendue disponible par les lasers femtosecondes, permet d'ioniser les atomes des matériaux diélectriques par absorption multi-photonique et effet tunnel en créant des électrons libres dans la bande de conduction de ceux-ci. Cette ionisation est à l'origine de l'ionisation par avalanche qui survient après les effets décrit ci-dessus.

III.1.2. L'ionisation par avalanche électronique

Quand les électrons libres sont suffisamment nombreux dans la bande de conduction du matériau diélectrique considéré un effet d'avalanche électronique se produit dans un second temps. L'avalanche électronique est un mécanisme d'ionisation qui permet l'absorption d'énergie lumineuse et une ionisation par collisions électroniques. L'effet d'avalanche est causé par la répétition de l'absorption d'un photon par

un électron présent dans la bande de conduction qui induit l'ionisation d'un électron de la bande de valence par collision électronique. Deux électrons de même énergie sont obtenus dans le bas de la bande de conduction. La Fig. 2.9 est une représentation de l'ionisation par avalanche dans un cristal.

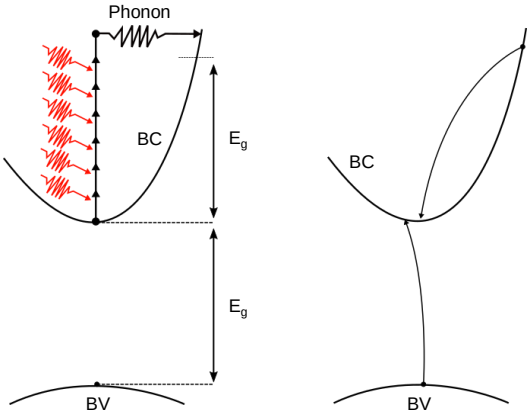


Fig. 2.9 : Représentation de l'ionisation par avalanche dans un cristal

Il est admis aujourd'hui, après les travaux de Stuart [7] et Lenzner [8], que le taux d'ionisation par avalanche β dépend linéairement de l'intensité I du faisceau laser selon :

$$\beta = \alpha I(t) \tag{2-2}$$

Où α est le taux d'ionisation par avalanche de Keldysh [6] et I(t) le profil temporel de l'impulsion laser.
Le modèle aujourd'hui le plus utilisé pour décrire l'évolution temporelle de la densité électronique pendant l'interaction laser diélectrique a été proposé par Li [9].

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha I(t) n(t) + \sigma_k I(t)^k - \frac{n}{\tau} \tag{2-3}$$

avec σ_k la section efficace d'absorption des photons, k doit être le plus petit possible et satisfaire $k\hbar\omega \geq \Delta$, où ω est la fréquence du laser et Δ le gap, $-n/\tau$ décrit la décroissance exponentielle de la densité électronique.
Cette équation permet de décrire, à la fois les phénomènes qui se produisent pendant l'impulsion laser, comme l'absorption multi-photonique ou l'ionisation par effet tunnel, mais aussi de décrire l'ionisation par avalanche électronique, phénomène qui se produit après l'interaction laser matière. L'augmentation du nombre d'électrons due à l'ionisation par avalanche permet la création d'un plasma d'électrons libres alors que la diffusion thermique n'a pas encore commencé.

III.1.3. Le plasma d'électrons libres

Comme pour les métaux, si l'intensité du faisceau laser est suffisante, dans le cas de l'interaction laser diélectrique, la densité électronique du plasma augmente par absorption de l'énergie des photons laser. Le temps d'impulsion étant plus court que la diffusion thermique entre les électrons et le réseau, l'usinage du matériau se fait dans une zone très petite et de façon ultra précise. Le dépôt d'énergie dans le volume du matériau est très localisé, sans dommage collatéral.

III.1.4. La densification et le changement d'indice

La modification de la structure du verre se produit après la relaxation du plasma d'électrons libres. Plusieurs théories sont avancées pour la compréhension des mécanismes physiques qui rentrent en compte dans la densification et le changement d'indice de réfraction des verres après avoir été irradiés par un faisceau laser femtoseconde. On peut citer la densification des verres par changements structuraux, que l'on peut contrôler par spectroscopie Raman [10][11], qui permet d'augmenter l'indice de réfraction de certains verres de l'ordre de 10^{-3} [12][13][14]. La création de défauts et de centres colorés [15][16] peut aussi influencer le changement d'indice de réfraction des verres. La littérature avance aussi que les contraintes mécaniques peuvent agir sur la biréfringence et modifier l'indice des verres[17][18][19] après la fusion et la resolidifiaction ultra rapide de la matière au point focal du laser. Dans certaines publications [20], la fusion et la resolidifiaction du matériau sont comparées à une trempe (quenching). L'accumulation thermique induite par le passage du faisceau laser à certains taux de répétition peut permettre de contrôler la morphologie de la zone modifiée [21][22]. Il est à noter que les changements structuraux induits dans des diélectriques dépendent du matériau employé : verres, verres dopés, silice fondue etc. Même si les mécanismes qui engendrent une densification ou un changement d'indice de verre après irradiation laser sont encore mal compris, les phénomènes cités précédemment rentrent tous plus ou moins en compte. Lors de l'irradiation femtoseconde de verre, plusieurs types de modifications structurales peuvent apparaitre dans le matériau. Le verre est un matériau amorphe composé principalement de SiO_2. Les liaisons Si-O peuvent s'arranger de différentes façons au sein des verres de silice. La structure des liaisons Si-O la plus stable est la structure cyclique à 6 mailles du quartz [23]. Durant l'irradiation laser femtoseconde des effets non linéaires apparaissent grâce à la forte intensité et la courte durée d'impulsion. Cette forte intensité est responsable d'un accroissement localisé de la température et de la pression, ce qui induit un changement de la structure des liaisons Si-O du verre. Les liaisons obtenues sont plus courtes et l'angle $\theta_{Si\text{-}O\text{-}Si}$ entre les liaisons diminue, ce qui conduit à une densification du verre irradié. Les structures cycliques à 6 chainons se transforment en structures à 3 ou 4 chainons. Plus de détails seront donnés au sujet de la densification des verres par irradiation et notamment sur la caractérisation par analyse Raman dans le chapitre IV section II.2.

III.2. L'auto focalisation par effet Kerr

Dans cette partie une analyse chiffrée de l'auto focalisation par effet Kerr basée sur la compensation entre la diffraction et l'auto focalisation va être présentée.

III.2.1. Analyse des conditions de diffraction

Dans un premier temps, considérons la diffraction par une ouverture circulaire pour un faisceau monochromatique de longueur d'onde λ, dont un schéma est présenté Fig. 2.10.

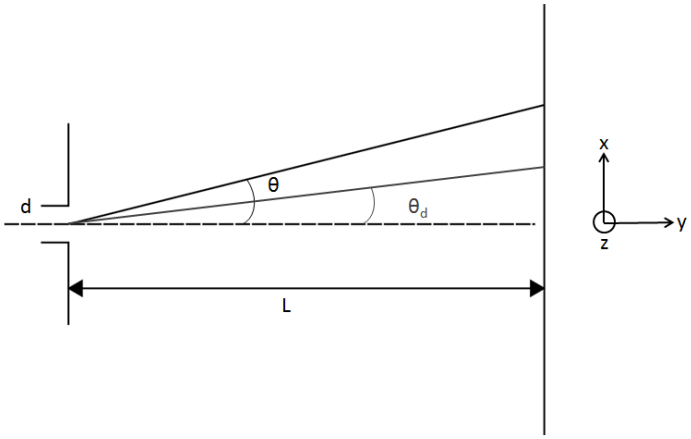
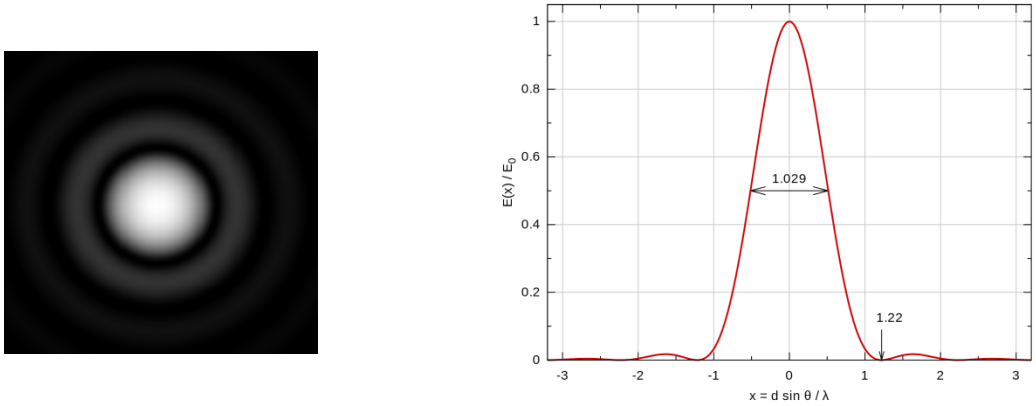


Fig. 2.10 : Schéma de la diffraction par une ouverture circulaire

Quand on se trouve dans la limite de L très grand, en champ lointain, c'est-à-dire dans l'approximation de Fraunhofer, on observe une figure de diffraction sur un écran (Fig. 2.11.a). Pour un faisceau monochromatique, cette figure de diffraction consiste en un ensemble de tâches concentriques.



(a) (b)

Fig. 2.11 : (a) Figure de diffraction d'un faisceau monochromatique, ou tache d'Airy ; (b) coupe de l'éclairement en fonction de la position dans une tache d'Airy [24]

L'intensité de l'éclairement de la tache d'Airy, dont un exemple est présenté Fig. 2.11.b est égale à :

$$I(\beta) = I_0 \left(\frac{2J_1(\pi\beta)}{\pi\beta}\right)^2 \tag{2-4}$$

avec

$$\beta = \frac{dn \sin\theta_d}{\lambda} \tag{2-5}$$

où d est le diamètre de l'ouverture, θ_d est l'angle de diffraction entre la normale au centre de l'ouverture circulaire et le faisceau étudié, λ est la longueur d'onde de la source monochromatique, J_1 est la fonction de Bessel du premier ordre et I_0 est l'intensité au centre de la figure de diffraction.

La fonction I(β) s'annule pour β = 1.22 (premier zéro) de J_1 (πβ)

$$\sin\theta_d = \frac{1.22\lambda}{nd} \sim \theta_d \tag{2-6}$$

Si $L \gg d$ $$\sin\theta_d = \theta_d = \frac{\beta\lambda}{nd} \quad (2\text{-}7)$$

Sachant que $$\sin\theta_d = \frac{r}{L} \quad (2\text{-}8)$$

avec r le rayon dans le plan d'observation et L la distance entre le plan d'observation et le plan de l'ouverture.

$$\beta = \frac{\mathrm{dn}}{\lambda}\frac{r_0}{L} = 1.22 \quad (2\text{-}9)$$

$$r_0 = 1.22\frac{\lambda L}{d} \quad (2\text{-}10)$$

où $r = r_0$ est le rayon du premier disque noir de la figure de diffraction.
Le rayon du premier disque noir constitue la tâche d'Airy. D'autre part, en première approximation de l'effet d'auto focalisation, on peut considérer un faisceau circulaire d'intensité constante dans un milieu où l'indice de réfraction démontre un comportement non linéaire. L'effet Kerr se manifeste par un phénomène non linéaire du troisième ordre qui fait dépendre l'indice de réfraction en fonction de l'intensité optique selon la relation suivante :

$$n(I) = n_0 + \Delta n(I) \text{ avec } \Delta n(I) = \gamma I \quad (2\text{-}11)$$

III.2.2. Analyse de la condition d'auto focalisation

On suppose alors que le faisceau à une intensité suffisamment élevée pour modifier l'indice du milieu de propagation vers une valeur plus élevée. On se retrouve donc dans une configuration de guide optique circulaire de structure cœur/couronne dont l'indice du cœur est déterminé par l'augmentation locale de l'indice de réfraction. La Fig. 2.12 montre la propagation d'un faisceau dans un guide circulaire.

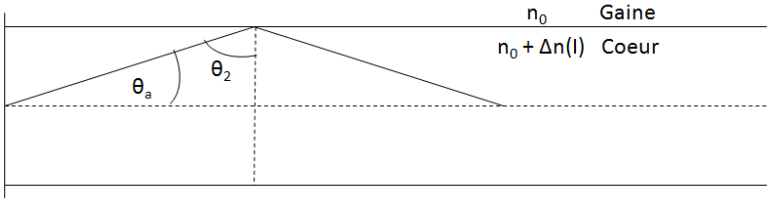


Fig. 2.12 : Schéma de la propagation d'un faisceau dans un guide circulaire

Pour que la lumière soit effectivement guidée dans cette structure de guide, la condition de réflexion totale interne d'une fibre optique doit être considérée. Pour $n_0 + \Delta n > n_0$, la loi de Snell donne un angle limite à l'interface entre le milieu d'indice fort et le milieu d'indice faible qui s'écrit :

$$[n_0 + \Delta n(I)]\sin\theta_2 = n_0 \quad (2\text{-}12)$$

$$\sin\theta_2 = \frac{n_0}{n_0 + \Delta n(I)} \quad (2\text{-}13)$$

En ré-écrivant cette relation avec θ_a, l'angle complémentaire de θ_2, $\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_a$, on obtient :

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_a\right) = \cos\theta_a = \frac{n_0}{n_0 + \Delta n(I)} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta n(I)}{n_0}} \quad (2\text{-}14)$$

Pour des valeurs faibles de θ_a, un développement limité donne :

$$\cos\theta_a \sim 1 - \frac{{\theta_a}^2}{2} \quad (2\text{-}15)$$

Et

$$\frac{1}{1 + \frac{\Delta n(I)}{n_0}} \sim 1 - \frac{\Delta n(I)}{n_0} \quad (2\text{-}16)$$

soit :

$$\frac{2\Delta n(I)}{n_0} = {\theta_a}^2 \quad (2\text{-}17)$$

Compte tenu des calculs précédents, fixant les conditions de guidage par réflexion totale interne d'une part, et de diffraction par une ouverture circulaire d'autre part, l'effet d'auto focalisation est obtenu lorsque le mécanisme de focalisation domine la diffraction. Le seuil qui délimite un équilibre exact entre les deux états permet de déterminer l'intensité critique du faisceau pour remplir cette condition.
On note que l'angle θ_a utilisé pour exprimer la condition de réflexion totale correspond au demi-angle du cône de diffraction. Dans ces conditions, le seuil d'auto focalisation s'exprime par : $\theta_a = \theta_d$

Soit :

$$\frac{2\Delta n(I)}{n_0} = \left(\frac{1.22\lambda}{n_0 d}\right)^2 \quad (2\text{-}18)$$

avec :

$$P = I.S = I.\frac{\pi d^2}{4} \quad (2\text{-}19)$$

et :

$$\Delta n(I) = \gamma I \quad (2\text{-}20)$$

On obtient donc :

$$\frac{2\gamma I}{n_0} = \left(\frac{1.22\lambda}{n_0 d}\right)^2 \quad (2\text{-}21)$$

soit :

$$P_{cr} = \frac{(1.22)^2\lambda^2\pi}{8 n_0 \gamma} = \frac{(1.22\pi)^2\lambda^2}{8\pi n_0 \gamma} \quad (2\text{-}22)$$

Pour des faisceaux lasers Gaussiens, comme ceux utilisés lors de cette thèse, quand n_0 est positif, c'est-à-dire dans la plupart des matériaux, il y a effet d'auto focalisation. En d'autres termes, l'indice de réfraction traversé par le faisceau est plus important en son centre qu'aux extrémités, le faisceau se focalise sur lui-même, il crée une lentille convergente appelé lentille de Kerr. P_{cr} constitue la puissance crête à laquelle il y a claquage optique, quand le faisceau s'effondre sur lui-même. Cet effet est représenté sur la Fig. 2.13.

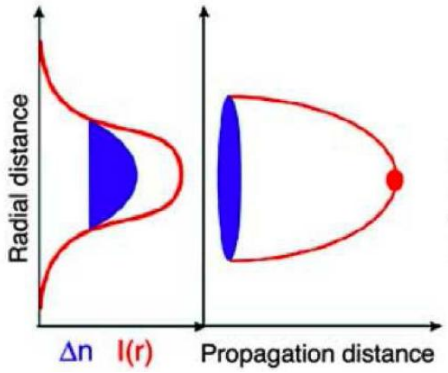


Fig. 2.13 : Schématisation de l'effet Kerr, l'indice de réfraction du milieu est modifié en fonction de l'intensité du faisceau et agit comme une lentille en faisant converger le faisceau sur lui-même. Quand la puissance du faisceau dépasse la valeur critique P_{cr}, le faisceau d'effondre [25]

III.3. Le plasma comme lentille divergente

Les verres de types borosilicates sont transparents aux longueurs d'onde disponibles sur notre source laser et la probabilité que plusieurs photons se combinent et excitent les charges électriques du verre est faible. Toutefois quand l'intensité du faisceau augmente, celui-ci s'affine et l'effet Kerr intervient, l'ionisation multi photonique peut alors se produire. L'ionisation multi photonique génère ainsi un plasma d'électrons libres. A l'inverse de l'effet Kerr, le plasma se comporte comme une lentille divergente. L'intensité étant supérieure au centre du faisceau par rapport aux extrémités, la probabilité que des photons contribuent de manière additive à l'absorption multi photonique y est plus importante. La densité électronique aux frontières du faisceau est grande, ce qui crée un gradient d'indice négatif. Ce gradient défocalise le faisceau telle une lentille divergente [26]. Une illustration de l'effet de défocalisation du faisceau par la création d'un plasma est présentée Fig. 2.14.

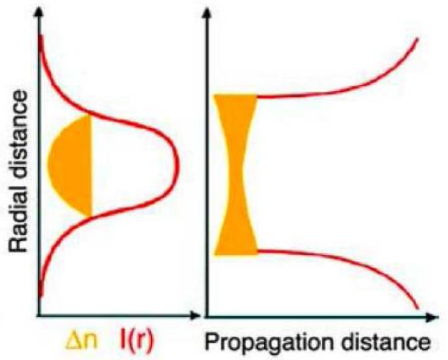


Fig. 2.14 : Schématisation de la divergence due à la formation d'un plasma électronique, l'ionisation initiale du milieu prend place dans le centre du faisceau, où l'intensité est la plus importante, ensuite la création d'un plasma électronique dense va induire une diminution de l'indice de réfraction et causer la défocalisation du faisceau [25]

III.4. La filamentation

Initialement, la filamentation est induit par l'effet Kerr optique combiné à l'absorption multi photonique et à l'ionisation. Néanmoins, la diffraction due à la création d'un plasma électronique contribue aussi à cet effet d'autoguidage du faisceau [26]. En effet, en fonction de l'intensité, quand l'effet Kerr intervient, le faisceau se focalise sur lui-même et, avec les autres effets, le faisceau, se diffracte. Il existe une condition sur l'intensité où la lentille de Kerr ajoutée à la diffraction du faisceau vient

compenser la divergence naturelle de celui-ci. A cette intensité précise, on assiste à la création d'un filament. Le diamètre du filament dans les verres est estimé à quelques microns jusqu'à quelques dizaines de microns [5]. L'effet de filamentation est donc obtenu quand le faisceau, qui se focalise sur lui-même par effet Kerr, augmente l'intensité et la probabilité de combinaison de photons jusqu'à diffraction, causée par la création d'un plasma d'électrons libres du à l'ionisation multi photonique. La Fig. 2.15 schématise cet effet.

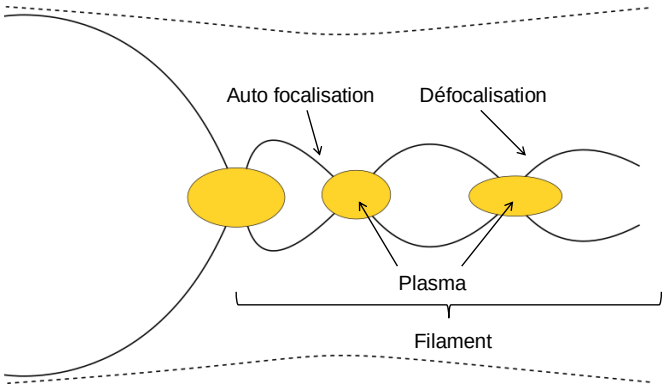


Fig. 2.15 : Schématisation de la filamentation ; dans un premier temps, le faisceau se focalise sur lui-même grâce à l'effet Kerr, puis il y a formation d'un plasma électronique qui induit une diffraction du faisceau, la compensation de ces deux effets conduit à la formation de filaments [26]

III.5. Régime d'interaction laser femtoseconde dans les verres de silice fondue

Dans les verres de silice fondue, on peut observer trois régimes d'interaction avec un faisceau laser femtoseconde. Le premier régime d'interaction induit des modifications de la structure des verres sans que le matériau ne soit ablaté. Par exemple une augmentation de l'indice de réfraction, et/ou de la susceptibilité chimique peut être observée [27]. Ce régime se situe sous une valeur d'énergie seuil qui dépend des paramètres lasers mais aussi des optiques utilisées. Le deuxième régime d'interaction conduit à la formation de motifs auto organisés [28][29][30][31] et le dernier régime intervient pour de fortes énergies et mène à l'observation de trous [32] et à l'ablation du matériau.

IV. État de l'art du micro-usinage laser du verre

Comme nous l'avons discuté dans les sections précédentes, les lasers femtoseconde ont une capacité unique, de par le temps de l'impulsion et l'énergie mise en jeu à chaque impulsion, qui est fondamentalement différente de celle produite par des lasers à impulsions longues, à usiner des matériaux en tout genre et plus particulièrement le verre. Le fait que des effets d'optique non linéaire puissent apparaitre au point focal du faisceau par absorption multi phonique permet de modifier, localement et avec une excellente résolution spatiale, la structure du verre pour obtenir des composants en trois dimensions. Dans cette partie, un état de l'art des techniques de fabrication et de différents composants pouvant être obtenus par micro usinage par laser femtoseconde dans du verre est présenté. Les caractéristiques principales de l'effet d'un faisceau laser femtoseconde sur la silice fondue et d'autres types de verres (photosensibles, borosilicates etc.) qui peuvent être intéressants pour la fabrication de micro systèmes sont ici résumées. En effet, de par leurs propriétés exceptionnelles, telles que l'inertie chimique, la résistance mécanique mais aussi leur faible prix et leur grande abondance [33], les verres sont des

matériaux particulièrement attrayants et avantageux pour la fabrication de micro systèmes, que ce soit en optique, par exemple pour la fabrication de fibres utilisées pour les télécommunications, en chimie, en électronique ou en biologie. Pour la fabrication de microsystèmes, les deux premiers régimes d'interaction décrits précédemment peuvent être intéressants, notamment le premier, où la densification mène au changement de l'indice de réfraction et à l'augmentation de la susceptibilité chimique des matériaux irradiés. Plus particulièrement, l'accent est porté sur des composants fabriqués par irradiation laser femtoseconde suivi d'une attaque chimique (FLAE Femtosecond Laser Assisted Etching), le plus souvent au HF. La technique WAFLD (Water Assisted Femtosecond Laser Drilling), où les verres à usiner sont placés en contact avec de l'eau, sera aussi présentée. Ces techniques de fabrication permettent de mettre en œuvre l'intégration monolithique de fonctions dans un même matériau par le concept de 'system-material' (traduction littérale, matériau-système). En d'autres termes, il est possible d'utiliser un substrat unique (en verres de silice fondue ou en verre borosilicate etc.) et de modifier localement ces propriétés, pour en faire un système complexe possédant des attributs multiples. Ce concept permet de diminuer la complexité de fabrication et d'améliorer les performances et la fiabilité des microsystèmes. On n'utilise plus le matériau comme une partie d'un composant, mais le matériau devient le composant, ce qui permet de diminuer le nombre d'étapes d'assemblage et donne la possibilité de stimuler les étapes de conception. Ce concept a été utilisé en micro-ingénierie, où un laser peut être utilisé pour travailler des couches de matériaux et introduire des fonctions actives et passives afin de fabriquer des alliages à mémoire de forme [34].

IV.1. Techniques de fabrication des composants

IV.1.1. Fabrication de structures en 3D

La focalisation d'un laser femtoseconde dans le volume de verre permet de modifier la structure de celui-ci. Cette modification de structure engendre une densification du matériau et augmente son taux de gravure chimique, notamment au HF [35]. La technique FLAE permet donc d'obtenir des structures 3D, plus ou moins grandes, dans du verre qui aura été préalablement irradié au laser, puis trempé dans une solution aqueuse acide, le plus souvent du HF avec un taux de concentration de 5 à 10 %. Cette technique est illustrée en Fig. 2.16. L'acide grave sélectivement le verre modifié par le faisceau laser.

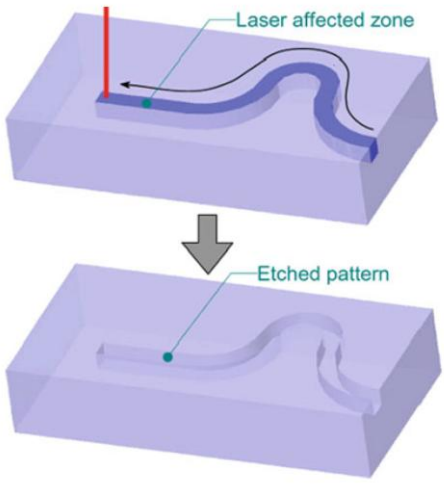


Fig. 2.16 : Technique de fabrication de micro canaux par FLAE, irradiation laser de la zone à structurer, puis gravure chimique de l'ensemble, la zone irradiée est gravée préférentiellement [2]

Des verres photosensibles [36][37][38] , nécessitant l'utilisation de traitement thermique, ou des verres de silice fondue [39][35] peuvent être utilisés pour obtenir des composants micro-fluidiques par cette technique. Les verres photosensibles sont des verres dopés, qui ont été développés pour être microstructurés en surface à l'aide de radiation UV. Originellement c'est Stookey de Corning qui développa ce type de verre [40]. Il existe aujourd'hui un grand nombre de verres photosensibles (~5000), l'un des plus commercialisé est le Foturan [41], fabriqué par Schott. Il possède un module de Young important, un faible coefficient d'absorption dans le spectre visible, il a une bonne stabilité chimique et est biocompatible. Ce verre est notamment utilisé pour la fabrication de microsystèmes tels que des détecteurs de gaz [42] ou des microréacteurs [43]. Le foturan est un verre de lithium aluminosilicate dopé à l'argent et au cérium. Le traitement thermique qui suit une exposition UV de ce verre permet une gravure au HF de la partie exposée plus rapide que la matrice du verre. Il apparait que les verres photosensibles ont plusieurs avantages pour l'utilisation du FLAE. En effet, pour ce type de verre l'intensité laser nécessaire pour modifier leur structure est inférieure à celle nécessaire pour modifier la structure des verres de silice fondue. De plus, l'augmentation du taux de gravure chimique sera plus importante dans les verres photosensibles. A contrario, les verres de silice fondue ont l'avantage de ne pas avoir besoin de traitement thermique et offre de meilleures propriétés optiques comme leur large spectre d'utilisation en transmission. Dans le domaine de la photonique, cette technique peut être utilisée pour la fabrication, dans des verres photosensibles, de micro-miroir, ou de microlentilles. L'utilisation du HF comme acide pour la gravure chimique présente le problème d'obtenir des angles biseautés sur les tranches des composants fabriqués, ce qui peut être un problème, notamment pour l'écoulement des fluides en micro-fluidique. Pour pallier ce souci de fabrication, il est possible d'utiliser des acides avec une meilleure sélectivité et des taux de gravure moins important qu'avec le HF, par exemple avec le KOH [23].

L'utilisation de la technique WAFLD est aussi rapportée dans la littérature. Comme on peut l'observer en Fig. 2.17, cette technique consiste à usiner l'échantillon par sa face arrière alors que celle-ci est en contact avec une solution d'eau distillée pendant l'ablation laser [44]. L'eau distillée permet de retirer efficacement les débris dus à l'ablation. Le WAFLD permet l'obtention de canaux longs et étroits mais nécessite l'emploi d'objectifs de microscope avec une ouverture numérique importante. Pour des canaux de plusieurs centaines de microns, les débris peuvent cependant être difficiles à enlever. Cela dit des canaux d'une profondeur de 1 mm ont été fabriqués par plusieurs groupes de recherche [45][46]. Ce problème peut être régler par l'utilisation de verres microporeux et l'utilisation de post recuit [47][48]. Les pores contenus dans ce type de verres permettent une meilleure évacuation des débris pendant l'ablation et sont résorbés avec un traitement thermique après l'irradiation laser.

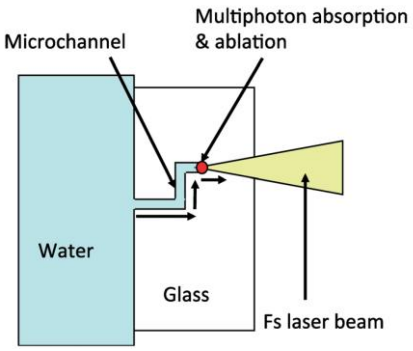


Fig. 2.17 : Schéma du principe de la technique WAFLD pour la fabrication de micro structures dans du verre [49]

IV.1.2. Fabrication de guides optiques

La densification résultant de l'irradiation laser femtoseconde de verre, induit une modification de l'indice de réfraction [12], notamment grâce à l'absorption multi photonique [50][12] au point focal. En utilisant des objectifs de microscope avec des ouvertures numériques importantes (NA=0.5-0.9) pour focaliser un faisceau laser femtoseconde dans le volume de verres de silice fondue, ou de verres photosensibles, et en translatant l'échantillon, des guides optiques peuvent être obtenus après optimisation des paramètres lasers. Plusieurs études ont été menées pour la fabrication de composants optiques actifs et passifs [2][51] en utilisant l'irradiation directe de verres. Cette technique est utilisée pour fabriquer une grande variété de composants optiques dans des verres mais aussi dans des matériaux moins conventionnels comme le niobate de lithium. En opto-micro-fluidique, cette technique de fabrication de guides optiques, est utilisée pour l'obtention de composants plus complexes, à l'aide d'autres techniques comme la FLAE pour fabriquer des canaux. Les propriétés des guides optiques inscrits par irradiation laser dans des verres dépendent à la fois des paramètres lasers utilisés, comme la durée de l'impulsion, le taux de répétition, la fluence, mais aussi des optiques utilisées pendant l'inscription. En effet, la LAZ (Laser Affected Zone) peut être de taille et de forme différentes, notamment en fonction de l'ouverture numérique utilisée. L'ouverture numérique des lentilles a donc un effet particulièrement important, car, c'est ce paramètre qui affecte la distribution d'énergie autour du point focal du spot laser. De façon générale, la LAZ possède une forme ellipsoïdale où la taille dans la direction de propagation du faisceau dépend de la profondeur de champ des optiques utilisées durant l'irradiation laser. Des techniques de caractérisation existent pour déterminer la taille et la forme des guides optiques obtenus par irradiation laser. On peut citer la technique de cartographie de l'indice de réfraction ou des techniques basées sur l'imagerie thermique [52][53].

IV.1.3. Polymérisation à deux photons

Il est possible de fabriquer des microcomposants en utilisant la polymérisation à deux photons (TPP Two Photons Polymerysation) [54][55]. Cette technique consiste à irradier avec un faisceau laser femtoseconde une couche de résine photosensible. A l'endroit où la distribution d'énergie est la plus forte, c'est-à-dire au centre du point focal, l'intensité est particulièrement importante et peut dépasser la limite TPP, où deux photons vont être absorbés et vont polymériser la résine[56][57].Dans ces conditions, il est possible de réaliser des structures en 3D à partir d'une résine liquide qui va passer dans sa phase solide lors de l'irradiation laser. Cette technique est par exemple utilisée pour l'impression 3D avec une précision nanométrique. La combinaison de la TPP et du FLAE permet d'obtenir des bio-composants complexes, possédant de multiples fonctions, contenant des nanostructures 3D en polymères dans des microstructures en verre, obtenues après absorption laser et gravure chimique [58].

IV.1.4. Applications en micro fluidique

De multiples applications existent pour le micro usinage du verre par laser femtoseconde. Par exemple, la technique de FLAE est très utilisée pour la fabrication de micro canaux pour la micro fluidique. Une application particulièrement intéressante des composants 3D de micro-fluidique est l'observation de microorganismes telle qu'Euglena gracilis, une espèce de microorganismes, le plus souvent unicellulaires, flagellés [59][60], illustrés en Fig. 2.18.a. En effet, l'observation de ces organismes est particulièrement compliquée étant donné leur rapidité de déplacement. Pour procéder à l'observation d'Euglena gracilis, un micro canal avec des tranches rectangulaires polies a été fabriqué, pour capturer des

images propres et nettes, dans lequel les microorganismes ont été insérés. Le confinement des organismes dans le micro canal a permis, pour la première fois, l'obtention d'images (Fig. 2.18.b) satisfaisantes pour décrire leur système de propulsion.

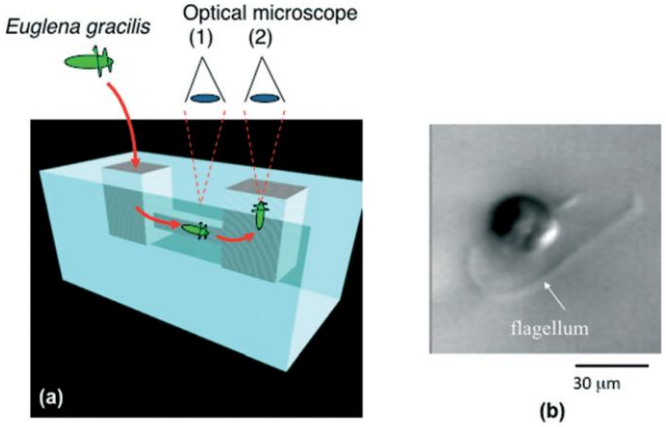


Fig. 2.18 : (a) Illustration de micro aquarium fabriqué par FLAE pour l'observation d'Euglena gracilis et (b) observation du microorganisme en mouvement dans le système de micro fluidique

Une autre application est le tri de cellules [61], schématisé en Fig. 2.19. Par exemple, il peut être utile de séparer certaines cellules d'un mélange hétérogène pour une étude statistique, la création de cultures cellulaires ou dans le domaine de la génétique. La technique FLAE est donc utilisée pour fabriquer des tranchées en forme de 'T' avec des micro-canaux reliés par de multiples canaux étroits, qui fonctionnent comme un filtre et permettent le tri des cellules en fonction de leurs caractéristiques.

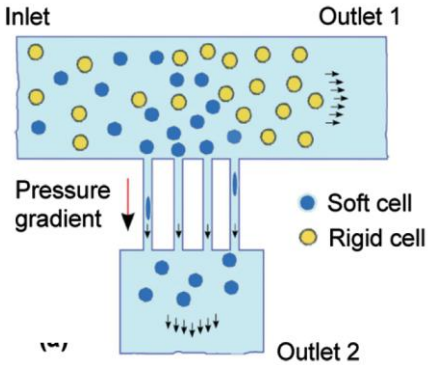


Fig. 2.19 : Schéma d'un système de filtrage de cellules [49]

Le FLAE est aussi utilisé pour concevoir des systèmes de régulation d'écoulement des fluides tel des micro-pompes ou des micro-valves intégrées dans des composants micro fluidiques [62][63]. Le WAFLD est une technique utilisée pour fabriquer des composants plus complexes. En effet, la non utilisation d'acide de gravure après l'irradiation laser permet la formation de motifs particulièrement fins et élaborés [64]. Des micro-canaux avec des structures hélicoïdales, comme présentés en Fig. 2.20, peuvent être conçus, par exemple pour le mixage simultané de plusieurs liquides.

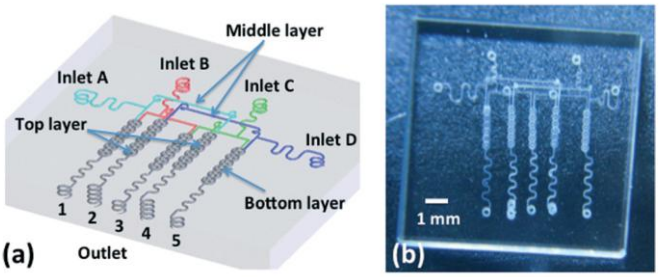


Fig. 2.20 : (a) Schéma et (b) photographie d'un système micro fluidique pour le mélange de liquide, obtenu par WAFLD

IV.1.5. Applications en opto-fluidique

En opto-fluidique, le FLAE est utilisé pour concevoir des systèmes 3D plus ou moins complexes et inscrire des guides optiques, intégrés dans les mêmes puces de verre. Des systèmes plutôt simples consistent en un micro-canal comportant sur une des tranches un guide optique. Ces systèmes permettent, par exemple, de mesurer la concentration de liquide [65][66], de détecter des microorganismes [67][68][69][70] ou encore d'acquérir des images de populations d'algues [71][72][73]. La mesure de l'indice de réfraction de liquide est aussi possible en utilisant des systèmes opto-micro-fluidiques [74].
Un système d'opto-micro-fluidique intéressant, présenté en Fig. 2.21, se compose d'un interféromètre Mach-Zehnder, obtenu par structuration laser dans le volume d'un substrat de verre associé à un composant de micro-fluidique fabriqué par FLAE, qui permet une détection sans marqueur et résolue spatialement [65].

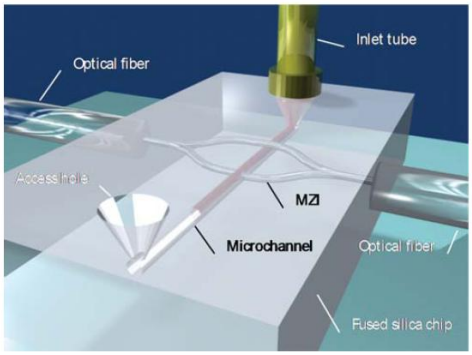


Fig. 2.21 : Illustration d'un composant d'opto micro fluidique, comportant un interféromètre Mach-Zehnder obtenu par irradiation laser, et un micro canal obtenu par FLAE [65]

L'excellente résolution spatiale de la technique FLAE dans les verres photosensibles permet l'intégration de microcomposants optiques, comme des microlentilles, dans les composants d'opto-micro-fluidique [75][50][76]. Cela permet l'obtention de systèmes, composés d'un guide optique et de deux microlentilles, pour la bio détection. Une dernière application de l'utilisation de verres photosensibles est le contrôle de la transmission de la lumière visible en les utilisant comme filtres optiques. Il est possible d'obtenir de tels filtres par irradiation femtoseconde directe du verre et par traitement thermique, qui permet une cristallisation du matériau irradié [77]. Des fonctions micromécaniques peuvent aussi être intégrées à des substrats de verre notamment pour des applications 'Lab-on-Chip' (laboratoire sur puce) [78]. La Fig. 2.22 présente un système de micro-fluidique fabriqué par FLAE, composé de microplaques permettant de contrôler la direction du flux d'un liquide dans un microréacteur [62].

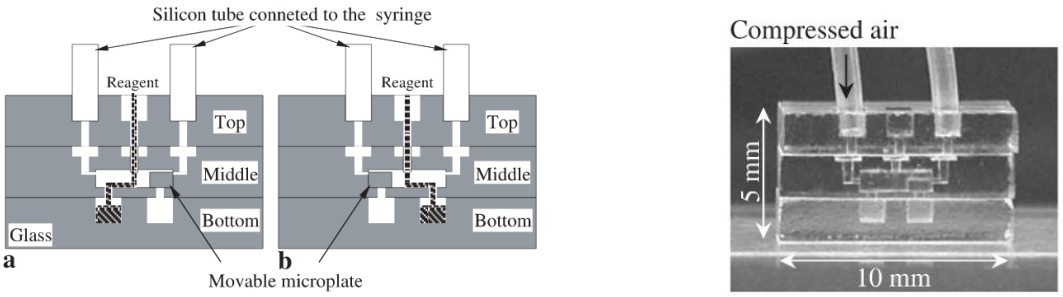


Fig. 2.22 : (a) Schéma du fonctionnement des micro-valves dans un microréacteur ; (b) photographie du microréacteur avec les deux micro-valves fabriquées par FLAE [62]

IV.2. Applications en photonique, les composants passifs

Depuis 1996, année de la première fabrication de guides optiques par irradiation directe de verre avec un laser femtoseconde par Hirao et al. [12] de nombreux composants photoniques passifs ont été conçus et fabriqués par cette technologie. Les jonctions 'Y' sont des composants optiques passifs importants particulièrement utilisés en particulier comme diviseurs de puissance optique et dans les interféromètres Mach-Zehnder pour la détection. En 1999, Homoelle et al. ont fabriqué les premières jonctions 'Y' dans de la silice fondue par irradiation directe avec un faisceau laser ultra bref [79]. Ces premières jonctions 'Y' permettaient de diviser un faisceau laser à 514.5 nm en deux avec un ratio d'intensité de 50/50. Plus récemment, des jonctions 'Y' avec 'n' branches ont été développées, notamment par Liu et Della Valle, respectivement en 2005 et 2009 [80][81]. Le schéma d'un diviseur de puissance 1-8 est présenté en Fig. 2.23.

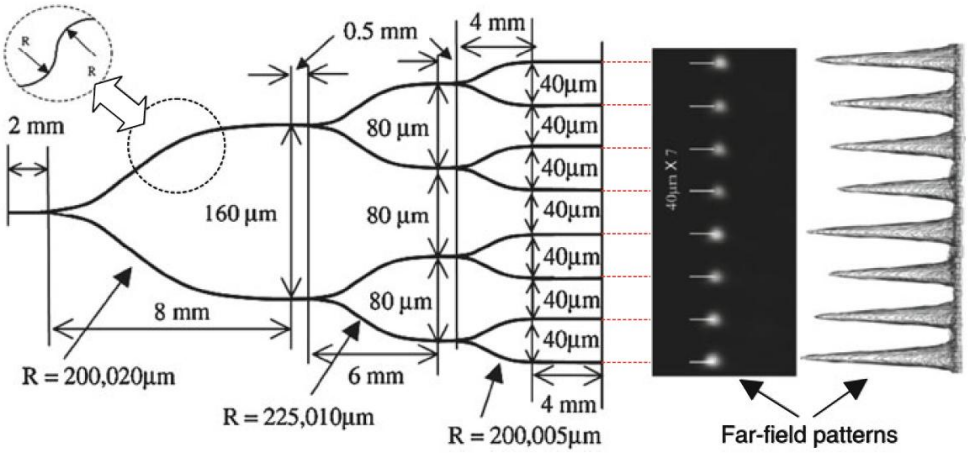


Fig. 2.23 : Schéma d'un diviseur de puissance 1-8 composé de 7 jonctions 'Y' [80][81]

Ces travaux ont ouvert la voie à la fabrication de jonctions 'Y' en 3D et non plus dans le même plan. Nolte et al. [82] ont fabriqué un diviseur 1-3 en 3D, dont le schéma est présenté en Fig. 2.24, dans de la silice fondue avec des ratios de 32/33/35 avec des pertes de propagation estimées à 0.8 dB/cm.

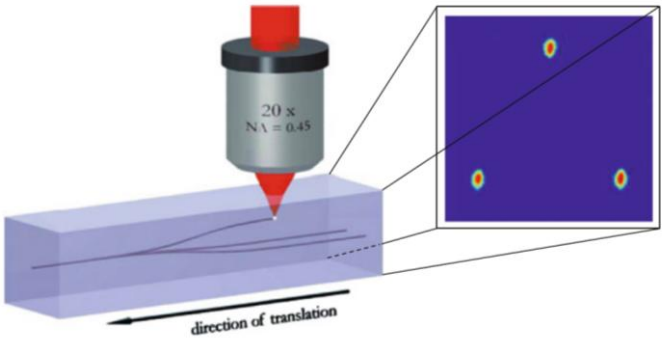


Fig. 2.24 : Schéma d'un diviseur de puissance 1-3 en 3D [82]

Pour fabriquer des composants photoniques plus complexes tels que des interféromètres Mach-Zehnder (MZI), des détecteurs ou des multiplexeurs de longueurs d'onde, l'accent a été porté sur le développement des coupleurs directionnels. Ces composants d'optique permettent un transfert de puissance par ondes évanescentes entre des guides rapprochés et sont des composants d'optique particulièrement importants. Le premier coupleur directionnel par écriture laser a été fabriqué en 2001 [83], conçu pour fonctionner dans le spectre visible, à 633 nm, constitué d'un guide droit et d'un guide en trois segments courbés. Watanabe et al. [84] ont conçu les premiers coupleurs directionnels en 3D et ont démontré pour la première fois le démultiplexage de longueurs d'onde, avec une source large bande (450-700 nm), en utilisant l'inscription directe par laser femtoseconde dans du verre de silice fondue, comme on peut l'observer sur la Fig. 2.25.

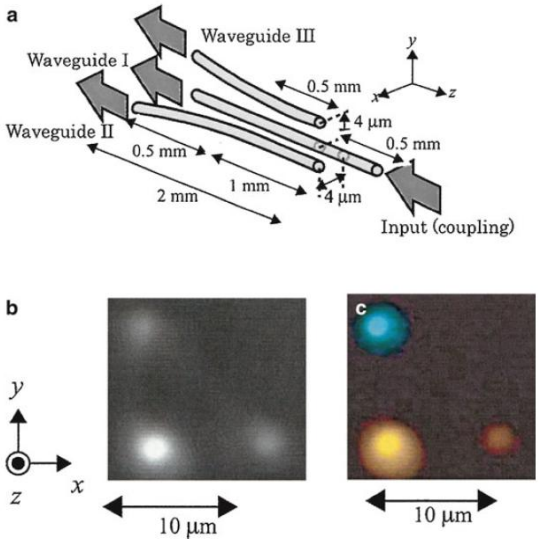


Fig. 2.25 : (a) Schéma d'un coupleur directionnel en 3D ; Profile de mode obtenue à (b) 633 nm et (c) en utilisant une source supercontinum (450-700nm) [84]

Des caractérisations à 633 nm ont été réalisées par Minoshima et Al. [85] pour des coupleurs directionnels, avec des longueurs de guide multiples, obtenus dans du verre Soda lime pour lame de microscope. Ces caractérisations ont montré la grande sensibilité des coupleurs en fonction des conditions d'écriture des guides optiques. Szameit et Al. [86] ont étudié en détail l'effet de l'orientation de l'angle entre les guides optiques couplés. Ils ont montré que le coefficient de couplage est dépendant de l'orientation angulaire des guides. Les coupleurs directionnels peuvent être utilisés dans des applications d'informatique

quantique [87]. Osselame et Al. [88] ont produit les premiers coupleurs directionnels en 'X' fonctionnant aux longueurs d'onde télécoms. Le multiplexage par répartition en longueurs d'onde dans le proche infrarouge (WDM Wavelength Division Multiplexing) a aussi été démontré. Des coupleurs directionnels ont été fabriqués par écriture laser dans d'autres types de verre, tel que des verres borosilicates et fonctionnent aux longueurs d'onde télécoms [89] avec de bonnes performances.

La combinaison de ces blocs optiques de base que sont les jonctions 'Y' et les coupleurs directionnels, permet d'obtenir des composants photoniques plus complexes tels que des interféromètres Mach-Zehnder, largement utilisés pour la détection [65] et le multiplexage de longueurs d'onde. Comme le montre la Fig. 2.26, le premier MZI fabriqué par irradiation directe d'un faisceau laser femtoseconde dans un substrat de verre est constitué de deux coupleurs en 'X' en cascade [90].

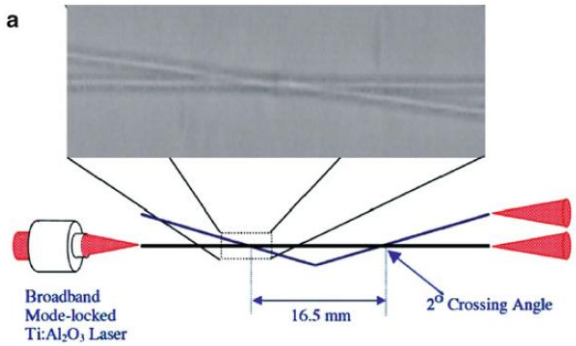


Fig. 2.26 : Schéma et photographie d'un MZI [90]

D'autres composants passifs de photonique peuvent être réalisés à l'aide de l'inscription directe par laser dans des verres. On peut notamment citer la fabrication de MMI (Multi Mode Interference coupler),ou d'autres composants en 3D [91], comme des cavités en anneaux 3D [92].
Les MMI sont des guides optiques multimodes rectangulaires permettant la division de puissance [93]. Un schéma de MMI et des caractérisations optiques obtenues pour différentes longueurs d'ondes sont présentés en Fig. 2.27.

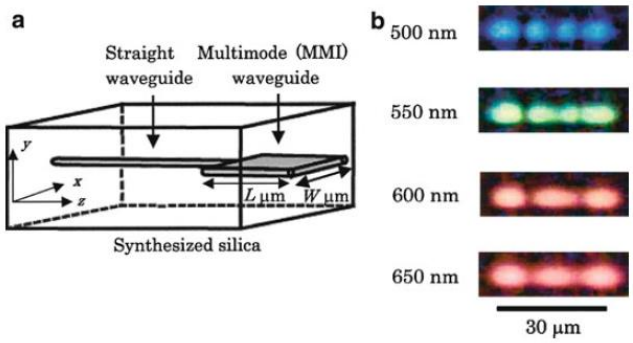


Fig. 2.27 : (a) Schéma d'un MMI, (b) caractérisations optiques en champs proche pour différentes longueurs d'onde [94]

V. Présentation de la plateforme de micro-usinage

V.1. Laser fibré dopé Ytterbium

Cette partie présente de façon hiérarchique la chaine laser utilisée pendant cette thèse. Elle permet donc de présenter les différents paramètres importants de l'architecture du laser et son mode de fonctionnement. A partir d'un laser fibré dopée Ytterbium à 1030 nm, il est possible de générer la seconde et la troisième harmonique à l'aide d'un module de doublage-triplage de fréquence, qui sera décrit ainsi que la génération d'impulsions ultra brèves à l'aide d'une technologie d'amplification à fibre à dérive de fréquence (FCPA Fiber Chirped Pulse Amplification) qui sera développée dans les grandes lignes.

V.1.1. La génération des impulsions femtosecondes

Le laser utilisé pour les expérimentations de cette thèse est composé d'une source Tangerine d'Amplitude Systèmes. La source Tangerine est une source impulsionnelle à fibre dopée Ytterbium. La durée des impulsions délivrées par le système ajustable entre 300 fs et 10 ps à la longueur d'onde de 1030 nm, dans le proche IR. L'énergie de chaque impulsion est de 100 µJ à 200 kHz. La puissance moyenne maximale délivrée par la source est de 20W. L'architecture de laser est présentée en Fig. 2.28.
Pour l'amplification des impulsions ultra brèves provenant de l'oscillateur, celles-ci doivent être étirées dans le temps à l'aide d'un étireur. L'énergie des impulsions est augmentée dans un milieu amplificateur. Les impulsions passent alors dans un compresseur, ce qui leurs permet de retrouver leurs durées initiales. Afin d'obtenir des impulsions ultra-brèves avec des puissances crêtes élevées (quelques centaines de MW) notre système laser est équipé d'une technologie innovante, d'amplification à dérive de fréquence (FCPA).

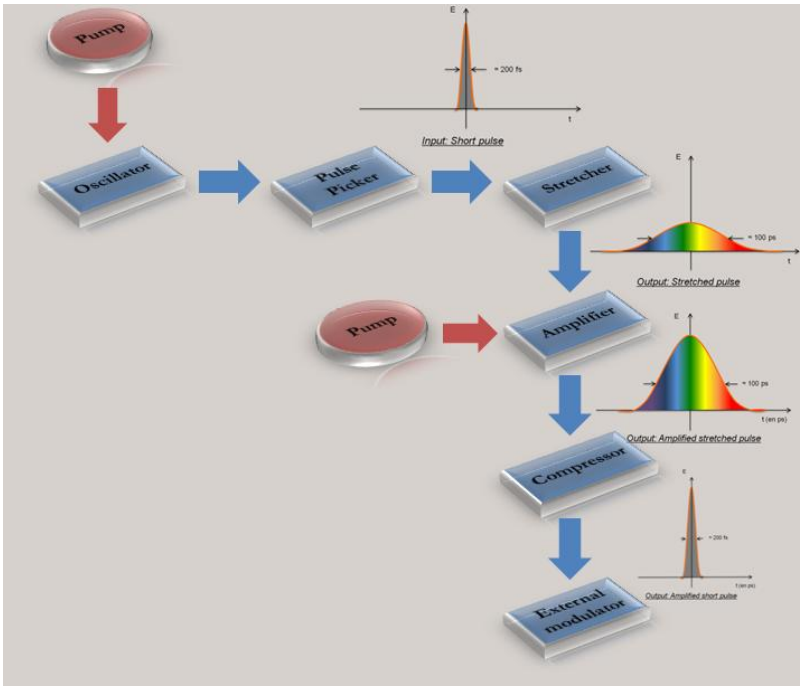


Fig. 2.28 :Architecture du laser basée sur la FCPA [95]

Pour bien comprendre le mode de fonctionnement de la source laser Tangerine, les différents éléments composant le FCPA sont décrits ci-après :

L'oscillateur permet la génération d'impulsions stables d'une fréquence de 41,5 MHz. Pour être en régime impulsionnel, il faut que les modes longitudinaux qui coexistent soient mis en phase : c'est le verrouillage de modes, sans lequel un régime continu est obtenu. Il est à noter que le nombre de modes dans la cavité dépend de la largeur spectrale du milieu amplificateur, ici une fibre dopée Ytterbium. Un miroir semi-conducteur absorbant saturable (SESAM = SEmiconductor Saturable Absorber Mirror) qui module le gain est placé dans la cavité pour réaliser le verrouillage des modes. Les modes longitudinaux sont synchronisés en phase et génèrent un train d'impulsions.
En sortie de l'oscillateur est placé un modulateur acousto-optique (Acousto-Optic Modulator, AOM), le Pulse Picker (PP). C'est un interrupteur optique qui permet de sélectionner des impulsions pour l'amplification. La sélection d'impulsions mène à un train de fréquences réduites par rapport à celui de l'oscillateur. Le PP est commandé électriquement.
Basé sur un réseau de diffraction, la technique d'étirement consiste à rallonger temporellement l'impulsion en étalant dans le temps ses différentes composantes spectrales. Autrement dit, l'étirement est une différence de vitesse de groupe positive, ou dérive de fréquence.
L'amplification est réalisée dans une fibre avec un cœur en silicium, dopée à l'Ytterbium. La fibre permet de s'affranchir d'une architecture complexe d'amplificateur car ce milieu possède une très bonne efficacité de conversion.
En sortie de source, le taux de répétition des impulsions peut être modulé en divisant la fréquence du PP grâce à un second AOM, le modulateur externe.

V.1.2. L'utilisation de la seconde et troisième harmonique

Un module de doublage-triplage de fréquence est placé à la sortie de la source : c'est la boîte de génération d'harmonique. Ce module a été développé par Amplitude Systèmes, il permet de doubler ou tripler la fréquence du laser.Le module est présenté en Fig. 2.29.
Il est possible, grâce à ce module, d'utiliser la longueur d'onde GR (515 nm) ou la longueur d'onde UV (343 nm). Pour la ligne GR, le faisceau laser IR initial est dévié et passe à travers un cristal non linéaire puis est réfléchi par des miroirs dichroïques pour ne sélectionner que la longueur d'onde souhaitée, c'est le doublage de fréquence.
Pour utiliser la ligne UV il faut doubler la fréquence et recombiner ce faisceau ainsi créé avec le faisceau initial. En faisant passer dans deux cristaux non linéaires le faisceau IR et après réflexion de celui-ci dans des miroirs dichroïques, on peut obtenir la troisième harmonique de la fréquence centrale.

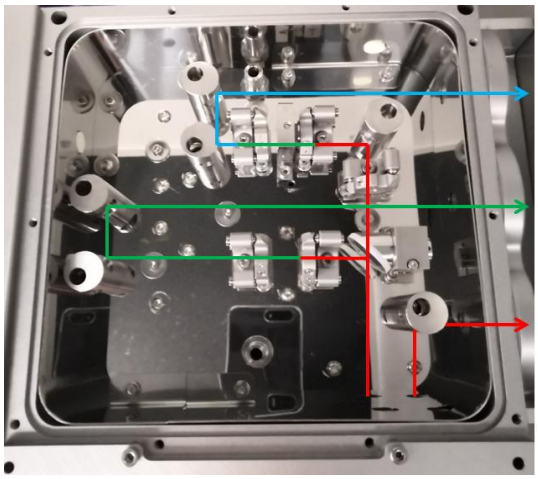


Fig. 2.29 : Photo de la boîte d'accordement des harmoniques du laser

Des hublots à haute tenue de flux sont situés à la sortie de chaque ligne. A la sortie de la tête laser, une puissance moyenne de 2W et une énergie de 10 µJ par impulsion est disponible pour la ligne UV et une puissance moyenne de 4W avec une énergie par impulsion de 20 µJ est disponible pour la ligne GR. Pour la ligne IR, la puissance moyenne est de 20 W pour une énergie par impulsion de 100 µJ.

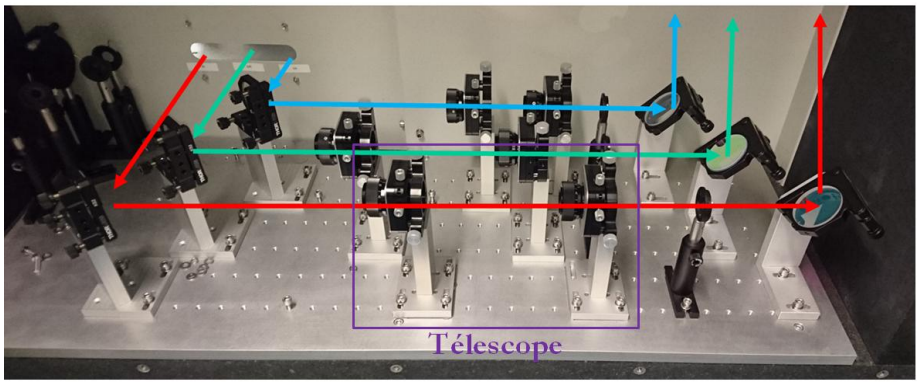


Fig. 2.30 : Chemins des faisceaux de longueurs d'onde disponibles après la boite de génération d'harmoniques

V.2. Mise en forme du faisceau

Après la boite d'harmoniques, le chemin optique est composé de plusieurs éléments essentiels :

i) Le faisceau collimaté d'environ 1 mm de diamètre est dilatée à ~ 8 mm par un télescope.
ii) Un atténuateur optique basé sur une lame demie onde, une lame polarisante et un puits de lumière.
iii) Une tête de trépanation du type prisme de Risley permettant la déviation de faisceau selon une trajectoire de baïonnette.
iv) Une lame quart d'onde permettant de transformer la polarisation linéaire en polarisation circulaire.
v) Un scanner permettant la déviation rapide du faisceau.

Pour chaque ligne, le faisceau dilaté peut être envoyé dans une lentille f-theta télécentrique qui permet au faisceau d'arriver de façon normale sur tout le plan focal. La Fig. 2.31 montre le schéma de fonctionnement d'une telle lentille. Le spot laser avec les lentilles f-theta télécentrique a un diamètre de l'ordre de la dizaine de microns.

