République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Département du Génie Mécanique

Mémoire de Master

SPECIALITE GENIE MECANIQUE

Option : Energies renouvelables en mécanique

Thème :

Modélisation et simulation du chauffage du silicium par laser

Présenté par : **Mlle. CHOUTRI Imen**

Soutenu publiquement le : 21 Juin 2018

Devant le jury composé de :

Mme. AMARI Malika	MCB - Université Yahia Fares de Médéa	Président
Mme. KRIBY Saliha	Université Yahia Fares de Médéa	Examinateur
Mme. CHRAIR Imen	MCB - Université Yahia Fares de Médéa	Examinateur
Mme. KACIMI Habiba	MAA - Université Yahia Fares de Médéa	Encadreur
Mr. IBRIR Abdellah	Université Yahia Fares de Médéa	Co-Encadreur

Année Universitaire : 2017/2018

Résumé

Une tranche de silicium est chauffé par un laser qui se déplace dans le sens radial et dans le temps. En outre, la plaquette est mise en rotation sur elle-même dans sa phase. Le flux provenant du laser de chaleur incidente est modélisée comme une source de chaleur spatialement distribuée sur la surface. La réponse thermique en régime transitoire de la plaquette est représentée. Le pic, la moyenne, le minimum et les variations de la température pendant le procédé de chauffage sont calculés, de même que les variations de la température à travers la plaquette. Les résultats de calcul concordent bien avec ceux obtenus à partir des données expérimentales de cette étude.

Mots clés : Substrat du silicium**,** chauffage laser, interaction laser-matière, modélisation par Comsol Multiphysique.

Abstract

A silicon wafer is heated up by a laser that moves radially in and out over time while the wafer itself rotates on its stage. Modeling the incident heat flux from the laser as a spatially distributed heat source on the surface, the transient thermal response of the wafer is obtained. The peak, average, and minimum temperature variation during the heating process are computed, as well as the temperature variations across the wafer. The calculating results accord well with those obtained from the experimental data in this study.

Keywords: Silicon substrate, laser heating, interaction laser-matter, modeling by Comsol Multiphysique.

ملخص

يتم تسخين رقاقة من السيليكون بواسطة ليزر يتحرك على مستوى قطر الرقاقة. بالإضافة إلى ذلك، يتم تدوير الرقاقة في نفس المرحلة. تم تصميم التدفق من الليزر الحراري للحادث كمصدر حرارة موزعة مكانياً على السطح. تظهر الاستجابة الحرارية العابرة في الرقاقة. يتم حساب الذروة والمتوسط والحد الأدنى لدرجة الحرارة خلال عملية التسخين، وكذلك التغيرات في درجة الحرارة عبر الرقاقة. تتفق نتائج الحسابات المتحصل عليها مع النتائج التي تم الحصول عليها من البيانات التجريبية لهذه الدراسة.

كلمات البحث : رقاقة السيليكون، تسخين بالليزر ، تفاعل المادة بالليزر ، النمذجة بواسطة Comsol Multiphysique.

Remerciements

Le travail de ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'études réalisé à l'université YAHIA FARES de Médéa.

Merci bon DIEU pour la force, le courage, la santé et surtout la volonté que j'ai eu pour achever ce travail.

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

*Je tiens à remercier sincèrement Madame **KACIMI Habiba** qui, en tant qu'encadreuse, s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulue me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour, et qui a eu la gentillesse de lire et corriger ce travail.*

*J'exprime ma gratitude à Monsieur **IBRIR Abdellah** qui, en tant que Co-promoteur, pour son temps précieux qu'il m'a consacré.*

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements aux membres de jury qui m'ont fait honneur de juger ce travail, et à tous les enseignants du département de Génie Mécanique de Médéa.

Dédicace

A mes très chers parents Nacira et Med.Salah,

A mes frères Youcef et Yacine,

A ma sœur Amina,

A mes très chers neveux Abdelmalek et Khalil,

A tous mes collègues de la première promotion sortante 2018, Option énergie renouvelable en mécanique.



Imen

Figure I.1 : Evolution de la température en profondeur à différents instants lors d'un recuit par laser KrF (λ=248 nm, τ=27 ns, F=800 mJ/cm²) d'un échantillon de Si préamorphisé.

Figure I.2 : La température de surface de c-Si en fonction du temps à différentes fluences laser (F), a gauche pour la forme 'Gaussian' et a droite pour la forme 'Gate'.

Figure I.3 : Evolution du champ de température a t=60 ns, avec distribution de temps de forme 'gate'.

Figure I.4: Tracé de température en fonction de la profondeur pour une couche de Si irradié avec une source laser de forme gaussienne à t = 60 ns.

Figure I.5: Température en fonction du temps à différentes densités de puissance laser pour la forme gaussienne.

Figure I.6 : L'évolution de la température transitoire au centre de la zone chauffée par une impulsion laser excimère de 203 mJ/cm^2.

Figure I.7 : (a) : durée de fusion en fonction de la profondeur de fusion, (b) : la température de surface en fonction de la profondeur de fusion, dans le cas de faisceaux laser KrF et Nd: YAG traitant une couche a-Si de 20 nm.

Figure I.8 : Surveillance par TRR en temps réel de l'activation des jonctions ultra-minces par la LTP de KrF et le faisceau laser de détection HeNe (633 nm).

Figure I.9 : Les résultats de la simulation indiquant la température en fonction du profil temporel à la surface, 100, 150 et des couches de 200 nm de l'a-Si, qui est irradiée par laser influence de 600 mJ/cm^2.

Figure I.10 : La variation de température calculée de la surface avec le temps. La fluence du laser excimer F = 0,155 mJ/cm^2.

Figure I.11 : Dépendance de la réflectivité en fonction de la température pour HeNe laser, selon un angle d'incidence égal à 38°.

Figure I.12 : Structure cristalline du silicium.

Figure I.13 : Bloc de silicium pur.

Figure I.14 : Quartz de la mine de La Gardette, Bourg d'Oisans, Isère, France.

Figure I.15 : Sable hollandais (grains 0,2 à 0,6 mm).

Figure I.16 : Représentation bidimensionnelle Schématisée de la silice amorphe (SiO_2).

Figure I.17 : Représentation bidimensionnelle schématisée de la silice cristalline.

Figure I.18 : Procédé de fabrication du Si MG.

Figure I.19 : Le procédé de Czochralski.

Figure I.20 : Lingots de Silicium monocristallin.

Figure I.21 : Barreau de silicium polycristallin.

Figure I.22 : Wafers de différents diamètres.

Figure II.1 : Principe du laser.

Figure II.2 : Deux types de cavité.

Figure II.3 : Processus d'émission spontanée.

Figure II.4 : Processus d'absorption.

Figure II.5 : Processus d'émission stimulée.

Figure II.6 : Classification des lasers.

Figure II.7 : Dopage de type N.

Figure II.8 : Dopage de type P.

Figure II.9 : Jonction PN.

Figure II.10 : Réflectivité du silicium cristallin dopé P et dopé N en fonction de λ.

Figure II.11 : Coefficient d'absorption a du silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde.

Figure II.12 : Théorie des bandes.

Figure II.13 : Diagramme d'énergie du Silicium et absorption indirecte d'un photon avec assistance d'un phonon.

Figure II.14 : Indice de réfraction n, coefficient de réflexion R selon la normale, et profondeur d'absorption Z=1/α (nm) du Si cristallin en fonction de la longueur d'onde.

Figure II.15 : Schéma de principe de relaxation de l'énergie absorbée dans le silicium : (a) absorption du photon ($\tau = 10^{-13}$ s), (b) collisions e^--e^- ($\tau = 10^{-14}$ s), (c) recombinaisons Auger ($\tau = 10^{-9}$ s), (d) chauffage du réseau ($\tau = 10^{-12}$ s).

Figure III.1: wafer de silicium est chauffée avec un laser qui va et vient. La plaquette est étant également tourné autour de son axe.

Figure III.2: La géométrie du substrat du silicium.

Figure III.3: Forme temporelle de l'impulsion laser.

Figure III.4: Forme d'onde triangulaire.

Figure III.5 : Source de chaleur gaussienne (W/m^2).

Figure III.6 : Géométrie du modèle étudie avec les limites considérées.

Figure III.7 : Maillage du modèle.

Figure III.8 : Variation de température à travers la plaquette (wafer). Le tracé de la flèche décrit la vitesse de la plaquette (wafer).

Figure III.9 : Variation des isothermes à travers la surface du wafer et le flux de chaleur totale par les flèches**.**

Figure III.10 : Températures maximales, minimales et moyennes de la plaquette en fonction du temps.

Figure III.11 : Différence entre les températures maximale et minimale sur la plaquette.

Figure III.12 : Evolution au cours du temps du profil de température numérique et expérimentale [43] en un point de mesure à la surface de la plaquette du silicium.

Introduction générale.....1

Chapitre I : Eléments théoriques fondamentaux

I.1 Recherche bibliographique.....4

I.2 Le Silicium.....14

I.2.1 Introduction.....14

I.2.2 Généralités sur le silicium.....14

I.2.2.1 L'atome de silicium.....14

I.2.2.2 Structure cristalline.....14

I.2.2.3 Propriétés physico-chimiques.....15

I.2.3 Le silicium associe à l'élément oxygène.....16

1.2.3.1 La silice.....16

I.2.4 Production du silicium.....17

I.2.4.1 Le silicium métallurgique.....17

I.2.4.2 Traitements chimiques.....18

I.2.4.3 Production de silicium par dépôt.....19

I.2.4.4 Le silicium monocristallin.....19

I.2.4.5 Le silicium polycristallin.....20

I.2.4.6 Production des plaquettes de silicium « *wafers* ».....20

a. Tronçonnage.....21
b. Rodage des faces.....21
c. Découpage des pastilles.....21

Chapitre II : Interaction laser-matière

II.1 Le laser.....23

II.1.1 Historique…….....23

II.1.2 Généralités et Fonctionnement.....23

II.1.2.1 Le fonctionnement intrinsèque.....24

a). Le matériau actif.....25

b). Le dispositif de pompage.....25

c). La cavité.....25

II.1.2.2 Un rappel sur les transitions.....26

II.1.3 Les différents types de laser.....27

II.2 Interaction laser-matière.....28

II.2.1 Le dopage.....29

II.2.1.1 Le dopage de type N.....29

II.2.1.2 Le dopage de type P.....29

II.2.2 Propriétés optiques du silicium.....30

II.2.3 Propriétés thermodynamique du silicium.....32

II.2.4 Le silicium en tant que semi-conducteur……..…..32

II.2.5 Mécanisme d'absorption et transfert de l'énergie.....35

II.2.6 Conduction de la chaleur.....36

Chapitre III : La Modélisation et la simulation numérique

III.1 Introduction.....38

III.2 Présentation du logiciel Comsol Multiphysics.....38

III.3 La modélisation numérique.....39

III.3.1 Prise en main du logiciel.....40

III.3.2 Résultats des Calculs et interprétation.....47

Conclusion générale……...51

Glossaire ……..52

Bibliographie……55

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé pour la fabrication de dispositifs microélectroniques ainsi que des cellules photovoltaïques. La technologie du silicium s'efforce sans cesse de miniaturiser les composants semi-conducteurs afin d'améliorer les performances des circuits. Dans les années 1980, l'utilisation de fours conventionnels a commencé à devenir un frein pour la miniaturisation des composants. Leur trop grande inertie n'autorisait pas des traitements locaux et de courtes durées pour les plaques de silicium. Ces plaques de silicium sont couramment appelées substrats (wafer en anglais). Le principal défi est d'avoir une bonne uniformité de la température sur toute la surface du substrat de silicium. Il est en effet nécessaire d'assurer un traitement identique sur tout le substrat pour que les composants répondent de manière identique aux critères de qualité.

Actuellement, le procédé LTP (Laser Thermal Processing) est utilisé avec succès pour ces traitements de courtes durées. Il est en effet nécessaire d'assurer un traitement identique sur tout le substrat pour que les composants répondent de manière identique aux critères de qualité ainsi la rotation du substrat permet d'homogénéiser la température circulairement.

En parallèle, le développement de l'informatique a permis de mettre au point des méthodes de simulations numériques efficaces pour optimiser les procédés thermiques laser. L'objectif de cette étude est de modéliser le chauffage d'une wafer du silicium par le laser afin de mieux comprendre les phénomènes responsables des gradients de température constatés. Cette étude a été traitée en trois chapitres, l'objectif de chaque un d'entre eux est comme suit:

Le chapitre I présente quelques éléments théoriques concernant le silicium, production, traitement chimique…etc. est une revue bibliographique des travaux antérieurs est donnée.

Le chapitre II rappelle quelques bases de physiques des lasers pour enfin introduire l'interaction laser –matière.

Le chapitre III expose le logiciel comsol avec la maitrise du logiciel, ensuite la modélisation du chauffage du substrat du silicium est détaillée dont l'objectif est de décrire l'effet du rayonnement émit par le laser UV sur la surface du substrat de silicium cristallin. Les résultats numériques sont alors obtenus avec la méthode des éléments finis. Ces derniers sont confrontés à des mesures expérimentales de température disponible dans la littérature.

Chapitre I :

« *Eléments théoriques fondamentaux* »

I.1 Recherches bibliographique :

A travers la recherche bibliographique qu'on a effectué sur les travaux concernant la modélisation du chauffage du silicium par laser, on a remarqué qu'il y'a des articles et des thèses ont été publiés dans ce domaine, on cite à titre d'exemple.

- **La recristallisation du silicium dopé par faisceau laser pulsé [1] :**
  Fait par : M. DARIF, N. SEMMAR, E. MILLION et D. SEMMAR.

La simulation a été réalisée sous le logiciel de calcul par éléments finis COMSOL Multiphysics. L'objectif de calcul est de décrire l'effet du rayonnement laser UV sur la surface de substrats de silicium cristallin (c-Si), et de silicium préamorphisé (a-Si) par implantation ionique du germanium (PAI). Les paramètres laser utilisé sont : longueur d'onde λ = 248 nm et la durée d'impulsion τ = 20 à 30 ns. Le cas considéré pour le procédé de recristallisation est celui de l'interaction d'un faisceau laser d'une densité surfacique d'énergie (fluence) uniforme à 248 nm avec une surface de silicium préamorphisé par implantation ionique (a-Si) d'une couche amorphe de 20 nm et avec du silicium cristallin (c-Si) homogène et semi-infini [2]. La surface irradiée est d'environ 4 mm², et la profondeur de diffusion thermique de l'ordre de 1 µm [3]. Le calcul utilisé pour étudier la distribution des dopants (bore) dans les substrats de Si recristallisés, est réalisé en couplant les équations de la chaleur à celle de diffusion.

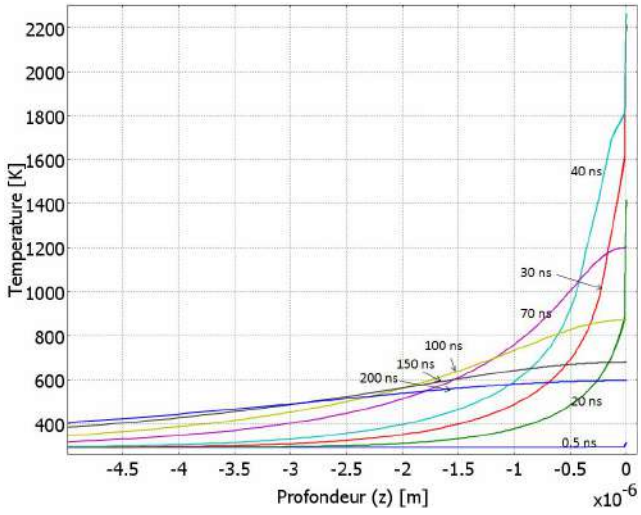


Figure I.1 : Evolution de la température en profondeur à différents instants lors d'un recuit par laser KrF (λ=248 nm, τ=27 ns, F=800 mJ/cm²) d'un échantillon de Si préamorphisé.

- **Simulation numérique de recuit laser nanoseconde du Si par COMSOL Multiphysics [4] :**

  Fait par : M. DARIF et N. SEMMAR.

Un modèle de conduction de chaleur transitoire 2D a été créé dans COMSOL Multiphysics en tant que simulation du changement de température d'un matériau irradié par un faisceau KrF (248 nm, 27 ns) confiné sur la surface du silicium (10 - 50 nm). Dans cet article, les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le cas du silicium cristallin. La source de chaleur est distribuée dans le temps avec les formes 'gate' et 'gaussian'. Les valeurs de propriétés thermiques obtenues, dans le cas d'une forme en «gate», ont été comparées à celles obtenues en cas de forme «gaussian». Les résultats renvoyés montrent que l'étude de la cinétique de fusion devrait être considérée principalement dans la plage de 800 à 1100 mJ / cm² (Figure 9), afin d'affiner le seuil laser. Typiquement, sur une fluence laser de 2000 mJ / cm², le processus d'ablation se produit à la surface du silicium.

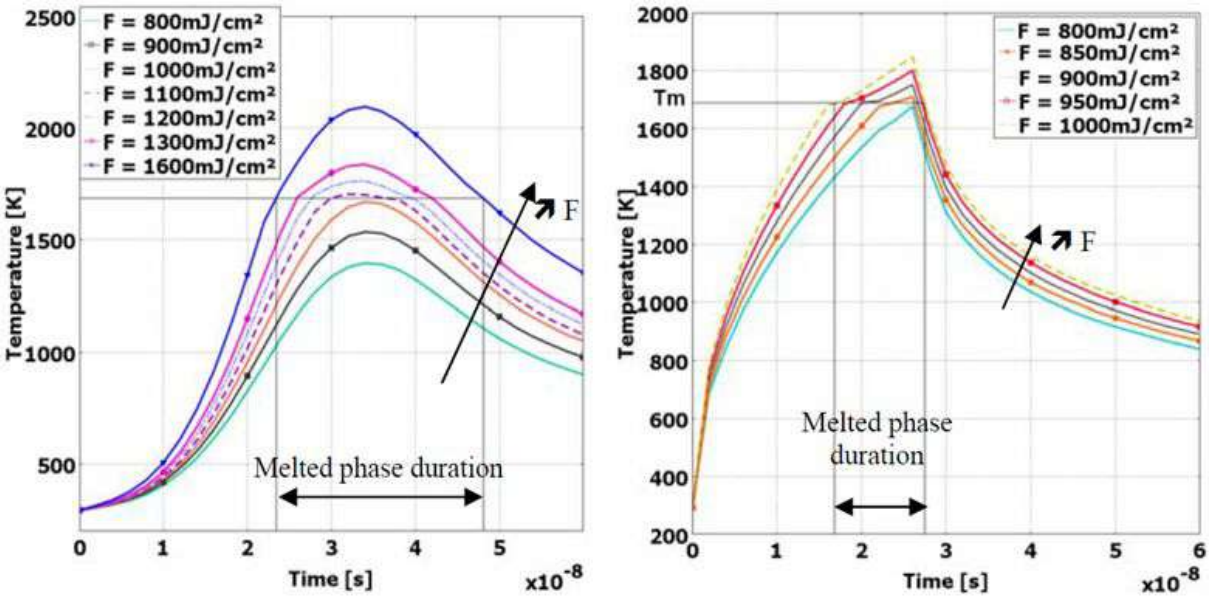


Figure I.2 : La température de surface de c-Si en fonction du temps à différentes fluences laser (F), a gauche pour la forme 'Gaussian' et a droite pour la forme 'Gate'.

