



Caractérisation et simulation de défauts induits par laser 1340 nm continu sur la technologie 28FDSOI en analyse de défaillance électrique

Maxime Penzes

► To cite this version:

Maxime Penzes. Caractérisation et simulation de défauts induits par laser 1340 nm continu sur la technologie 28FDSOI en analyse de défaillance électrique. Autre. Université de Bordeaux, 2018. Français. NNT : 2018BORD0028 . tel-01783955

HAL Id: tel-01783955

<https://theses.hal.science/tel-01783955>

Submitted on 2 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

SPÉCIALITÉ Electronique

Par Maxime PENZES

**Caractérisation et simulation de défauts induits par
laser 1340 nm continu sur la technologie 28FDSOI en
analyse de défaillance électrique**

Sous la direction de : Dean LEWIS

Soutenue le 02/03/2018

Membres du jury :

Mme MALBERT, Nathalie
M. PORTAL, Jean-Michel
Mme BEN-DHIA, Sonia
M. LEWIS, Dean
M. PERDU, Philippe
M. DUDIT, Sylvain

Professeur, Université de Bordeaux
Professeur, Université IN2MP-Aux Marseille
Professeur, LAAS-INSA Toulouse
Professeur, Université de Bordeaux
Docteur, CNES Toulouse
& Temasek Lab @ NTU
Ingénieur, STMicroelectronics CROLLES

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur
Invité
Tuteur

Table des matières

Remerciements	Erreur ! Signet non défini.
Introduction générale	9
1. Contexte	10
1.1. La miniaturisation des transistors et des circuits intégrés	10
1.2. L'analyse de défaillance dans la microélectronique	10
2. Objectif de la thèse	12
3. Structure du manuscrit	13
CHAPITRE I : Etat de l'art sur la technologie 28FDSOI et les techniques lasers d'analyse de défaillance	15
1. Introduction	16
2. Les circuits intégrés	17
2.1. Introduction	17
2.2. Description générale des transistors MOSFET	18
2.3. Fonctionnement et caractéristiques électriques des transistors	18
2.4. La métallisation	20
2.5. La technologie 28FDSOI	21
2.6. Conclusion	21
3. Propriétés optiques de la matière	22
3.1. Introduction	22
3.2. L'indice de réfraction	22
3.3. Interface entre 2 matériaux	23
3.4. Absorption dans un matériau	24
3.5. Influence du champ électrique	28
3.6. Conclusion	30
4. Les techniques lasers à 1340 nm	31
4.1. Introduction	31
4.2. La stimulation laser thermique par la face arrière	32
4.3. L'analyse du faisceau réfléchi	35
4.4. Conclusion	39
5. Modélisation de l'interaction laser-circuit intégré	40
5.1. Introduction	40
5.2. Modèle de faisceau gaussien	40
5.3. Modélisation de l'échauffement induit par laser continu à 1340 nm	42
5.4. Conclusion	44
6. Effet de la miniaturisation	45
6.1. Introduction	45
6.2. Les lentilles à immersion solide (SIL)	45
6.3. Le problème de la résolution spatiale et de la sensibilité	45
6.4. Suspensions d'effet invasif du laser	47
6.5. Conclusion	47
7. Conclusion du chapitre	48
CHAPITRE II : Reproduction et caractérisation sur circuit intégré de défauts induits par laser	51
1. Introduction	52
2. Reproduction d'un défaut induit par laser sur une chaîne d'inverseurs en anneau	53

2.1. Introduction	53
2.2. Description et fonctionnement d'une chaîne d'inverseurs en anneau.....	53
2.3. Dessin de masque et paramètres de la structure	53
2.4. Microscopie à photoémission – EMMI.....	54
2.5. Méthodologie de reproduction du défaut	54
2.6. Résultats	56
2.7. Conclusion.....	57
3. Caractérisation électrique du défaut.....	57
3.1. Introduction	57
3.2. Préparation de l'échantillon pour la mesure électrique.....	57
3.3. Méthode de caractérisation électrique.....	58
3.4. Résultats	59
3.5. Conclusion.....	60
4. Caractérisation physique du défaut	60
4.1. Introduction	60
4.2. Préparation de l'échantillon pour l'observation TEM	61
4.3. Microscope électronique en transmission TEM/STEM.....	61
4.4. Résultats	62
4.5. Conclusion.....	63
5. Caractérisation chimique du défaut.....	63
5.1. Introduction	63
5.2. La cartographie chimique par Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)	63
5.3. Résultats	64
5.4. Conclusion.....	66
6. Conclusion du chapitre.....	66
CHAPITRE III : Mécanismes de défaillances et simulation du stress thermique	69
1. Introduction	70
2. Mécanisme de défaillance induit par le laser	70
2.1. Introduction	70
2.2. Rappel sur la diffusion	71
2.3. Le siliciure de nickel-platine (NiPtSi).....	73
2.4. Conclusion.....	75
3. Modélisation du stress thermique induit par le laser sur les transistors	76
3.1. Introduction	76
3.2. Environnement de la simulation.....	76
3.3. Propagation du faisceau laser	79
3.4. Densité de photons absorbés	82
3.5. Résultats de la simulation.....	83
3.6. Conclusion.....	88
4. Comparaison avec les recuits du process	88
4.1. Introduction	88
4.2. Corrélation.....	88
4.3. Conclusion.....	89
5. Conclusion du chapitre.....	90
CHAPITRE IV : Corrélation entre l'expérience et la simulation	91
1. Introduction	92
2. Partie expérimentale	93

2.1. Introduction	93
2.2. Méthodologie de test laser	93
2.3. Résultats expérimentaux	94
2.4. Conclusion.....	96
3. Partie simulation.....	97
3.1. Introduction	97
3.2. Construction 3D de structures	97
3.3. Conclusion.....	100
4. Confrontation de la simulation et de l'expérience	100
4.1. Introduction	100
4.2. Confrontation des résultats sur structure fortement intégrée	100
4.3. Corrélation des résultats avec le chapitre II	101
4.4. Conclusion.....	102
5. Conséquences opérationnelles	103
6. Conclusion du chapitre.....	103
Conclusion générale & perspectives	105
1. Conclusion.....	106
2. Perspectives.....	108
2.1. Temps d'exposition au laser.....	108
2.2. Longueurs d'onde plus courtes	109
Annexes.....	111
Bibliographies	121

Remerciements

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration de ma thèse.

En primeur, mes remerciements et ma reconnaissance vont à mon directeur de thèse Dean Lewis de l'IMS Bordeaux, pour son intérêt et son soutien, sa grande disponibilité et ses nombreux conseils durant la rédaction de ma thèse.

Je tiens de même à remercier Nadine Bicaïs qui m'a accueilli au sein du laboratoire de caractérisation physique à STMicroelectronics, donné de son temps et offert une place privilégiée au même titre que tous les membres de son équipe.

Je remercie tout particulièrement Philippe Perdu, Ingénieur au CNES, pour l'intérêt qu'il a porté à ce projet et pour ses conseils techniques.

Je remercie Sylvain Dudit mon responsable industriel et également responsable de l'équipe EFA Design. Il m'a orienté dans les bonnes directions durant ces trois années de thèse, sans oublier les conseils techniques et les sessions d'entraînement aux présentations orales. Sylvain, tu as su développer mon raisonnement au travers de toutes nos discussions stimulantes.

Des remerciements aussi à Michel Vallet pour ses conseils en matière de présentations orales et d'organisation. Tes talents de tribuns m'ont été d'une grande utilité.

Je veux remercier l'ensemble des membres l'équipe EFA pour leur aide et leur bonne humeur. Et toutes nos discussions autant stimulantes pour mes travaux de recherche que pour mes zygomatics, je remercie particulièrement Thierry Parrassin qui m'a aidé, malgré son peu de temps disponible dû à son accident tant au niveau technique que pour ses délires créatifs et Philippe Larre pour son expertise en nanoprobings et pour ses blagues pas drôles (ou pas).

Ce travail n'aurait pas non plus pu être réalisé sans l'aide de personne venant d'autres équipes. Magali Grégoire et de Frédéric Monsieur m'ont apporté des connaissances techniques et donné accès aux outils de simulation T-CAD. L'équipe de caractérisation physique, gérée par Laurent Clément, a aussi beaucoup apporté à cette thèse.

Pour finir, mes sincères remerciements à mes parents qui ont été présents et qui m'ont soutenu durant 3 ans.

Introduction générale

1. Contexte

1.1. La miniaturisation des transistors et des circuits intégrés

Au cours des dernières années, le marché de l'électronique a été principalement influencé par les smartphones, les périphériques intégrés et l'internet des objets (IOT pour Internet Of Things) de telle sorte que les circuits intégrés sont devenus omniprésents dans notre vie quotidienne.

Le besoin des fabricants de toujours fournir des composants avec des performances plus élevées et de moindre coût ont conduit à de grands développements au cours des 50 dernières années. Cela a été traduit par G. Moore en 1965 (mais révisé en 1975) dans une feuille de route pour l'industrie des semi-conducteurs connue sous le nom de loi de Moore. En 1974, Dennard et al. ont édité les règles de base qui garantissent la miniaturisation des transistors par un facteur κ tout en augmentant les performances et en conservant une consommation d'énergie constante [DEN74]. Ce facteur a été utilisé comme base de la feuille de route éditée par l'International Technology Roadmap for Semiconductors pour l'industrie de la microélectronique [ITRS2011]. Aujourd'hui, les fondeurs planifient les futurs nœuds technologiques pour une longueur de grille de 10 nm, ce qui signifie une réduction supplémentaire de la taille des composants même si leurs dimensions ne sont plus directement liées à la taille des transistors.

1.2. L'analyse de défaillance dans la microélectronique

S'approcher des limites physiques à la fois en termes de miniaturisation et d'intégration tend à augmenter la difficulté d'industrialisation d'une technologie. Des défauts qui n'avaient alors pas d'impact au niveau électrique peuvent aujourd'hui causer de forte perte de rendement et de fiabilité. Le nombre de défaillances a fortement augmenté et leurs origines sont beaucoup plus difficiles à traquer. Ces défaillances électriques peuvent aussi bien se produire lors de la qualification d'un produit, en phase de production ou pendant la durée de vie du produit. L'analyse de défaillance a donc un rôle clé dans le développement d'une nouvelle technologie ou d'un nouveau produit.

Comme le montre la figure 1, l'Analyse de Défaillance Electrique (EFA) commence par un test électrique dont l'objectif est de valider la défaillance électrique observée dans un environnement de test différent et de caractériser électriquement cette dernière. Etant donné les millions de transistors et la complexité des circuits intégrés, cette étape est indispensable mais insuffisante.

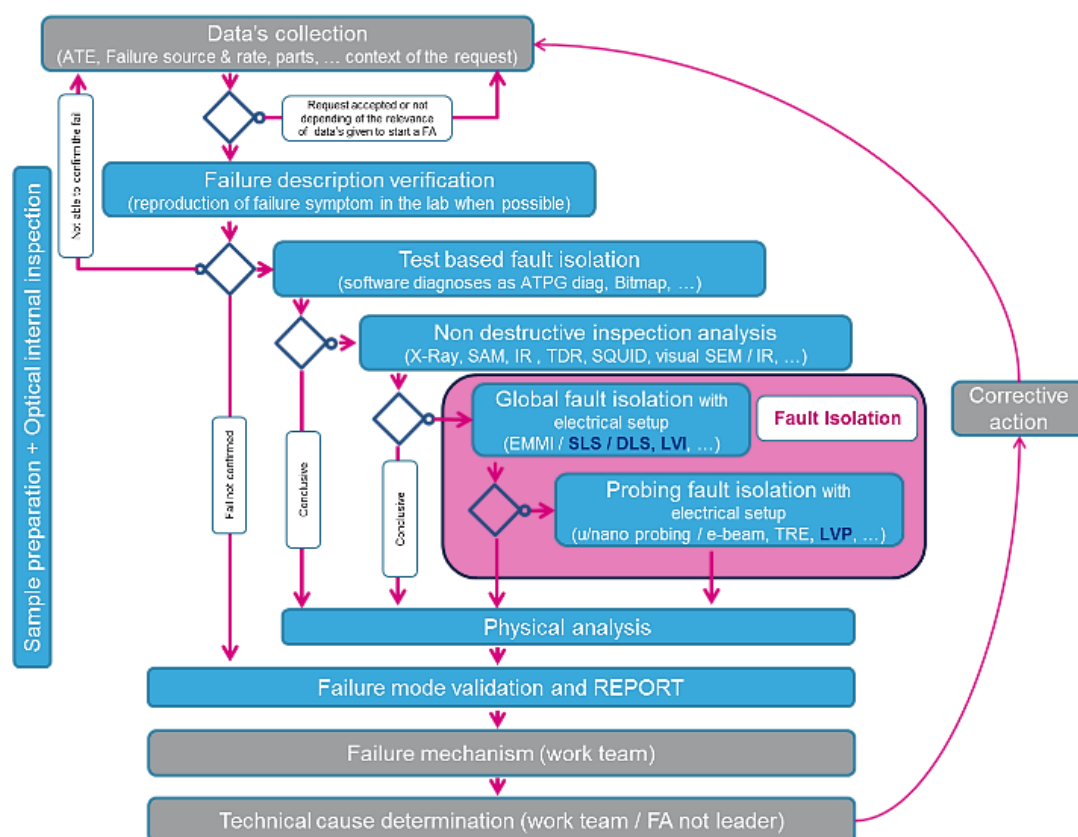


Figure 0-1: processus standard d'une EFA

L'architecture des circuits intégrés permet un autotest de ces derniers. Ce type de test est également très important, car il permet de réaliser un premier niveau d'isolation du défaut dans les différentes régions du circuit (bloc, ligne et colonne de mémoire). Aujourd'hui, la complexité et le niveau d'isolation du défaut par cet auto-diagnostic permet parfois d'aller directement à la caractérisation physique.

Quand le test électrique et l'auto-diagnostic ne permettent pas une localisation du défaut au transistor près, le boîtier est analysé à l'aide de techniques non-intrusives telles que la tomographie par rayon X ou la microscopie acoustique à balayage (SAM). Ces techniques ont en général des résolutions latérales plutôt de l'ordre du micron voir beaucoup moins (SAM).

Si l'étape précédente n'est pas concluante, l'analyse passe par une étape de localisation essentiellement optique de l'origine du dysfonctionnement. Il y a une dizaine d'années elles pouvaient encore se faire par la face avant. Cependant, la présence de plus de 4 niveaux de métallisation opaques est rédhibitoire quant à la mise en œuvre de méthodologies optiques.

La localisation de défaut se fait aujourd'hui essentiellement par la face arrière en raison de 2 problèmes qui limitent l'analyse par la face avant :

- le nombre de couches de métaux et leur densité,
- la majorité des défauts se situent dans les premiers niveaux de métaux, là où la finesse des gravures et des dépôts est la plus importante.

Néanmoins, cette étude par la face arrière est confrontée aux propriétés optiques du substrat en silicium, car celui-ci devient absorbant dans les longueurs d'onde visibles. Il en résulte l'obligation d'utiliser des longueurs d'ondes du proche infra-rouge au détriment de la résolution spatiale. On retrouve donc des techniques basées sur l'observation de la photoémission (EMMI) [KHU86] et des techniques basées sur la microscopie à balayage laser (1340 nm et 1064 nm à STMicroelectronics CROLLES).

Ces techniques lasers se divisent en 2 grandes familles : une approche pompe qui regarde l'influence du laser sur un paramètre électrique choisi (courant, fréquence, fonctionnalité, délais, ...) et une approche sonde qui est basée sur l'analyse du faisceau réfléchi. Pour contrebalancer la perte en résolution due à l'utilisation de ces longueurs d'onde, l'utilisation de lentilles à immersion solide (SIL) est obligatoire.

Le problème aujourd'hui est que la résolution optique ainsi obtenue peut correspondre à plusieurs dizaines de transistors ce qui est beaucoup trop pour entamer une caractérisation physique. Pour compléter la localisation, il est alors souvent nécessaire de tester directement les transistors avec des sondes nanométriques pour obtenir une caractérisation fine du défaut. Une fois le transistor défaillant repéré, ce dernier est caractérisé physiquement et chimiquement par microscopie électronique en transmission (TEM) et analyse dispersive en énergie (EDX).

2. Objectif de la thèse

Pour localiser des défauts dans les technologies 28FDSOI, les techniques lasers sont très largement utilisées. Or ces techniques, comme nous le verrons dans les chapitres suivant, sont susceptibles de dégrader les transistors ainsi observés. L'objectif de cette thèse est de mieux comprendre ces mécanismes de dégradation et de définir la dose laser acceptable par les transistors en technologie 28FDSOI afin de ne pas créer de défauts pendant l'analyse. De manière plus générale, l'objectif est de mettre en place un outil de modélisation permettant de prédire la dégradation des transistors sous une stimulation laser 1340 nm continu.