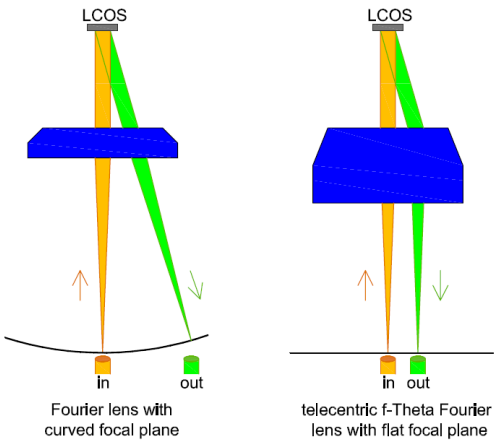


Fig. 2.31 : La lentille f-theta télécentrique permet de focaliser le faisceau de façon normale sur le plan focal [96]

Le faisceau dilaté peut aussi être envoyé dans des lentilles fixes. De base les lentilles fixes UV, GR et IR ont une distance focale de 100 mm. Pour pouvoir travailler de façon plus précise et avec une fluence plus importante, par exemple pour l'inscription de guides optiques dans des échantillons de verre borosilicate, plusieurs objectifs de microscope Thorlabs sont disponibles pour la ligne UV. Un LMU NUV 20× avec une ouverture numérique (NA) de 0,4 et un LMU NUV 40× avec NA = 0,5 sont disponibles. L'influence de l'ouverture numérique sur le micro usinage de verre, notamment pour la fabrication de guides optiques et de tranchées sera présentée dans le chapitre 4. La taille du spot au point focal est de l'ordre de 1 à 5 µm avec ces objectifs de microscope.

V.3. Propriétés spatiales du faisceau laser

V.3.1. Équations de propagations

Les composantes de propagation du champ électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ d'une onde lumineuse sont régis par quatre lois [97] : Maxwell-Gauss, Maxwell-Thomson, Maxwell-Faraday et Maxwell-Ampère. On peut en déduire l'équation de propagation de Helmholtz pour connaitre les composantes spatiales et temporelles de chacun des champs électriques et magnétiques, notamment dans le système cartésien (x, y et z) et avec à un temps t. $\vec{E}$ s'exprime par :

$$\vec{\Delta}\vec{E}(x,y,z,t) - \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2\vec{E}(r,\theta,z,t)}{\partial^2 t} = \vec{0} \tag{2-23}$$

Avec $\vec{\Delta}$ un Laplacien vectoriel et $\mu_0\epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$.

Cette équation admet pour solution une onde sphérique divergente :

$$E(x,y,z,t) = \frac{E_0}{r} e^{-ikr} e^{i\omega t} \tag{2-24}$$

avec $r = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$, $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda}$ et $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$

r est la distance au point d'observation et ω : la pulsation de l'onde lumineuse dont la fréquence est ν, k est le vecteur d'onde, il est inversement proportionnel, à 2π près, à la longueur d'onde.
L'expression de r peut être simplifiée en utilisant l'approximation paraxiale : l'observation se fait à proximité de l'axe optique, x et y restant petit devant z. On obtient r avec un développement limité au voisinage de 0 :

$$r = z\sqrt{1+\frac{x^2+y^2}{z^2}} + \frac{x^2+y^2}{2z} = \frac{x^2+y^2}{2z} \tag{2-25}$$

Le champ électrique $\vec{E}$ peut donc être reformulé sous la forme :

$$E_{paraxiale}(x,y,z,t) = \frac{E_0}{z} e^{-ikz} e^{-ik\frac{x^2+y^2}{2z}} e^{i\omega t} \tag{2-26}$$

V.3.2. Approximation Gaussienne

Dans le cadre de l'approximation paraxiale de l'équation de Helmholtz, les faisceaux lasers peuvent être modéliser par des faisceaux Gaussiens [98]. Les faisceaux lasers ont pour origine l'utilisation de cavités résonnantes pour l'amplification. Plusieurs modes optiques existent simultanément dans de telles cavités, qu'ils soient longitudinaux et transverses, ceux-ci notés TEM_{ij}. Quand $i = j = 0$, le champ électrique TEM_{00}, possède une répartition d'intensité en Gaussienne de révolution, et suit la solution décrite précédemment en coordonnées cylindriques (r, θ, z) avec $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

$$\vec{E}(r,\theta,z) = \vec{E}(r,z) \tag{2-27}$$

$$\vec{E}(r,\theta,z) = E_z e^{i\zeta(z)} e^{-ik\frac{r^2}{2q(z)}} e^{-ikz} \tag{2-28}$$

$$\vec{E}(r,\theta,z) = E_o \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{i\zeta(z)} e^{-ik\frac{r^2}{2R(z)}} e^{-\frac{r^2}{n\omega^2(z)}} e^{-ikz} \tag{2-29}$$

Avec $\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - \frac{\lambda}{n\pi\omega^2(z)} i = \frac{1}{q_0 + z}$

où : i) E_0 est l'amplitude du champ électrique en $z = r = 0$

ii) $\frac{\omega_0}{\omega(z)}$ est un terme de normalisation avec ω le rayon de la Gaussienne spatiale en e^{-2}

iii) $e^{i\zeta(z)}$ est un terme de déphasage absolu de 'Gouy'

iv) $e^{-ik\frac{r^2}{2R(z)}}$ représente la phase spatiale de l'onde dont $R(z)$ est le rayon de courbure réel

v) $e^{-\frac{r^2}{n\omega^2(z)}}$ exprime la forme Gaussienne du champ dans le plan transverse à z et de rayon $\omega(z)$

vi) e^{-kiz} la direction de propagation en z

Pour un faisceau Gaussien se propageant dans le vide, $\omega(z)$, désigne la largeur du faisceau. $q(z)$ est appelé rayon de courbure complexe. Quand $z = 0$, le rayon transverse ω_0, appelé 'waist', est minimal et le rayon de courbure de la phase spatiale vaut alors $R_0 = \infty$. On peut en déduire $q(0)$ et l'évolution de $\omega(z)$ et $R(z)$:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}} \tag{2-30}$$

$$R(z) = z + \frac{z_R^2}{z} \tag{2-31}$$

Quand $\omega(z_R) = \sqrt{2}\omega_0$, $z_R = \frac{n\pi\omega_0^2}{\lambda}$ c'est la distance de Rayleigh, ou profondeur de champ. Le faisceau a doublé sa surface par rapport à sa valeur en $z = 0$. Afin de simplifier les calculs, on considère l'indice de réfraction, n, égal à 1. Si $z << z_R$, alors le rayon de courbure tend vers l'infini, tel une onde plane progressive. Si $z >> z_R$, alors le rayon de courbure tend vers z, la phase s'approche donc d'une onde sphérique.
On peut définir la divergence du faisceau loin du waist par :

$$\theta = \lim_{z\to\infty} \frac{2\omega(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \tag{2-32}$$

V.3.3. La fluence d'un faisceau Gaussien

A l'aide du carré du module du champ électrique, l'intensité en W/cm² peut être obtenue :

$$I(r,z) = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)}\right)^2 e^{-2\frac{r^2}{\omega^2(z)}} \tag{2-33}$$

Où *ω(z)* est la distance au centre de l'axe du faisceau où l'amplitude du champ électrique est à égale à *1/e*, ce qui correspond à une intensité réduite à *1/e²*. La fluence est définie par l'énergie déposée par unité de surface, en J/cm², par :

$$\Phi(r) = \Phi_0 e^{-2\frac{r^2}{\omega_0^2}} \tag{2-34}$$

r étant le rayon et $\omega_0 = \omega(0)$ est la valeur minimale de la demie largeur du faisceau, le 'waist'. ω_0 est le rayon à partir duquel, la fluence est réduite d'un facteur *1/e²*.
En définissant Ep comme l'énergie d'une impulsion et $S_{spot} = \pi\omega_0^2$, la surface du spot laser, l'expression de la fluence est déterminée à partir du développement :

$$\int_{\theta=0}^{2\pi}\int_{r=0}^{+\infty} \Phi_0 e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}} r dr d\theta = E_p \tag{2-35}$$

$$2\pi\Phi_0 \int_{r=0}^{+\infty} r e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}}\, dr = E_p \tag{2-36}$$

$$2\pi\Phi_0 \left[-\frac{1}{2}\frac{\omega_0^2}{2} e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}}\right]_{r=0}^{+\infty} = E_p \tag{2-37}$$

$$\frac{2\pi\Phi_0\omega_0^2}{4} = E_p \tag{2-38}$$

$$\Phi_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2} \tag{2-39}$$

Le plus souvent, les lasers possèdent d'autres modes de propagation. Les équations précédentes ne peuvent donc s'appliquer, mais il existe un paramètre *M²* qui permet de prendre en compte l'écart entre un faisceau théorique Gaussien et un faisceau laser, il est défini par :

$$\theta_{réel}\omega_{réel} = M^2\theta_{théorique}\omega_{théorique} = M^2\frac{2\lambda}{\pi} \tag{2-40}$$

$$z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{M^2\lambda} \tag{2-41}$$

V.4. La puissance moyenne en fonction du taux de répétition

La Fig. 2.32 montre l'évolution de la puissance moyenne et de l'énergie par pulse du laser en fonction du taux de répétition de celui-ci.

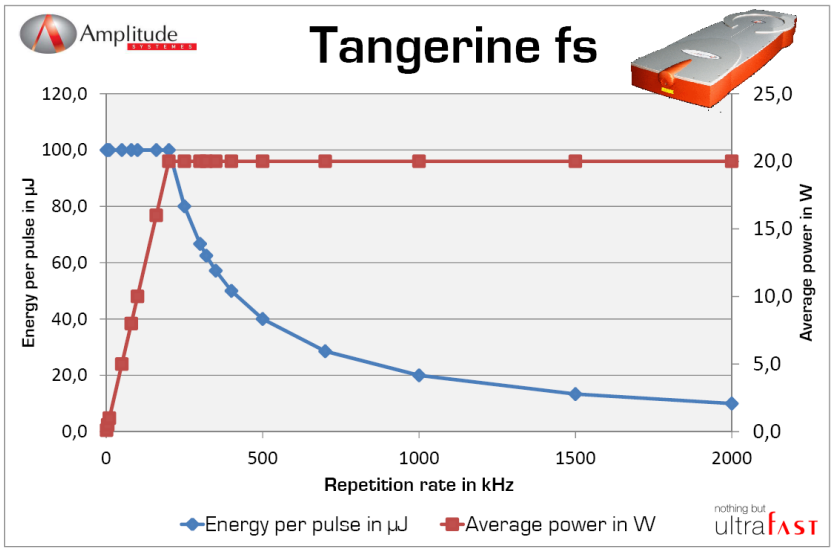


Fig. 2.32 : Évolution de la puissance moyenne et de l'énergie par pulse du laser en fonction du taux de répétition

Entre 0 et 200 kHz, la puissance moyenne croit linéairement alors que l'énergie par pulse reste constante. Après 200 kHz, c'est la puissance moyenne qui reste stable et l'énergie par pulse qui décroit de façon hyperbolique. Le taux de répétition de 200 kHz est donc une valeur optimale, notre référence, ou la puissance moyenne et l'énergie par pulse sont à leur maximums.

VI. Matériaux utilisés

VI.1. AF32

Les verres borosilicates, sont des matériaux amorphes, composés principalement de silice (70-80% SiO_2) et de borates (7-13% B_2O_3). On trouve aussi dans ces verres, des oxydes alcalins (Na_2O ; K_2O ; CaO, MgO...) et de l'alumine (Al_2O_3). Cette composition leur confère des propriétés particulièrement intéressantes. Les verres borosilicates ont un faible coefficient thermique et résistent bien au choc thermique. Ils ont d'excellentes propriétés mécaniques, ils sont rigoureusement élastiques linéaires. Du point de vue chimique, ils sont relativement stables, mise à part contre les attaques à l'acide fluorhydrique (HF), ou à l'acide phosphorique (H_3PO_4). Dans le chapitre 4, l'exacerbation de la non résistance au HF du verre irradié par un laser femtoseconde sera expliquée.

La plupart des expériences sur les verres ont été réalisées sur des échantillons d'AF32 de la société Schott. Différentes formes et tailles (2" – 75mm x 75mm) et différentes épaisseurs (200 µm – 500µm) ont été testées. L'AF32 est un verre borosilicate amorphe, non cristallin contenant : 55 à 65% de SiO_2, 15 à 20% d'Al_2O_3, 5 à 10% de B_2O_3 et 10 à 15% d'oxydes alcalins [99]. La rugosité de surface des échantillons est inférieure à 1 nm RMS. Son coefficient d'expansion thermique, de 3.2 10^{-6} K^{-1}, est équivalent à celui du silicium. Grâce à sa haute température de transformation, il peut être utilisé pour des applications à haute-

température, jusqu' à ~ 600°C. L'AF32 possède une très haute transmittance, celle-ci est présentée Fig. 2.33.

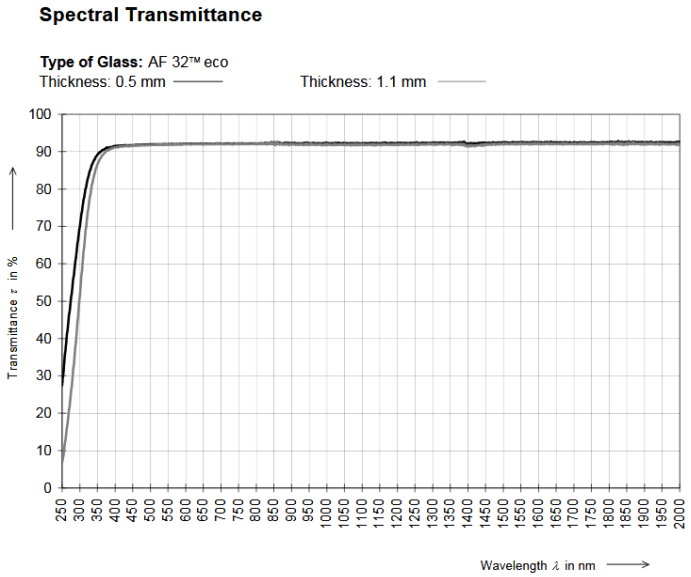


Fig. 2.33 : Transmittance spectrale de l'AF32 de 250 à 2000 nm

Ce verre est utilisé dans de nombreuses applications, notamment pour la fabrication de MEMs et d'interposeur verre [100].

VI.2. PCB

Les matériaux utilisés pour la fabrication d'interconnexions électriques sont des matériaux multicouches XT/Duroid (Rogers), le plus populaire étant le FR4, à base de résine époxy et renforcé par un tissage en fibre de verre. Ils sont composés d'un diélectrique (verre, PTFE) recouvert sur les deux faces d'un revêtement (cladding) conducteur de cuivre, le diélectrique et les couches de cuivre peuvent avoir des épaisseurs variables. Ce sont des matériaux en couches laminées les unes sur les autres particulièrement utilisés pour la conception et la fabrication de PCBs. Ces matériaux sont thermiquement et chimiquement résistants et possèdent d'excellentes propriétés pour être utilisés dans des applications hautes fréquentes et hautes vitesses.

VII. Outils de caractérisation

VII.1. MEB

Pour obtenir des images haute résolution des différentes expérimentations menées au cours de cette thèse, la microscopie électronique à balayage (MEB, SEM Scanning Electronic Microscopy) a été utilisée. Cette technique utilise le principe des interactions électrons/matière pour permettre d'acquérir des images. Un faisceau d'électrons est envoyé sur la surface à observer et un spectre de particules (électrons Auger, rayons X) est renvoyé vers des détecteurs. Quand les électrons primaires tapent la surface de l'échantillon à analyser, des électrons secondaires, provenant de la matière proche de la surface (profondeur inférieure à 10 nm) peuvent être éjectés. Ces électrons sont faiblement énergétiques et peuvent être facilement captés pour obtenir des images de bonne qualité avec un rapport signal/bruit

intéressant. Les électrons secondaires donnent des informations sur la topographie de l'échantillon et sont très sensibles aux variations de la surface observée. D'autres électrons peuvent être captés : les électrons rétrodiffusés. Ceux-ci proviennent de l'interaction des électrons primaires avec les noyaux d'atomes de l'échantillon. Ils sont beaucoup plus énergétiques que les électrons secondaires et permettent de donner des indications sur l'homogénéité chimique de l'échantillon grâce au contraste de phase observé entre les atomes avec un numéro atomique faible ou élevé.
Le MEB a été particulièrement utilisé pour caractériser les tranchées fabriquées dans du verre durant l'étude sur l'influence des paramètres lasers sur des échantillons de verre AF32. La difficulté dans ces conditions est que les échantillons de verre n'étant pas conducteurs, les images obtenues peuvent être très lumineuses. En effet les électrons primaires envoyés sur le verre ne sont pas évacués et restent sur l'échantillon, on dit que l'échantillon charge. Pour pallier ce problème plusieurs techniques peuvent être employées. Par exemple, il est possible de diminuer la tension d'accélération des électrons émis par le canon pour obtenir des images satisfaisantes. Sinon, il est possible d'utiliser la technique de pression partielle : durant l'analyse on envoie un léger flux de gaz pour évacuer les électrons de la surface de l'échantillon.

VII.2. Profilomètre optique

Pour la caractérisation de la micro structuration des PCBs, un profilomètre optique Bruker Contour GT-X a été utilisé. Ce type de profilomètre possède un capteur optique de distance qui mesure l'altitude z à des coordonnées x et y. Les résolutions sont de l'ordre de quelques nanomètres pour l'altitude et de quelques microns dans le plan horizontal. L'avantage du profilomètre optique Bruker est qu'il permet des mesures et des inspections 3D rapides et sans contact. Il fonctionne grâce à la technologie d'interférométrie de la lumière blanche, c'est-à-dire que des clichés par interférence sont réalisés à différentes altitudes grâce à un capteur CCD. Ces clichés résultant de la superposition de la lumière de l'échantillon à mesurer et de la lumière réfléchie par un miroir référence, permettent d'obtenir des cartographies 3D particulièrement précises. Le principe de fonctionnement de la profilomètrie optique est illustré sur la Fig. 2.34.

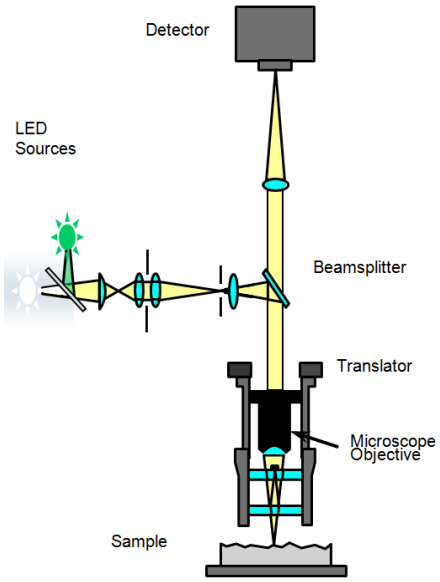


Fig. 2.34 : Principe de fonctionnement du profilomètre optique

Deux modes de mesure sont disponibles sur le profilomètre optique utilisé durant cette thèse : Le mode VSI et le mode PSI.

i) Le mode de mesure VSI est l'interférométrie à balayage verticale. Elle utilise une source lumineuse large bande, généralement une lumière blanche. Ce mode de mesure offre une précision nanométrique et est particulièrement efficace pour mesurer des objets dont la surface comporte des rugosités ou des objets dont la hauteur des pixels est supérieure à 135 nm. Durant la mesure, un translateur déplace l'objectif verticalement pendant que la caméra capture des images périodiquement. Lorsque les points de la surface observée sont mis au point, la modulation de ceux-ci atteint un maximum puis diminue lorsque l'objectif dépasse la focalisation. L'enregistrement de la position du translateur au signal maximum permet au système de déterminer la hauteur de chaque pixel composant la surface. La hauteur maximale de balayage avec la mesure VSI est de 10 mm.

ii) Le mode de mesure PSI, l'interférométrie à déphasage, utilise une source de lumière à bande étroite. Cette technique est le plus souvent utilisée pour caractériser des surfaces lisses, c'est-à-dire possédant une rugosité inférieur à 30 nm, telles que des miroirs, des optiques ou d'autres surfaces polies. Ce mode de mesure est particulièrement précis et possède une résolution inférieure au nanomètre. Cependant, pour des marches topographiques importantes, le PSI ne peut obtenir un profil correct. Ce type de mesure devient donc inefficace pour des discontinuités entre des pixels adjacents approchant le quart de la longueur d'onde de la source lumineuse, soit environ 135 nm avec une lumière verte. Pour l'interférométrie à déphasage, le translateur de position permet de modifier avec précision la longueur du trajet optique du faisceau. Les changements de longueur de chemin optique provoquent un changement structurel des franges d'interférences. Périodiquement, la caméra enregistre les franges décalées, ce qui produit une série d'interférogrammes. La combinaison des interférogrammes par des calculs informatiques permettent de déterminer le profil en hauteur de la surface analysée.

VII.3. Banc de mesure de modes/pertes

Pour caractériser les guides optiques inscrits par irradiation laser, un banc de mesure de profil de mode a été conçu. Le banc est composé d'un premier micro-positionneur trois axes x, y et z (NanoMax-TS Thorlabs) relié à un contrôleur piézoélectrique (Melles Griot), pour une précision de déplacement jusqu'à 5 nm. Un V-groove est fixé sur le micro-positionneur, dans lequel est montée une fibre optique SMF 28 monomode. Cette fibre est connectée à une diode laser émettant à 1310 nm. L'autre extrémité est clivée pour l'alignement avec les guides à caractériser. Un deuxième micro-positionneur, trois axes, x, θ et φ sert à maintenir l'échantillon en place pendant l'alignement, les micro-déplacements angulaires sont particulièrement intéressants car ils permettent de contrôler plus de degrés de liberté. Derrière le porte-échantillon, une caméra infrarouge (Hamamatsu C2741-03) est positionnée sur laquelle différents objectifs de microscope avec des grossissements divers pour faire différentes observations des modes peuvent être placés. La Fig. 2.35 présente une photographie du banc de mesure utilisé.

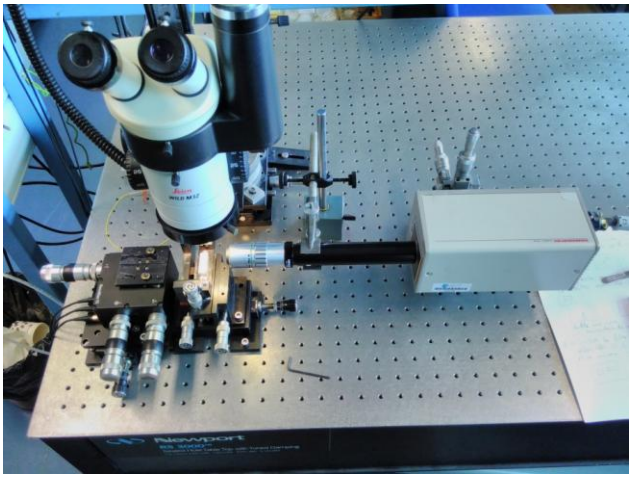


Fig. 2.35 : Photographie du banc de mesure de modes et de pertes

La plupart des expérimentations ont été menées avec des grossissements de ×20 et ×50. L'avantage du ×20 est que cet objectif permet de visualiser la tranche de l'échantillon jusqu'à 500 µm d'épaisseur. Il est donc possible de déterminer la profondeur d'enterrage des guides et la taille des modes. La caméra est directement reliée à un ordinateur et un programme Matlab permettant de visualiser, en direct, les modes en 3D. Ce programme nous permet de bien gérer la saturation, le gain et l'offset de la caméra pour obtenir des profils de mode non saturés et propres. Au-dessus de l'échantillon une binoculaire permet de gérer la distance entre la fibre d'entrée et l'échantillon. Pour faciliter la mesure, une caméra est placée sur la binoculaire.

Le banc de mesure de perte est le même que celui de profil de mode, mise à part que la caméra est remplacée par un troisième micro-positionneur 3 axes. Un V-groove supportant une fibre clivée SMF28 est utilisé pour recevoir le signal optique après avoir traversé les guides. Cette fibre est connectée en sortie à un puissance-mètre (1300 nm). L'alignement est actif et on mesure les pertes en lisant directement la valeur de puissance reçue par la fibre. Quand le maximum de puissance est atteint, les pertes de couplage des guides peuvent être déterminées, ainsi que les pertes de propagation.

Il est aussi possible de déterminer expérimentalement l'indice optique des guides inscrits par laser dans du verre [101]. En effet, grâce à un profil de mode en champs lointain, on peut déterminer l'ouverture numérique des guides inscrits. Or d'après l'expression suivante : $NA = \sqrt{2n\Delta n}$, il est à noter qu'ici l'indice de réfraction du cœur des guides inscrits est à gradients d'indice. Le fait que le matériau soit irradié par le laser confère au guide une diminution de l'indice de réfraction, en partant de son centre pour arriver au 'cladding' du matériau non modifié par le laser femtoseconde.

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, les différents effets physiques qui se produisent durant l'interaction laser matière ont été passés en revues. L'absorption linéaire et/ou non linéaire, qui se produit dans les verres quand ils sont en interaction avec un laser délivré par une source ultra brève comme un laser femtoseconde, a été décrite.

Les différents mécanismes d'interaction ont été présentés, le processus thermique d'interaction, où le laser se comporte comme une source de chaleur et où il y a une Zone Affectée Thermiquement importante sur le matériau usiné, a été décrit. Quand le matériau absorbe le rayonnement laser, il peut y avoir un mécanisme d'interaction photochimique, c'est-à-dire que les liaisons chimiques se cassent. Pour terminer,

le processus photo mécanique a été explicité. Une onde acoustique est créée lors des shoots lasers ce qui permet le décollement d'une couche de matériau d'un substrat.
La chronologie de l'interaction laser matière a été présentée et une description des différents types d'interactions en fonction du temps d'impulsion a été donnée. Il faut retenir que pour des durées d'impulsions de l'ordre de la nanoseconde, il y aura particulièrement des effets thermiques qui rentreront en compte. En effet le temps d'impulsion sera suffisamment long pour qu'il y ait diffusion thermique de l'énergie délivrée par le laser. Pour les processus plus courts, quand on réduit le temps entre les impulsions, il y aura de moins en moins d'effets thermiques, la ZAT va diminuer et l'usinage sera de plus en plus fin et précis. Pour des impulsions de l'ordre de la femtoseconde, la qualité d'usinage sera particulièrement intéressante avec des rugosités très faibles.
Des phénomènes d'optique non linéaire permettent notamment de travailler des matériaux transparents aux longueurs d'onde des lasers femtoseconde déployés dans l'industrie. Les modifications structurales, comme le changement d'indice du verre par densification, ont été décrites, tout comme l'effet d'auto-focalisation dû à la création d'une lentille de Kerr pendant l'interaction laser diélectrique avec de fortes intensités. De plus, la création d'un plasma par absorption multi photonique crée une lentille divergente qui vient défocaliser le faisceau laser. Quand ces deux effets, l'auto-focalisation par effet Kerr et la défocalisation par interaction avec un plasma d'électrons libres, compensent la divergence du faisceau, il y a création d'un filament. Cette propriété, qui découle de phénomènes d'optique non linéaire, peut être tantôt intéressante, tantôt désavantageuse.
La deuxième partie de ce chapitre a été l'occasion de présenter un état de l'art des composants pouvant être fabriqués dans du verre en utilisant un laser femtoseconde. Dans un premier temps, une description des composants de micro-fluidique et d'opto micro-fluidique a été réalisée, le plus souvent obtenus par irradiation laser et gravure chimique (FLAE). Ces composants peuvent servir de séparateurs de cellule, de détecteurs ou encore de micro aquariums pour l'observation de microorganismes.
Une seconde partie a permis de présenter les différents composants de photonique passifs qu'il est possible d'obtenir par inscription directe dans des verres. Du simple guide optique droit au guide amplificateur pouvant être utilisé comme laser, en passant par les interféromètres Mach-Zehnder et les coupleurs directionnels.
La plateforme de micro-usinage, utilisée pour les expérimentations de cette thèse, a été présentée dans la troisième partie du chapitre. Le laser à fibre dopée Ytterbium, ainsi que la génération d'impulsions femtoseconde et la génération des seconde et troisième harmoniques, ont été décrites. Une brève description de la mise en forme du faisceau et du système de micro déplacement a aussi été donnée.
Les deux dernières parties du chapitre ont permis de présenter plus en détail les matériaux utilisés pour ce travail de thèse, notamment l'AF32, au cœur de la fabrication des interposeurs verres pour l'intégration de fonctions optiques et électriques sur le même substrat passif et les différents moyens de caractérisations utilisés.

Bibliographie

[1] F. Venturini, M. Sansotera, R. M. Vazquez, R. Osellame, G. Cerullo, and W. Navarrini, "Micromanufacturing in fused silica via femtosecond laser irradiation followed by gas-phase chemical etching," *Micromachines*, vol. 3, no. 4, pp. 604–614, 2012.

[2] R. R. Gattass and E. Mazur, *Femtosecond laser micromachining in transparent materials*, vol. 2, no. 4. Nature Publishing Group, 1994.

[3] J. Lopez, F. Salin, M.-C. Hernandez, and M. Faucon, "Micro-usinage nanoseconde UV ou femtoseconde : état de l'art et comparaison," *J. Phys. IV*, vol. 108, pp. 13–17, Jun. 2003.

[4] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. Alvensleben, and A. Tünnermann, "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 63, no. 2, pp. 109–115, Aug. 1996.

[5] E. Yablonovitch and N. Bloembergen, "Avalanche Ionization and the Limiting Diameter of Filaments Induced by Light Pulses in Transparent Media," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 29, no. 14, pp. 907–910, Oct. 1972.

[6] M. V. Fedorov, L. V. Keldysh's "Ionization in the Field of a Strong Electromagnetic Wave" and modern physics of atomic interaction with a strong laser field," *J. Exp. Theor. Phys.*, vol. 122, no. 3, pp. 449–455, Mar. 2016.

[7] B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry, "Optical ablation by high-power short-pulse lasers," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 13, no. 2, p. 459, Feb. 1996.

[8] M. Lenzner *et al.*, "Femtosecond Optical Breakdown in Dielectrics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 18, pp. 4076–4079, May 1998.

[9] M. Li, S. Menon, J. P. Nibarger, and G. N. Gibson, "Ultrafast Electron Dynamics in Femtosecond Optical Breakdown of Dielectrics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, no. 11, pp. 2394–2397, Mar. 1999.

[10] J. W. Chan, T. Huser, S. Risbud, and D. M. Krol, "Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses.," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 21, pp. 1726–1728, 2001.

[11] J. W. Chan, T. R. Huser, S. H. Risbud, and D. M. Krol, "Modification of the fused silica glass network associated with waveguide fabrication using femtosecond laser pulses," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 76, no. 3, pp. 367–372, Mar. 2003.

[12] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao, "Writing waveguides in glass with a femtosecond laser," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 21, p. 1729, Nov. 1996.

[13] K. Miura, J. Qiu, H. Inouye, T. Mitsuyu, and K. Hirao, "Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no. 23, pp. 3329–3331, Jun. 1997.

[14] K. Hirao and K. Miura, "Writing waveguides and gratings in silica and related materials by a femtosecond laser," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 239, no. 1–3, pp. 91–95, Oct. 1998.

[15] O. . Efimov *et al.*, "Waveguide writing in chalcogenide glasses by a train of femtosecond laser pulses," *Opt. Mater. (Amst).*, vol. 17, no. 3, pp. 379–386, Aug. 2001.

[16] G. Petite, P. Daguzan, S. Guizard, and P. Martin, "Ultrafast processes in laser irradiated wide bandgap insulators," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 109–110, pp. 36–42, Feb. 1997.

[17] L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, and A. Mysyrowicz, "Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses," *Opt. Commun.*, vol. 171, no. 4–6, pp. 279–284, Dec. 1999.

[18] X. R. Zhang, X. Xu, and A. M. Rubenchik, "Simulation of microscale densification during

femtosecond laser processing of dielectric materials," *Appl. Phys. A*, vol. 79, no. 4–6, pp. 945–948, Sep. 2004.

[19] B. Poumellec, L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, and A. Mysyrowicz, "Femtosecond laser irradiation stress induced in pure silica.," *Opt. Express*, vol. 11, no. 9, pp. 1070–9, May 2003.

[20] R. Osellame *et al.*, "Optical properties of waveguides written by a 26 MHz stretched cavity Ti:sapphire femtosecond oscillator," *Opt. Express*, vol. 13, no. 2, p. 612, Jan. 2005.

[21] C. B. B. Schaffer, J. F. F. García, and E. Mazur, "Bulk heating of transparent materials using a high-repetition-rate femtosecond laser," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 76, no. 3, pp. 351–354, Mar. 2003.

[22] C. B. Schaffer, A. O. Jamison, and E. Mazur, "Morphology of femtosecond laser-induced structural changes in bulk transparent materials," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 9, pp. 1441–1443, Mar. 2004.

[23] S. Kiyama, S. Matsuo, S. Hashimoto, and Y. Morihira, "Examination of etching agent and etching mechanism on femotosecond laser microfabrication of channels inside vitreous silica substrates," *J. Phys. Chem. C*, vol. 113, no. 27, pp. 11560–11566, Jul. 2009.

[24] "Wikipedia, the free encyclopedia." .

[25] A. Couairon and A. Mysyrowicz, "Self-focusing and Filamentation of Femtosecond Pulses in Air and Condensed Matter: Simulations and Experiments," in *Self-focusing: Past and Present*, New York, NY: Springer New York, 2009, pp. 297–322.

[26] A. Couairon and A. Mysyrowicz, "Femtosecond filamentation in transparent media," *Phys. Rep.*, vol. 441, no. 2–4, pp. 47–189, 2007.

[27] H. Nakanishi, T. Nishimoto, R. Nakamura, A. Yotsumoto, T. Yoshida, and S. Shoji, "Studies on SiO2–SiO2 bonding with hydrofluoric acid. Room temperature and low stress bonding technique for MEMS," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 79, no. 3, pp. 237–244, Feb. 2000.

[28] T. M. . Lee, D. H. . Lee, C. Y. . Liaw, A. I. . Lao, and I.-M. Hsing, "Detailed characterization of anodic bonding process between glass and thin-film coated silicon substrates," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 86, no. 1–2, pp. 103–107, Oct. 2000.

[29] P. W. Barth, "Silicon fusion bonding for fabrication of sensors, actuators and microstructures," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 23, no. 1–3, pp. 919–926, Apr. 1990.

[30] T. Tamaki, W. Watanabe, J. Nishii, and K. Itoh, "Welding of Transparent Materials Using Femtosecond Laser Pulses," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. No. 22, pp. L687–L689, May 2005.

[31] W. Watanabe, S. Onda, T. Tamaki, and K. Itoh, "Direct joining of glass substrates by 1 kHz femtosecond laser pulses," *Appl. Phys. B*, vol. 87, no. 1, pp. 85–89, Mar. 2007.

[32] E. N. Glezer *et al.*, "Three-dimensional optical storage inside transparent materials," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 24, p. 2023, Dec. 1996.

[33] L. W. Hobbs, C. E. Jesurum, V. Pulim, and B. Berger, "Local topology of silica networks," *Philos. Mag. A*, vol. 78, no. 3, pp. 679–711, Sep. 1998.

[34] Y. Bellouard, T. Lehnert, J.-E. Bidaux, T. Sidler, R. Clavel, and R. Gotthardt, "Local annealing of complex mechanical devices: a new approach for developing monolithic micro-devices," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 273–275, pp. 795–798, Dec. 1999.

[35] A. Marcinkevičius *et al.*, "Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 5, p. 277, Mar. 2001.

[36] M. Masuda *et al.*, "3-D microstructuring inside photosensitive glass by femtosecond laser excitation," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 76, no. 5, pp. 857–860, Mar. 2003.

[37] K. Sugioka, Y. Cheng, and K. Midorikawa, "Three-dimensional micromachining of glass using

femtosecond laser for lab-on-a-chip device manufacture," *Appl. Phys. A*, vol. 81, no. 1, pp. 1–10, Jun. 2005.

[38] Y. Kondo, J. Qiu, T. Mitsuyu, K. Hirao, and T. Yoko, "Three-Dimensional Microdrilling of Glass by Multiphoton Process and Chemical Etching," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, no. Part 2, No. 10A, pp. L1146–L1148, Oct. 1999.

[39] Y. Bellouard, A. Said, M. Dugan, and P. Bado, "Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching," *Opt. Express*, vol. 12, no. 10, p. 2120, May 2004.

[40] S. D. Stookey, "Chemical Machining of Photosensitive Glass," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 45, no. 1, pp. 115–118, Jan. 1953.

[41] Schott, "FOTURAN® II Photo-Sensitive Glass Wafer | SCHOTT AG." .

[42] S. K. Ahn *et al.*, "GEM-type detectors using LIGA and etchable glass technologies," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 49, no. 3, pp. 870–874, Jun. 2002.

[43] T. R. Dietrich, A. Freitag, and R. Scholz, "Production and Characteristics of Microreactors Made from Glass," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 477–483, Apr. 2005.

[44] R. An, M. D. Hoffman, M. A. Donoghue, A. J. Hunt, and S. C. Jacobson, "Water-assisted femtosecond laser machining of electrospray nozzles on glass microfluidic devices," *Opt. Express*, vol. 16, no. 19, p. 15206, Sep. 2008.

[45] R. An, Y. Li, Y. Dou, H. Yang, and Q. Gong, "Simultaneous multi-microhole drilling of soda-lime glass by water-assisted ablation with femtosecond laser pulses," *Opt. Express*, vol. 13, no. 6, p. 1855, Mar. 2005.

[46] D. J. Hwang, T. Y. Choi, and C. P. Grigoropoulos, "Liquid-assisted femtosecond laser drilling of straight and three-dimensional microchannels in glass," *Appl. Phys. A*, vol. 79, no. 3, pp. 605–612, Aug. 2004.

[47] Y. Liao *et al.*, "Three-dimensional microfluidic channel with arbitrary length and configuration fabricated inside glass by femtosecond laser direct writing," *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 19, p. 3225, Oct. 2010.

[48] Y. Liao *et al.*, "Rapid prototyping of three-dimensional microfluidic mixers in glass by femtosecond laser direct writing," *Lab Chip*, vol. 12, no. 4, p. 746, Jan. 2012.

[49] K. Sugioka *et al.*, "Femtosecond laser 3D micromachining: a powerful tool for the fabrication of microfluidic, optofluidic, and electrofluidic devices based on glass.," *Lab Chip*, vol. 14, no. 18, pp. 3447–58, Sep. 2014.

[50] Z. Wang, K. Sugioka, Y. Hanada, and K. Midorikawa, "Optical waveguide fabrication and integration with a micro-mirror inside photosensitive glass by femtosecond laser direct writing," *Appl. Phys. A*, vol. 88, no. 4, pp. 699–704, Jul. 2007.

[51] K. Sugioka and Y. Cheng, *Ultrafast laser processing : from micro- to nanoscale*. CRC Press LLC, 2013.

[52] Y. Bellouard, E. Barthel, A. A. Said, M. Dugan, and P. Bado, "Scanning thermal microscopy and Raman analysis of bulk fused silica exposed to lowenergy femtosecond laser pulses," *Opt. Express*, vol. 16, no. 24, p. 19520, Nov. 2008.

[53] Y. Bellouard, M. Dugan, A. A. Said, and P. Bado, "Thermal conductivity contrast measurement of fused silica exposed to low-energy femtosecond laser pulses," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 16, p. 161911, Oct. 2006.

[54] J. Wang *et al.*, "Embellishment of microfluidic devices via femtosecond laser micronanofabrication for chip functionalization," *Lab Chip*, vol. 10, no. 15, p. 1993, Aug. 2010.

[55] S. Maruo and H. Inoue, "Optically driven viscous micropump using a rotating microdisk," *Appl.*

Phys. Lett., vol. 91, no. 8, p. 084101, Aug. 2007.

[56] S. Maruo, O. Nakamura, and S. Kawata, "Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 2, p. 132, Jan. 1997.

[57] S. Kawata, H.-B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada, "Finer features for functional microdevices," *Nature*, vol. 412, no. 6848, pp. 697–698, Aug. 2001.

[58] D. Wu, S.-Z. Wu, J. Xu, L.-G. Niu, K. Midorikawa, and K. Sugioka, "Hybrid femtosecond laser microfabrication to achieve true 3D glass/polymer composite biochips with multiscale features and high performance: the concept of ship-in-a-bottle biochip," *Laser Photon. Rev.*, vol. 8, no. 3, pp. 458–467, May 2014.

[59] K. M. Nichols and R. Rikmenspoel, "Mg2+-dependent electrical control of flagellar activity in Euglena.," *J. Cell Sci.*, vol. 23, no. 1, pp. 211–25, Feb. 1977.

[60] K. M. Nichols and R. Rikmenspoel, "Control of flagellar motion in Chlamydomonas and Euglena by mechanical microinjection of Mg2+ and Ca2+ and by electric current injection," *J. Cell Sci.*, vol. 29, no. 1, 1978.

[61] D. Choudhury, W. T. Ramsay, R. Kiss, N. A. Willoughby, L. Paterson, and A. K. Kar, "A 3D mammalian cell separator biochip," *Lab Chip*, vol. 12, no. 5, p. 948, Feb. 2012.

[62] M. Masuda *et al.*, "Direct fabrication of freely movable microplate inside photosensitive glass by femtosecond laser for lab-on-chip application," *Appl. Phys. A*, vol. 78, no. 7, pp. 1029–1032, Apr. 2004.

[63] K. Sugioka and Y. Cheng, "Fabrication of 3D microfluidic structures inside glass by femtosecond laser micromachining," *Appl. Phys. A*, vol. 114, no. 1, pp. 215–221, Jan. 2014.

[64] Y. Li and S. Qu, "Water-assisted femtosecond laser ablation for fabricating three-dimensional microfluidic chips," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 13, no. 7, pp. 1292–1295, Sep. 2013.

[65] A. Crespi *et al.*, "Three-dimensional Mach-Zehnder interferometer in a microfluidic chip for spatially-resolved label-free detection," *Lab Chip*, vol. 10, no. 9, pp. 1167–1173, May 2010.

[66] Y. Hanada, K. Sugioka, and K. Midorikawa, "Highly sensitive optofluidic chips for biochemical liquid assay fabricated by 3D femtosecond laser micromachining followed by polymer coating," *Lab Chip*, vol. 12, no. 19, p. 3688, Aug. 2012.

[67] Y. W. Kim and J. Y. Yoo, "Axisymmetric flow focusing of particles in a single microchannel," *Lab Chip*, vol. 9, no. 8, p. 1043, Apr. 2009.

[68] N. Bellini *et al.*, "Femtosecond laser fabricated monolithic chip for optical trapping and stretching of single cells," *Opt. Express*, vol. 18, no. 5, p. 4679, Mar. 2010.

[69] F. Bragheri *et al.*, "Optofluidic chip for single cell trapping and stretching fabricated by a femtosecond laser," *J. Biophotonics*, vol. 3, no. 4, pp. 234–243, Apr. 2010.

[70] F. Bragheri *et al.*, "Optofluidic integrated cell sorter fabricated by femtosecond lasers," *Lab Chip*, vol. 12, no. 19, p. 3779, Aug. 2012.

[71] A. Schaap, Y. Bellouard, and T. Rohrlack, "Optofluidic lab-on-a-chip for rapid algae population screening," *Biomed. Opt. Express*, vol. 2, no. 3, p. 658, Mar. 2011.

[72] A. Schaap, T. Rohrlack, and Y. Bellouard, "Optical classification of algae species with a glass lab-on-a-chip," *Lab Chip*, vol. 12, no. 8, p. 1527, Apr. 2012.

[73] A. Schaap, T. Rohrlack, and Y. Bellouard, "Lab on a chip technologies for algae detection: a review," *J. Biophotonics*, vol. 5, no. 8–9, pp. 661–672, Aug. 2012.

[74] V. Maselli, J. R. Grenier, S. Ho, and P. R. Herman, "Femtosecond laser written optofluidic sensor: Bragg grating waveguide evanescent probing of microfluidic channel," *Opt. Express*, vol. 17, no. 14, p. 11719, Jul. 2009.

[75] Y. Cheng *et al.*, "Three-dimensional micro-optical components embedded in photosensitive glass by a femtosecond laser," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 13, p. 1144, Jul. 2003.

[76] Z. Wang, K. Sugioka, and K. Midorikawa, "Fabrication of integrated microchip for optical sensing by femtosecond laser direct writing of Foturan glass," *Appl. Phys. A*, vol. 93, no. 1, pp. 225–229, Oct. 2008.

[77] Y. Hanada, K. Sugioka, I. Shihira-Ishikawa, H. Kawano, A. Miyawaki, and K. Midorikawa, "3D microfluidic chips with integrated functional microelements fabricated by a femtosecond laser for studying the gliding mechanism of cyanobacteria," *Lab Chip*, vol. 11, no. 12, p. 2109, Jun. 2011.

[78] K. Sugioka and Y. Cheng, "Femtosecond laser three-dimensional micro-and nanofabrication," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 1, no. 4, 2014.

[79] D. Homoelle, S. Wielandy, A. L. Gaeta, N. F. Borrelli, and C. Smith, "Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 18, p. 1311, Sep. 1999.

[80] J. Liu, Z. Zhang, S. Chang, C. Flueraru, and C. P. Grover, "Directly writing of 1-to-N optical waveguide power splitters in fused silica glass using a femtosecond laser," *Opt. Commun.*, vol. 253, no. 4–6, pp. 315–319, Sep. 2005.

[81] G. Della Valle, R. Osellame, and P. Laporta, "Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 11, no. 1, p. 013001, Jan. 2009.

[82] K. Sugioka and S. Nolte, "3D Fabrication of Embedded Microcomponents," Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 215–238.

[83] A. M. Streltsov and N. F. Borrelli, "Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 1, p. 42, Jan. 2001.

[84] W. Watanabe, T. Asano, K. Yamada, K. Itoh, and J. Nishii, "Wavelength division with three-dimensional couplers fabricated by filamentation of femtosecond laser pulses," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 24, p. 2491, Dec. 2003.

[85] K. Minoshima, A. M. Kowalevicz, E. P. Ippen, and J. G. Fujimoto, "Fabrication of coupled mode photonic devices in glass by nonlinear femtosecond laser materials processing," *Opt. Express*, vol. 10, no. 15, pp. 645–652, Jul. 2002.

[86] A. Szameit, F. Dreisow, T. Pertsch, S. Nolte, and A. Tünnermann, "Control of directional evanescent coupling in fs laser written waveguides," *Opt. Express*, vol. 15, no. 4, p. 1579, Feb. 2007.

[87] G. D. Marshall *et al.*, "Laser written waveguide photonic quantum circuits," *Opt. Express*, vol. 195, no. 2002, pp. 165–171, Jul. 2009.

[88] R. Osellame *et al.*, "Fabrication of 3D photonic devices at 1.55 μm wavelength by femtosecond Ti:Sapphire oscillator," *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 6, p. 315, 2005.

[89] S. M. Eaton *et al.*, "Telecom-Band Directional Coupler Written With Femtosecond Fiber Laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, no. 20, pp. 2174–2176, Oct. 2006.

[90] K. Suzuki, V. Sharma, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, and Y. Nasu, "Characterization of symmetric [3 x 3] directional couplers fabricated by direct writing with a femtosecond laser oscillator," *Opt. Express*, vol. 14, no. 6, p. 2335, Mar. 2006.

[91] R. R. Thomson *et al.*, "Ultrafast-laser inscription of a three dimensional fan-out device for multicore fiber coupling applications.," *Opt. Express*, vol. 15, no. 18, pp. 11691–7, Sep. 2007.

[92] A. M. Kowalevicz, V. Sharma, E. P. Ippen, J. G. Fujimoto, and K. Minoshima, "Three-dimensional photonic devices fabricated in glass by use of a femtosecond laser oscillator," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 9, p. 1060, May 2005.

[93] M. R. Poulsen *et al.*, "Advances in silica-based integrated optics," *Opt. Eng.*, vol. 42, no. 10, p. 2821, Oct. 2003.

[94] W. Watanabe, Y. Note, and K. Itoh, "Fabrication of multimode interference waveguides in glass by use of a femtosecond laser," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 21, p. 2888, Nov. 2005.

[95] J. Lopez *et al.*, "Parameters of influence in surface ablation of metals with using a high power tunable ultrafast laser," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2013, pp. 686–694.

[96] A. Georgiou, J. Beeckman, and K. Neyts, "Multicasting optical interconnects using liquid crystal over silicon devices," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 28, no. 3, p. 363, Mar. 2011.

[97] J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 155, no. 0, pp. 459–512, Jan. 1865.

[98] J. Alda, "Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation." 2003.

[99] "AF 32 ® Thin Glass," vol. 49, no. 0, p. 55122, 2013.

[100] T. A. Faculty, V. Sukumaran, and I. P. Fulfillment, "Through-Package-Via Hole Formation , Metallization and Characterization for Ultra-Thin 3D Glass Interposer Packages Through-Package-Via Hole Formation , Metallization and Characterization for Ultra-Thin 3D Glass," no. August, 2014.

[101] J. A. Dharmadhikari *et al.*, "Writing low-loss waveguides in borosilicate (BK7) glass with a low-repetition-rate femtosecond laser," *Opt. Commun.*, vol. 284, no. 2, pp. 630–634, 2011.

CHAPITRE 3 : STRUCTURATION DE MATÉRIAUX PAR LASER FEMTOSECONDE POUR LA FABRICATION D'INTERCONNEXIONS

Sommaire

SOMMAIRE 103

I. INTRODUCTION 104

II. THÉORIE SUR LA STRUCTURATION DES MATÉRIAUX PAR LASER FEMTOSECONDE 104

II.1. Absorption et transfert d'énergie dans les métaux 104

II.1.1. Absorption de l'énergie du faisceau laser 104

II.1.2. Relaxation de l'énergie 105

II.2. Modifications permanentes du matériau 105

II.2.1. Nanostructures de surface 105

II.2.2. Microstructures de surface 107

II.3. Ablation de métaux par laser femtoseconde 108

II.3.1. Le seuil d'ablation 108

II.3.2. Le taux d'ablation 108

II.3.3. Le facteur d'incubation 111

II.3.4. L'influence du taux de répétition 112

II.3.5. Le taux de recouvrement 112

III. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET CARACTÉRISATIONS DE LA STRUCTURATION D'INTERCONNEXIONS POUR PCB 113

III.1. L'usinage de surface 114

III.1.1. La technique d'usinage de surface 114

III.1.2. Caractérisations de puces obtenues par usinage de surface 115

III.2. Technique alternative de fractionnement-décollement (Cut-Shot-And-Peel ; CSAP) 116

IV. CONCLUSION 119

BIBLIOGRAPHIE 120

I. Introduction

Plusieurs techniques existent afin de créer des circuits d'interconnexions, la plus répandue étant la gravure chimique. Cependant ce type de gravure ne permet pas de réaliser des interconnexions sur des objets complexes, notamment en trois dimensions. La structuration laser est une technique qui permet l'usinage de matériaux aussi divers que les couches minces métalliques, les céramiques ou les polymères. Grâce à un faisceau laser, il est possible de graver directement, sans étape de masquage, la couche métallique placée sur des couches isolantes (polymères, céramiques, composites polymère-fibre de verre, etc.). Le micro-usinage laser pour les interconnexions électriques des circuits permet de structurer très rapidement des motifs complexes uniquement limité par le parcours du faisceau. En plus de la baisse du coût, due à la non utilisation de masques, la structuration d'interconnexions par laser permet d'usiner des circuits plans mais aussi des circuits continus en volume sur plusieurs faces d'un système. L'utilisation des lasers permet de diminuer le nombre d'étapes, et donc, l'outillage nécessaire à la création des circuits. La structuration de matériaux par laser pour la fabrication d'interconnexions permet de faire du prototypage mais aussi de la fabrication en série. L'utilisation de laser femtoseconde permet d'adapter les paramètres pour usiner tout type de matériaux, que ça soit les couches conductrices métalliques ou les couches isolantes.

Dans ce contexte, ce chapitre est consacré à la structuration des métaux par laser, notamment en décrivant l'absorption de l'énergie d'un faisceau laser et les phénomènes de relaxation se produisant au sein des métaux. Différents types de structuration seront décrits, que ça soit à l'échelle nanométrique ou à l'échelle du micron. Les différents paramètres importants à prendre en compte pour l'ablation de matériaux seront présentés, comme le seuil et le taux d'ablation, ou encore le facteur d'incubation et l'influence de la cadence du faisceau laser. Une étude expérimentale présentera l'usinage de surface et un procédé développé au sein du laboratoire qui permet la structuration d'interconnexions par fractionnement et décollement d'une couche de cuivre par effet thermo-mécanique.

II. Théorie sur la structuration des matériaux par laser femtoseconde

II.1. Absorption et transfert d'énergie dans les métaux

Trois étapes [1] dans l'évolution temporelle de l'interaction laser-matière peuvent être décrites pour comprendre les phénomènes physiques se déroulant sur des échelles de temps particulièrement courtes (entre la femtoseconde et la microseconde), se produisant durant l'exposition d'un solide métallique à un laser femtoseconde. Dans un premier temps, les électrons libres absorbent l'énergie du faisceau laser, ensuite, l'énergie des électrons est transférée par dissipation à la matrice du réseau. Des modifications permanentes du matériau peuvent apparaitre.

II.1.1. Absorption de l'énergie du faisceau laser

Les métaux, qui ne possèdent pas de bande interdite et ont une bande de conduction partiellement remplie peuvent être décrits comme une matrice d'ions entourés d'électrons libres avec des durées de transfert d'énergie de l'ordre de la picoseconde pour les électrons libres et comprises entre 0.1 à 1 nanoseconde pour le transfert d'énergie entre le nuage d'électrons et le réseau ionique. Quand on irradie un matériau métallique avec un faisceau laser femtoseconde, l'énergie lumineuse est absorbée quasi-

instantanément par le nuage électronique sous l'effet de champs électromagnétiques intenses, par absorption d'un photon par un électron, c'est le mécanisme de Bremsstrahlung inverse [2][3] dans une épaisseur de matériau de quelques dizaines de nanomètres [4][5]. Le nuage d'électrons, hors équilibre, va se thermaliser par collision électron-électron et se retrouver en état d'équilibre[6][7].

II.1.2. Relaxation de l'énergie

Dans les premiers instants de l'irradiation femtoseconde, le matériau se compose d'un réseau ionique froid entouré d'un nuage d'électrons chaud. Le transfert de l'énergie vers le réseau d'ions s'opère par couplage électron-phonon entre le nuage d'électrons libres et le réseau [8]. La relaxation électron-phonon est une interaction coulombienne s'exprimant par une force entre des charges électriques et non pas une interaction collisionnelle entre les électrons et les ions du réseau. L'interaction électron-phonon s'arrête quand il y a thermalisation entre les électrons chauds et les ions froids du système. L'équilibre thermique est atteint au bout d'un temps de quelques picosecondes, variant en fonction des matériaux. Il est à noter qu'il est possible de décrire le transfert de l'énergie entre les électrons et les ions du réseau en découplant les températures électroniques et ioniques [9][10].

II.2. Modifications permanentes du matériau

En fonction de l'énergie du faisceau et de la durée d'impulsion, et après équilibre thermique entre le nuage d'électrons et le réseau ionique, la zone irradiée (ZAT) peut se réorganiser de différentes façons. A faible énergie on peut obtenir des réarrangements périodiques du matériau, communément appelé LIPS (Laser Induced Periodic Structures). Pour des durées d'impulsions longues, la HAZ sera très importante et on pourra constater l'apparition d'effets de bord comme des gouttelettes, des zones de surfusion ou encore des fissures. Pour des impulsions courtes, inférieur à 10 ps, durée inférieure au temps de diffusion de la chaleur des électrons et au temps de transfert de l'énergie entre les électrons et le réseau, la HAZ est réduite. En effet, la matière est éjectée avant que la chaleur, qui reste localisée, ne se diffuse au voisinage de la zone exposée au laser. C'est dans ces régimes d'impulsions que l'on obtient des usinages particulièrement fins et précis et que l'on peut considérer le traitement comme athermique [11][12].

II.2.1. Nanostructures de surface

Des nanostructures de surface peuvent apparaitre lors de l'interaction d'un faisceau laser femtoseconde avec un métal. On peut citer les nanostructures aléatoires, des nano-trous, nano-bosses, nano-cavités etc. qui ont été observés, comme le montre les clichés MEB présentés en Fig. 3.1. Différents mécanismes, notamment hydrodynamiques dus à la fusion locale du matériau ou à la cavitation de bulles, rentrent en jeu pour la formation de ces nanostructures aléatoires [13][14].

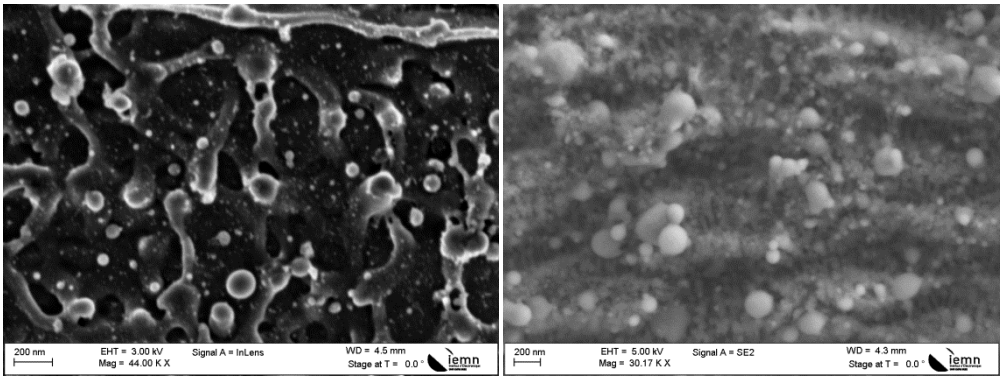


Fig. 3.1 : Exemple de nanostructure aléatoire due à une irradiation laser femtoseconde sur une surface d'acier

D'autres types de nanostructures, quasi-périodiques ou périodiques, peuvent apparaitre, par exemple, les LIPS, aussi appelées 'ripples' ou 'ondulations', observées pour la première fois par Birnbaum en 1965 sur des matériaux semi-conducteurs irradiés par un faisceau laser [15]. Ces formations nanométriques peuvent être observées sur différents matériaux : métaux, diélectriques ou semi-conducteurs, sur la surface des matériaux irradiés ou dans le cratère d'ablation, pour des valeurs de fluence sous le seuil d'ablation [16][17][18]. Plusieurs types de LIPS existent, celles-ci sont classées en fonction de leurs morphologies, de leurs organisations, de leurs dimensions et des conditions d'irradiation nécessaires pour leurs formations. Les LSFL (Low Spatial Frequency LIPS) sont caractérisées par une organisation dépendant de la polarisation du faisceau laser et une périodicité spatiale de l'ordre de la longueur d'onde, légèrement inférieure dans le cas des métaux, du faisceau laser utilisé, ce qui les rends spécifiques à l'utilisation de sources laser ultra brèves [4]. Une illustration de l'orientation des 'ripples' en fonction de la polarisation du faisceau est donnée Fig. 3.2, l'orientation des LSFL est perpendiculaire à la polarisation du faisceau [19].
La formation des LSFL reste encore un sujet de débat dans la communauté scientifique, néanmoins leur formation semble être due à des interférences entre le faisceau laser et une onde de surface des matériaux. Certains chercheurs modélisent la formation de cette onde comme une interaction entre les ondes électromagnétiques et les rugosités de surface des matériaux usinés [20][21]. Un autre modèle existe [22] prenant en plus en compte l'aspect hydrodynamique.