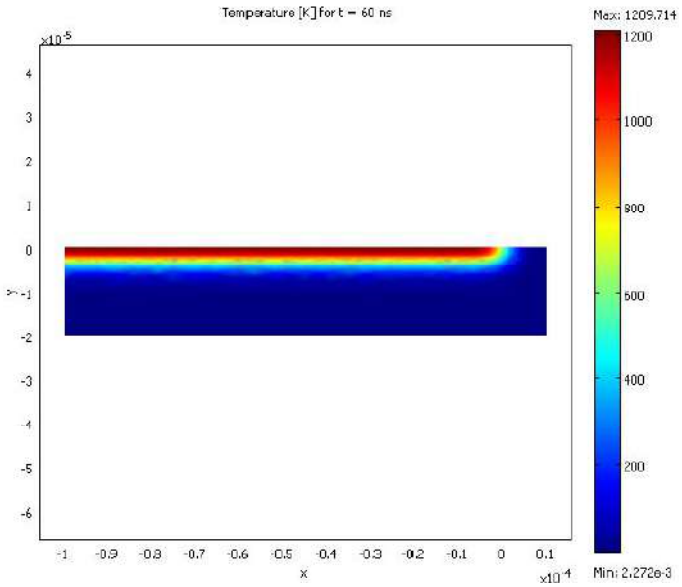


Figure I.3 : Evolution du champ de température a t=60 ns, avec distribution de temps de forme 'gate'.

- **Simulations de transfert de chaleur pour le recuit laser pulsé de couche mince de silicium [5] :**

  Fait par : M. HOSSAIN et M. CHOWDHURY.

La simulation de transfert de chaleur de très mince couche de silicium (Si) en utilisant COMSOL Multiphysics a été présentée. Les résultats montrent qu'une densité de puissance plus élevée peut faire fondre la couche à des temps plus courts par rapport à une densité de puissance plus faible. On observe également que la surface supérieure du film peut être chauffée à une température beaucoup plus élevée que la surface inférieure (l'interface avec le substrat). La profondeur de recuit et la température à n'importe quelle profondeur peuvent être contrôlées avec précision en optimisant la densité de puissance de la source de chaleur, la largeur d'impulsion et le temps d'exposition. Par conséquent, il est possible de cristalliser des couches de Si par fusion contrôlée sans faire fondre le substrat.

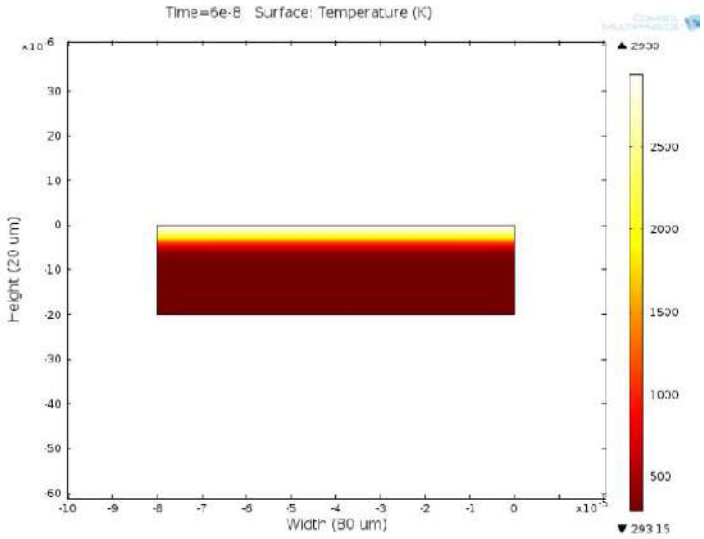


Figure I.4: Tracé de température en fonction de la profondeur pour une couche de Si irradié avec une source laser de forme gaussienne à t = 60 ns.

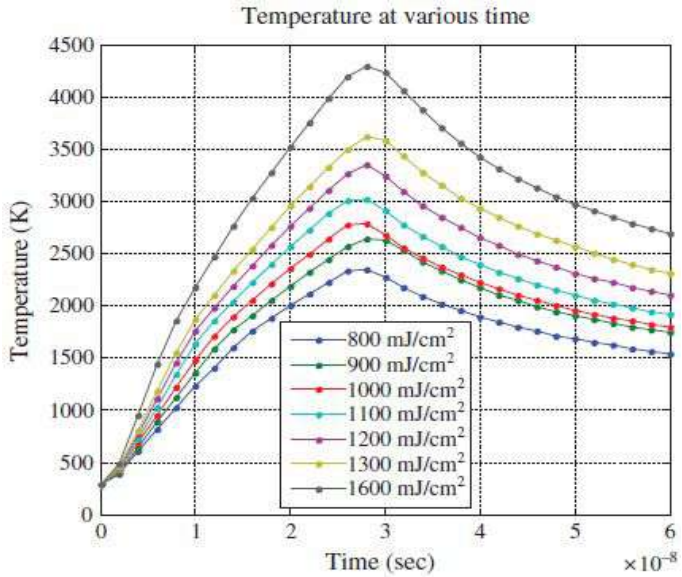


Figure I.5: Température en fonction du temps à différentes densités de puissance laser pour la forme gaussienne.

- **Transfert de chaleur et transformations de phase dans le recuit laser de couches minces Si [6] :**

  Fait par : Seung-Jae Moon, Minghong Lee et Costas P. Grigoropoulos.

Des études sur le sondage expérimental de la fusion et de la recristallisation de couche minces de a-Si avec un rayonnement laser excimère pulsé d'une durée d'impulsion de l'ordre de la nanoseconde ont été présentées. En retardant l'apparition de la nucléation spontanée, il était possible de laisser suffisamment de temps pour une croissance ultrarapide des cristaux qui était remarquablement

insensible aux variations de l'énergie laser appliquée des deux faisceaux de traitement. La photographie au flash a confirmé la vitesse de solidification latérale d'environ 10 m/s.

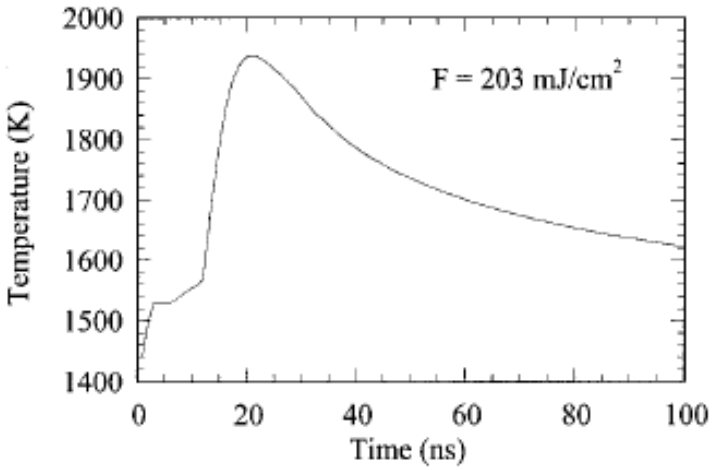


Figure I.6 : L'évolution de la température transitoire au centre de la zone chauffée par une impulsion laser excimère de 203 mJ/cm^2.

- **Activation par laser Excimer des jonctions ultra-minces profondes dans le Si Dopé: Modélisation, Expérimentation et Suivi de Processus en Temps Réel [7] :**

Fait par : N. SEMMAR, M. DARIF, E. MILLON, A. PETIT, H. ETIENNE et P. DELAPORTE.

L'objectif de cette étude est de contrôler l'épaisseur fondue (c'est-à-dire l'épaisseur de jonction dans la plage de 10 à 100 nm) par la surveillance de la réflectivité en temps réel (TRR) pendant le traitement thermique laser (LTP). Le LTP est obtenu en utilisant un faisceau laser KrF (248 nm, 27 ns) avec une distribution homogène de «Top-Hat» pour induire une fusion sélective et la resolidification des échantillons Si: B dopés sur quelques nanomètres. La méthode TRR permet l'évaluation précise du seuil de fusion, de la durée de la phase de fusion et de l'épaisseur maximale fondue. Afin de calibrer la méthode TRR (pour déterminer l'intensité et le profil du signal TRR en fonction de la profondeur de fusion), nous avons utilisé l'analyse par spectrométrie de masse des ions secondaires (TOF-SIMS). La méthode TRR est utile pour surveiller la formation de jonctions.

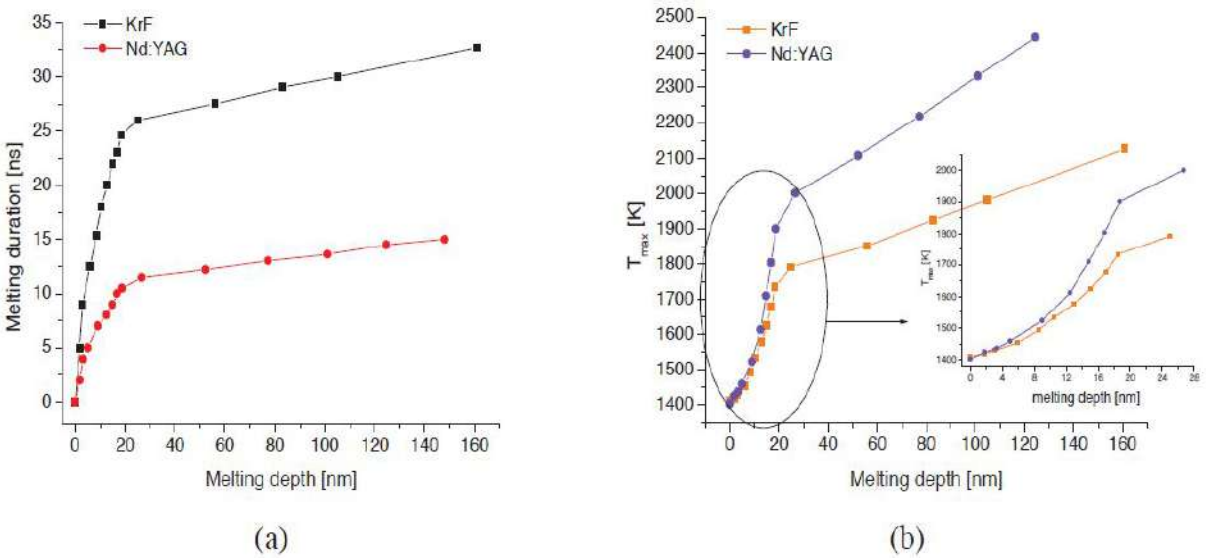


Figure I.7 : (a) : durée de fusion en fonction de la profondeur de fusion, (b) : la température de surface en fonction de la profondeur de fusion, dans le cas de faisceaux laser KrF et Nd: YAG traitant une couche a-Si de 20 nm.

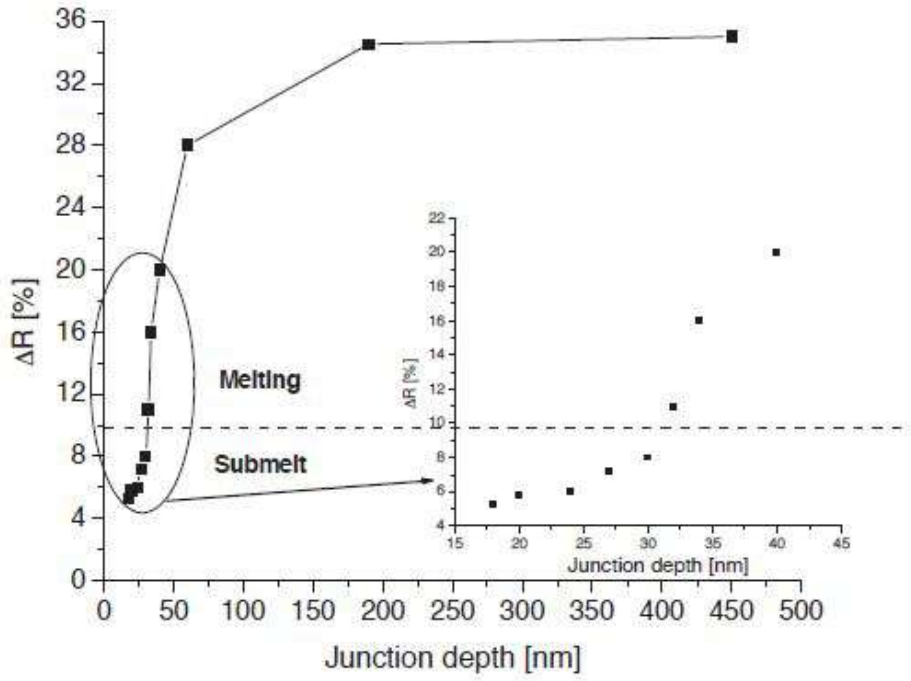


Figure I.8 : Surveillance par TRR en temps réel de l'activation des jonctions ultra-minces par la LTP de KrF et le faisceau laser de détection HeNe (633 nm).

- **Analyse numérique et expérimentale sur la cristallisation de couches minces de silicium amorphe au laser vert [8] :**

Fait par : ZhijunYuan, Qihong Lou, Jun Zhou, Jingxing Dong, Yunrong Wei, Zhijiang Wang, Hongming Zhao, Guohua Wu.

L'effet du laser influe sur la cristallisation du silicium amorphe irradié par une fréquence doublée Nd: YAG (λ = 532 nm) est étudié théoriquement et expérimentalement. La variation de la distribution de température en fonction du temps et de la profondeur à l'état fondu est analysée. Dans ce travail, l'effet de fluence laser sur la cristallisation de 200 nm d'épaisseur en silicium amorphe (a-Si) induite par laser vert est étudié numériquement et expérimentalement. La méthode des différences finies est utilisée pour résoudre l'équation de conduction thermique : en utilisant l'équation unidimensionnelle non linéaire pour la simulation :

$$c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + S(x,t) \qquad (1)$$

ou c est la chaleur spécifique, ρ : la densité, la température $T(x,t)$, varie avec la profondeur x et le temps t, K : conductivité thermique et S(x,t)=S(x).S(t) est le terme source laser. Les résultats calculés sont comparés aux données expérimentales d'autres chercheurs.

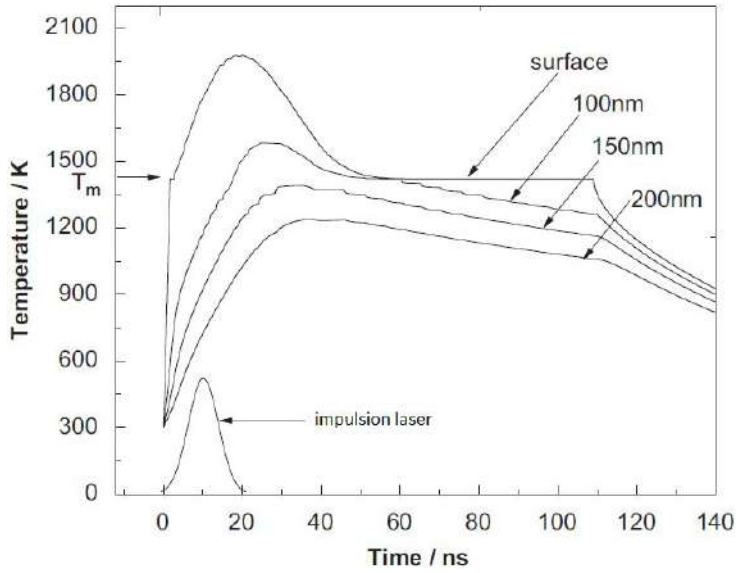


Figure I.9 : Les résultats de la simulation indiquant la température en fonction du profil temporel à la surface, 100, 150 et des couches de 200 nm de l'a-Si, qui est irradiée par laser influence de 600 mJ/cm^2.

- **Cristallisation des couches minces de silicium amorphe (a-si) par le laser excimère krf [9] :**

  Fait par : F. BOUFELGHA, A. BOUAINE et L. AOMAR

Le recuit par laser excimère KrF des couches minces de silicium amorphe (a-Si) est utilisé pour élaborer du silicium polycristallin en films minces. Les couches (a-Si) d'épaisseur 2000 Å ont été déposées par la méthode LPCVD (*Low pressure Chemical Vapor Deposition*) sur un substrat de quartz et recouvertes par un film mince de 900 Å de SiO_2. Les échantillons ainsi préparés ont été irradiés par le laser excimère KrF de longueur d'onde égale à 248 nm et d'une durée d'irradiation de l'ordre de 20 ns ($\lambda \approx 248$ nm, 20 ns) et de densité d'énergie égale à 0.67 J/cm^2, pour différentes impulsions. Les propriétés structurales telles que la taille des grains, les contraintes et la fraction (quantité) de matière cristallisée ont été évaluées par la spectroscopie micro-Raman qui fonctionne par un laser He-Ne de longueur d'onde égale à 632,8 nm et de 1 µm de diamètre et la microscopie électronique à balayage a été utilisée pour étudiée l'état de surface. Les observations montrent que les impulsions laser successives entraînent des transformations microstructurales.

- **Température transitoire pendant le chauffage par laser excimère pulsé de couches minces de poly-silicium obtenus par mesure de réflectivité optique [10] :**

  Fait par : X. Xu, C. P. Grigoropoulos et R. E. Russo.