3. Structure du manuscrit

Ce manuscrit est composé de 4 chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à l'état de l'art des techniques d'analyse de circuits intégrés par faisceau laser existantes aujourd'hui à STMicroelectronics et à la mise en évidence de la problématique. Une distinction sera faite entre les techniques basées sur l'observation, les techniques lasers basées sur la stimulation laser (techniques pompes) et les techniques lasers basées sur l'analyse du faisceau (techniques sondes). Une attention particulière sera portée sur les problèmes de résolution et sur la complexité des analyses amenant à l'utilisation quasi-systématique de techniques lasers couplés à des objectifs à fort grossissement. Des cas de localisations et de caractérisations de défauts sans corrélation avec le test électrique seront notamment reportés et conduiront à la principale problématique de cette thèse : l'effet non neutre du laser sur les circuits intégrés.

Le deuxième chapitre se concentrera sur la caractérisation du défaut induit par le laser 1340 nm continu sur la technologie 28FDSOI. Pour répondre à cette problématique, nous appliquerons une méthodologie semblable à un processus standard d'analyse. D'abord un défaut sera reproduit avec une source laser continue à 1340 nm sur un circuit intégré. Ensuite, ce défaut est caractérisé électriquement en utilisant le nano-probing. Une caractérisation physique et chimique par TEM et EDX de ces défauts sera présentée. Des dégradations du siliciure de nickel platine et du métal de la grille seront présentées. Cette étude apportera également une première évaluation des zones d'interactions entre le laser et le circuit intégré.

Le troisième chapitre concernera l'étude du mécanisme de dégradation et la modélisation du phénomène de stimulation laser thermique. Une première partie sur l'étude bibliographique des phénomènes de diffusion sera faite. Cette étude mettra en évidence l'importance du temps d'exposition et de la température atteinte localement dans la définition de la dose. Le modèle TCAD se déroulera en 3 principales étapes : la construction d'une structure, le calcul de la propagation du faisceau laser dans la structure et enfin la résolution numérique de l'équation de la chaleur. Dans ce chapitre, la simulation sera testée sur une structure à un transistor et 4 niveaux de métaux. Nous verrons en particulier l'effet des couches de métaux sur la stimulation thermique. Ceci permettra de valider le modèle.

Enfin, le quatrième chapitre s'intéressera à une validation plus approfondie du modèle avec une corrélation fine entre l'expérience et la simulation sur des structures usuelles. La mesure des seuils de dégradation sous stimulation laser sera notamment étudiée par

cartographie de fréquence. Un outil de construction 3D de structures sera mis au point. La simulation sera appliquée et nous pourrons apprécier la capacité du modèle à prédire la puissance laser seuil de dégradation des transistors. Nous pourrons ainsi définir les principales tendances en fonction du dessin du circuit. Enfin, nous verrons au niveau opérationnel qu'une bonne connaissance des zones d'interactions entre le laser 1340 nm et le circuit intégré permettra de sensiblement améliorer localisation de défaut en mode sonde.

CHAPITRE I : Etat de l'art sur la technologie 28FDSOI et les techniques lasers d'analyse de défaillance

1. Introduction

Dans ce chapitre, l'état de l'art de l'interaction laser-circuit intégré (laser-circuit intégré) et de son utilisation en analyse de défaillance à ST Microelectronics est présenté.

Tout d'abord, rappelons le principe de la localisation de défaut par technique laser en face arrière qui est schématisé sur la figure I-1. Un circuit est placé en face arrière dans un microscope à balayage laser. Ce circuit intégré est émulé électriquement afin de reproduire le défaut électrique identifié en diagnostic électrique. En parallèle, un faisceau laser balaie le circuit intégré. Les longueurs d'onde usuellement utilisées sont 1340 nm (thermique) et 1064 nm (photoélectrique). Pour rappel, cette thèse s'intéresse au laser 1340 nm continu.

On classe ces méthodes en 2 grandes familles :

- L'approche sonde qui analyse l'onde réfléchie.
- L'approche pompe qui consiste à mesurer l'influence du laser sur une grandeur fonctionnelle ou paramétrique du circuit.

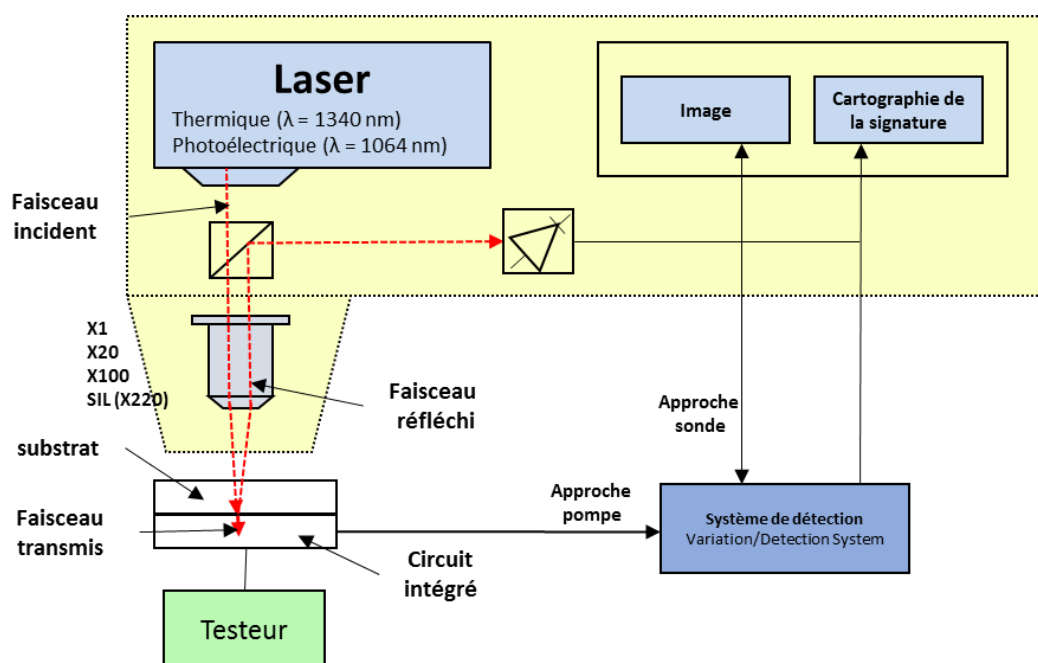


Figure I-1 : principe de l'analyse par technique laser en face arrière sur microscope à balayage laser

Il est donc intéressant d'avoir un maximum d'interactions entre l'onde laser et le circuit intégré pour avoir une localisation pertinente. Pour cela, l'utilisateur peut jouer

sur la puissance laser et sur le temps d'exposition.

L'étude de la dose laser maximale tolérée par les transistors nécessite donc une bonne connaissance de l'interaction laser circuits intégrés (laser-circuit intégré) et de son utilisation en localisation de défaut.

Dans une première partie, nous rappellerons la structure générale des circuits intégrés et le fonctionnement des transistors. Nous préciserons entre autres les caractéristiques de la technologie 28FDSOI.

Nous rappellerons dans une deuxième partie les principales propriétés du faisceau incident et de l'interaction laser-matière ayant lieu dans les circuits intégrés. L'étude sera concentrée notamment sur le silicium et le cuivre qui constituent le substrat et les principales sources d'échauffement.

Dans une troisième partie, nous verrons les modèles de faisceau laser gaussien et de stimulation thermique permettant d'obtenir la température théorique induite par le laser dans une structure donnée.

Enfin, dans la quatrième partie, nous mettrons en évidence les conséquences de la miniaturisation des technologies et de l'augmentation de l'intégration des circuits sur la dose laser reçue par les transistors. Nous verrons que dans des conditions standards d'utilisation des techniques lasers, les techniques sondes peuvent manquer de sensibilité notamment sur les défauts à basse tension. Ce manque de sensibilité a amené les utilisateurs à utiliser des puissances laser et des temps d'exposition plus important qu'en temps normal. Nous verrons que cela pose des problèmes non neutralité du laser sur les transistors.

2. Les circuits intégrés

2.1. Introduction

La majorité des circuits intégrés se basent sur la technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Cette technologie utilise des transistors à effet de champ à semi-conducteur en oxyde de métal (MOSFET) dont les différents éléments seront fréquemment considérés dans cette thèse. Ceci permet notamment de construire des fonctions de base de la logique telles que des inverseurs, des portes NAND, NOR, etc...

Cette partie décrit les matériaux et explique le fonctionnement des MOSFETs. On

pourra ensuite décrire l'interaction laser-circuit intégré.

2.2. Description générale des transistors MOSFET

Un MOSFET est un dispositif à trois bornes composé d'un canal en semi-conducteur entouré de réservoirs de charges appelés source et drain. Les porteurs traversant le canal sont contrôlés par la grille isolée du canal par un diélectrique mince (Figure I-2). La source et le drain sont obtenus en dopant du silicium avec le même type de dopant alors que le canal est obtenu par un dopage de type opposé. Un nMOS a le drain et la source dopé avec un dopant donneur d'électrons (colonne V-A du tableau périodique : P, As, etc...) et le canal dopé avec un dopant accepteur d'électrons (colonne III-A du tableau périodique : B, etc...).

L'image du microscope électronique de transmission (TEM) en figure I-2 montre deux transistors connectés en série. Cette image est typique de la caractérisation physique. Les contacts en W constituent les premiers éléments qui sont ensuite connectés aux interconnexions. L'oxyde de silicium amorphe (SiO_2) est utilisé pour remplir et isoler l'espace entre les transistors et les interconnexions. Dans cette technologie, la grille est constituée d'un empilement de matériaux high-k/métal (HfO_2 / TiN / Si-poly) protégé par une couche amorphe de Si_3N_4 . Le siliciure de nickel platine ($\text{NiPt}_{10\%}\text{Si}$) est utilisé pour réduire la résistance des contacts des sources, des drains et des grilles.

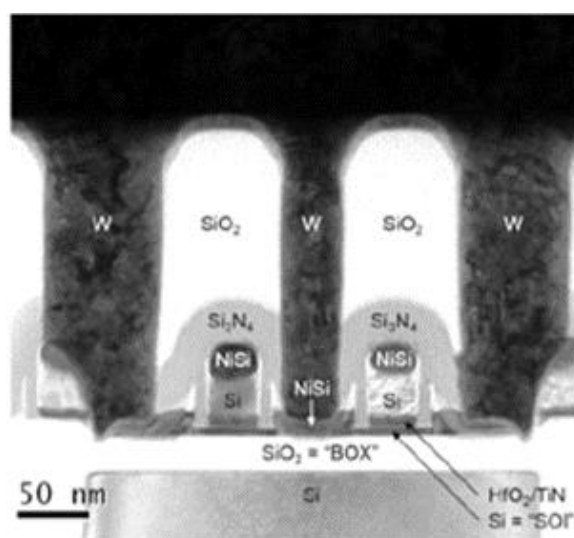


Figure I-2 : image TEM de transistors de technologie 28FDSOI montrant les différents composants d'un transistor

2.3. Fonctionnement et caractéristiques électriques des transistors

Les nMOS et les pMOS ont des comportements symétriques, si bien qu'on ne décrit

que les nMOS. La figure I-3 donne les différents états d'un nMOS en fonction de la tension de grille V_G .

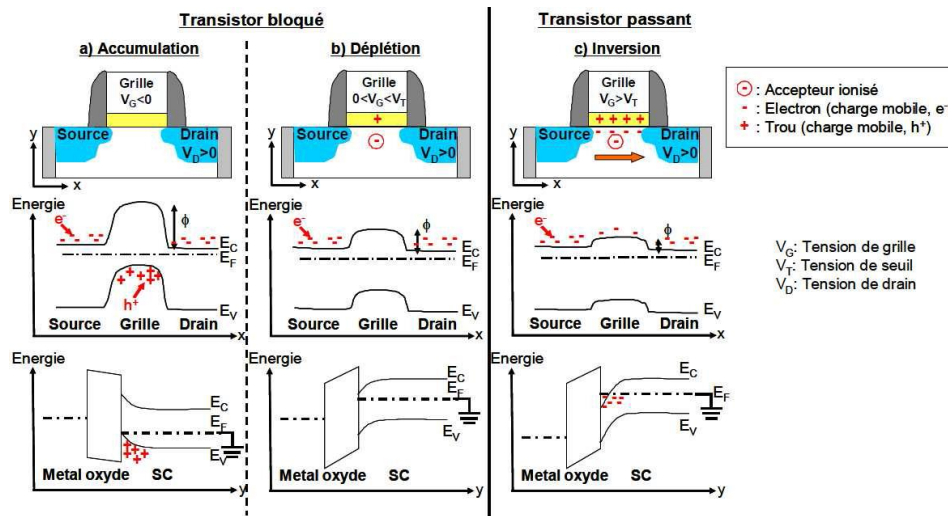


Figure I-3 : différents états d'un nMOS en fonction de la tension de grille V_G

Dans un cas idéal, lorsque la différence de potentiel V_G entre la grille et la source est nulle ou négative, le champ électrique dans le canal est nul. Les porteurs majoritaires dans le canal sont les trous alors que dans la source et le drain ce sont les électrons. Il y a alors naturellement une barrière de potentielle qui empêche le passage du courant. On parle de régime d'accumulation.

Quand la différence de potentielle est positive, mais en-dessous d'une tension de seuil V_{th} , les trous du canal sont repoussés en profondeur et les électrons sont attirés au niveau du canal. Cependant, tant que V_G est inférieure à V_{th} , les trous restent majoritaires dans le canal. C'est le régime de déplétion.

Enfin, quand V_G est supérieure ou égale à V_{th} , les électrons deviennent les porteurs majoritaires dans le canal et le courant peut passer entre le drain et la source.

On distingue alors 2 états possibles du transistor : l'état bloqué lorsque I_D est nul et l'état passant lorsque le transistor est à l'état saturé.

Cependant, dans un cas plus réaliste, le courant augmente progressivement entre l'état bloqué et l'état passant et on peut distinguer différents paramètres caractéristiques du transistor (cf figure 4) :

- Le courant de fuite I_{off} qui traverse le canal même lorsque V_G est égale à 0 V.
- Le courant I_{on} lorsque V_G atteint la tension appliquée V_{DD} .

- La tension de seuil V_{th} qui correspond à l'intersection entre la tangente de la courbe (I_d/V_g) et l'axe des abscisses V_{DS} .

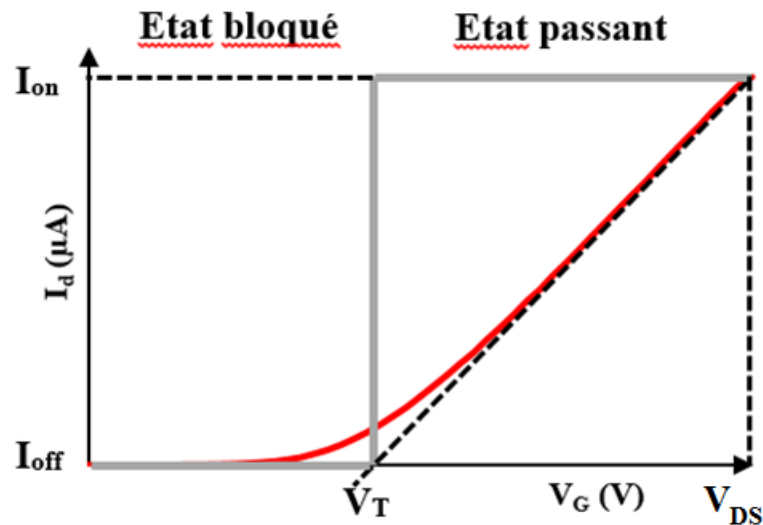


Figure I-4 : caractéristiques électriques d'un transistor

2.4. La métallisation

Les millions de transistors présents dans chaque circuit intégré sont fabriqués sur un substrat en silicium à partir de plusieurs étapes de dépôts, de lithographies, d'implantations, de gravures et d'aplanissement mécanique-chimique. Ces dispositifs sont ensuite interconnectés par plusieurs couches métalliques en Cu (BEOL pour Back-End-Of-Line). Un circuit intégré standard a aujourd'hui entre 7 et 12 niveaux de métallisation. La Figure 5 est une image SEM d'un circuit intégré avec tous les niveaux de métallisation du BEOL, la partie FEOL avec les transistors et le substrat en Si.