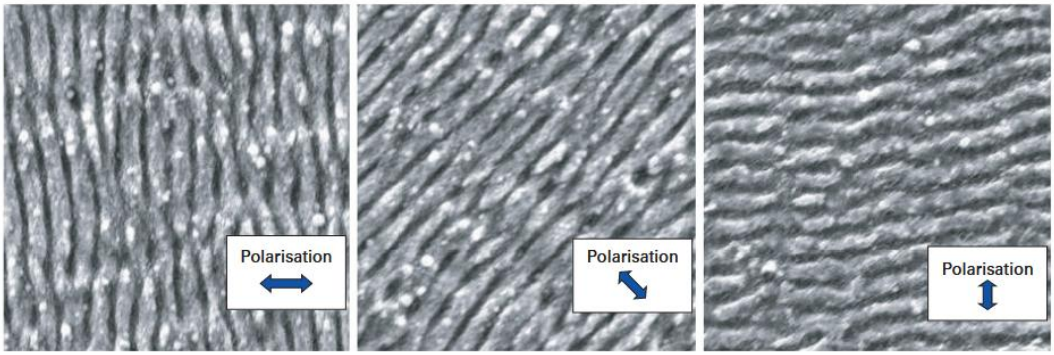


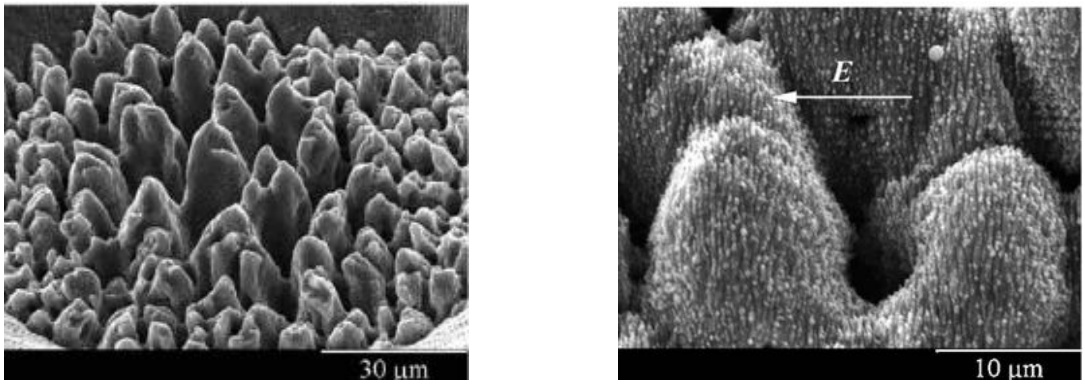
Fig. 3.2 : Illustration de l'influence de la polarisation du faisceau laser femtoseconde sur l'orientation des LSFL [4][19]

Les HSFL (High Spatial Frequency LIPPS) ont une orientation tantôt parallèle [23][24], tantôt orthogonale [25] à la polarisation du faisceau, dépendamment des matériaux usinés. Leurs périodicités est inférieures à la longueur d'onde du faisceau.

II.2.2. Microstructures de surface

Quand un métal est exposé à des valeurs importantes de fluence, bien supérieures au seuil d'ablation, il peut y avoir formation de microstructures à la surface du matériau. Ce sont des structures périodiques avec une orientation parallèle à la polarisation du faisceau laser incident qui possèdent des dimensions micrométriques [26][27][28]. Pour un faisceau laser statique, l'énergie délivrée par celui-ci étant plus importante, les ripples nanométriques laissent leur place à des micro-ripples.

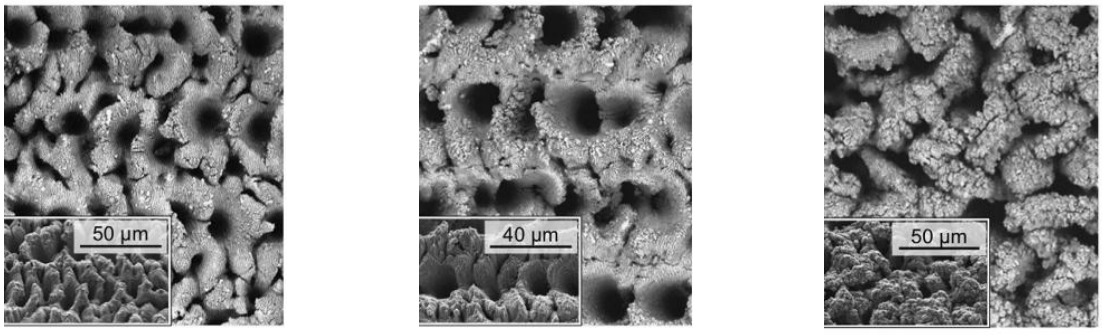
D'autres microstructures peuvent apparaitre à la surface de métaux irradiés par laser femtoseconde, notamment des micro-colonnes, ou des micro-pics (spikes) [29], présentés Fig. 3.3. Leurs structures sont régulières et pratiquement coniques. Elles apparaissent pour des valeurs d'énergies plus importantes [29], leurs tailles dépendent des conditions d'irradiation laser. Il est à noter que des LIPS peuvent s'observer sur les spikes [30]. De plus la formation des spikes est aussi conditionnée par le taux de recouvrement des impulsions lasers.



(a) (b)

Fig. 3.3 : (a) Photographie MEB de spikes obtenue sur un échantillon de titane et (b) observation de ripples sur les spikes [30]

Des micropores peuvent aussi se former [31]. La matière se réorganise spontanément sous l'effet des très fortes énergies émises par le faisceau laser. Les pores sont irréguliers et boursoufflés, comme on peut le voir sur la Fig. 3.4.



(a) (b) (c)

Fig. 3.4 : (a) (b) (c) Clichés MEB de micropores obtenus sur du titane [31]

II.3. Ablation de métaux par laser femtoseconde

Il est possible de caractériser le processus d'ablation des métaux en utilisant les quatre paramètres principaux de l'ablation laser : le seuil d'ablation, le taux d'ablation, le facteur d'incubation et l'influence du taux de répétition.

II.3.1. Le seuil d'ablation

Dans le Chapitre 2, la notion de fluence à été présentée sous l'hypothèse d'un faisceau gaussien. Cette notion est fondamentale pour bien comprendre ce qu'est le seuil d'ablation. En effet, celui-ci concorde avec la quantité minimale d'énergie nécessaire que doit apporter un faisceau laser pour obtenir l'ablation de celui-ci. Il s'agit donc de l'énergie nécessaire pour que la propagation des effets thermiques et thermomécaniques, qui créent une onde acoustique au sein du matériau, conduisent à l'éjection de matière. On peut quantifier le seuil d'ablation d'un matériau à l'aide de la fluence, en J/cm², soit une quantité d'énergie par unité de surface. Il est à noter que de nombreuses approches existent pour déterminer le seuil d'ablation d'un matériau dans la littérature [32][23][33][34], induisant une multiplicité des valeurs caractérisant le même phénomène.

II.3.2. Le taux d'ablation

Le taux d'ablation permet de quantifier la quantité de matière arrachée à la cible après son interaction avec un faisceau laser. Le taux d'ablation dépend à la fois des paramètres lasers mais aussi des propriétés intrinsèques du matériau à usiner, comme son coefficient d'absorption ou sa conductivité thermique ou encore sa température de fusion.
Comme on peut l'observer en Fig. 3.5, deux régimes d'ablation existent [35] : le régime d'ablation douce ou, de basse fluence, et le régime d'ablation forte, ou de fluence importante.

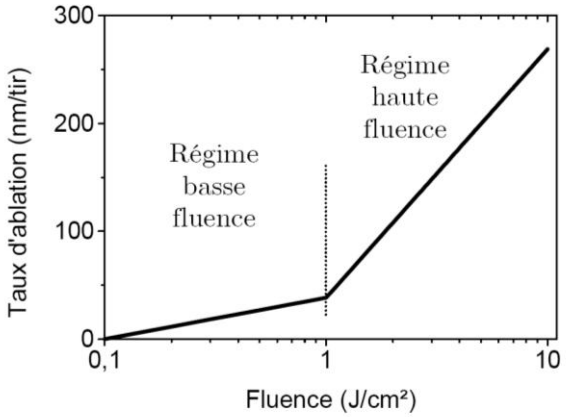


Fig. 3.5 : Deux régimes d'ablation mis en évidence avec la schématisation de la dépendance du taux d'ablation en fonction de la fluence laser (AU) [32]

Pour le régime d'ablation en basse fluence, la qualité d'ablation est améliorée mais le taux d'ablation reste faible induisant une efficacité d'usinage réduite. A contrario, en régime de haute fluence, le taux d'ablation est plus important mais la qualité d'usinage est dégradée.
De façon optimale, il faut se placer au seuil d'ablation pour maximiser la qualité d'usinage même si l'efficacité du procédé, notamment en termes de temps d'usinage ne sera pas parfaite.

Des expériences ont été menées sur de l'acier afin d'observer les différentes structurations obtenues en basse et haute fluence. Pour cela, une plaque d'acier à été exposée à un faisceau laser femtoseconde (10 μm de diamètre) à 1030 nm (P_m = 13.2 W à 200 kHz) avec différents taux de répétition et différentes puissances lasers. Le balayage de l'échantillon a consisté en un quadrillage à 75 mm/s. L'espacement entre deux passages de faisceau est réglé à 30 μm et 10 passes successives sont opérées. La Fig. 3.6 montre les différentes microstructures observées lors de ces expériences. En régime de basse fluence (Fig. 3.6.a.b.c.d) les microstructures obtenues sont de bonne qualité, néanmoins, peu de matériau est ablaté alors qu'en régime de haute fluence (Fig. 3.6.e.f.g.h), le taux d'ablation est plus élevé induisant une diminution de la qualité d'usinage.

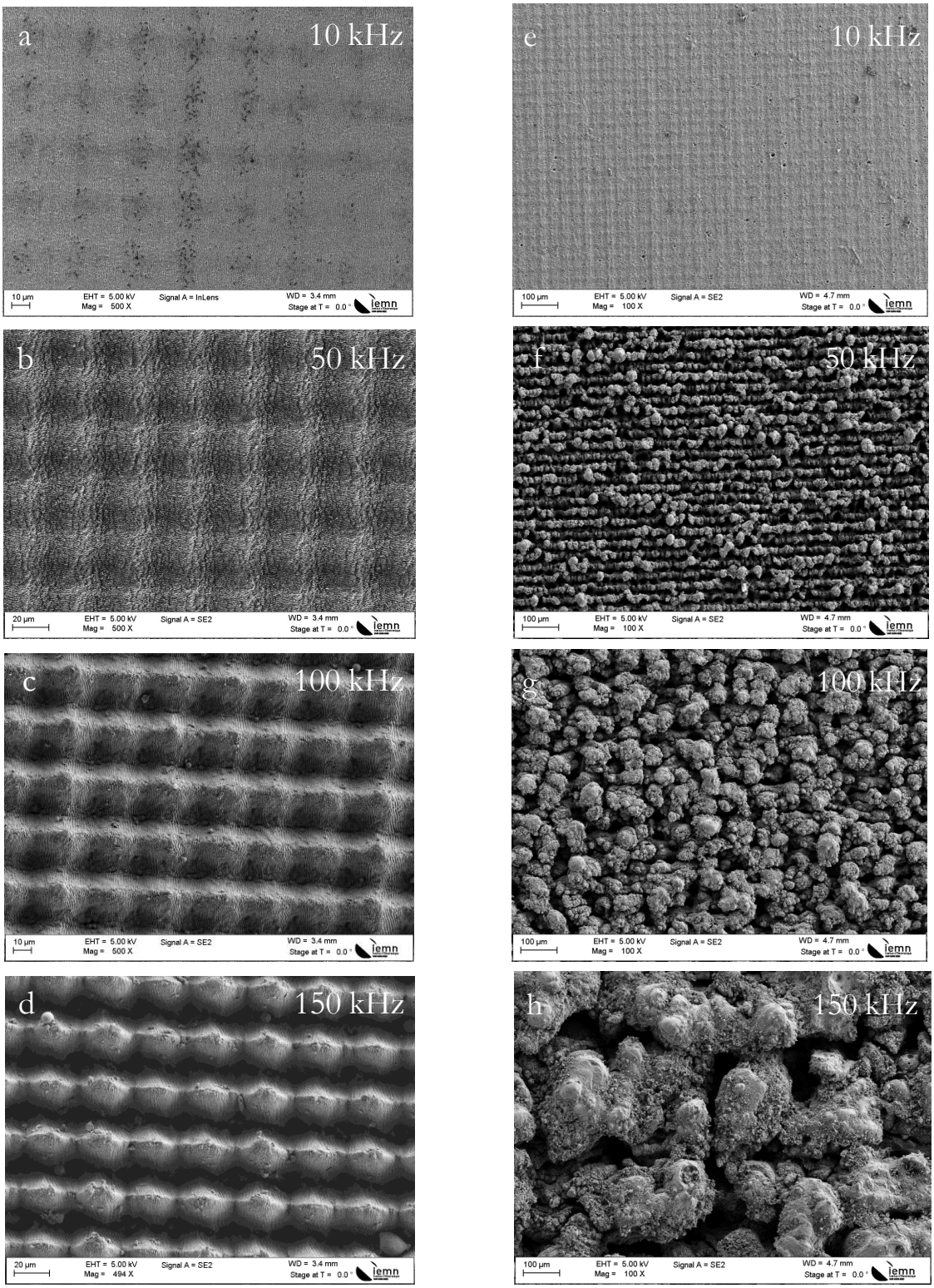


Fig. 3.6 : Microstructures obtenues sur de l'acier (a) (b) (c) (d) en régime de basse fluence (P_m = 1.32 W) et (e) (f) (g) (h) en régime de haute fluence (P_m = 13.2 W)

II.3.3. Le facteur d'incubation

Dans le cas d'une analyse pour un faisceau stationnaire, la fluence au seuil d'ablation F_{seuil} peut être reliée à la fluence F_0 et à la taille (waist) ω_0 du faisceau par [36]:

$$D_{cratère}{}^2 = 2\omega_0{}^2 \ln\left(\frac{F_0}{F_{seuil}}\right) \tag{3-1}$$

avec $D_{cratère}$ le diamètre du cratère formé au seuil d'ablation.

Il est à noter que le seuil d'ablation est également fonction du nombre d'impulsions incidentes sur le matériau. Dans le cas d'un grand nombre d'impulsions, l'accumulation de l'énergie induit un phénomène d'incubation qui permet de modifier le seuil d'ablation. En effet, l'énergie d'une impulsion n'est pas suffisante pour modifier sensiblement la structure du matériau. Le nombre d'impulsions incidentes va donc être déterminant sur la modification structurale des matériaux usinés [4]. Le seuil d'ablation pour une impulsion unique F_{seuil} est relié au seuil d'ablation $F_{seuil(N_{imp})}$ avec plusieurs impulsions incidentes par la relation [37] :

$$F_{seuil}(N_{imp}) = F_{seuil} N_{imp}{}^{S-1} \tag{3-2}$$

avec S le facteur d'incubation. Si S est égale à 1, il n'y a pas d'incubation.
On peut donc déterminer l'influence du nombre d'impulsions incidentes sur le diamètre du cratère créé par l'équation :

$$D_{cratère} = \omega_0 \sqrt{2\, ln\left(\frac{F_0}{F_{seuil} N_{imp}{}^{S-1}}\right)} \tag{3-3}$$

Si on trace l'évolution du diamètre du cratère d'ablation en fonction du nombre d'impulsions incidentes (Fig. 3.7), le phénomène d'incubation est mis en évidence, puisqu'en effet, on peut observer que le diamètre du cratère augmente de façon significative pour les premières impulsions lasers puis tend à saturer au delà.

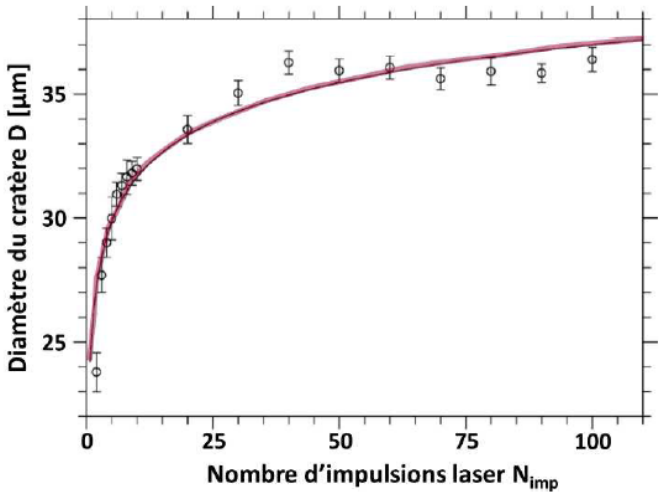
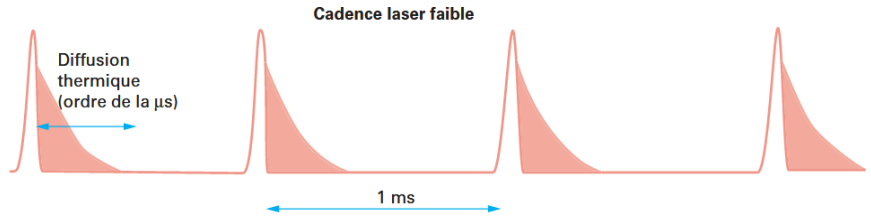


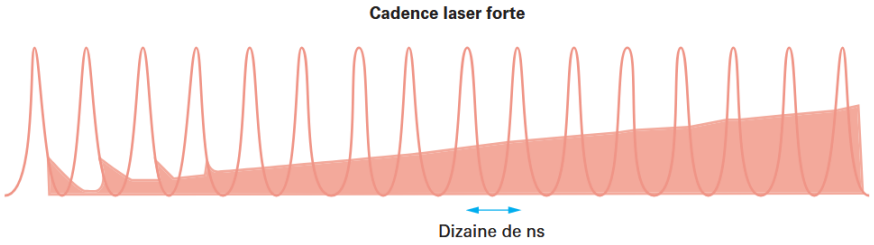
Fig. 3.7 : Évolution du diamètre du cratère créé par ablation en fonction du nombre d'impulsions lasers incidentes, mise en évidence du phénomène d'incubation [34]

II.3.4. L'influence du taux de répétition

Le taux de répétition joue également un rôle prépondérant sur l'ablation des matériaux par un faisceau laser. En effet, si on utilise une cadence importante, l'énergie déposée par une impulsion peut ne pas être complètement relaxée quand la deuxième arrive et ainsi de suite. Ce phénomène, s'additionnant à chaque impulsion, le taux de répétition du laser peut donc contrarier de façon importante les phénomènes de relaxation au sein du matériau usiné [4]. L'influence du taux de répétition, présentée en Fig. 3.8, est donc particulièrement importante à prendre en compte puisqu'une cadence importante peut entrainer des effets thermiques néfastes, dues à l'accumulation d'énergie, durant l'usinage de matériaux.



(a)



(b)

Fig. 3.8 : Influence de la cadence [4]

La durée de diffusion thermique dans un matériau est de l'ordre de quelques microsecondes (entre 2 et 5 µs) [38][11]. En comparant cette durée avec la période de tir, il est possible de mieux comprendre l'influence du taux de répétition sur la création d'effets thermiques au sein du matériau usiné. Pour des taux de répétition relativement bas (Fig. 3.8.a) la diffusion de chaleur liée à une impulsion unique dans le matériau atteint un état stationnaire. La température locale augmente puis diminue quasi instantanément avant qu'une nouvelle impulsion ne soit déclenchée. Pour des taux de répétition plus importants (Fig. 3.8.b), le temps entre deux impulsions est inférieur à la durée de diffusion de l'énergie thermique du matériau ce qui induit une accumulation thermique ne permettant pas d'atteindre un état stationnaire. Des phénomènes thermiques peuvent apparaitre étant donné que la température locale du matériau ne fait que s'accroitre jusqu'à la fin du tir laser.

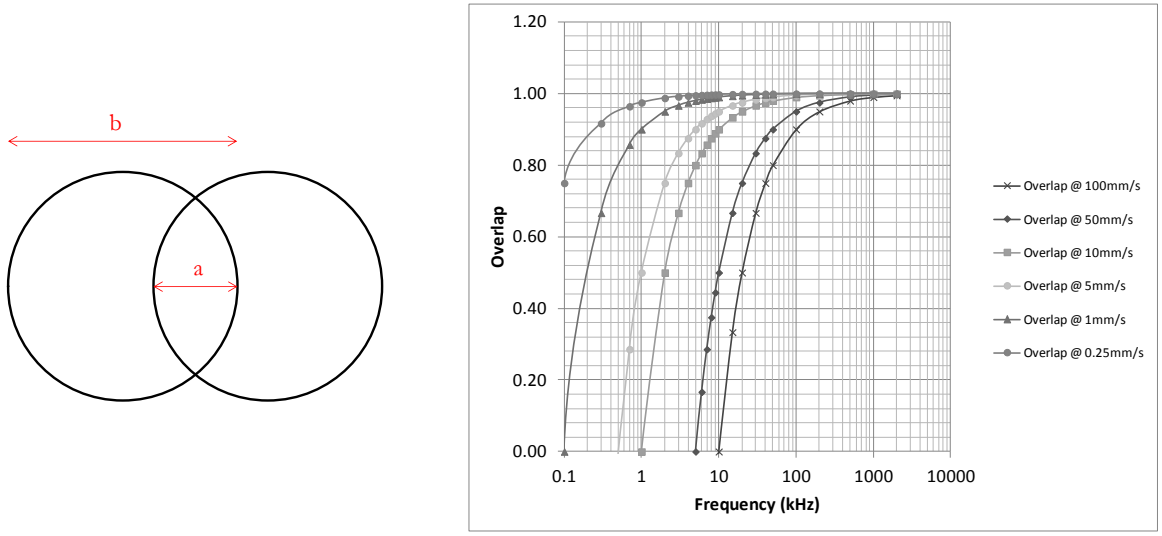
II.3.5. Le taux de recouvrement

Jusqu'à présent, nous considérions une exposition laser statique. Dans la suite de ce chapitre, on considère que le faisceau laser est en mode balayage. **:** Pendant l'usinage d'un matériau, un faisceau laser femtoseconde balaye l'échantillon quand ce n'est pas l'échantillon qui est en mouvement. Celui-ci se déplace à une vitesse v_{scan} et possède un taux de répétition ν_{rep}. À partir de ces deux paramètres il est possible de déterminer le taux de recouvrement linéaire R_L ($0 \leq R_L < 1$) des impacts lasers par l'équation :

$$R_L = 1 - \frac{v_{scan}}{v_{rep}.d_{spot}} \quad (3\text{-}4)$$

avec d_{spot} le diamètre de la tache laser.

Graphiquement, il est possible d'illustrer le recouvrement linéaire avec la Fig. 3.9.a. Le recouvrement linéaire (Overlap) a été calculé pour différentes vitesses de balayage du faisceau laser et en fonction du taux de répétition, et est présenté Fig. 3.9.b.



(a) (b)

Fig. 3.9 : (a) Illustration du taux de recouvrement avec R_L = a/b et (b) recouvrement linéaire en fonction du taux de répétition du laser pour différentes vitesses de balayage

III. Étude expérimentale et caractérisations de la structuration d'interconnexions pour PCB

La structuration d'interconnexions sur PCB est une technique qui consiste à usiner sélectivement un matériau qui possède une fluence seuil d'ablation élevée (ici le métal) par rapport au matériau sous-jacent, dont le seuil d'ablation est faible (le polymère). Le laser femtoseconde nous permet de structurer des empilements de matériaux afin de réaliser des circuits d'interconnexions avec une précision micrométrique. Ici, nous travaillons sur un matériau multicouche (Fig. 3.10), composé d'un empilement de couches conductrices (or 1 µm, nickel 3 µm et cuivre 9 µm) sur un matériau isolant (PTFE 51 µm). Nous souhaitons retirer la couche métallique sans enlever le polymère, qui garantie l'isolation électrique, afin de fabriquer des circuits.

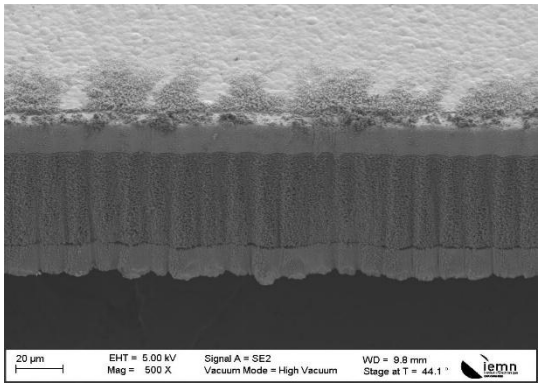


Fig. 3.10 : Photographie MEB de la coupe d'un matériau multicouche (Rogers ; RT Duroid) pour la fabrication d'interconnexions électriques

La technique la plus répandue pour la réalisation de ce genre de circuit est l'usinage de surface (cf Fig. 3.11). Cette technique consiste à venir ablater le métal en balayant le faisceau laser sur toute la surface métallique à retirer.
Une étude expérimentale, sur les conditions opératoires pour l'obtention d'interconnexions électriques à partir d'un laser femtoseconde, a permis le développement d'une technique inédite (cf Fig. 3.14) de fabrication d'interconnexions à l'IEMN. Le faisceau laser est utilisé pour délimiter et fractionner le matériau conducteur d'un PCB (Printed Circuit Board) à retirer, afin de l'isoler thermiquement. Le faisceau est aussi utilisé comme source de contrainte mécanique afin de 'décoller' les fragments précédemment isolés.

III.1. L'usinage de surface

L'usinage de surface est une technique classique de micro structuration laser, qui permet de structurer un matériau par passes successives les unes à côtés des autres. L'usinage de surface peut être utilisé pour la micro structuration ou l'ablation de la plupart des matériaux.

III.1.1. La technique d'usinage de surface

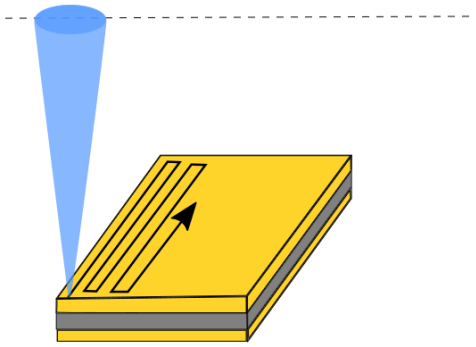


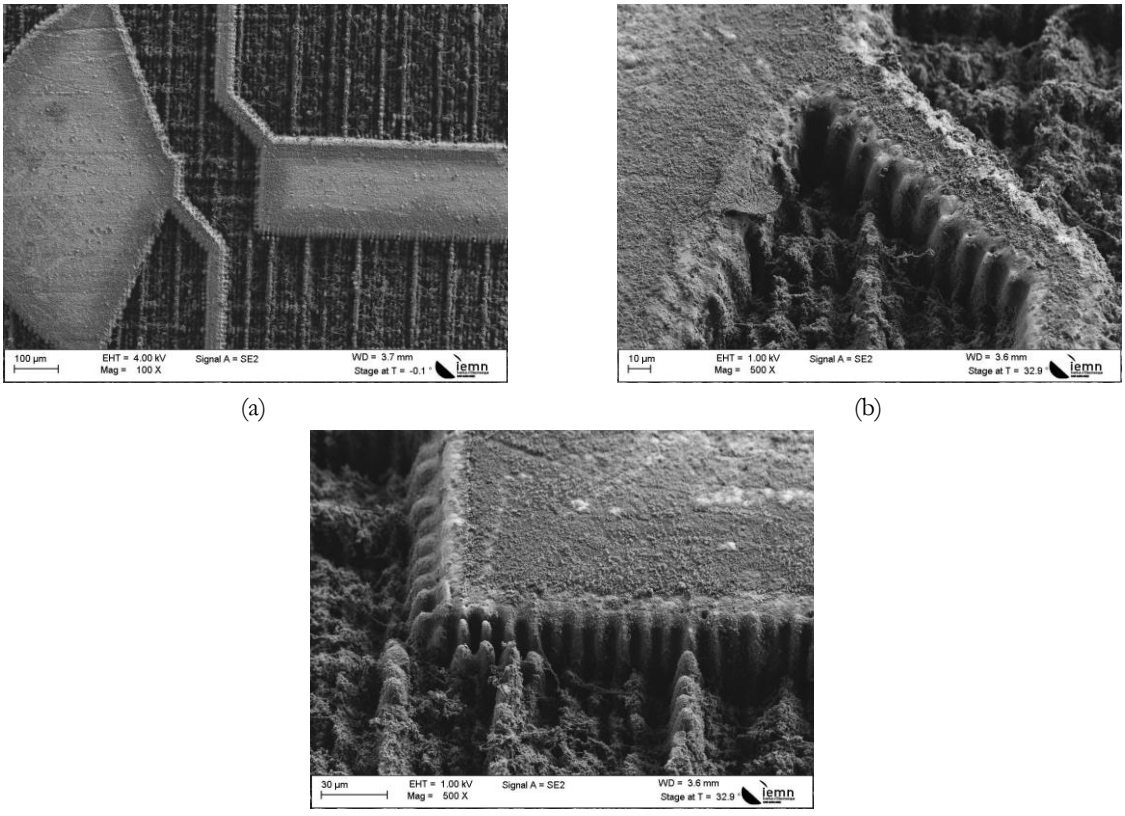
Fig. 3.11 : Schéma présentant le procédé d'usinage de surface pour la structuration d'interconnexions

Le procédé d'usinage de surface consiste à ablater tout le matériau conducteur que l'on souhaite retirer pour créer une piste électronique. Toute la difficulté de cette technique réside dans le fait de déterminer les bons paramètres lasers pour ne pas détériorer la couche isolante qui se trouve sous la

couche de matériau conducteur. Il est à noter que l'ablation du matériau conducteur nécessite une plus grande énergie de faisceau laser que pour le matériau isolant. En effet le seuil d'ablation pour des matériaux métalliques est bien supérieur à celui des matériaux isolants à cause des propriétés intrinsèques des matériaux (température de fusion, coefficient de diffusion thermique etc.). De plus cette technique est particulièrement chronophage car il s'agit d'une technique de balayage de la totalité de la surface à traiter et les passages répétés du faisceau sur toute la surface à retirer peuvent être nombreux. La structuration de métaux par usinage de surface induit aussi une forte rugosité de la couche isolante à la fin du procédé.

III.1.2. Caractérisations de puces obtenues par usinage de surface

Dans un premier temps, des échantillons structurés par usinage de surface fabriqués dans un autre laboratoire ont été caractérisés à l'IEMN. Les clichés MEB de la Fig. 3.12 présente ces caractérisations.



(a) (b)

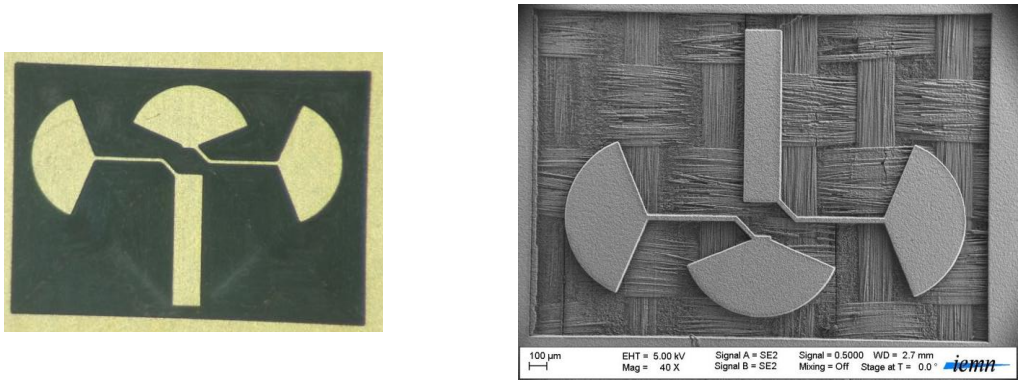
(c)

Fig. 3.12 : Photographies MEB de la structuration d'interconnexions obtenues par usinage de surface

On observe sur la photographie MEB présentée Fig. 3.12.a des irrégularités de surface sur la couche isolante. Celle-ci est très rugueuse et sur les Fig. 3.12.b et Fig. 3.12.c, des zooms sur la largeur des pistes et les contacts métalliques, il est possible d'observer que la couche d'isolant est boursouflée avec des redépôts de matière. La tranche des contacts métalliques a aussi beaucoup de défauts. Le taux de recouvrement du laser, déterminé par le rapport du taux de répétition du laser par la vitesse de balayage n'est pas ajusté pour obtenir le meilleur résultat.

Plusieurs séries d'expériences ont été menées à l'IEMN en utilisant l'usinage de surface pour structurer des interconnexions sur un circuit imprimé composé d'une couche de cuivre de 17 µm d'épaisseur en face

avant et en face arrière, et de fibre de verre comme matériau diélectrique d'une épaisseur de 50 µm. Des résultats de caractérisations sont donnés sur la Fig. 3.13.



(a) (b)

Fig. 3.13 : (a) Photographie au microscope optique et (b) Photographie MEB d'usinage de surface

Sur la Fig. 3.13.b le tissage de la fibre de verre est observable. La qualité de l'usinage de surface est bonne, les flancs des contacts électriques sont propres et ne comportent pas d'irrégularité. Le taux de recouvrement du laser est optimal pour obtenir des qualités d'usinage de surface satisfaisantes.

III.2. Technique alternative de fractionnement-décollement (Cut-Shot-And-Peel ; CSAP)

Après avoir présenté la technique classique pour faire de la structuration de matériau conducteur pour les interconnexions électriques, cette partie sera consacrée à la technique développée au sein de l'IEMN. Cette technique à notamment été développée pour structurer des PCBs et en faire des circuits électroniques complexes.

Pour former des pistes électriques avec une forme définie, il est possible d'utiliser une technique, développée au sein du laboratoire, pour retirer partiellement des zones de matériaux conducteurs d'un PCBs. L'aire de matériaux à retirer est fractionnée en zones dont le périmètre est découpé par laser. Quand toutes les zones sont délimitées, un shoot laser défocalisé au centre de celles-ci permet de 'décoller' le matériau à retirer pour structurer les interconnexions. Cette technique est illustrée sur la Fig. 3.14. Le fractionnement du matériau à retirer permet d'isoler thermiquement chaque 'ilots' de forme carrée de ses voisins. L'isolation thermique en face arrière est obtenue par contraste entre conductivité thermique du cuivre et celle du polymère (téflon) respectivement. En effet, la conductivité thermique du cuivre est de l'ordre de 380 W/K/m et celle du téflon est comprise entre 0.23 et 0.25 W/K/m. En termes de comparaison la conductivité thermique du silicium est de 150 W/K/m et celle de l'acier inoxydable est de 15 W/K/m. Après l'isolation thermique des ilots, le faisceau laser est défocalisé et une impulsion unique au centre de chaque carrés permet de décoller ceux-ci du polymère. L'impulsion laser défocalisée va créer une contrainte mécanique qui entraine le décollement des carrés de matériaux conducteur. Un flux d'air permet d'assurer un décollement optimal du cuivre.

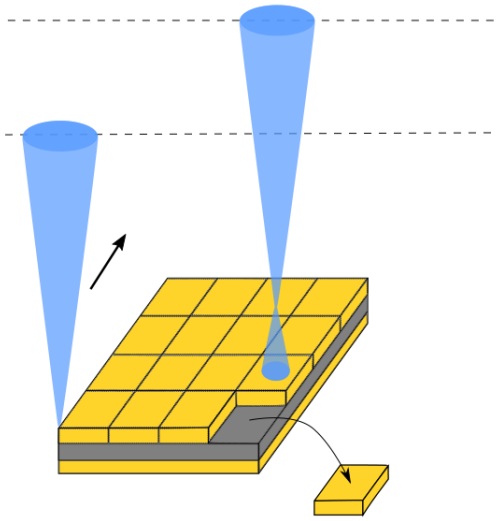
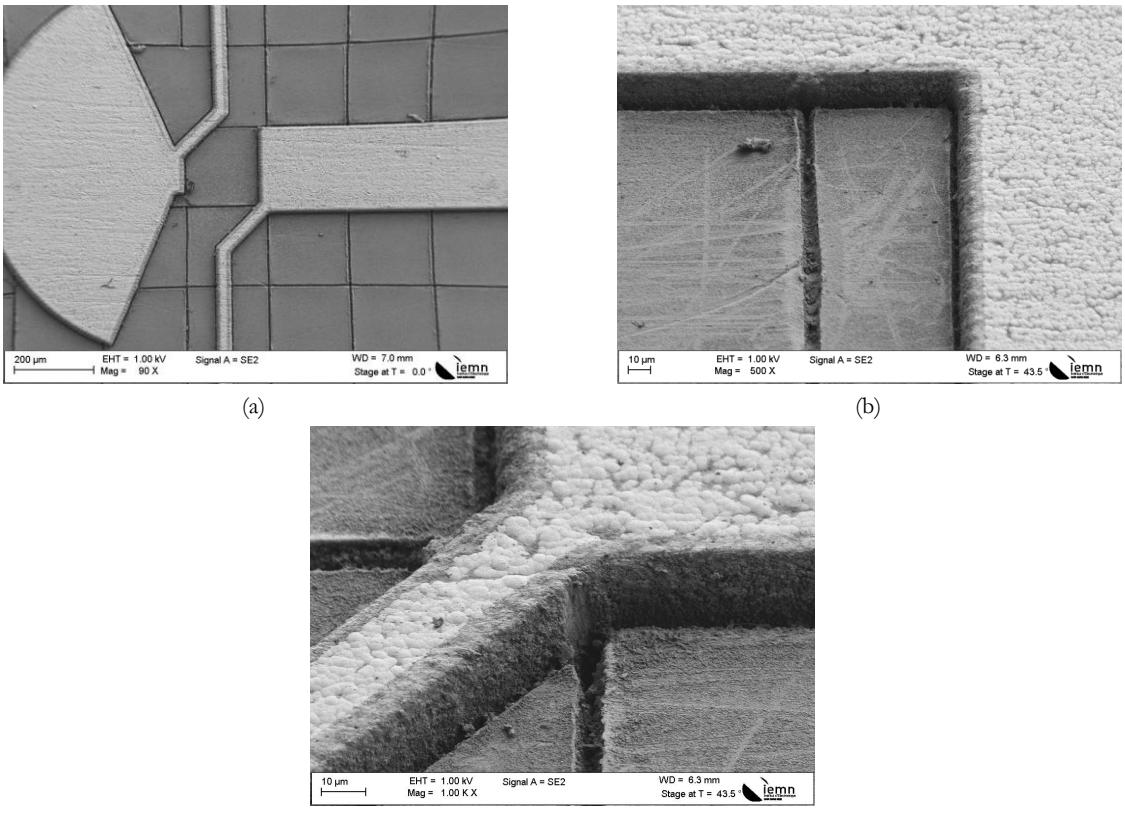


Fig. 3.14 : Schéma présentant la technique CSAP pour la formation d'interconnexions

La technique CSAP est actuellement utilisée au sein de l'IEMN notamment pour la production de puces pour l'entreprise MC² Technologie. Les puces produites ont été caractérisées. Les résultats sont présentés sur la Fig. 3.15. Les résultats sont assez spectaculaires, en effet, le polymère se situant sous le matériau conducteur retiré, reste particulièrement propre, quelques poussières persistent mais elles sont retirées par nettoyage après le processus laser.



(a) (b)

(c)

Fig. 3.15 : Photographies MEB de la structuration d'interconnexions obtenues par la technique CSAP

Les photographies MEB présentent la très bonne qualité des résultats obtenus. On n'observe pas d'irrégularités du processus de fabrication, aucune boursouflure n'est visible et le flanc des pistes électriques est particulièrement régulier. La Fig. 3.16 montre la caractérisation d'une puce fabriquée avec la technique CSAP au profilomètre optique. Cette technique de caractérisation est particulièrement intéressante puisqu'elle permet de visualiser les composants fabriqués en 3D. Cette caractérisation montre la régularité de la surface de diélectrique et la propreté des flancs du connecteur.

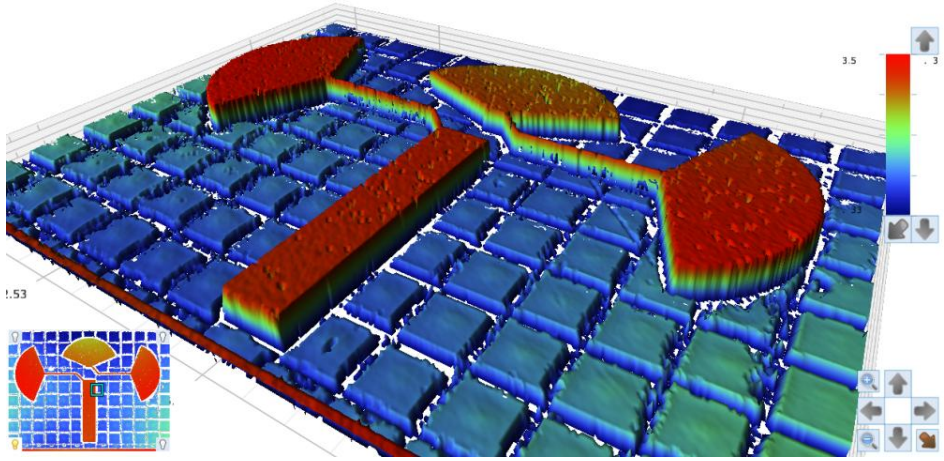
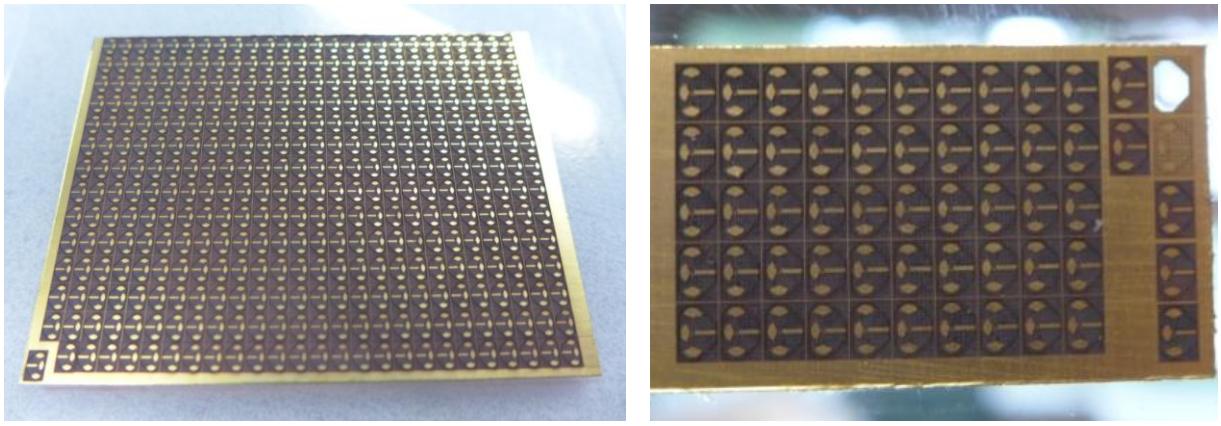


Fig. 3.16 : Caractérisation à l'interféromètre optique d'une puce fabriquée avec la technique IEMN

La technique CSAP est particulièrement intéressante, en effet, il est possible de fabriquer des centaines de puces très rapidement. Après la structuration des puces, celles-ci peuvent être séparées par usinage laser. La Fig. 3.17 présente deux clichés de plaques de PCBs usinées. Sur la Fig. 3.17.a, plusieurs centaines de puces ont été fabriquées.



(a) (b)

Fig. 3.17 : (a) et (b) Photographie de plaques avec plusieurs puces fabriquées avec la technique CSAP

IV. Conclusion

Ce chapitre a été l'occasion de revenir sur la structuration de matériaux multicouches par laser femtoseconde pour la fabrication d'interconnexions. L'absorption et la relaxation de l'énergie durant l'irradiation laser d'un matériau métallique ont été décrites puis les nano et microstructures typiques ont été présentées. L'ablation des matériaux métalliques à été détaillée notamment au travers de la définition du facteur d'incubation et du taux de recouvrement ainsi qu'avec l'influence du taux de répétition.

Deux techniques de structuration d'interconnexions ont été décrites, expérimentées et caractérisées. La première : l'usinage de surface, permet de structurer des matériaux multicouches en ablatant la couche supérieure, conductrice, en balayant le faisceau sur toute la surface à retirer. Selon le taux de recouvrement utilisé l'usinage est de plus ou moins bonne qualité. La seconde technique, développée au sein de l'IEMN : la technique CSAP, permet quant à elle d'isoler thermiquement des ilots de matériau conducteur, de les délimiter au laser les uns des autres et de les isoler du matériau diélectrique grâce au contraste de conductivité thermique. Cette technique permet la structuration d'interconnexions particulièrement rapidement et avec une qualité d'usinage supérieure qu'en usinage de surface classique. Des composants ont été fabriqués et sont notamment utilisés par l'entreprise MC² Technologie.

Bibliographie

[1] K. Bourhis, "Photostructuration par laser infrarouge femtoseconde de verres photosensibles de phosphates de zinc, d'argent et de gallium," *http://www.theses.fr*, Nov. 2011.

[2] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. Alvensleben, and A. Tünnermann, "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 63, no. 2, pp. 109–115, Aug. 1996.

[3] E. G. Gamaly, A. V. Rode, B. Luther-Davies, and V. T. Tikhonchuk, "Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics," *Phys. Plasmas*, vol. 9, no. 3, pp. 949–957, Mar. 2002.

[4] É. Audouard, "Lasers à impulsions ultrabrèves : applications," *Ref TIP520WEB - "Optique Photonique,"* Oct. 2011.

[5] N. Matsapey, "Rendu visuel de surfaces nano-structurées : effet de l'ordre à courte distance," Jun. 2013.

[6] D. Breitling, A. Ruf, and F. Dausinger, "Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses," 2004, vol. 5339, p. 49.

[7] B. Rethfeld, A. Kaiser, M. Vicanek, and G. Simon, "Femtosecond laser-induced heating of electron gas in aluminium," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 69, no. S1, pp. S109–S112, Dec. 1999.

[8] American Institute of Physics. Kaganov, *Soviet physics, JETP*. American Institute of Physics, 1957.

[9] T. L. Anisimov, S. I.; Kapeliovich, B. L.; Perelman, "Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses," Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1974.

[10] T. Itina, "Etudes numériques des mécanismes d'interaction d'un laser impulsionnel aec des matériaux : application à la synthèse de nano agrégats," Mar. 2008.

[11] J. Lopez, E. Mottay, C. Loumena, Y. Zaouter, and M. Faucon, "Micromachining of metal and silicon using high average power ultrafast fiber lasers," in *Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics*, 2010, vol. 2010, no. 1, p. M503.

[12] J. Zelgowski, "Etude et optimisation du procédé de gravure par laser à fibre femtoseconde dédié aux applications industrielles et médicales," *http://www.theses.fr*, Dec. 2014.

[13] K. M. Tanvir Ahmmed and A.-M. Kietzig, "Drag reduction on laser-patterned hierarchical superhydrophobic surfaces," *Soft Matter*, vol. 12, no. 22, pp. 4912–4922, Jun. 2016.

[14] A. Y. Vorobyev and C. Guo, "Femtosecond laser nanostructuring of metals," *Opt. Express*, vol. 14, no. 6, p. 2164, Mar. 2006.

[15] M. Birnbaum, "Semiconductor Surface Damage Produced by Ruby Lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 11, pp. 3688–3689, Nov. 1965.

[16] A. Borowiec and H. K. Haugen, "Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 25, pp. 4462–4464, Jun. 2003.

[17] J. Reif, F. Costache, M. Henyk, and S. V. Pandelov, "Ripples revisited: non-classical morphology at the bottom of femtosecond laser ablation craters in transparent dielectrics," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 197–198, pp. 891–895, Sep. 2002.

[18] T. Tomita, K. Kinoshita, S. Matsuo, and S. Hashimoto, "Effect of surface roughening on femtosecond laser-induced ripple structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 15, p. 153115, Apr. 2007.

[19] J. König and T. Bauer, "Fundamentals and industrial applications of ultrashort pulsed lasers at Bosch," 2011, vol. 7925, p. 792510.

[20] J. E. Sipe, J. F. Young, J. S. Preston, and H. M. van Driel, "Laser-induced periodic surface structure. I. Theory," *Phys. Rev. B*, vol. 27, no. 2, pp. 1141–1154, Jan. 1983.

[21] J. F. Young, J. S. Preston, H. M. van Driel, and J. E. Sipe, "Laser-induced periodic surface structure. II. Experiments on Ge, Si, Al, and brass," *Phys. Rev. B*, vol. 27, no. 2, pp. 1155–1172, Jan. 1983.

[22] J. Reif, O. Varlamova, S. Uhlig, S. Varlamov, and M. Bestehorn, "On the physics of self-organized nanostructure formation upon femtosecond laser ablation," *Appl. Phys. A*, vol. 117, no. 1, pp. 179–184, Oct. 2014.

[23] J. Bonse, S. Baudach, J. Krüger, W. Kautek, and M. Lenzner, "Femtosecond laser ablation of silicon–modification thresholds and morphology," *Appl. Phys. A*, vol. 74, no. 1, pp. 19–25, Jan. 2002.

[24] V. S. Mitko *et al.*, "Properties of High-Frequency Sub-Wavelength Ripples on Stainless Steel 304L under Ultra Short Pulse Laser Irradiation," *Phys. Procedia*, vol. 12, pp. 99–104, Jan. 2011.

[25] D. Dufft, A. Rosenfeld, S. K. Das, R. Grunwald, and J. Bonse, "Femtosecond laser-induced periodic surface structures revisited: A comparative study on ZnO," *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 3, p. 034908, Feb. 2009.

[26] P. Bizi-Bandoki, S. Benayoun, S. Valette, B. Beaugiraud, and E. Audouard, "Modifications of roughness and wettability properties of metals induced by femtosecond laser treatment," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 257, no. 12, pp. 5213–5218, Apr. 2011.

[27] M. Guillermin, F. Garrelie, N. Sanner, E. Audouard, and H. Soder, "Single- and multi-pulse formation of surface structures under static femtosecond irradiation," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, pp. 8075–9079, 2006.

[28] C. Hairaye, F. Mermet, T. Engel, P. C. Montgomery, and J. Fontaine, "Functionalization of surfaces by ultrafast laser micro/nano structuring," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 558, no. 1, p. 012063, Dec. 2014.

[29] B. K. Nayak, M. C. Gupta, and K. W. Kolasinski, "Formation of nano-textured conical microstructures in titanium metal surface by femtosecond laser irradiation," *Appl. Phys. A*, vol. 90, no. 3, pp. 399–402, Mar. 2008.

[30] V. Oliveira, S. Ausset, and R. Vilar, "Surface micro/nanostructuring of titanium under stationary and non-stationary femtosecond laser irradiation," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, no. 17, pp. 7556–7560, Jun. 2009.

[31] K. M. T. Ahmmed, E. J. Y. Ling, P. Servio, and A.-M. Kietzig, "Introducing a new optimization tool for femtosecond laser-induced surface texturing on titanium, stainless steel, aluminum and copper," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 66, pp. 258–268, Mar. 2015.

[32] N. Sanner, "Mise en forme programmable de faisceau laser femtoseconde pour le micro-usinage et la photoinscription de guides d'ondes," Dec. 2005.

[33] M. Hashida, A. F. Semerok, O. Gobert, G. Petite, and J.-F. Wagner, "Ablation thresholds of metals with femtosecond laser pulses</title>," 2001, vol. 4423, pp. 178–185.

[34] P. Mannion, J. Magee, E. Coyne, and G. M. O'Connor, "Ablation thresholds in ultrafast laser micromachining of common metals in air," in *Proceedings of the SPIE, Volume 4876, p. 470-478 (2003).*, 2003, vol. 4876, p. 470.

[35] S. Nolte *et al.*, "Ablation of metals by ultrashort laser pulses," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 14, no. 10, p. 2716, Oct. 1997.

[36] J. M. Liu, "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," *Opt. Lett.*, vol. 7, no. 5, p. 196, May 1982.

[37] Y. Jee, M. F. Becker, and R. M. Walser, "Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 5, no. 3, p. 648, Mar. 1988.

[38] Audouard, "Lasers à impulsions ultrabrèves : applications - Nature spécifique de l'interaction laser-matière en mode ultrabref," 2011.

CHAPITRE 4 : MODIFICATIONS STRUCTURALES DU VERRE PAR IRRADIATION LASER FEMTOSECONDE

Sommaire

SOMMAIRE 123

I. INTRODUCTION 125

II. BASE THEORIQUE DE LA MODIFICATION STRUCTURALE DU VERRE INDUIT PAR LASER FEMTOSECONDE 126

II.1. Simulation de la densité d'énergie au voisinage du point focal 126
II.2. Densification du verre par irradiation laser 128
II.3. Mise en évidence de la densification du verre par photo-inscription 129

III. ÉTUDE EXPERIMENTALE ET CARACTERISATION DE GUIDES OPTIQUES FABRIQUES PAR INSCRIPTION DIRECTE PAR LASER FEMTOSECONDE DANS DU VERRE 132

III.1. Différentes techniques pour la photo-inscription de guides optiques dans du verre 132
III.2. Banc de caractérisation 134
III.3. Étude de l'influence des paramètres lasers sur la fabrication de guides optique par photo-inscription directe 137
III.3.1. Influence de la puissance du laser sur la photo-inscription des guides 137
III.3.2. Influence de la vitesse de photo-inscription 140
III.3.3. Influence du nombre de passes de photo-inscription 141
III.3.4. Influence de l'ouverture numérique 142
III.3.5. Influence de la profondeur d'enterrage des guides 143
III.3.6. Caractérisation des pertes des guides optiques 145

IV. ÉTUDE EXPERIMENTALE ET CARACTERISATIONS DE TRANCHEES FABRIQUEES PAR INSCRIPTION DIRECT ET GRAVURE CHIMIQUE 146

IV.1. Méthodologie 147
IV.2. Influence des paramètres lasers 147
IV.2.1. Influence de la puissance du faisceau 147
IV.2.2. Influence de la vitesse de balayage du faisceau 149
IV.2.3. Influence du taux de répétition 149
IV.2.4. Influence de la longueur d'onde du laser 151
IV.3. Influence de la gravure HF 152

V. MIROIR PHOTONIQUE 155

V.1. Fabrication du miroir photonique 155
V.2. Caractérisation du miroir photonique 157

VI. CONCLUSION 159

BIBLIOGRAPHIE 160

I. Introduction

La micro fabrication par lasers femtosecondes offre la possibilité de fabriquer des dispositifs optiques passifs dans le volume de verre, comme cela a été décrit dans le Chapitre 2, notamment pour être utilisés dans les réseaux photoniques ou pour des applications LoC (Lab on Chip). En d'autres termes, il est possible d'induire des modifications structurales dans du verre par focalisation d'un faisceau laser femtoseconde à l'intérieur d'un matériau transparent. La focalisation du faisceau dans le matériau entraine une forte augmentation de l'intensité dans le volume focal et peut être suffisant pour induire des effets d'absorption non linéaire. La grande intensité du faisceau provoque une ionisation par avalanche des électrons produit par photo-ionisation. Un plasma se crée et des modifications structurales apparaissent, pouvant mener à un changement d'indice du verre, accompagné d'un changement de taux de gravure du matériau au HF. Quand l'intensité du faisceau atteint une valeur limite, il y a ablation du matériau. Pour une irradiation laser femtoseconde, l'ablation correspond à l'enlèvement de matière du à une énergie de faisceau supérieur à l'énergie de cohésion de la matière. Plusieurs applications peuvent découler de ce phénomène comme l'inscription de guides optiques mono ou multi-modes [1][2][3][4], le stockage de données binaires [5][6][7], on encore l'inscription de diviseurs optiques [8][9] ou de guides optiques amplificateurs [10].

D'autres techniques plus standards existent pour la fabrication des composants photoniques passifs, appelés PLC (Planar Ligthwave Circuit). Sur la Fig. 4.1 sont présentées les étapes de fabrication de PLC par hydrolyse à la flamme. Les étapes technologiques pour l'obtention de PLCs sont :

i) un dépôt FHD (Flamme Hydrolysis Deposition)
ii) la formation de motifs lithographiques
iii) la gravure ionique réactive (RIE)

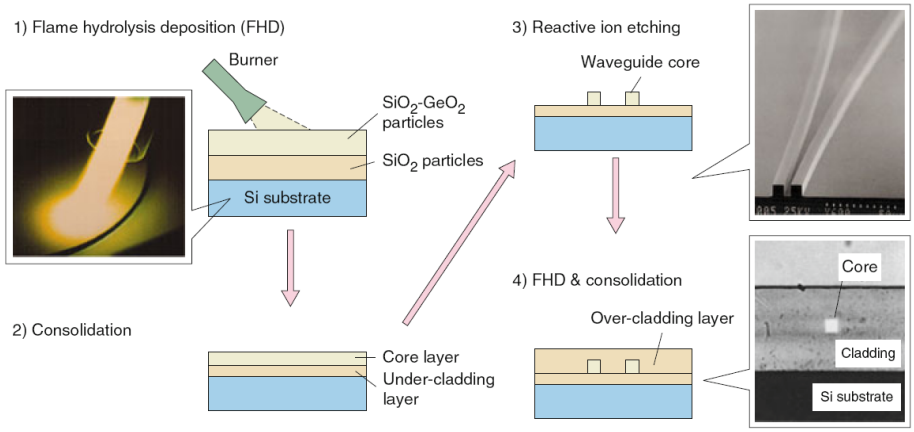


Fig. 4.1: Étapes de fabrication de PLC par hydrolyse à la flamme [11]

L'avantage substantiel de la micro fabrication par laser femtoseconde de composants photoniques passifs par rapport aux procédés PLCs réside dans l'absence de masque, ce qui est particulièrement intéressant pour le prototypage rapide. De plus, il n'est pas nécessaire de travailler dans un environnement de salle blanche, ce qui réduit considérablement la complexité de mise en œuvre de cette technique, réduisant ainsi le coût du procédé. Enfin, contrairement aux techniques habituelles de fabrication des PLCs classiques pour des composants photoniques, l'irradiation laser de verre permet de concevoir et fabriquer des composants aux architectures plus complexes notamment en trois dimensions.

Ce chapitre présente les modifications structurales du verre durant son interaction avec un faisceau laser femtoseconde. Il est organisé en sections balayant successivement :

i) Les bases théoriques de la modification structurale du verre par laser femtoseconde avec des simulations de la densité d'énergie au voisinage du point focal et une étude bibliographique sur la densification des verres.
ii) L'étude expérimentale de guides optiques fabriqués par inscription directe par laser femtoseconde. Cette partie présentera les différentes techniques d'inscription de guides optiques dans le volume de substrat de verre, le banc de caractérisation et l'influence des différents paramètres lasers sur la fabrication des guides.
iii) L'étude expérimentale sur la fabrication de tranchées par inscription laser et gravure chimique en décrivant l'influence des différents paramètres lasers pour l'inscription de tranchées et l'influence de la gravure chimique au HF.
iv) La fabrication de miroirs photoniques comme composants photoniques pour la redirection de signaux dans les interposeurs verre.

II. Base théorique de la modification structurale du verre induit par laser femtoseconde

Les différents composants de photoniques qui vont être présentés ont été obtenus en utilisant la chaine laser décrite dans le Chapitre 2. Ici une attention particulière sera portée sur les optiques utilisées, que ce soit pour la fabrication de guides optiques ou pour la fabrication de tranchées. En effet, la bonne compréhension des paramètres optiques et notamment de l'influence de l'ouverture numérique sur la distribution d'énergie au point focal est indispensable pour déterminer quelles lentilles ou objectif de microscope utiliser pour la micro fabrication.
De plus, les différents phénomènes physiques qui rentrent en compte dans la fabrication de ces composants et particulièrement les changements structuraux menant au changement d'indice de réfraction du verre vont être présentés plus en détails.