La réflectivité transitoire d'un laser HeNe à onde continue (CW) a été mesurée pendant le chauffage par laser à excimère pulsé de couches minces de polysilicium à l'échelle de la nanoseconde. Des couches de polysilicium ayant des épaisseurs de 0,1 à 0,4 µm ont été déposées par dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD) sur des wafers de silicium cristallin oxydées thermiquement. L'indice de réfraction complexe de ces couche à la longueur d'onde laser HeNe (λ = 0,6328 µm) a été déterminé statiquement par des mesures combinées de réflectivité ellipso-métrique et d'incidence normale dans la gamme de température de 300 K à environ 1400 K. L'indice de réfraction complexe de température ambiante de la longueur d'onde du laser excimère a été mesuré par ellipsométrie spectroscopique.

Ces mesures ont été utilisées pour modéliser la réflectivité transitoire au cours du chauffage laser pulsé à l'échelle de la nanoseconde. Un bon accord a été obtenu entre les résultats expérimentaux et le calcul.

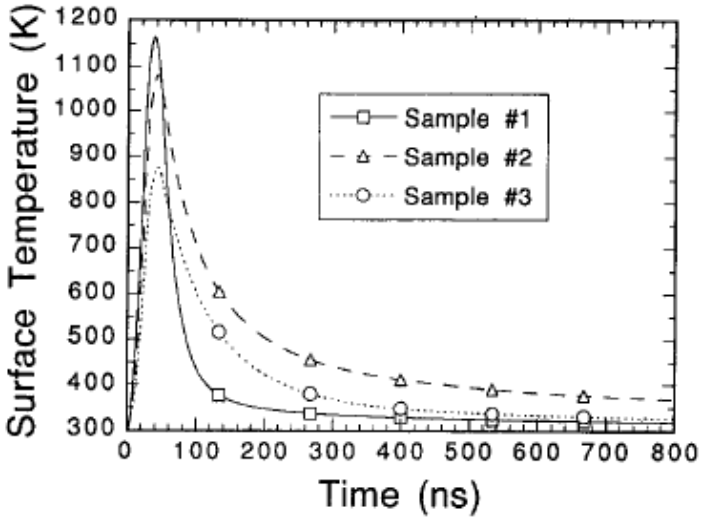


Figure I.10 : La variation de température calculée de la surface avec le temps. La fluence du laser excimer F = 0,155 mJ/cm^2.

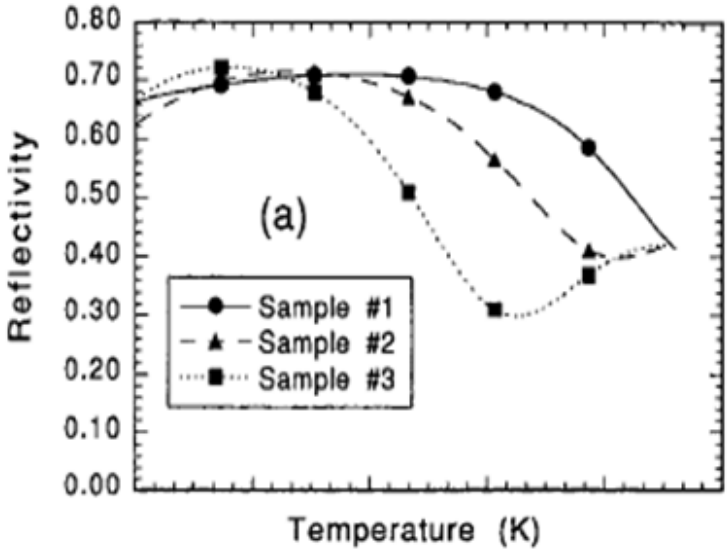


Figure I.11: Dépendance de la réflectivité en fonction de la température pour HeNe laser, selon un angle d'incidence égal à 38°.

- **Élaboration et caractérisations du silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe [11] :**

  Fait par : Z. SAIDBACAR.

L'objectif de ce travail de thèse est l'élaboration du silicium polycristallin en phase liquide, sur substrat de verre borosilicate, en utilisant l'irradiation par laser continu de forte puissance d'un film de silicium amorphe. Des simulations numériques modélisant l'interaction laser-silicium amorphe ont été effectuées grâce à un modèle développé sur l'outil COMSOL. Ainsi suivre l'évolution des transferts thermiques dans les différentes structures Si/verre irradiées par laser et évaluer l'impact des paramètres expérimentaux tels que la vitesse de balayage, la puissance du laser, la température du substrat sur les seuils de transition de phase du Si amorphe (fusion, cristallisation, évaporation). Ces résultats de simulation ont été confrontes a des données réelles obtenues en réalisant différentes expériences d'irradiation de films Si amorphe.

- **Réalisation de jonctions ultra-minces par recuit laser : application aux détecteurs UV [12] :**

  Fait par : Y. LARMANDE.

Le procédé d'activation au laser de dopants implantés par immersion plasma est étudié. Le laser à excimère utilisé (ArF) est absorbé dans moins de 10 nm de silicium, ce qui va permettre un recuit local. De plus, la courte durée d'impulsion va assurer un faible budget thermique, limitant la diffusion des dopants. En associant cette technique à l'implantation ionique par immersion plasma, dont l'intérêt est de pouvoir travailler à de très basses tensions d'accélération (quelques dizaines d'eV), nous pouvons réaliser des jonctions avec un fort taux d'activation sans diffusion. Après avoir présenté les différentes techniques de dopage pouvant être utilisées, les dispositifs expérimentaux de traitement et de caractérisation utilisés ont été décrits. Des simulations ont permis de comprendre le rôle des paramètres laser sur le profil de température du silicium en surface. Après avoir choisi le laser le plus adapté parmi les lasers ArF, KrF et XeCl (respectivement : 193 nm - 15 ns, 248 nm - 35 ns, 308 nm - 50 ns), on observe l'effet du nombre de tirs et de la mise en forme de faisceau afin d'optimiser le procédé.

I.2 Le silicium :

I.2.1 Introduction :

Le silicium est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, puisqu'il représente 25,7% de sa masse. Il n'existe pas dans la nature à l'état de corps simple, mais sous forme de composés : soit sous forme de silice, qui est un dioxyde de silicium (SiO_2) et que l'on trouve dans le sable. Soit sous forme de silicates qui sont des sels dérivants de la silice et qui rentrent dans la composition d'une quantité importante de minéraux puisqu'ils constituent 97% de la croute terrestre. Citons entre autres, le quartz, le talc ou la topaze [13].

Il est utilisé depuis très longtemps sous forme d'oxyde de silicium amorphe (silice ou SiO_2) comme composant essentiel du verre. Il a depuis le milieu XX^e siècle de nouveaux usages en électronique, pour la production de matériaux tels que les silicones ou, pour fabriquer des panneaux solaires photovoltaïques [14].

C'est l'un des fondateurs de la chimie moderne, le suédois Jöns Jacob Berzelius (1779 - 1848) qui a, en 1823, isolé pour la première fois du silicium. Quant au silicium à l'état cristallin, il a été obtenu pour la première fois en 1854 par le chimiste français Henry Sainte-Claire Deville (1818 - 1881) [13].

I.2.2 Généralités sur le silicium :

I.2.2.1 L'atome de silicium :

Le silicium est un élément chimique de symbole Si et de numéro atomique 14 [14], sa masse atomique est de 28.09 $g.mol^{-1}$ [12]. Il existe naturellement sous trois formes d'isotopes : ^{28}Si (92,18%) ,^{29}Si (4,71%) et ^{30}Si (3,12%) [13]. Son rayon atomique est voisin de 110 pm. Dans la classification périodique des éléments, il se trouve sur la $3^{ème}$ période (ligne) et appartient au $14^{ème}$ groupe (colonne). Il comporte donc 4 électrons de valence sur sa couche externe, comme le carbone ou le germanium.

I.2.2.2 Structure cristalline :

Comme les autres éléments du groupe 14 (dont le carbone), le silicium est un cristallogène : il peut exister sous forme cristalline. Pour le carbone, il s'agit du diamant, qui possède une structure cristalline caractéristique.

Le silicium possède également cette structure cristalline lorsqu'il est pur comme le montre la figure I.1. Le paramètre de la maille *a*, c'est-à-dire la longueur d'une arrête du cube, est de 0,543 071 0 nm.

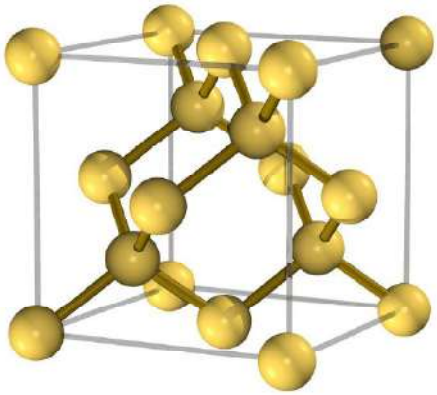


Figure I.12: Structure cristalline du silicium [12].

I.2.2.3 Propriétés physico-chimiques :

A température et, pression ambiante, le silicium pur est un solide, dont la couleur est grise foncée, aux teintes bleutées (il est de coloration brune sous forme amorphe et grise avec une apparence métallique sous forme cristalline). D'un point de vue mécanique, le silicium est dur et peu ductile et présente une très bonne résistance aux acides [15]. Sa température de fusion est de 1414 °C et sa température d'ébullition de 3265 °C. A 25°C, sa masse volumique est de 2,33 tonnes par mètre cube. C'est par ailleurs un assez bon conducteur de la chaleur (conductivité thermique : 149 $W.m^{-1}.K^{-1}$) [16].



Figure I.13 : Bloc de silicium pur [16].

I.2.3 Le silicium associé à l'élément oxygène :

1.2.3.1 La silice :

Dans la Nature, le silicium se rencontre majoritairement sous forme de dioxyde de silicium SiO_2, la silice. On parle de silicates pour désigner les minéraux dans lesquels la silice est combinée à des oxydes métalliques.

La silice se présente sous deux formes : cristalline et amorphe. On rappelle que sous forme cristalline, les atomes sont disposés de manière régulière, afin de former un motif (une maille) qui se répète au sein du cristal. Au contraire, sous forme amorphe, la disposition des atomes n'est pas régulière. Sous forme cristalline, la silice est par exemple le principal constituant du quartz. Elle sert également de support isolant en électronique [13].



Figure I.14 : Quartz de la mine de La Gardette, Bourg d'Oisans, Isère, France [17].

Le sable est particulièrement riche en silice. En effet, il résulte de la désagrégation de roches, elles-mêmes étant constituées de silicates, dont le quartz.



Figure I.15 : Sable hollandais (grains 0,2 à 0,6 mm) [17].

C'est avec l'arrivée de l'électronique qu'on lui a trouvé de nouveaux usages comme semi-conducteur. Les figures (Figure I.16 et Figure I.17), représentent schématiquement et bidimensionnellement la structure de la silice amorphe [13] et cristalline.

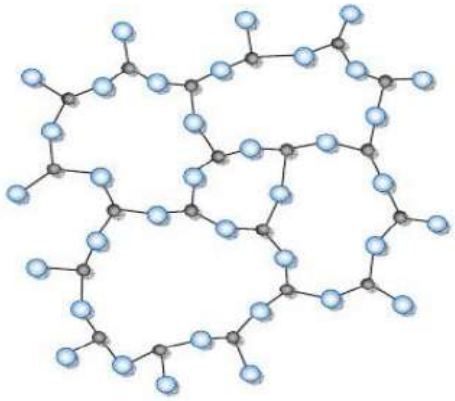


Fig.I.16 : Représentation bidimensionnelle schématisée de la silice amorphe (SiO_2) [13].

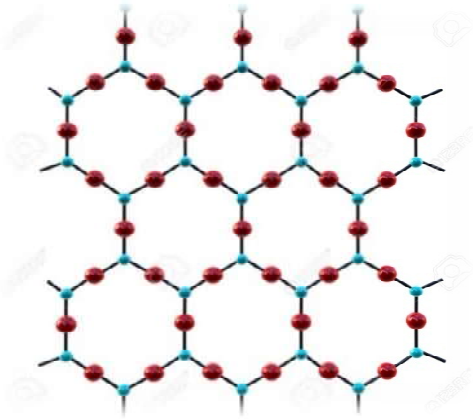


Fig.I.17: Représentation bidimensionnelle schématisée de la silice cristalline.

I.2.4 Production du silicium :

Selon l'utilisation industrielle du silicium, on poussera son niveau de pureté suivant trois niveaux [18] :

- Silicium métallurgique (pureté à 99%): MG-silicium (metallurgical grade), alliages d'aluminium, silicones ;
- Silicium solaire (pureté à 99,999 9%): SoG-silicium (solar grade), cellules photovoltaïques ;
- Silicium électronique (pureté à 99,999 999 99%): EG-silicium (electronic grade), puces électroniques.

I.2.4.1 Le silicium métallurgique :

On parle de silicium métallurgique (MG-Si) pour désigner le silicium extrait de la silice par un procédé de métallurgie. La silice est introduite dans un four à arc électrique. Dans la pratique, elle provient de galets, de morceaux de quartz, etc., laquelle est mélangée avec des réducteurs tels que le coke de pétrole, des charbons bitumineux, la houille et des copeaux de bois [18]. Des électrodes en carbone (graphite) portent alors le matériau à des températures de l'ordre de 3000 °C. La silice est réduite en silicium (carbo-réduction), selon la réaction globale :

$$SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2 \qquad (1)$$

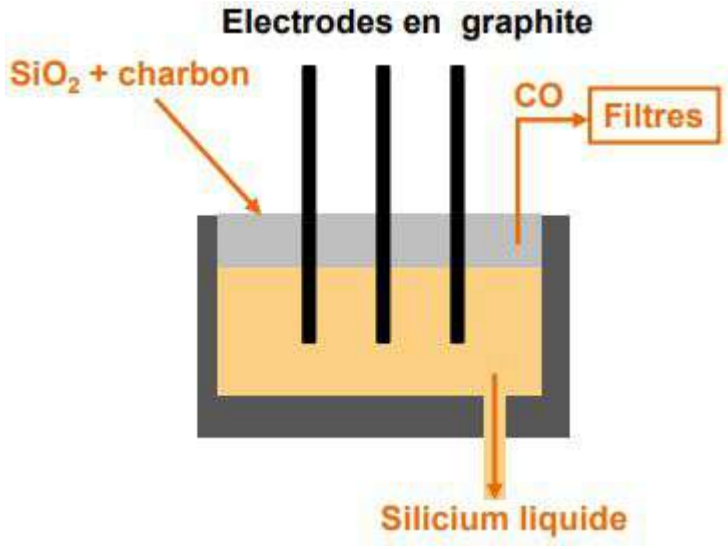


Figure I.18 : Procédé de fabrication du Si MG [15].

Le silicium obtenu est recueilli dans des « poches », à l'état liquide, grâce à des orifices pratiqués dans le creuset: les trous de coulées. Il est ensuite affiné dans ces poches, par injection d'air et d'oxygène pour oxyder l'aluminium et le calcium qui vont être extraits par séparation [14] du « laitier » (oxydes produits au cours des différentes étapes du procédé et entraînés avec le silicium) avant d'être solidifié :

- soit par coulée en lingotières ou sur une surface plane ;
- soit par granulation à l'eau (le silicium liquide est alors versé dans de l'eau et les gouttes de silicium se solidifient en petites granules : opération relativement délicate).

La pureté du silicium obtenu est d'environ 98 % ou 99% [19].

I.2.4.2 Traitements chimiques :

Pour des applications nécessitant du silicium très pur, on fait également appel à du silicium métallurgique, mais comme première étape, les opérations ultérieures visant alors à le purifier.

Le principe consiste dans la première étape à faire une attaque par acide chlorhydrique (HCl) en lit fluidisé à environ 550K du silicium métallurgique suivant la réaction principale suivante [15] :

$$Si\ MG_{(s)} + 3\ HCl_{(g)} \rightarrow SiHCl_{3(g)} + H_{2(g)} \qquad (2)$$

En deuxième étape le mélange de chlorosilanes est condensé puis distillé pour séparer les constituants liquides afin de retenir les trichlorosilanes ($SiHCl_3$) ultra purs. La dernière étape consiste à réduire le $SiHCl_3$ par H_2 à 1000K dans un four selon la réaction suivante [15] :

$$SiHCl_{3(g)} + H_{2(g)} \rightarrow Si_{(s)} + 3\ HCl \qquad (3)$$

I.2.4.3 Production de silicium par dépôt [20] :

Du silicium pur peut être produit par exemple par dépôt chimique en phase vapeur (CVD : *Chemical Vapor Deposition*). Pour cela, les gaz silane SiH_4 ou trichlorosilane HCl_3Si sont injectés dans un four où règne des basses pressions mais des hautes températures. Sous l'effet de la chaleur, SiH_4 et HCl_3Si se dissocient.

Le silicium ainsi libéré se dépose alors sur les parois sur lequel il forme une couche mince. Selon la méthode utilisée, la couche de silicium peut être monocristalline, polycristalline ou amorphe. Ces trois types sont utilisés pour la confection de cellules photovoltaïques.

I.2.4.4 Le silicium monocristallin :

Le Silicium monocristallin (ou cristallin « c-Si ») possède un ordre à grande distance [21], c'est un échantillon macroscopique formé d'un seul cristal.

Le silicium monocristallin est un matériau de très haute pureté, qui est obtenu par des procédés industriels tels que le tirage en creuset (méthode de Czockralski) ou la purification par fusion de zone (FZ). Le produit fini se présente sous la forme de lingots monocristallins [22].

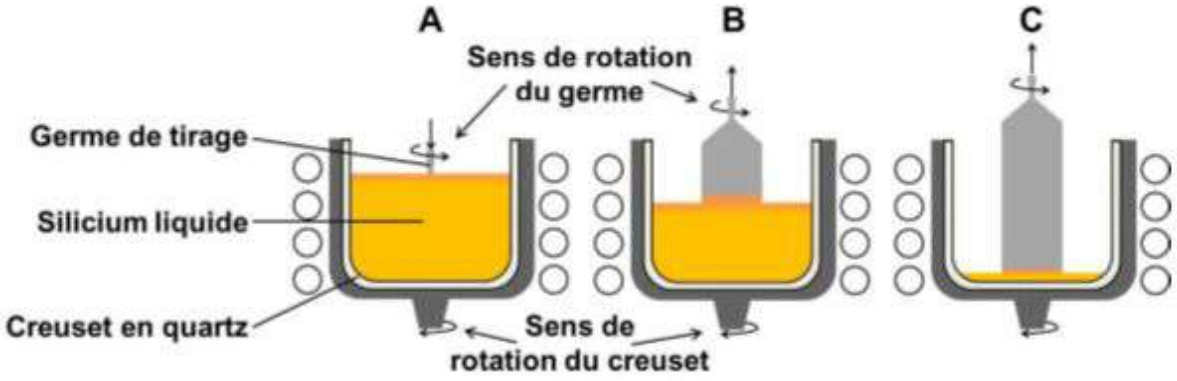


Figure I.19 : Le procédé de Czochralski [17].