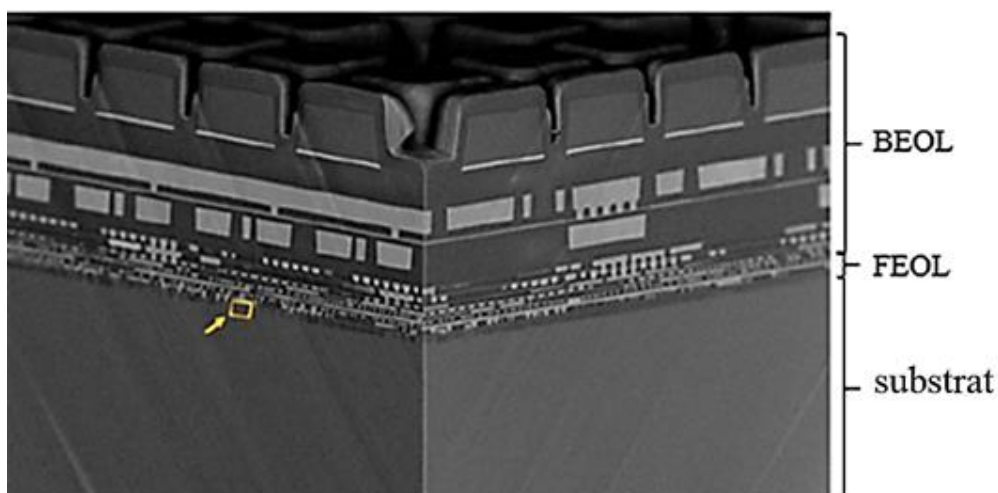


Figure I-5 : image SEM d'une coupe d'un circuit intégré

2.5. La technologie 28FDSOI

Pendant des années, les circuits intégrés ont été fabriqués à partir de plaques en silicium. Les technologies Sub-32 nm sont fortement affectées par des fuites et des effets de canal court qui ont forcé les fabricants à innover et à utiliser de nouvelles architectures. Plusieurs fabricants ont opté pour la technologie FinFET dirigée par les 22 nm d'Intel [AUT2012], tandis que STMicroelectronics a sélectionné l'architecture Full-Depleted Silicon On Insulator (FDSOI) illustrée en figure I-6 [PLA2012]. Le substrat SOI est constitué d'une fine couche de silicium (Si) sur l'oxyde de silicium (SiO₂) appelé oxyde enterré (BOX). Les avantages de l'architecture FD-SOI sont l'utilisation d'étapes de fabrication semblables à la technologie bulk - par rapport à la technologie tridimensionnelle FinFET - ainsi qu'un meilleur contrôle électrostatique du canal qui réduit les fuites dues à la miniaturisation (cf. figure I-6).

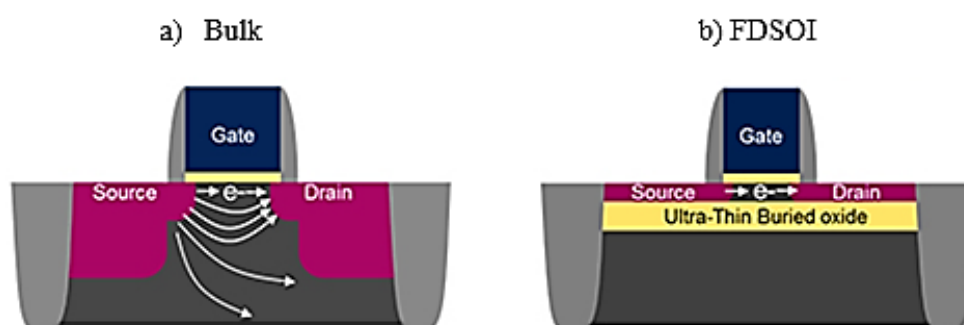


Figure I-6 : schéma d'un MOSFET d'architecture (a) bulk et (b) FD-SOI avec les lignes de champ électrique dans le canal

2.6. Conclusion

Aujourd'hui, les circuits intégrés sont donc construits à partir d'un grand nombre de MOSFETs. Dans ces circuits, on retrouve un grand nombre de matériaux. Lors du fonctionnement d'un MOSFET, des champs électriques très importants notamment au niveau du canal peuvent apparaître.

On observe également que la plupart des défauts sont au niveau des transistors, car c'est cette zone qui demande les étapes de fabrications les plus fines.

La partie suivante s'intéresse à l'interaction entre la lumière et ces différents matériaux. Nous verrons entre autres pourquoi la localisation de défauts au niveau transistor se fait par la face arrière.

3. Propriétés optiques de la matière

3.1. Introduction

Dans un circuit intégré, il y a des matériaux ayant des propriétés optiques bien distinctes tels que le Si qui est un semi-conducteur, des oxydes isolants (SiO_2 , HfO_2 ,...) et des métaux conducteurs comme le Cu. Au sein de ces matériaux et des transistors, il y a des phénomènes physiques qui peuvent changer ces propriétés optiques.

Dans cette partie, nous faisons l'état de l'art des propriétés optiques de ces matériaux et des principaux phénomènes physiques qui peuvent les modifier.

3.2. L'indice de réfraction

Les propriétés optiques d'un matériau peuvent être résumées par son indice de réfraction complexe $\tilde{n}$ (1). La connaissance de ce paramètre permet de rendre compte des changements subis par l'onde lorsqu'elle se propage (intensité réfléchie, intensité transmise, changement de polarisation, réfraction, absorption, changement de phase, etc...). La partie réelle n correspond à l'indice de réfraction et indique la vitesse de phase $v = c/n$. La partie complexe k est appelée coefficient d'extinction. Ce dernier rend compte de l'absorption de l'onde dans le milieu.

$$\tilde{n} = n + ki \quad (1)$$

Les figures I-7 et I-8 donnent respectivement l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction du silicium et du cuivre pour des longueurs d'ondes allant de 200 à 1400 nm. Nous voyons en particulier qu'à 1064 nm et 1340 nm, le silicium intrinsèque a un coefficient d'extinction proche de 0, alors que le cuivre a un coefficient d'extinction de 7 et 9 respectivement.

Etant donné que les épaisseurs des couches de Cu du BEOL sont d'au moins 100 nm, on comprend facilement que la localisation de défauts au niveau transistor se fasse par la face arrière.

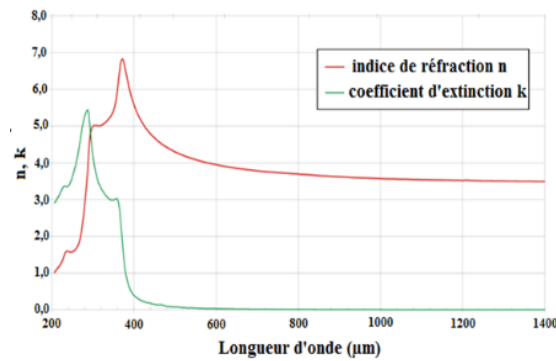


Figure I-7 : indice de réfraction et coefficient d'extinction du silicium intrinsèque [PAL98] en fonction de la longueur d'onde à 300 K

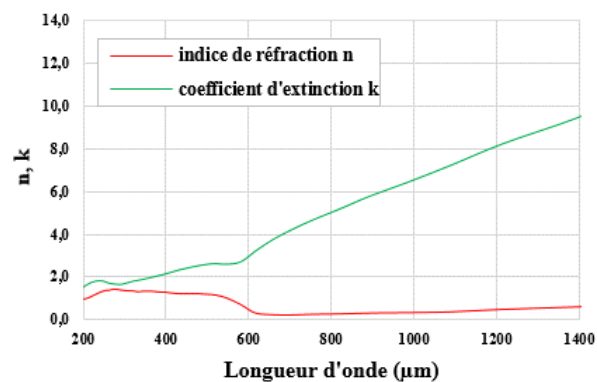


Figure I-8 : indice de réfraction et coefficient d'extinction du cuivre [JOH92] en fonction de la longueur d'onde à 300 K

3.3. Interface entre 2 matériaux

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans un milieu d'indice de réfraction $\tilde{n}_1$ et rencontre un milieu d'indice de réfraction $\tilde{n}_2$, il se produit à la fois une réflexion et une transmission de l'onde. En incidence normale, les facteurs énergétiques de réflexion R et de transmission T peuvent être calculés à partir des équations (2) et (3) [Hec87].

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2)$$

$$T = 1 - R \quad (3)$$

où n_1 et n_2 sont respectivement les indices de réfraction des 2 milieux. Ces relations sont utilisées pour les ondes planes, mais leur domaine de validité peut être étendu aux ondes laser.

3.4. Absorption dans un matériau

Le coefficient d'absorption est la somme de l'absorption photoélectrique et de l'absorption due aux porteurs libres. Le coefficient d'absorption α (m^{-1}) est calculable en connaissant le coefficient d'extinction du matériau et la longueur d'onde (4).

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (4)$$

La profondeur de pénétration de l'onde appelée aussi longueur de peau δ (m) (5) est la distance où l'amplitude de l'onde est atténuée d'un facteur e. La figure I-9 et I-10 donne l'application au silicium et au cuivre respectivement.

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (5)$$

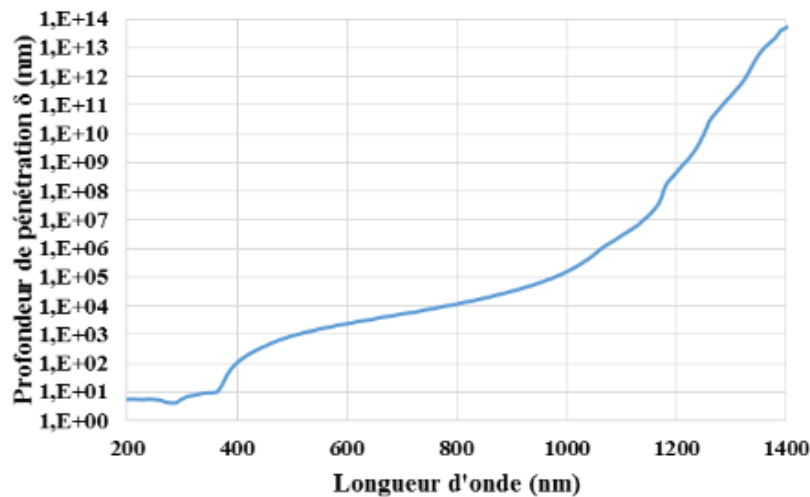


Figure I-9 : profondeur de pénétration dans le silicium

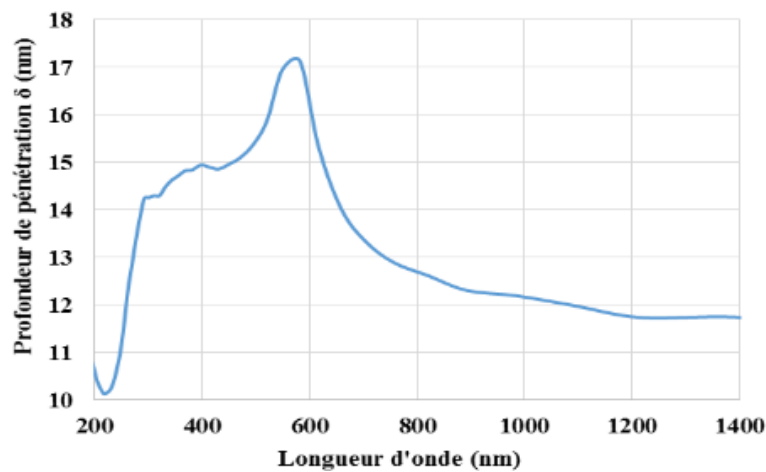


Figure I-10 : profondeur de pénétration dans le cuivre

3.4.1. Absorption par génération de paires électron-trou

Ce type d'absorption a lieu surtout dans les matériaux où les électrons de la bande de valence ne sont pas libres tels que les semi-conducteurs. Il faut que l'énergie du photon (6) soit au moins égale au band-gap du matériau.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (6)$$

où h est la constante de Planck ($h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$), c (m.s^{-1}) la célérité de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$) et λ (m) la longueur d'onde. Il y a alors formation d'une paire électron-trou.

Le silicium pur est un semi-conducteur à transition indirecte. Comme le montre la figure I-11, cela signifie que le maximum de la bande de valence n'est pas aligné avec le minimum de la bande de conduction. Par conséquent, 2 types de transitions sont possibles : la transition directe et la transition indirecte.

- la transition directe nécessite une énergie de photon suffisamment élevée pour que l'électron puisse passer de la bande de valence vers la bande de conduction (E_{gd} sur la figure II-11). Dans ce cas, toute l'énergie du photon est utilisée pour générer une paire-électron, aucune chaleur n'est générée. Pour le silicium, cette énergie est de 3,41 eV à 300 K, ce qui correspond à une longueur d'onde de 364 nm.
- la transition indirecte n'est possible qu'avec l'absorption simultanée d'un photon et d'un phonon. Dans ce cas l'énergie du photon nécessaire E_{gi} est de 1,12 eV, soit 1109 nm de longueur d'onde dans le silicium. Un phonon correspond à une vibration de la structure cristalline du silicium. Ceci est associé à de la chaleur.

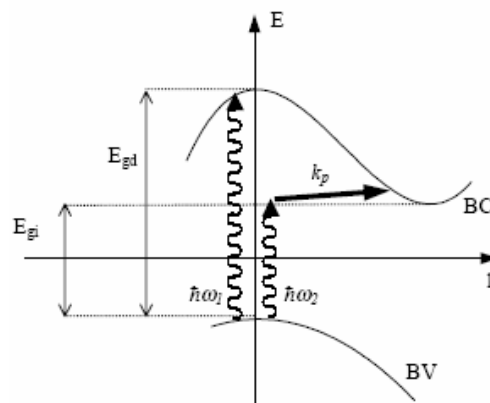


Figure I-11: diagramme d'état d'un semi-conducteur à transition indirecte

3.4.2. Absorption due aux porteurs libres

L'absorption due aux porteurs libres est directement transformée en échauffement. Ce phénomène a lieu soit dans :

- les conducteurs électriques où une grande quantité d'électrons sont naturellement déjà dans la bande de conduction. Toute l'énergie du photon est transformée en chaleur,
- les matériaux semi-conducteurs, si l'énergie du photon est supérieure à celle nécessaire à la génération d'une paire électron-trou. Dans ce cas, c'est l'excédent d'énergie du photon qui est transformé en chaleur.

Dans ce cas, l'onde s'amortit exponentiellement en pénétrant dans le milieu en mettant en mouvement les charges libres. Une première approximation consiste à dire que le coefficient d'absorption est fonction de la perméabilité magnétique μ (H.m⁻¹), de la conductivité électrique du matériau ρ (S.m⁻¹) et de la pulsation ω (s⁻¹) de l'onde (cf. Equation 7).

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu\rho\omega}{2}} \quad (7)$$

Par exemple, le Cu a une conductivité électrique de 59,6.10⁶ S/m. Pour une longueur de 1340 nm, ce matériaux a une perméabilité magnétique d'approximativement 1 et un coefficient d'absorption de 227 μm^{-1} . Ceci qui correspond à une profondeur de Peau de 4,4 nm. Le silicium, avec une conductivité électrique de 2,52.10⁻⁴ S/m, a un coefficient d'absorption de 4,71.10⁻⁴ μm^{-1} . La profondeur de pénétration correspondante est de 2 119 μm . Ce résultat est concordant avec l'approximation que le substrat est transparent aux épaisseurs considérées (100 μm) pendant la localisation de défauts par technique laser et que les couches de métallisation masquent l'information et oblige à faire le test par la face arrière du CI.

Plus précis, le modèle de Drude consiste à voir les porteurs libres et les ions qui leurs sont associées comme un système masse-ressort-amortissement auquel on applique le principe fondamental de la dynamique. On dit que le gaz d'électrons et de trous forme un plasma qui a son propre indice de réfraction et coefficient d'absorption.

En particulier, le dopage du silicium réduit localement le band-gap et augmente le nombre de porteurs libres. Cet effet a très largement été étudié [SB87, SCH81, SPI57]. La conséquence est une variation des coefficients d'absorption et de réfraction d'une valeur $\Delta\alpha$ et Δn données par les équations 8 et 9.

$$\Delta\alpha = \frac{\lambda^2 q^3}{4\pi^2 c_0^2 \epsilon_0 n} \left[\frac{\Delta N_e}{m_e^2 \mu_e} + \frac{\Delta N_h}{m_h^2 \mu_h} \right] \quad (8)$$

$$\Delta n = \frac{\lambda^2 q^2}{8\pi^2 c_0^2 \epsilon_0 n} \left[\frac{\Delta N_e}{m_e^2} + \frac{\Delta N_h}{m_h^2} \right] \quad (9)$$

Dans les équations 8 et 9, μ_e et μ_h sont respectivement la mobilité ($\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$) des électrons et des trous pour une température et une concentration en densité de porteurs donnée, ΔN le changement de densité de porteurs (cm^{-3}), n l'indice de réfraction ($n_0 + \Delta n$), c_0 la vitesse de la lumière dans le vide et ϵ_0 la permittivité du vide. m_e et m_h sont respectivement les masses effectives des électrons et des trous. Les figures I-12 et I-13 donnent le coefficient d'absorption et l'indice de réfraction du silicium obtenus expérimentalement pour différentes densités de porteurs.