II.1. Simulation de la densité d'énergie au voisinage du point focal

L'objectif de cette section réside dans l'étude théorique du profil du faisceau en fonction de la lentille de focalisation utilisée. Pour cela il est nécessaire d'analyser la réponse impulsionnelle des lentilles, appelée PSF pour Point Spread Function, c'est la fonction d'étalement du point. Celle-ci constitue un phénomène majeur de la formation d'une image, elle correspond à la sortie d'un système optique soumis à une impulsion d'entrée. En microscopie, la PSF exacte ne peut être connue qu'approximativement par calcul analytique grâce à une modélisation mathématique de la propagation de la lumière à travers les composants optiques du système. Pour cela, nous utilisons le logiciel PSF lab [12], qui permet de modéliser la distribution d'énergie autour du point focal d'un faisceau laser passant au travers d'un objectif [12]. En effet, la fonction d'illumination PSF, décrit l'intensité créée au voisinage du point de focalisation d'un faisceau lumineux monochromatique passant à travers un objectif de microscope. La Fig. 4.2 est une illustration montrant les plans *X-Y* et *X-Z* d'un échantillon par rapport au faisceau laser.

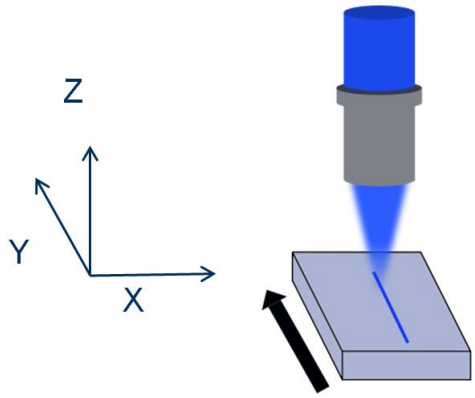


Fig. 4.2 : Schéma montrant les plans *X-Y* et *X-Z* utilisés pour la description des modélisations avec PSF Lab

La Fig. 4.3 montre les modélisations de la distribution d'énergie autour du point focal, dans les plans *X-Z* qui contient l'axe de propagation du faisceau et *X-Y*, qui correspond au plan du substrat de verre perpendiculaire à la direction de propagation du faisceau. Ces résultats de modélisation ont été obtenus avec PSF Lab pour une ouverture numérique de 0.05 (lentille télécentrique f-theta SILL Optics) et une ouverture numérique de 0.5 (LMU NUV X40 Thorlabs) utilisées pour l'usinage du verre et l'inscription directe de guide optique dans le volume de verre. Les paramètres expérimentaux utilisés sont : une longueur d'onde λ=343 nm, correspondant à la ligne UV du laser utilisé. Avec une polarisation circulaire et un indice de réfraction pour l'AF32 de 1.5357 pour la longueur d'onde considérée.

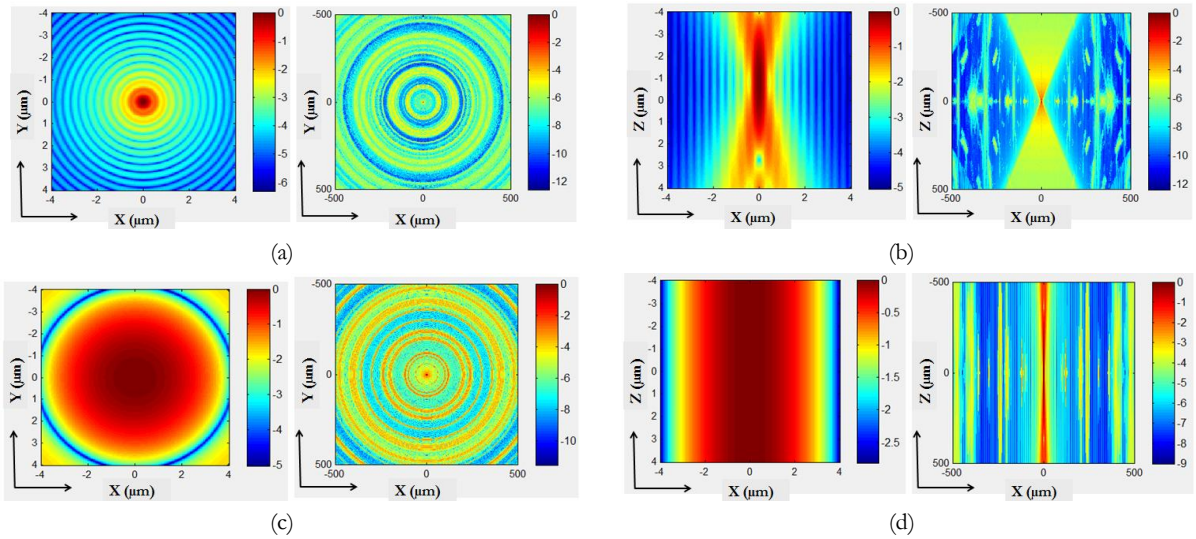


Fig. 4.3: Modélisation de la distribution d'énergie autour du point focal avec (a) et (b) pour NA= 0.5 respectivement dans les plans *X-Y* et *X-Z* et (c) et (d) pour NA=0.05 respectivement dans les plans *X-Y* et *X-Z*, obtenue avec le logiciel PSF Lab [12]

Pour une ouverture numérique de 0.5, l'enveloppe du voxel dans le plan *X-Y* est un point de diamètre inférieur à 1 µm. Dans la direction de propagation du faisceau (plan *X-Z*) la densité d'énergie a un profil elliptique de 1 µm sur 4 µm, la profondeur de champ est petite. Pour cette optique le volume de matériau irradié est extrêmement localisé, favorisant ainsi les transitions multi-photoniques.

Pour NA = 0.05, l'enveloppe du voxel est bien différente. Dans le plan *X-Y* la densité d'énergie entourant le point focal est plus étendue, c'est un disque de 7 µm de diamètre. Dans la direction *X-Z* la densité

d'énergie maximale est pratiquement contenue dans un cylindre de 5 μm de diamètre sur l'épaisseur totale du substrat, à savoir, 500 μm.
Cette modélisation montre que quand l'ouverture numérique de l'optique utilisée pour l'inscription de guide ou le micro usinage du verre est petite, la densité d'énergie déposée par le faisceau dans le verre est très étendue dans la direction de propagation. Typiquement les lentilles télé-centriques d'ouverture numérique 0.05 ne peuvent être utilisées pour l'inscription de guide optique. Il est préférable pour ce type d'application d'utiliser des objectifs de microscope avec des ouvertures numériques plus importantes (0.4, 0.5).
Il faut néanmoins souligner que, plus l'ouverture numérique est grande et plus la distance focale est courte, cela signifie qu'en utilisant un objectif de microscope avec des ouvertures numériques trop grandes, celui-ci doit être placé particulièrement proche de l'échantillon à traiter. Typiquement avec une ouverture numérique de 0.5, la distance de travail est de 1 mm, rendant délicat le placement de l'échantillon par rapport à l'optique utilisée pour l'inscription.

II.2. Densification du verre par irradiation laser

Les verres borosilicates sont des solides amorphes contenant 55 à 65% de SiO_2, 15 à 20% d'Al_2O_3, 5 à 10% de B_2O_3 et 10 à 15% d'oxydes alcalinoterreux, notamment dans le cas de l'AF32 [13].
Dans les verres de silice, les liaisons moléculaires Si-O sont prédominantes et il existe de multiples types de structures cycliques, les plus stables étant les cycles à 5-6 chaînons (5-6-membered rings) du quartz [14], dont la structure est présentée en Fig. 4.4.a.
Afin de rendre compte de l'état structural du verre, Tool a introduit en 1946 [15] le concept de 'température fictive' notée T_f. La température fictive est définie comme la température à laquelle un verre est à l'équilibre. En d'autres termes, T_f est la température à laquelle l'énergie potentielle du verre est égale à celle du liquide. Or, la génération d'ondes de choc pendant le micro usinage par laser femtoseconde induit une zone localisée ou la pression et la température sont très élevées dans le verre [16]. Il est à noter que les verres avec une température fictive importante, une haute pression et des contraintes de compression fortes possèdent des liaisons Si-O plus courtes. Sous ces conditions, des cycles irréguliers (cycles à 3 ou 4 chainons, présentés Fig. 4.4.b) sont créés et la densité du verre augmente. Parc [17] a démontré que, plus la température fictive était importante dans de la silice et plus les angles intertétraèdraux se fermaient, ce qui induit une diminution du nombre de 'grands anneaux', c'est-à-dire des cycles à 5-6 chainons, donc plus de tétraèdres à 3-4 chainons sont créés. De plus, Martinez [18] a montré que, dans des verres SiO_2 GeO_2, quand la température fictive augmente, la vitesse du son augmente, ce qui montre une densification du verre. La diminution de l'angle $\theta_{Si\text{-}O\text{-}Si}$ induit une densification du verre [19]. Or il été démontré par Agarwal et al. [16] que la densification du verre conduit à une augmentation du taux de gravure du verre dans le HF. La densification du verre par l'augmentation de la température fictive impulse fortement sa susceptibilité à la gravure au HF.



(a) (b)

Fig. 4.4 : (a) structure des cycles à 5-6 chainons du quartz et (b) structure des cycles à 3-4 chainons [20]

Pour résumer, l'irradiation par faisceau laser femtoseconde modifie l'ordre structural du verre et peut produire des liaisons atomiques plus petites que dans le verre non irradié, une plus grande densité et une endurance chimique moins importante, c'est-à-dire un taux de gravure au HF plus important [21].
D'autres solutions chimiques peuvent être utilisées pour graver préférentiellement la zone affectée par laser (Laser Affected Zone, LAZ). On peut citer les solutions d'hydroxyde de potassium (KOH) qui ont un taux de gravure inférieur à celui du HF mais qui est plus sélectif sur une longue durée de gravure [14]. De plus, il est possible d'augmenter le taux de gravure du verre modifié par irradiation laser femtoseconde dans une solution de KOH en augmentant la température du bain. Ce type de gravure n'a pas été étudié étant donné qu'il faut compter plusieurs heures de gravure pour des résultats similaires. La gravure chimique au HF, en plus d'être une solution particulièrement efficace, est un moyen à bas coût d'obtenir une structuration efficace dans le verre après irradiation laser [22].

II.3. Mise en évidence de la densification du verre par photo-inscription

La densification du verre par irradiation laser femtoseconde peut être mise en évidence par des mesures au μRaman. Comme le montre la Fig. 4.5, Chan et al. [21] ont démontré que l'intensité des pics 480 cm^{-1} et 600 cm^{-1} augmente avec l'accroissement de l'énergie déposée par exposition laser. L'aire du pic à 480 cm^{-1} correspond à des défauts structuraux de type D1, c'est-à-dire la formation de cycles à 4 chainons, du SiO_2 et l'aire du pic à 600 cm^{-1} correspond à des défauts structuraux de type D2, c'est à dire la formation de cycles à 3 chainons, du SiO_2.

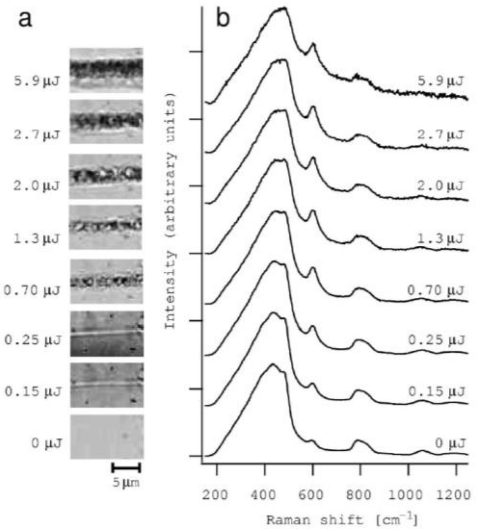


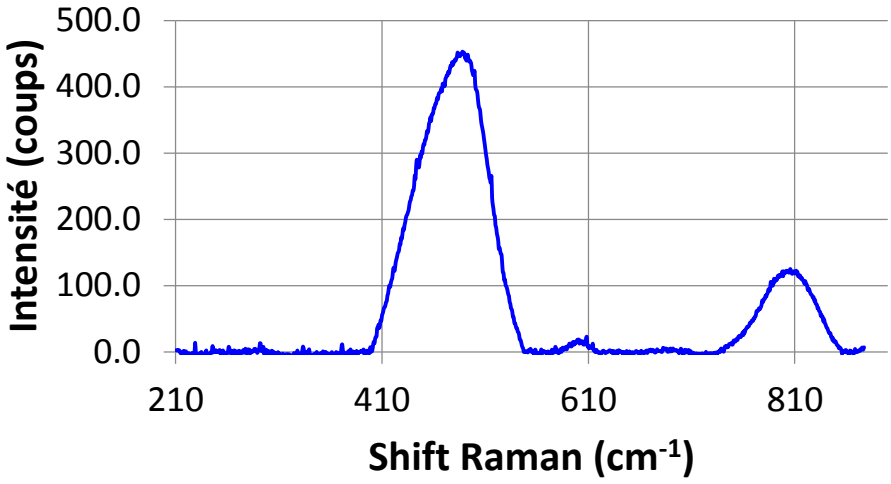
Fig. 4.5 : (a) Microscopies de lignes inscrites dans de la silice fondue pour différentes énergies de faisceau et (b) spectres Ramans correspondants [21]

Les différentes structures du verre en fonction des bandes Raman sont présentées en Fig. 4.6. L'augmentation de l'air de ces pics en fonction de l'énergie déposée au sein du matériau montre une augmentation du nombre de cycles à 3 chainons (défauts de type D2). Il en résulte des angles $\theta_{Si\text{-}O\text{-}Si}$ plus petits et donc une densification du matériau, celui-ci étant moins stable [23]. La densification du matériau par la transformation des cycles à 5-6 chainons pour des cycles à 3-4 chainons, qui sont plus vulnérables aux attaques chimiques, particulièrement au HF [14], induit aussi un changement de l'indice de réfraction du matériau pouvant produire des structures guidantes.

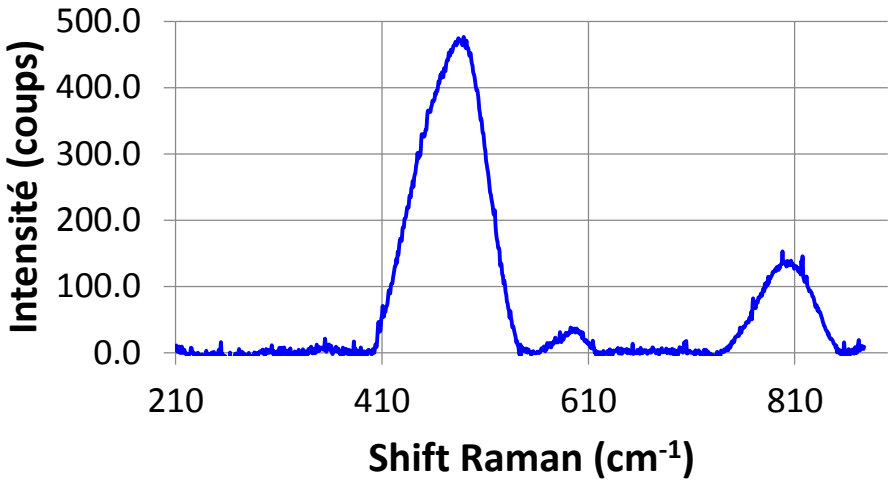
Raman Peak	Frequency Range [cm^{-1}]	Structure	Origin according to literature	References
A	300–380	—	controversial	19, 39, 40–42
B	430–500	SiO_2/Q^4	Si-O-Si bending	19, 24, 40–44
C	490	D1 defect	4-membered rings of SiO_4 tetrahedra	20, 24, 40, 43, 44
D	490–610	$Si_2O_5^{2-}/Q^3$	—Si-O* bending	19, 24, 40, 43
E	605	D2 defect	3-membered rings of SiO_4 tetrahedra	20, 40, 44, 45
F	590–640	$Si_2O_6^{4-}/Q^2$	–Si–O* bending	19, 40, 41
G	649–690	$Si_2O_7^{6-}/Q^1$	-Si—O* bending	19
H/H'	770–790/810–830	SiO_2/Q^4	Si vibration in an oxygen cage	19, 40–44
I	850–890	SiO_4^{4-}/Q^0	Si—O* stretching	40, 41
J	870–910	$Si_2O_7^{6-}/Q^1$	-Si—O* stretching	40, 41, 46
K	940–980	$Si_2O_6^{4-}/Q^2$	–Si–O* stretching	19, 24, 40
L	1010–1060	SiO_2/Q^4	Si-O-Si antisymmetric stretch (TO mode)	40, 41, 43, 44
M	1000–1040	$Si_2O_5^{2-}/Q^{3'}$	—Si-O* stretching derivative	46, 47, 48
N	1050–1100	$Si_2O_5^{2-}/Q^3$	—Si-O* stretching	19, 24, 40, 41
O	1150	$Si_2O_5^{2-}/Q^{3''}$	—Si-O* stretching derivative	40
P	1150–1200	SiO_2/Q^4	Si-O-Si antisymmetric stretch (LO mode)	19, 24, 40, 41

Fig. 4.6: Bandes Raman correspondant aux différentes structures du verre [24]

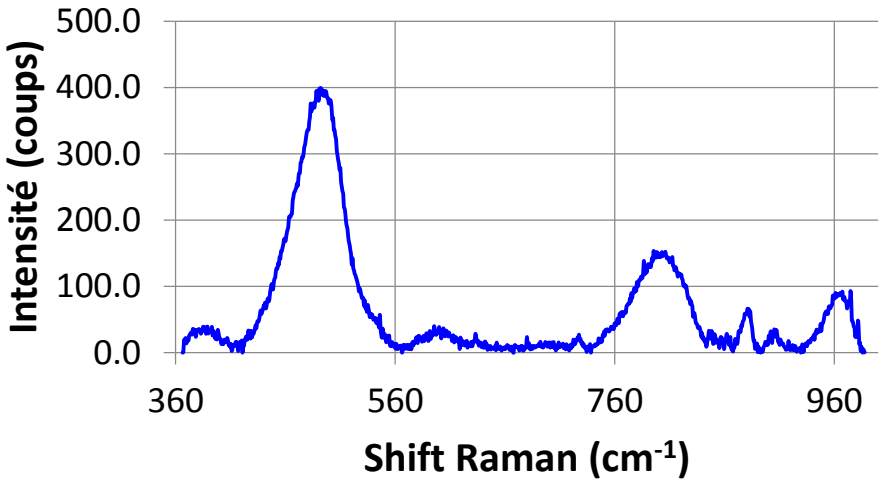
Des expérimentations ont été menées par μRaman pour caractériser les changements structuraux qui s'opèrent dans des échantillons d'AF32 irradiés à différentes puissances lasers. Pour cela des carrés de 1 mm^2 ont été irradiés avec une ouverture numérique de 0.05 à des puissances de 1.18 W et 0.35 W. Des spectres Raman ont été réalisés sur les deux zones irradiées, aux deux puissances et sur une zone non irradiée. Les spectres, présentés Fig. 4.7, ont été ajustés afin de supprimer l'effet de fluorescence obtenu systématiquement lors d'analyses Raman d'échantillons de verre.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.7: Spectres Raman obtenus sur de l'AF32 (a) non irradié, irradié avec une puissance moyenne (b) de 0.35W et (c) de 1.18 W

Pour le verre non irradié et le verre irradié avec une puissance moyenne de 0.35 W, plusieurs pics caractéristiques sont observables, le pic à 480 cm^{-1}, le pic à 600 cm^{-1} et le pic à 800 cm^{-1}. Pour le verre irradié à 1.18 W, ces pics sont aussi observables ainsi que des pics à 890 cm^{-1}, 910 cm^{-1} et à 961 cm^{-1}. Comme il à été décrit dans cette section II.3, l'aire du pic à 480 cm^{-1} correspond à la formation de cycles à 4 chainons (défauts structuraux de type D1) et l'aire du pic à 600 cm^{-1} correspond à la formation de cycles à 3 chainons (défauts structuraux de type D2) [24]. Les pics à 890 cm^{-1}, 910 cm^{-1} et à 961 cm^{-1} correspondent à l'étirement, l'élongation des liaisons Si-O [24]. Et le pic à 800 cm^{-1}, correspond quant à lui à la vibration de l'atome de Si dans une cage d'atomes O [24]. Afin de caractériser la densification du verre, une normalisation a été opérée, entre l'aire des pics à 480 cm^{-1} et 800 cm^{-1} et l'aire des pics à 600 cm^{-1} et 800 cm^{-1}, le pic à 800 cm^{-1} étant pris pour référence, pour comparer le verre non irradié et le verre irradié à 0.35 W. Les résultats de cette normalisation sont donnés dans le Tab. 4.1.

Échantillons	Rapport aire des pics 600/800 cm^{-1}	Rapport aire des pics 480/800 cm^{-1}
Non irradié	0.042	0.009
Irradié à 0.35 W	0.125	0.027

Tab. 4.1 : Résultats de la normalisation des aires des pics Raman

Les résultats de normalisation nous permettent de dire que les aires des pics à 480 et 600 cm^{-1} augmentent entre le verre non irradié et le verre irradié par laser femtoseconde, ce qui met en évidence la formation de cycles à 3 et 4 chainons et une diminution des cycles à 5 et 6 chainons, ce qui induit une densification du verre. De plus, le spectre Raman obtenu avec une puissance d'irradiation de 1.18 W nous montre que les liaisons Si-O sont étirées. La mise en évidence de l'élongation des liaisons Si-O pour des puissances d'irradiation importantes montre la formation de vide dans la structure du verre.

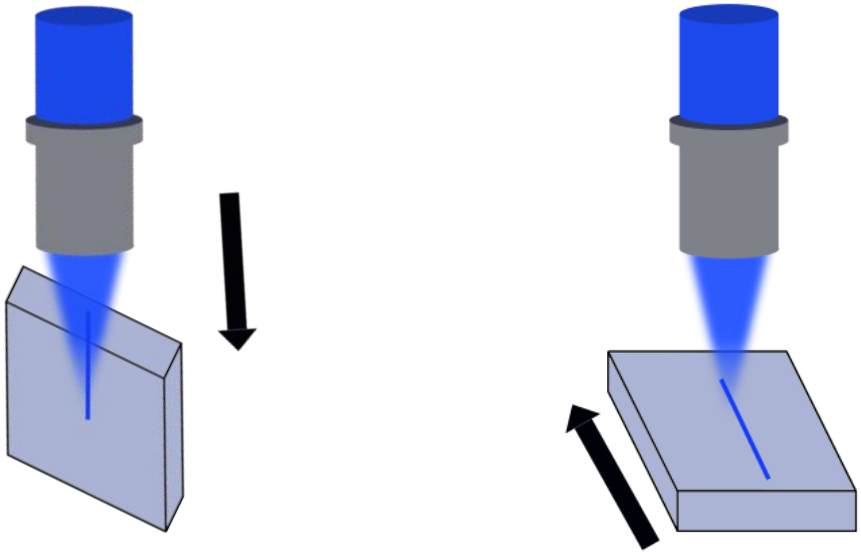
III. Étude expérimentale et caractérisation de guides optiques fabriqués par inscription directe par laser femtoseconde dans du verre

Dans le chapitre 2 et la section II, nous avons introduit et détaillé les raisons du changement d'indice de réfraction du verre après irradiation laser femtoseconde. Un faisceau laser est focalisé dans le volume d'un échantillon de verre, en translatant celui-ci, une ligne d'indice plus important est créée, qui selon les paramètres lasers pourra avoir des propriétés guidantes. Dans cette partie III les différentes techniques d'inscription de guides optiques vont être présentées ainsi que les études expérimentales qui ont mené à la fabrication et à la caractérisation de guides optiques dans le verre AF32. Le banc de caractérisation qui a été conçu dans le cadre de cette thèse sera également décrit.

III.1. Différentes techniques pour la photo-inscription de guides optiques dans du verre

Plusieurs techniques permettent la photo inscription de guides optiques dans le volume d'échantillons de verre. La photo-inscription longitudinale Fig. 4.8 – a : le guide est créé parallèlement à la direction de propagation du faisceau laser et la photo inscription transverse (Fig. 4.8.b) : le faisceau laser est perpendiculaire au guide. En condition longitudinale, le guide créé présente un profil circulaire, dû à la symétrie du faisceau au point de focalisation. Cependant, ce type d'inscription est limité par la distance de

travail de la lentille utilisée. Il peut être avantageux de fabriquer des guides selon ce principe quand la lentille possède une petite ouverture numérique et donc une grande focale ce qui peut permettre de fabriquer des guides centimétriques. Afin de pallier la limitation de la longueur des guides à inscrire, il est possible de travailler par photo inscription transverse. En plus de permettre la création de longs guides, cette technique peut aussi être utilisée pour concevoir des composants photoniques courbés et 3D, la limite étant ici l'épaisseur du substrat de verre utilisé.



(a) (b)

Fig. 4.8: Schéma de la photo inscription en (a) condition longitudinale et (b) en condition transverse

Dans ce travail thèse, les guides optiques ont été fabriqués en condition transverse. Comme le montre la Fig. 4.9, le faisceau laser femtoseconde est focalisé à une profondeur cible d_{target}. Dans un échantillon de verre, le faisceau se translate à une vitesse v déterminée. A l'aide de la loi de Snell Descartes en réfraction, on peut déterminer la profondeur d'enterrage théorique des guides à l'aide de l'Éq. 4-1 :

$$d_{th} = \sqrt{n^2 . d_{target}^2 + R^2 . (n^2 - 1)} \tag{4-1}$$

où n est l'indice de réfraction du verre à la longueur d'onde du laser (pour l'AF32 n = 1.5357 à λ =343 nm), d_{target} est la profondeur cible pour l'enterrement du guide et R est le rayon du faisceau laser à l'interface air verre. Le rayon R peut être déterminé à l'aide de l'Éq. 4-2 :

$$R = \frac{NA.d_{target}}{\sqrt{1-NA^2}} \tag{4-2}$$

avec $NA = sin\ (a)$ l'ouverture numérique de l'objectif de microscope dans l'air.

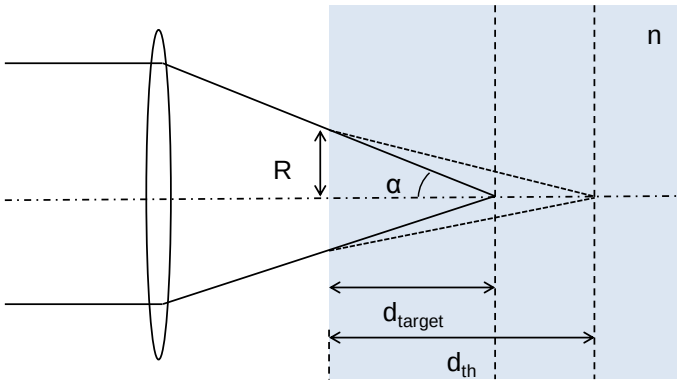


Fig. 4.9: Schéma de la focalisation du faisceau du laser dans le volume du verre

Les caractérisations optiques des guides optiques se font en deux temps. En premier lieu, des profils de modes sont mesurés afin de déterminer les caractéristiques de guidage optique, puis des mesures de pertes sont effectuées dans un second temps.

III.2. Banc de caractérisation

Le banc de caractérisation des guides optiques en profil de modes, présenté en Fig. 4.10, se compose d'une source laser continue reliée à une fibre optique (SMF28), ajustée sur un micro positionneur trois axes (x, y et z) pour injecter la lumière dans la face d'entrée des guides. Face à la fibre optique se trouve un micro positionneur quatre axes (y, z, a et φ) sur lequel les échantillons à caractériser sont montés. Une vision binoculaire reliée à une caméra est placée au-dessus du porte échantillon afin d'observer et de contrôler la distance entre la fibre optique et l'échantillon. Une camera CCD, avec un objectif de microscope ×20 est placée derrière l'échantillon afin de procéder à l'observation des modes du guide en champ proche. Un programme Matlab permet en direct de contrôler la saturation lumineuse des modes. On peut ainsi ajuster le gain, l'offset et la sensibilité de la caméra pour obtenir une visualisation pertinente du ou des modes de propagation. Étant donné que la tolérance d'alignement à l'injection est de quelques microns, le positionnement de la fibre par rapport au guide demande une grande précision de travail, une bonne méthodologie et beaucoup de patience.

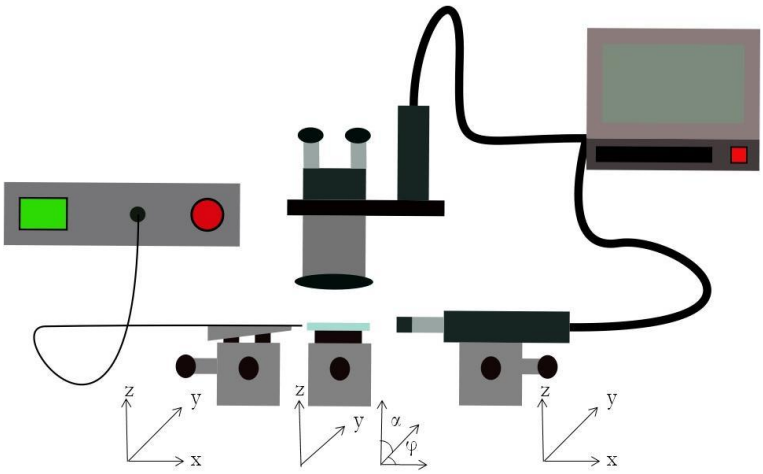


Fig. 4.10: Schéma du banc de mesure des profiles de mode

La première étape, consiste à mesurer le profil de mode de la fibre optique d'injection. Pour cela la fibre est positionnée devant l'objectif de microscope de la caméra et par mouvement de translation le point focal de la fibre est déterminé. La Fig. 4.11 fournit deux illustrations de cette étape. Cette étape est particulièrement importante pour la caractérisation du guide car elle permet de savoir à quelle distance la sortie des guides optiques devra être placée par rapport à l'objectif de la caméra.

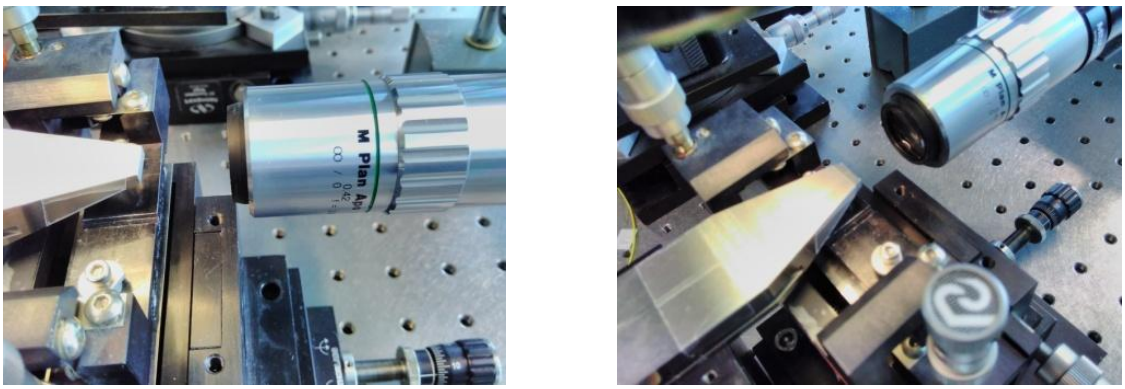


Fig. 4.11: Photos de la mise en place de la fibre devant l'objectif de la caméra latérale

La seconde étape consiste à repérer la position de la fibre optique grâce à la caméra placée au-dessus du banc, puis de substituer l'échantillon à analyser à la fibre. La face de sortie des guides intégrés à l'échantillon doit être positionnée exactement à l'endroit, repéré précédemment, où était placée la face clivée de la fibre optique (Fig. 4.12).

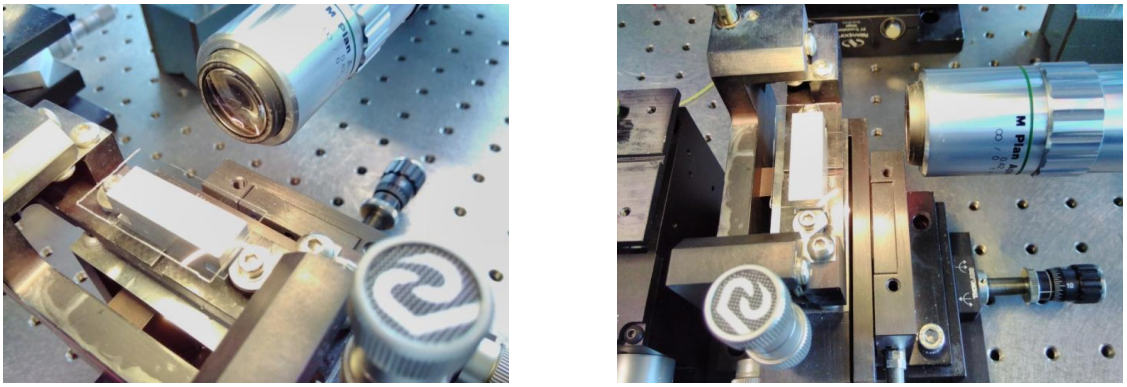
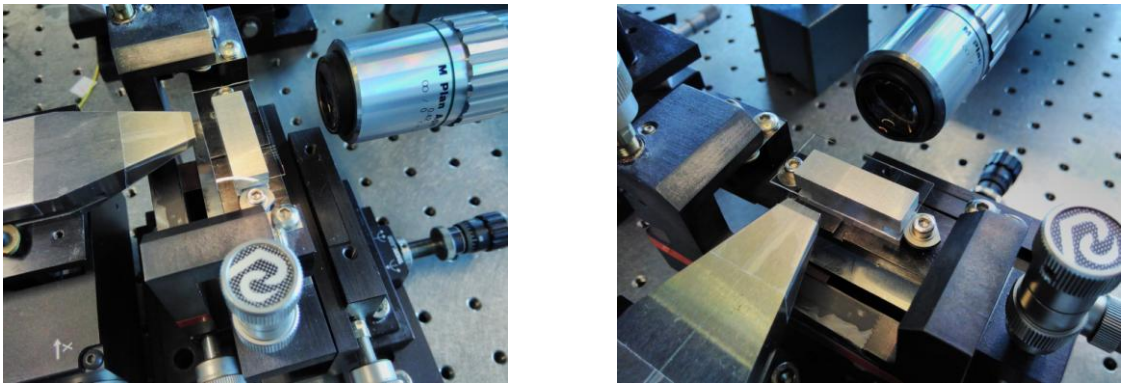


Fig. 4.12: Photos de la mise en place de l'échantillon devant l'objectif de la caméra latérale

Quand l'échantillon est positionné convenablement, il est possible d'observer la tranche de celui-ci à l'aide de la caméra transverse. On peut ajuster la position de la caméra selon l'axe x pour ajuster le point focal sur la tranche. L'étape suivante consiste à placer la fibre optique à proximité de la face où se situe l'entrée des guides, comme présentée sur les photos de la Fig. 4.13. En ajustant la position de la fibre et en translatant l'échantillon en y, on observe l'apparition des profils de modes à partir de l'image enregistrée sur la caméra transverse.



:

Fig. 4.13 : Photos de la mise en place de la fibre, de l'échantillon et de l'objectif de la caméra

Pour une observation précise et rigoureuse des guides, le grossissement de l'objectif de microscope sur la caméra peut atteindre ×50, voire ×80. Ici, la plupart des résultats présentés sont observés avec l'objectif ×20. Grace à cet objectif nous pouvons observer l'épaisseur totale de la tranche de l'échantillon ce qui nous permet de mesurer la profondeur d'enterrage des guides. En effet, les substrats utilisés pour l'inscription des guides ont une épaisseur de 500 μm. Pour ce qui est des mesures de pertes, le banc de caractérisation est pratiquement inchangé. Dès qu'un mode est observé sur la caméra latérale, l'objectif de microscope est retiré et remplacé par une fibre optique multi-modes, afin de récupérer le signal sortant du guide. Cette fibre optique est reliée à un puissance mètre. La puissance d'émission étant connue, les pertes du guide, additionnées aux pertes de couplage et celles résultant des réflexions de Fresnel, peuvent être déduites. Le schéma du banc de mesure de pertes est présenté Fig. 4.14. Pour une plus grande précision lors de l'alignement, les micro-positionneurs des deux fibres optiques d'entrée et de sortie sont fixés à des moteurs piézoélectriques d'une précision de 20 nm.

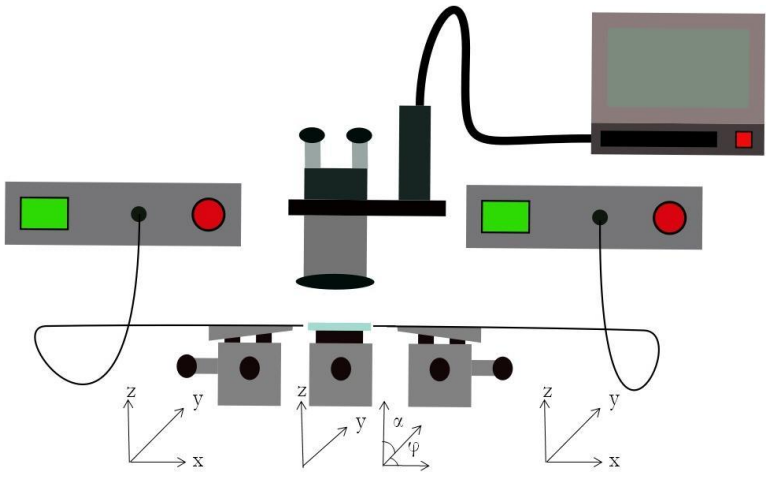


Fig. 4.14 : Schéma du banc de mesure des pertes

Plusieurs séries d'expériences ont été menées afin de déterminer les paramètres lasers adéquats à la fabrication de guides optiques. Dans une étude préliminaire, un premier cadrage des paramètres lasers nous a amené à un processus de fabrication de guides fonctionnels. Ces guides ont été obtenus avec une puissance moyenne de 462 mW, un taux de répétition de 200 kHz et une vitesse de translation de 5 mm/s.

III.3. Étude de l'influence des paramètres lasers sur la fabrication de guides optique par photo-inscription directe

De nombreuses expériences et caractérisations ont été menées pour corréler les paramètres lasers utilisés aux propriétés des structures obtenues. Il a d'abord été question de déterminer un jeu de paramètres permettant l'observation de guides optiques par microscopie optique afin de pouvoir ensuite caractériser leur profil de mode et d'en mesurer les pertes. L'observation de structures guidantes obtenues par inscription laser directe est loin d'être évidente puisque la plupart des guides, facilement visibles, ne sont pas satisfaisants en termes de profil de mode et possèdent des pertes particulièrement importantes. Inversement, lorsque les modifications structurales sont trop faibles, les motifs obtenus n'ont pas de propriété guidante. Les guides décrits par la suite ont donc été inscrits dans des substrats de verre préalablement marqués avec un système d'alignement pour rendre le repérage des structures guidantes plus aisés et faciliter leurs caractérisations. Les tranches des échantillons ne sont pas polies avant leur caractérisation mais tous les échantillons ont été clivés pour obtenir des facettes optiques nettes pour une observation optimale. Le clivage consiste à inscrire au laser une amorce perpendiculaire aux guides photo-inscris sur les substrats de verre. L'opération de clivage est suivie d'un nettoyage à l'acétone et à l'alcool dans un bain à ultra son, afin de retirer les résidus de découpe.

III.3.1. Influence de la puissance du laser sur la photo-inscription des guides

Afin d'optimiser au mieux l'inscription de guides optiques dans le volume de verre AF32, une étude a été menée sur l'influence de la puissance du faisceau laser sur le procédé de photo-inscription. Pour ce faire, différents guides ont été inscrits à des puissances différentes et pour deux ouvertures numériques, NA = 0.4 et 0.5, les autres paramètres restants identiques par ailleurs (f = 200 kHz, v = 5 mm/s)

i) Ouverture numérique de 0.4 :

Les profils de modes obtenus pour ces guides sont présentés en Fig. 4.15. Les guides sont caractérisés avec un signal optique à 1310 nm et un objectif de microscope ×20.

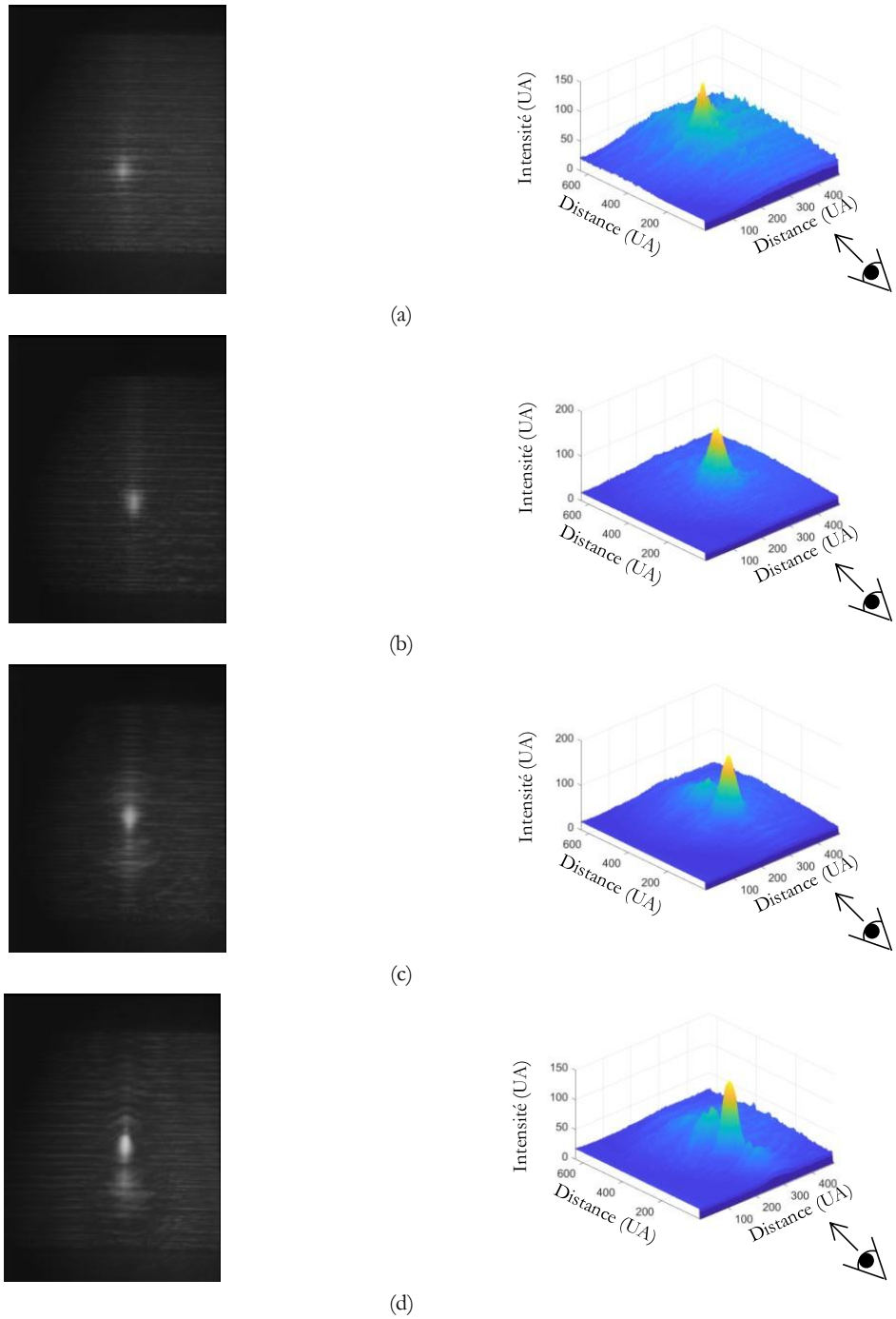


Fig. 4.15: Profils de modes caractérisant l'influence de la puissance du faisceau sur l'inscription de guides optiques (a) 0.382 W, (b) 0.564 W, (c) 0.764 W et (d) 0.955 W ; 👁 indique la direction de propagation du faisceau durant la photo-inscription

Pour des puissances proches de 1 W, on observe un étalement lumineux autour du mode principal du guide. On peut supposer que la modification structurale du verre est telle que la propagation est étalée selon l'axe d'impact du faisceau de photo-inscription, le mode n'est pas symétrique.

Le profil de mode obtenu pour une puissance de 0.564 W est symétrique, intense et ne permet pas de discerner de fuites de lumière. Pour une puissance inférieure à 0.382 W, le profil de mode est très peu intense et en deçà la modification structurale du verre n'est pas suffisante pour obtenir des structures guidantes.

ii) Ouverture numérique de 0.5 :

Les profils de modes obtenus pour des guides inscrits avec une ouverture numérique de 0.5 sont donnés en Fig. 4.16. Ils ont été caractérisés dans les mêmes conditions que les guides précédents.

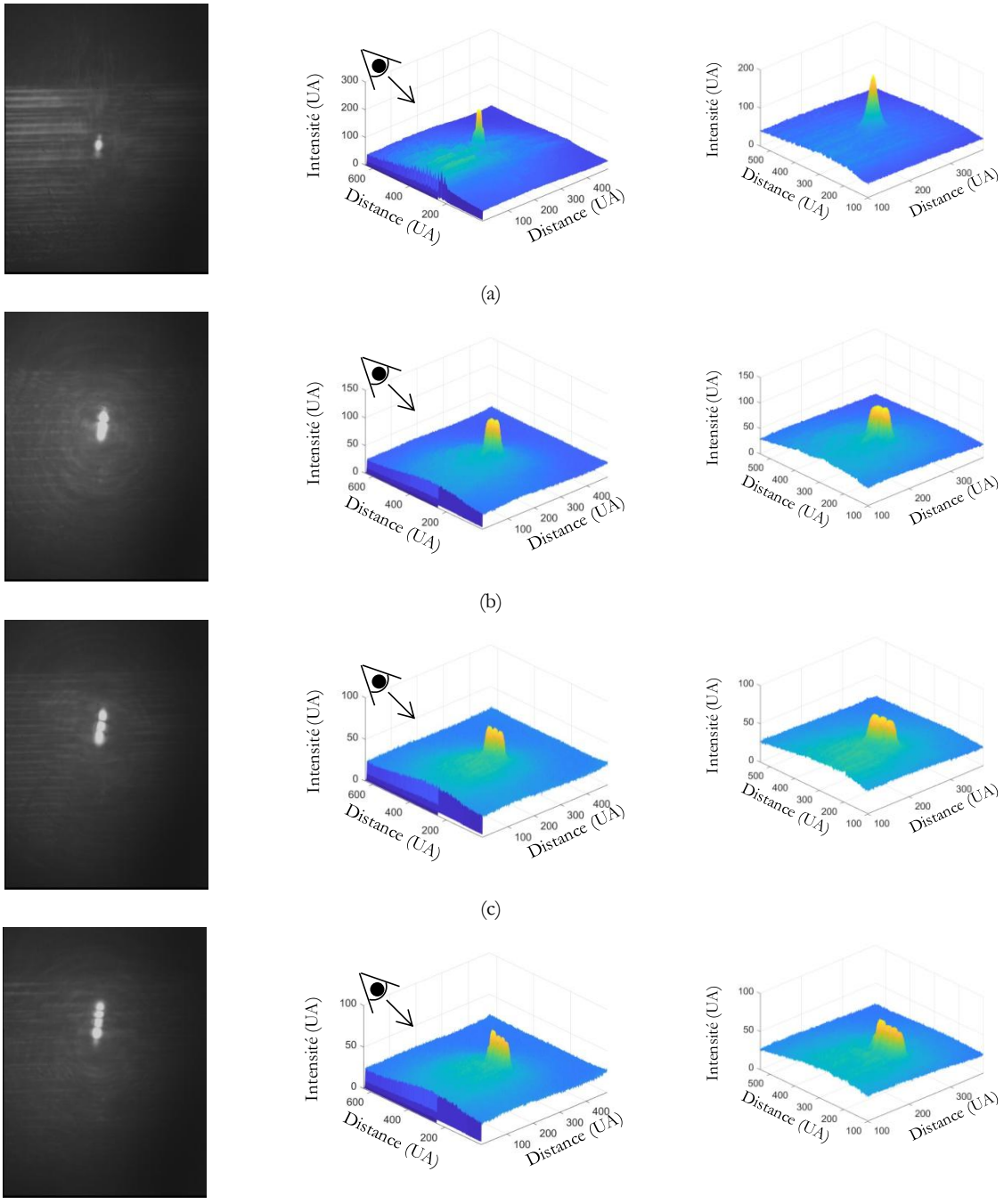


Fig. 4.16: Profils de modes caractérisant l'influence de la puissance du faisceau sur l'inscription de guides optiques (a) 1.08 W, (b) 1.39 W, (c) 1.46 W et (d) 1.54 W ; 👁 indique la direction de propagation du faisceau durant la photo-inscription

Les guides obtenus pour des puissances inférieures à 1W ne sont pas présentés ici mais le seront notamment en Fig. 4.21. Pour ces dernières, la propagation montre des caractéristiques de guidage monomode avec un profil symétrique et très intense. Ce qui nous intéresse ici est le fait que l'on obtienne des propriétés de guidage avec plusieurs modes particulièrement distincts et superposés. Pour une puissance de 1.08 W le guide est monomode et pour des puissances de 1.39 W, 1.46 W et 1.54 W, respectivement 2, 3 et 4 modes superposés sont clairement observables. Il est à noter que pour une ouverture numérique de 0.5, il n'y a pas de fuite de lumière dans l'échantillon puisque la distribution d'énergie au point focal est particulièrement localisée, ce qui favorise l'absorption multi-photonique. La lumière observée est localisée à l'endroit où le verre a été structuré par le laser. Néanmoins, il est clair que l'intensité pour des guides optiques obtenus avec des puissances proches de 1 W est beaucoup plus intense que pour des guides obtenus avec des puissances supérieures. La formation de ces guides multi-modes peut résulter de la formation de filament au sein du volume de matériau irradié avec des zones ou l'indice de réfraction est plus fortement modifié que d'autres. En effet lors de la filamentation, dans la direction de propagation du faisceau, perpendiculairement au plan du substrat, l'intensité du faisceau optique est de plus en plus importante lors de l'auto focalisation, jusqu'à atteindre un pic. Puis l'intensité diminue à cause de l'ionisation du matériau et la formation du plasma, ce qui induit une défocalisation du faisceau laser. Les pics d'intensité correspondent aux différents modes observables, là où l'indice de réfraction est suffisamment important par rapport à celui de la zone non modifiée pour guider la lumière. Plus la puissance du laser est grande et plus le filament créé au sein du volume de verre sera long, ce qui induit un plus grand nombre de pics d'intensité, donc de modes.

Pour résumer, Avec les autres paramètres fixes et pour des puissances basses, inférieures à 0.3 W les modifications structurales ne sont pas suffisantes pour créer des guides. L'indice de réfraction du matériau modifié est trop peu changé pour permettre d'obtenir une différence d'indice, entre le cœur et le revêtement : la 'gaine', suffisante pour que la lumière soit guidée. Pour des puissances supérieures à 0.6 W des fuites de lumière dues à une trop grande modification structurale apparaissent. La densité d'énergie au point focal devient très importante ce qui engendre un changement d'indice de réfraction sur une zone plus importante, la lumière injectée n'est plus guidée convenablement et une partie de celle-ci sort du guide pour créer des fuites de lumière. L'optimisation des paramètres lasers a montré qu'il est important de se trouver dans une plage de puissances entre 0.3 et 0.6 W pour obtenir des structures guidantes optimales.

III.3.2. Influence de la vitesse de photo-inscription

Une étude à été menée pour comprendre l'influence de la vitesse de balayage sur l'inscription des guides optiques. Les guides ont été inscrits avec une puissance de 0.564 W, un taux de répétition de 200 Hz pour une ouverture numérique de 0.4, avec des vitesses de 1, 2 et 5 mm/s. Des caractérisations optiques ont été obtenues avec un banc à 1310 nm et les profils de modes sont présentés en Fig. 4.17.

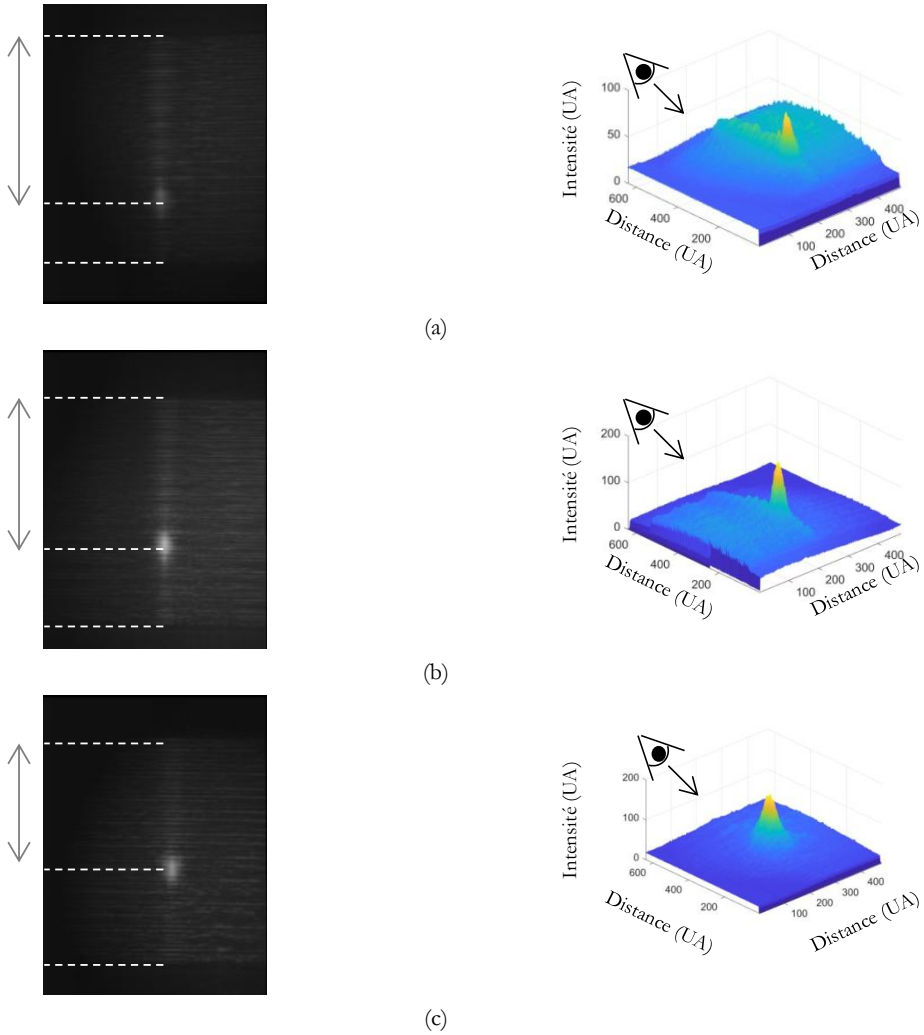


Fig. 4.17: Profils de modes pour caractériser l'influence de la vitesse de balayage sur le mécanisme de photo-inscription de guides optique (a) 1 mm/s, (b) 2 mm/s et (c) 5 mm/s ; 👁 indique la direction de propagation du faisceau durant la photo-inscription

Il est intéressant de constater que la profondeur d'enterrage est dépendante de la vitesse d'inscription des guides optiques. De plus l'intensité des modes obtenus et les fuites de lumière dépendent aussi de la vitesse de balayage du faisceau laser dans l'échantillon durant l'irradiation. Plus le balayage sera lent et plus le guide sera enterré profondément. Par exemple, pour les guides dont les profils de mode sont présentés ci-dessus, la profondeur d'enterrage est de 362, 330 et 290 µm, respectivement, pour des vitesses de 1, 2 et 5 mm/s. De plus, les fuites de lumières sont plus importantes quand le balayage est lent, indiquant une surexposition du verre et une modification structurale anisotrope marquée dans la direction de photo-inscription laser. Sur la Fig. 4.17.a et b on discerne particulièrement bien des fuites de lumière au-dessus et en dessous du guide. Ces effets sont dû au fait que pour des faibles vitesses, le faisceau laser sera focalisé plus profondément dans l'échantillon. La vitesse de balayage optimale pour minimiser les fuites de lumière et l'intensité des modes de propagation des guides s'approche de 5 mm/s. Au-delà, le balayage est trop rapide et aucune modification structurale n'est obtenue dans le volume du verre.

III.3.3. Influence du nombre de passes de photo-inscription

Une série d'expériences a été menée avec l'objectif de microscope LMU NUV ×20, NA= 0.4 pour comprendre l'influence du nombre de passes sur la fabrication de guides optiques. Cette série d'inscriptions a consisté à focaliser le faisceau laser femtoseconde dans le volume de verre AF32 et à déplacer l'échantillon transversalement pour créer des guides. Plusieurs inscriptions ont été réalisées avec les mêmes paramètres lasers (f = 200 kHz, v = 1 mm/s et P_m = 1.23 W), cependant avec plusieurs passages (1, 5, 10, 15 et 20).
Les profils de mode ont été obtenus en caractérisant les guides à 830 nm avec un objectif de microscope ×80 et sont présentés en Fig. 4.18 avec la photographie au microscope optique des guides obtenus.

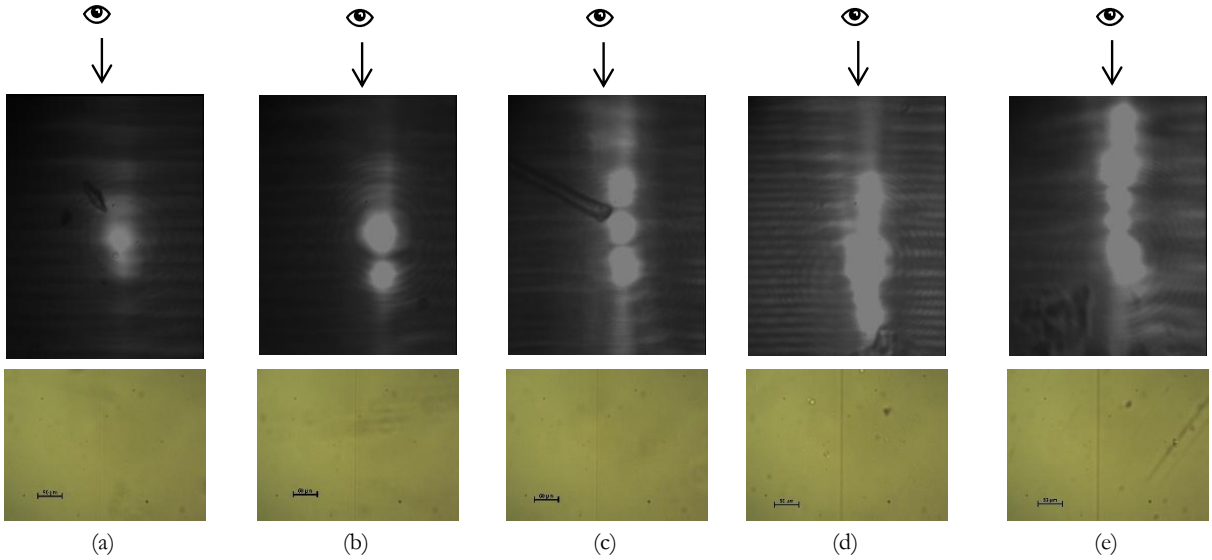


Fig. 4.18 : Profils de mode et photographie au microscope optique pour caractériser l'influence du nombre de passes sur l'inscription de guides optiques (a) 1 passe, (b) 5 passes, (c) 10 passes, (d) 15 passes et (e) 20 passes ; 👁 indique la direction de propagation du faisceau durant la photo-inscription

Les profils de mode présentés montrent que lorsque le nombre de passes augmente, on obtient des guides optiques avec de plus en plus de modes optiques. Lorsque la photo-inscription est réalisée en une passe, la Fig. 4.18.a montre qu'une seule structure guidante est obtenue avec cependant un étalement du mode de propagation. Pour 5 et 10 passes, il est possible de discerner 2 et 3 structures guidantes, respectivement. Pour les guides obtenus avec 15 et 20 passes il est difficile de déterminer le nombre de modes visibles. On peut aussi noter que sur les photographies au microscope optique, plus le nombre de passes est important et plus il est facile de discerner les guides obtenus. Le nombre de modes discernables sur les profils de mode augmente donc avec le nombre de passes du faisceau laser. Or, l'augmentation du nombre de passes induit le fait que le matériau à déjà été irradié. L'indice de réfraction du milieu est donc déjà modifié. Par exemple, pour la Fig. 4.18.c, pour la passe 'n', le matériau possède un historique des 'n-1' passes, l'indice de réfraction du milieu a été modifié successivement par les 'n-1' passes. Dans ce contexte, la profondeur d'enterrage des guides dépendant de l'indice du milieu, il est possible d'observer la formation de plusieurs guides superposés, dans la direction de propagation du faisceau. Pour la première passe, le faisceau modifie l'indice de réfraction local du verre et pour la 'n+1' passe, le faisceau est focalisé plus en profondeur, à cause de la modification d'indice de réfraction, ce qui induit la formation de structures guidantes superposées les unes sur les autres.