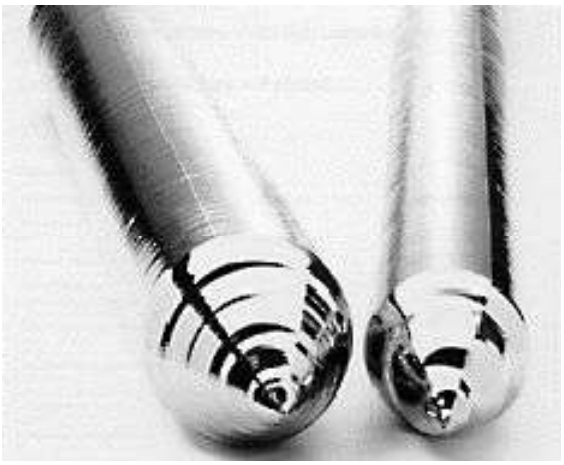


Figure I.20 : Lingots de Silicium monocristallin [15].

I.2.4.5 Le silicium polycristallin :

Le silicium polycristallin, nommé aussi multicristallin, est constitué par du silicium sous forme cristalline. Son nom vient du fait que l'orientation cristalline peut changer d'un point à un autre du matériau. Sa structure est constituée de grains dont la taille varie de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres, séparés entre eux par des joints de grains [11].

Le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux. Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin [22].



Figure I.21 : Barreau de silicium polycristallin [17].

I.2.4.6 Production des plaquettes de silicium « *wafers* » :

Un « wafer » est un morceau assez fin composé de silicium monocristallin [23]. Du fait du prix très élevé du silicium monocristallin, il faut éviter la perte de matière pendant la préparation des galettes (*wafers)*.

Le cristal étant très fragile, il faut éviter toute contrainte pouvant les déformer ou les briser. Par ailleurs, l'état de surface des *wafers* doit être aussi parfait que possible et le traitement ne doit pas « polluer » le monocristal [24].

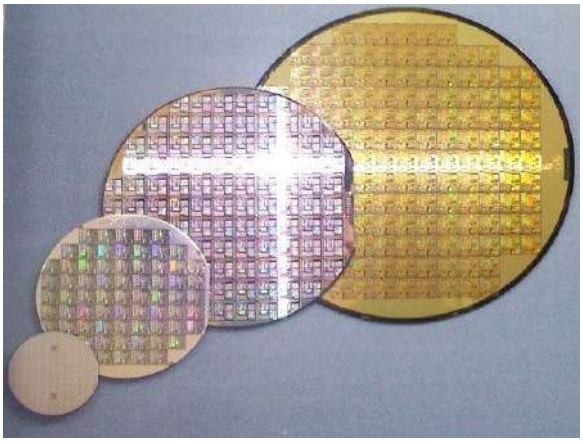


Figure I.22 : Wafers de différents diamètres [24].

a. Tronçonnage :

Le silicium est découpé en galettes (*wafers*) de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur au moyen d'une scie circulaire diamantée de grande précision. Le travail s'effectue dans l'eau afin d'éviter tout échauffement et toute pollution. Les déchets étant importants, les boues sont filtrées et la poudre de silicium est récupérée et utilisée à nouveau.

b. Rodage des faces :

Il a pour but d'éliminer les irrégularités de surface provoquées par les grains de poudre de diamant lors du tronçonnage ; il s'effectue avec de la poudre de carbure de silicium. Après le rodage mécanique, un rodage chimique vient supprimer les dernières irrégularités sur la couche superficielle qui peut avoir été polluée. À cet effet, on utilise des bains d'acides (acides fluorhydrique et nitrique) ; puis les *wafers* sont rincées soigneusement et séchées.

c. Découpage des pastilles :

On découpe les galettes (*wafers*) en un très grand nombre de pastilles, avec précision, la largeur du trait de découpe étant aussi faible que possible (0,125 à 0,15 mm). Les bavures de découpage sont ensuite éliminées par attaque chimique suivie d'un rinçage.

Chapitre II :

« *Interaction laser-matière* »

II.1 Le laser :

II.1.1 Historique:

« LASER » est l'acronyme qui désigne l'amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement, de l'anglais ***L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation*. Voici un bref historique de son évolution [13] :

Tableau II.1 : Historique du développement des lasers.

1917	Albert Einstein décrit le principe d'émission stimulée.
1950	L'Alsacien Alfred Kastler (1902-1984) né à Guebwiller, Nobel de physique en 1966, propose un procédé de pompage optique, validé expérimentalement par le physicien français Jean Brossel (1918-2003) puis deux ans plus tard par Kastler lui-même.
1953	Le physicien américain Charles Hard Townes (1915), Nobel de physique en 1964, développe le premier MASER (***M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation*).
1960	Le physicien américain Théodore Maiman (1927-2007). Obtient pour la première fois une émission laser par le biais d'un cristal de rubis.
1961	Le physicien persan Ali Javan met au point un laser à gaz par le biais d'un mélange HeNe.
1962-1966	Développement des autres lasers : à Ar, à CO2, à liquide, à Semi-conducteur.
1975-1980	Développement des lasers de puissance et des applications qui en découlent.

II.1.2 Généralités et Fonctionnement :

Le LASER est un générateur de rayonnement électromagnétique cohérent (Lorsqu'il se propage, même sur de grandes distances, le faisceau LASER reste bien parallèle et localisé [25]) qui couvre une grande partie du spectre électromagnétique, en effet, aujourd'hui, il s'étend dans les plages microondes, infrarouges, visibles, ultraviolets, rayons X [13].

Donc dans l'acronyme laser, la lumière doit être prise au sens large (rayonnement visible et «proche» du visible). En outre, l'émission stimulée est un phénomène qui n'est pas observable dans la nature, c'est pourquoi sa mise en évidence et son utilisation nécessite des conditions particulières. En réalité un laser n'est pas uniquement un amplificateur, mais un oscillateur optique, et comme tout oscillateur, il est basé sur un milieu d'amplification placé dans une cavité jouant le rôle de circuit de réaction.

II.1.2.1 Le fonctionnement intrinsèque :

Un laser se définit par 3 éléments fondamentaux :

- Un milieu actif ou amplificateur.
- Une source de pompage : elle permet d'exciter les atomes du milieu actif en injectant de l'énergie. Cette source peut être d'origine électrique ou lumineuse.
- Un résonateur optique (la cavité): un miroir qui réfléchit tous les photons incidents et un miroir semi-réfléchissant qui laisse passer entre 1% à 10% des photons incidents et réfléchit le reste du rayonnement.

Le principe d'un laser est visible sur la figure suivante (Figure II.1) :

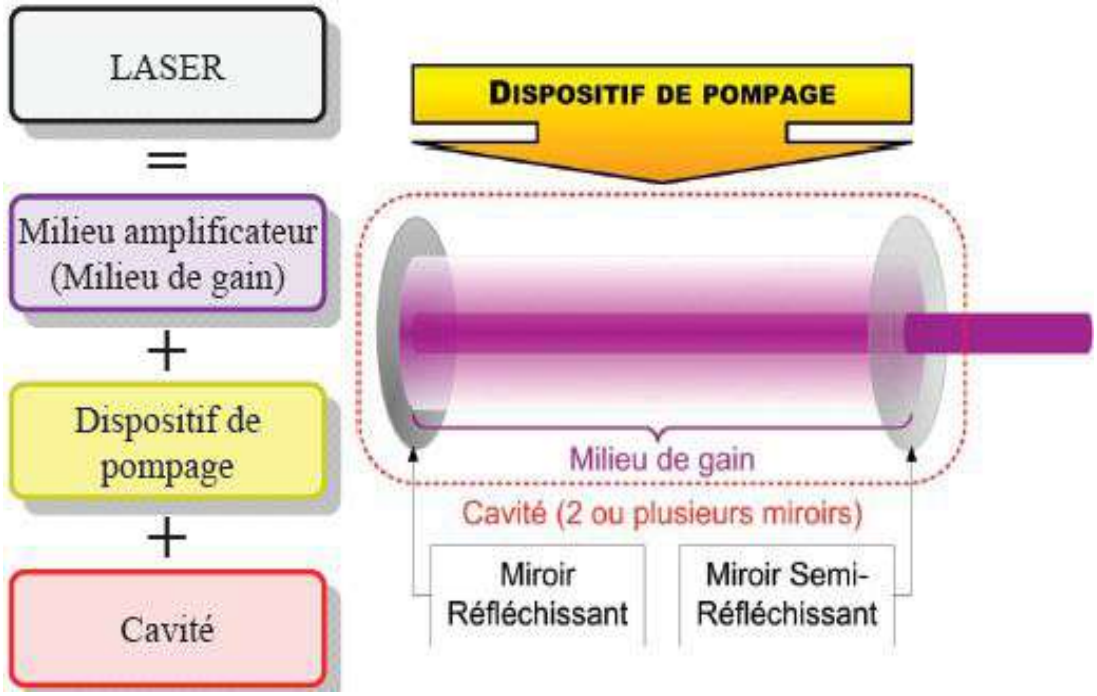


Figure II.1 : Principe du laser [13].

a). Le matériau actif

Il constitue le cœur du laser. Encore appelé milieu actif, milieu amplificateur ou milieu de gain, c'est dans ce dernier que sont générés par pompage des atomes à l'état excité qui peuvent ensuite se désexciter en émettant des photons. Ce milieu de gain peut prendre la forme d'un liquide comme dans le cas d'un laser à colorants, d'un gaz comme dans le cas des lasers HeNe, CO_2 ou à exciplexes, ou d'un solide comme dans le cas d'un laser YAG ou Rubis [26].

b). Le dispositif de pompage

Il peut prendre la forme d'une alimentation haute tension (pompage électrique), d'une lampe flash ou d'un laser (pompage optique). C'est lui qui permet de réaliser les inversions de population nécessaires à l'émission laser par l'apport d'énergie extérieure au matériau actif. On dit qu'il y a inversion de population, lorsqu'un groupe d'électrons, d'atomes ou de molécules, se trouvent dans un état dans lequel la majorité des éléments sont dans un état excité plutôt que dans leur état fondamental [26].

c). La cavité

Les différents rôles de cette dernière sont [13] :

- d'assurer la rétroaction,
- de confiner l'énergie,
- de sélectionner les composantes spectrales.

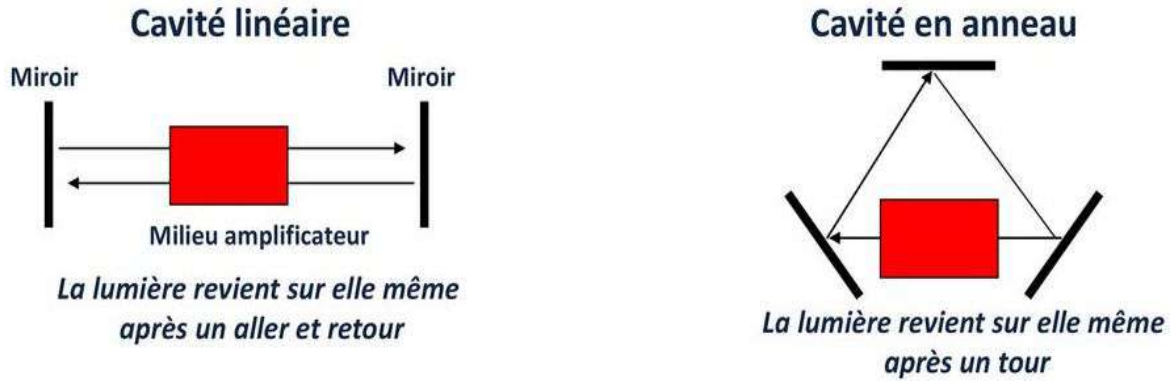


Figure II.2 : Deux types de cavité [27].

II.1.2.2 Un rappel sur les transitions :

- Processus d'émission spontanée cf. (Fig. II.3) : Dans ce dernier, un atome transite spontanément d'un état excité N_2 vers un niveau d'énergie plus basse N_1 [13], et engendrer l'émission d'un photon de fréquence hv [27].

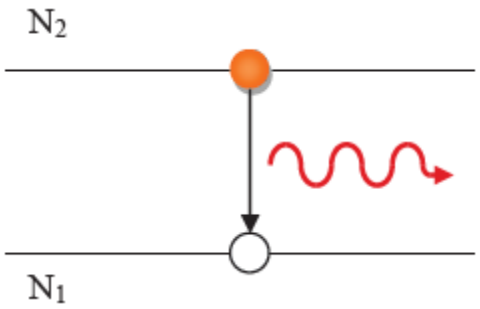


Figure II.3 : Processus d'émission spontanée [13].

- Processus d'absorption cf. (Fig. II.4) : Le système matériel récupère l'énergie d'un photon hv_a qui disparaît du rayonnement électromagnétique. Cette énergie est récupérée sous la forme d'un gain d'énergie potentielle d'un électron qui passe alors du niveau 1 (qui se dépeuple) au niveau 2 tel que: $N_2 - N_1 = hv$, avec $N_2 > N_1$ [13].

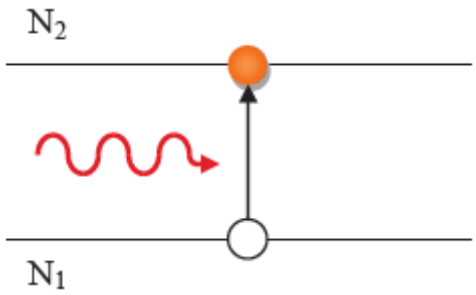


Figure II.4 : Processus d'absorption.

- Processus émission stimulée cf. (Fig. II.5) : Il est à la base de l'effet laser. L'émission est induite par un champ électromagnétique. Lorsqu'un photon d'énergie hv_a passe au voisinage d'un atome dans un état excité N_2, il déclenche avec une probabilité qui est la même que pour l'absorption, sa désexcitation, et donc sa transition vers le niveau N_1. Cette transition s'accompagne de l'émission d'un photon hv_{aj} jumeau (même fréquence, même direction, même polarisation) [13].

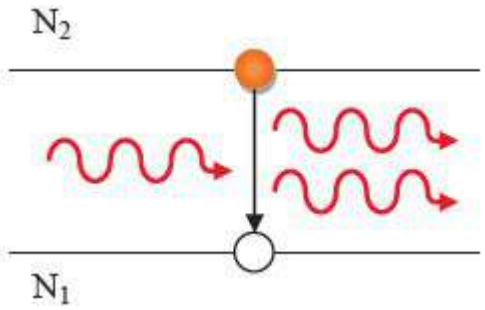


Figure II.5 : Processus d'émission stimulée.

Pour que le milieu soit amplificateur, la condition qui doit être respectée est $N_2 > N_1$, ce qui s'oppose à la loi d'équilibre thermodynamique de Boltzmann :

$$\frac{N_1}{N_2} = exp\left(\frac{E_2 - E_1}{k_B.T}\right) \qquad (2)$$

Il apparait clairement la nécessité d'une inversion de population $\Delta N = N_2 - N_1$. Il y aura amplification de lumière si l'inversion de population est positive [27]. Cette dernière étant impossible dans un système à deux niveaux, les lasers sont obligatoirement des systèmes à au moins trois niveaux d'énergie [13]. (Laser à rubis (Cr^{3+}:Al_2O_3) met en effet en jeu 3 niveaux, le néodyme YAG (Nd^{3+}:$Y_3Al_5O_{12}$) système à 4 niveaux…) [27].

I.3.3 Les différents types de laser [28] :

Les laser sont classés par catégorie car ils peuvent avoir différentes compositions:

- Laser à gaz: Ils utilisent tous un gaz et fonctionnent avec un procédé électrique, ils sont utilisés dans le domaine médical et dans l'industrie pour le traitement des matériaux. Les lasers à gaz sont souvent des lasers encombrants et nécessitants un refroidissement par eau important.

- Laser à solide: Les lasers à solide émettent en général dans le rouge et l'infrarouge proche, leurs sources d'excitation sont soit des diodes laser ou des lampes flash, ils sont utilisés dans beaucoup de domaine : usinage, médical, recherche scientifique, ...

- Laser chimiques: Ils fonctionnent avec une réaction chimique et sont utilisés dans l'armement car ils sont très puissants et possèdent une longueur d'onde énorme de l'ordre d'environ 3000 nm ($3,0x10^{-6}$ m).

- Laser à fibre: Les Laser à fibre émettent de 1050 nm à 2200 nm ($1,05x10^{-6}$ à $2,2x10^{-6}$ m), leurs sources d'excitation peuvent être un autre laser ou une diode. Leurs utilisations sont dans l'usinage ou le soudage.

La figure ci-dessous montre une classification des différents types de lasers.

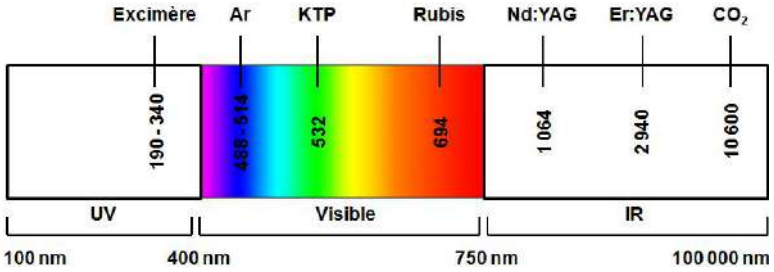


Figure II.6 : Classification des lasers [29].

II.2 Interaction laser-matière :

Lorsqu'un faisceau laser interagit avec la surface du silicium cristallin, plusieurs phénomènes entrent en jeu [30] :

- L'absorption de l'onde électromagnétique par le matériau,
- Le transfert de l'énergie laser au réseau cristallin,
- La diffusion de la chaleur dans le matériau,
- Le changement de phase : fusion puis solidification.

Ces étapes déterminent complètement la dynamique de fusion.

L'interaction laser/matériau va fortement dépendre des propriétés intrinsèques du substrat. Les propriétés optiques vont intervenir dans l'absorption de l'énergie laser par le matériau. Elles sont fortement liées aux paramètres cristallins et électriques du substrat. Lorsque l'énergie est absorbée par le matériau, ce sont ses propriétés thermiques qui vont gouverner la dynamique de l'évolution de la température du substrat [12].