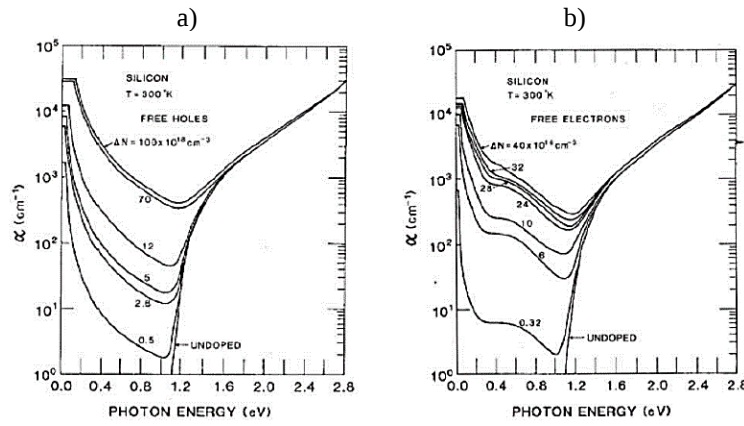


Figure I-12: coefficient d'absorption du silicium pour des dopages N et P différents [SB87]

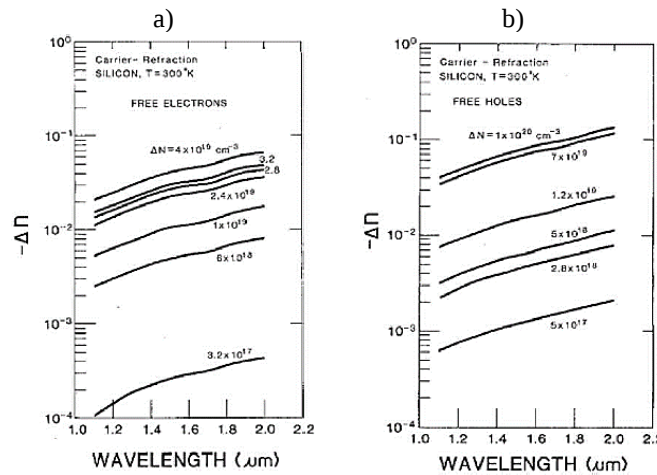


Figure I-13 : variation d'indice de réfraction induite par la présence d'électrons libres (a) et de trous libres (b) due au dopage [SB87]

3.5. Influence du champ électrique

Dans un MOSFET, il y a des champs électriques au niveau des charges d'espace, de la grille et du canal.

Cette partie discute des effets des champs électriques sur l'indice de réfraction complexe.

3.5.1. Effet de Franz-Keldish

L'effet Franz-Keldish, découvert en 1958 par W. Franz [Fra58] et L. V. Keldish [Kel58], est le changement du coefficient d'absorption d'un matériau semi-conducteur en présence d'un champ électrique élevé (10^5 V.cm^{-1}). En effet, les électrons de la bande valence acquièrent une partie de l'énergie nécessaire au passage du band-gap. L'énergie de photon nécessaire pour générer la paire électron-trou est alors plus faible. Ceci se traduit par une augmentation du nombre de porteurs libres et donc de l'absorption du silicium. La figure I-14 montre la variation $\Delta\alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ de coefficient d'absorption du silicium obtenu expérimentalement [WC65] en fonction de l'énergie de photon pour différents champs électriques.

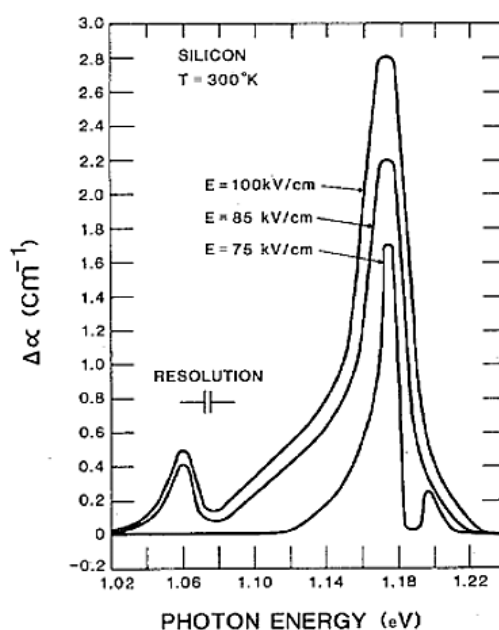


Figure I-14 : variation de coefficient d'absorption du silicium [WC65]

Nous voyons en particulier un pic à $1,175 \text{ eV}$ (1055 nm). On observe que c'est également au niveau de ce pic que la variation du coefficient d'absorption est la plus élevée. Elle passe de $1,7 \text{ cm}^{-1}$ à $2,8 \text{ cm}^{-1}$ pour des champs électriques respectifs de 75 kV.cm^{-1} et 100 kV.cm^{-1} .

Les relations de Kramers-Kronig [KRA27, KRO26] décrivent les relations qui existent entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'indice de réfraction. En utilisant cette relation, [SB87] relie $\Delta\alpha$ (figure I-14) à une variation Δn de la partie réelle de l'indice de réfraction. Le résultat est montré dans la figure I-15 en fonction de l'énergie de photon.

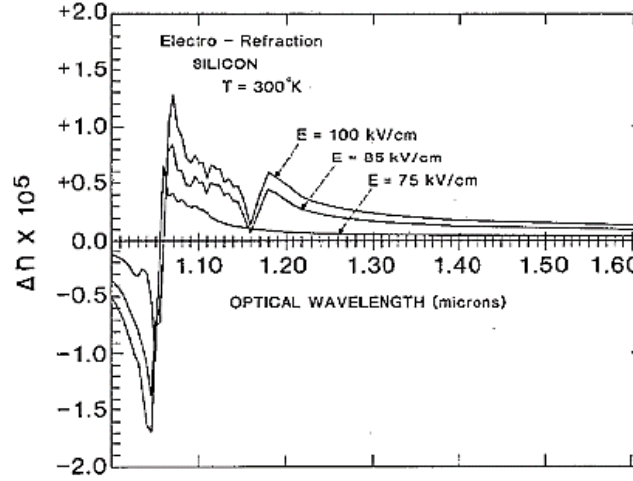


Figure I-15 : variation d'indice de réfraction obtenue par la relation de Kramers-Kronig [SB87]

3.5.2. Effet de Kerr

L'effet de Kerr est un effet non linéaire sur l'indice de réfraction des matériaux dû à l'application d'un champ électrique très intense. Le champ électrique induit une orientation des charges électriques dans le matériau, ce qui génère de la biréfringence. Etant un phénomène non linéaire, l'expression de l'indice de réfraction dépend de l'intensité du champ électrique (10). γ ($\text{cm}^2.\text{W}^{-1}$) est le coefficient d'indice de réfraction non linéaire du matériau dans lequel se propage l'onde et I (W.m^2) est l'intensité lumineuse.

$$n = n_0 + \gamma I = n_0 + \Delta n \quad (10)$$

En utilisant l'équation (11) issue du modèle de Moss et al. [MOS73], Soref et Bennett ont calculé la variation d'indice de réfraction Δn due à l'effet de Kerr (cf. figure I-16) à une longueur d'onde de 1,3 μm .

$$\Delta n = \frac{-3q^2(n^2-1)E^2}{2nm^2\omega_0^4x^2} \quad (11)$$

On note une bonne concordance avec la relation de Kramers-Kronig (figure I-15).

Avec un champ électrique de 100 kV/cm^{-1} , Ces 2 méthodes indiquent une variation d'indice de réfraction de $2,5 \cdot 10^{-6}$. Cependant Soref et Bennett notent une incertitude sur le signe qui est négatif selon le modèle de Moss et al., tandis que l'expérience indique qu'il est positif [WYN68].

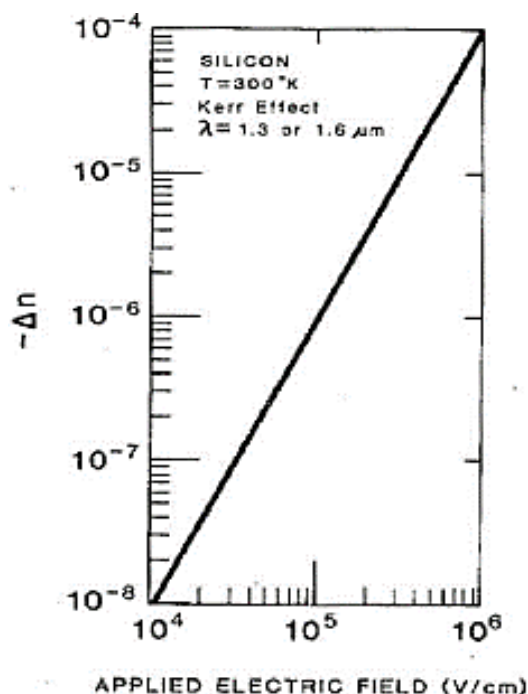


Figure I-16 : variation d'indice de réfraction due à l'effet de Kerr calculée avec le modèle de Moss et al. [MOS73]

Il faut noter que l'effet de Kerr n'a un effet notable qu'à des amplitudes de champs électriques extrêmes. C'est notamment ce phénomène qui est à l'origine de l'autofocus des faisceaux des lasers femtosecondes. Si on part du modèle de faisceau gaussien, l'indice de réfraction induit par effet de Kerr est plus élevé au centre, ce qui équivaut à une lentille convergente.

3.6. Conclusion

Les propriétés optiques des matériaux sont principalement définies par l'indice de réfraction. A partir de cette grandeur, il est possible de calculer, la partie réfléchi, transmise et absorbée d'une onde lumineuse à une interface entre 2 matériaux. Il existe principalement 2 types d'absorption dans les matériaux qui composent les MOSFET : l'absorption par les porteurs libres et l'absorption par génération de paires électron-trou.

Dans les métaux et les semi-conducteurs tel que le Cu et le Si, l'absorption à 1340 nm

est principalement due aux porteurs libres. Ce type d'absorption induit un échauffement des matériaux.

Dans le Cu, la quantité de porteurs libres est très importante et on observe des profondeurs de pénétration de l'ordre de 10 nm. Par contre, dans le Si pur, la quantité de porteurs libres est très faible, si bien que le substrat est considéré comme transparent. C'est la raison pour laquelle la localisation de défaut au niveau transistor se fait par la face arrière.

Nous avons aussi vu que le fonctionnement des transistors implique des champs électriques qui modifient localement l'indice de réfraction des matériaux par effet de Franz-Keldish et de Kerr.

Pour définir complètement l'interaction laser-circuit intégré à 1340 nm, il reste donc à décrire la modélisation de la source laser et l'échauffement induit par cette dernière.

4. Les techniques lasers à 1340 nm

4.1. Introduction

Dans les parties précédentes, nous avons expliqué que la localisation de défaut au niveau transistor doit se faire par la face arrière, car les niveaux de métaux en Cu masquent l'information.

Le substrat en Si impose quant à lui, l'utilisation de longueur d'onde du proche infra-rouge pour limiter l'absorption du faisceau et pour limiter le problème de la résolution (critère de Rayleigh).

Nous nous intéressons tout d'abord aux techniques lasers en mode pompe. Ensuite, nous décrirons les techniques sondes.

A 1340 nm, l'absorption du faisceau laser gaussien se traduit surtout par un échauffement de la structure au niveau des métaux. Plusieurs techniques sont basées sur l'échauffement laser. Elles utilisent toutes une électronique pour mesurer soit des variations de paramètres électriques soit la fonctionnalité du circuit intégré.

L'onde réfléchie est quant à elle modulée en amplitude par les effets de Franz-Keldish et de Kerr. Les techniques lasers en mode sonde n'utilisent donc pas le laser comme stimuli mais comme capteur. C'est-à-dire que dans ce cas, le laser doit être le moins intrusif possible et c'est le circuit intégré en fonctionnement qui change les propriétés

du faisceau lumineux telles que l'amplitude, la phase, la fréquence, la polarisation ou la direction.

On décrira tout d'abord les techniques pompes et ensuite les techniques sondes. Ceci permettra de donner d'avantage de détails sur les conditions expérimentales dans lesquelles les circuits intégrés sont soumis à la stimulation laser.

4.2. La stimulation laser thermique par la face arrière

4.2.1. OBIRCH/TIVA

Les techniques OBIRCH (Optical Beam Induced Resistance Change), TIVA (Thermally-Induced Voltage Alteration) sont différentes variantes d'une technique basée sur la modification locale des propriétés électriques du circuit induit par l'échauffement. Pour une ligne de métallisation, cette perturbation est modélisée par une variation de sa résistance électrique selon l'équation (12).

$$\Delta R = \rho_0 \frac{l}{S} (\alpha_{TCR} - 2\delta_T) \Delta T \quad (12)$$

où ρ_0 ($\Omega \cdot m^{-1}$) est la résistivité du matériau à température ambiante, l (m) et S (m) la longueur et largeur de la ligne métallique, α_{TCR} ($\Omega \cdot K^{-1}$) le coefficient de variation thermique de la résistance et δ_T ($m \cdot K^{-1}$) le coefficient de dilation thermique. Généralement, pour les métaux on néglige δ_T et la variation de résistance est estimée à partir de α_{TCR} .

Il est alors possible de corréler la position de ces perturbations avec le dessin du circuit et de déterminer si elles sont normales ou non. On utilise ces techniques pour repérer les défauts résistifs. Cette énergie ne doit bien évidemment pas être trop grande pour ne pas dégrader les transistors. La figure I-17 schématise ce type de technique.

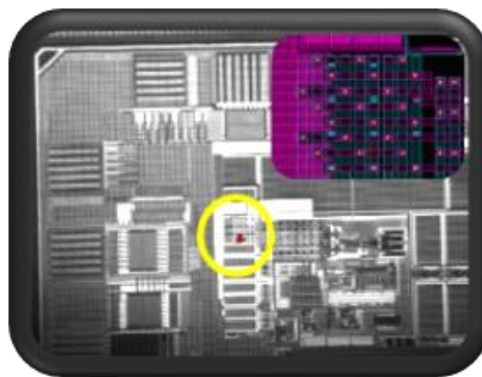


Figure I-17 : exemple de signature OBIRCH

4.2.2. SEI (Seebeck Effect Imaging)

La technique SEI qui repose sur l'effet Seebeck est une deuxième technique qui tire profit de l'échauffement induit par le laser. Cet effet découvert en 1821 par Thomas Johann Seebeck peut être décrit ainsi : une différence de potentiel ΔV (13) apparaît à la jonction de deux matériaux a et b lorsqu'ils sont soumis à une différence de température ΔT .

$$\Delta V = (S_a - S_b)\Delta T \quad (13)$$

En pratique, la force électromotrice perçue par les électrons est de l'ordre de quelques μV . C'est pourquoi la sensibilité de cette technique est généralement meilleure en mode passif. Il est possible de décrire la jonction de deux matériaux a et b par un coefficient de Seebeck S_{ab} (14) parfois appelé « pouvoir thermoélectrique » qui s'exprime en $V.K^{-1}$ ou plus souvent en $\mu V.K^{-1}$ étant donné les ordres de grandeur pour les matériaux usuels.

$$S_a - S_b = S_{ab} = \frac{dV}{dT} \quad (14)$$

Le tableau 2 donne S_{ab} pour différents couples de matériaux. On remarque dans ce tableau que les couples métal/semi-conducteur ont des pouvoirs thermoélectriques beaucoup plus importants que les couples métal/métal. C'est pourquoi les défauts d'interconnexions sont particulièrement mis en avant par cette technique.

Interfaces	Pouvoir thermoélectrique relatif S_{ab}
Al/Cu	-3,4
W/Cu	3,6
Métal/Si-poly n+	-121
Métal/Si-poly p+	189
Métal/Si-mono n+	287
Métal/Si-mono p+	-202

Tableau 2 : pouvoir thermoélectrique de différents thermocouples

Sur la figure I-18 ci-dessous, quand le faisceau laser arrive sur l'interconnexion de gauche en W, sa température augmente et devient supérieure à celle de l'interconnexion de droite. La différence de température est dite positive, car la force électromotrice qu'elle génère induit un courant dans le même sens que la propagation du signal. Cette mesure associée à la position du laser donne une signature noire. Quand le laser arrive sur l'interconnexion de droite, le courant induit est dans le sens opposé au signal, d'où la tache blanche.