III.3.4. Influence de l'ouverture numérique

Pour étudier l'influence de l'ouverture numérique utilisée pour inscrire les guides, des expériences ont été conduites avec 3 objectifs différents : une lentille télé-centrique f-theta (SILL Optics) NA=0.05 et deux objectifs de microscope LMU NUV ×20, NA = 0.4, et ×40, NA = 0.5 (Thorlabs). Le laser est focalisé dans le volume d'échantillon de 500 μm d'épaisseur. La Fig. 4.19 montre les profils de mode de guides obtenus avec des optiques d'ouvertures numériques différentes. Pour NA = 0.5, le profil est très fin, résolu et intense et avec une symétrie cylindrique. Quand l'ouverture numérique diminue à NA = 0.4, des fuites de lumières et un étalement du mode sont clairement observables, comme en atteste la Fig. 4.19.b. Finalement l'utilisation d'une ouverture numérique de 0.05 mène à la création d'une ligne 'quasi guidée', causée par l'extension en profondeur du point de focalisation dans la direction de propagation du faisceau laser. C'est la conséquence de l'utilisation d'une optique à grande profondeur de champs définie par la distance de Rayleigh pour les faisceaux Gaussien.

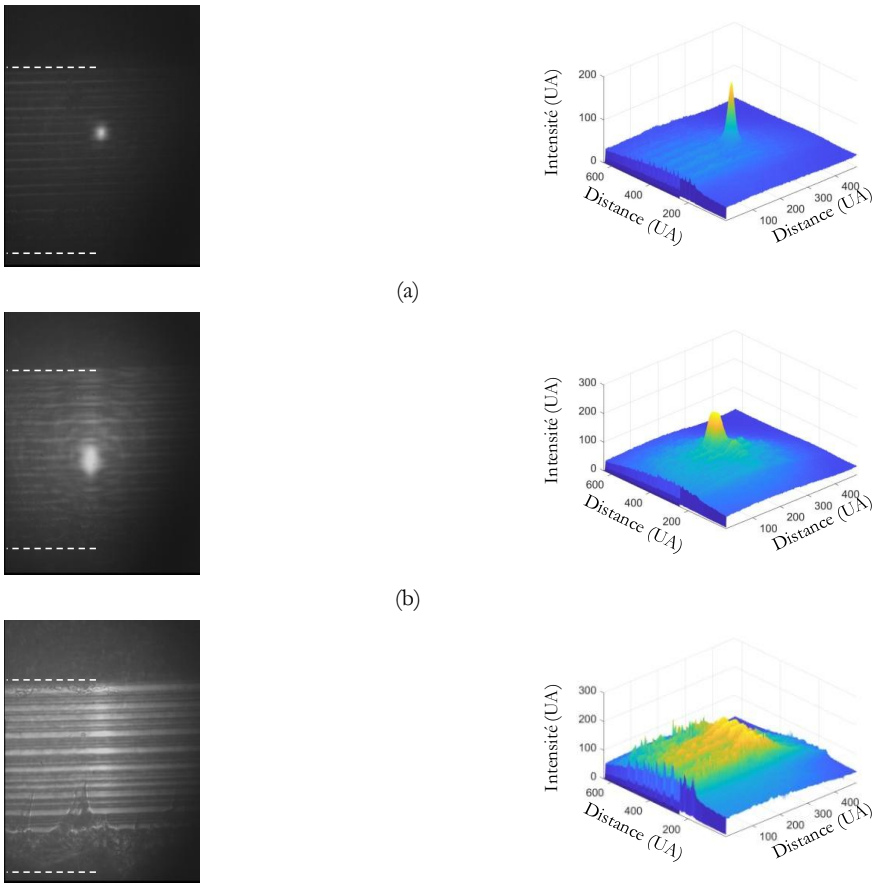


Fig. 4.19: Profils de mode, observés avec un objectif ×20, de guides enterrés, obtenus par inscription laser directe avec P_{av} = 462 mW, f = 200 kHz, v = 5 mm/s, (a) NA = 0.5, (b) NA = 0.4 et (c) NA = 0.05

III.3.5. Influence de la profondeur d'enterrage des guides

Cette section explore la possibilité de contrôler la profondeur d'enterrage des guides durant la photo-inscription. En effet, il est possible de programmer la profondeur à laquelle seront inscrits les guides en fonction de la position de l'échantillon par rapport au point de focalisation du faisceau laser. La Fig. 4.20 montre l'impact de l'indice de réfraction du milieu sur la focalisation de faisceau laser.

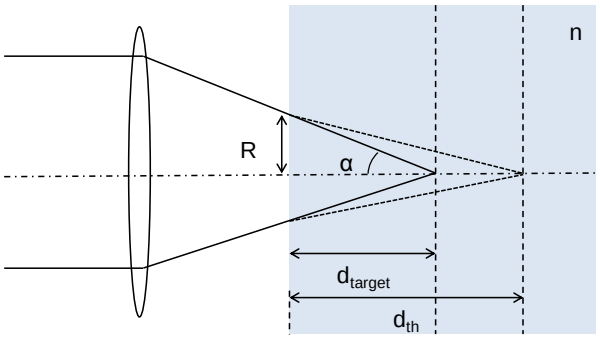


Fig. 4.20: Influence de l'indice de réfraction du milieu sur la focalisation du faisceau laser.

Des résultats intéressants ont été acquis lors des mesures de l'enterrement de guide en fonction de la profondeur d'enterrage théorique calculée précédemment. La Fig. 4.21 et la Fig. 4.22 présentent l'évolution de la profondeur d'enterrage des guides pour NA = 0.5 et NA = 0.4 respectivement.

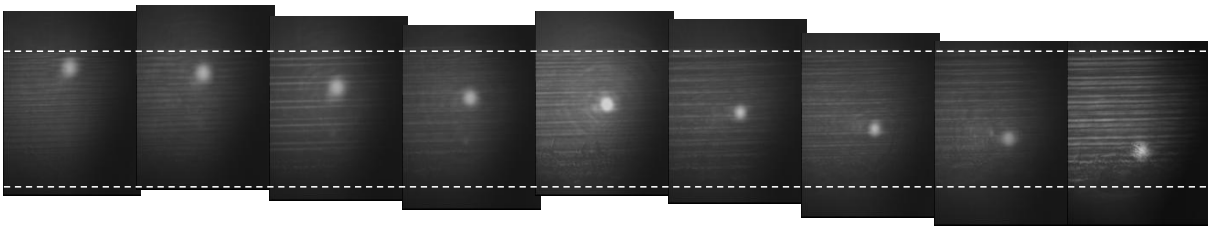


Fig. 4.21: Evolution de l'enterrement de guides avec NA = 0.5 (P = 450 mW, f = 200 kHz et v = 5mm/s)

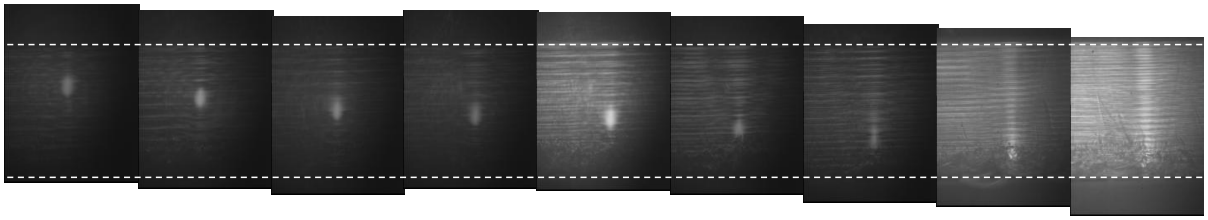


Fig. 4.22: Evolution de l'enterrement de guides avec NA = 0.4 (P = 450 mW, f = 200 kHz et v = 5mm/s)

Pour les guides obtenus avec une ouverture numérique NA = 0.5, les modes sont plus confinés et la mesure de la profondeur est plus proche de la valeur d'enterrage théorique que les guides obtenus avec une optique avec NA = 0.4 (Fig. 4.23). Pour ces derniers guides, il y a des fuites de lumière plus importantes qui s'accroissent à mesure que la profondeur d'enterrage des guides augmente, ce qui indique que le confinement de la lumière est dégradé.

La Fig. 4.23 montre l'évolution de la profondeur d'enterrage des guides optiques en fonction de la profondeur cible. Il est à noter qu'il est possible de mesurer la profondeur des guides enterrés pendant l'acquisition des profils de mode. En effet, en utilisant un objectif de microscope ×20, la caméra d'observation capture toute l'épaisseur du substrat de 500 μm d'épaisseur. En connaissant la taille des échantillons, il est possible de déduire la profondeur d'enterrage. Pour une ouverture numérique de 0.5 les mesures sont relativement proches de la théorie. Pour une ouverture numérique de 0.4 les résultats sont plus éloignés. Ces résultats montrent que l'utilisation d'une ouverture numérique importante, induit le meilleur confinement de la densité d'énergie déposée dans le matériau. La modification d'indice de réfraction du milieu est plus localisée, la focalisation du faisceau mieux contrôlée. De plus, avec une ouverture numérique plus faible, la densité d'énergie s'étale de manière plus importante dans la direction

de propagation. La profondeur d'enterrage mesurée est donc plus proche de la profondeur d'enterrage théorique avec une ouverture numérique plus importante.

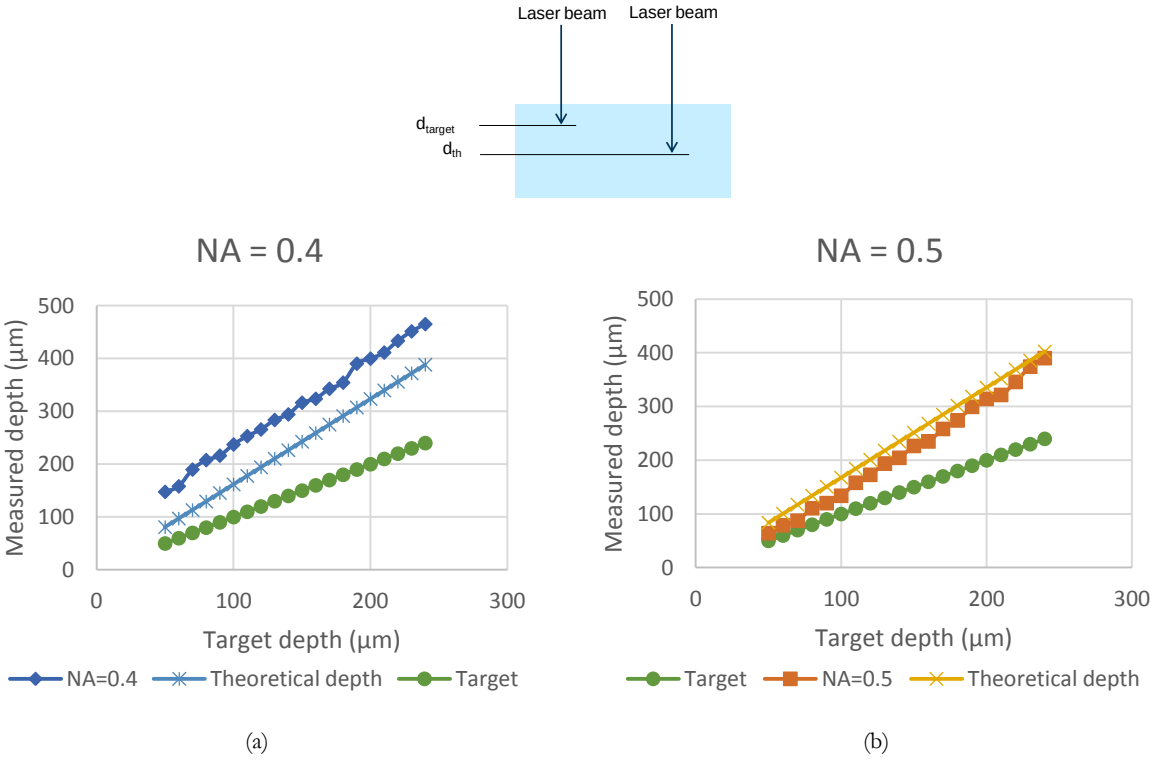


Fig. 4.23: Profondeur effective d'enterrage des guides optiques en fonction de la profondeur d'enterrage cible pour (a) NA = 0.4 et (b) NA = 0.5

L'étude de l'influence de l'enterrage des guides montre que pour une ouverture numérique de 0.5 l'enterrage mesuré est très proche de la profondeur théorique de formation des guides alors que pour une ouverture numérique de 0.4 l'enterrage mesuré s'éloigne de l'enterrage théorique. Cela peut s'expliquer par le fait que le calcul théorique est sensé fonctionner pour des guides parfaits. Or il a été mis en évidence que le confinement des guides obtenus pour des ouvertures numériques de 0.4 n'est pas optimal. En effet, de nombreuses fuites de lumière sont observables sur les différents profils de mode obtenus pour ces guides. De plus, quand la profondeur d'enterrage est importante, le confinement de la lumière dans les guides se dégrade, ce qui induit une différence importante entre la profondeur d'enterrage théorique et la profondeur d'enterrage mesurée. Pour les guides obtenus avec une ouverture numérique de 0.5 le confinement de la lumière est particulièrement bon, quasi parfait, il est donc logique de voir que la profondeur d'enterrage mesurée est assez proche de la profondeur théorique.

III.3.6. Mesure de pertes

Afin de quantifier les performances des guides optiques photo-inscrits des mesures de pertes ont été effectuées. Pour cela une méthode de mesure directe à été utilisée par couplage et par propagation avec le banc de mesure décrit dans la section III.2 de ce Chapitre. La Fig. 4.24 est un schéma montrant les différentes mesures opérées pour obtenir les pertes des guides testés.

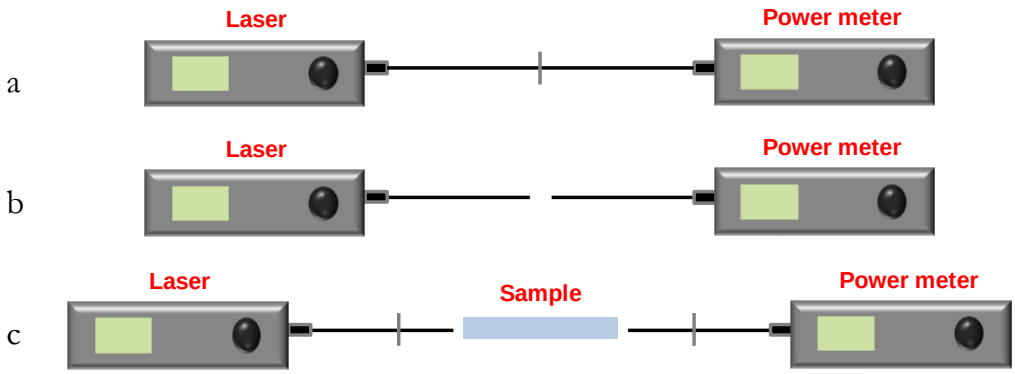


Fig. 4.24: Schéma de la méthodologie de mesure des pertes des guides

Dans un premier temps, la mesure (a) consiste à mesurer la puissance en sortie d'un laser à 1310 nm avec un mesureur de puissance en connectant les deux fibres optiques avec un connecteur adapté. Cette mesure est notre référence. Dans un deuxième temps (b), une mesure est effectuée entre la fibre de sortie du laser et la fibre d'entrée du mesureur de puissance à l'aide de micro-positionneurs, cette mesure nous permet de déterminer les pertes intrinsèques du banc de mesure qui sont estimées à -1 dB. La dernière mesure (c) consiste à mesurer la puissance du signal qui est injecté dans un guide de l'échantillon. Ce type de mesure ne permet pas de déterminer les pertes de couplage et les pertes dues aux réflexions de Fresnel. En soustrayant la mesure (c) à la mesure (a) on détermine donc les pertes d'insertion additionnées aux pertes de couplage et aux pertes induites par les réflexions de Fresnel.
Les meilleurs guides monomodes ont été obtenus en utilisant une ouverture numérique de l'optique utilisée importante (NA = 0.5), qui permet une distribution de l'énergie au point focal particulièrement localisée, engendrant des modifications structurales des verres irradiés très précises. Les paramètres lasers optimaux ont été déterminés, soit un taux de répétition de 200 kHz, une vitesse de balayage de 5 mm/s et une puissance du faisceau autour de 450 mW. Ces guides ont un profil de mode très intense, symétrique et particulièrement fin. Les pertes typiques ajoutées aux pertes de couplage et aux réflexions de Fresnel ont été mesurées à 4.35 dB pour des guides de 2.5 cm de long.
Les pertes mesurées peuvent sembler élevées, néanmoins la détermination future des pertes de couplage du dispositif par d'autres méthodes de mesure permettra de revoir celles-ci à la baisse.

IV. Étude expérimentale et caractérisation de tranchées fabriquées par inscription directe et gravure chimique

Des expériences ont été menées pour comprendre l'influence des paramètres lasers sur la formation, par irradiation laser, de tranchées dans du verre. La formation de tranchées dans du verre par irradiation laser permet en effet la formation de cavités en 3D et la formation de composants, décrits dans la section IV du Chapitre 2, notamment la formation de miroir photonique. Pour réaliser un tel composant il faut former une tranchée suffisamment profonde et inclinée. Dans un premier temps, nous avons étudié l'impact de la puissance moyenne déposée et de la vitesse à un taux de répétition fixe sur du verre. Dans un second temps, des expériences ont été entreprises pour comprendre l'influence du taux de répétition sur la forme et la profondeur des tranchées. Il est à noter que toutes les expériences menées sur la fabrication de tranchées se sont déroulées avec une polarisation optique du faisceau circulaire. De plus, afin de profiter de la différence du taux de gravure entre le verre irradié et le verre non modifié, des

gravures chimiques ont été opérées sur certains échantillons. En effet, comme il a été présenté dans la section IV.1.1 du Chapitre 2, différents composants peuvent être obtenus par irradiation laser suivi d'une gravure chimique au HF. En effet, L'irradiation laser permet de modifier localement la structure du verre. Les transformations structurales induites par un faisceau laser femtoseconde provoque une transformation des cycles à 5-6 chainons, c'est-à-dire les cycles 'classiques' du verre [14] en cycles à 3-4 chainons. Le verre se densifie [19]. Or la densification du verre induit une plus faible durabilité chimique de celui-ci [16]. Plusieurs concentrations de HF et différents temps de gravure ont été testés pour mieux comprendre l'influence de l'irradiation laser du verre sur le changement structurel de celui-ci. De multiples expérimentations ont été nécessaires afin d'obtenir un ensemble de conditions opératoires rendant possible la formation de composants. Par exemple, ce panel de tranchées doit permettre de déterminer les paramètres lasers et de gravure chimique pour obtenir des miroirs photoniques, ou des 'V-groove', tranchées permettant le positionnement d'une fibre optique. Tous ces composants ayant pour but de servir à la fabrication d'interposeurs verre en diminuant les contraintes d'alignement entre les fibres optiques est les composants photoniques (PICs).

IV.1. Méthodologie

Pour tous les échantillons, la méthodologie à été la suivante : sélection des paramètres lasers, irradiation laser de deux échantillons de verre AF32 de 500 μm d'épaisseur. Un des échantillons est conservé tel quel, le second est gravé dans du HF avec une concentration et un temps de gravure défini, puis est nettoyé. Les deux échantillons sont clivés, nettoyés à nouveau puis analysés au MEB.
Le nettoyage des échantillons consiste à plonger le verre dans un bain d'acétone puis dans un bain d'alcool isopropylique pendant cinq minutes sous agitation ultrasonique. Le nettoyage est particulièrement important afin de vider les tranchées des possibles résidus de verre.
Une méthode originale de clivage a été mise en œuvre, elle consiste à venir irradier la face arrière des échantillons avec des paramètres optimisés au laser femtoseconde afin de créer une amorce de clivage puis d'appliquer une force sur l'échantillon pour pouvoir observer sa tranche.

IV.2. Influence des paramètres lasers

Cette section propose la synthèse de multiples expériences concernant l'influence des différents paramètres lasers sur la formation de tranchées. La caractérisation des tranchées est obtenue à l'aide d'un MEB, dont le principe de fonctionnement à été décrit dans la section VII.1 du Chapitre II. L'observation au MEB est précédée du clivage et du nettoyage des échantillons.

IV.2.1. Influence de la puissance du faisceau

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur la ligne UV du laser femtoseconde avec la lentille f-theta (NA = 0.05), un taux de répétition de 200 kHz à une vitesse de balayage du faisceau de 20 mm/s et nous avons étudié l'influence de la puissance du laser.
Les photos MEB présentées Fig. 4.25 montrent la face clivée de tranchées obtenues dans du verre AF32 pour différentes valeurs de puissance, 40, 50, 55, 80, 90 et 100 % (P_m = 2.4 W à 200 kHz, 100 %).

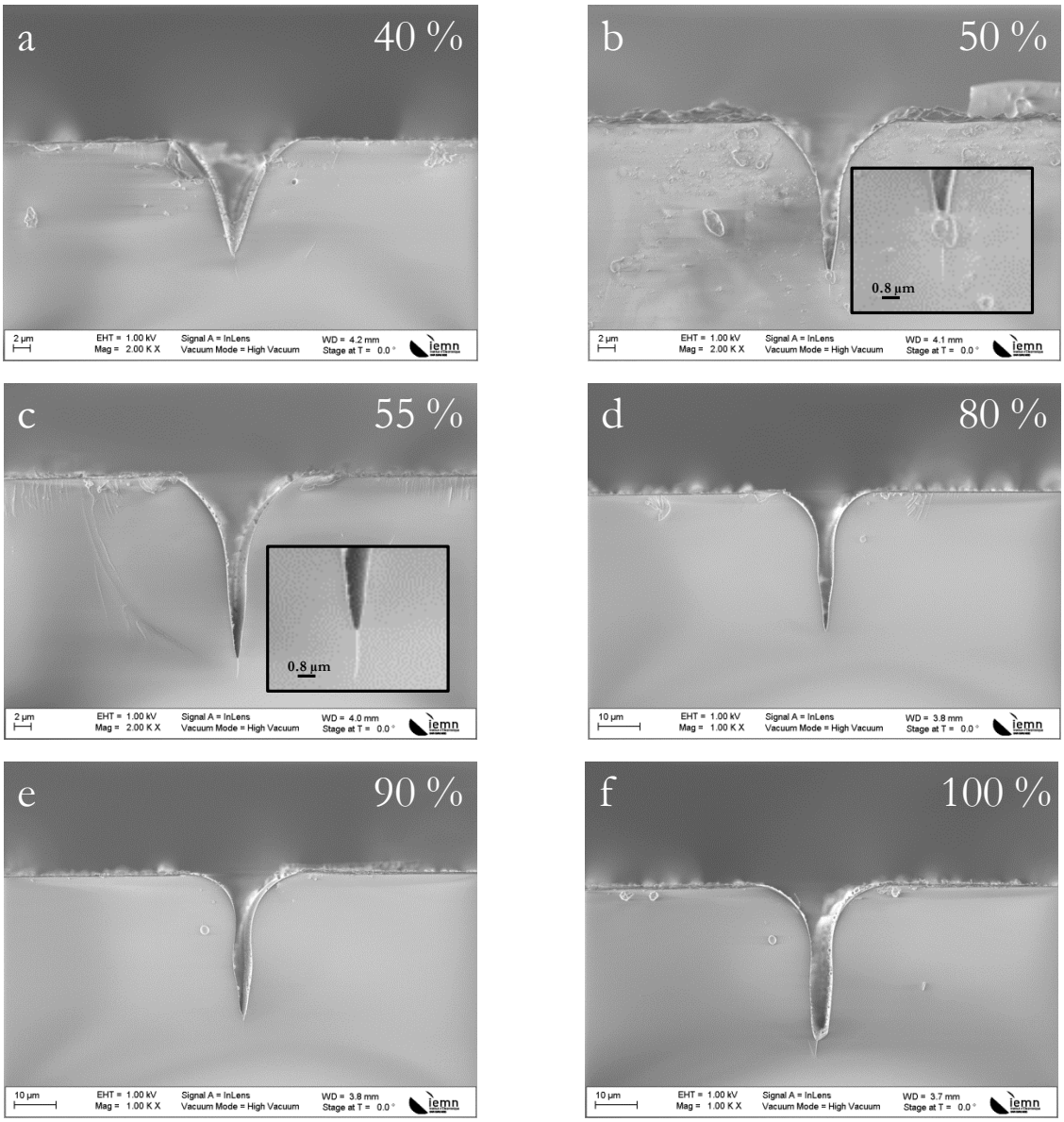


Fig. 4.25: Tranchées obtenues en UV à 200 kHz, 20 mm/s et (a) 40% ; (b) 50% ; (c) 55% ; (d) 80% ; (e) 90% et (f) 100% de puissance

On observe une nette différence de forme et de profondeur pour ces tranchées et on peut voir qu'un phénomène remarquable apparait pour certaines puissances : la filamentation. Comme indiquée Chapitre 2, la filamentation est issue de la compensation entre les phénomènes antagonistes d'effondrement du faisceau (autofocalisation) et de la diffraction. Ce phénomène apparait dés 50 % et est particulièrement visible à 55 %.

Jusque 40 %, Fig. 4.25.a l'intensité du faisceau n'est pas suffisante pour créer un filament, l'énergie est absorbée par la surface de l'échantillon.

Pour 50 %, Fig. 4.25.b et 55 %, Fig. 4.25.c, on observe une forme particulière qui correspond à la création d'un filament. L'intensité est suffisamment grande pour que l'effet Kerr soit identifiable, le faisceau se focalise sur lui-même et, plus il s'inscrit profondément dans le verre, plus l'énergie est absorbée. L'intensité diminue et un plasma, dû à l'ionisation de la matière, est créé. Ce plasma défocalise le faisceau et quand l'intensité n'est plus assez importante le filament s'arrête. Pour 80 et 90 % le filament est moins grand que pour 50 et 55 %. On peut l'expliquer par le fait que l'énergie, qui est beaucoup plus importante

à 80 et 90 %, va ioniser plus rapidement la matière. Le plasma créé par cette ionisation va défocaliser le faisceau et l'effet Kerr ne sera pas suffisamment important pour compenser la diffraction du faisceau. Il en est de même pour l'expérience à 100 % de la puissance.

IV.2.2. Influence de la vitesse de balayage du faisceau

Pour l'étude sur l'influence de la vitesse de balayage du faisceau, des tranchées ont été réalisées à un taux de répétition fixé à 70 kHz et à une puissance fixe de 840 mW (P_m = 2.4 W à 200 kHz, 100 %), toujours sur la ligne UV du laser. En Fig. 4.26, on peut observer trois photos MEB de la face clivée de tranchées obtenues pour des vitesses de 10, 20 et 50 mm/s, respectivement.

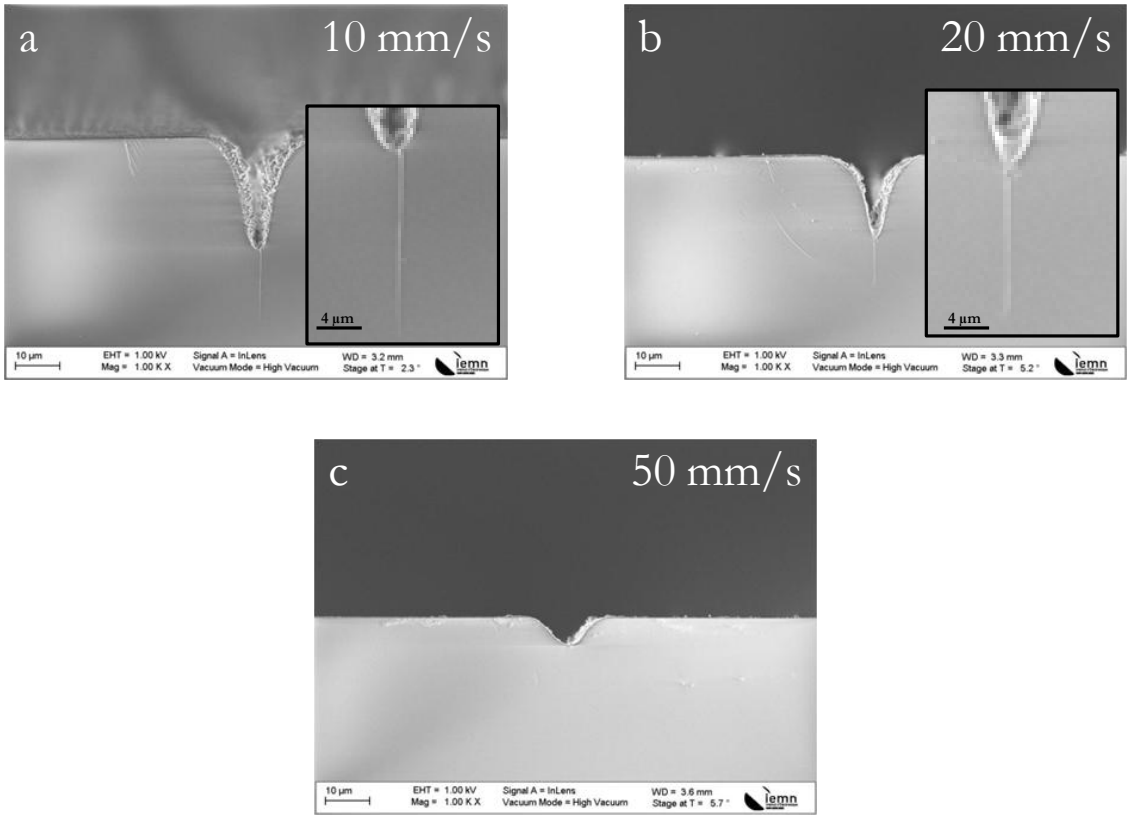


Fig. 4.26: Tranchées obtenues en UV à 70 kHz, à 840 mW de puissance moyenne et (a) 10 mm/s ; (b) 20 mm/s ; (c) 50 mm/s

Logiquement, plus la vitesse de balayage du faisceau est rapide et moins le matériau est impacté. Pour une vitesse de balayage du laser élevée les tranchées sont moins profondes que pour de faibles vitesses car l'énergie déposée par le laser est de plus en plus faible.

IV.2.3. Influence du taux de répétition

Afin d'étudier l'influence du taux de répétition de la source laser sur la forme et la profondeur des tranchées, des expérimentations ont eu lieu sur la ligne UV du laser à une puissance fixée à 100 % (P_m = 2.4 W à 200 kHz, 100 %) et une vitesse de balayage du faisceau de 10 mm/s.
Sur la Fig. 4.27 six photos MEB présentent l'évolution de la forme des tranchées obtenues pour des taux de répétition de 20, 35, 40, 70, 100 et 200 kHz.

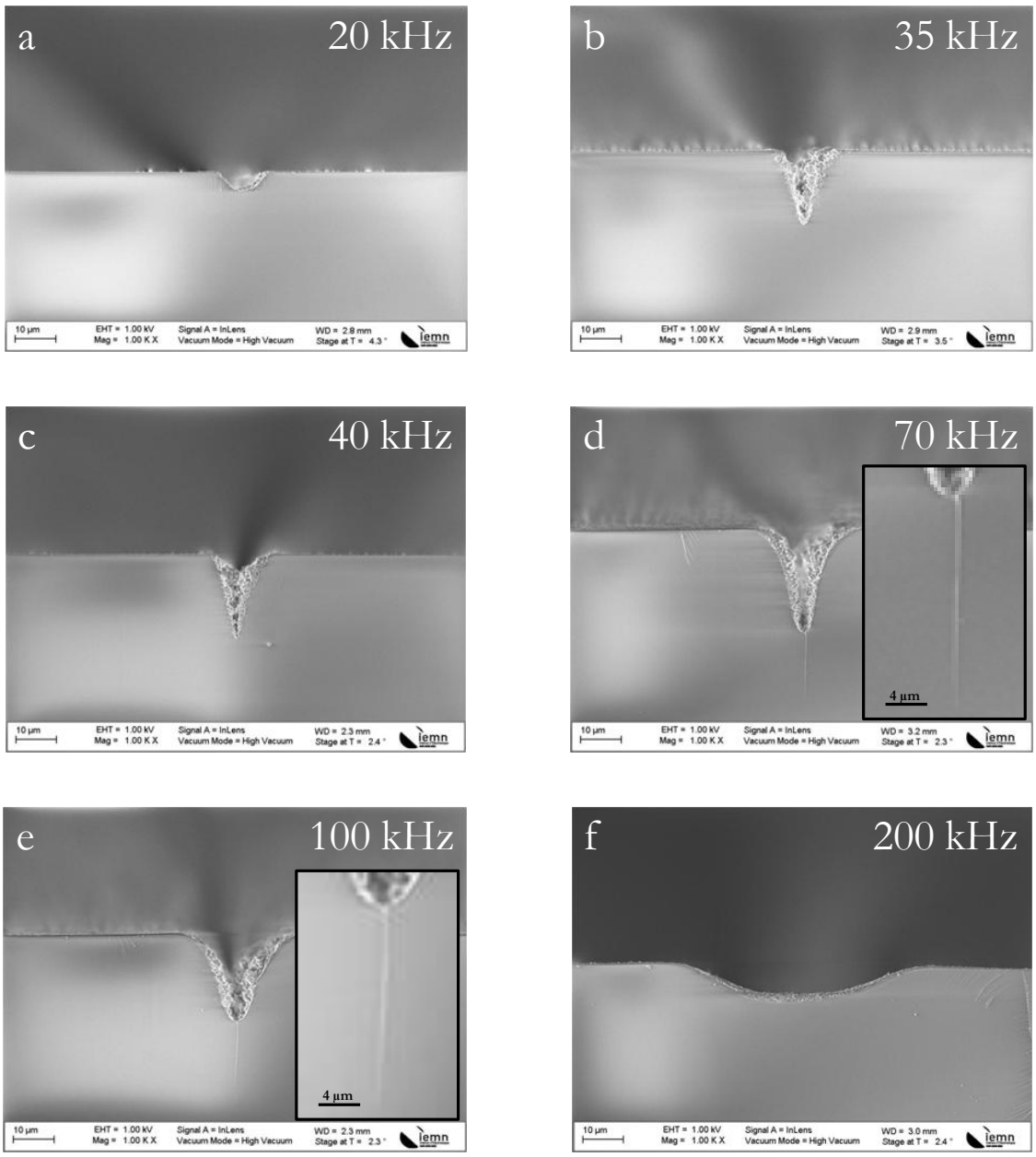


Fig. 4.27: Tranchées obtenues en UV à 10 mm/s, à 100 % de puissance et (a) 20 kHz ; (b) 35 kHz ; (c) 40 kHz ; (d) 70 kHz ; (e) 100 kHz ; (f) 200 kHz

De 20 à 70 kHz, les tranchées sont de plus en plus profondes. À mesure que le taux de répétition augmente la quantité d'énergie déposée dans le matériau augmente, celui-ci est alors de plus en plus impacté par le laser et la profondeur des tranchées s'accentue. À partir de 70 kHz, Fig. 4.27.d, il y a apparition d'un filament, comme lorsque nous avons étudié l'influence de la puissance sur les tranchées. La filamentation apparait quand l'intensité est suffisamment grande pour qu'une lentille de Kerr puisse compenser l'effet de diffraction du faisceau dû à la création d'un plasma par un mécanisme de photo-ionisation. Pour 200 kHz, Fig. 4.27.f, on suppose que l'intensité est tellement importante que le plasma créé par ionisation atténue le champ électrique du faisceau laser. Il y a un phénomène d'écrantage en raison de la présence de porteurs de charge dans le matériau à cause de l'ionisation du plasma. L'écrantage plasma, dans les diélectriques, apparait au cours de la dynamique temporelle d'interaction quand les mécanismes d'ionisation ont généré de nombreux électrons. Quand la densité critique d'électrons est

atteinte, une partie de l'impulsion laser est réfléchie, le plasma devient absorbant et le matériau est moins endommagé.

IV.2.4. Influence de la longueur d'onde du laser

Pour terminer sur l'étude des paramètres lasers sur la forme et la profondeur des tranchées obtenues par irradiation, des expérimentations ont été menées quant au choix de la longueur d'onde du faisceau. Trois longueurs d'ondes sont disponibles sur la source laser femtoseconde utilisée par multiplication de fréquence, présentée dans la section V du Chapitre 2. À partir de la longueur d'onde infra rouge (IR) à 1030 nm on peut ainsi avoir la longueur d'onde verte (GR) à 515 nm et la longueur d'onde ultra violette (UV) à 343 nm. En fonction de la longueur d'onde l'énergie de pulse délivrée n'est pas la même. Le Tab. 4.2 présente les différentes valeurs d'énergie de pulse en fonction de la longueur d'onde du faisceau laser.

Longueur d'onde	$P_{moyenne}$ à 200 kHz (W)	Énergie par pulse à 200 kHz (µJ)	$P_{moyenne}$ à 28 kHz (W)	Énergie par pulse à 28 kHz (µJ)
IR	20	100	2.8	14
GR	2.6	13	0.364	1.82
UV	2.4	12	0.336	1.68

Tab. 4.2 : Résultats de la normalisation des aires des pics Raman

Sur la Fig. 4.28 sont présentées des clichés MEB de tranchées obtenues à 100 % de la puissance moyenne (celle-ci dépend des longueurs d'onde utilisées qui sont récapitulées dans le Tab. 4.2) à un taux de répétition de 28 kHz, à une vitesse de 2 mm/s et après une gravure au HF 10 % de 5 minutes, pour les trois longueurs d'ondes disponibles sur notre laser : IR, GR et UV. Il est à noter que le zoom de la photographie de la tranchée dans l'infrarouge est de ×400 alors que pour les photographies en GR et en UV le zoom est de ×1000. La profondeur des tranchées en UV et GR est relativement équivalente, l'énergie de pulse du laser étant assez proche, alors que la profondeur de la tranchée obtenue en IR est beaucoup plus importante, l'énergie de pulse en infra-rouge étant largement supérieure.

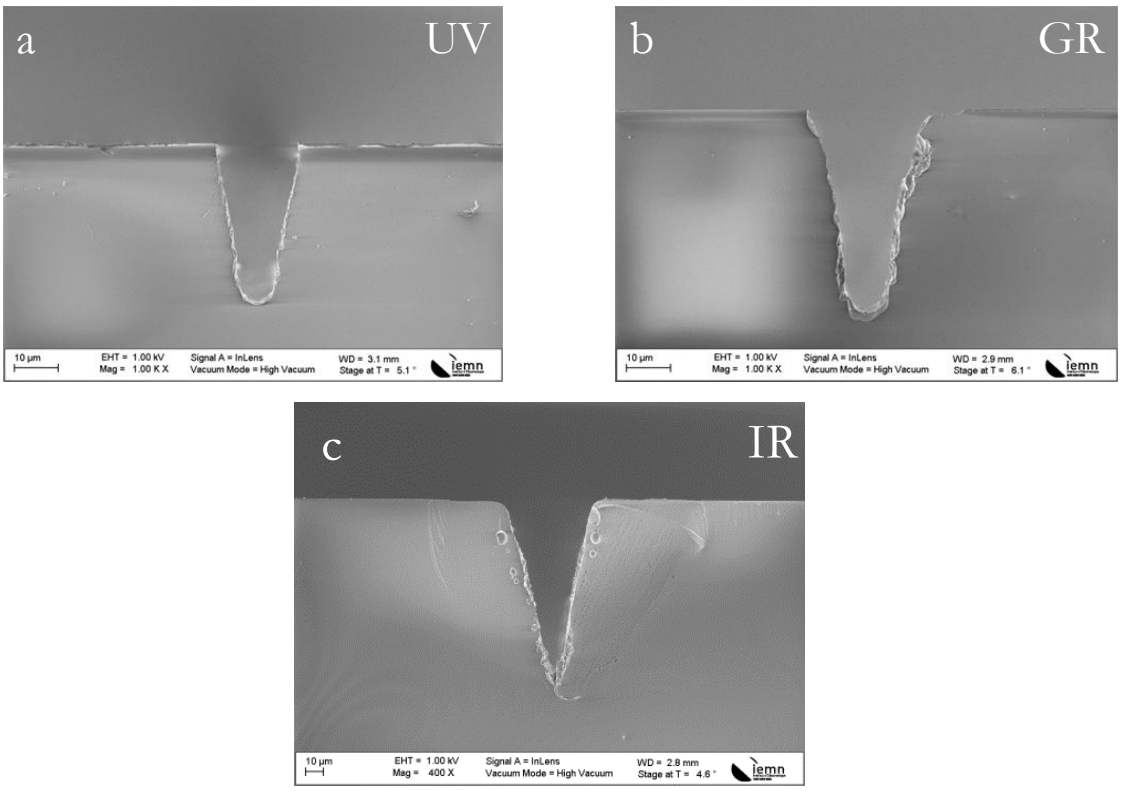


Fig. 4.28: Tranchées obtenues à 2 mm/s, à 100 % de puissance et 28 kHz (a) UV; (b) GR; (c) IR. Attention, pour l'UV et le vert, le zoom des photos est de ×1000 alors que pour le rouge, le zoom est de ×400.

IV.3. Influence de la gravure HF

Comme développé dans la première partie de ce chapitre, la vitesse de gravure au HF du verre est fortement dépendante de la modification structurelle du matériau (cf Chapitre 4 section II.2) et donc des conditions d'exposition laser. Pour rappel, quand du verre est irradié avec un laser femtoseconde, des changements structuraux interviennent dans la matrice de verre.

Dans cette partie, des expériences ont été menées afin d'investiguer l'influence de l'irradiation laser sur la gravure au HF des échantillons.

La Fig. 4.29 présente des clichés MEB de tranchées obtenues après irradiation laser à 100 % de la puissance (P_m = 2.4 W à 200 kHz, 100 %), à une vitesse de 10 mm/s et respectivement pour des taux de répétition de 35 et 40 kHz, 420 et 480 mW respectivement, avant et après une gravure chimique dans du HF 10 % pendant 5 min.

Dans un premier temps, on peut constater que la gravure au HF permet d'obtenir des tranchées beaucoup plus larges, s'étendant latéralement, au-delà de la zone pulvérisée. Le HF gravant préférentiellement le verre irradié par le laser femtoseconde, on constate que le re-dépôt de matière est éliminé et que l'on obtient des tranchées pratiquement circulaires. La forme de la tranchée après gravure va dépendre des paramètres de l'irradiation laser mais aussi du temps et de la concentration du HF pendant la gravure.

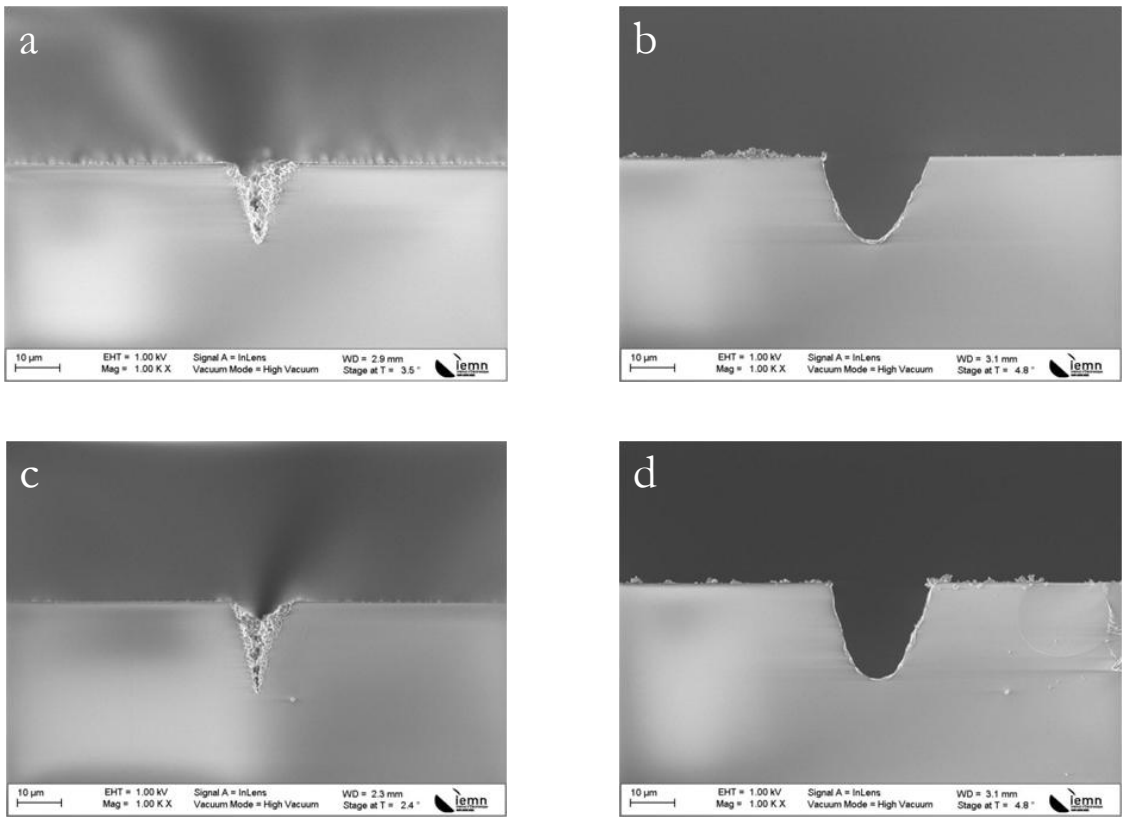


Fig. 4.29 : Tranchées obtenues en UV à 10 mm/s, (a) 35 kHz, 420 mW ; (b) 35 kHz, 420 mW gravé au HF (10 %) 5 minutes ; (c) 40 kHz, 480 mW ; (d) 40 kHz, 480 mW, gravé au HF (10 %) 5 minutes

L'influence du temps de gravure au HF a été étudié, comme le montre la Fig. 4.30 qui présente des clichés MEB de tranchées obtenues à 100 % de la puissance (P_m = 2.4 W à 200 kHz, 100 %), à un taux de répétition de 30 kHz, 360 mW de puissance moyenne et une vitesse de 5 mm/s avec des gravures dans du HF 10 % pour des temps de 170, 300, 450 et 600 secondes.

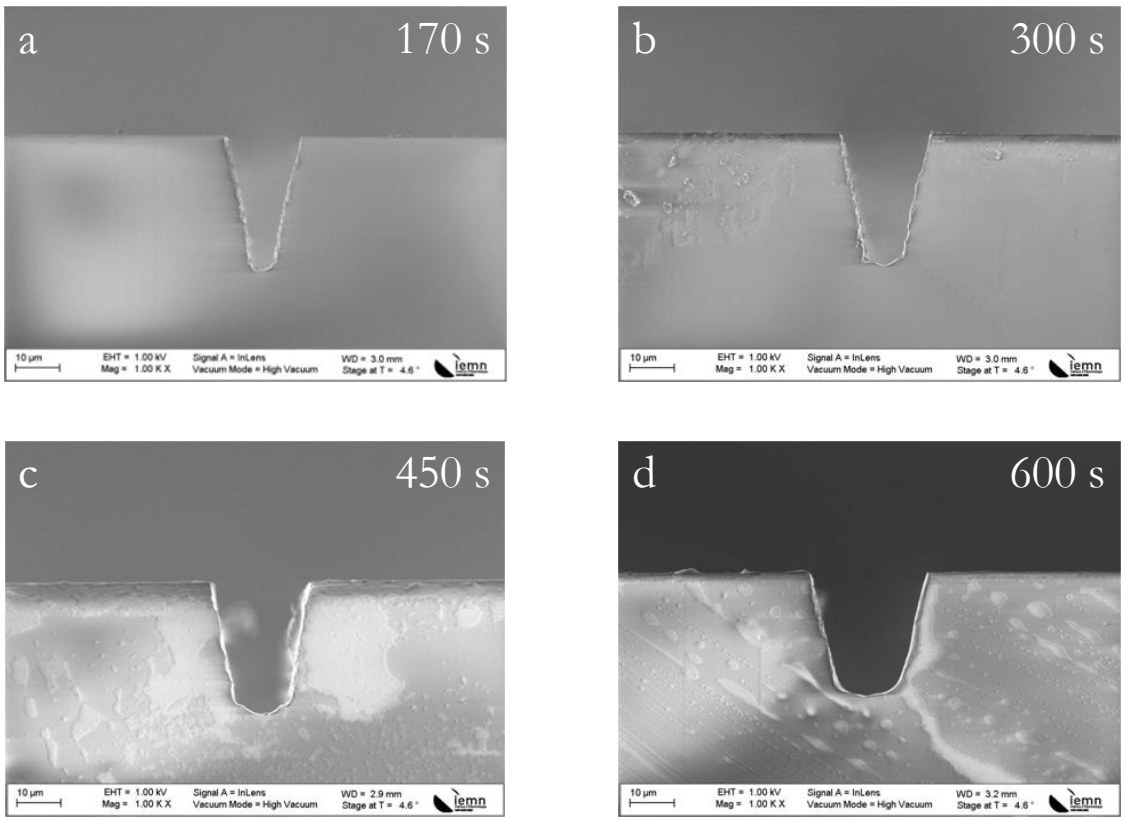


Fig. 4.30: Tranchées obtenues en UV à 5 mm/s, à 360 mW, 30 kHz (a) gravées 170 s au HF; (b) gravées 300 s au HF; (c) gravées 450 s au HF; (d) gravées 600 s au HF

Il est intéressant de noter ici que l'évolution la plus importante n'est pas sur la profondeur des tranchées mais leur largeur. En effet, on observe nettement que la profondeur des tranchées n'évolue pratiquement pas pour des temps de gravure entre 170 et 600 s mais que la largeur de celles-ci augmente. Le HF gravant préférentiellement la matière irradiée par le laser femtoseconde, on peut supposer qu'un temps assez court (170 s) permet de graver toute la matière irradiée, suivi par la gravure du matériau non irradié. Pour les temps les plus longs, les tranchées s'élargissent car toute la matière restante n'a pas été impactée par le laser et cette matière est gravée de manière isotrope à la même vitesse sur les flancs ou dans le fond des tranchées.

De nombreuses expériences ont été menées afin de comprendre l'influence de chaque paramètre expérimental sur la fabrication de tranchées dans du verre à l'aide d'un laser femtoseconde, qu'il s'agisse des paramètres lasers, comme le taux de répétition ou la puissance ou encore des caractéristiques de la gravure chimique au HF. Toutes ces expérimentations nous ont permis de construire une cartographie expérimentale, disponible en Annexe I, pour faciliter l'optimisation des travaux suivants. En effet, à l'aide de cette cartographie il a été plus simple d'identifier les paramètres nécessaires à la réalisation de tranchées en fonction de l'application visée.

V. Miroir photonique

La bonne compréhension de l'influence des paramètres lasers sur la fabrication de tranchées dans du verre par irradiation nous a permis d'imaginer une application photonique pouvant être intégrée dans un interposeur verre à savoir : le miroir photonique. Cette application consiste en une face pouvant rediriger à angle droit un signal transmis dans un guide optique enterré dans le verre à la surface du substrat passif. Cette application est particulièrement intéressante pour transmettre un signal directement dans le coupleur à réseau d'un PIC en injectant celui-ci dans un guide en couplage latéral par la tranche de l'interposeur. En d'autres termes, le miroir photonique est un composant nécessaire pour le développement de la transmission des signaux optiques au sein des interposeurs verre. La Fig. 4.31 présente le schéma d'un miroir photonique dans un interposeur verre.

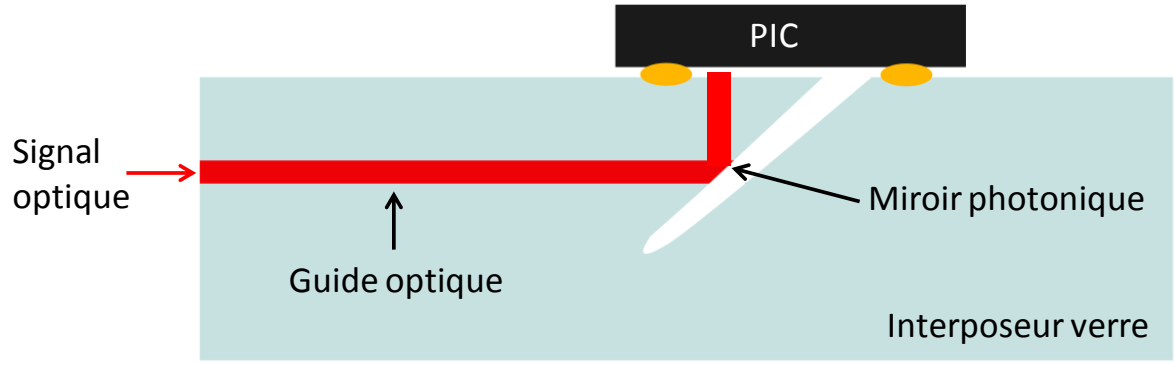


Fig. 4.31: Schéma du fonctionnement d'un miroir photonique dans un interposeur verre

V.1. Fabrication du miroir photonique

Afin de concevoir les miroirs photoniques, la méthodologie a consisté à exploiter le plan d'expériences de fabrication des tranchées sous l'influence des différents paramètres lasers et de gravure chimique au HF. L'idée étant de pouvoir rediriger un signal optique enterré dans du verre, les paramètres lasers permettant d'obtenir une tranchée assez profonde ont été déterminés dans un premier temps. Ces paramètres sont : taux de répétition 30 kHz, puissance moyenne 2W, et une vitesse de balayage du faisceau de 2 mm/s. Pour créer des tranchées inclinées, différents supports ont été conçus et fabriqués, avec des angles d'inclinaison différents, en ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) par impression 3D. Les premiers tests ont été réalisés avec une structure inclinée à 45° dont la modélisation pour impression 3D est donnée Fig. 4.32.

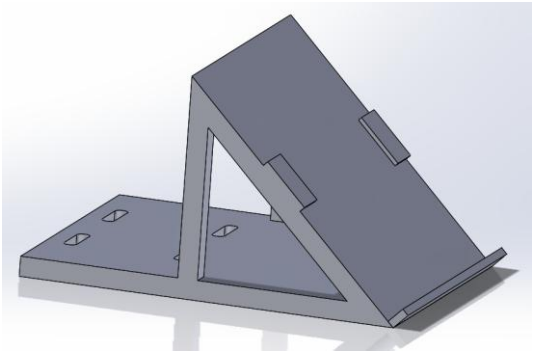


Fig. 4.32: Modélisation 3D du support incliné à 45°

En ce qui concerne les caractérisations des tranchées inclinées, le même procédé que pour la caractérisation des tranchées droites a été mis en œuvre, c'est-à-dire : exposition laser, gravure chimique ou non, nettoyage, clivage des échantillons, nettoyage puis observation au MEB.
La Fig. 4.33 présente une photographie MEB d'une tranchée inclinée, obtenue dans un substrat de verre AF32 de 500 µm d'épaisseur après exposition par laser femtoseconde. On peut voir un filament d'une longueur de 35 µm de profondeur, incliné à 52°.

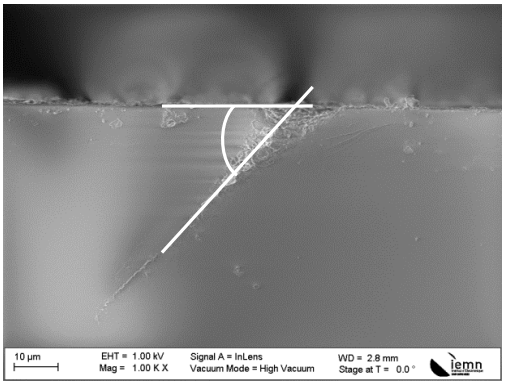


Fig. 4.33: Photo MEB de la section transverse d'une tranchée inclinée obtenue par irradiation laser avec un taux de répétition de 30 kHz, une puissance moyenne de 2W et une vitesse de balayage de 2 mm/s

Pour ouvrir la tranchée inclinée et obtenir un miroir photonique, une gravure chimique au HF 10% pendant cinq minutes a été opérée. Comme observé précédemment, le matériau irradié est gravé préférentiellement dans la zone exposée ce qui permet d'obtenir une tranchée inclinée ouverte d'une trentaine de micromètres de profondeur. La face qui nous intéresse pour constituer le miroir photonique est montrée sur la photographie MEB présentée Fig. 4.34. Ici l'angle du miroir est de 52°.

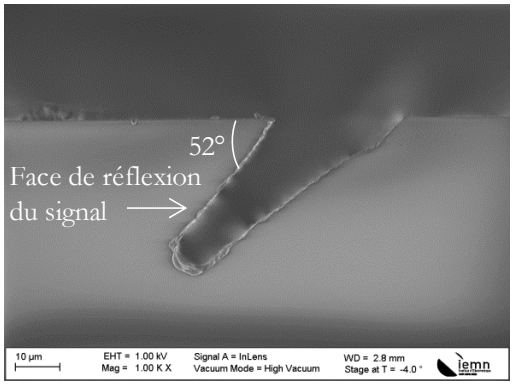
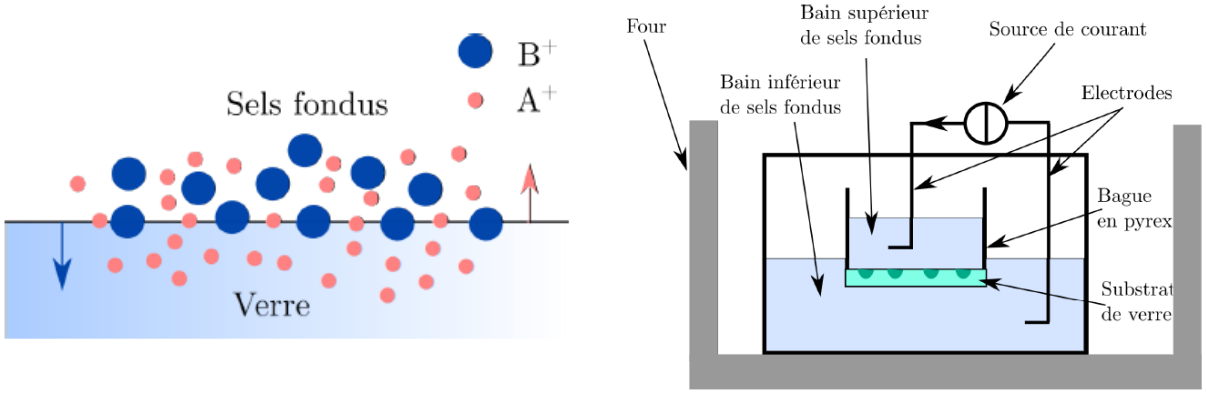


Fig. 4.34: Photo MEB de la section transverse d'un miroir obtenu par irradiation laser avec un taux de répétition de 30 kHz, une puissance moyenne de 2W et une vitesse de balayage de 2 mm/s et une gravure chimique dans du HF 10 % pendant 5 minutes

Après des essais concluants sur la référence de verre AF32 (SCHOTT) de fabrication de tranchées inclinées pour être utilisées en tant que miroir photonique, des expérimentations ont été réalisées sur des verres GO14, contenant des guides optiques enterrés, fabriqués à L'Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique et le Laboratoire d'Hyperfréquences et de Caractérisation (IMEP-LaHC), à Grenoble. Les guides optiques enterrés ont été fabriqués par échanges d'ions. Comme le montre la Fig. 4.35.a, cette technique est basée sur la migration d'ions argent à la surface d'un échantillon de verre

à travers un masque, le masque servant à délimiter les guides et à leur donner leurs caractéristiques géométriques. Un substrat de verre, avec son masque, est immergé dans un bain de sels fondus (nitrate de sodium et nitrate d'argent) à plus de 300°. Les ions Ag^+ diffusent dans le verre à travers les fenêtres du masque pour se substituer aux ions Na^+ du substrat. Le temps de diffusion des ions Ag^+ dans le bain de sels fondus est un paramètre particulièrement important, celui-ci est déterminé par simulation numérique et joue sur la taille des guides. Après structuration des guides en surface, ceux-ci sont enterrés. L'enterrage, dont la présentation de l'équipement est donné Fig. 4.35.b, consiste à faire migrer les ions Ag^+ de la surface du verre vers l'intérieur, par voie de recuit thermique, dans un four contenant le substrat de verre et des bains contenant des sels de nitrate de sodium et de magnésium et sous application d' un champs électrique entre ceux-ci.