II.2.1 Le dopage :

Cependant, à l'état pur un semi-conducteur ne permet pas de réaliser des transistors. Il faut modifier ses propriétés physiques et électroniques en introduisant des impuretés : c'est l'étape de dopage [12].

II.2.1.1 Le dopage de type N :

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité d'électrons du semi-conducteur. Pour cela, on va remplacer une partie des atomes du matériau semi-conducteur par des atomes plus riche en électrons. Il va en résulter un excès d'électrons de valence qui vont passer facilement dans la bande de conduction à température ambiante. Cela va diminuer la résistivité du semi-conducteur.

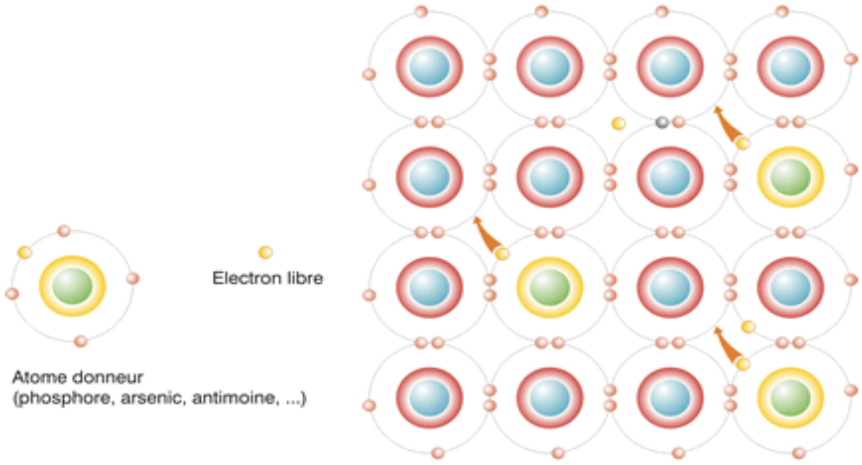


Figure II.7 : Dopage de type N.

II.2.1.2 Le dopage de type P :

Le dopage de type P consiste à augmenter la densité des trous dans le semi-conducteur. On appelle trou le manque d'un électron dans une liaison covalente. Des électrons du matériau vont pouvoir se déplacer plus facilement et combler ce trou. Ce dernier va se déplacer dans le sens contraire des électrons.

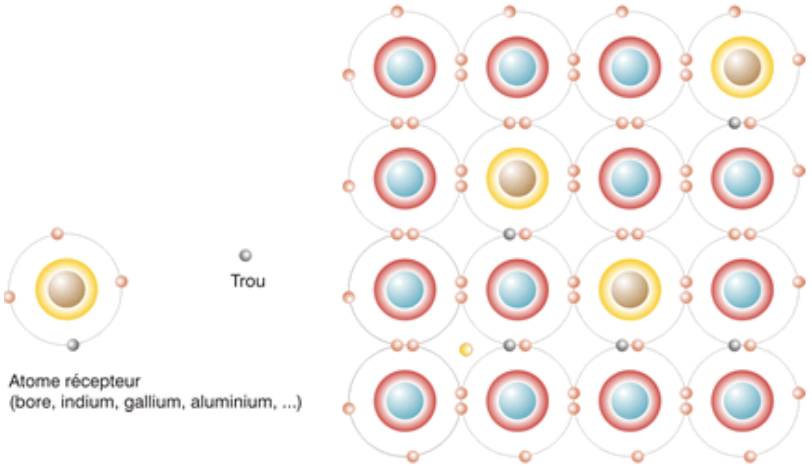


Figure II.8 : Dopage de type P.

Quand un semi-conducteur dopé N est mis en contact avec un semi-conducteur dopé P, on obtient une jonction PN.

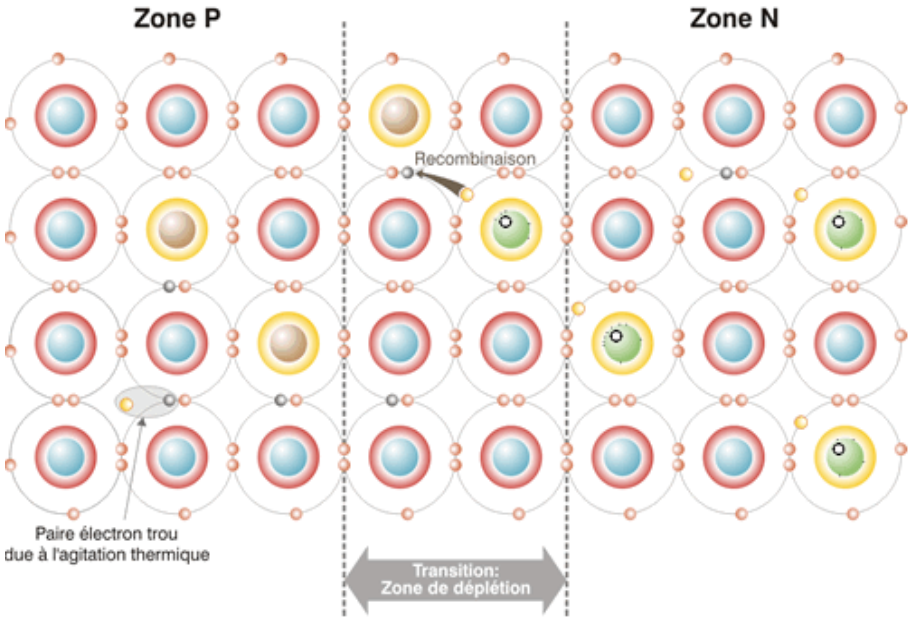


Figure II.9 : Jonction PN.

II.2.2 Propriétés optiques du silicium :

Lorsqu'une onde arrive sur une interface, une partie de l'énergie va être réfléchie (R), une autre absorbée (A) et une dernière va être transmise (Tr). Ces paramètres sont directement reliés aux propriétés de l'interface. La relation qui relie ces coefficients est la suivante [12] :

$$R + A + Tr = 1$$

Sont reportées sur la figure suivante (Figure II.10), les mesures de la réflectivité du silicium cristallin dopé P et dopé N qui a été effectué à température ambiante, et pour une gamme de longueur d'onde λ s'étalant de 200 à 1200 nm. L'analyse de ce spectre de réflexion nous permet d'identifier deux pics E_1 et E_2 respectivement localisés autour de λ =263 nm (4,7 eV) et de λ =361 nm (3,4 eV) [13].

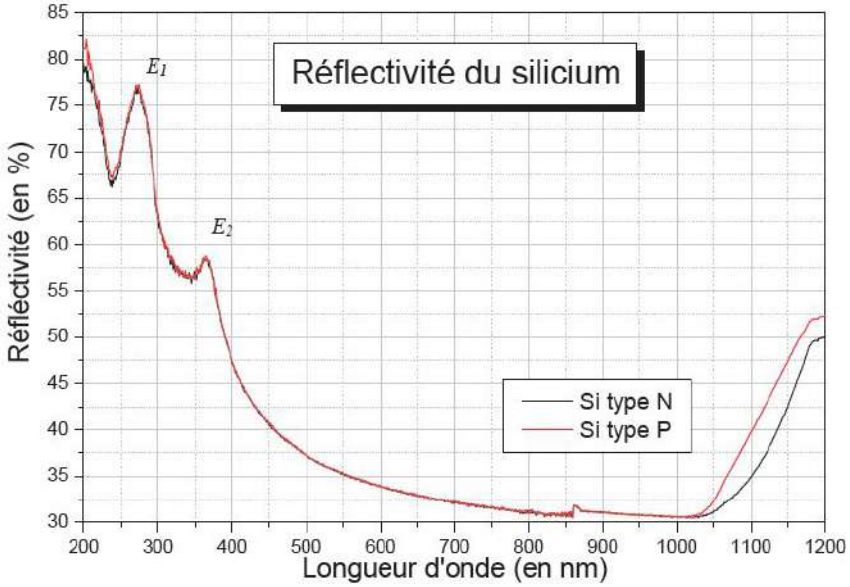


Figure II.10 : Réflectivité du silicium cristallin dopé P et dopé N en fonction de λ [13].

Dans le cas d'une onde incidente sur une interface air/silicium, les deux coefficients déterminant l'interaction laser/silicium sont le coefficient de réflexion R et le coefficient d'absorption α. Les valeurs de ces coefficients vont dépendre de la longueur d'onde [12].

Il ressort de la figure suivante (Figure II.11), que le coefficient d'absorption d'une valeur de $1{,}7.10^6$ à λ =200nm (6,2 eV), après le passage par deux pics à λ =263 nm et λ=361 nm, chute vertigineusement pour atteindre une très faible valeur dans l'infrarouge (basses énergies) à cause de l'absence de porteurs libres.

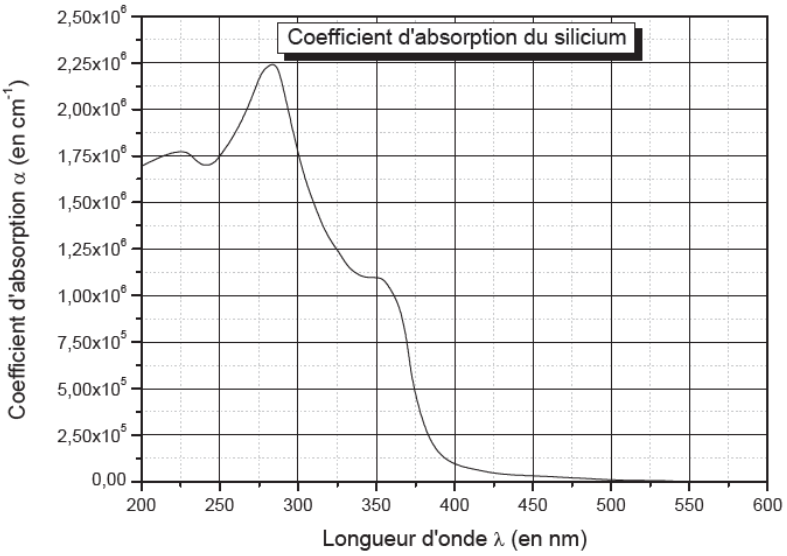


Figure II.11 : Coefficient d'absorption a du silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde [13].

II.2.3 Propriétés thermodynamique du silicium :

Les principales caractéristiques interviennent dans l'étude de l'interaction laser silicium sont : la densité ρ, la chaleur spécifique C_p, la conductivité thermique K_t et la chaleur latente de fusion L_f [13]. A température et à pression ambiantes, les valeurs de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique sont les suivantes [12]:

– chaleur spécifique : $C_p = 700\, J.kg^{-1}.K^{-1}$

– conductivité thermique : $K_t = 124\, W.m^{-1}.K^{-1}$

Le silicium cristallin fond à une température $T_f = 1687\, K$, et se vaporise pour une température $T_v = 3173\, K$.

II.2.4 Le silicium en tant que semi-conducteur :

Un semi-conducteur est un matériau dont la conductivité est comprise entre celle d'un isolant et celle d'un conducteur. Il possède les caractéristiques d'un isolant mais sa bande interdite est suffisamment faible pour qu'un électron de la bande de valence puisse passer dans la bande de conduction suite à un apport d'énergie réduit (figure II.12). Ce sont pour la plupart des éléments de la colonne IV du tableau périodique (C, Si, Ge) [12].

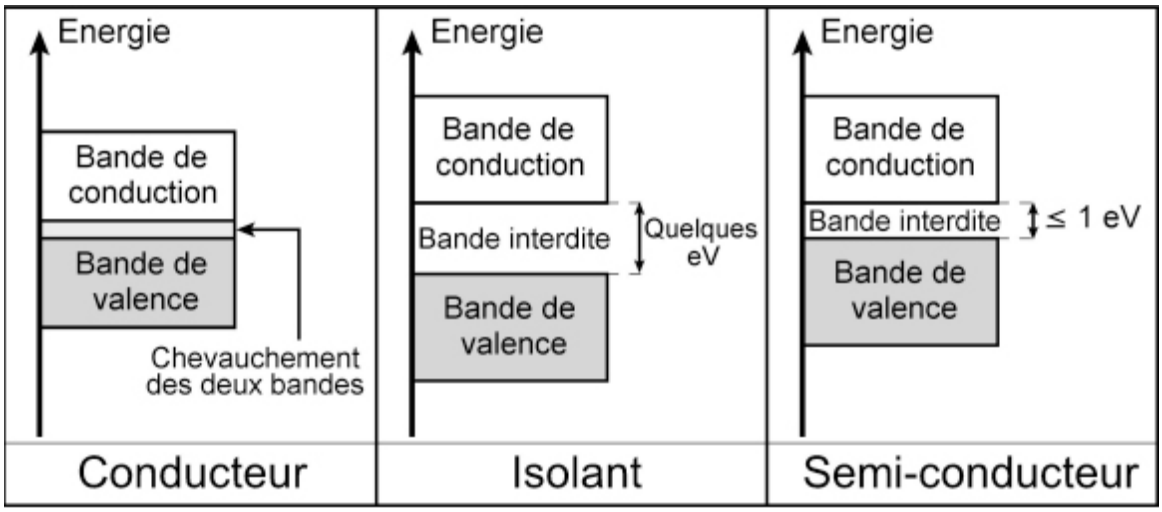


Figure II.12 : Théorie des bandes.

L'énergie de la bande interdite, qui sépare la bande de valence de la bande de conduction est appelée le gap [13].

Dans le cristal de silicium, la largeur de la bande interdite E_g est de 1,12 eV à 300 K [12]. Le silicium possède aussi deux gaps directs à plus forte énergie (E_1 = 3,6 eV et E_2 = 4,2 eV) qui influencent particulièrement son indice de réfraction complexe $\tilde{n} = n - ik$ [30] (influent sur ses propriétés d'absorption). Le diagramme d'énergie du silicium est représenté en figure II.13.

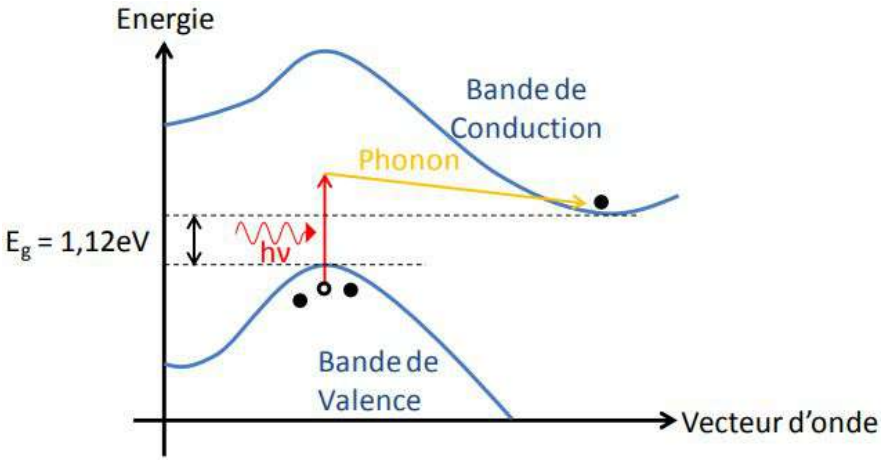


Figure II.13 : Diagramme d'énergie du Silicium et absorption indirecte d'un photon avec assistance d'un phonon [31].

La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction d'un photon laser avec le silicium [30].

Si un photon possédant une énergie hv plus importante que E_1 interagit avec un électron, la transition est directe : l'absorption du photon crée immédiatement une paire électron-trou. Dans le cas où son énergie est comprise entre E_g et E_2, l'absorption d'un phonon est nécessaire à la création d'une paire électron-trou. Si l'énergie du photon est inférieure à E_1, le photon n'est pas absorbé [12].

La figure II.14, montre que la profondeur d'absorption du silicium diminue de plusieurs ordres de grandeur lorsque la longueur d'onde passe de la valeur correspondant au gap indirect à celle du gap direct. La transition directe est la plus efficace et la profondeur de pénétration du laser n'est que de 10 nm. C'est donc pour des longueurs d'onde inférieures à 360 nm que le couplage laser-silicium sera le plus efficace.

On remarque sur cette même figure II.14 les variations importantes de l'indice réel et du coefficient de réflexion au voisinage des gaps directs du silicium.

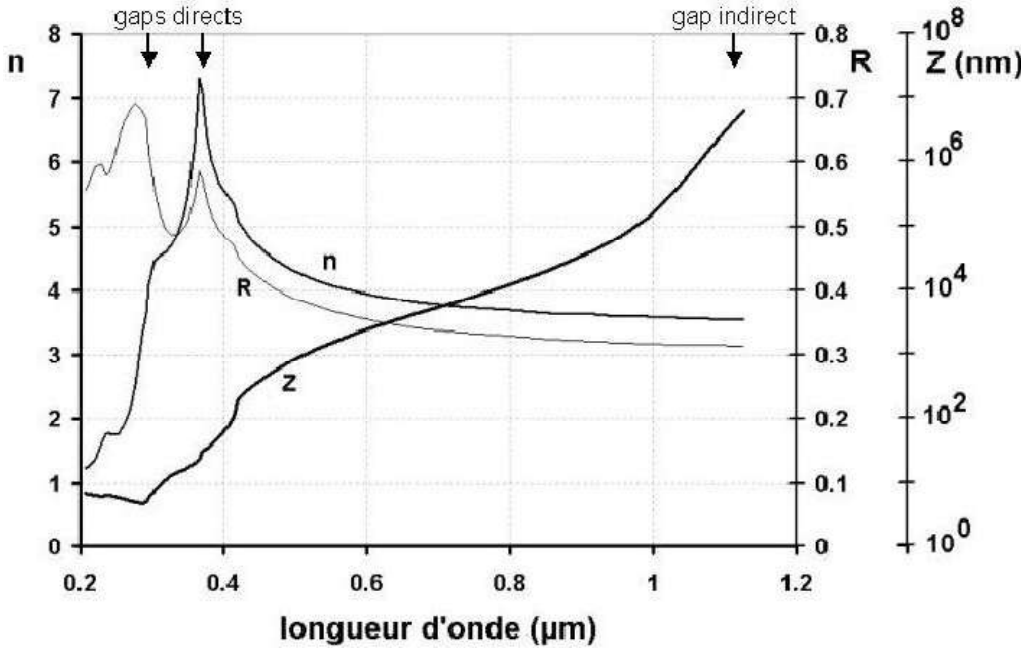


Figure II.14 : Indice de réfraction n, coefficient de réflexion R selon la normale, et profondeur d'absorption Z=1/α (nm) du Si cristallin en fonction de la longueur d'onde [32].