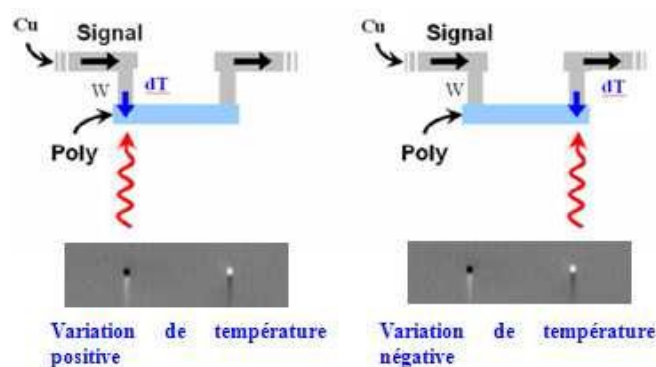


Figure I-18 : exemple de signature Seebeck

4.2.3. Analyse par la fonctionnalité – SDL (Soft Defect Localization)

La technique SDL repose sur des diagrammes appelés schmoo plot indiquant l'état de fonctionnalité d'un circuit en fonction de paramètres électriques ou environnementaux tels que la tension, la fréquence ou la température. Ces diagrammes laissent apparaître une zone où le circuit fonctionne (pass) et une zone de non fonctionnalité (fail).

Dans le cadre de cette technique, le fonctionnement du circuit est placé très près de la frontière du diagramme correspondant au défaut. C'est le laser qui provoque le basculement pass vers fail ou bien fail vers pass (cf. Figure I-19).

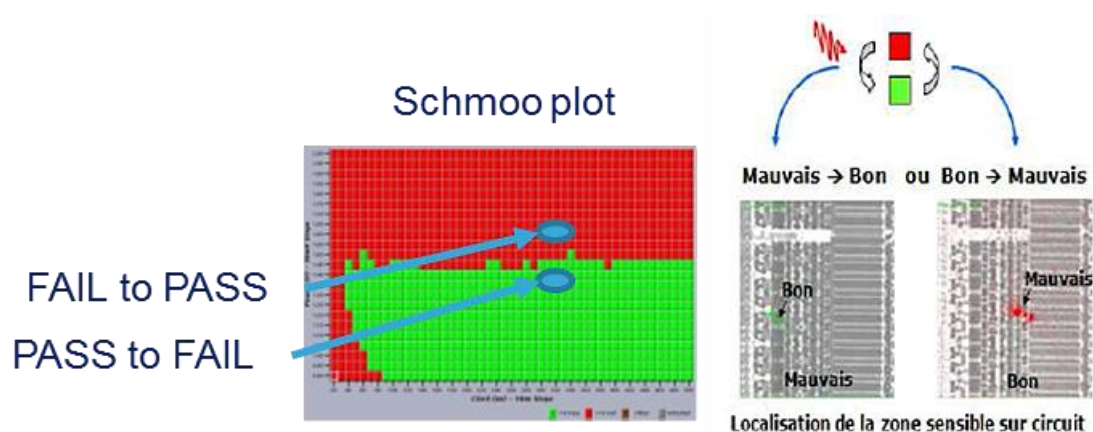


Figure I-19 : (droite) schmoo plot d'un défaut – (gauche) signature fail vers pass et pass vers fail

Etant donné que ce type de technique repose sur un état binaire du circuit, la sensibilité est très élevée. C'est pourquoi la SDL est utilisée pour localiser des défauts très fins du type « défauts de fiabilité » en température ou en tension. Cependant, il y a en général une zone d'instabilité entre les 2 zones et si les paramètres d'entrée ne sont pas

assez résolu, il peut y avoir une perte de sensibilité. L'analyste peut alors être tenté d'augmenter la puissance du laser pour permettre le basculement.

4.3. L'analyse du faisceau réfléchi

4.3.1. Laser sonde continu en mode pointé – CW LVP (Continuous Wave Laser Voltage Imaging)

Le CW LVP consiste à pointer le faisceau laser sur la zone active d'un transistor en fonctionnement et de mesurer en fonction du temps la modulation en amplitude de l'onde réfléchie induite par le champ électrique (cf partie 3.2.3.). La figure I-20 montre différentes mesures de signaux en utilisant le CW LVP.

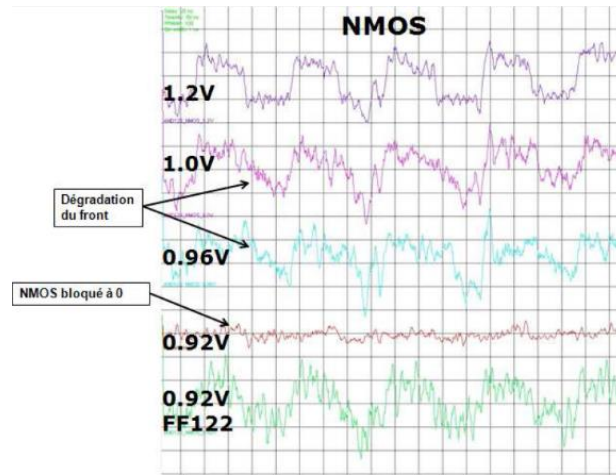


Figure I-20 : exemple de mesure CW-LVP sur des nMOS [CEL2013-2]

4.3.2. Cartographie de fréquence (LVI)

La cartographie de fréquences repose sur l'analyse par un analyseur de spectre du faisceau réfléchi. Selon le principe des séries de Fourier, toute fonction périodique est décomposable en une somme de fonctions sinusoïdales (15, 16, 17 et 18).

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (15)$$

$$\text{avec } a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt \quad (16)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (17)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (18)$$

où n est le rang de l'harmonique, ω (s^{-1}) est la pulsation fondamentale et t (s) est le temps.

Il est aussi bien connu qu'un signal carré impair de rapport cyclique 50% et de fréquence f_0 n'est composé que de raie spectrale impaire. Dès que le rapport cyclique n'est plus de 50% (figure I-21) des harmoniques paires apparaissent.

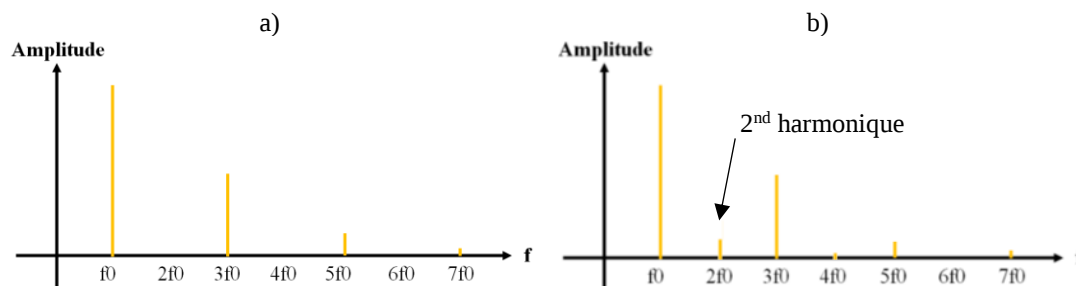


Figure I-21 : spectre d'un signal carré de fréquence f_0 de rapport cyclique 50% (a) et Spectre d'un signal carré de fréquence f_0 de rapport cyclique différent de 50% (b)

Il est donc possible de cartographier à la fois la propagation d'un signal, et de mettre en évidence une déformation temporelle de ce dernier [CEL2011]. La figure I-22-a montre une cartographie de la fréquence fondamentale dans une chaîne de bascules. Cette signature n'indique pas de défaut particulier. Par contre le défaut est directement pointé par la 2nd harmonique (figure I-22-b).

Le défaut de ce type de technique est qu'il est absolument nécessaire d'utiliser une vitesse de balayage suffisamment lente. Ceci permet d'avoir suffisamment de périodes dans le signal et donc d'avoir une résolution spectrale intéressante. Le temps d'exposition du circuit au laser peut alors devenir conséquent.

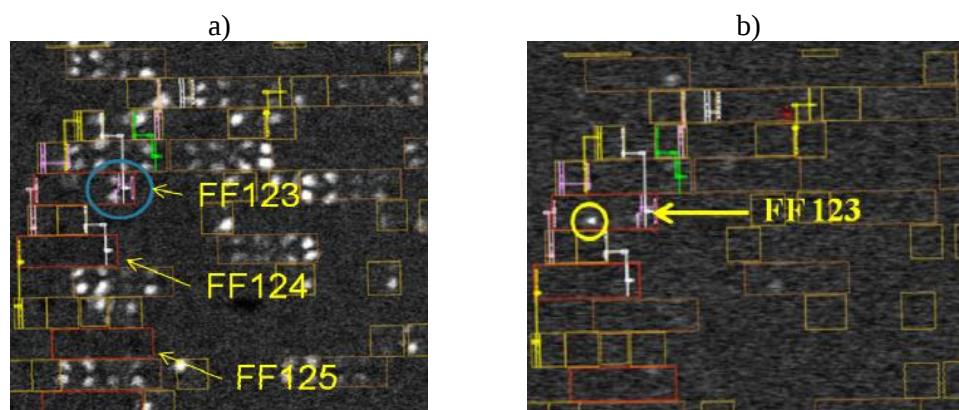


Figure I-22 : cartographie de la fréquence fondamentale f_0 (a) et cartographie de la 2nd harmonique $2f_0$ (b)

4.3.3. Analyse par thermo-réflectance – TFI (Thermal Frequency Imaging)

Le début des techniques utilisant le phénomène de thermo-réflectance comme moyen d'analyse de défaillances date des années 1970-80 [BIN82]. Ces techniques reposent sur la mesure de l'amplitude d'une onde lumineuse réfléchiée par un échantillon en fonction de la température de ce dernier. Cette technique peut être utilisée dans une large gamme de longueurs d'onde, bien que la réflectivité dépende aussi du matériau et de la longueur d'onde. Ici, nous nous intéressons seulement à l'analyse par thermo-réflectance d'un échantillon en mode de fonctionnement statique.

La mesure par thermo-réflectance est une mesure différentielle (figure I-23) entre une mesure de référence où le DUT n'est pas alimenté et une mesure où le DUT est alimenté en statique. Cette variation est directement proportionnelle à la variation de température entre les deux états.

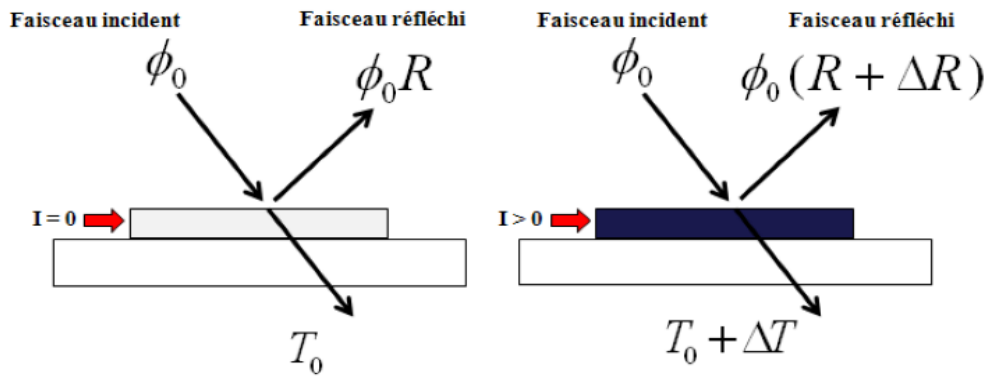


Figure I-23 : schéma du principe de la mesure par thermo-réflectance

Une source lumineuse éclaire l'échantillon qui se trouve à ce moment-là, à une température T_0 (la température ambiante par exemple). Dans cet état, l'intensité réfléchiée I_r par l'échantillon est proportionnelle au coefficient de réflectivité $R(T)$ et à l'intensité de l'onde incidente I_0 (19) :

$$I_r = R(T).I_0 \quad (19)$$

Ensuite, quand le circuit est mis sous tension, le passage de courant chauffe le circuit d'une température ΔT par effet joule. Il en résulte une modification ΔR de sa réflectivité R comme suit (20) :

$$R(T + \Delta T) = R(T) + \Delta R(\Delta T) \quad (20)$$

L'équation 19 devient alors l'équation 21 :

$$I_r = (R(T) + \Delta R(\Delta T)).I_0 \quad (21)$$

On en déduit l'équation 22 entre la variation de réflectivité ΔR et la variation de température ΔT . Une relation linéaire existe entre ΔR et ΔT , le coefficient $\frac{dR}{dT}$ étant propre à chaque matériau. La mesure est différentielle ce qui permet de ne pas avoir à connaître en détail les matériaux de l'échantillon.

$$\Delta R = \frac{dR}{dT} \Delta T \quad (22)$$

La figure I-24 montre une mesure du coefficient de réflexion et de l'élévation de la température dans une piste métallique réalisée sur un banc optique [DEA96].

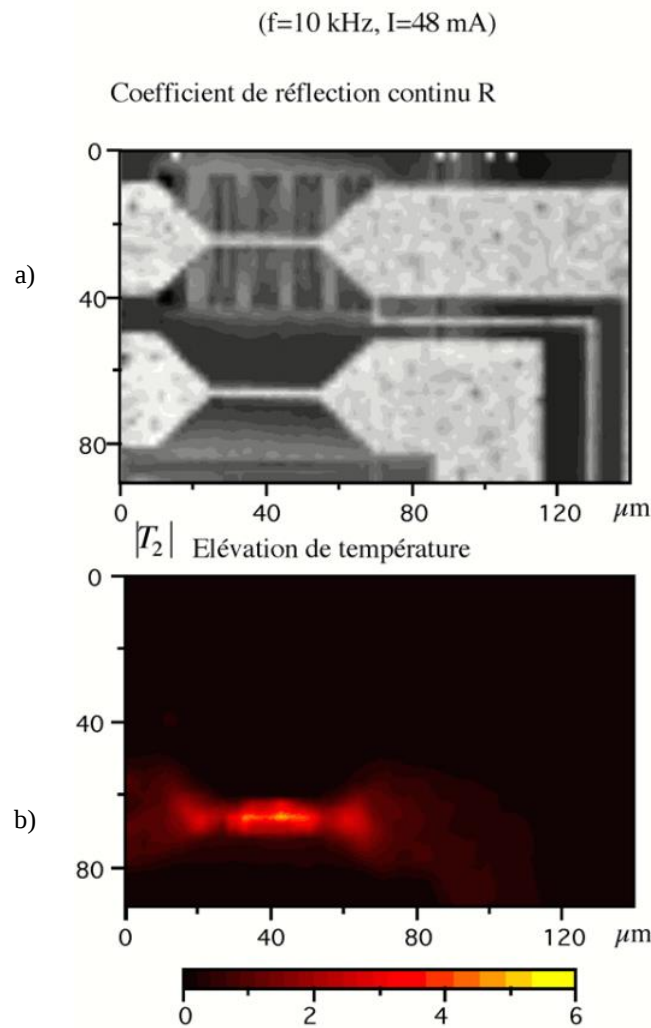


Figure I-24 : coefficient de réflexion (a) et élévation de température d'une piste métallique (b) [DEA96]

Les mécanismes thermiques ont des constantes de temps plutôt de l'ordre de la μs ou de la ms alors que les constantes de temps des variations de concentration de porteurs de charges électriques sont de l'ordre de la ps ou de la ns. Comme le montre la figure I-25, la différenciation de l'effet Franz-Keldish et de la thermo-réfectance est donc possible en faisant varier la fréquence [CEL2013].

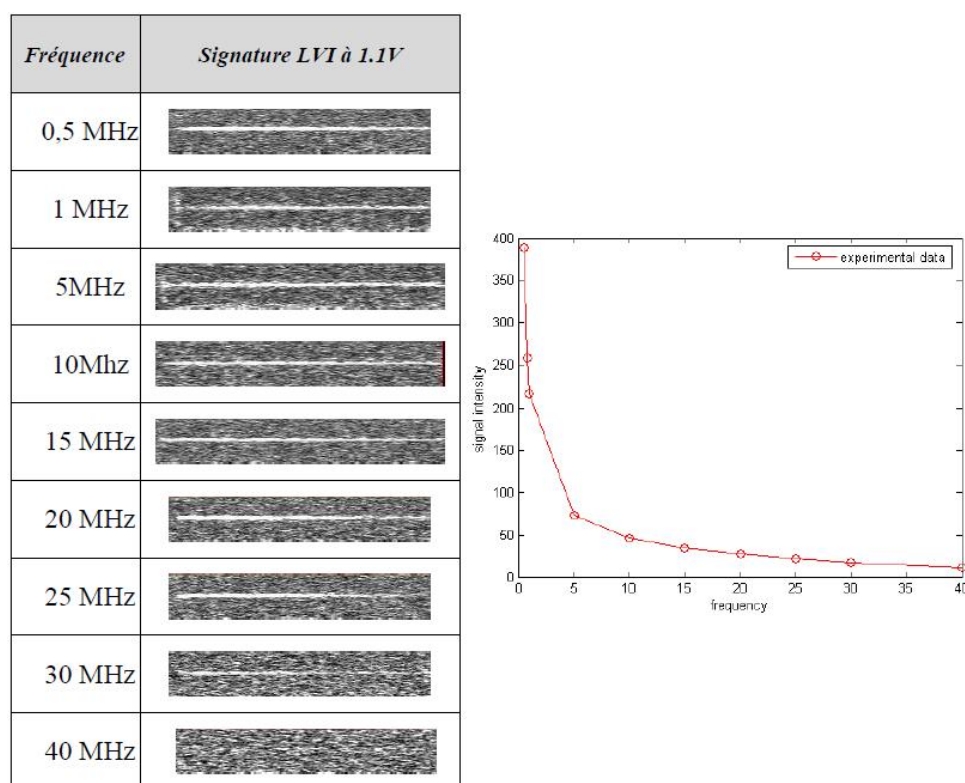


Figure I-25 : amplitude d'une signature fréquentielle dans une ligne de cuivre pour différentes fréquences. [CEL2013]

4.4. Conclusion

Dans cette partie, les techniques pompe et les techniques sonde les plus couramment utilisées à STMicroelectronics Crolles ont été décrites.