(a) (b)

Fig. 4.35: Principe de l'échange d'ions pour la fabrication de guides optiques (a) Échange d'ion à l'interface sels fondus et verre (b) description de l'équipement d'enterrage [25]

V.2. Caractérisation du miroir photonique

Un miroir photonique a donc été fabriqué sur un substrat de verre GO14 contenant de nombreux guides. Le miroir a été caractérisé optiquement à l'IMEP. Les caractérisations optiques ont d'abord consisté à vérifier l'uniformité du miroir fabriqué. Pour cela un signal laser visible a été utilisé et injecté sur la tranche du miroir. La Fig. 4.36.a montre cette caractérisation et la bonne uniformité du miroir fabriqué. Dans un second temps, un signal optique visible (600 nm) puis à 1310 nm (longueur d'onde d'utilisation typique d'une PIC) a été injecté à l'entrée des guides enterrés afin d'observer la redirection correcte du signal.

Les caractérisations optiques montrent que le miroir réfléchit un faisceau laser visible, mais aussi à 1310 nm, injecté dans un guide enterré. La Fig. 4.36.b montre que la lumière visible est réfléchie par le miroir, l'emplacement de la tâche optique correspond parfaitement à la sortie d'un guide enterré.

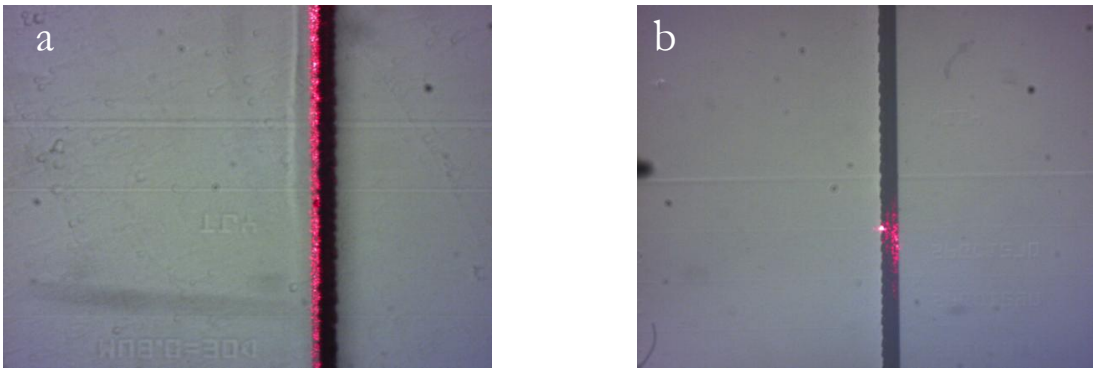


Fig. 4.36: Vue de dessus d'un miroir photonique pendant les caractérisations optiques dans le spectre visible ; (a) caractérisation de l'uniformité du miroir et (b) réflexion de la lumière par le miroir

Cette technique de fabrication de miroir photonique par irradiation laser suivie d'une attaque chimique au HF est tout à fait compatible avec la technologie d'échange d'ions utilisée pour la fabrication des guides enterrés et les caractérisations optiques montrent qu'il est tout à fait imaginable d'utiliser ce type de miroir photonique au sein d'un interposeur verre pour rediriger un signal optique dans une PIC.
Actuellement le problème de ce type de miroir reste les pertes optiques importantes dues au fait que la surface du verre ne réfléchit pas tout le signal optique provenant du guide. Pour améliorer significativement les performances du miroir, il est possible de déposer par pulvérisation une fine couche de métal (Al, Cu, etc.) dans la tranchée inclinée. Un exemple de dépôt de 150 nm d'aluminium est présenté en Fig. 4.37.

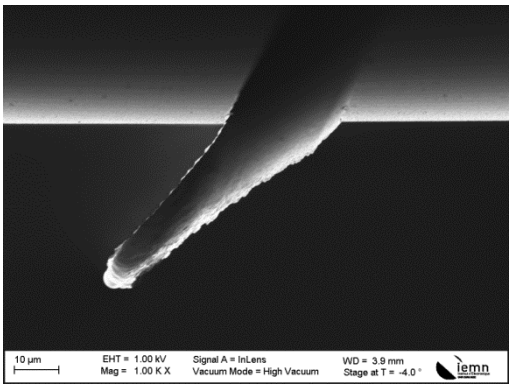


Fig. 4.37: Photo MEB de la section transverse d'un miroir photonique recouvert d'une couche d'aluminium de 150 nm

L'aluminium, l'or ou encore l'argent semblent de bons choix de matériau pour cette couche qui permettrait d'améliorer la réflectivité du miroir. En effet, comme on peut l'observer sur la Fig. 4.38, la réflectivité de ces trois matériaux pour des longueurs d'onde de la télécommunication, c'est-à-dire de 1310 nm à 1550 nm est proche de 100 %.

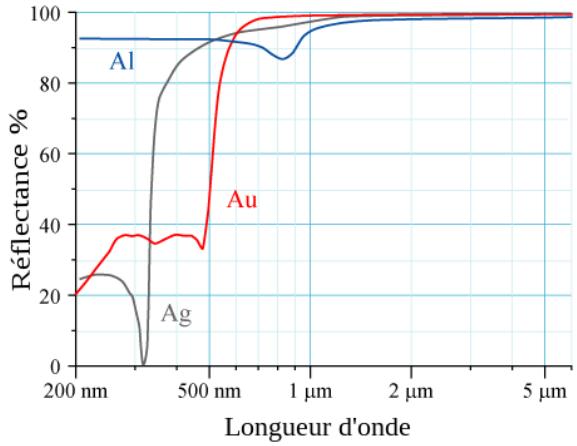


Fig. 4.38: Réflectivité de l'or, de l'argent et de l'aluminium en fonction de la longueur d'onde [26]

VI. Conclusion

Ce chapitre a présenté les différents aspects théoriques permettant de comprendre la formation de composants photoniques dans du verre par irradiation laser femtoseconde. Les simulations en illumination PSF ont montré que la distribution d'énergie au point focal dépend très fortement des lentilles utilisées pour la concentration du faisceau. L'emploi d'objectifs de microscope avec des ouvertures numériques importantes (NA = 0.4 et NA = 0.5) est particulièrement intéressant, notamment pour la fabrication de guides optiques. En effet, avec ces ouvertures numériques, la distribution d'énergie au point focal du faisceau est beaucoup plus localisée et permet la modification structurale micrométrique nécessaire à la fabrication de guides. La lentille télécentrique, avec une ouverture numérique de 0.05 est caractérisée par une distribution d'énergie plus étalée en profondeur au point focal et peut être avantageuse, alliée à une gravure chimique humide pour la fabrication de tranchées dans le verre.

La densification causée par l'irradiation d'un faisceau laser femtoseconde dans du verre est due à la transformation des cycles moléculaires à 5-6 chainons en des cycles à 3-4 chainons. Cette transformation induit une modification de l'angle des liaisons Si-O-Si et est responsable du changement d'indice de réfraction du matériau, ainsi que de sa plus grande sensibilité chimique. Les analyses Raman ont permis de mettre en évidence ces phénomènes en observant les pics caractéristiques du spectre des verres.

De nombreuses expériences ont conduit à la fabrication de structures photoniques. Des guides optiques ont notamment été fabriqués et caractérisés après l'optimisation des paramètres lasers pour la fabrication de ceux-ci. Des guides monomodes, réalisés puis caractérisés, montrent des profils de modes particulièrement fins, intenses et symétriques. Les pertes de ces guides, ajoutés aux pertes de couplage et aux réflexions de Fresnel ont été évalués à 4.35 dB.

Des études approfondies de l'influence des paramètres lasers ont permis la fabrication et la caractérisation de multiples échantillons. Les influences du taux de répétition, de la vitesse de balayage, de la puissance, de la longueur d'onde et de la gravure chimique au HF ont montré la possibilité de fabriquer des tranchées de différentes géométries et profondeurs, dans du verre, après irradiation directe par un faisceau laser femtoseconde et attaque chimique.

Après l'examen de l'influence des différents paramètres lasers et de la gravure chimique au HF sur l'inscription de tranchées, un miroir photonique à été fabriqué dans un interposeur verre contenant des guides optiques enterrés. Les caractérisations de ce miroir ont montré une bonne uniformité et une bonne réflectivité de celui-ci.

Bibliographie

[1] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao, "Writing waveguides in glass with a femtosecond laser," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 21, p. 1729, Nov. 1996.

[2] O. . Efimov *et al.*, "Waveguide writing in chalcogenide glasses by a train of femtosecond laser pulses," *Opt. Mater. (Amst).*, vol. 17, no. 3, pp. 379–386, Aug. 2001.

[3] C. B. Schaffer, A. Brodeur, J. F. García, and E. Mazur, "Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 2, p. 93, Jan. 2001.

[4] K. Miura, J. Qiu, H. Inouye, T. Mitsuyu, and K. Hirao, "Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no. 23, pp. 3329–3331, Jun. 1997.

[5] E. N. Glezer *et al.*, "Three-dimensional optical storage inside transparent materials," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 24, p. 2023, Dec. 1996.

[6] M. Watanabe *et al.*, "Three-Dimensional Optical Data Storage in Vitreous Silica," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. Part 2, No. 12B, pp. L1527–L1530, Dec. 1998.

[7] K. Yamasaki, S. Juodkazis, M. Watanabe, H.-B. Sun, S. Matsuo, and H. Misawa, "Recording by microexplosion and two-photon reading of three-dimensional optical memory in polymethylmethacrylate films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 8, p. 1000, Feb. 2000.

[8] D. Homoelle, S. Wielandy, A. L. Gaeta, N. F. Borrelli, and C. Smith, "Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 18, p. 1311, Sep. 1999.

[9] K. Minoshima, A. M. Kowalevicz, I. Hartl, E. P. Ippen, and J. G. Fujimoto, "Photonic device fabrication in glass by use of nonlinear materials processing with a femtosecond laser oscillator," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 19, p. 1516, 2001.

[10] Y. Sikorski, A. A. Said, P. Bado, R. Maynard, C. Florea, and K. A. Winick, "Optical waveguide amplifier in Nd-doped glass written with near-IR femtosecond laser pulses," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 3, p. 226, 2000.

[11] Y. Hibino, "Silica-Based Planar Lightwave Circuits and Their Applications," *MRS Bull.*, vol. 28, no. 05, pp. 365–371, May 2003.

[12] M. J. Nasse and J. C. Woehl, "Realistic modeling of the illumination point spread function in confocal scanning optical microscopy," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 27, no. 2, pp. 295–302, 2010.

[13] T. Properties, "Technical Glasses."

[14] S. Kiyama, S. Matsuo, S. Hashimoto, and Y. Morihira, "Examination of etching agent and etching mechanism on femotosecond laser microfabrication of channels inside vitreous silica substrates," *J. Phys. Chem. C*, vol. 113, no. 27, pp. 11560–11566, Jul. 2009.

[15] A. Q. Tool, "Relation between inelastic deformability and thermal expansion of glass in its annealing range," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 29, no. 9, pp. 240–253, Sep. 1946.

[16] A. Agarwal and M. Tomozawa, "Correlation of silica glass properties with the infrared spectra," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 209, no. 1–2, pp. 166–174, 1997.

[17] R. Le Parc, "Diffusion de rayonnements et relaxation structurale dans les verres de silice et préformes de fibres optiques," *http://www.theses.fr*, Jan. 2002.

[18] V. Martinez, "Influence des effets thermiques et mécaniques sur la relaxation des préformes et des fibres optiques à base de silice: étude par diffusion de la lumière et par diffusion des rayons X," *http://www.theses.fr*, Jan. 2004.

[19] Y. Bellouard, A. Said, M. Dugan, and P. Bado, "Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic

channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching," *Opt. Express*, vol. 12, no. 10, p. 2120, May 2004.

[20] K. Awazu and H. Kawazoe, "Strained Si-O-Si bonds in amorphous SiO2materials: A family member of active centers in radio, photo, and chemical responses," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 10, pp. 6243–6262, 2003.

[21] J. W. Chan, T. Huser, S. Risbud, and D. M. Krol, "Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses.," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 21, pp. 1726–1728, 2001.

[22] C. Iliescu, "Wet etching of glass for MEMS applications," *Rom. J. Inf. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 285–310, 2006.

[23] E. R. Mcmullen, N. Orleans, and J. H. Rose, "Planar ring in glasses," vol. 44, no. 6, pp. 945–949, 1982.

[24] T. Seuthe, A. Mermillod-Blondin, M. Grehn, J. Bonse, L. Wondraczek, and M. Eberstein, "Structural relaxation phenomena in silicate glasses modified by irradiation with femtosecond laser pulses," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. March, pp. 1–10, 2017.

[25] F. E. Ayi-yovo, "Évaluation d ' un module électro-optique hybride combinant la photonique sur silicium et sur verre pour des applications de multiplexage en longueur d ' onde (WDM) Évaluation d ' un module," 2018.

[26] "Wikipedia, the free encyclopedia." .

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Sommaire

SOMMAIRE **163**

I. INTRODUCTION **164**

II. SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE THÈSE **164**

II.1. Chapitre I 164
II.2. Chapitre II 165
II.3. Chapitre III 166
II.4. Chapitre IV 167

III. PERSPECTIVES : CHAMPS D'APPLICATION DE L'INSCRIPTION LASER. **168**

III.1. Guides optiques dans des verres flexibles 168
III.2. Composants photoniques 3D 170
III.3. Marquage et stockage optique 171
III.4. Puces de micro et d'opto-fluidique 172

IV. L'INSCRIPTION LASER AU SERVICE DE LA PHOTONIQUE INTEGRÉE ET DU PACKAGING MICROÉLECTRONIQUE POUR L'INTERPOSEUR VERRE **172**

BIBLIOGRAPHIE **175**

I. Introduction

Dans le contexte de la recherche industrielle portant sur la microélectronique et la photonique intégrée, l'utilisation des lasers à sources ultra brèves constitue un outil particulièrement intéressant pour la structuration de matériaux pour le packaging de puces semi conductrices. Ce travail de thèse a porté sur les processus de micro-structuration laser pour le packaging de fonctions électro-optiques complexes.
La synthèse des travaux de thèse décrit dans les chapitres précédents est proposée en section II, puis une description de différentes applications pouvant découler des études venant de ce travail sera présentée, en particulier la possibilité d'inscrire des guides optiques dans des verres flexibles, l'inscription de composants photoniques en 3D, le marquage de produits industriels et le stockage de données.

II. Synthèse des travaux de thèse

II.1. Chapitre I

Après avoir détaillé succinctement les principes de base du fonctionnement des lasers et après un court historique sur ceux-ci, une description des avantages liés à l'utilisation des lasers et notamment le régime femtoseconde pour la micro-structuration et particulièrement pour le micro-usinage appliqué au packaging microélectronique a été donnée. Les impulsions ultra courtes générées par les nouvelles sources lasers femtosecondes permettent de structurer la plupart des matériaux sans dommages collatéraux avec une ZAT réduite et une très grande précision.
Le contexte applicatif des data centers, et notamment des liens électriques et optiques qui les composent, a permis de mettre en évidence la nécessité de repenser l'architecture de ceux-ci, tout particulièrement pour la montée en débit du câblage optique qui devrait permettre d'améliorer les performances des centres de données en termes de stockage et d'utilisation des données, toujours plus nombreuses. Les transceivers, qui permettent de transformer un signal optique en un signal électrique et inversement, sont des composants particulièrement importants dans l'architecture et le fonctionnement des data-centers. Ce sont eux qui font le lien entre les fibres optiques et les racks des serveurs. Ils sont composés d'une partie optique qui permet le transport et le multiplexage en longueur d'onde du signal injecté par les fibres, et de PICs qui permettent la transformation de ce signal en un signal électrique et inversement. Les PICs sont des éléments clés pour l'utilisation des AOCs dans les data-centers. Leur utilisation laisse entrevoir une solution tout optique pour palier au problème de la surconsommation électrique mais aussi à l'allongement des liaisons et à la baisse des coûts.
La difficulté accrue de réduction de taille et d'accroissement de performance des transistors CMOS signe la fin de la loi de Moore et annonce un nouveau paradigme pour l'industrie des semi-conducteurs. En effet, l'amélioration des performances des composants microélectroniques et notamment des micro-processeurs, qui jusque-là été notamment déterminée par nombre de transistors sur une puce, est aujourd'hui limitée par la taille de la gravure possible de ces dispositifs. Une solution à la poursuite du gain en performance**s** des composants semi-conducteurs réside dans l'amélioration du packaging des systèmes microélectroniques. Différents types d'architecture de packaging microélectronique ont été décrits, avec leurs avantages et leurs limites pour l'amélioration des performances des systèmes. L'intégration SiP se détache des autres types d'architectures de part le gain en compacité et l'intégration de fonctions complexes hétérogènes. En effet, l'intégration SiP permet de réduire les dimensions des interconnexions électriques au sein du packaging et de multiplier le nombre de fonctions tout en permettant l'utilisation de

puces de natures très différentes, ce qui génère une multiplication des fonctionnalités au sein d'un même boitier. L'intégration SiP 3D consiste en la superposition verticale de puces et induit donc, en plus de la diminution de l'encombrement, une réduction de la longueur des interconnexions électriques et donc tend vers une augmentation des performances en fréquence du système. Les puces mises en boitier à l'aide de cette technologie peuvent être de natures hétérogènes, c'est-à-dire que chaque puce peut avoir été fabriquée séparément avec des technologies très différentes, et sont ensuite assemblées par report. L'inconvénient de l'intégration SiP 3D réside principalement dans la nécessité du développement de briques technologiques complexes, comme la fabrication des TSVs, qui permettent d'interconnecter électriquement les puces superposées les unes sur les autres.
L'alternative proposée est l'intégration SiP 2.5D qui consiste en l'utilisation d'interposeurs comme substrats passifs fonctionnalisés. Les matériaux utilisés pour la fabrication d'interposeur sont multiples. Les interposeurs en silicium sont historiquement les plus utilisés étant donné le long historique de ce matériau dans l'industrie des semi-conducteurs. Ils sont notamment utilisés pour l'intégration 2.5D pour des applications hautes performances. Il existe aussi des interposeurs organiques qui ont pour défaut leur faible stabilité dimensionnelle qui limite la capacité d'intégration. Le dernier matériau utilisé pour la fabrication des interposeurs est le verre. L'utilisation du verre comme matériau pour la fabrication d'interposeurs est particulièrement intéressante étant donnée ses propriétés physiques exceptionnelles. De plus, le verre a comme avantage de pouvoir être structuré très facilement à l'aide d'un laser femtoseconde pour obtenir des composants photoniques utiles, notamment pour le guidage de signaux optiques. L'utilisation de l'intégration SiP 2.5D à l'aide d'interposeurs verre permet, en plus d'une bonne densité d'intégration et d'un coût de fabrication relativement bas, de s'affranchir des contraintes d'alignement dues à l'utilisation de PICs. En effet, la structuration de substrat de verre pour la conception d'interposeurs permet de mettre en place des processus menant à un positionnement passif des fibres de couplage extérieur.

II.2. Chapitre II

Une description élémentaire des phénomènes d'interaction laser-matière a été donnée pour permettre une meilleure compréhension des effets physiques mis en jeux durant l'irradiation laser de matériaux et notamment en ce qui concerne les matériaux diélectriques comme les verres. Les différents mécanismes d'absorption d'un faisceau laser par la matière linéaire ou non linéaires ont été décrits, ainsi que les détails des mécanismes d'interactions. Quand le laser se comporte comme une source de chaleur, on parle de processus thermique, la ZAT est importante. Si les liaisons moléculaires du matériau sont brisées par le faisceau laser, c'est le processus photo-chimique qui prend place. Enfin le processus photomécanique peut être décrit comme la formation d'une onde acoustique due a l'impact du faisceau laser. Des couches de matériau se détachent de la pièce usinée. L'étude de la chronologie des interactions laser-matière a montré que, pour des impulsions lasers 'longues', les effets physiques créés sur le matériau sont principalement thermiques. La diffusion thermique de l'énergie du faisceau laser est alors possible dans la matrice du matériau. Pour des impulsions ultra-brèves comme celles délivrées par le laser femtoseconde, la ZAT est réduite. En effet, le temps d'impulsion étant plus court que le temps de diffusion thermique, les effets thermiques sont minimisés. Les impulsions femtosecondes sont donc particulièrement intéressantes pour le micro-usinage puisqu'elles permettent une réduction drastique des effets thermiques néfastes et rend l'usinage particulièrement fin et précis.
Le cas particulier de l'interaction laser matière dans le cas des diélectriques transparents a été détaillé. Les longueurs d'ondes, allant du proche infrarouge à l'ultraviolet (UV > 350 nm), ne sont pas absorbées par

les diélectriques transparents. En effet, pour ce type de matériau, des phénomènes optiques non linéaires apparaissent, notamment l'absorption multi-phonique. Quand l'intensité du faisceau laser est assez importante, des changements structuraux sont obtenus dans les verres. Le changement d'indice du verre dû à sa densification a été décrit. Cette densification mène aussi à un changement drastique du taux de gravure dans certains acides de la matière irradiée par le laser. C'est le changement d'arrangement moléculaire qui permet cette densification du verre. En effet, les cycles du verre sont modifiés, passant de cycles à 5 ou 6 chainons à des cycles à 3 ou 4 chainons, entrainant une modification de l'angle typique entre les molécules de SiO_2. Cette modification du nombre de chainons des cycles moléculaires est donc responsable du changement de densité de la matière irradiée. À de fortes intensités de faisceau, d'autres phénomènes d'optique non linéaire interviennent comme la formation de filaments qui a été observée dans ces travaux. Ces filaments sont la compensation de l'effet Kerr, qui focalise le faisceau sur lui-même et agit donc comme une lentille convergente, et de l'effet de défocalisation induit par la formation d'un plasma au cours de l'irradiation. Ce plasma agit comme une lentille divergente.
Les techniques de fabrication de composants grâce au micro usinage laser du verre ont été données et ont permis de dresser un état de l'art de composants passifs. La FLAE (Femtosecond Laser Assisted Etching), qui permet d'obtenir des motifs, parfois complexes, en 3D dans du verre par irradiation laser suivi d'une attaque chimique, est particulièrement utilisée pour le micro usinage de composants de micro fluidique et d'opto micro fluidique comme la fabrication de micro-canaux. La WAFLD (Water Assisted Femtosecond Laser Drilling) permet d'obtenir des composants plus complexes, comme des structures hélicoïdales. La formation de guides optiques par irradiation directe d'un faisceau laser dans le volume de verre à été décrite et plusieurs composants et leurs applications ont été expliqués. Nous avons démontré, grâce à ces exemples, que le micro usinage laser de verres est un thème important de recherche qui peut déboucher sur de nombreuses applications très variées. Le positionnement des travaux de cette thèse est de pouvoir utiliser l'interaction laser-matière sur des substrats de verre pour concevoir et réaliser des interposeurs verres, qui rentrent dans la plateforme de fabrication des transceivers électro-optiques, ce qui est particulièrement important pour l'échange de données au sein des data centers.
La présentation de la plateforme de micro usinage au travers de la description du laser utilisé, des matériaux utilisés et des outils de caractérisation a permis d'introduire les chapitres d'expérimentations.

II.3. Chapitre III

Une description de la structuration des matériaux par laser pour la formation d'interconnexions électriques a été donnée. Les éléments essentiels de théorie associée à la structuration de matériaux conducteurs par laser femtoseconde et notamment sur l'ablation des métaux, ont permis de faire le lien entre cette technologie et les expériences menées sur la fabrication de PCB au sein du laboratoire. Deux techniques ont été présentées. Une technique, l'usinage de surface, qui permet d'ablater directement, ligne après ligne, la couche conductrice d'un PCB a été décrite. Plusieurs circuits ont été réalisés et caractérisés. Une méthode originale de structuration des interconnexions basée sur le fractionnement et le décollement de la couche de cuivre par effet thermo-mécanique a été développée. Celle-ci permet l'isolation d'ilots de matériau conducteur par découpe laser. Puis chaque ilot est exposé à une impulsion unique défocalisée. Cette impulsion permet le décollement des parcelles par effet thermo-mécanique. La comparaison de ces deux techniques a montré que la technique CSAP est particulièrement performante, que ça soit du point de vue de la qualité des structures obtenues ou du point de vue de l'efficacité du process qui est bien plus rapide à mettre en œuvre.

II.4. Chapitre IV

Les modifications structurales du verre induites par un faisceau laser femtoseconde ont été étudiées en détail dans le but d'obtenir des structures guidantes et des microstructures 3D pouvant servir de miroir photonique. Des simulations ont permis de montrer de façon théorique l'influence de l'ouverture numérique de l'optique utilisée pour la focalisation du faisceau sur la distribution d'énergie au point focal. Pour des optiques avec des petites ouvertures numériques, typiquement 0.05, la distribution d'énergie au point focal du faisceau laser peut-être représentée par un cercle d'une dizaine de microns dans le plan du substrat. Dans le plan correspondant à la direction de propagation du faisceau, la distribution d'énergie est néanmoins beaucoup plus étalée. Celle-ci se comporte comme une ligne d'une dizaine de microns d'épaisseur sur 500 microns de long. Pour des optiques avec des ouvertures numériques plus importantes, comme celles d'objectifs de microscope, typiquement de l'ordre de 0.5, la distribution d'énergie est beaucoup plus concentrée. En effet, pour ce type d'optique, la distribution d'énergie dans le plan du substrat se modélise comme un cercle de diamètre proche du micron. Dans la direction de propagation, la distribution d'énergie est beaucoup plus fine que pour les optiques avec des ouvertures numériques petites. Les modélisations montrent, dans la direction de propagation, que la distribution d'énergie forme une ellipse de 10 μm de long sur quelques microns de large. Le comportement du faisceau laser à son point focal est particulièrement important pour comprendre comment se forment les différentes structures qui ont été présentées. L'ouverture numérique des optiques utilisées, conditionne tout particulièrement ces microstructures et possède une très forte influence sur les modifications structurales du verre quand celui-ci est irradié par un laser femtoseconde. La densification du verre à l'échelle microscopique a été étudiée plus en détail, à l'aide de spectroscopie Raman.

De multiples expériences ont été effectuées sur la structuration du verre par irradiation laser femtoseconde. Des guides optiques ont été fabriqués et caractérisés en étudiant l'influence des différents paramètres lasers sur ces structures guidantes. Notamment, il a été confirmé par l'expérience l'importance de l'ouverture numérique sur la fabrication de guide. Pour des ouvertures numériques faibles, nous n'avons pas obtenu de guide à proprement parlé mais plutôt des bandes guidantes, peu intéressantes pour des applications photoniques. Par ailleurs, pour des ouvertures numériques plus importantes, des guides, mono et multi modes ont été obtenus. Les meilleurs guides monomodes obtenus possèdent des pertes, ajoutées aux pertes de couplage et aux réflexions de Fresnel typiques de 4.35 dB pour des échantillons de 2.5 cm de long. Les pertes de couplages devraient être déterminées à la suite de cette thèse. L'étude sur l'influence de la profondeur d'enterrage des guides a permis de mettre en évidence que, selon l'ouverture numérique choisie, il est possible d'inscrire des guides optiques plus ou moins précisément dans le volume de verre. En effet, nous avons montré que, plus l'ouverture numérique de l'optique utilisée pour la focalisation du faisceau laser est grande, et plus il est possible de positionner son guide de façon précise. Pour des grandes ouvertures numériques, la profondeur d'enterrage des guides est très proche de la valeur calculable théoriquement.

D'autres séries d'expériences ont été menées sur la fabrication de tranchées par irradiation laser suivi d'une gravure humide dans du HF. L'influence des différents paramètres lasers a été étudiée ainsi que l'influence de la gravure au HF. Des tranchées de formes et de tailles variées ont été obtenues, notamment grâce au contrôle de la filamentation laser. En effet, pour obtenir des tranchées profondes, nous avons cherché à obtenir des filaments les plus longs possibles. L'étude des paramètres lasers a conduit à l'obtention de filaments de plusieurs dizaines de microns, qui, après attaque chimique nous ont permis d'obtenir des tranchées adaptées aux applications de photonique intégrée.

En utilisant des supports inclinés lors de l'exposition laser, il a été possible de réaliser des tranchées inclinées dans des échantillons de verre. Des caractérisations optiques avec un banc de mesure à 1310 nm ont permis de montrer que les tranchées ainsi obtenues pouvaient rediriger le signal optique injecté dans des guides optiques enterrés dans l'échantillon de verre. Ceci a permis de démontrer la possibilité d'utiliser ces tranchées comme miroir photonique, pouvant être intégré dans des interposeurs de verre, contenant des guides. Il est tout à fait possible d'améliorer significativement les performances du miroir photonique, notamment en recouvrant celui-ci d'un métal réfléchissant comme l'aluminium ou l'or.
Une discussion a permis de mettre en corrélation les différents phénomènes physiques rentrant en jeu lors de l'irradiation laser de verre et les composants obtenus. Les effets des différents paramètres lasers ont été analysés. Il a été démontré que l'utilisation d'un laser femtoseconde permet notamment la fabrication de composants photoniques et d'interconnexions électriques pour le packaging microélectronique et photonique. L'interposeur verre, une solution bas coût, constitue une opportunité adaptée à l'amélioration des performances et **à** la diminution de la complexité de fabrication du packaging des transceivers électro-optiques utilisés dans les data-centers. La formation de guides optiques et de miroirs photoniques, compatibles avec le multiplexage de longueurs d'onde et la technologie PIC, ouvre en effet la voie à l'intégration de cette solution dans les systèmes de télécommunication électro-optique.

III. Perspectives : champs d'application de l'inscription laser

Il est possible de modifier la structure de matériaux transparents, tel que le verre, en focalisant un faisceau laser femtoseconde dans le volume de substrat. Le passage du faisceau laser, aux paramètres optimisés, permet de fonctionnaliser le matériau en augmentant l'indice de réfraction de celui-ci, notamment par densification. De nombreux travaux de recherche portent sur la fabrication de guides d'onde, mais aussi sur la conception et la fabrication de composants photoniques en trois dimensions comme des splitters de signal optique. Il est aussi possible d'utiliser cette technique pour le marquage des matériaux transparents en utilisant des lasers à impulsions ultra-courtes dans les longueurs d'onde de l'ultra-violet, beaucoup moins énergétiques que les lasers infra-rouge, ce qui permet de modifier la cohésion à l'intérieur de l'échantillon en s'affranchissant des mécanismes thermiques. La photo-inscription des matériaux transparents est donc une technologie particulièrement intéressante en ce qui concerne le marquage, l'identification, la traçabilité de production industrielle.

III.1. Guides optiques dans des verres flexibles

Depuis la découverte, dans les années 1990, de matériaux organiques de grande qualité [1][2][3][4], l'électronique et la photonique sur polymères ont évolué pour devenir un domaine d'ingénierie dynamique tant au niveau de la recherche que de l'industrie. En plus de son avantage financier, l'électronique et la photonique sur polymères offrent une flexibilité mécanique hors norme des différents composants fabriqués sur ces substrats. Le coût faible et la grande souplesse des matériaux polymères utilisés en électronique et en photonique en font une technologie de choix pour le développement d'interconnexions électriques et optiques, pour les composants et systèmes.
Malgré le développement de matériaux de grande qualité, permettant d'obtenir des guides optiques avec des pertes de propagations inférieures à 0.05 dB/cm pour la photonique sur polymère**s** [5][6], plusieurs problèmes persistent dans la fabrication de composants. Il est à noter que les composants photoniques développés sur polymères possèdent toujours des pertes optiques importantes, notamment aux longueurs

d'onde pour les télécommunications, autour de 1550 nm. De plus, ces matériaux flexibles bénéficient d'une faible stabilité thermique, ce qui induit des limitations à la distribution de cette technologie dans les systèmes. Plusieurs compagnies de fabrication de verre ont développé ces dernières années des substrats de verre fin, d'une épaisseur inférieure à 100 µm, pouvant descendre à 30 µm. La diminution d'épaisseur des substrats de verre leur confère des propriétés de flexibilité mécanique remarquable, tout en conservant les propriétés chimiques, thermiques et optiques des verres d'épaisseur plus classique.

Une des perspectives intéressantes de ce travail de thèse est donc la possibilité d'inscrire des guides optiques dans des verres ultra fins et flexibles. La Fig. 5.1 montre qu'il est possible d'inscrire des guides optiques par irradiation d'un faisceau laser femtoseconde dans des verres allant de 100 à 25 µm d'épaisseur [7].

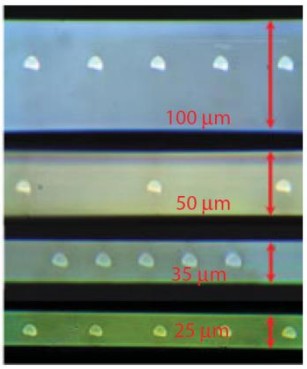


Fig. 5.1 : Guides optiques inscrits dans des verres de 100 à 25 µm d'épaisseur [7]

Ces guides ont été obtenus en utilisant une mise en forme de faisceau spatiale et temporelle avec une source laser à 300 fs, avec un taux de répétition de 250 kHz avec différentes valeurs d'énergie par pulse et des vitesses allant de 2 à 18 mm/s. Les guides ont des pertes d'insertions autour de 0.11 dB/cm [7]. Ils ont notamment été caractérisés en fonction de leur rayon de courbure, comme on peut l'observer sur la Fig. 5.2.
Les caractérisations des pertes d'insertion de ces guides en fonction du rayon de courbure montrent une légère augmentation de celles-ci de 0.05 dB pour des rayons de courbure supérieur à 6.7 cm.

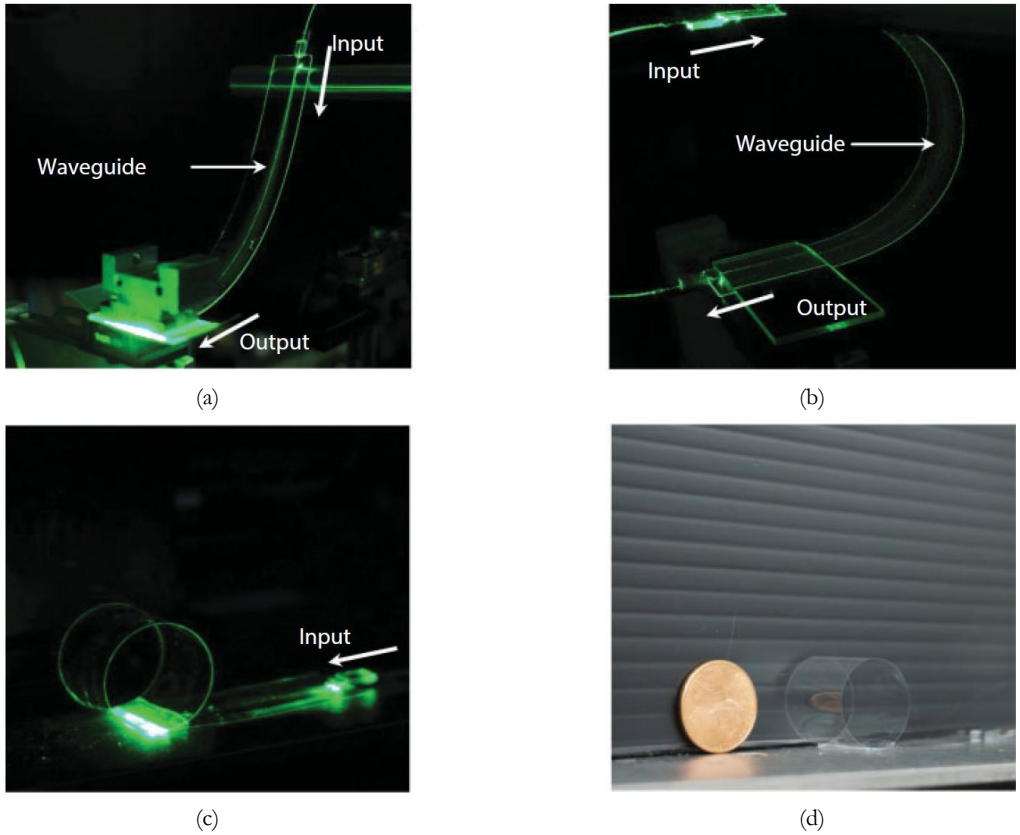


Fig. 5.2 : Guides obtenus dans des verres flexibles de (a) 100 µm d'épaisseur avec un rayon de courbure de 13.5 cm, (b) 50 µm d'épaisseur avec un rayon de courbure de 2.1 cm, (c) 35 µm d'épaisseur avec un rayon de courbure de 1 cm et (d) le même guide dans du verre de 35 µm après caractérisation[7]

III.2. Composants photoniques 3D

L'utilisation des systèmes de déplacement très précis dans les 3 directions de l'espace et des logiciels de CAO tridimensionnel permet aussi de réaliser des composants photoniques 3D. En effet, après l'optimisation des paramètres pour la photo-inscription de guides d'ondes optiques il est possible de fabriquer des composants plus complexes dans les trois dimensions de l'échantillon, plutôt que dans deux. Plusieurs groupes de recherche ont réalisé des composants complexes comme des séparateurs (splitters) à une entrée et plusieurs sorties ou encore des multiplexeurs/démultiplexeurs type MZI.

Les différentes expérimentations menées sur la fabrication des guides optiques durant cette thèse ouvrent la voie à la fabrication de composants photoniques 3D. Dans un premier temps des splitters ainsi que des jonctions Y peuvent être réalisés. L'inscription de plusieurs guides en 3D peut mener à la fabrication de coupleurs comme celui présenté Fig. 5.3.

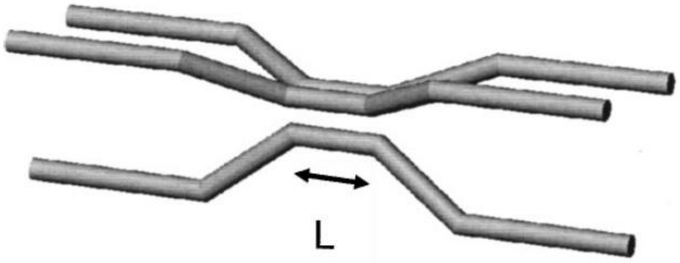


Fig. 5.3 : Schéma d'un coupleur directionnel à trois guides optiques [8]

III.3. Marquage et stockage optique

Les technologies de photo inscription par laser femtoseconde dans les matériaux transparents permettent, grâce aux impulsions ultra-brèves et l'utilisation de longueurs d'onde ultra violettes, une très grande précision de travail. Il est donc possible de créer des marquages sub micrométriques avantageux, soit pour cacher le marquage pour l'œil humain et créer des systèmes de traçabilité de produits industriels et pour lutter contre la contrefaçon [9][10], soit pour obtenir une plus grande densité d'informations stockées [11]. Sur la Fig. 5.4 sont présentées quatre photos d'un exemple de cryptage à cinq échelles d'exposition et de polarisation dans un échantillon de verre de 1.5 x 2 mm, inscrit à l'aide d'un laser femtoseconde.

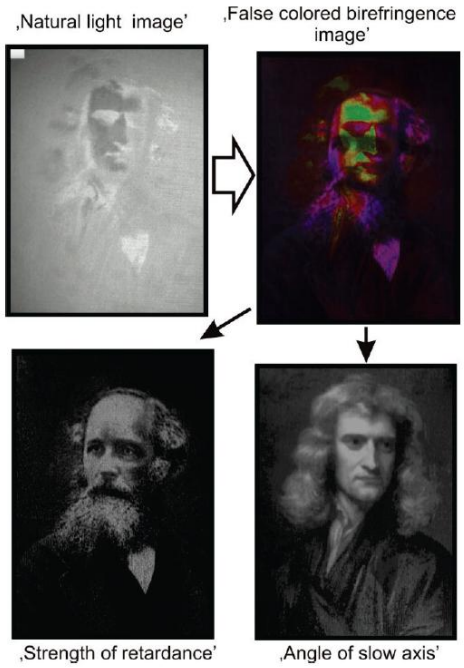


Fig. 5.4 : Exemple de cryptage de données à cinq échelles mesurant 1.5 x 2 mm [11]

L'image en haut à gauche est une photo du cryptage en lumière blanche. Les trois autres images montrent la même photographie avec des polarisations lumineuses différentes. Cet exemple permet de montrer le potentiel de l'inscription de structure par des lasers femtosecondes dans le volume de verre pour le marquage et le stockage de données.

III.4. Puces de micro et d'opto-fluidique

La mise en évidence du changement du taux de gravure au HF entre un verre non irradié et un verre irradié par un faisceau laser femtoseconde permet d'imaginer la fabrication de puces pouvant servir en micro-fluidique, et pourquoi pas, en additionnant cette technologie à l'inscription de guides optiques dans des verres, en opto-micro-fluidique. Le changement de taux de gravure est particulièrement intéressant pour fabriquer des structures en 3D dans des substrats de verre. Un exemple de ce type d'applications est présenté en Fig. 5.5.

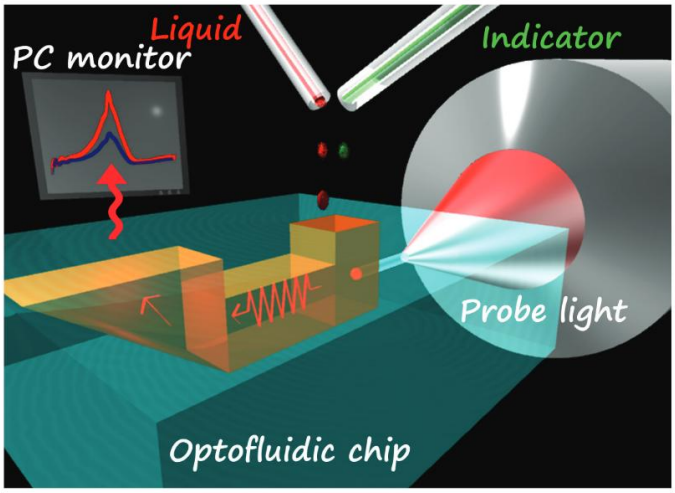


Fig. 5.5 : Puce d'opto fluidique pour la caractérisation de liquide biochimique [12]

IV. L'inscription laser au service de la photonique intégrée et du packaging microélectronique pour l'interposeur verre

L'interposeur verre, présenté en Fig. 5.6, est un substrat d'assemblage qui présente des avantages distinctifs majeurs pour les solutions d'intégration tels que :

i) l'alignement passif de la fibre externe
ii) l'alignement optique passif du PIC sur l'interposeur
iii) le transfert des fonctions optiques passives du PIC sur l'interposeur de verre
iv) une approche conservative réutilisant les coupleurs à réseau du PIC.

Dans le Chapitre 4, il a été montré qu'il est possible de fabriquer des guides optiques et des miroirs photoniques en utilisant les technologies lasers avec des sources ultra-brèves. Ici les possibilités d'amélioration de l'interposeur verre vont être décrites.

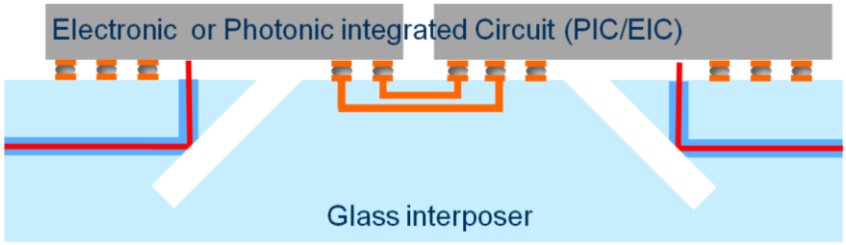


Fig. 5.6 : Schéma d'un interposeur verre avec des fonctions photoniques passives

Plusieurs voies de perfectionnement existent pour améliorer significativement les performances de l'interposeur verre décrit précédemment. On peut citer la diminution des pertes des guides optiques, qui sont contraintes par la différence d'indice maximum qu'il est possible d'obtenir entre le verre non modifié et le verre structuré. Une autre idée est d'améliorer le couplage entre la fibre optique et le guide, pour cela plusieurs possibilités existent. En effet, la fabrication de 'V groove', une rainure fabriquée par irradiation laser suivi d'une attaque chimique est imaginable devant le guide inscrit au laser. Cette technique a pour avantage d'obtenir un alignement passif entre la fibre et le guide, ce qui permet de réduire drastiquement le temps d'alignement et donc le coût de l'interposeur. Il est aussi possible d'améliorer le couplage fibre guide en améliorant la morphologie du guide, c'est-à-dire en adaptant son mode d'entrée au mode de la fibre optique.

Dans la section IV du Chapitre 4, concernant la fabrication de tranchées, il a été démontré la possibilité de concevoir des rainures de tailles et de formes différentes dans du verre. Le diamètre d'une fibre optique utilisé en télécommunications, typiquement une SMF 28 est de 125 µm. Au vue des résultats obtenus en terme de géométrie et de profondeur de tranchée, il semble possible d'adapter les processus de fabrication, pour obtenir des V grooves aux dimensions adéquates pour y placer une fibre optique. Et donc de permettre un alignement passif entre la fibre optique et un guide inscrit en continuité du V groove.

Heilmann et al. [13] ont montré qu'il est possible d'améliorer significativement le couplage entre une fibre optique monomode et un guide fabriqué par inscription à l'aide d'un laser femtoseconde dans le volume de verre. Ils ont montré une amélioration de 77 % du couplage entre une fibre monomode classique et un guide, sans pour autant rendre plus compliqué la formation de ceux-ci.
Le diamètre de champ de mode (MFD Mode Field Diameter) d'un guide obtenu par inscription à l'aide d'un laser femtoseconde est, en général, deux fois plus important que le MFD d'une fibre optique monomode [14]. Ce qui diminue grandement l'efficacité de couplage entre les deux composants. L'amélioration de l'adaptabilité de ces deux MFDs est rendue possible en augmentant la puissance d'inscription des guides localement, proche de la face de sortie du substrat. En effet, un premier guide est inscrit (regular guide) puis un second passage est opéré avec le laser pour créer une zone ou le MFD des guides sera plus fin. Cette technique est présentée Fig. 5.7.

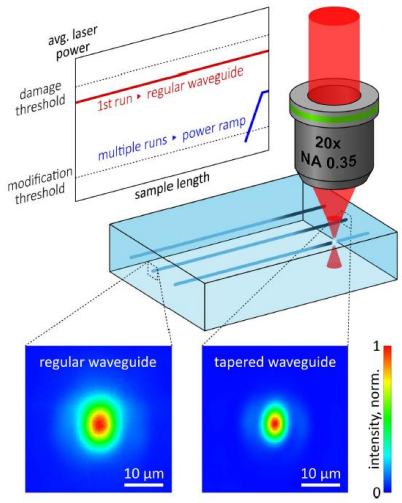


Fig. 5.7 : Illustration de la technique de fabrication des guides avec l'adaptation du MFD des guides [13]

Comme le montre la Fig. 5.7, cette seconde passe laser, consistant en une rampe de puissance, permet de créer un taper : une région ou le guide a un MFD plus fin, mieux adapté à celui d'une fibre optique mono mode.

En guise de synthèse finale, quelques applications des composants photoniques fabriqués ont été présentés, comme le marquage de verre ou encore la fabrication de puces pour l'opto micro fluidique. Les différentes étapes de fabrication pour l'obtention d'un interposeur verre utilisable, par exemple comme transceiver électro-optique, ainsi que des pistes d'améliorations ont été données. Notamment en ce qui concerne le couplage de la fibre avec le guide de l'interposeur. Ces indications constituent des pistes d'amélioration significative des performances du système ainsi que de son temps de fabrication et donc de son coût.

Bibliographie

[1] M. Hikita, R. Yoshimura, M. Usui, S. Tomaru, and S. Imamura, "Polymeric optical waveguides for optical interconnections," *Thin Solid Films*, vol. 331, no. 1–2, pp. 303–308, Oct. 1998.

[2] S. H. Ahn and L. J. Guo, "High-Speed Roll-to-Roll Nanoimprint Lithography on Flexible Plastic Substrates," *Adv. Mater.*, vol. 20, no. 11, pp. 2044–2049, Jun. 2008.

[3] L. Eldada and L. W. Shacklette, "Advances in polymer integrated optics," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 54–68, Jan. 2000.

[4] M. Zhou, "Low-loss polymeric materials for passive waveguide components in fiber optical telecommunication," *Opt. Eng.*, vol. 41, no. 7, p. 1631, Jul. 2002.

[5] R. Dangel *et al.*, "Polymer-Waveguide-Based Board-Level Optical Interconnect Technology for Datacom Applications," *IEEE Trans. Adv. Packag.*, vol. 31, no. 4, pp. 759–767, Nov. 2008.

[6] R. Dangel *et al.*, "Development of Versatile Polymer Waveguide Flex Technology for Use in Optical Interconnects," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 24, pp. 3915–3926, Dec. 2013.

[7] S. Huang, M. Li, S. M. Garner, M.-J. Li, and K. P. Chen, "Flexible photonic components in glass substrates," *Opt. Express*, vol. 23, no. 17, p. 22532, 2015.

[8] A. M. Kowalevicz, V. Sharma, E. P. Ippen, J. G. Fujimoto, and K. Minoshima, "Three-dimensional photonic devices fabricated in glass by use of a femtosecond laser oscillator," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 9, p. 1060, May 2005.

[9] David Benderly, "Laser allows single-step marking on automotive glass - Industrial Laser Solutions," 2016. .

[10] E. Mottay *et al.*, "Industrial ultrafast internal engraving laser system for anti-counterfeiting applications," 2008, vol. 6881, p. 68810H.

[11] Y. Bellouard, "The Femtoprint Project," *J. Laser Micro/Nanoengineering*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, Feb. 2012.

[12] Y. Hanada, K. Sugioka, and K. Midorikawa, "Highly sensitive optofluidic chips for biochemical liquid assay fabricated by 3D femtosecond laser micromachining followed by polymer coating," *Lab Chip*, vol. 12, no. 19, p. 3688, Aug. 2012.

[13] R. Heilmann, C. Greganti, M. Gräfe, S. Nolte, P. Walther, and A. Szameit, "Tapering of femtosecond laser-written waveguides," *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 3, pp. 377–381, 2018.

[14] R. Keil *et al.*, "Hybrid waveguide-bulk multi-path interferometer with switchable amplitude and phase," Jun. 2016.