II.2.5 Mécanisme d'absorption et transfert de l'énergie :

Lorsque l'onde électromagnétique pénètre dans le cristal, elle va interagir avec les atomes et les électrons du matériau. Les photons vont alors transférer leur énergie aux électrons qui vont passer dans la bande de conduction avec un excès d'énergie d'autant plus important que la longueur d'onde est courte. La figure II.15 résume les principaux processus de relaxation de l'énergie absorbée dans le cas du silicium. Cet excès va être thermalisé par des collisions électrons-électrons. Le plasma d'électrons va atteindre une température importante. L'excès de paires électron-trou peut se recombiner seulement par recombinaison Auger. Celle-ci implique la création de nouveau porteurs chauds. Finalement les collisions électron-phonon vont transférer l'énergie du plasma au réseau ce qui va engendrer une augmentation de la température [33, 34].

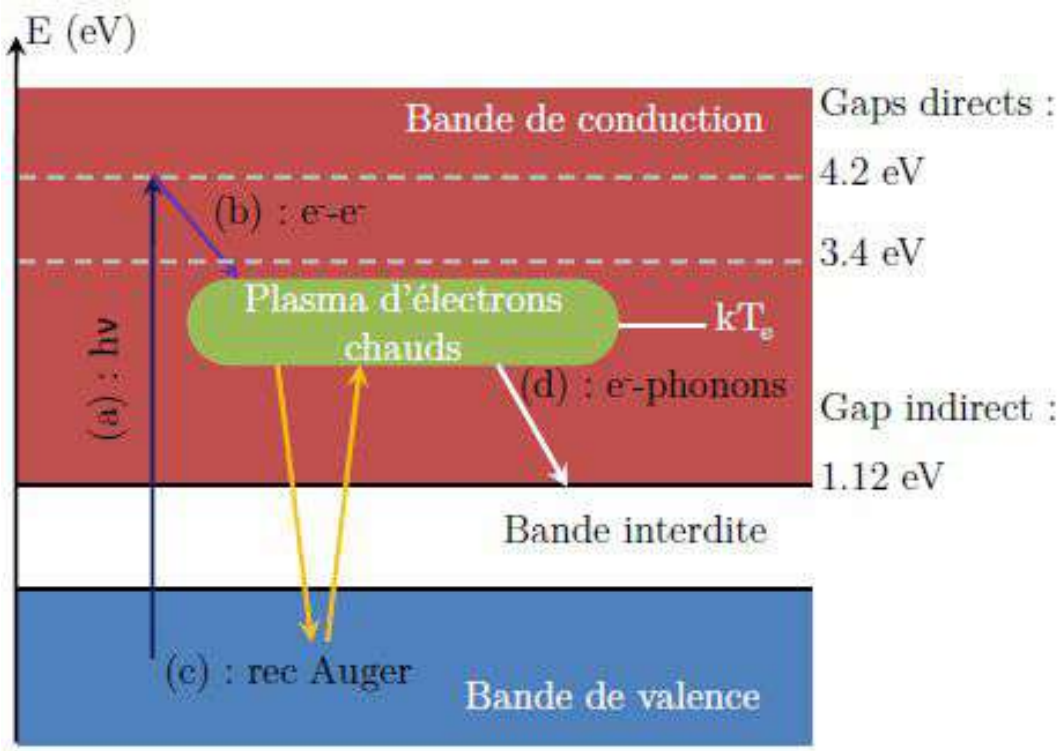


Figure II.15 : Schéma de principe de relaxation de l'énergie absorbée dans le silicium : (a) absorption du photon ($\tau = 10^{-13}$ s), (b) collisions e^--e^- ($\tau = 10^{-14}$ s), (c) recombinaisons Auger ($\tau = 10^{-9}$ s), (d) chauffage du réseau ($\tau = 10^{-12}$ s) [35].

II.2.6 Conduction de la chaleur :

Pour contrôler de manière précise l'épaisseur de la zone activée il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des mécanismes de base qui gouvernent la conduction de la chaleur dans un matériau. Lorsque les porteurs transmettent leur énergie au réseau, l'équation de la chaleur va régir l'accroissement de la température [12] :

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_v C_p T(z,t)\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(k\frac{\partial T(z,t)}{\partial z}\right) + S_{laser} \qquad (3)$$

C_p est la chaleur spécifique (en $J.K^{-1}.kg^{-1}$)

ρ_v est la densité du matériau (en $kg.m^{-3}$)

k est la conductivité thermique (en $W.K^{-1}.m^{-1}$)

$T(z,t)$ est la température en un point z, à un instant t

Ces paramètres dépendent de la nature du matériau ainsi que de sa température et de sa phase. Plus la durée d'impulsion est courte et plus l'énergie qu'il faut apporter au matériau pour atteindre le seuil de fusion est faible [12].

La durée de l'impulsion laser va également jouer un rôle sur la vitesse de propagation du front de fusion. Tant que la vitesse ne dépasse pas 10 $m.s^{-1}$, la solidification conduit à un processus d'épitaxie en phase liquide : le silicium se solidifie sous forme cristalline si le silicium sous-jacent est monocristallin, sinon il se solidifie sous forme poly-cristalline. Cependant si la vitesse dépasse environ 15 $m.s^{-1}$, l'épitaxie ne peut plus avoir lieu et le matériau reconstruit est amorphe. Les études menées sur ces processus mettent en évidence que les lasers nanoseconde sont un bon compromis entre diffusion thermique faible et une recristallisation bien ordonnée [36, 37].

Chapitre III :

« La Modélisation et la simulation numérique »

III.1 Introduction :

Une modélisation est complexe car différents phénomènes interviennent en même temps : le chauffage du substrat, le contrôle de la température du substrat, les écoulements, les réactions chimiques et les structures des films traités. Dans une première approche, ces phénomènes peuvent être considérés indépendants. Ils peuvent être couplés par la suite. La modélisation numérique se focalise généralement sur un aspect. On se penche sur la modélisation numérique du chauffage du substrat de silicium, ce dernier se fait essentiellement par un transfert de chaleur radiatif [38].

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'a en prédire son évolution. Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié [39].

La première partie de ce chapitre consiste en une recherche bibliographique sur la prise en main du logiciel COMSOL, à savoir ses fonctionnalités et ses performances. La deuxième partie consiste à modéliser la structure sous *Comsol* et comparer les résultats de la simulation numérique aux mesures expérimentales déduites de la littérature.

III.2 Présentation du logiciel Comsol Multiphysics :

Le logiciel Comsol, anciennement appelé Femlab, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est disposée d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques (électrique, thermique, mécanique, fluidique et chimique) [40].

En effet, cet outil de simulation numérique permet de traiter de nombreux problèmes couplés grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées (électrothermique, thermo-fluidique…etc.) décrits par les équations aux dérivées partielles [41]. Cette approche autorise une simulation numérique au plus près des systèmes réels [42].

Le logiciel *Comsol Multiphysics* possède un environnement de programmation (*Comsol Script*) dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits <<*solveurs*>>, pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendants du temps. En effet, les différentes étapes proposées par cet outil sont [42]:

1- La construction de la géométrie,
2- Le maillage de la géométrie : le maillage des domaines est automatique. Il est possible de raffiner globalement ou de manière localisée,
3- Définition de la physique : définition des constantes et des expressions,
4- Définition des propriétés des matériaux : une bibliothèque de matériaux est à disposition dans Comsol Multiphysics,
5- Les conditions aux limites : on impose des conditions sur certaines frontières,
6- Exploitation des résultats post-traitement : lorsque le programme est convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de *postprocessing*, qui permet d'analyser les résultats.

Différentes modules physiques existent sous Comsol, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures… Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est un des points forts de ce logiciel.

III.3 La modélisation numérique:

Une plaquette de silicium de 1 pouce de diamètre, comme le montre la figure III.1, est chauffée pendant une minute par un laser de 10 W qui se déplace radialement vers l'intérieur et vers l'extérieur, tandis que la plaquette tourne autour de son axe.

En supposant une bonne isolation thermique de l'environnement, la seule source de perte de chaleur provient de la surface supérieure par rayonnement aux parois de la chambre de traitement, qui sont supposées être à une température fixe de 20 °C.

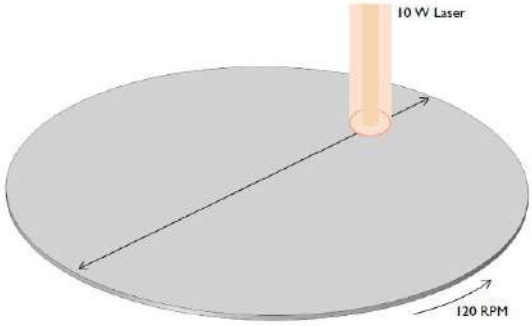


Figure III.1: wafer de silicium est chauffée avec un laser qui va et vient. La plaquette est étant également tourné autour de son axe.

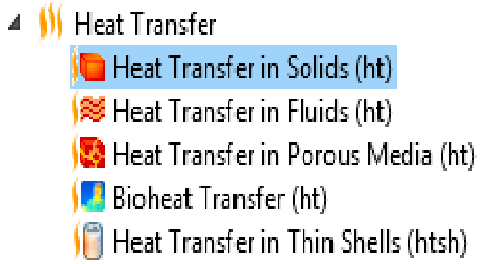
III.3.1 Prise en main du logiciel :

a). Model Wizard :

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous Comsol Multiphysics implique plusieurs étapes, Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modèle (Model Wizard) permet de définir toutes les étapes de la modélisation brièvement évoquées ci-dessus. Ces étapes sont les suivantes :

L'assistant Model Wizard permet de choisir le système de coordonnées pour le modèle, la physique pertinente au problème, et le type d'études que l'on souhaite effectuer (stationnaire ou en fonction du temps).

- *Le système de coordonnées choisis pour le modèle est 3D,*
- *Le module physique choisis est le module de transfert de chaleur,*



- *Dans le module transfert de chaleur, on a choisis le transfert de chaleur dans un solide,*
- *Le type d'étude choisi est en fonction du temps.*

Une fois le système de coordonné, le module physique et le type d'étude sont choisis, le constructeur du modèle apparaisse avec ses nœuds principales.

Le constructeur du modèle ou Modèle *builder* est l'outil où on va définir notre modèle qui est constitué des principaux nœuds : définition globale, le composé, l'étude et les résultats

Les phases suivantes de la modélisation sont communes aux autres logiciels de modélisation physiques. Dans l'ordre chronologique, il y a :

b). Dessin de la géométrie du système :

Afin de représenter le système de chauffage utilisé lors du chauffage on va simplifier les données du problème en ne conservant que les dimensions caractéristiques des éléments clés, à savoir la géométrie de la plaquette et la taille globale du substrat. Une structure de 3D est donnée sur la figure III.2.

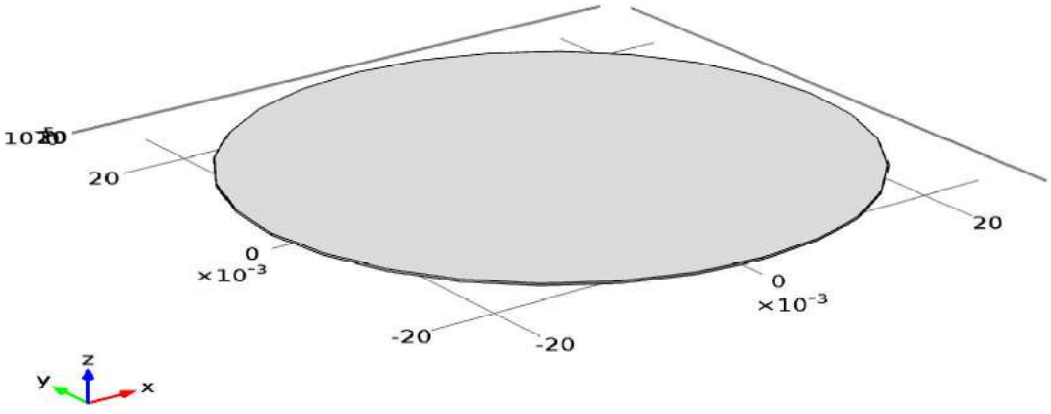


Figure III.2: La géométrie du substrat du silicium.

c). Choix du matériau :

Une bibliothèque de matériaux comportant plus de 1 400 matériaux et 15 000 propriétés est disponible. Elle inclut l'import de fichiers issus de la base de données *MatWeb*, soit plus de 59 000 matériaux, des polymères aux céramiques, en passant par les métaux et les semi-conducteurs. Le matériau choisis pour cette étude comme nous l'avons indiqué précédemment est le silicium.

d). Définition globale:

Après la définition de la géométrie du système étudié et le matériau utilisé, il faut introduire tous les paramètres nécessaires pour l'étude concernant le substrat du silicium et le faisceau laser. Comme c'est indiqué dans le tableau des paramètres suivant.

Tableau III.1 : Tableau des paramètres introduits.

Parameters

Parameters

Name	Expression	Value	Description
r_wafer	1[in]	0.025400 m	Wafer radius
thickness	275[um]	2.7500E-4 m	Wafer thickness
v_rotation	120[rpm]	2.0000 Hz	Rotational speed
period	10[s]	10.000 s	Time for laser to move ba...
r_spot	2.5[mm]	0.0025000 m	Radius of laser spot size
emissivity	0.8	0.80000	Surface emissivity of wafer
p_laser	10[W]	10.000 W	Laser power

e). Fonctions à créer dans COMSOL:

Le faisceau laser est modélisé comme une source de chaleur dans le plan (x,y) avec un profil gaussien. Pour configurer le profil de chauffage, le modèle utilise les fonctions d'impulsion gaussienne intégrées, qui imposent que l'intégrale sous la courbe soit égale à l'unité.

- **La Gaussienne :** $g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ (3)

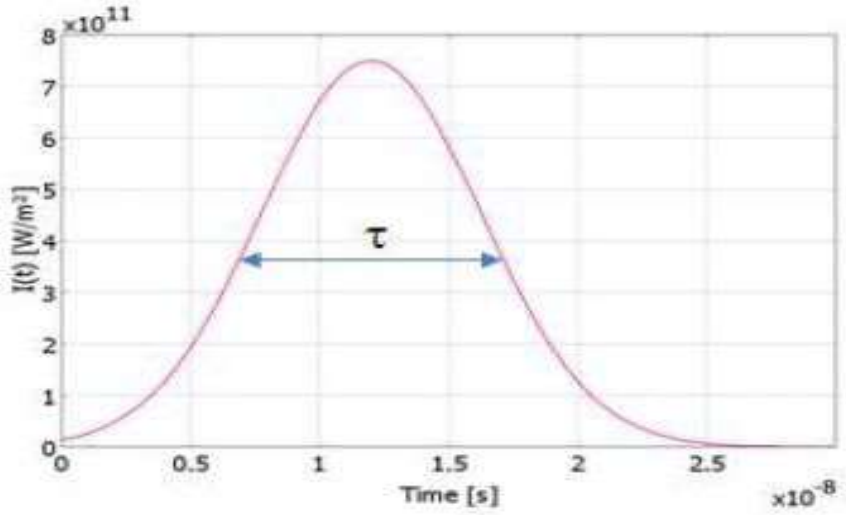


Figure III.3: Forme temporelle de l'impulsion laser.

- **Périodique triangulaire :**

Le point focal est déplacé en utilisant une forme d'onde triangulaire pour définir sa position le long de l'axe x au cours du temps.

Amplitude : Rayon du wafer

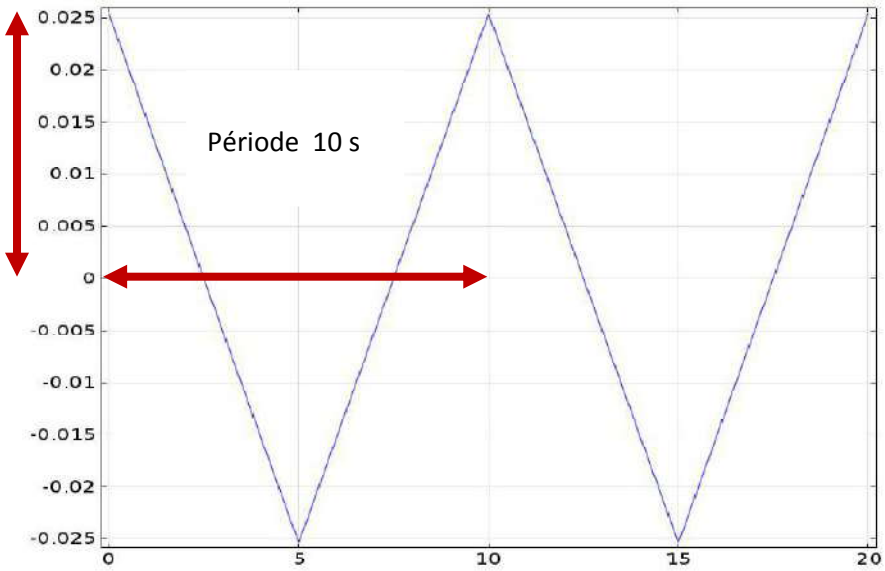


Figure III.4: Forme d'onde triangulaire.