Les techniques pompes, regroupant l'OBIRCH, le SEI et la SDL sont basées sur l'échauffement induit par le laser. Ces techniques nécessitent un minimum de puissance lumineuse pour être utilisées.

Les principales techniques sondes sont le LVI et le TFI. Ces techniques peuvent nécessiter de long temps d'exposition pendant lesquels le système d'acquisition moyenne l'information pour obtenir un SNR (Signal to Noise Ratio) acceptable. En théorie, ces techniques ne sont pas invasives mais il est bien connu qu'une puissance

laser plus importante augmente le SNR permettant une analyse plus courte. La question de l'effet de la source laser a des puissances plus faibles, mais sur des temps d'expositions plus long est aussi une question importante de l'optimisation de l'analyse.

5. Modélisation de l'interaction laser-circuit intégré

5.1. Introduction

Dans les parties précédentes, nous avons vu que l'interaction laser-circuit intégré à 1340 nm de longueur d'onde se caractérise essentiellement par un échauffement au niveau des métaux.

Ici, nous rappellerons les propriétés des faisceaux laser couramment utilisés et un modèle d'échauffement induit par laser. Nous nous appuierons également sur une publication [FEX011] pour décrire un modèle d'échauffement laser induit par absorption des porteurs libres.

5.2. Modèle de faisceau gaussien

Dans le modèle de faisceau gaussien, on considère que la répartition radiale de l'intensité lumineuse est gaussienne. L'équation 23 donne l'intensité dans le cas d'un milieu homogène et transparent (sans absorption).

$$I(r) = I_0 \frac{\omega_0^2}{W(z)^2} e^{\frac{-2r^2}{W(z)^2}} \quad (23)$$

où r (m) est la distance radiale par rapport à l'axe optique z , $W(z)$ (m) représente la divergence longitudinal du faisceau laser et I_0 ($W.m^{-2}$) l'intensité au centre de la gaussienne. Ce modèle est valide dans le cadre de l'approximation paraxiale (angle entre les rayons lumineux et l'axe optique z inférieur à 30°). L'équation 24 donne l'expression de $W(z)$ en fonction de z (m), du rayon de ceinture ω_0 (m) au niveau du col du faisceau et de la longueur de Rayleigh z_0 . I_0 peut également être calculée en fonction de la puissance totale P (W) du faisceau et de ω_0 (25).

$$W(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \quad (24)$$

$$I_0 = \frac{2P}{\pi\omega_0^2} \quad (25)$$

L'onde au niveau du col du faisceau est considérée comme plane et a la particularité de correspondre au rayon minimal que peut prendre le faisceau. C'est donc dans ce plan que l'intensité lumineuse est la plus élevée. Ensuite, l'onde diverge et devient peu à peu une onde sphérique. Cette divergence est représentée par z_0 qui est calculable à partir de ω_0 et de la longueur d'onde dans le vide λ_0 (m) (26).

$$z_0 = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda_0} \quad (26)$$

La figure I-26 donne une représentation schématique d'un faisceau laser et de ses différentes propriétés.

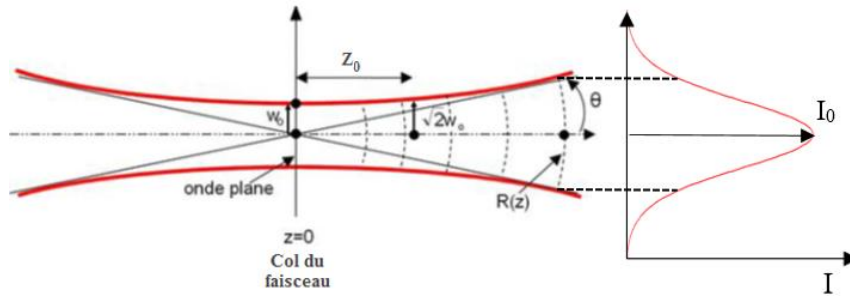


Figure I-26 : représentation du faisceau laser et de ses différents paramètres : Rayon de ceinture ω_0 , longueur de Rayleigh, intensité I_0 et profil radiale de l'intensité.

L'équation 27 permet de calculer le rayon de ceinture ω'_0 après le passage du faisceau à travers une lentille convergente de distance focale f . La figure I-27 schématise la focalisation d'un faisceau par une lentille.

$$\omega'_0 = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{z_0}{f}\right)^2}} \quad (27)$$

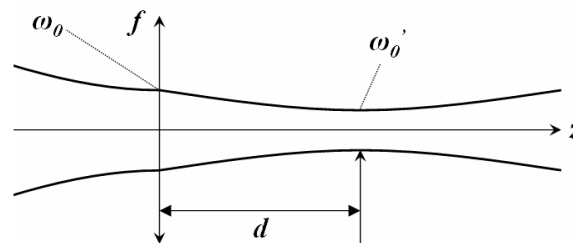


Figure I-27 : focalisation du faisceau laser par une lentille

Finalement, notons que le rayon à mi-hauteur d du faisceau dans le plan focal est souvent calculé avec une bonne approximation en utilisant le critère de Rayleigh (28)

sachant l'ouverture numérique NA de la lentille.

$$d = 0,61 \frac{\lambda}{NA} \quad (28)$$

Lorsqu'on prend en compte l'interaction de l'onde avec son environnement il faut utiliser l'équation 29 qui représente l'intensité de l'onde lumineuse transmise à une distance d le long de l'axe optique.

$$I(d) = I_0 \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (29)$$

5.3. Modélisation de l'échauffement induit par laser continu à 1340 nm

La simulation de l'échauffement thermique par laser a déjà été plusieurs fois étudiée [SPA76, LAX77, NIS80, MOO82, FER83, CHE83, LIA85] notamment pour comprendre l'origine du signal obtenu par stimulation laser thermique [FEX011]. Ces modèles 3D par éléments finis reposent essentiellement sur l'équation de la chaleur (30).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\kappa \nabla T] + G \quad (30)$$

où ρ (kg.m⁻³) est la densité volumique, C_p (J.kg⁻¹.K⁻¹) la chaleur spécifique massique, κ (W.m⁻¹.K⁻¹) la conductivité thermique et G (W.m⁻³) la densité volumique de puissance apportée par la source laser. G est donc directement relié à l'intensité lumineuse qui est linéaire dans ce modèle (31). g représente le profil gaussien normalisé de l'onde. La relation liant G et le rayon du faisceau est inverse quadratique, il est donc évident que l'échauffement est fortement impacté par la focalisation du laser.

$$G = I_0 \cdot g = \frac{2P}{\pi \omega_0^2} \quad (31)$$

Les différents éléments composant un circuit intégré ont en général des dimensions très inférieures ou du même ordre de grandeur que cette limite. C'est pourquoi la propagation du faisceau est calculée en utilisant un modèle ondulatoire de la lumière. Ce dernier résout numériquement les équations de Maxwell pour obtenir le champ électrique en tenant compte des réflexions, de l'absorption et des interférences ayant lieu dans la structure. Connaissant le champ électromagnétique dans la structure, il est possible de calculer la densité d'énergie absorbée en chaque point de la structure avec l'équation 32.

$$\frac{dE_e}{dV} = \frac{1}{2} \left[\epsilon \vec{E}^2 + \frac{\vec{B}^2}{\mu} \right] \quad (32)$$

où E_e (J) est l'énergie absorbée, V (m^3) le volume, ϵ ($C \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}$) la permittivité, $\vec{E}$ ($V \cdot m^{-1}$) le champ électrique, $\vec{B}$ (T) le champ magnétique et μ ($H \cdot m^{-1}$) la perméabilité magnétique de la structure. Il est ensuite aisé de remonter à G .

Le modèle présenté dans [FEX011] considère l'échauffement d'une ligne d'aluminium dans de l'oxyde de silicium, le tout sur un substrat en silicium faiblement dopé. Le faisceau laser est gaussien, la puissance totale est de 20 mW, le diamètre du spot est de $0,65 \mu m$. La géométrie choisie est montrée dans la figure I-28. A l'instant initial, la température est $20^\circ C$.

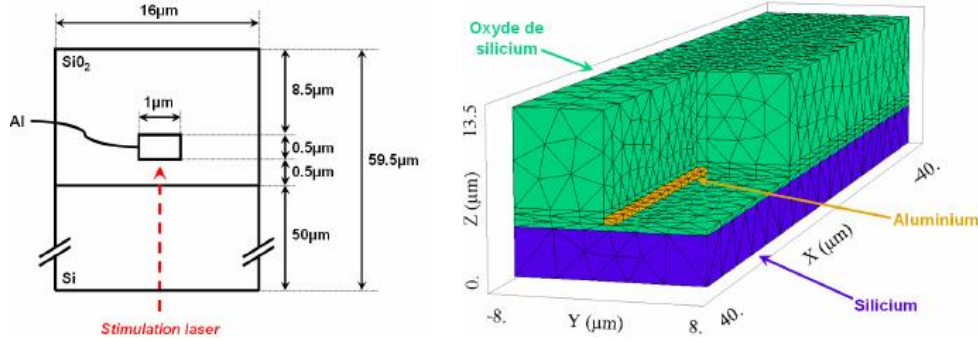


Figure I-28 : structure utilisée dans le cadre de la modélisation de la température induite par une stimulation au laser 1340 nm continu

Le tableau 1 résume les propriétés optiques et thermiques choisies pour la simulation [FEX003]. L'oxyde de silicium est considéré comme transparent, le silicium faiblement dopé est quasiment transparent. Par contre, l'oxyde de silicium a une chaleur spécifique massique relativement plus élevée ce qui indique qu'il est plutôt un isolant thermique. L'aluminium est un métal et, tout comme expliqué dans la partie précédente, il a un coefficient d'absorption élevé de $109,8901 \mu m^{-1}$ dû aux porteurs libres.

	Silicium	Oxyde de silicium	Aluminium
α (μm^{-1})	$9,6027 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	109,8901
ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	2330	2190	2702
κ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	141	1,4	246
C_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	703	1400	896
R	NA	0	0,97

Tableau 1 : propriétés optiques et thermiques des matériaux à une température de 300 K et une longueur d'onde de 1340 nm.

La figure I-29 montre la simulation de la répartition spatiale et temporelle de la température d'une ligne de métal en aluminium. On constate un maximum de température de 38°C dans la piste métallique. La figure de droite indique que la température maximale dans la ligne métallique est atteinte à environ 10 μ s. Cette constante de temps est importante pour la stimulation laser. Une vitesse de balayage trop rapide impliquera une stimulation thermique (et donc une sensibilité) plus faible. De plus, si la vitesse de balayage est trop rapide, l'électronique de détection peut ne pas avoir une bande passante suffisante pour repérer la variation. Cependant, la vitesse de balayage doit tout de même être suffisamment rapide pour couvrir le champ d'analyse en un temps acceptable (quelques secondes ou minutes).

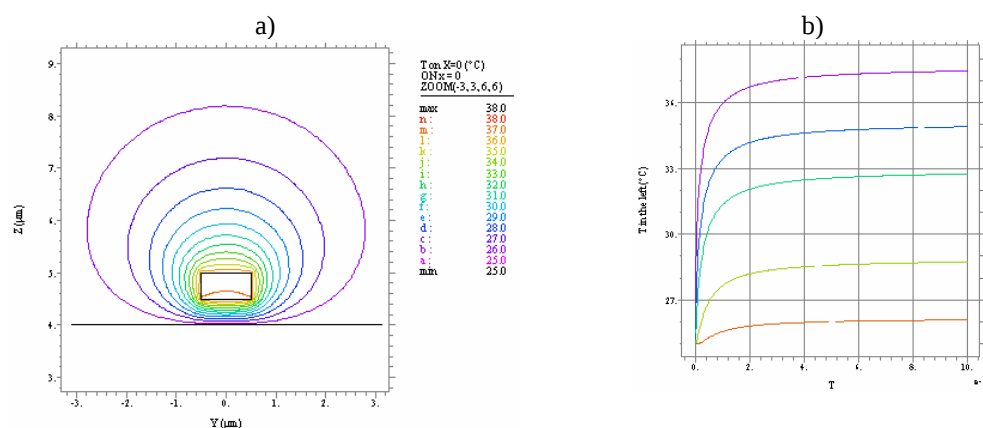


Figure I-29 : répartition spatiale de la température à 10 μ s dans le domaine de simulation (a) – Evolution temporelle de la température le long de la ligne métallique (b) [FEX003]

Finalement, comme la relation (31) est linéaire, il existe un coefficient ΔT reliant directement la température à la puissance lumineuse. Dans ce cas, ΔT égale 0,55 $^{\circ}$ C/mW.

5.4. Conclusion

Le faisceau laser est donc focalisé sur le transistor et a un profil gaussien, ce qui permet d'obtenir facilement des intensités lumineuses très importantes.

La modélisation de l'échauffement est réalisée en utilisant l'équation de la chaleur qui contient des termes associée à la structure du circuit intégré et un terme associé à la source lumineuse.

Cet échauffement induit des variations de résistances électriques des matériaux qui sont être utilisées dans le cadre du mode pompe.

6. Effet de la miniaturisation

6.1. Introduction

Pour pallier au manque de résolution imposé par l'utilisation de longueur du proche infra-rouge, l'utilisation de Lentille à Immersion Solide (SIL) est indispensable. Les SILs habituellement en Si ou GaAs augmentent l'ouverture numérique du système optique et par conséquent la résolution spatiale. Un exemple de SIL est présentée en figure I-30.

6.2. Les lentilles à immersion solide (SIL)

Les spécifications d'une SIL imposent en général une épaisseur de substrat et une planéité de l'interface substrat/SIL. Habituellement, l'épaisseur imposée est de $100\ \mu\text{m} \pm 30\ \mu\text{m}$ et une variation de $10\ \mu\text{m}$ sur l'ensemble de la face arrière.

Typiquement, ce type de lentille permet d'avoir des ouvertures numériques supérieures à 1 (2,45 au laboratoire ST Crolles) correspondants à des spots laser d'un diamètre de l'ordre de 330 nm à mi-hauteur et des grossissements de l'ordre de 220 fois. La conséquence directe d'une focalisation aussi importante est une augmentation de la densité de puissance optique injectée dans les transistors. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, cette densité de puissance optique est directement reliée à l'échauffement induit par le laser. On comprend donc aisément que la focalisation du faisceau par ce type d'objectif augmente sensiblement les risques de dégradation des transistors.

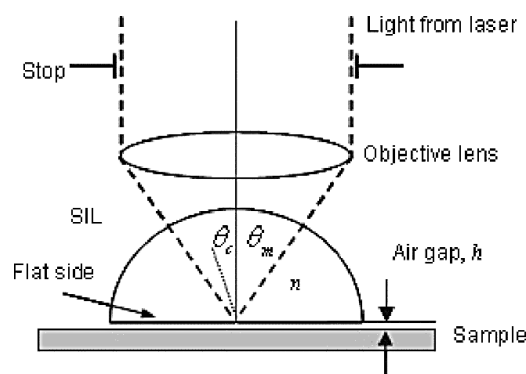


Figure I-30 : principe de la Lentille à Immersion Solid (SIL)

6.3. Le problème de la résolution spatiale et de la sensibilité

Aujourd'hui, La miniaturisation induit des problèmes à la fois au niveau de la résolution spatiale et de la sensibilité des techniques.

Pour rappel, la résolution spatiale est la plus petite distance qu'un système peut résoudre. Pour la calculer, on utilise en général le critère de Rayleigh (Partie 4.1 – Equation 17). Pour une SIL 2,45 NA et une longueur d'onde de 1340 nm, elle est de 330 nm.

La sensibilité est un paramètre exprimant la variation de la grandeur de sortie d'un système en fonction de la grandeur d'entrée d'un système de mesure. Par exemple, dans le cas de l'OBIRCH, la grandeur de sortie est la variation de résistance électrique du circuit ($\Delta\Omega$) et la grandeur d'entrée est la variation de température induit par le laser.