ANNEXE I – CARTOGRAPHIE EXPERIMENTALE

Sommaire

SOMMAIRE 177

I. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU BALAYAGE EN PUISSANCE POUR TROIS VITESSES SUR LA FORMATION DE TRANCHEE APRES IRRADIATION LASER 178

II. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU BALAYAGE EN FREQUENCE POUR CINQ VITESSES SUR LA FORMATION DE TRANCHEE APRES IRRADIATION LASER 180

II.1. De 20 à 200 kHz par pas de 20 kHz 180
II.2. De 8 à 44 kHz par pas de 4 kHz 182

III. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU BALAYAGE EN FREQUENCE POUR TROIS VITESSES SUR LA FORMATION DE TRANCHEE APRES IRRADIATION LASER ET GRAVURE AU HF 184

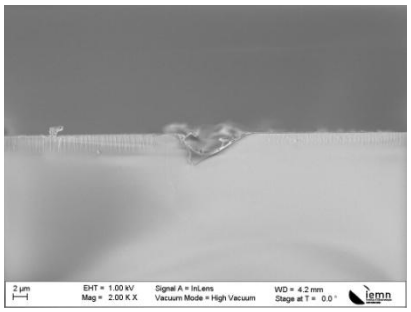
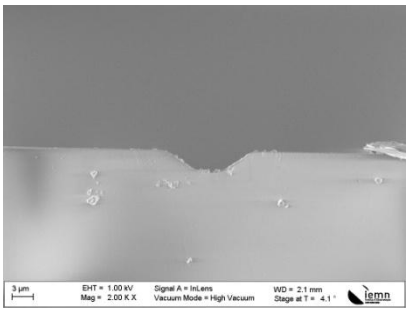
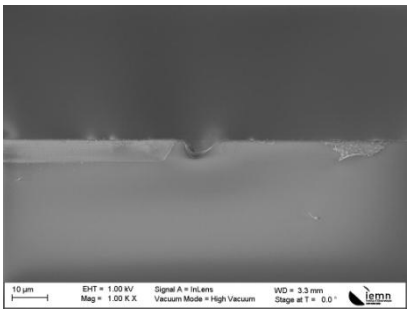
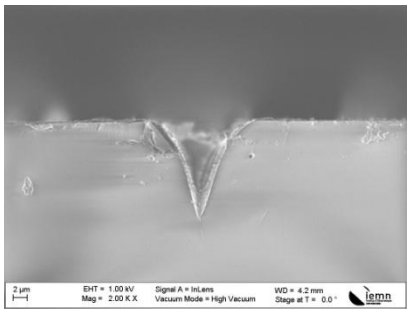
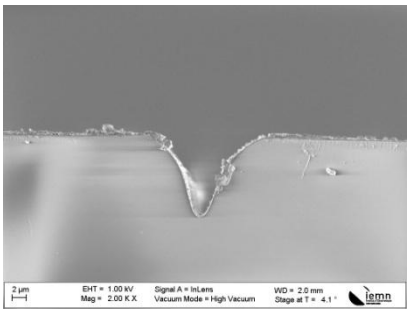
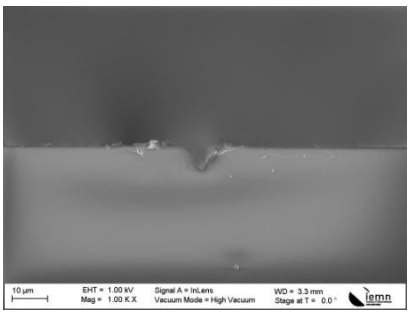
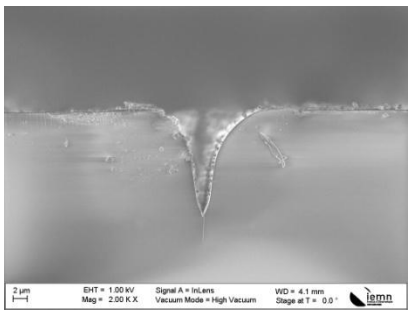
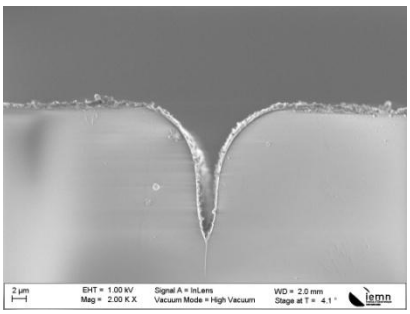
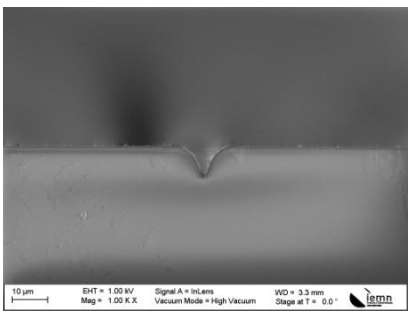
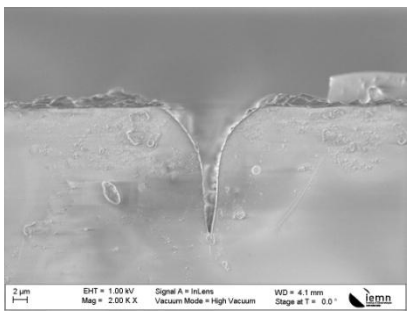
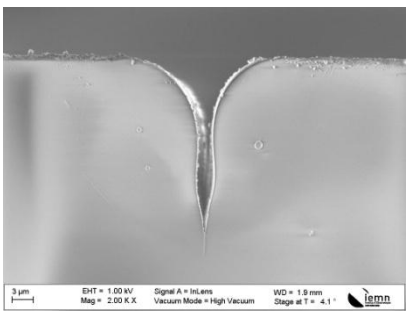
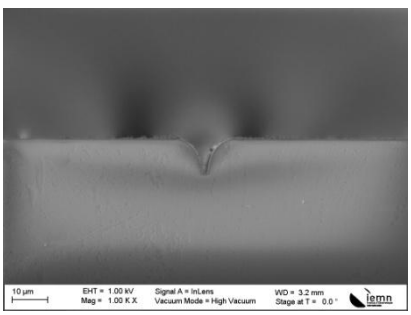
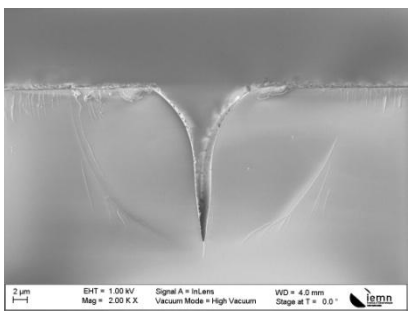
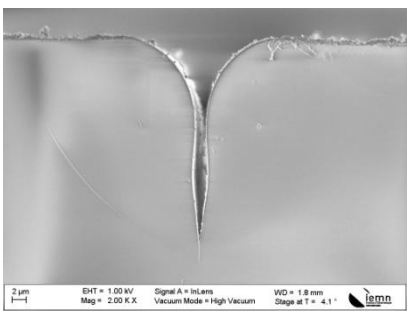
III.1. Ligne UV 184
III.2. Ligne GR 186
III.3. Ligne IR 188

IV. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU BALAYAGE EN FREQUENCE SUR LA FORMATION DE TRANCHEE INCLINEE APRES IRRADIATION LASER ET GRAVURE AU HF 190

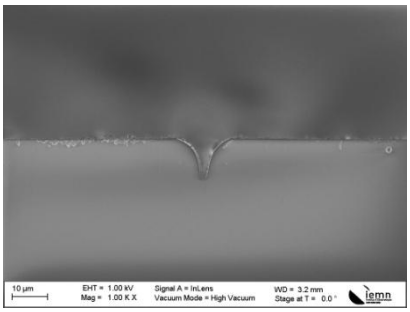
I. Étude de l'influence du balayage en puissance pour trois vitesses sur la formation de tranchée après irradiation laser

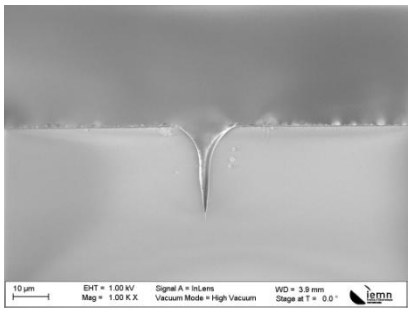
Ligne UV

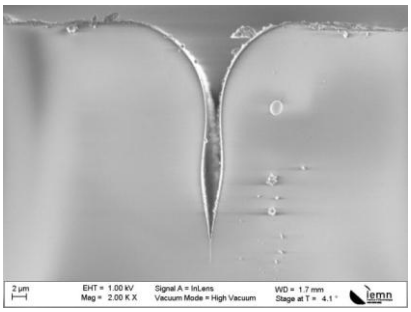
Taux de répétition : 200 kHz

Puissance (%)	Vitesse (mm/s) 10	20	50
30			
40			
45			
50			
55			

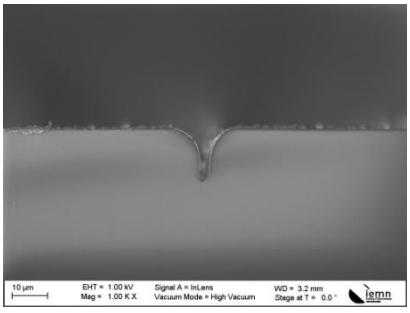
60

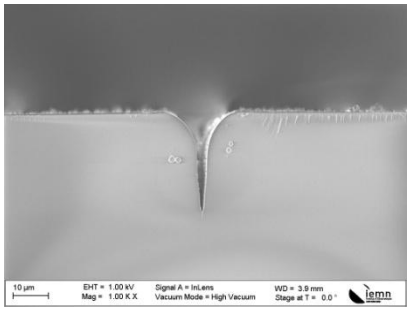


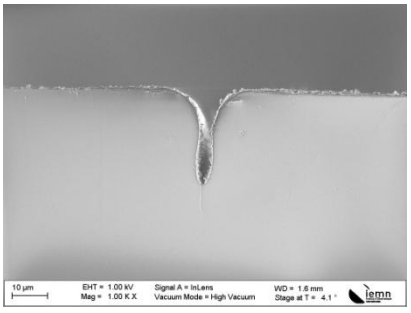




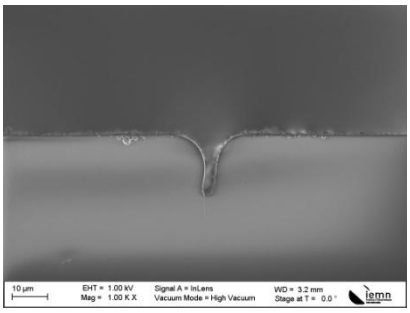
70

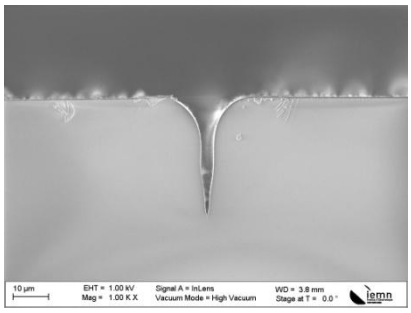


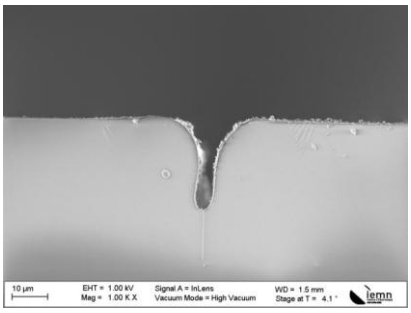




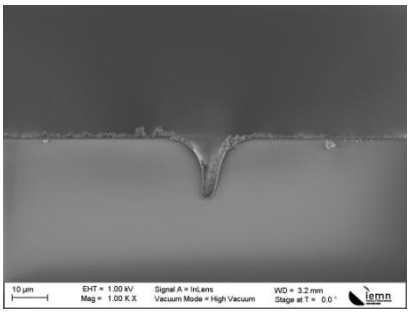
80

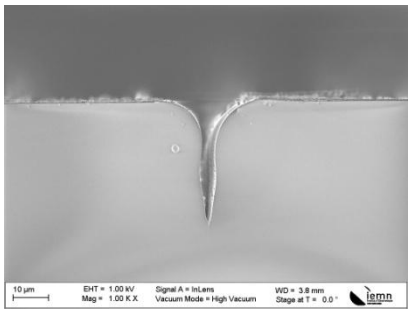


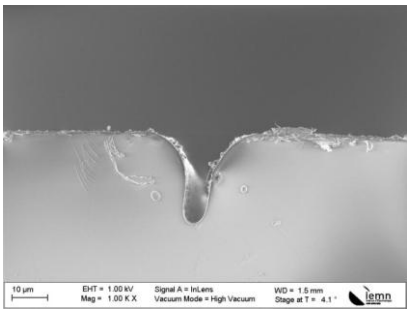




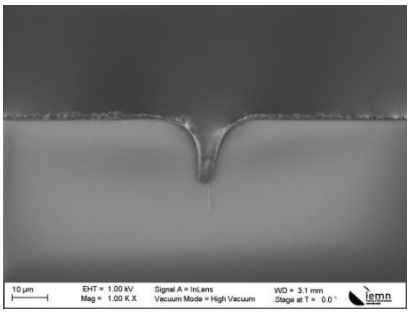
90

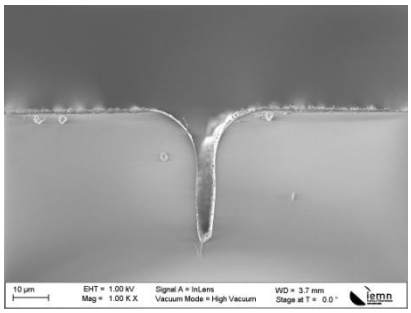


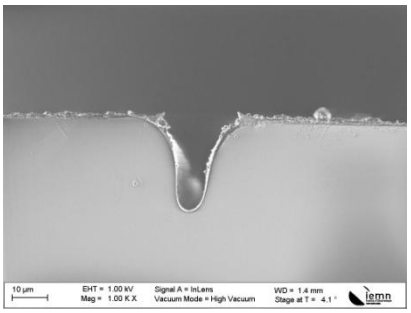




100





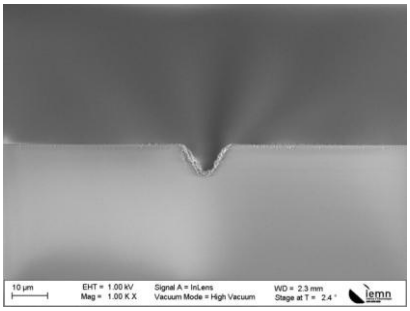
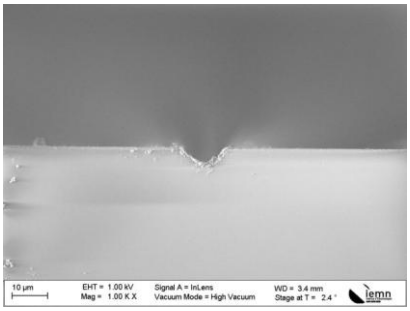
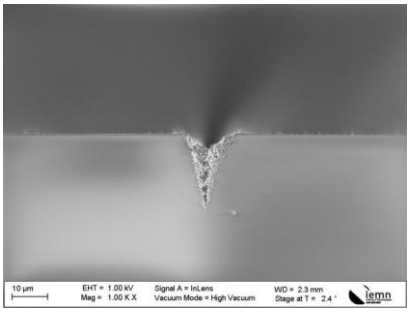
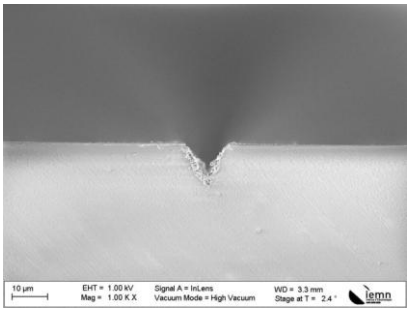
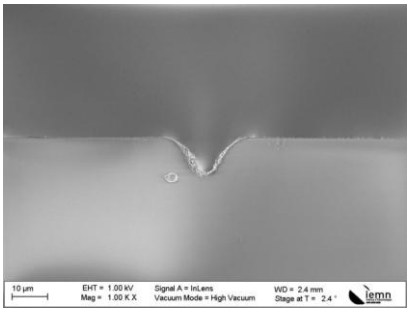
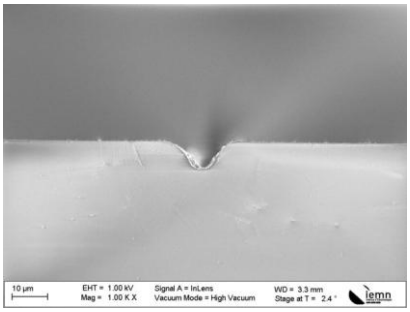
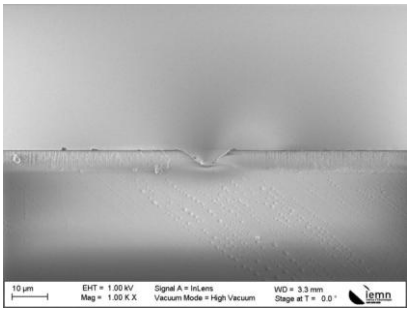
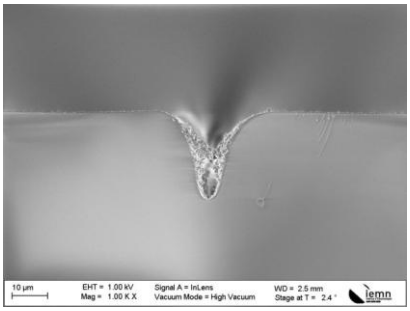
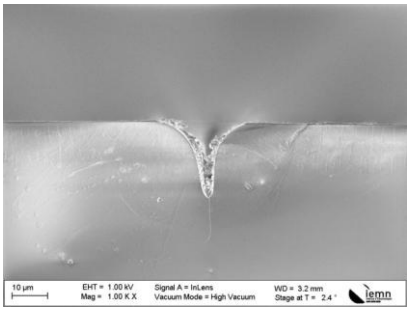
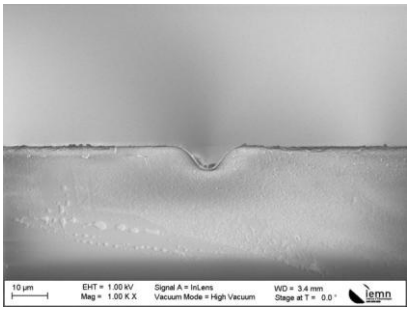


II. Étude de l'influence du balayage en fréquence pour cinq vitesses sur la formation de tranchée après irradiation laser

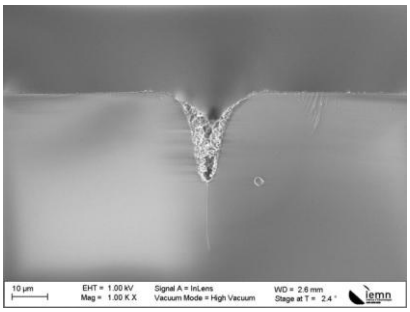
II.1. De 20 à 200 kHz par pas de 20 kHz

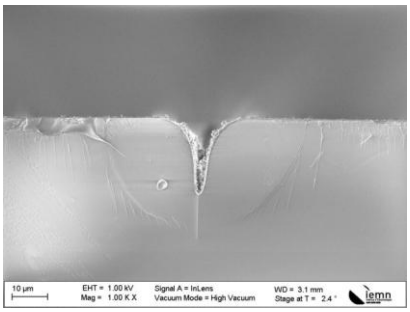
Ligne UV

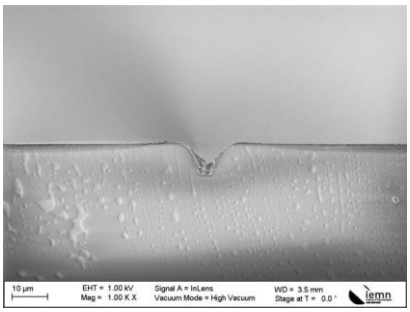
$P_{moyenne}$ = 2.4 W à 200 kHz

Taux de répétition (kHz)	Vitesse (mm/s) 10	20	50
20			
40			
60			
80			

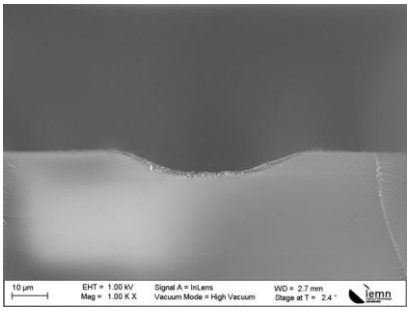
100

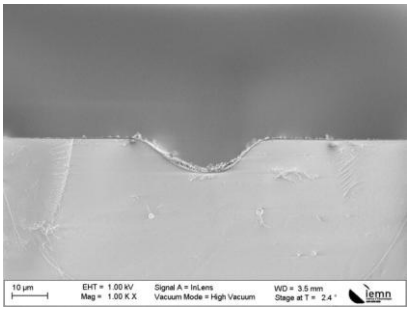


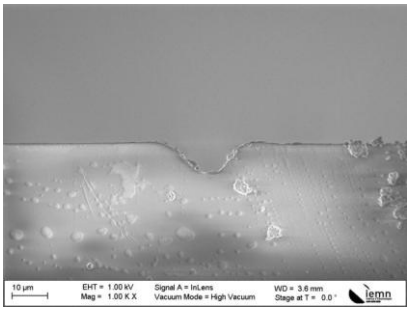




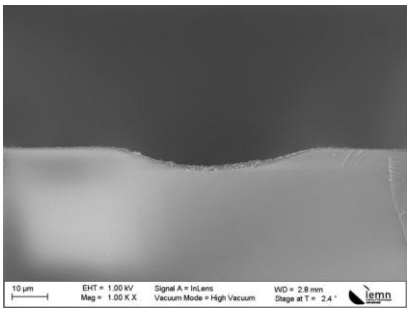
120

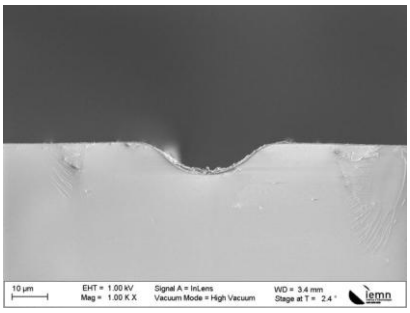


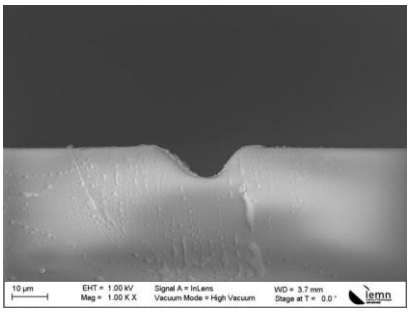




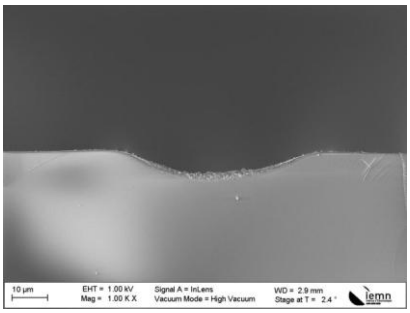
140

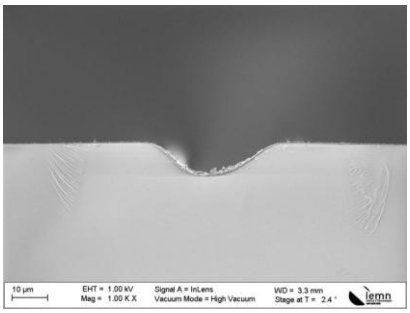


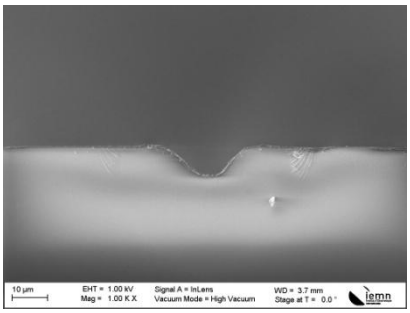




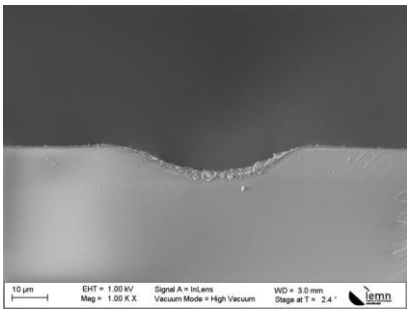
160

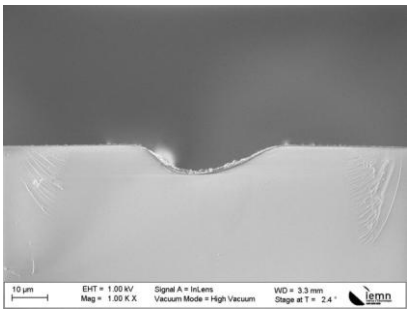


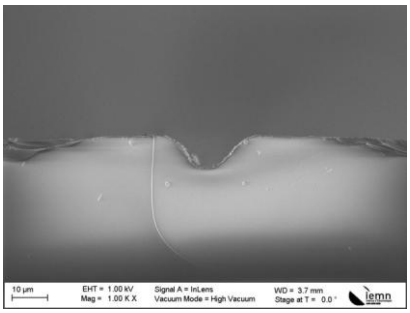




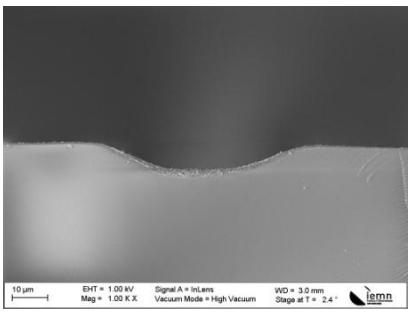
180

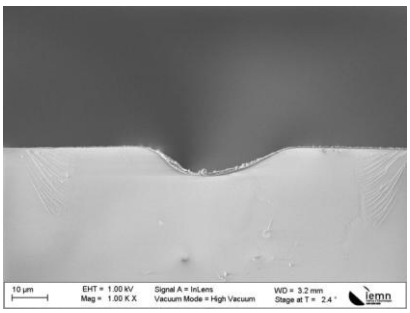


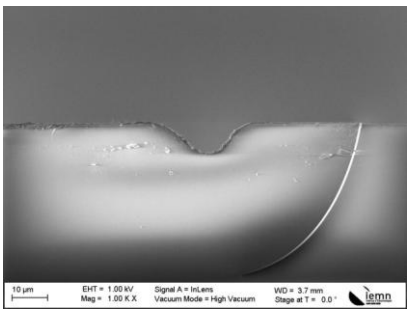




200



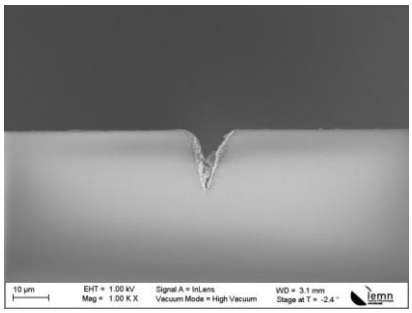
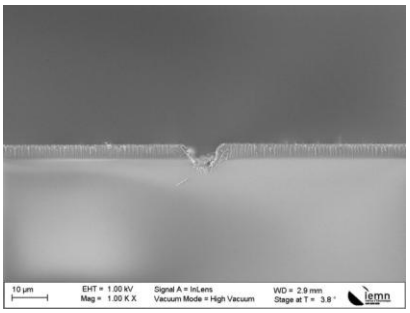
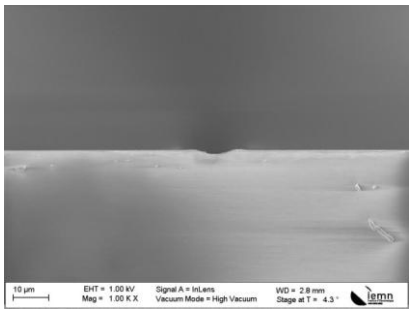
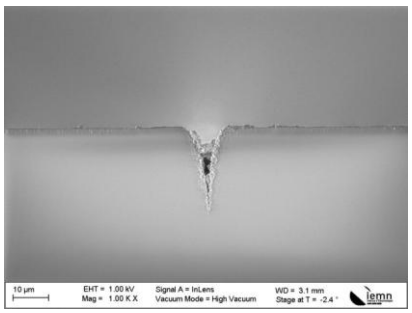
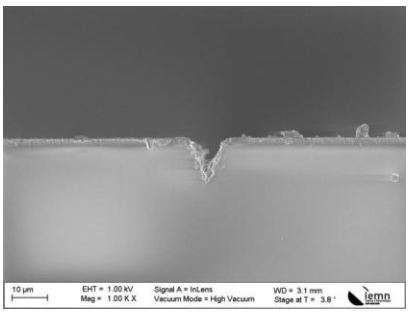
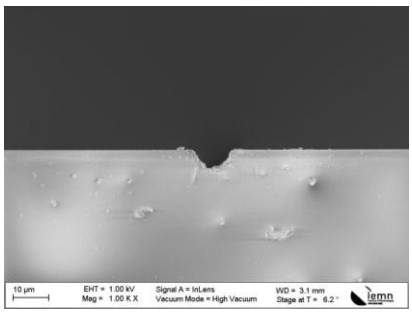
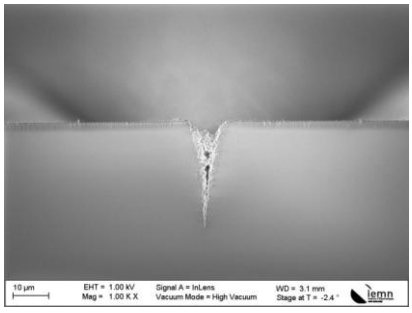
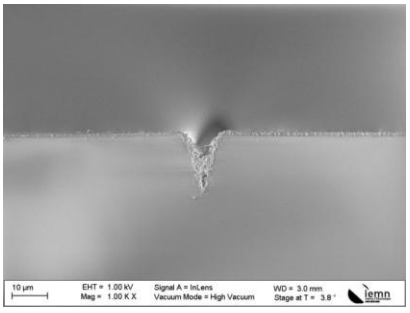
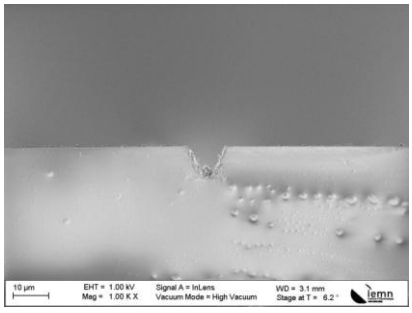
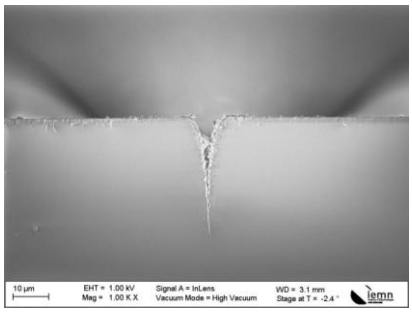
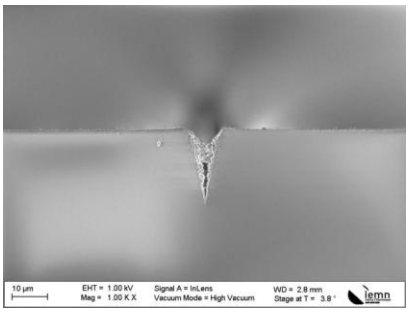
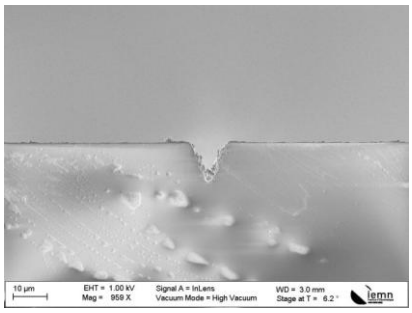
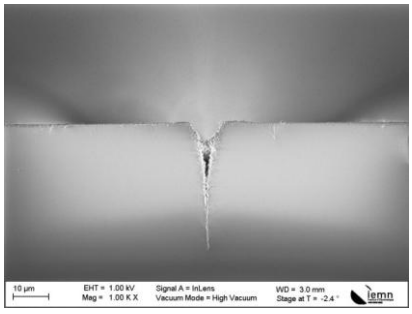
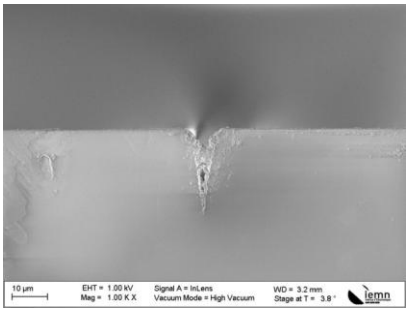
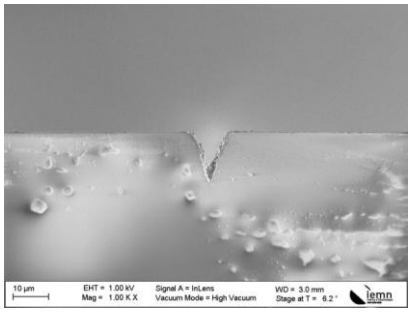




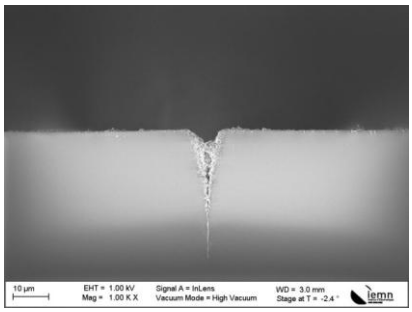
II.2. De 8 à 44 kHz par pas de 4 kHz

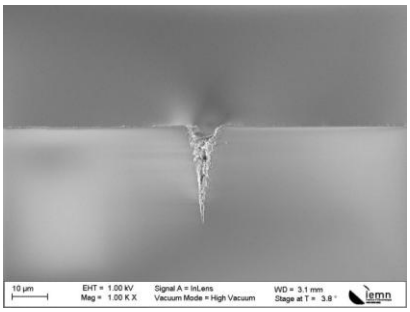
Ligne UV

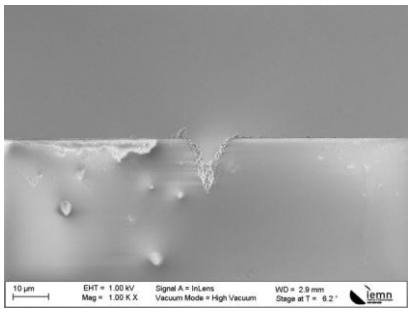
$P_{moyenne}$ = 2.4 W à 200 kHz

Taux de répétition (kHz)	Vitesse (mm/s) 2	5	10
8			
12			
16			
20			
24			

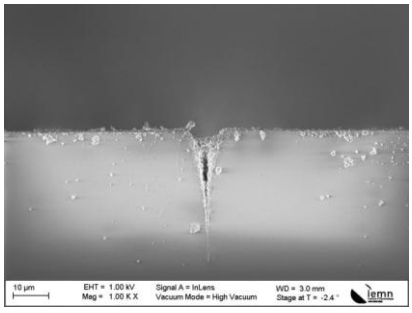
28

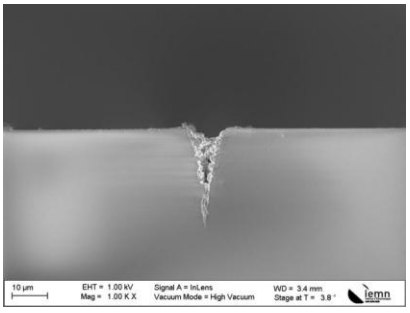

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -2.4 °
lemn

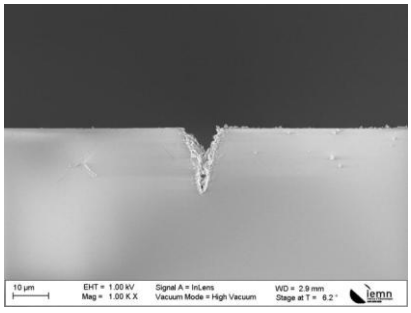

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.1 mm
Stage at T = 3.8 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 6.2 °
lemn

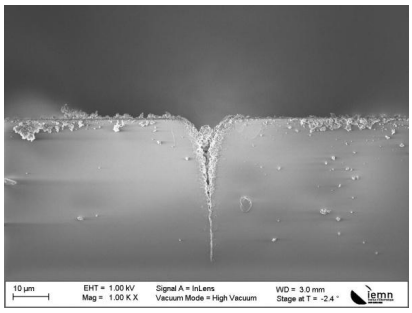
32

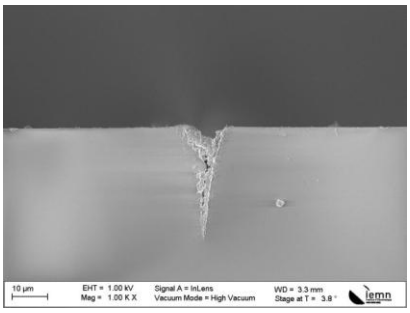

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -2.4 °
lemn

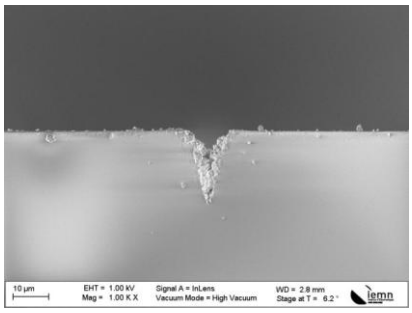

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.4 mm
Stage at T = 3.8 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 6.2 °
lemn

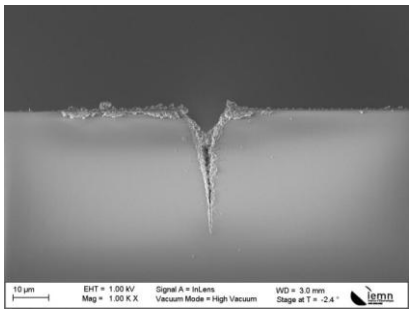
36

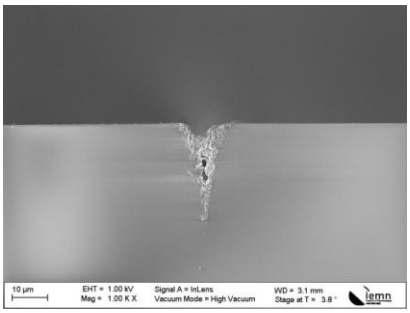

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -2.4 °
lemn

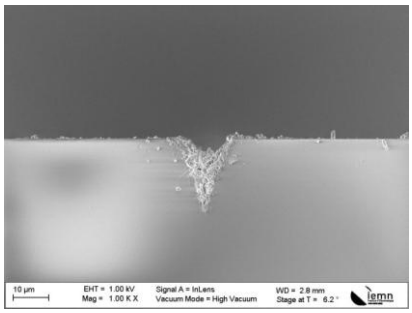

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.3 mm
Stage at T = 3.8 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 6.2 °
lemn

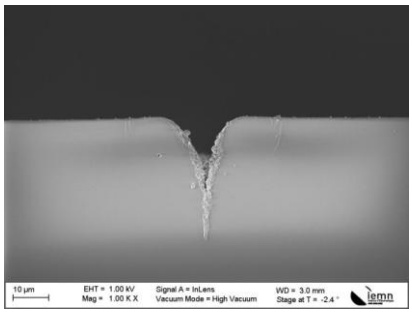
40

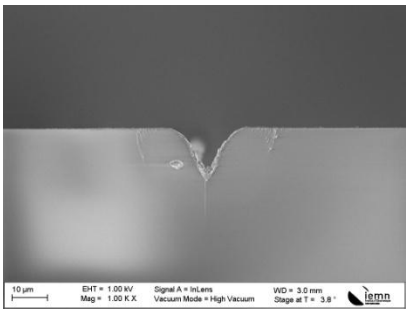

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -2.4 °
lemn

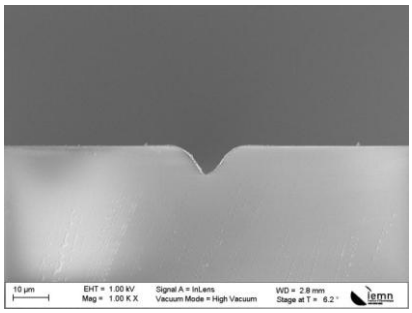

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.1 mm
Stage at T = 3.8 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 6.2 °
lemn

44


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -2.4 °
lemn

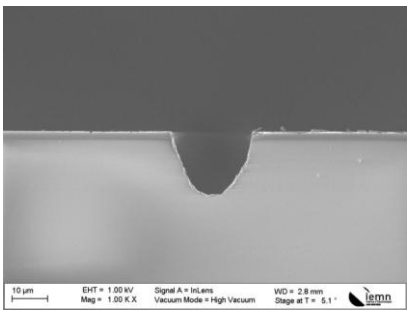
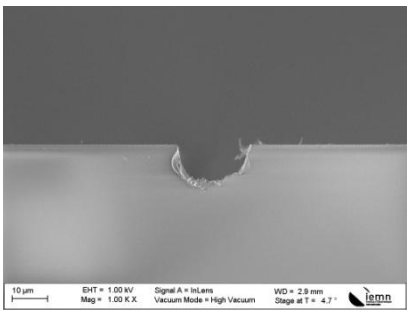
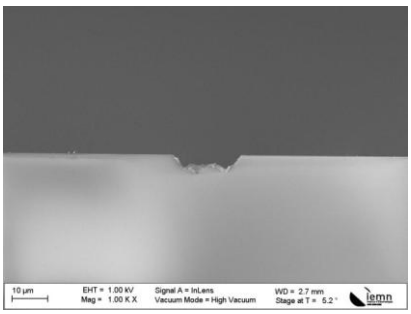
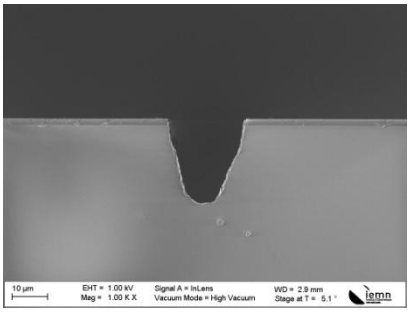
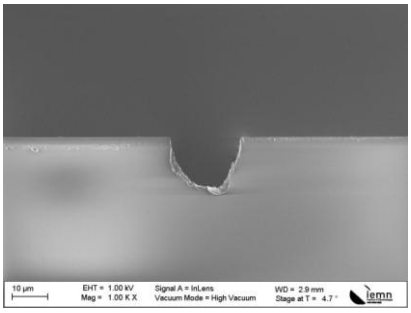
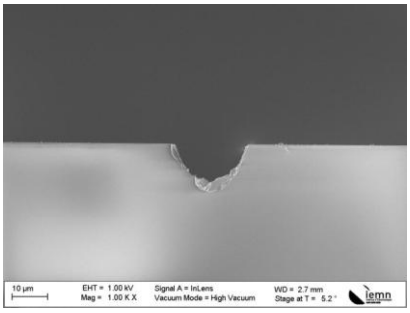
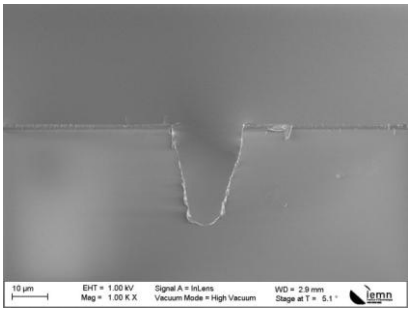
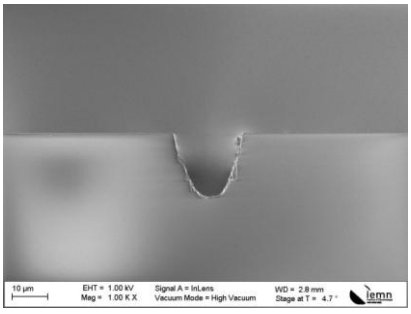
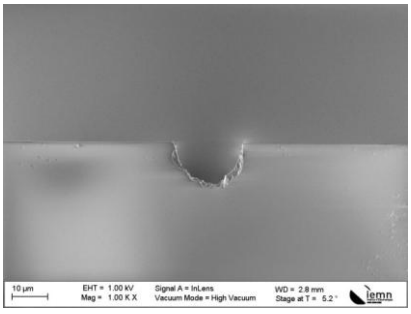
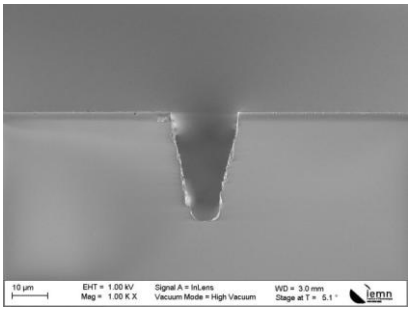
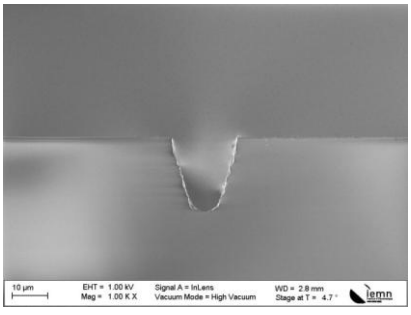
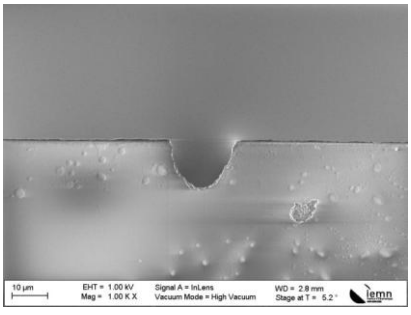

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = 3.8 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 6.2 °
lemn

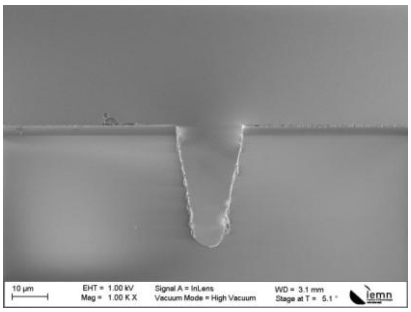
III. Étude de l'influence du balayage en fréquence pour trois vitesses sur la formation de tranchée après irradiation laser et gravure au HF

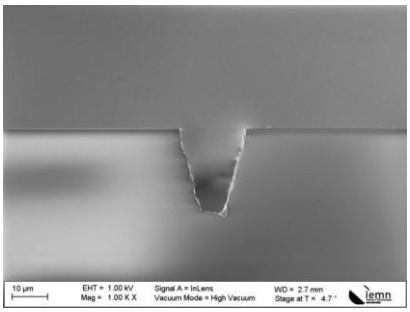
III.1. Ligne UV

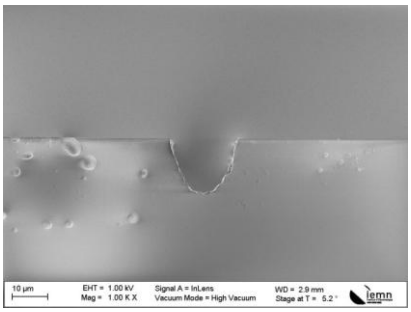
$P_{moyenne}$ = 2.4 W à 200 kHz
Gravure : 5 min HF 10 %

Taux de répétition (kHz)	Vitesse (mm/s) 2	5	10
8			
12			
16			
20			

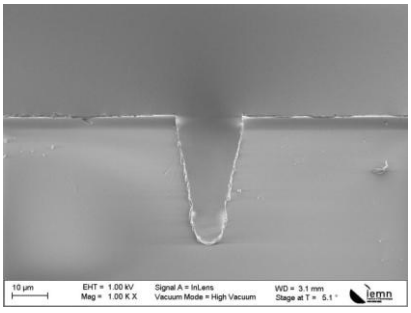
24

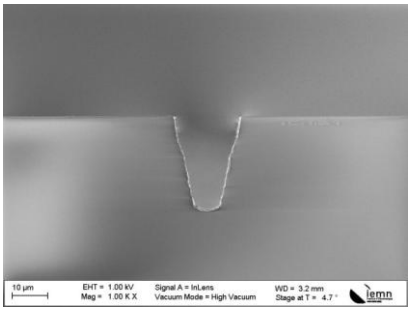


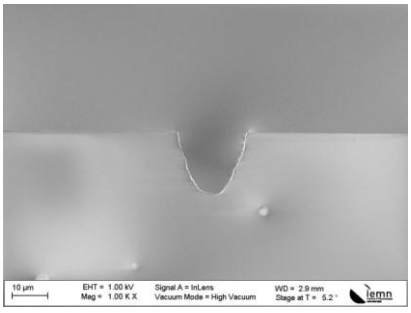




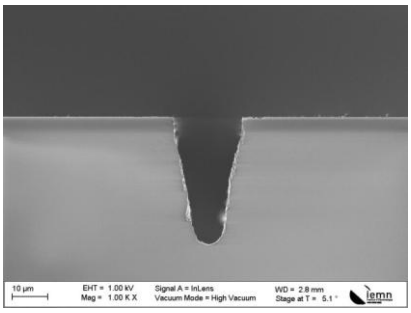
28

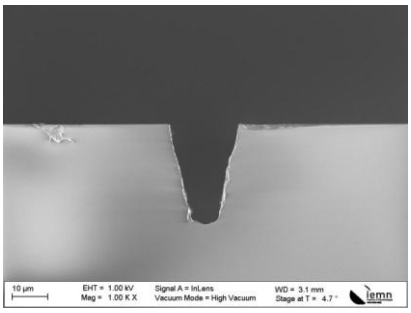


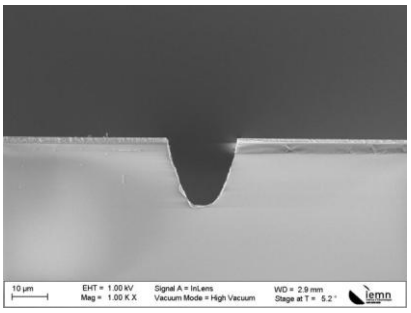




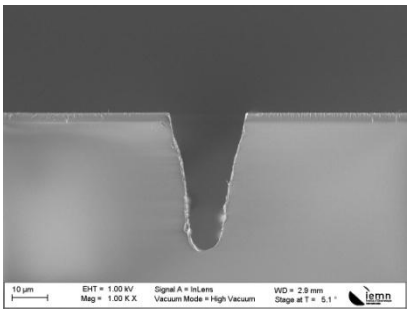
32

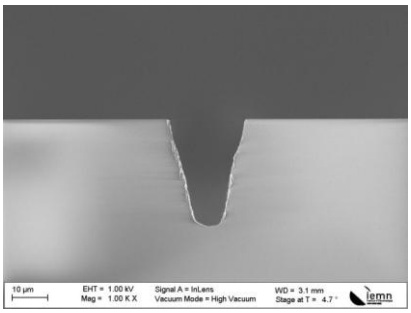


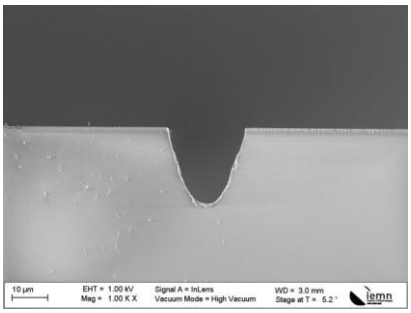




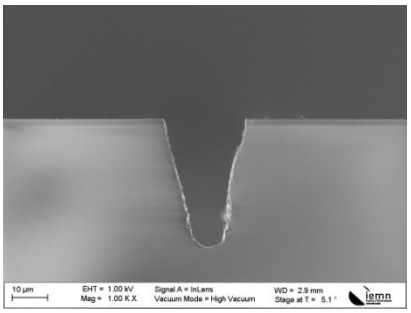
36

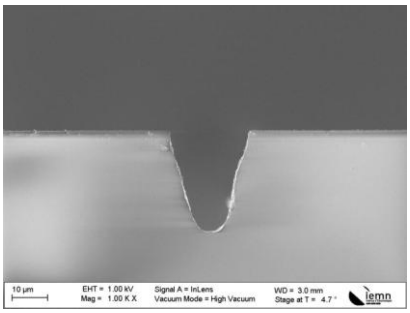


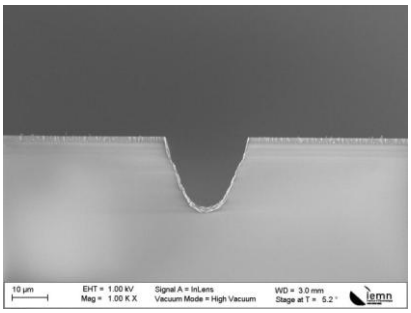




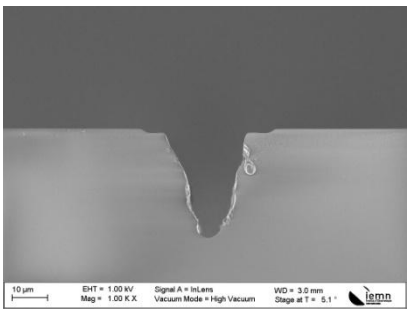
40

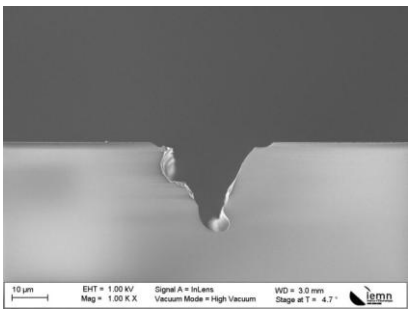


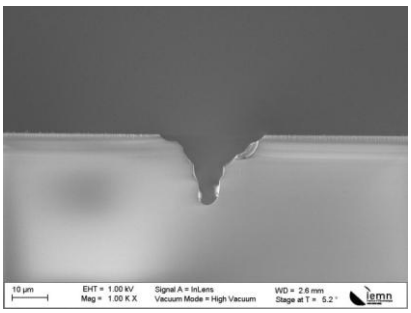




44

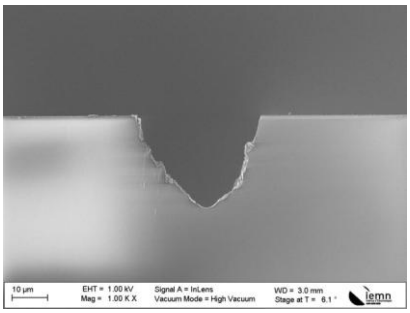
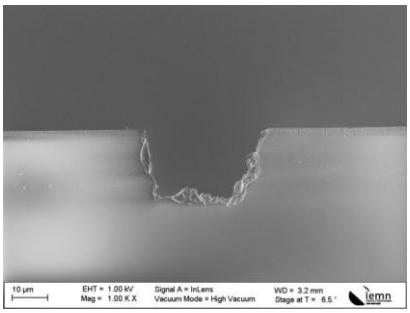
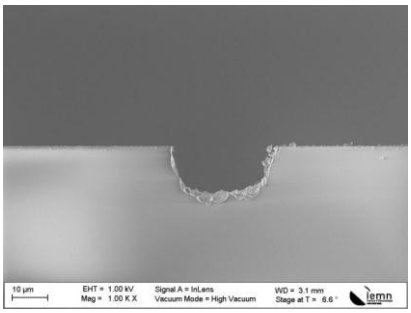
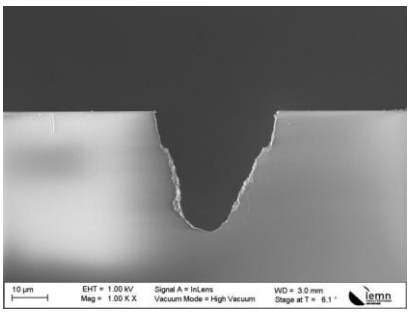
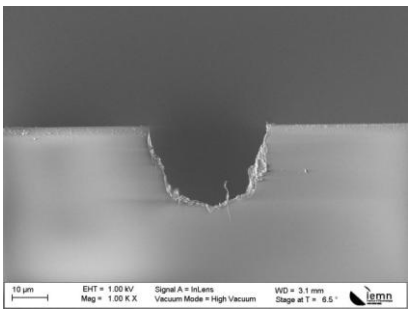
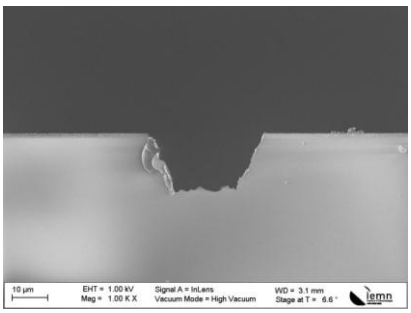
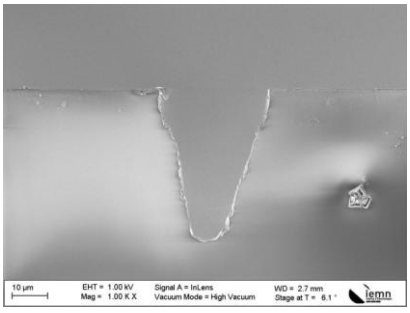
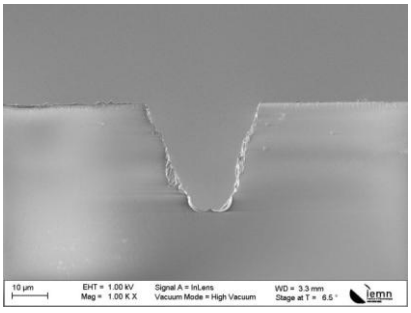
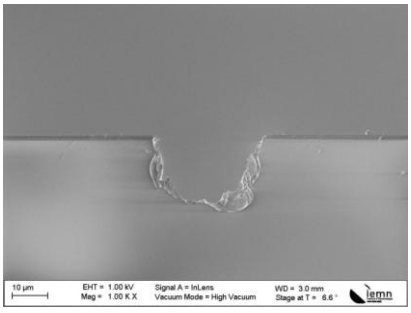
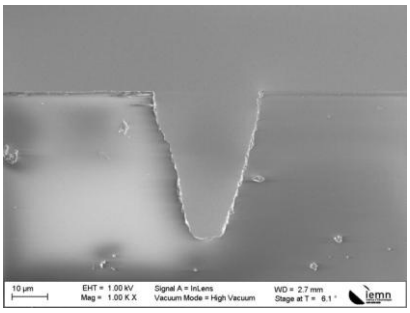
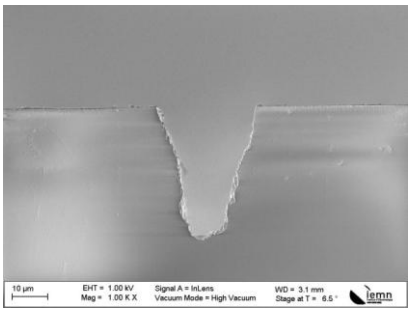
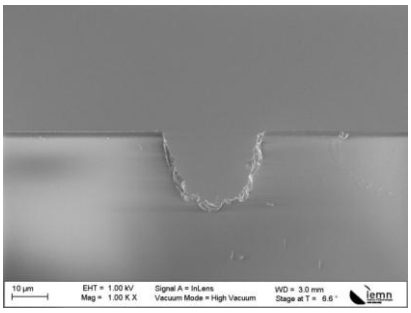
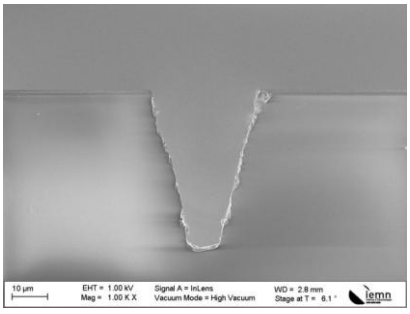
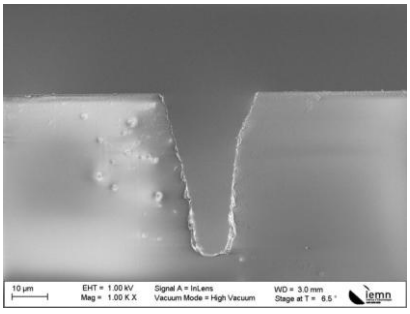
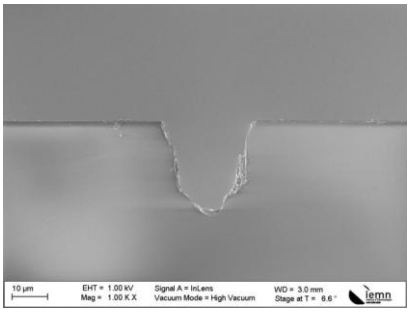




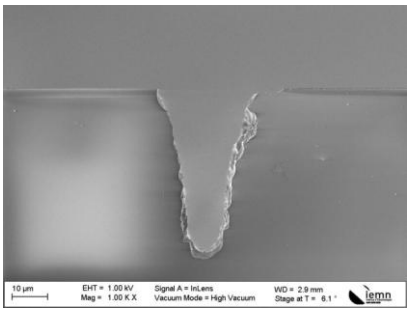


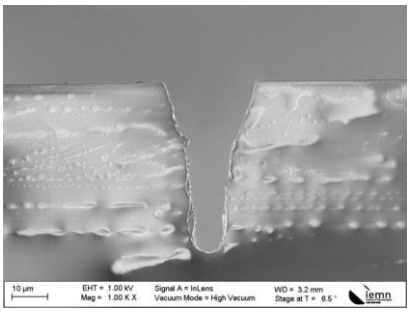
III.2. Ligne GR

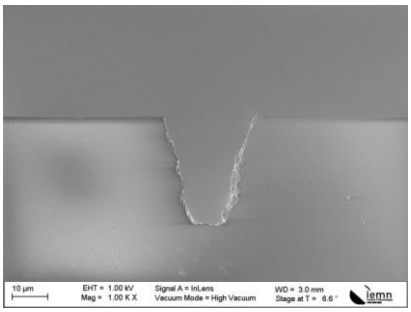
$P_{moyenne}$ = 2.6 W à 200 kHz
Gravure : 5 min HF 10 %

Taux de répétition (kHz)	Vitesse (mm/s) 2	5	10
8			
12			
16			
20			
24			

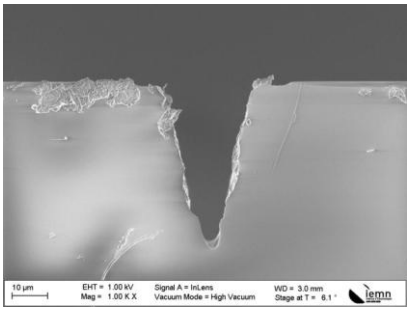
28

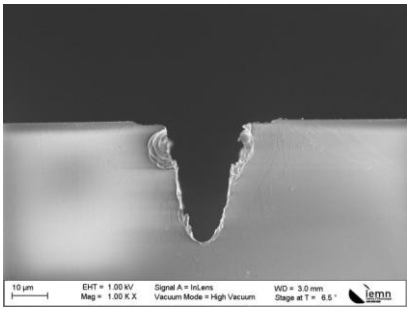

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 6.1 °
lemn

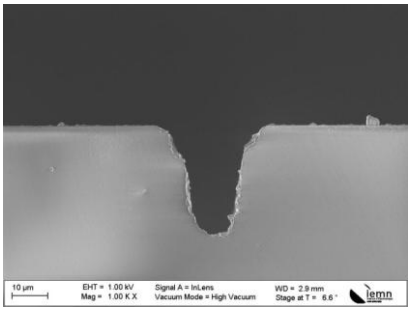

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.2 mm
Stage at T = 6.5 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = 6.6 °
lemn

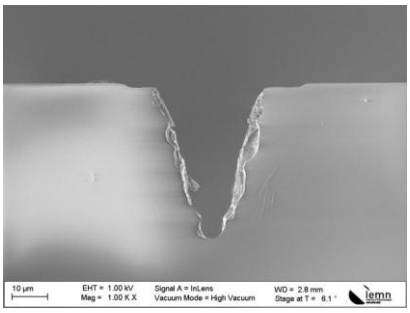
32

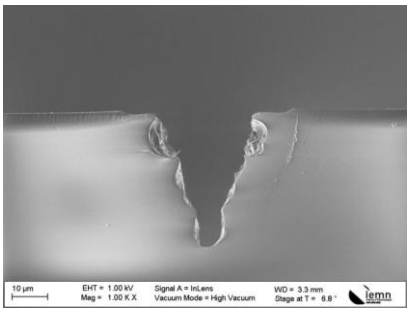

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = 6.1 °
lemn

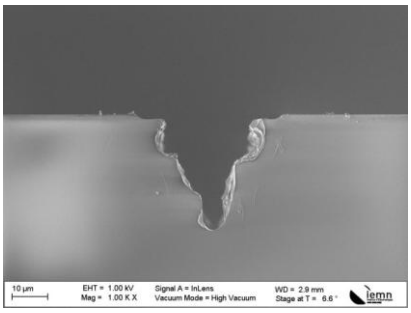

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = 6.5 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 6.6 °
lemn

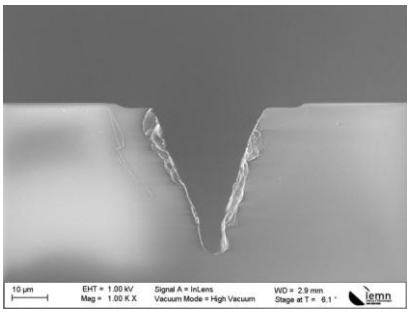
36

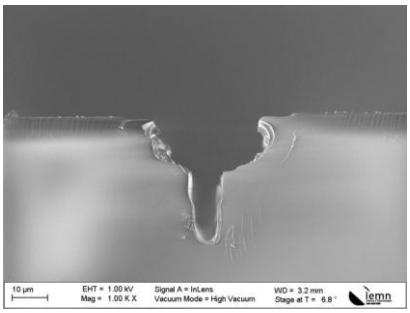

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 6.1 °
lemn

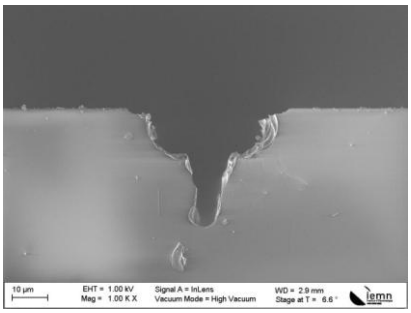

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.3 mm
Stage at T = 6.8 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 6.6 °
lemn