- **Analytique :** La définition de source de chaleur utilisée dans notre modèle thermique est : $Q(x,y) = P_{laser}.gp1\big(x - wv1(t)\big).gp1(y)$ (4)

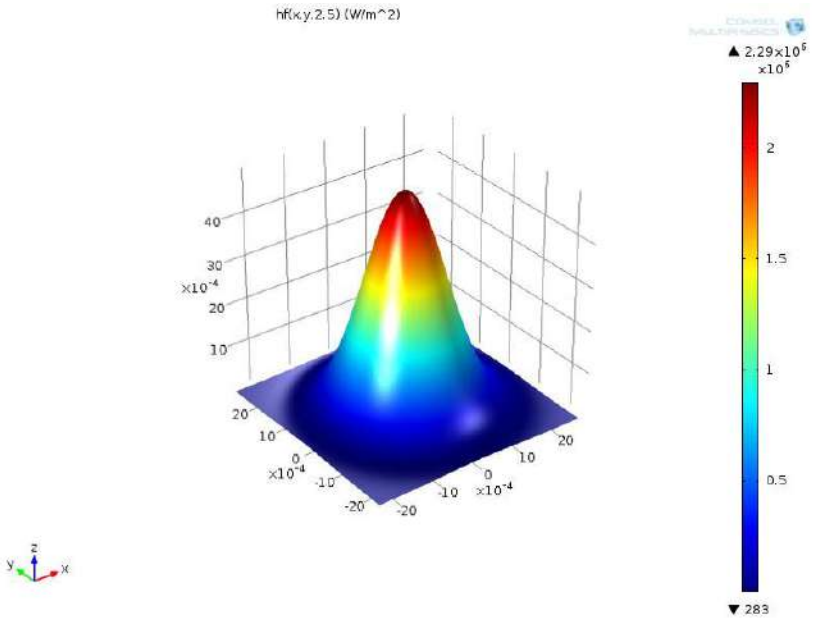


Figure III.5 : Source de chaleur gaussienne (W/m^2).

f). Mise en place des conditions aux limites et initiales dans chaque module avec le couplage éventuel de ceux-ci:

- **Module de transfert thermique :**

Dans un solide, l'équation de transfert de la chaleur s'écrit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u(\nabla \mathrm{T}) = \mathrm{Q} + \overrightarrow{\nabla \mathrm{T}}(\lambda \nabla \mathrm{T}) \qquad (5)$$

Avec:

$\rho(Kg/m^3)$: Masse volumique du matériau,

$C_p(J/kg.K)$: La chaleur massique à pression constante du matériau,

$\lambda(W/m.K)$: La conductivité thermique du matériau,

$\overrightarrow{\nabla \mathrm{T}}$: Le gradient de température.

Q (W) : Le terme source de chaleur interne.

Tout d'abord, inclure la vitesse de rotation de la plaquette dans l'équation de transfert de chaleur régissant.

On attribue à la plaquette une vitesse de rotation globale dans l'équation de transfert de chaleur qui la régit.

$$u = u_{trs}$$

Spécifiez le vecteur u_{trs} comme:

Velocity field:

u_{trans}	-y*v_rotation	x	m/s
	x*v_rotation	y	
	0	z	

- **Hypothèses:**

L'émissivité de la surface de la plaquette est d'environ 0,8. A la longueur d'onde de fonctionnement du laser, on suppose que l'absorptivité est égale à l'émissivité. La charge thermique due au laser est ainsi multipliée par l'émissivité. En supposant également que le laser fonctionne à une longueur d'onde à laquelle la plaquette est opaque, aucune lumière ne passe à travers la plaquette. Par conséquent, toute la chaleur du laser est déposée à la surface.

• Faisceau laser (Wave Optics) non modélisé

• Source de chaleur : gaussienne appliquée en surface

• Wafer opaque ⟶ Emissivité = Absorptivité = 0,8

- **Conditions aux limites :**

1. Isolation thermique : $-n.(-k.\nabla T) = 0$, (pour tous les domaine 1.2.3.4.5.6)
2. Flux de chaleur imposé $-n.(-k.\nabla T)$= q, avec $q = \varepsilon.Q(x,y,z)$ sur la surface, domaine 4,
3. Rayonnement de surface à l'ambiant : $-n.(-k.\nabla T) = \varepsilon.\sigma.S(T_{amb}^4 - T_\infty^4)$, domaine 4,
4. Température initiale imposée, égale à la température d'environnement $T_{int} = T_{amb}$=293.15 K.

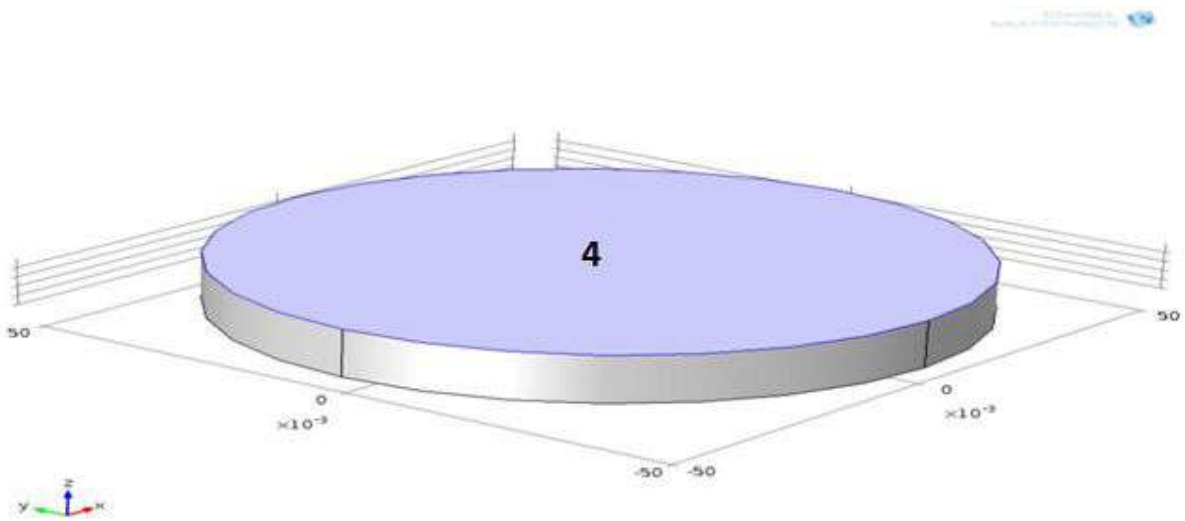


Figure III.6 : Géométrie du modèle étudie avec les limites considérées.

g). Géométrie du maillage:

La géométrie du maillage employé dans notre modèle est présentée sur la Figure III.7. Nous avons choisi un maillage triangulaire de taille fine progressif dans la direction de l'axe (x,y).

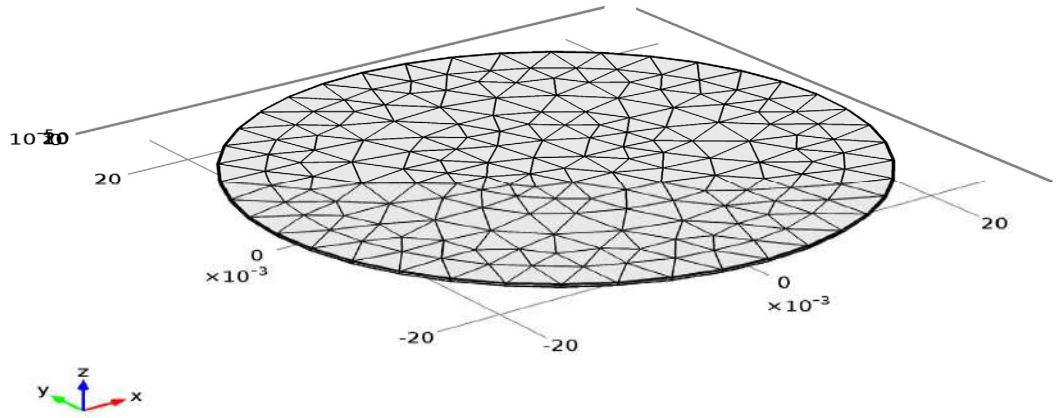


Figure III.7 : Maillage du modèle.

III.3.2 Résultats des Calculs et interprétation:

Les calculs ont été effectués en utilisant les paramètres de la plaquette du silicium ainsi le laser énoncés précédemment, Les pas de temps et d'espace ont été optimises et sont identiques quelle que soit la puissance.

Les résultats de la simulation sont donnés sous forme de graphe qui pressente d'une part, l'évolution de la température de la surface en fonction du temps, et d'autre part un tracé de flèche pour le champ de vitesse décrivant la rotation de la plaquette (Figure III.8).

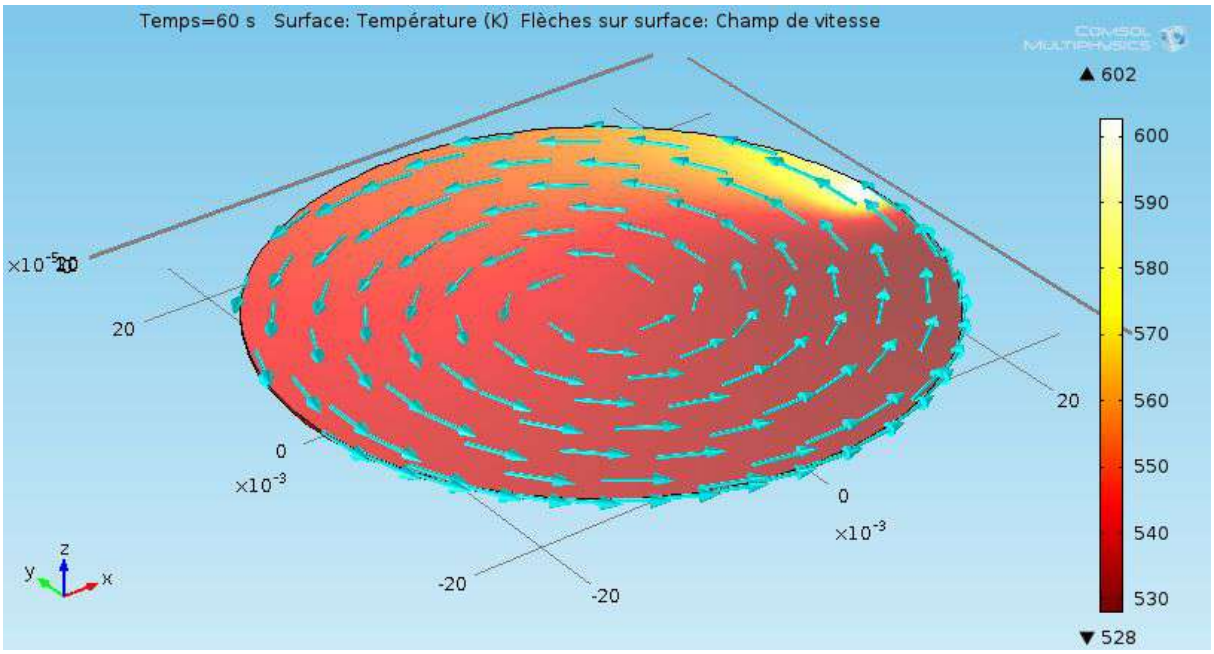


Figure III.8 : Variation de température à travers la plaquette (wafer). Le tracé de la flèche décrit la vitesse de la plaquette (wafer).

Le deuxième tracé par défaut (Figure III.9) montre la température de l'iso-surface et un tracé en flèche du flux de chaleur total.

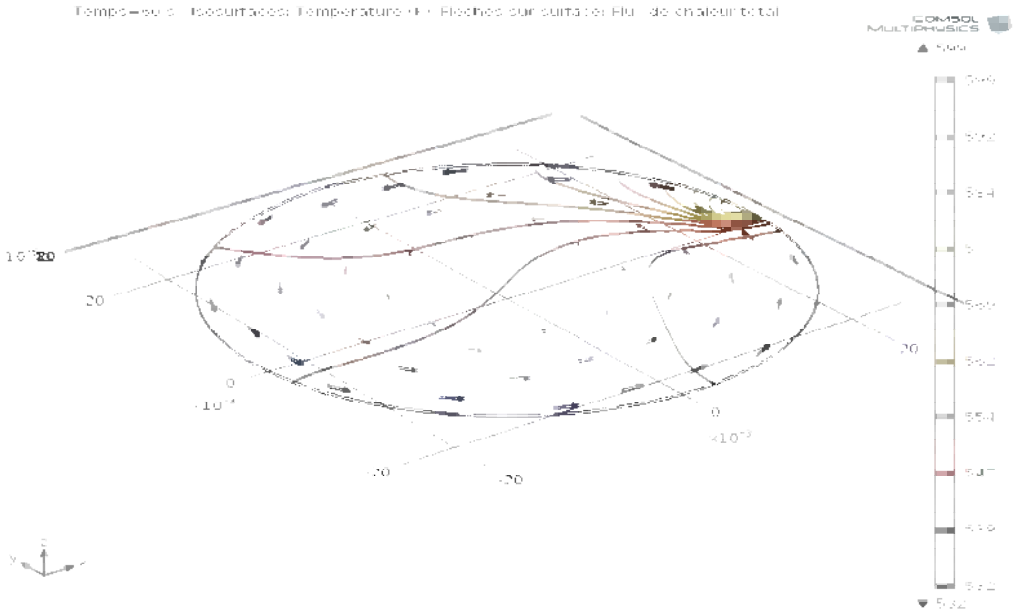


Figure III.9: Variation des isothermes à travers la surface du wafer et le flux de chaleur totale présenté par des flèches**.**

La figure suivante (Figure III.10) montre les températures maximales, minimales et moyennes de la plaquette pendant le processus de chauffage par laser.

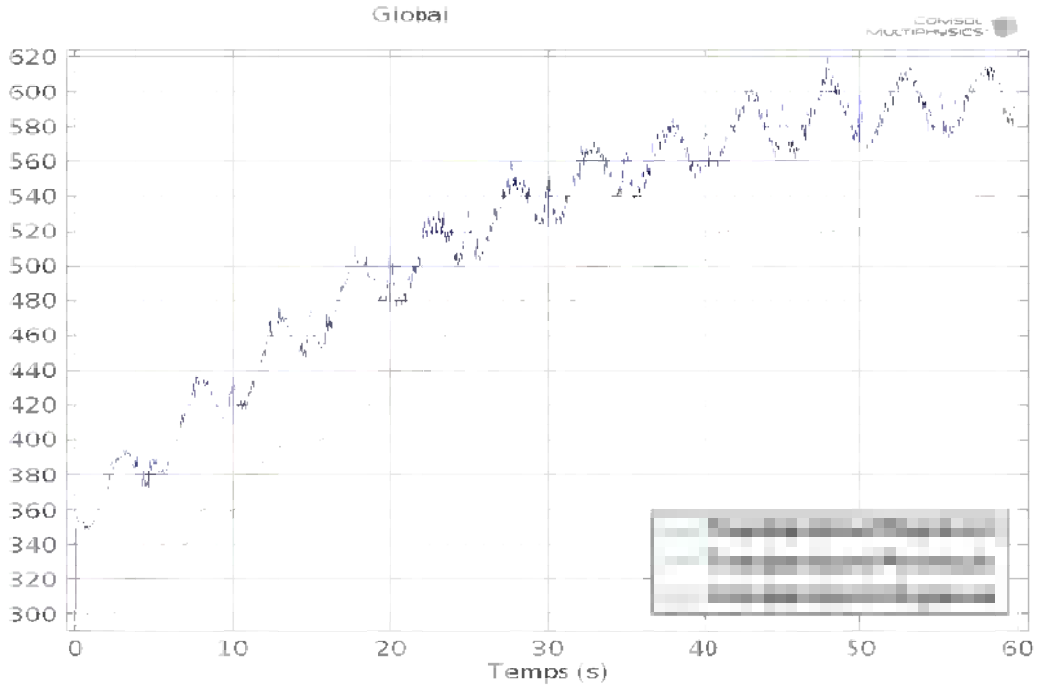


Figure III.10 : Températures maximales, minimales et moyennes de la plaquette en fonction du temps.

Si on fait la comparaison entre la figure III.9 et la figure III.10, on remarque que la distribution de la température de la plaquette de silicium n'est pas uniforme sur toute la surface.

La figure III.11 représente la différence entre les températures maximale et minimale sur la plaquette, avec $\Delta T = T_{max} - T_{min} \approx 50$ K.

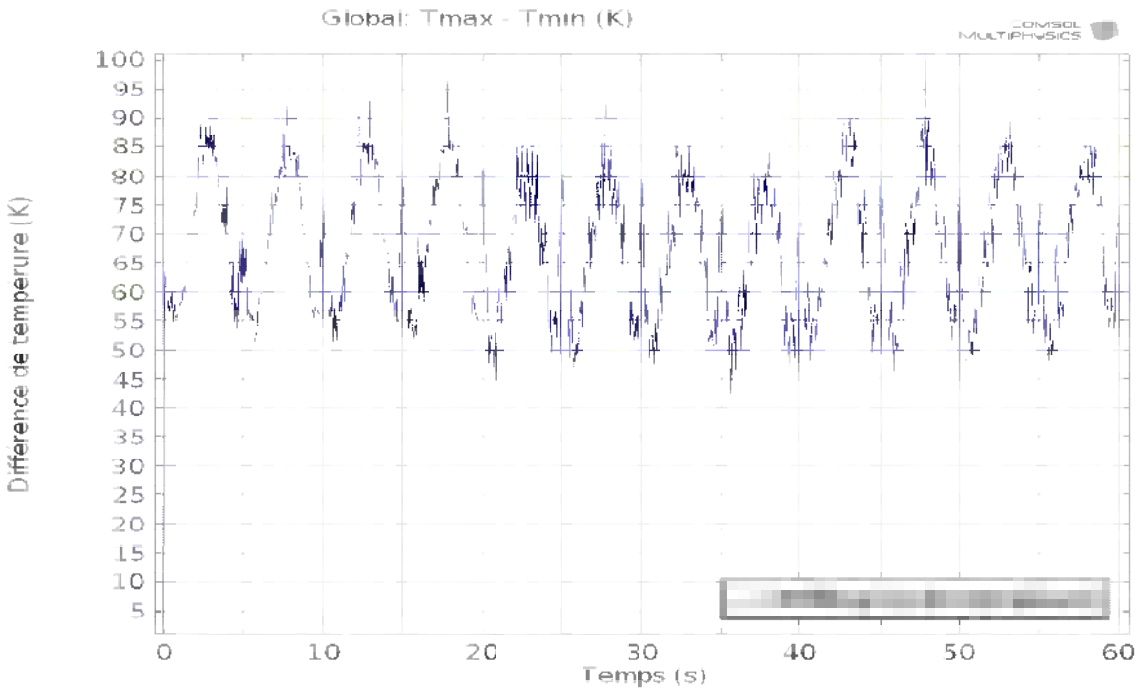


Figure III.11 : Différence entre les températures maximale et minimale sur la plaquette.

Les mesures expérimentales disponible dans la littérature et sur lesquelles nous sommes basés pour valider notre modèle sont des mesures de températures de chauffage d'un substrat de silicium par lasers CO_2 dans l'infrarouge lointain [43].

Les mesures expérimentales utilisées pour cette étude ont été mesurées in situ en utilisant la radiométrie infrarouge. L'échantillon utilisé pour le chauffage, c'est une wafer de silicium de diamètre 5 cm et d'épaisseur 10 mm, les paramètres de laser utilisé sont : $P = 4{,}6\ W$, et le rayon du faisceau laser est 216 μm, alors que tous les autres paramètres ont été tenus les mêmes. C'est à partir de ces mesures expérimentales que nous avons mené une étude sur la validation des hypothèses et des paramètres de notre modèle (figure III.12).