Sur les technologies sub32 nm, il est donc possible de détecter des défauts résistifs très fin sans nécessairement les localiser au transistor près.

La figure I-31 montre des exemples d'acquisition en émission de lumière (EMMI) avec une caméra InGaAs sur des cellules standards de différentes technologies. On voit en particulier que le nombre de transistors recouverts par un spot de photoémission passe de 1 transistor pour une technologie 120 nm à plusieurs dizaines pour une technologie 28 nm.

Un autre problème de la miniaturisation est l'augmentation du nombre de défauts à faible tension rendant la technique EMMI beaucoup moins voire totalement inefficace.

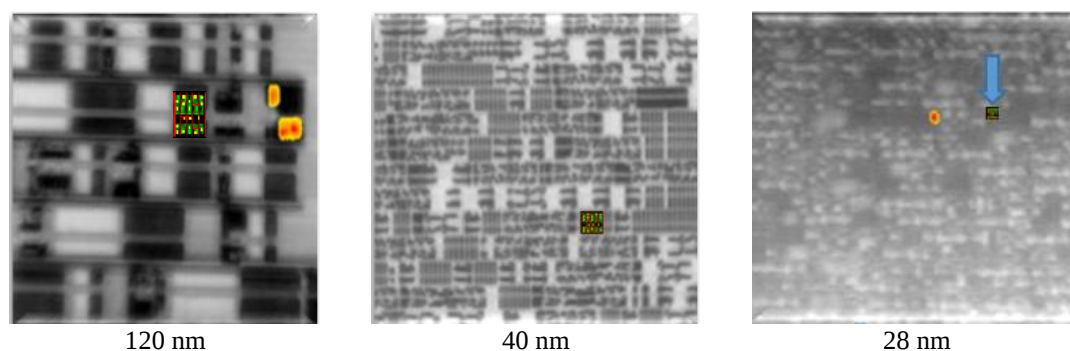


Figure I-31 : image InGaAs avec SIL 220X avec acquisition EMMI et un lay-out d'une cellule standard

C'est pourquoi, les techniques lasers sont quasi-systématiquement utilisées sur les technologies sub-32 nm. Avec ces techniques, il est possible de détecter des défauts d'une dimension largement inférieure à la résolution spatiale, grâce à la sensibilité de l'électronique.

Il arrive tout de même qu'un défaut soit difficile à mettre en évidence par une approche traditionnelle des techniques LVI, SDL ou OBIRCH. Ceci est encore plus vrai pour les défauts à basse tension. La figure I-32 montre une signature LVI à 10 MHz dans une bascule alimentée à 1 V et à 0,6 V. On voit très clairement qu'aucune information n'apparaît à 0,6 V. Ceci peut amener l'analyste à vouloir utiliser des puissances lasers plus importante pour améliorer le SNR.

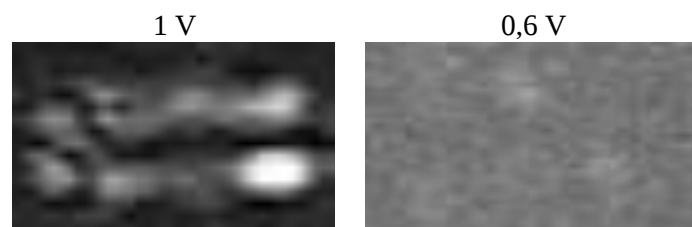


Figure I-32 : cartographie de fréquence à 10 MHz dans une bascule à 1 V et à 0,6 V

6.4. Suspensions d'effet invasif du laser

Avec le temps, la dose reçue par les transistors a donc drastiquement augmentée. La caractérisation physique par TEM a révélé des défauts sans corrélation avec le défaut électrique de départ. Se pose alors la question de la dose laser acceptable par les transistors. La figure I-33 montre des exemples de défauts où il y a des suspicions d'effets invasifs du laser. En a), le BOX est déformé, en b), il y a un trou dans le siliciure, en c), on observe une dégradation du TiN et en d) le siliciure de la grille a diffusé en dehors de la grille jusqu'au contact et forme un court-circuit.

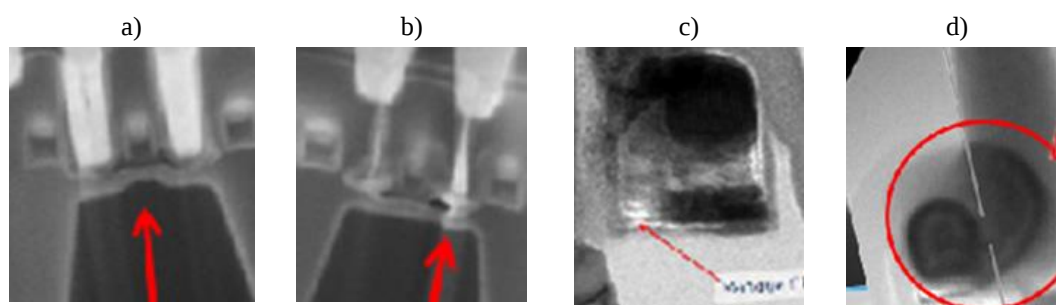


Figure I-33 : exemple de défauts reliés à des suspicions d'effet invasif du laser

6.5. Conclusion

Les contraintes liées au manque de résolutions et de sensibilité amène à l'utilisation d'objectifs SIL à fort grossissement qui augmentent la densité de puissance laser reçue par les transistors.

De plus, la miniaturisation des technologies implique l'apparition de plus en plus souvent de défaut à basse tension. Le manque de sensibilité des techniques lasers dans ces conditions peut amener l'utilisateur à utiliser des puissances lasers et des temps d'expositions plus importants pour augmenter le SNR.

Le problème aujourd'hui est l'apparition de défauts non corrélés aux diagnostics électriques induisant des suspicions de dégradation induites par le laser.

7. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons rappelé le principe de l'analyse de défaillance de circuit par la face arrière qui se fait en général en utilisant des lasers à 1064 nm ou à 1340 nm. Cette thèse s'intéresse plus précisément au laser 1340 nm utilisé pour les techniques LVI, OBIRCH et SDL.

Les circuits intégrés se composent de 2 principalement parties : le BEOL essentiellement composé de Cu et de SiO₂ et Le FEOL qui est fait de transistors.

La recherche bibliographique montre que les propriétés optiques des matériaux peuvent être résumées par l'indice de réfraction. Ce-dernier permet de remonter notamment au coefficient d'absorption d'un matériau. A 1340 nm, l'interaction du faisceau avec le Si est faible (silicium considéré transparent). L'échauffement est dû à l'absorption du faisceau par les métaux dont les électrons sont quasi-libres.

Nous avons également relevé l'existence des effets Franz-Keldish et de Kerr susceptible de modifier les propriétés optiques des matériaux. Ces phénomènes sont à la base des techniques sondes.

Le faisceau laser peut être modélisé par une onde gaussienne dont le rayon de courbure peut être réduit en utilisant une lentille convergente. Il est possible de modéliser l'échauffement induit par le laser en utilisant ce modèle gaussien ainsi que l'équation de la chaleur. Les techniques OBIRCH, SDL et SEI reposent sur cet échauffement. Les techniques sondes (LVI et CW-LVP) reposent sur l'interaction du faisceau avec le CI et sur la mesure de l'onde réfléchi.

Des cas d'analyses où ces techniques ont été utilisées montrent des défauts avec de fortes suspicions d'effet invasif du laser. De plus, les techniques lasers à des puissances laser standards montrent leur limite sur des défauts à basse tension. Il est donc intéressant d'avoir une bonne connaissance de la dose laser acceptable par les transistors. Ceci passe par connaître quels types de défauts sont induit par le laser à la

fois au niveau électrique et au niveau morphologique. Enfin, l'évolution et la miniaturisation des technologies ne cessant de continuer, il est intéressant de construire un outil capable de prévoir cette dose pour de futures technologies.

CHAPITRE II : Reproduction et caractérisation sur circuit intégré de défauts induits par laser

1. Introduction

Le premier chapitre met en évidence la nécessité d'utiliser les techniques basées sur la microscopie à balayage laser couplées à des lentilles à immersion solide (SIL) pour localiser les défauts dans les technologies 28 nm et en-dessous. En effet, sur ces nœuds technologiques, il est indispensable d'utiliser ces lentilles pour avoir une localisation au transistor près. L'émission de lumière (EMMI) reste une technique d'analyse importante car elle permet de caractériser l'état des transistors de manière non invasive. Elle sera utilisée dans l'étude pour donner un statut avant et après stress laser.

Certaines analyses de défaillance montrent des défauts physiques difficilement explicables par un problème lié au procédé de fabrication (process) ou à la conception (design) ; aussi des fortes suspicions d'effet invasif du laser sont portées.

Ce chapitre décrit une étude dont l'objectif est de caractériser électriquement et morphologiquement les dégradations induites par une source laser 1340 nm continue habituellement utilisée pour faire de l'analyse de défaillance (LVI, OBIRCH, etc...) sur les technologies 28 nm sur substrat isolant (28FDSOI).

Une analogie peut être faite entre la méthodologie de l'étude et une analyse de défaillance standard :

- tout d'abord, un défaut induit par le laser est reproduit sur une structure de type chaîne d'inverseurs,
- ensuite, les transistors sont caractérisés électriquement et individuellement par nano-probing. Nous utiliserons les caractéristiques standards des transistors. (I_{off} , I_{on} , V_{th}),
- enfin, les transistors défaillants sont caractérisés physiquement et chimiquement par microscopie électronique en transmission (TEM) et par analyse chimique (EDX).

L'étude montre pour la première fois une caractérisation complète des dégradations des transistors MOS en technologie 28FDSOI au niveau électrique et au niveau morphologique en fonction d'un stress laser. Des zones d'interactions « laser-circuit intégré » ont notamment été déduites pour des conditions expérimentales données.

2. Reproduction d'un défaut induit par laser sur une chaîne d'inverseurs en anneau

2.1. Introduction

Cette partie décrit la méthode employée pour reproduire un défaut par laser de longueur d'onde 1340 nm et continu sur une structure de type « inverseurs en anneau ».

L'objectif est de savoir si le laser utilisé pour faire des localisations de défauts (LVI, OBIRCH et SDL) peut induire des changements électriques ou physiques irréversibles en technologie 28FDSOI dans une gamme de puissances accessibles à l'utilisateur.

2.2. Description et fonctionnement d'une chaîne d'inverseurs en anneau

Une chaîne d'inverseurs montés en anneau est une chaîne d'inverseurs en nombre impair rebouclée entre la sortie S et une entrée B d'une porte NAND. Cette structure est représentée schématiquement en figure II-1.

Lorsque l'entrée A est à 0 (figure II-1), la sortie S est toujours égale à 0 : l'anneau est dit bloqué. Lorsque l'entrée A est à 1, la valeur de la sortie peut être égale à 0 ou 1 : l'anneau oscille et est dit à l'état passant.

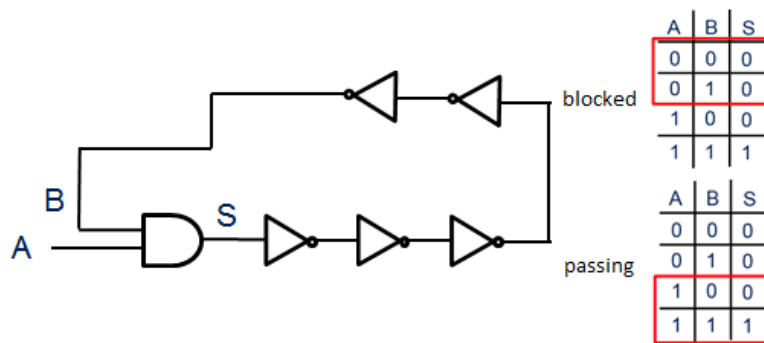


Figure II-1: schéma d'un oscillateur à anneau avec les tables de vérité

2.3. Dessin de masque et paramètres de la structure

Le dessin de masque de la structure choisie pour les tests lasers est présenté sur la figure II-2. Chaque transistor (nMOS et pMOS) possède ses propres contacts drain/source. Le contact de grille est commun aux 2 transistors. Au niveau dimensionnel, la zone active des nMOS mesure 100 nm x 100 nm tandis que celle des pMOS est de 100 nm x 170 nm.

La distance entre les inverseurs est de 325 nm et le diamètre du faisceau laser (de type gaussien) est estimé à 330 nm à mi-hauteur en utilisant la formule de Rayleigh. Cela permettra une stimulation laser sans impact direct sur les autres inverseurs.

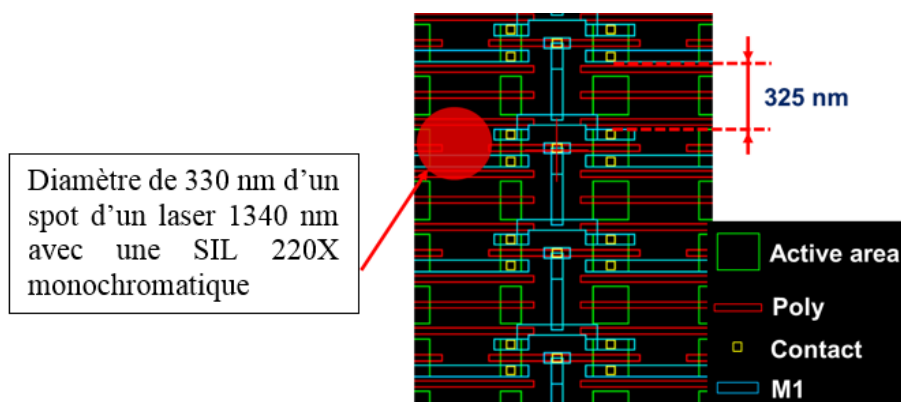


Figure II-2 : Dessin de masque - Comparaison de la distance entre les transistors

A l'instant t_0 , le courant électrique nominal et la fréquence de fonctionnement de l'oscillateur en anneau à 1 V sont respectivement de 40 μA et 400 MHz.

2.4. Microscopie à photoémission – EMMI

La microscopie à photoémission est une technique non-invasive qui consiste à observer les photons émis par le circuit [KHU86]. Tout comme pour les techniques lasers décrites dans le chapitre précédent, elle est utilisée par la face arrière des circuits dans le domaine du proche infra-rouge. Dans le cadre de cette étude, l'EMMI a été réalisée avec une caméra InGaAs sensible de 0,9 μm à 1,55 μm de longueur d'onde couplée à une SIL.

Cette technique sera utilisée pour caractériser le fonctionnement de la structure.

2.5. Méthodologie de reproduction du défaut

2.5.1. Acquisition EMMI avant test laser

Avant toute exposition au laser, des acquisitions EMMI préliminaires sont réalisées pour s'assurer qu'aucune défaillance n'est présente. En effet, tous les transistors sont en principe identiques (même conception et connectés de la même manière) : le niveau de photoémission de chaque transistor doit être identique.

La figure II-3 représente la photoémission dynamique des inverseurs avant le test laser et montre, comme attendu, une intensité relativement uniforme entre les transistors.

On peut donc aisément conclure en première approximation qu'aucun transistor ne présente de défaillance notable.

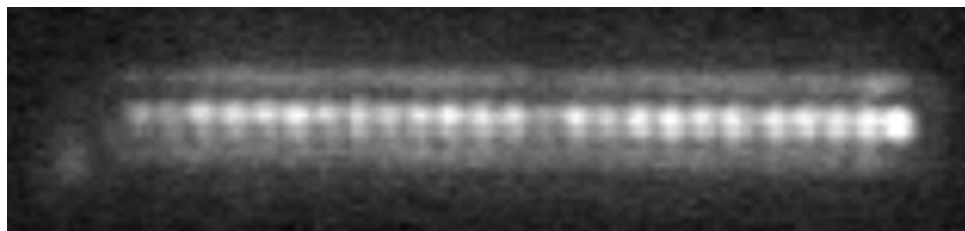


Figure II-3: cartographie EMMI dynamique d'une chaîne d'inverseurs avant un test laser

2.5.2. Stimulation laser

La puissance laser est mesurée en utilisant une photodiode. Cette valeur est calibrée en mode pointé en utilisant un puissancemètre. Une pondération est ensuite appliquée pour tenir compte de l'absorption des différents matériaux (objectif SIL et silicium). Les valeurs de puissance laser qui sont données à partir de maintenant correspondent donc à la puissance laser reçue au niveau du transistor.

Avant le test laser, un alignement dessin de masque avec le circuit sous test est nécessaire pour fiabiliser la reproductibilité de l'expérience (résolution, focalisation et dose).