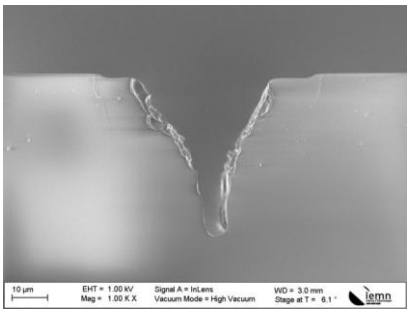
40

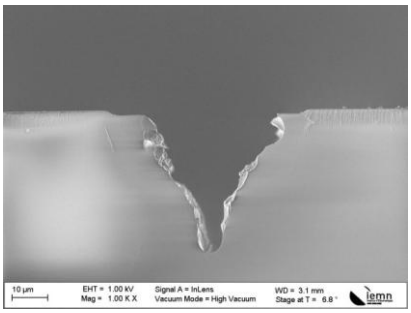

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 6.1 °
lemn

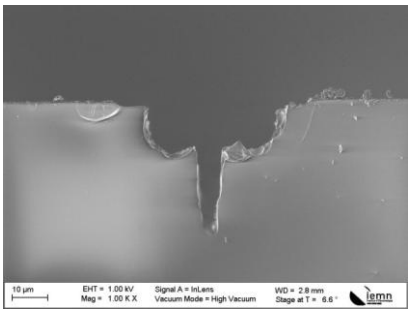

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.2 mm
Stage at T = 6.8 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 6.6 °
lemn

44

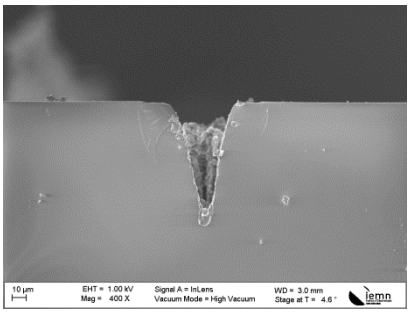
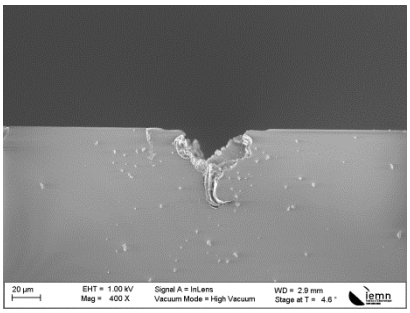
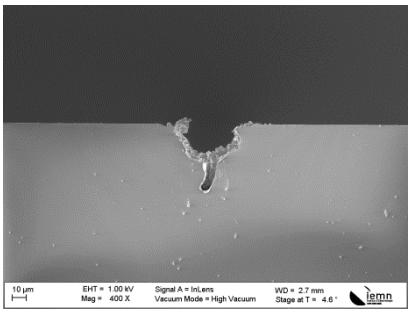
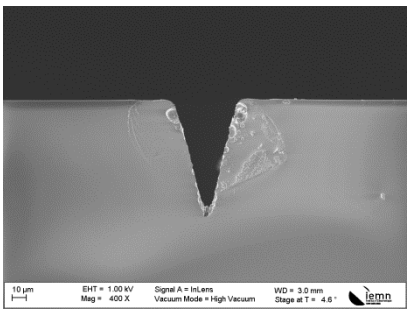
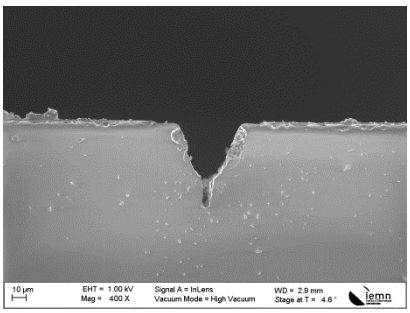
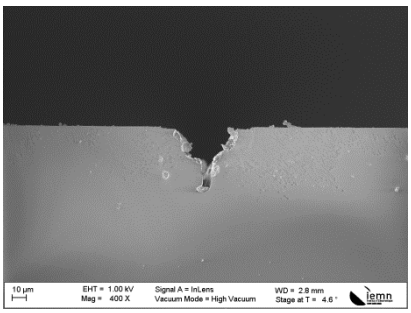
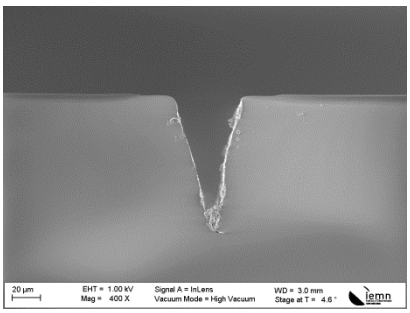
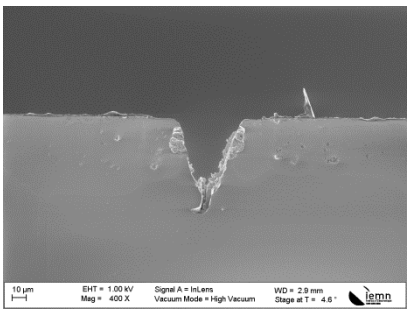
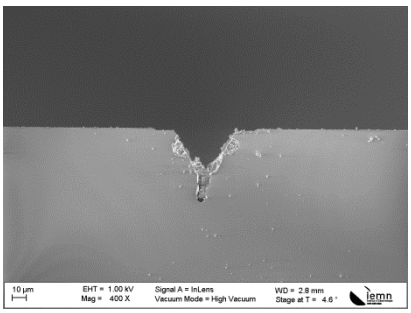
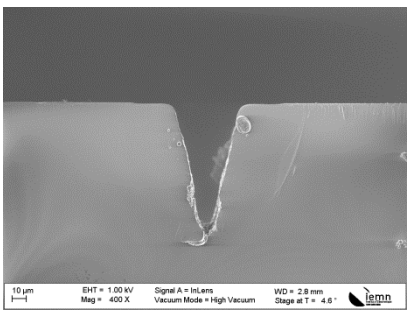
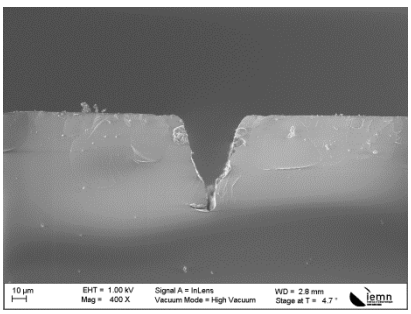
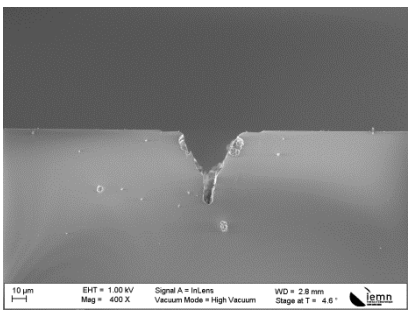
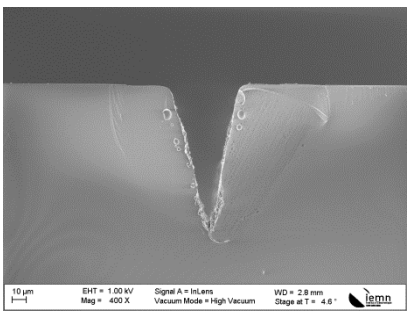
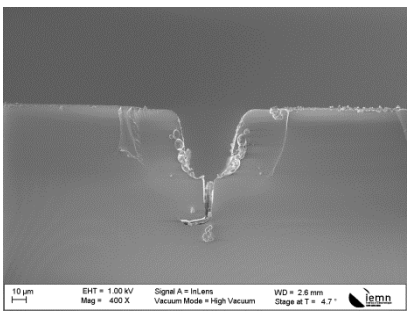
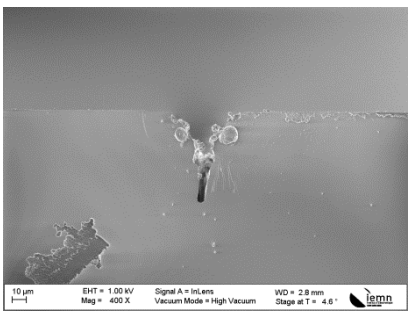

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = 6.1 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.1 mm
Stage at T = 6.8 °
lemn

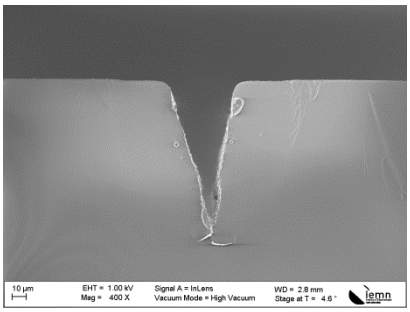

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 6.6 °
lemn

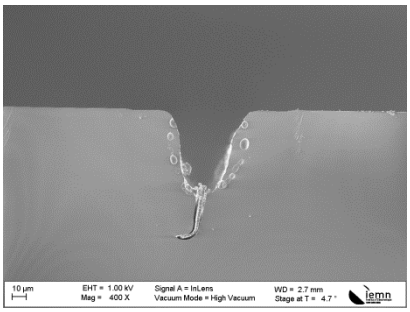
III.3. Ligne IR

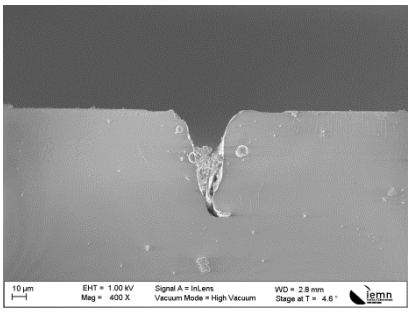
$P_{moyenne}$ = 20 W à 200 kHz
Gravure : 5 min HF 10 %

Taux de répétition (kHz)	Vitesse (mm/s) 2	5	10
18			
20			
22			
25			
28			

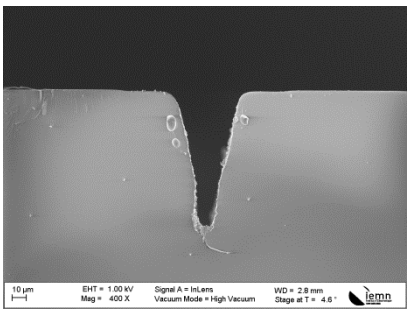
30

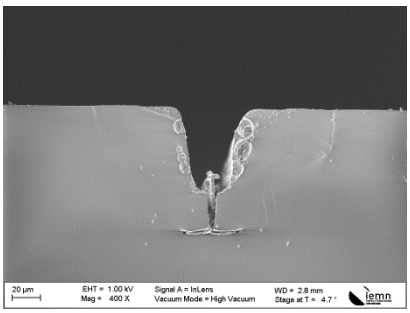

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

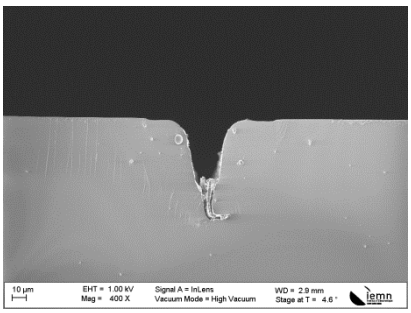

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.7 mm
Stage at T = 4.7 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

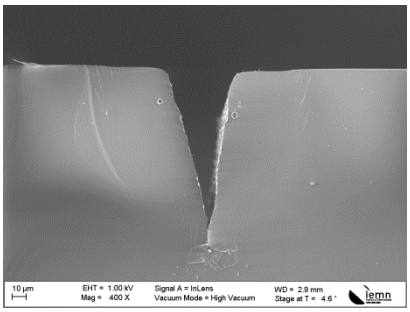
32

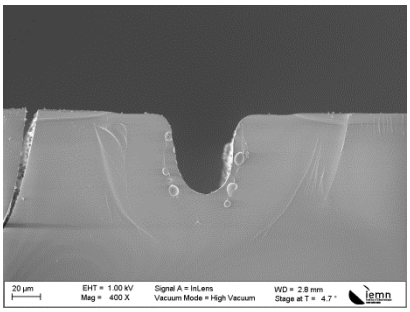

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

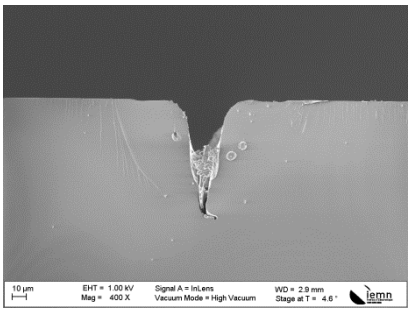

20 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 4.7 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

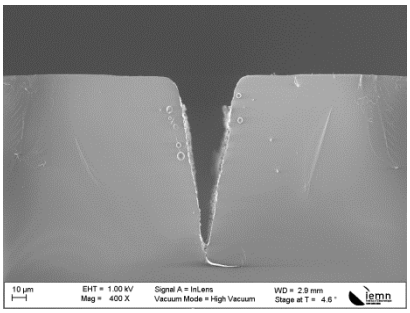
35

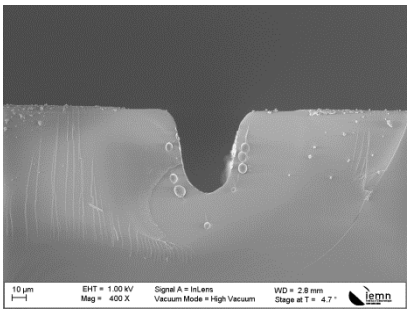

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

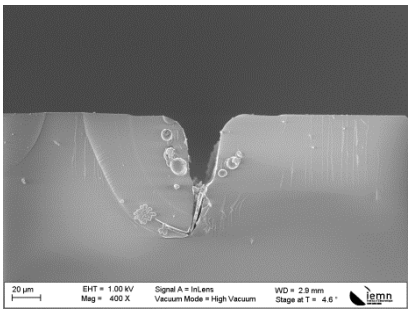

20 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 4.7 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

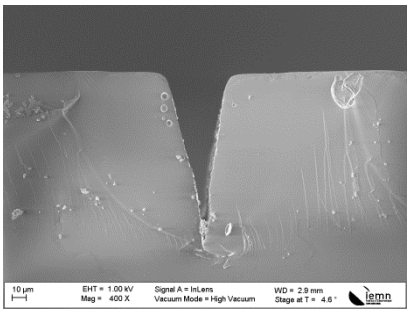
38

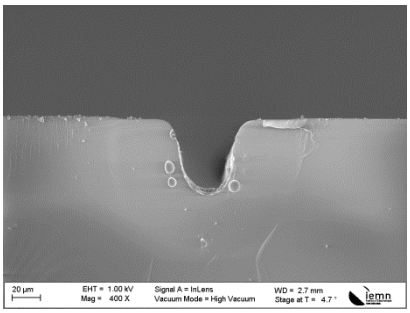

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

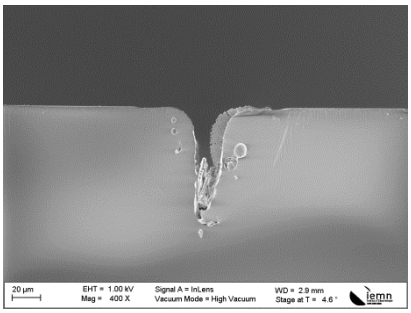

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.8 mm
Stage at T = 4.7 °
lemn


20 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

40

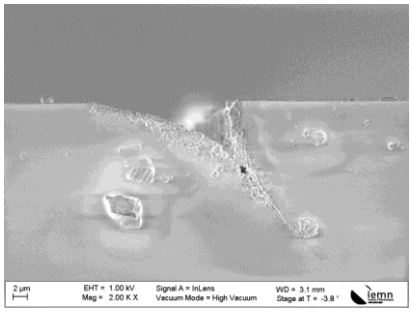
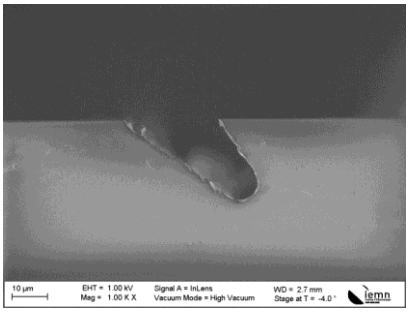
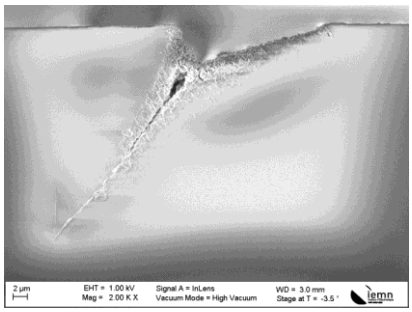
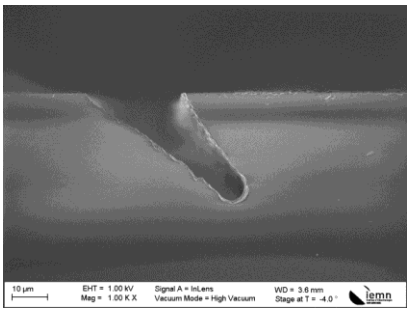
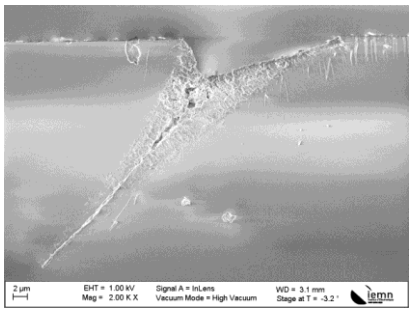
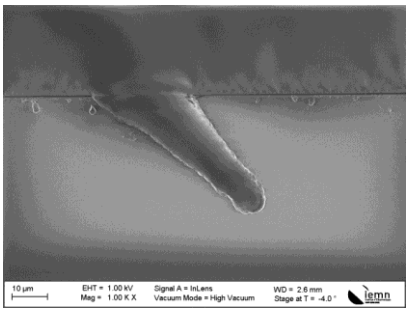
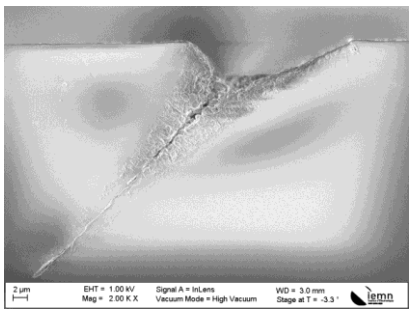
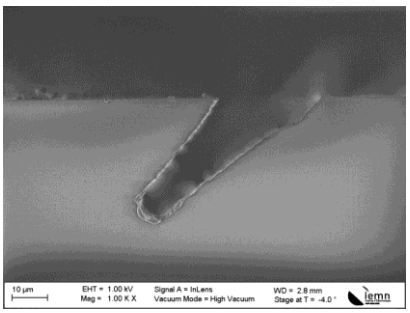

10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn


20 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.7 mm
Stage at T = 4.7 °
lemn

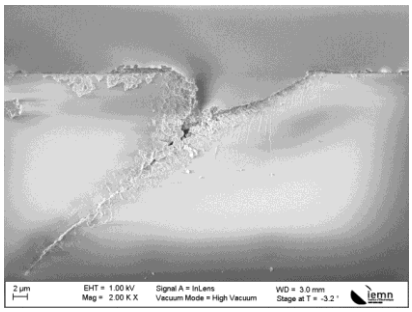

20 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 400 X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 2.9 mm
Stage at T = 4.6 °
lemn

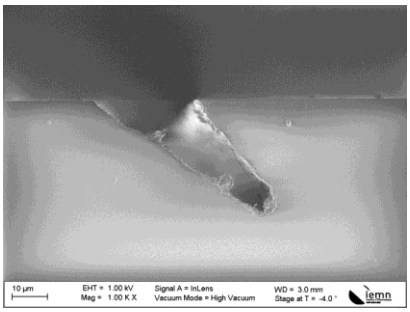
IV. Étude de l'influence du balayage en fréquence sur la formation de tranchée inclinée après irradiation laser et gravure au HF

Ligne UV
$P_{moyenne}$ = 2.4 W à 200 kHz
V = 2 mm/s
Gravure : 5 min HF 10 %
Support incliné à 45°

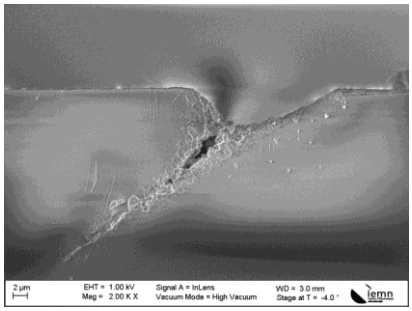
Taux de répétition (kHz)	Sans gravure HF	Gravure HF 10 % de 5 min
27.5		
30		
32.5		
35		

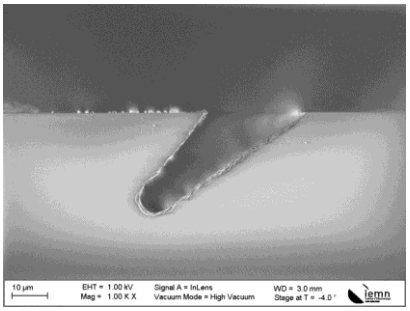
37.5


2 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 2.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -3.2 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -4.0 °
lemn

40


2 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 2.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -4.0 °
lemn


10 µm
EHT = 1.00 kV
Mag = 1.00 K X
Signal A = InLens
Vacuum Mode = High Vacuum
WD = 3.0 mm
Stage at T = -4.0 °
lemn

LISTE DES ACRONYMES

ABS Acrylonitrile Butadiène Styrène
AOC Active Optical Cable
AOM Acousto-Optic Modulator
AWG Array Waveguide Grating
BEOL Back End-Of-Line
BOSA Bidirectional Optical Sub Assembly
CGAR Compound Annual Growth Rate
CMP Chemical and Mechanical Planarization
CPA Chirped Pulse Amplification
CPU Central Processing Unit
CSAP Cut-Shot-And-Peel
CSP Chip Scale Package
CWDM Coarse Wavelength Division Multiplexing
CWDM4 Coarse Wavelength Division Multiplexer 4 Channels
CXP 12 eXtended-capability Pluggable
C4 Controlled Collapse Chip Connection
DAC Direct Attach Copper
DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing
EIC Electronic Integrated Circuit
FCPA Fiber Chirped Pulse Amplification
FEOL Front End-Of-Line
FHP Flame Hydrolysis Deposition
FLAE Femtosecond Laser Assisted Etching
FOWLP Fan Out Wafer Level Packaging
HAZ Heat Affected Zone
HBM High Bandwidth Memory
HPC High Performance Computing
HSFL High Spatial Frequency LIPS
IC Integrated Circuit
IoT Internet of Things
ITRS International Technology Roadmap for Semiconductor
IR Infra Rouge
Laser light amplification by stimulated emission for radiation
LAZ Laser Affected Zone
LC Lucent Connector
LIDAR Light Detection And Ranging
LIPS Laser Inducted Periodic Structures
LoC Lab on Chip
LoL Logic on Logic
LR4 Long Range 4 channels
LSFL Low Spatial Frequency LIPS
MCM Multi Chip Module
MCP Many Core Processor
MEB Microscopie Electronique à Balayage
MEMS Micro Electro-Mechanical SystemS

MFD Mode Field Diameter
MM More Moore
MMI Multi-Mode Interference
MoM Memory on Memory
MtM More-Than-Moore
MZI Mach-Zehnder Interferometer
NA Numerical Aperture
NEMS Nano Electro-Mechanical SystemS
OEIC OptoElectronic Integrated Circuit
PCB Print Circuit Board
PD PhotoDiode
PIC Photonic Integrated Circuit
PLC Planar Lightwave Circuit
PP Pulse Picker
PSF Point Spread Function
PSM4 Parallel Single-Mode transceiver
QPSK Quadruple Phase Shift Keying
QSFP Quad Small Form-factor Pluggable
SEM Scanning Electronic Microscopy
SESAM SEmiconductor Saturable Absorber Mirror
SFP Single Form-factor Pluggable
SiP System in Package
SoC System on Chip
SR Short Range
SR4 Short Range 4 channels
TCAC Taux de Croissance Annuel Composé
ToR Top of the Rack
TPP Two Photons Polymerization
TSV Through Silicon Via
T2T Tier to Tier
UV Ultra Violet
VCSEL Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VLSI Very Large Scale Integrated
WAFLD Water Assisted Femtosecond Laser Drilling
WDM Wavelength Division Multiplexing
WLP Wafer Level Packaging
ZAT Zone Affectée Thermiquement

TABLE DES FIGURES

FIG. 1.1 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN LASER [8], 1 - MILIEU EXCITABLE 2 - ENERGIE DE POMPAGE 3 - MIROIR TOTALEMENT REFLECHISSANT 4 - MIROIR SEMI-REFLECHISSANT 5 - FAISCEAU LASER 18

FIG. 1.2 : THEODORE MAIMAN ET LE PREMIER LASER [11] 19

FIG. 1.3 :REPARTITION DES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES LASERS EN 2017 [18] 20

FIG. 1.4 : SEGMENTS DU MARCHE DES LASERS EN 2017 [18] 20

FIG. 1.5 : ÉVOLUTION DES PACKAGINGS MICROELECTRONIQUES DE 1970 A 2020 [22] 21

FIG. 1.6 : PHOTOGRAPHIES MEB D'UNE PUCE DE VERRE DECOUPEE AVEC UN LASER FEMTOSECONDE [23] 22

FIG. 1.7 ARCHITECTURE TYPIQUE D'UN DATA CENTER [52] 24

FIG. 1.8 : AUGMENTATION DU TRAFIC DES DONNEES AU SEIN DES DATA CENTERS DE 2015 A 2020 [53] 24

FIG. 1.9 : ÉVOLUTION DU MARCHE DES DISPOSITIFS DE PHOTONIQUE SUR SILICIUM DE 2013 A 2024 [61] 26

FIG. 1.10 : GRAPHIQUE PRESENTANT LES RELATIONS ENTRE PRIX, RAPIDITE ET LONGUEURS DES DIFFERENTES LIAISONS UTILISEES DANS LES DATA CENTERS [69] 27

FIG. 1.11 : EFFET DE LA DISPERSION DANS UNE FIBRE OPTIQUE SUR UNE IMPULSION D'UN SIGNAL OPTIQUE [73] 30

FIG. 1.12 : ILLUSTRATION DE LA FORME DE L'IMPULSION D'ENTREE ET DE SORTIE POUR DIFFERENTS TYPES DE FIBRES OPTIQUES : (A) FIBRE MULTIMODE, (B) FIBRE MULTIMODE A GRADIENT D'INDICE ET (C) FIBRE MONOMODE [8] 32

FIG. 1.13 : TECHNIQUE DE FONCTIONNEMENT DU MULTIPLEXAGE ET DU DEMULTIPLEXAGE EN LONGUEUR D'ONDE [73] 33

FIG. 1.14 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES AWGS [74] 34

FIG. 1.15 : STRUCTURE PHYSIQUE D'UN TRANSCEIVER ELECTRO OPTIQUE (ONE CHIP) AVEC SA PIC SUR LE BOSA [76] 35

FIG. 1.16 : (A) PHOTOGRAPHIE DU PREMIER PROCESSEUR EN 1971, LE INTEL 4004, AVEC 2300 TRANSISTORS, (B) PHOTOGRAPHIE DU INTEL PENTIUM IV, DE 2001 AVEC 40 MILLIONS DE TRANSISTORS ET (C) PHOTOGRAPHIE DU

QUALCOMM SNAPDRAGON 835, DE 2016 AVEC 3 MILLIARDS DE TRANSISTORS 37

FIG. 1.17 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA LOI DE MOORE : (I) EVOLUTION DU NOMBRE DE TRANSISTOR PAR MICROPROCESSEUR (COURBE ORANGE) (II) EVOLUTION DES PERFORMANCES D'UN SINGLE-THREAD (COURBE BLEUE) (III) EVOLUTION DE LA FREQUENCE DES MICROPROCESSEURS (COURBE VERTE) (IV) EVOLUTION DE LA PUISSANCE DES TRANSISTORS (COURBE ROUGE) (V) EVOLUTION DE NOMBRE DE CŒUR DES MICRO-PROCESSEURS (COURBE NOIRE) 37

FIG. 1.18 : GRAPHIQUE MONTRANT L'EVOLUTION EN PARALLELE DU 'MORE MOORE' ET LE 'MORE-THAN-MOORE' [61] 39

FIG. 1.19 : ÉVOLUTION DES TENDANCES DU PACKAGING MICROELECTRONIQUE [93] 39

FIG. 1.20 : ÉVOLUTION DU MARCHE DES PACKAGINGS AVANCES DE 2017 A 2023 [94] 40

FIG. 1.21 : SYNTHESE DES DIFFERENTS TYPES D'ARCHITECTURES UTILISES EN PACKAGING MICROELECTRONIQUE : I) SOC BASE SUR L'UTILISATION D'UNE UNIQUE PUCE II) MCM BASE SUR L'INTERCONNEXION DE DIFFERENTS MODULES III) SIP BASE SUR L'EMPILEMENT DE PUCE OU DE PACKAGING POUR AMELIORER L'ENCOMBREMENT DES PACKAGE IV) SOP BASE SUR L'OPTIMISATION DES INTERCONNEXIONS ENTRE LES PACKAGING ET LES PUCES TOUT EN MINIATURISANT LES SYSTEMES [93] . 40

FIG. 1.22 : SCHEMATISATION DES LIENS ENTRE BEOL ET FEOL [95] 41

FIG. 1.23 : ILLUSTRATION D'UN SOC [98] 42

FIG. 1.24 : SCHEMA DE L'INTEGRATION 2.5D AVEC UNE VUE SUR LE COTE ET UNE VUE SUR LE DESSUS D'UN SIP COMPOSE DE DEUX PUCES SUR UN INTERPOSEUR SI [99] 43

FIG. 1.25 : SCHEMA DE L'INTEGRATION 3D AVEC UNE VUE SUR LE COTE ET UNE VUE SUR LE DESSUS D'UN SIP COMPOSE DE DEUX PUCES [99] 44

FIG. 1.26 : (A) VUE SUR LE DESSUS DU PACKAGING POP APPLE A7 ET (B) SCHEMA DE LA SECTION DE COUPE DE CETTE MISE EN BOITIER [109] 44

FIG. 1.27 : RESUME DE DIFFERENTES ARCHITECTURES UTILISABLES POUR L'INTEGRATION SIP AVEC LEUR DIFFERENTES CONTRAINTES ET LEURS OPPORTUNITES D'INTEGRATION ASSOCIEES [112] 46

FIG. 1.28 (A) SCHEMA DES DIFFERENTES ETAPES DE LA FABRICATION DES TSVS : (I) GRAVURE DE TROUS DANS UN SUBSTRAT DE SILICIUM, (II) DEPOT D'UNE COUCHE DIELECTRIQUE, (III) DEPOT DU LINER, (IV) DEPOT D'UNE

COUCHE D'ACCROCHE POUR LA METALLISATION, (V) METALLISATION ET (VI) PLANARISATION ET POLISSAGE ET (B) SCHEMA DU RESULTAT DE LA FABRICATION D'UN TSV[114] 47

FIG. 1.29 : PHOTOGRAPHIE DE DEUX 'WEDGE BONDING' SUR UN TRANSISTOR KSY34 [8] 48

FIG. 1.30 : SCHEMA MONTRANT DEUX TYPES DE JOINTS UTILISES EN PACKAGING MICROELECTRONIQUE, LE BGA JOINT ET LE FLIP CHIP JOINT [117] 48

FIG. 1.31 : EXEMPLE D'UN SIP 2.5D AVEC UN INTERPOSEUR SI [99] 49

FIG. 1.32 : (A) SCHEMA D'UN SIP COMPORTANT UN INTERPOSEUR VERRE [99] ET (B) SCHEMA D'UN INTERPOSEUR VERRE AVEC DES FONCTIONS PHOTONIQUES PASSIVES 50

FIG. 2.1 : ILLUSTRATION DES INTERACTIONS LASER/MATERIAUX TRANSPARENTS [1] 62

FIG. 2.2 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROCESSUS THERMIQUE PAR IRRADIATION LASER ; (A)ABSORPTION ET DIFFUSION DE LA CHALEUR DANS LE MATERIAU CIBLE ET (B) FUSION, VAPORISATION ET EXPULSION DE LA MATIERE 63

FIG. 2.3 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROCESSUS D'IRRADIATION LASER PHOTOCHIMIQUE ; (A) ABSORPTION ET RUPTURE DES LIAISONS DE VALENCE DU MATERIAU CIBLE ET (B) EMISSION ET DETENTE DU PLASMA 63

FIG. 2.4 : ÉCHELLE DE TEMPS DES EFFETS PHYSIQUES QUI APPARAISSENT LORS DE L'INTERACTION LASER MATERIAU TRANSPARENT EN REGIME FEMTOSECONDE [2] 64

FIG. 2.5 : CRATERES D'ABLATION OBTENUS DANS UNE PLAQUE D'ACIER DE 100 μM D'EPAISSEUR POUR, UNE IMPULSION A 780 NM (A) DE 200 FS, 120 μJ ET (B) DE 3.3 NS, 1MJ[4] 66

FIG. 2.6 : DIFFERENCES ENTRE LA QUALITE D'USINAGE POUR L'UTILISATION D'IMPULSIONS LONGUES ET D'IMPULSIONS ULTRA-COURTES SUR LA MICRO-STRUCTURATION PAR LASER ; (I) POUR DES IMPULSIONS LONGUES, LA ZAT EST ETENDUE ET IL Y A DES REDEPOTS A LA SURFACE DE LA CIBLE AINSI QUE LA FORMATION DE MICROFISSURES DANS LE VOLUME DU MATERIAU ; (II) POUR DES IMPULSIONS ULTRA-COURTES, LA ZAT EST MINIMISEE 66

FIG. 2.7 : PHOTOGRAPHIE MEB D'UN FILAMENT OBTENU DANS UN SUBSTRAT DE VERRE AF32 IRRADIE A UNE PUISSANCE MOYENNE DE 2W, UN TAUX DE REPETITION DE 36 KHZ ET UNE VITESSE DE 2MM/S EN UV ..67

FIG. 2.8 : LES DIFFERENTS MECANISMES DE PHOTO-IONISATION D'UN ATOME 68

FIG. 2.9 : REPRESENTATION DE L'IONISATION PAR AVALANCHE DANS UN CRISTAL 69

FIG. 2.10 : SCHEMA DE LA DIFFRACTION PAR UNE OUVERTURE CIRCULAIRE 71

FIG. 2.11 : (A) FIGURE DE DIFFRACTION D'UN FAISCEAU MONOCHROMATIQUE, OU TACHE D'AIRY ; (B) COUPE DE L'ECLAIREMENT EN FONCTION DE LA POSITION DANS UNE TACHE D'AIRY [24] 71

FIG. 2.12 : SCHEMA DE LA PROPAGATION D'UN FAISCEAU DANS UN GUIDE CIRCULAIRE.....72

FIG. 2.13 : SCHEMATISATION DE L'EFFET KERR, L'INDICE DE REFRACTION DU MILIEU EST MODIFIE EN FONCTION DE L'INTENSITE DU FAISCEAU ET AGIT COMME UNE LENTILLE EN FAISANT CONVERGER LE FAISCEAU SUR LUI-MEME. QUAND LA PUISSANCE DU FAISCEAU DEPASSE LA VALEUR CRITIQUE P_{CR}, LE FAISCEAU D'EFFONDRE [25] 74

FIG. 2.14 : SCHEMATISATION DE LA DIVERGENCE DUE A LA FORMATION D'UN PLASMA ELECTRONIQUE, L'IONISATION INITIALE DU MILIEU PREND PLACE DANS LE CENTRE DU FAISCEAU, OU L'INTENSITE EST LA PLUS IMPORTANTE, ENSUITE LA CREATION D'UN PLASMA ELECTRONIQUE DENSE VA INDUIRE UNE DIMINUTION DE L'INDICE DE REFRACTION ET CAUSER LA DEFOCALISATION DU FAISCEAU [25].....74

FIG. 2.15 : SCHEMATISATION DE LA FILAMENTATION ; DANS UN PREMIER TEMPS, LE FAISCEAU SE FOCALISE SUR LUI-MEME GRACE A L'EFFET KERR, PUIS IL Y A FORMATION D'UN PLASMA ELECTRONIQUE QUI INDUIT UNE DIFFRACTION DU FAISCEAU, LA COMPENSATION DE CES DEUX EFFETS CONDUIT A LA FORMATION DE FILAMENTS [26] 75

FIG. 2.16 : TECHNIQUE DE FABRICATION DE MICRO CANAUX PAR FLAE, IRRADIATION LASER DE LA ZONE A STRUCTURER, PUIS GRAVURE CHIMIQUE DE L'ENSEMBLE, LA ZONE IRRADIEE EST GRAVEE PREFERENTIELLEMENT [2] 76

FIG. 2.17 : SCHEMA DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE WAFLD POUR LA FABRICATION DE MICRO STRUCTURES DANS DU VERRE [49].....77

FIG. 2.18 : (A) ILLUSTRATION DE MICRO AQUARIUM FABRIQUE PAR FLAE POUR L'OBSERVATION D'EUGLENA GRACILIS ET (B) OBSERVATION DU MICROORGANISME EN MOUVEMENT DANS LE SYSTEME DE MICRO FLUIDIQUE 79

FIG. 2.19 : SCHEMA D'UN SYSTEME DE FILTRAGE DE CELLULES [49] 79

FIG. 2.20 : (A) SCHEMA ET (B) PHOTOGRAPHIE D'UN SYSTEME MICRO FLUIDIQUE POUR LE MELANGE DE LIQUIDE, OBTENU PAR WAFLD 80

FIG. 2.21 : ILLUSTRATION D'UN COMPOSANT D'OPTO MICRO FLUIDIQUE, COMPORTANT UN INTERFEROMETRE MACH-ZEHNDER OBTENU PAR IRRADIATION LASER, ET UN MICRO CANAL OBTENU PAR FLAE [65] 80

FIG. 2.22 : (A) SCHEMA DU FONCTIONNEMENT DES MICRO-VALVES DANS UN MICROREACTEUR ; (B) PHOTOGRAPHIE DU MICROREACTEUR AVEC LES DEUX MICRO-VALVES FABRIQUEES PAR FLAE [62] 81

FIG. 2.23 : SCHEMA D'UN DIVISEUR DE PUISSANCE 1-8 COMPOSE DE 7 JONCTIONS 'Y' [80][81] 81

FIG. 2.24 : SCHEMA D'UN DIVISEUR DE PUISSANCE 1-3 EN 3D [82] 82

FIG. 2.25 : (A) SCHEMA D'UN COUPLEUR DIRECTIONNEL EN 3D ; PROFILE DE MODE OBTENUE A (B) 633 NM ET (C) EN UTILISANT UNE SOURCE SUPERCONTINUM (450-700NM) [84] 82

FIG. 2.26 : SCHEMA ET PHOTOGRAPHIE D'UN MZI [90] 83

FIG. 2.27 : (A) SCHEMA D'UN MMI, (B) CARACTERISATIONS OPTIQUES EN CHAMPS PROCHE POUR DIFFERENTES LONGUEURS D'ONDE [94] 83

FIG. 2.28 :ARCHITECTURE DU LASER BASEE SUR LA FCPA [95] 84

FIG. 2.29 : PHOTO DE LA BOITE D'ACCORDEMENT DES HARMONIQUES DU LASER 85

FIG. 2.30 : CHEMINS DES FAISCEAUX DE LONGUEURS D'ONDE DISPONIBLES APRES LA BOITE DE GENERATION D'HARMONIQUES 86

FIG. 2.31 : LA LENTILLE F-THETA TELECENTRIQUE PERMET DE FOCALISER LE FAISCEAU DE FAÇON NORMALE SUR LE PLAN FOCAL [96] 86

FIG. 2.32 : ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE MOYENNE ET DE L'ENERGIE PAR PULSE DU LASER EN FONCTION DU TAUX DE REPETITION 90

FIG. 2.33 : TRANSMITTANCE SPECTRALE DE L'AF32 DE 250 A 2000 NM 91

FIG. 2.34 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PROFILOMETRE OPTIQUE 92

FIG. 2.35 : PHOTOGRAPHIE DU BANC DE MESURE DE MODES ET DE PERTES 94

FIG. 3.1 : EXEMPLE DE NANOSTRUCTURE ALEATOIRE DUE A UNE IRRADIATION LASER FEMTOSECONDE SUR UNE SURFACE D'ACIER 106

FIG. 3.2 : ILLUSTRATION DE L'INFLUENCE DE LA POLARISATION DU FAISCEAU LASER FEMTOSECONDE SUR L'ORIENTATION DES LSFL [4][19] 106

FIG. 3.3 : (A) PHOTOGRAPHIE MEB DE SPIKES OBTENUE SUR UN ECHANTILLON DE TITANE ET (B) OBSERVATION DE RIPPLES SUR LES SPIKES [30] 107

FIG. 3.4 : (A) (B) (C) CLICHES MEB DE MICROPORES OBTENUS SUR DU TITANE [31] 107

FIG. 3.5 : DEUX REGIMES D'ABLATION MIS EN EVIDENCE AVEC LA DEPENDANCE DU TAUX D'ABLATION EN FONCTION DE LA FLUENCE LASER [32] 108

FIG. 3.6 : MICROSTRUCTURES OBTENUES SUR DE L'ACIER (A) (B) (C) (D) EN REGIME DE BASSE FLUENCE (P_M = 1.32 W) ET (E) (F) (G) (H) EN REGIME DE HAUTE FLUENCE (P_M = 13.2 W) 110

FIG. 3.7 : ÉVOLUTION DU DIAMETRE DU CRATERE CREE PAR ABLATION EN FONCTION DU NOMBRE D'IMPULSIONS LASERS INCIDENTES, MISE EN EVIDENCE DU PHENOMENE D'INCUBATION [34] 111

FIG. 3.8 : INFLUENCE DE LA CADENCE [4] 112

FIG. 3.9 : (A) ILLUSTRATION DU TAUX DE RECOUVREMENT AVEC R_L = A/B ET (B) RECOUVREMENT LINEAIRE EN FONCTION DU TAUX DE REPETITION DU LASER POUR DIFFERENTES VITESSES DE BALAYAGE 113

FIG. 3.10 : PHOTOGRAPHIE MEB DE LA COUPE D'UN MATERIAU MULTICOUCHE (ROGERS ; RT DUROID) POUR LA FABRICATION D'INTERCONNEXIONS ELECTRIQUES 114

FIG. 3.11 : SCHEMA PRESENTANT LE PROCEDE D'USINAGE DE SURFACE POUR LA STRUCTURATION D'INTERCONNEXIONS 114

FIG. 3.12 : PHOTOGRAPHIES MEB DE LA STRUCTURATION D'INTERCONNEXIONS OBTENUES PAR USINAGE DE SURFACE 115

FIG. 3.13 : (A) PHOTOGRAPHIE AU MICROSCOPE OPTIQUE ET (B) PHOTOGRAPHIE MEB D'USINAGE DE SURFACE 116

FIG. 3.14 : SCHEMA PRESENTANT LA TECHNIQUE CSAP POUR LA FORMATION D'INTERCONNEXIONS 117

FIG. 3.15 : PHOTOGRAPHIES MEB DE LA STRUCTURATION D'INTERCONNEXIONS OBTENUES PAR LA TECHNIQUE CSAP 117

FIG. 3.16 : CARACTERISATION A L'INTERFEROMETRE OPTIQUE D'UNE PUCE FABRIQUEE AVEC LA TECHNIQUE IEMN 118

FIG. 3.17 : (A) ET (B) PHOTOGRAPHIE DE PLAQUES AVEC PLUSIEURS PUCES FABRIQUEES AVEC LA TECHNIQUE CSAP 118

FIG. 4.1 : ÉTAPES DE FABRICATION DE PLC PAR HYDROLYSE A LA FLAMME [11] 125

FIG. 4.2 : SCHEMA MONTRANT LES PLANS *X-Y* ET *X-Z* UTILISES POUR LA DESCRIPTION DES MODELISATIONS AVEC PSF LAB 127

FIG. 4.3 : MODELISATION DE LA DISTRIBUTION D'ENERGIE AUTOUR DU POINT FOCAL AVEC (A) ET (B) POUR NA= 0.5 RESPECTIVEMENT DANS LES PLANS *X-Y* ET *X-Z* ET (C) ET (D) POUR NA=0.05 RESPECTIVEMENT DANS LES PLANS *X-Y* ET *X-Z*, OBTENUE AVEC LE LOGICIEL PSF LAB [12] 127

FIG. 4.4 : (A) STRUCTURE DES CYCLES A 5-6 CHAINONS DU QUARTZ ET (B) STRUCTURE DES CYCLES A 3-4 CHAINONS [20] 129

FIG. 4.5 : (A) MICROSCOPIES DE LIGNES INSCRITES DANS DE LA SILICE FONDUE POUR DIFFERENTES ENERGIES DE FAISCEAU ET (B) SPECTRES RAMANS CORRESPONDANTS [21]..... 129

FIG. 4.6 : BANDES RAMAN CORRESPONDANT AUX DIFFERENTES STRUCTURES DU VERRE [24] 130

FIG. 4.7 : SPECTRES RAMAN OBTENUS SUR DE L'AF32 (A) NON IRRADIE, IRRADIE AVEC UNE PUISSANCE MOYENNE (B) DE 0.35W ET (C) DE 1.18 W...131

FIG. 4.8 : SCHEMA DE LA PHOTO INSCRIPTION EN (A) CONDITION LONGITUDINALE ET (B) EN CONDITION TRANSVERSE..... 133

FIG. 4.9 : SCHEMA DE LA FOCALISATION DU FAISCEAU DU LASER DANS LE VOLUME DU VERRE 134

FIG. 4.10 : SCHEMA DU BANC DE MESURE DES PROFILES DE MODE..... 134

FIG. 4.11 : PHOTOS DE LA MISE EN PLACE DE LA FIBRE DEVANT L'OBJECTIF DE LA CAMERA LATERALE..... 135

FIG. 4.12 : PHOTOS DE LA MISE EN PLACE DE L'ECHANTILLON DEVANT L'OBJECTIF DE LA CAMERA LATERALE..... 135

FIG. 4.13 : PHOTOS DE LA MISE EN PLACE DE LA FIBRE, DE L'ECHANTILLON ET DE L'OBJECTIF DE LA CAMERA 136

FIG. 4.14 : SCHEMA DU BANC DE MESURE DES PERTES..... 136

FIG. 4.15 : PROFILS DE MODES CARACTERISANT L'INFLUENCE DE LA PUISSANCE DU FAISCEAU SUR L'INSCRIPTION DE GUIDES OPTIQUES (A) 0.382 W, (B) 0.564 W, (C) 0.764 W ET (D) 0.955 W ; INDIQUE LA DIRECTION DE PROPAGATION DU FAISCEAU DURANT LA PHOTO-INSCRIPTION 138

FIG. 4.16 : PROFILS DE MODES CARACTERISANT L'INFLUENCE DE LA PUISSANCE DU FAISCEAU SUR L'INSCRIPTION DE GUIDES OPTIQUES (A) 1.08 W, (B) 1.39 W, (C) 1.46 W ET (D) 1.54 W ; INDIQUE LA DIRECTION DE PROPAGATION DU FAISCEAU DURANT LA PHOTO-INSCRIPTION 139

FIG. 4.17 : PROFILS DE MODES POUR CARACTERISER L'INFLUENCE DE LA VITESSE DE BALAYAGE SUR LE MECANISME DE PHOTO-INSCRIPTION DE GUIDES OPTIQUE (A) 1 MM/S, (B) 2 MM/S ET (C) 5 MM/S ; INDIQUE LA DIRECTION DE PROPAGATION DU FAISCEAU DURANT LA PHOTO-INSCRIPTION 141

FIG. 4.18 : PROFILS DE MODE ET PHOTOGRAPHIE AU MICROSCOPE OPTIQUE POUR CARACTERISER L'INFLUENCE DU NOMBRE DE PASSES SUR L'INSCRIPTION DE GUIDES OPTIQUES (A) 1 PASSE, (B) 5 PASSES, (C) 10 PASSES, (D) 15 PASSES ET (E) 20 PASSES ; INDIQUE LA DIRECTION DE PROPAGATION DU FAISCEAU DURANT LA PHOTO-INSCRIPTION 142

FIG. 4.19 : PROFILS DE MODE, OBSERVES AVEC UN OBJECTIF ×20, DE GUIDES ENTERRES, OBTENUS PAR INSCRIPTION LASER DIRECTE AVEC P_{AV} = 462 MW, F = 200 KHZ, V = 5 MM/S, (A) NA = 0.5, (B) NA = 0.4 ET (C) NA = 0.05143

FIG. 4.20 : INFLUENCE DE L'INDICE DE REFRACTION DU MILIEU SUR LA FOCALISATION DU FAISCEAU LASER. 144

FIG. 4.21 : EVOLUTION DE L'ENTERREMENT DE GUIDES AVEC NA = 0.5 (P = 30 %, F = 200 KHZ ET V = 5MM/S)..... 144

FIG. 4.22 : EVOLUTION DE L'ENTERREMENT DE GUIDES AVEC NA = 0.4 (P = 30 %, F = 200 KHZ ET V = 5MM/S)..... 144

FIG. 4.23 : PROFONDEUR EFFECTIVE D'ENTERRAGE DES GUIDES OPTIQUES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR D'ENTERRAGE CIBLE POUR (A) NA = 0.4 ET (B) NA = 0.5..... 145

FIG. 4.24 : SCHEMA DE LA METHODOLOGIE DE MESURE DES PERTES DES GUIDES..... 146

FIG. 4.25 : TRANCHEES OBTENUES EN UV A 200 KHZ, 20 MM/S ET (A) 40% ; (B) 50% ; (C) 55% ; (D) 80% ; (E) 90% ET (F) 100% DE PUISSANCE 148

FIG. 4.26 : TRANCHEES OBTENUES EN UV A 70 KHZ, A 840 MW DE PUISSANCE MOYENNE ET (A) 10 MM/S ; (B) 20 MM/S ; (C) 50 MM/S..... 149

FIG. 4.27 : TRANCHEES OBTENUES EN UV A 10 MM/S, A 100 % DE PUISSANCE ET (A) 20 KHZ ; (B) 35 KHZ ; (C) 40 KHZ ; (D) 70 KHZ ; (E) 100 KHZ ; (F) 200 KHZ 150

FIG. 4.28 : TRANCHEES OBTENUES A 2 MM/S, A 100 % DE PUISSANCE ET 28 KHZ (A) UV; (B) GR; (C) IR. ATTENTION, POUR L'UV ET LE VERT, LE ZOOM DES PHOTOS EST DE ×1000 ALORS QUE POUR LE ROUGE, LE ZOOM EST DE ×400. 152

FIG. 4.29 : TRANCHEES OBTENUES EN UV A 10 MM/S, (A) 35 KHZ, 420 MW ; (B) 35 KHZ, 420 MW GRAVE AU HF (10 %) 5 MINUTES ; (C) 40 KHZ, 480 MW ; (D) 40 KHZ, 480 MW, GRAVE AU HF (10 %) 5 MINUTES 153

FIG. 4.30 : TRANCHEES OBTENUES EN UV A 5 MM/S, A 360 MW, 30 KHZ (A) GRAVEES 170 S AU HF; (B) GRAVEES 300 S AU HF; (C) GRAVEES 450 S AU HF; (D) GRAVEES 600 S AU HF 154

FIG. 4.31 : SCHEMA DU FONCTIONNEMENT D'UN MIROIR PHOTONIQUE DANS UN INTERPOSEUR VERRE 155

FIG. 4.32 : MODELISATION 3D DU SUPPORT INCLINE A 45° 155

FIG. 4.33 : PHOTO MEB DE LA SECTION TRANSVERSE D'UNE TRANCHEE INCLINEE OBTENUE PAR IRRADIATION LASER AVEC UN TAUX DE REPETITION DE 30 KHZ, UNE PUISSANCE MOYENNE DE 2W ET UNE VITESSE DE BALAYAGE DE 2 MM/S 156

FIG. 4.34 : PHOTO MEB DE LA SECTION TRANSVERSE D'UN MIROIR OBTENU PAR IRRADIATION LASER AVEC UN TAUX DE REPETITION DE 30 KHZ, UNE PUISSANCE MOYENNE DE 2W ET UNE VITESSE DE BALAYAGE DE 2 MM/S ET UNE GRAVURE CHIMIQUE DANS DU HF 10 % PENDANT 5 MINUTES 156

FIG. 4.35 : PRINCIPE DE L'ECHANGE D'IONS POUR LA FABRICATION DE GUIDES OPTIQUES (A) ÉCHANGE D'ION A L'INTERFACE SELS FONDUS ET VERRE (B) DESCRIPTION DE L'EQUIPEMENT D'ENTERRAGE [25] 157

FIG. 4.36 : VUE DE DESSUS D'UN MIROIR PHOTONIQUE PENDANT LES CARACTERISATIONS OPTIQUES DANS LE SPECTRE VISIBLE ; (A) CARACTERISATION DE L'UNIFORMITE DU MIROIR ET (B) REFLEXION DE LA LUMIERE PAR LE MIROIR 158

FIG. 4.37 : PHOTO MEB DE LA SECTION TRANSVERSE D'UN MIROIR PHOTONIQUE RECOUVERT D'UNE COUCHE D'ALUMINIUM DE 150 NM 158

FIG. 4.38 : REFLECTIVITE DE L'OR, DE L'ARGENT ET DE L'ALUMINIUM EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE [26] 159

FIG. 5.1 : GUIDES OPTIQUES INSCRITS DANS DES VERRES DE 100 A 25 µM D'EPAISSEUR [7] 169

FIG. 5.2 : GUIDES OBTENUS DANS DES VERRES FLEXIBLES DE (A) 100 µM D'EPAISSEUR AVEC UN RAYON DE COURBURE DE 13.5 CM, (B) 50 µM D'EPAISSEUR AVEC UN RAYON DE COURBURE DE 2.1 CM, (C) 35 µM D'EPAISSEUR AVEC UN RAYON DE COURBURE DE 1 CM ET (D) LE MEME GUIDE DANS DU VERRE DE 35 µM APRES CARACTERISATION[7] 170

FIG. 5.3 : SCHEMA D'UN COUPLEUR DIRECTIONNEL A TROIS GUIDES OPTIQUES [8] 171

FIG. 5.4 : EXEMPLE DE CRYPTAGE DE DONNEES A CINQ ECHELLES MESURANT 1.5 X 2 MM [11] 171

FIG. 5.5 : PUCE D'OPTO FLUIDIQUE POUR LA CARACTERISATION DE LIQUIDE BIOCHIMIQUE [12] 172

FIG. 5.6 : SCHEMA D'UN INTERPOSEUR VERRE AVEC DES FONCTIONS PHOTONIQUES PASSIVES 172

FIG. 5.7 : ILLUSTRATION DE LA TECHNIQUE DE FABRICATION DES GUIDES AVEC L'ADAPTATION DU MFD DES GUIDES [13]..... 173

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Single Mode Polymer Optical Waveguides and Out-of plane Coupling Structure on a Glass Substrate

JM Boucaud, Q Hivin, C Durand, F Gianesello, D Bucci, JF Robillard, F Vaurette, JE Broquin, E Dubois

2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), 1-5

Femtosecond Pulsed Laser for Advanced Photonic Packaging

Q Hivin, JM Boucaud, F Braud, C Durand, F Gianesello, Davide Bucci, JF Robillard, JE Broquin, C Gaquière, E Dubois

2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), 1-5

Cost Effective Laser Structuration of Optical Waveguides on Thin Glass Interposer

Jean-Marc Boucaud, Folly-Eli Ayi-Yovo, Quentin Hivin, Matthieu Berthomé, Cédric Durand, Frédéric Gianesello, Davide Bucci, Guillaume Ducournau, Jean-François Robillard, Jean-Emmanuel Broquin, Emmanuel Dubois

Journal of Lightwave Technology 35 (20), 4445-4450, 2017

Glass micromachining using femtosecond pulsed laser for microelectronics and photonics applications

Q. Hivin, M. Berthomé, J.F. Robillard, C. Gaquière, E. Dubois

E-MRS 2016, oral, 2016

Résumé

Micro-structuration laser pour le packaging électro-optique avancé

Le développement de l'internet des objets et des services de vidéo en temps réel (streaming) a conduit à une augmentation continue du trafic des données au sein des data-centers. Celui-ci devrait être multiplié par trois entre 2012 et 2020 pour atteindre 15.3 zettaoctets/an. Cette évolution appelle parallèlement à un accroissement des performances des composants télécom en transmission optique monomode dont le standard s'établit aujourd'hui à 100-200 Gbits/s pour évoluer vers 400-800 Gbits/s dans un futur proche. Bien que les cœurs de technologies semiconducteurs soient aujourd'hui disponibles pour répondre à cette demande, les coûts élevés d'assemblage des puces électroniques (EIC) et photoniques (PIC) ainsi que l'alignement avec les fibres optiques monomodes limitent la pénétration de cette solution technologique sur le marché. Afin de relever ce défi, une structure originale d'interposeur en verre a été proposée dans le cadre du laboratoire commun IEMN-STMicroelectronics. Ce substrat d'assemblage en verre présente des avantages distinctifs majeurs tels que i) l'alignement passif de la fibre externe, ii) l'alignement optique passif du PIC sur l'interposeur, iii) le transfert des fonctions optiques passives du PIC sur l'interposeur de verre et iv) une approche conservative réutilisant les coupleurs à réseau du PIC.

Le contexte du packaging électro-optique étant posé, ce travail de thèse s'est concentré sur la fonctionnalisation de substrats de verre par photo-inscription ou micro-usinage laser en régime femtoseconde afin de structurer les guides d'onde optique, les miroirs de redirection du faisceau guidé et la couche de redistribution électrique en cuivre. En premier lieu, des guides optiques monomodes à 1310 nm de bonne qualité ont été obtenus et caractérisés, permettant une mise en évidence franche des effets d'absorption non linéaire, d'auto-focalisation et de filamentation. Une étude expérimentale complète a permis de déterminer les paramètres d'exposition laser et de gravure chimique pour la fabrication de miroirs photoniques. Enfin, une méthode originale de structuration des interconnexions basée sur le fractionnement et le décollement de la couche de cuivre par effet thermo-mécanique a été développée.

Mots clés : Laser à impulsions femtoseconde, interaction laser-matière, micro-usinage laser, métaux, diélectriques, guides d'ondes, miroirs photoniques, interposeur verre, packaging.

Abstract

Advanced electro-optical packaging using laser micro-structuring

The development of the Internet of Things and video streaming services is leadIng to a continuous increase in data traffic within data-centers that is expected to increase threefold between 2012 and 2020 reaching 15.3 zettabytes/year. This evolution calls for an increase in performance of telecom components in optical single mode transmission, the standard of which is now 100-200 Gbits/s and will evolve towards 400-800 Gbits/s in the near future. Although the semiconductor technology cores are now available to meet this demand, the high assembly costs of electronic (EIC) and photonic (PIC) integrated circuits as well as the alignment with single-mode optical fibers limit the market penetration of this technological solution. In order to meet the challenge, an original glass interposer structure has been proposed in the framework of the IEMN-STMicroelectronics common laboratory. This glass assembly substrate holds major distinctive advantages such as i) passive alignment of the external fiber, ii) passive optical alignment of the PIC on the interposer, iii) transfer of the passive optical functions of the PIC onto the glass interposer and iv) a conservative approach reusing the PIC grating couplers.

With this context associated to electro-optical packaging in mind, this thesis has focused on the functionalization of glass substrates by photo-inscription or laser micromachining in femtosecond regime in order to structure optical waveguides, redirection mirrors and copper electrical redistribution layer. First, good quality 1310 nm single-mode optical guides were obtained and characterized, allowing a clear demonstration of the effects of non-linear absorption, self-focusing and filamentation. A complete experimental study determined the laser exposure and chemical etching parameters for the manufacture of photonic mirrors. Finally, an original method for structuring interconnections based on the fractionation and detachment of the copper layer by thermo-mechanical effect has been developed.

Keywords: Femtosecond pulse laser, laser-material interaction, laser micromachining, metals, dielectrics, waveguides, photonic mirrors, glass interposer, packaging.