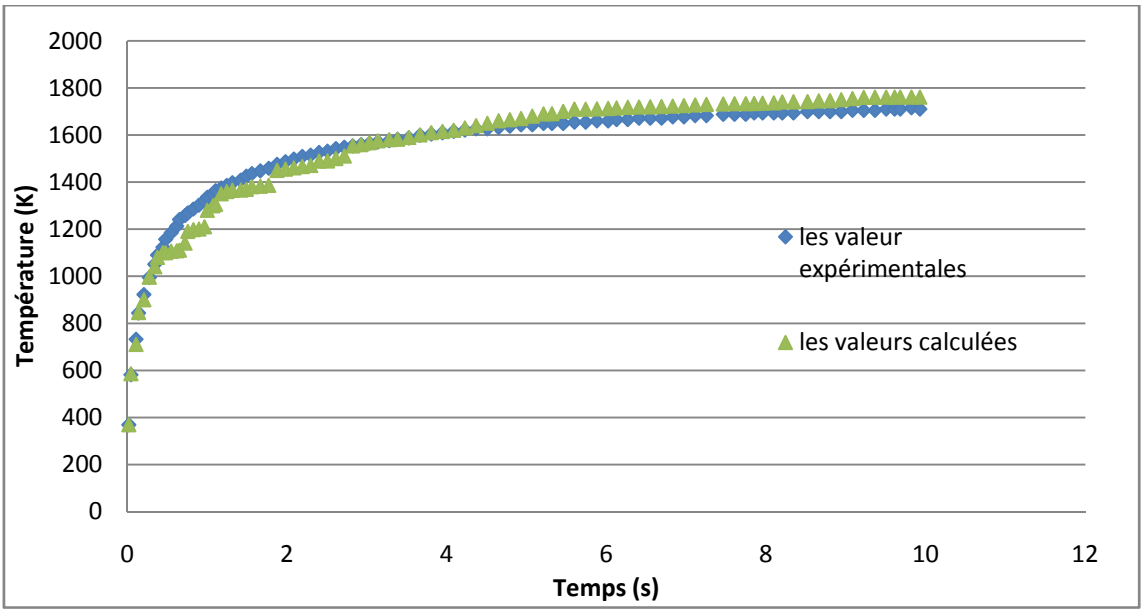


Figure III.12 : Evolution au cours du temps du profil de température numérique et expérimentale [43] en un point de mesure à la surface de la plaquette du silicium.

A partir de la figure III.12 qui représente la comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées par notre simulation, on remarque la faible influence de la définition des paramètres utilisés dans notre modèle sur les résultats obtenus (variation de la température).

- **Interprétation**

Le profil de chauffage introduit certaines variations de température importantes, car le laser dépose la même quantité de chaleur sur une surface balayée totale plus grande lorsqu'il est focalisé à l'extérieur de la plaquette comme c'est montré sur la figure III.8. Les isothermes indiqué sur la figure III.9 confirme le non uniformité de la température sur la surface du wafer, alors que la confrontation des mesures de la température calculées par notre simulation avec les mesures de températures expérimentales est en bon accord, donc on peut confirmer que les paramètres utilisés dans la géométrie, sont pas la cause de la non uniformité de la température sur la surface de plaquette.

Alors, on peut constater qu'une modification intéressante de ce modèle consiste à introduire les propriétés thermo-physiques et la réflectivité en fonction de la température dans notre modèle pour savoir contrôler un chauffage plus uniforme à travers toute la surface.

Dans ce travail de mémoire, nous avons mené une étude numérique du processus de chauffage d'une wafer de silicium monocristallin par un laser qui se déplace dans le sens radiale de la surface avec la rotation de la plaquette autour son axe.

Ce travail porte sur la modélisation du processus thermique du chauffage par laser d'une wafer de silicium cristallin, la simulation a été faite en utilisant le logiciel *COMSOL Multiphysics* basé sur la méthode des éléments finis, et consistant à résoudre l'équation de la chaleur avec un terme source volumique relatif à l'absorption du faisceau laser. Des hypothèses ont été proposées et des fonctions ont été créées dans *comsol* afin de mener bien à la modélisation.

Cette simulation nous a permets d'évaluer la température atteinte en fonction des paramètres physiques variables intervenant dans l'équation de la chaleur, parmi ces paramètres nous pouvons citer la puissance laser et la vitesse de rotation de la plaquette.

Le profil de chauffage observé sur la surface du wafer introduit certaines variations de température importantes, car le laser dépose la même quantité de chaleur sur une surface balayée totale plus grande lorsqu'il est concentré à l'extrémité de la plaquette. Malgré que le résultat obtenu n'était pas satisfaisant par rapport à l'uniformité de la distribution de la température au niveau de la surface de la plaquette, nous pouvons dire que l'évolution temporelle de la température calculé par notre modèle a donné de bon résultat après confrontations avec les mesures expérimentales déduites de la littérature.

Dans notre simulation, nous avons supposé que la réflectivité du silicium était constante, de même pour les propriétés thermo physique ce qui n'est pas nécessairement juste puisque ces paramètre dépendent fortement de la température. Une modification intéressante dans ce modèle consiste à la prise en compte de la thermodépandance de la réflectivité et les propriétés thermo physique tel que l'indice de réfraction, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la masse volumique.

PAI	Préamorphistion ionique, technique utilisée pour éviter l'effet de canalisation. Elle consiste à amorphiser partiellement la couche superficielle du silicium sur quelques dizaines de nanomètres de profondeur. En bombardant le substrat de silicium, avant l'implantation des impuretés (dopants par exemple le bore ou germanium), avec des ions lourds de même structure électronique externe que le silicium. On dit Silicium préamorphisé par implantation ionique.
Silicium Amorphe	Désigne un silicium qui n'est pas cristallin c'est à dire dans lequel les atomes ne sont pas rangés de façon ordonnée.
Laser KrF	Un laser à fluorure de krypton, est un type particulier de laser à excimère.
laser à excimère	Un laser à excimère, parfois appelé laser à exciplexe, est un type de laser ultraviolet couramment utilisé en chirurgie oculaire et en photolithographie dans l'industrie des semi-conducteurs.
Le laser Nd:YAG	(Acronyme du nom anglais : *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) ou grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme ($Nd:Y_3Al_5O_{12}$) est un cristal utilisé comme milieu amplificateur pour les lasers utilisant des milieux solides.
Laser He-Ne	Un laser à gaz, ou le milieu amplificateur est un mélange de gaz néon et hélium.
Forme Gaussienne	C'est une fonction en exponentielle de l'opposé du carré de l'abscisse.
LPCVD	Le dépôt chimique de films minces en phase vapeur réalisée à pression sous-atmosphérique.
L'ellipsométrie	C'est une technique optique de caractérisation et d'analyse de surface, fondée sur le changement d'état de polarisation de la lumière, par réflexion de la lumière sur la surface plane d'un échantillon.

La spectroscopie Raman	Méthodes *non destructives* d'observation et de caractérisation de la composition moléculaire et de la structure externe d'un matériau, qui exploite le phénomène physique selon lequel un milieu modifie légèrement la fréquence de la lumière y circulant. Ce décalage en fréquence dit l'effet Raman correspond à un échange d'énergie entre le rayon lumineux et le milieu, et donne des informations sur le substrat lui-même. La spectroscopie Raman consiste à envoyer une lumière monochromatique sur l'échantillon et à analyser la lumière diffusée.
Verre borosilicate	Composé à 80 % de silice, présente un faible coefficient de dilatation et se distingue donc par une bonne résistance aux chocs thermiques : 500 °C sur une courte durée, une résistance 3 fois supérieure à celle du verre courant !
Charbons bitumineux	C'est un charbon assez léger, plutôt tendre et poreux, contenant une substance huileuse grasse improprement qualifiée de « bitume », ce qui pourrait le faire classer dans les roches mères d'autant que c'est le type de charbon réputé libérer le plus de grisou (mélange gazeux explosif).
La houille	C'est une roche carbonée sédimentaire correspondant à une qualité spécifique de charbon.
Les boues	Déchets, résidus liquides.
Acronyme	C'est un mot formé des initiales ou des éléments initiaux de plusieurs mots, éventuellement composés, et se prononçant comme un mot normal et non pas lettre par lettre.
Intrinsèque	C'est un matériau dont le comportement électrique ne dépend que de sa structure, et non de l'adjonction d'impuretés comme dans le cas du dopage.
Phonon	En physique de la matière condensée, un phonon (du grec ancien *phonê*, la voix) désigne un quantum d'énergie de vibration dans un solide cristallin.

Quantum	Représente la plus petite mesure indivisible, que ce soit celle de l'énergie, de la quantité de mouvement ou de la masse.
La recombinaison Auger	C'est une recombinaison non radiative, l'énergie libérée par la recombinaison d'une paire électron-trou est transmise à un autre électron ou à un autre trou qui se trouve alors dans un état excité respectivement dans la bande de conduction ou la bande de valence. ce porteur perd en suite son énergie par interaction avec le cristal ou les autres porteurs libres.
L'épitaxie en phase liquide	Utilise le principe de la méthode de Czochralski. Le substrat est mis en contact avec une phase liquide sursaturée en l'élément voulu, qui se précipite et cristallise sur le substrat. La phase mère est liquide. Le substrat est mis en contact avec un bain liquide de composition adéquate à une température légèrement inférieure à celle de l'équilibre liquide-solide. La croissance s'opère par solidification pour donner naissance à une phase condensée ou cristal.
In situ	C'est une locution latine qui signifie sur place ; elle est utilisée en général pour désigner une opération ou un phénomène observé sur place, à l'endroit où il se déroule (sans le prélever ni le déplacer), par opposition à ex situ.
Galets	Un galet est un fragment de roche à l'aspect arrondi, lisse. Les galets exploités à Cayeux sont constitués à plus de 99 % de silice pure.
Pouce	1 pouce = $2{,}54.10^{-2}$ m.
Pm	Un picomètre est une unité de longueur du système métrique, équivalent à 1 pm = 10^{-12} m.
Å	Un ångström, est une unité de longueur valant 0,1 nanomètre, soit 10^{-10} mètre.

[1] : N. SEMMAR, E. MILLON, D. SEMMAR : « *Recristallisation du silicium dopé par faisceau laser pulsé : Etude numérique du couplage champ thermique et diffusion du bore en extrême surface (< 50 nm) »*. ResearchGate, article en ligne. 2015.

[2] : M. DARIF, N. SEMMAR, Actes (CD-ROM) JITh, Djerba 2009.

[3] : J. MARTAN, N. SEMMAR, and O. CIBULKA, *Journal of Applied Physics* 103, 2008.

[4] : M. DARIF et N. SEMMAR, « *Numerical Simulation of Si Nanosecond Laser Annealing by COMSOL Multiphysics*», COMSOL Conference Hannover, Allemagne, 2008.

[5] : M. HOSSAIN et M. H. CHOWDHURY, « *Heat Transfer Simulations for Pulsed Laser Annealing of Silicon Thin Film »*. Conference Paper in Midwest Symposium on Circuits and Systems, Columbus. P 732-735, August 2013.

[6] : S.J MOON, L. MINGHONG et C.P GRIGOROPOULOS, « *Heat Transfer and Phase Transformations in Laser Annealing of Thin Si Films »,* Journal of Heat Transfer, Vol. 124 (253-264) , APRIL 2002.

[7] : N. SEMMARA, M. DARIFA, E. MILLONA, A. PETITA, H. ETIENNEB, P. DELAPORTEC, « *Excimer Laser Activation of Ultra-Shallow Junctions in Doped Si: Modeling, Experiments and Real Time Process Monitoring* ». International Symposium on High Power Laser Ablation, AIP Conf. Proc. 1464, p.298-309, 2012.

[8] : Z. YUAN, Q. LOU, J. ZHOU, J. DONG, Y. WEI, Z. WANG, Z. HONGMING et W. GUOHUA, « *Numerical and experimental analysis on green laser crystallization of amorphous silicon thin films* ». Optics & Laser Technology 41, 380–383, 2009.

[9] : F. BOUFELGHA, A. BOUAINE et L. AOMAR, « *CRISTALLISATION DES COUCHES MINCES DE SILICIUM AMORPHE (a-Si) PAR LE LASER EXCIMÈRE KrF ».* Article, pC11. 2009.

[10] : X. Xu, C. P. GRIGOROPOULOS, R. E. RUSSO, « *Transient Temperature During Pulsed Excimer Laser Heating of Thin Polysilicon Films Obtained by Optical Reflectivity Measurement »*. Journal of Heat Transfer, vol. 117, (p.17-24), FEBRUARY 1995.

[11] : Z. SAIDBACAR, « *Élaboration et caractérisations du silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe* ». Thèse de doctorat, Université Paris-SUD. 2012

[12] : Y. LARMANDE, « *Réalisation de jonctions ultra-minces par recuit laser : application aux détecteurs UV* ». Thèse de Doctorat, Université de la méditerranée : Ecole doctorale de physique et science de la matière, Aix-Marseille II, 2010.

[13] : S. Coutanson, « *Étude Du Dopage Laser En Phases Solide Et Liquide : Application À La Formation De Jonctions Ultra-Minces Dans Le Silicium* » Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I - France, 2008.

[14] : M. NEKOUS, « *Elaboration du silicium à partir du sable du désert Algérien* ». Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2013.

[15] : R. BENRABBAH, « *Développement de procédés plasma pour l'élaboration et la caractérisation du silicium photovoltaïque* ». Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie- Paris, France, 2015.

[16] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Silicone#Fabrication.

[17] : M. BELKHAYAT : « *Les fours de cristallisation du silicium photovoltaïque* ». Encyclopédie de l'énergie. Disponible sur : < http://encyclopedie-energie.org/articles/les-fours-de-cristallisation-du-silicium-photovolta%C3%AFque#_ftn5>. [Consulté Février 2018].

[18] : ECOINFO. La fabrication du silicium [en ligne]. Disponible sur : < https://ecoinfo.cnrs.fr/2010/10/20/3-fabrication/>, 2010. [Consulté Mars 2018].

[19] : A. TANDJAOUI : « *Solidification dirigée du silicium multi-cristallin pour les applications photovoltaïques : caractérisation in situ et en temps réel par imagerie X synchrotron* ». Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille-France, 2013.

[20] : https://www.ingenieurs.com/documents/cours/le-silicium-533.php.

[21] : K. KHEFIF, « *Elaboration et caractérisation optique des semi-conducteurs amorphe et nanocristallins de silicium »*. Thèse de doctorat, Université d'Oran. 2015.

[22] : A. BENMEDDOUR, « *Etude et simulations numériques des contraintes thermomécaniques dans le silicium photovoltaïque* ». Thèse de doctorat, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE, 2010.

[23] : T. PENGAM, Couches minces : les wafers de silicium. Rapport de recherche, 2ème année master. Université de Nantes. 2011.

[24] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Wafer.

[25] : http://lachirurgielaserpourlesyeux.e-monsite.com/pages/ii-le-laser/a-qu-est-ce-que-le-laser.html

[26] : «Les lasers» D.DANGOISSE, D.HENNEQUIN, V.ZEHNLE-DHAOUI, [DUNOD], (1998).

[27] : http://optique ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/Grain_OPI_fr_M01_C01.html

[28] : http:// lachirurgielaserpourlesyeux.e-monsite.com / pages / ii-le-laser / b-les utilisations-du-laser-dans-la-vie-quotienne.html

[29] : L. VAN BELLE, « *Analyse, Modélisation Et Simulation De L'apparition De Contraintes En Fusion Laser Métallique ».* Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon –France, 2013.

[30] : M. HERNANDEZ, « *Procédé laser de réalisation de jonctions ultra-minces pour la microélectronique silicium : étude exprérimentale, modélisation et tests de faisabilité »*. Thèse de doctorat, université Paris XI UFR scientifique d'orsay-France, 2005.

[31] : A. MORISSET, « *Interaction laser-silicium et transport fibré pour le test de circuits intégrés par stimulation photoélectrique non-linéaire* ». Thèse de doctorat, Université BORDEAUX 1-France, 2013.

[32] : PALIK. *Handbook of Optical, Constants and Solids*, volume 4 of *L'électronique ultime*. Academic Press, 1998.

[33] : L.C FELDMANN and J.W MAYER, « *Laser Processing of Thin Films and Microstructures »*, volume 3 of *Materials Science*. Springer Series, 1987.

[34] : M. VON ALLEN, « *Laser-Beam Interraction with materials, Physical Principles and Applications »*, volume 2 of *Materials Science*. Springer Series, 1987.

[35] : S.A AKHAMANOV et AL, « *Non linear diagnostics of laser-excited surfaces »*. Harwood Academic Publishers, 1989.

[36] : M. HERNANDEZ et AL, « *Laser thermal processing for ultra shallow junctions formation : numerical simulation and comparison with experiment* ». *Appl. Surf. Sci.*, 208-209 :345–351, 2003.

[37] : E. FOGARASSY et AL, « *Recent advances in Laser Processing of Materials »*. Materials Science. Elsevier Ltd.

[38] : A. SOVEJA, « Modélisation du processus de texturation par faisceau laser : approches expérimentale et numérique ». Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2007.

[39] : N. FEKIRI, « *Transferts de chaleur dans des éléments micro et nano structurés : Simulation et expérimentation par thermographie infrarouge et microscopie SThM »*. Rapport de stage, Master Mécanique des fluides et Energétique. Université de Lorraine, Nancy-France, 2013.

[40] : N. BOUCHONNEAU, « *Etude du comortement des systèmes d'isolation thermique pour les grandes profondeurs d'eau* ». Thèse de doctorat, université de Franche-Comté, Mars 2007.

[41] : S. SAVARESE, Modélisation avec Comsol Multiphysics 3.4, France 2008.

[42] : C. TAHANOUT, « *Etude, simulation électrothermique d'un micro capteur de gaz à base d'oxyde semi-conducteur* ». Mémoire de magister, université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2010.

[43] : S.T YANG, M.J MATTHEWS, S. ELHADJ, D. COOKE, G.M GUSS, V.G DRAGGOO et P.J WEGNER, «*Comparing the use of mid-infrared versus far-infrared lasers for mitigating damage growth on fused silica*», APPLIED OPTICS / Vol. 49, No. 14 / 10 May 2010.