Les paramètres géométriques de conception de la structure permettent de stimuler individuellement chaque inverseur. La stimulation laser est réalisée dans des régions d'intérêts de $0,59\ \mu\text{m} \times 0,18\ \mu\text{m}$ englobant le nMOS et le pMOS de chaque inverseur. Ensuite, comme illustré par la vue LSM (figure II-4), la dose laser est progressivement augmentée de l'inverseur 2 à l'inverseur 15 en augmentant la puissance du laser. La vitesse de balayage et le diamètre du spot sont maintenus constants à $128\ \mu\text{s}/\text{pixel}$ et $330\ \text{nm}$ respectivement, ce qui correspond à une analyse laser standard. Le premier inverseur sert de référence et n'est pas exposé au laser.

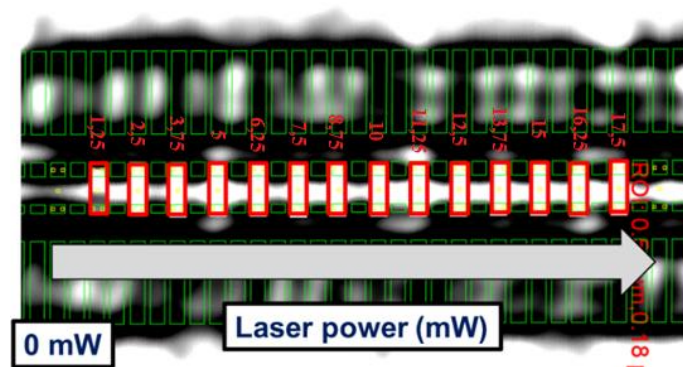


Figure II-4 : LSM - test laser dans les régions d'intérêts recouvrant chaque inverseur CMOS avec le même temps d'exposition constant et une puissance laser croissante.

2.6. Résultats

Au cours du balayage laser, on observe une modification des paramètres de consommation dynamique et de fréquence. Nous avons choisi de ne pas tenir compte de ces paramètres pendant la stimulation pour des raisons de quantification (précision et intérêt). Seuls les paramètres qui varient avant et après stress sont pris en compte.

A ce stade de l'étude, deux tendances significatives sont visibles en regardant l'image de photoémission après le stress laser (figure II-5) :

- Jusqu'à 15 mW, lorsque la stimulation laser est arrêtée, la consommation électrique et la fréquence reviennent aux valeurs mesurées avant l'exposition au laser. Le niveau de photoémission dynamique est identique à la référence.
- Pour une puissance de laser supérieure à 15 mW, des changements irréversibles des paramètres sont mesurés.



Figure II-5: cartographie EMMI dynamique d'une chaîne d'inverseurs montés en anneau après stimulation au laser

Nous montrerons lors de la caractérisation physique que ces changements sont directement liés à des dégradations morphologiques.

2.7. Conclusion

La structure choisie permet de stimuler thermiquement chaque inverseur de manière indépendante, de prendre en compte des paramètres électriques significatifs (consommation, fréquence et fonctionnalité) et d'observer l'impact du stress induit par le laser grâce à une acquisition EMMI avant et après chaque stress.

L'expérience montre qu'un défaut irréversible peut être produit par un laser continu de longueur d'onde 1340 nm dans des conditions expérimentales d'analyse de défaillance.

Au premier ordre, en fonction du stress laser appliqué, 2 zones se distinguent : une zone de fonctionnalité et une zone de dégradation.

La partie suivante concerne la caractérisation électrique des transistors ayant été stimulés au laser continu de longueur d'onde 1340 nm dans le but d'obtenir une meilleure définition des zones d'interaction laser-circuit intégré.

3. Caractérisation électrique du défaut

3.1. Introduction

La caractérisation électrique par nano-probing au niveau contact dans un microscope électronique à balayage (figure 8) est utilisée pour mesurer les caractéristiques électriques des transistors par la face avant [TOH2008, FUK2017, TOH2007].

L'objectif est d'obtenir les distributions des caractéristiques électriques des transistors stressés en fonction de la dose injectée par le laser CW 1340 nm.

3.2. Préparation de l'échantillon pour la mesure électrique

Pour mesurer les caractéristiques électriques d'un transistor, il faut poser des nano-sondes sur la grille, la source et le drain. Il est donc nécessaire au préalable d'enlever toutes les couches de métallisation jusqu'aux contacts par polissage. C'est une préparation délicate puisqu'on doit être plan dans la zone d'intérêt. Dans l'exemple de la figure II-6, on montre des nano-sondes posées sur les contacts d'un transistor à mesurer. Sur la droite de l'image (en blanc), nous pouvons voir qu'il reste encore du métal 1 qui n'impacte pas l'étude.

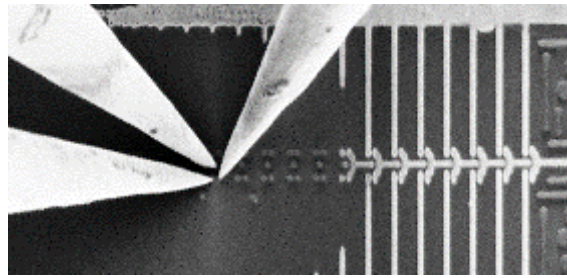


Figure II-6 : SEM – nano-sonde sur les contacts en W

3.3. Méthode de caractérisation électrique

La caractérisation électrique standard d'un transistor se fait par la mesure, à une tension V_{DS} donnée, du courant I_{DS} entre le drain et la source en fonction de la tension V_{GS} entre la grille et la source. Sur ces caractéristiques, la tension de seuil V_t est mesurée en trouvant le point d'intersection entre la tangente à la caractéristique et l'axe des abscisses. Le courant I_{on} est mesuré à V_{GS} nominal et le courant I_{off} à V_{GS} à 0 V.

La figure II-7-a montre les courbes $I_d(V_g)$ de transistors nMOS respectivement en échelle linéaire (les pMOS ont également été mesurés). Dans cet exemple, le transistor dégradé par le laser est encore fonctionnel mais sa tension de seuil V_t , ainsi que ses courants I_{on} et I_{off} sont décalés indiquant que le transistor nMOS est plus rapide mais présente des courants de fuite plus important.

La figure II-7-b montre les mêmes courbes mais avec une ordonnée logarithmique. L'augmentation de ce courant de fuite I_{off} de 2 ordres de grandeur d'un transistor dégradé au laser est ainsi mise d'avantage en évidence.

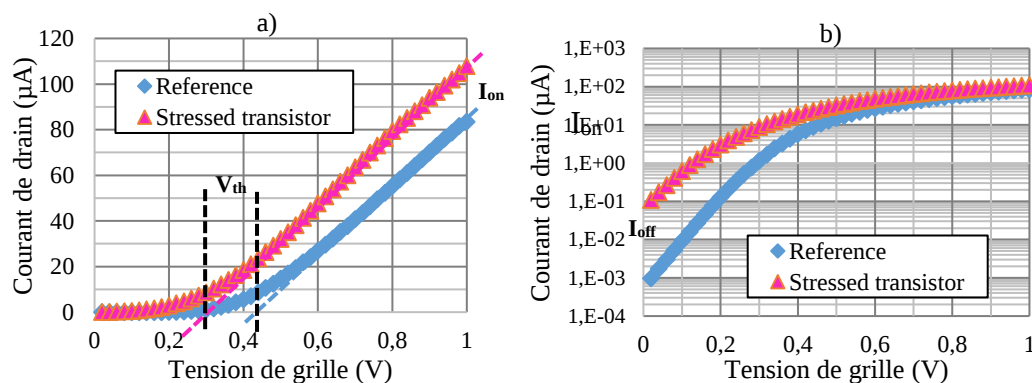


Figure II-7 : échelle linéaire (a) –échelle logarithmique (b) - courant de drain en fonction de la tension de grille pour un nMOS de référence et un nMOS dégradé au laser 1340 nm continu pour une tension source-drain de 1V

3.4. Résultats

En regardant la Figure II-8-a, nous n'observons aucune tendance sur le courant i_{off} entre 0 mW et 8 mW et un courant i_{off} croissant de quelques nA à presque 70 nA au-dessus de 8 mW de puissance laser.

La figure II-9-a montre une diminution de la tension de seuil (V_t) de 400 mV à 300 mV des nMOS ayant été stimulés au laser à des puissances supérieures à 8 mW ; la figure II-10-a montre une augmentation du courant i_{on} de 80 μ A à 110 μ A. Au-delà de 15 mW de puissance laser, le nMOS est trop endommagé ; il n'est plus fonctionnel et impossible à caractériser. De manière générale, aucune fuite de grille n'a été observée.

Les données sur les transistors pMOS montrent les mêmes tendances (Figure II-8-b, II-9-b et II-10-b) que sur les transistors nMOS.

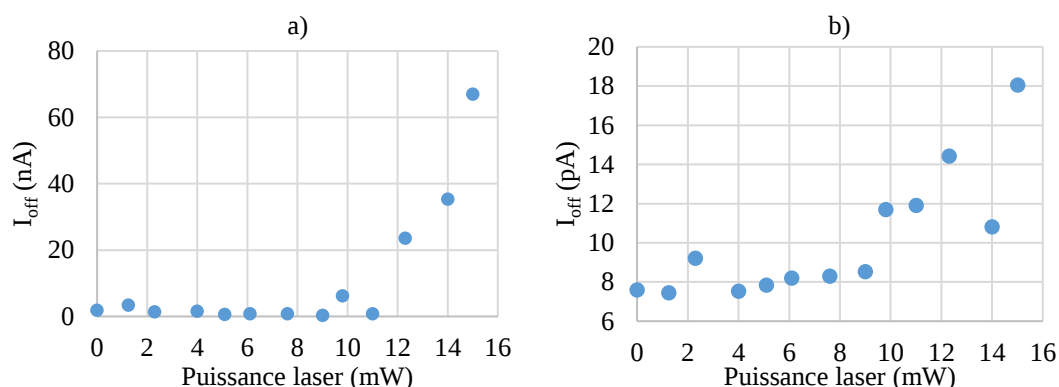


Figure II-8 : courants I_{off} des transistors nMOS (a) et pMOS (b) en fonction de la puissance laser

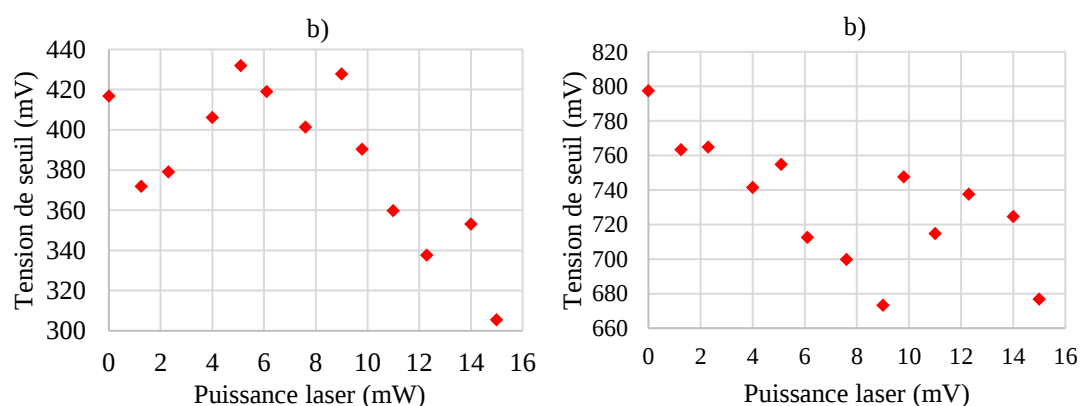


Figure II-9 : V_{th} des nMOS (a) et pMOS (b) en fonction de la puissance laser

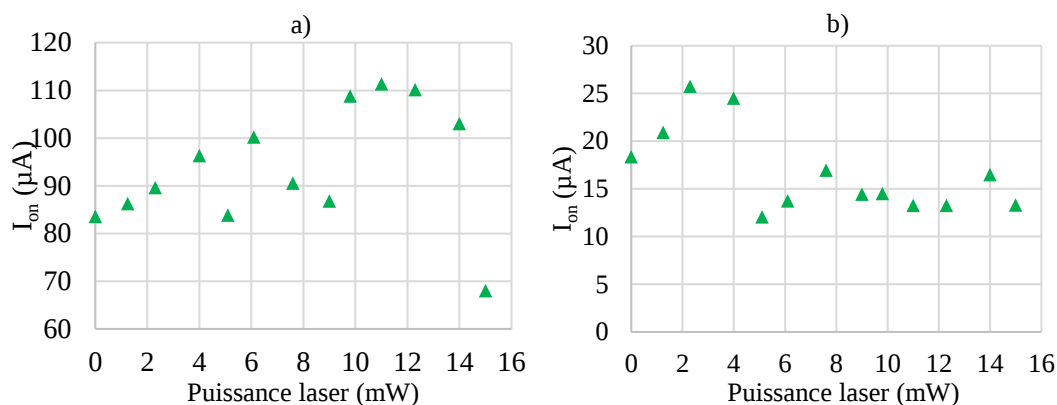


Figure II-10 : courants I_{on} des transistors nMOS (a) et pMOS (b) en fonction de la puissance laser

3.5. Conclusion

La caractérisation électrique met donc en évidence l'existence de 3 zones d'interactions laser-circuit intégré :

- une première zone « **élastique** » : le laser induit une variation réversible des caractéristiques électriques des transistors. Il y a augmentation de la consommation électrique et de la fréquence pendant le stress, mais les caractéristiques électriques des transistors restent inchangées après stress,
- une deuxième zone « **plastique** » : le circuit et les transistors fonctionnent toujours, mais les caractéristiques électriques des transistors changent. Il y a augmentation du courant i_{off} et diminution de la tension de seuil V_{th} des transistors aussi bien sur les nMOS que sur les pMOS,
- une troisième zone « **destructive** » : les dégradations des transistors sont telles qu'ils ne fonctionnent plus du tout. Les caractéristiques électriques des transistors ne sont plus exploitables.

La partie suivante s'intéresse à la caractérisation physique des transistors dans le but de faire un lien entre les défauts électriques et la morphologie des transistors dégradés.

4. Caractérisation physique du défaut

4.1. Introduction

L'analyse physique se fera par microscopie électronique en transmission (TEM) sur les transistors stressés.

L'objectif est de faire le lien entre les dégradations électriques mesurées précédemment et le défaut morphologique.

4.2. Préparation de l'échantillon pour l'observation TEM

L'analyse TEM nécessite la préparation de lamelles spécifiques (figure II-11). Au vue des dimensions de la structure, les lamelles qui ont réalisées pour cette étude font 100 nm d'épaisseur et 10 μ m de longueur au maximum. Compte tenu de la géométrie de la structure étudiée, les 15 transistors stressés sont présents dans la même lamelle. Néanmoins, 2 lamelles seront nécessaires pour observer les transistors nMOS et pMOS.

Ces lamelles ont été préparées à l'aide d'un microscope à double faisceau (FIB-SEM). Cet outil comporte une partie générant un faisceau d'ion gallium utilisé pour usiner la pièce et une partie microscope électronique à balayage pour l'observation de la lamelle.

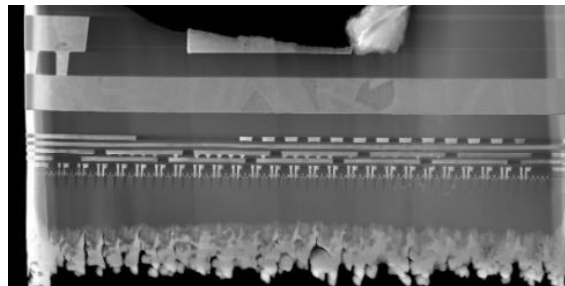


Figure II-11 : image SEM d'une lamelle de 100 nm d'épaisseur et 10 μ m de longueur avec tous les nMOS

4.3. Microscope électronique en transmission TEM/STEM

Le TEM permet d'imager un échantillon par projection en utilisant un faisceau d'électrons [WIL96]. L'utilisation des électrons permet d'obtenir des longueurs d'ondes de l'ordre de 0,0025 nm en accélérant des électrons à 200 kV. Ceci permet en théorie d'atteindre des résolutions de quelques nanomètres [ERN2009].

La caractérisation physique a été réalisée en mode STEM. Dans ce cas, le faisceau est convergent et balaie l'échantillon. La partie transmise du faisceau est alors plus ou moins diffractée par une interaction coulombienne en fonction des matériaux qu'elle rencontre. L'angle de diffraction dépend fortement du numéro atomique du matériau. C'est pourquoi on parle de contraste en Z : Les matériaux de numéro atomique élevé comme le tungstène apparaissent plutôt blancs tandis que les éléments légers

apparaissent plutôt noirs. La figure II-12 montre une image de référence STEM d'un transistor nMOS et d'un transistor pMOS en technologie 28FDSOI Snon stimulés par un faisceau laser.

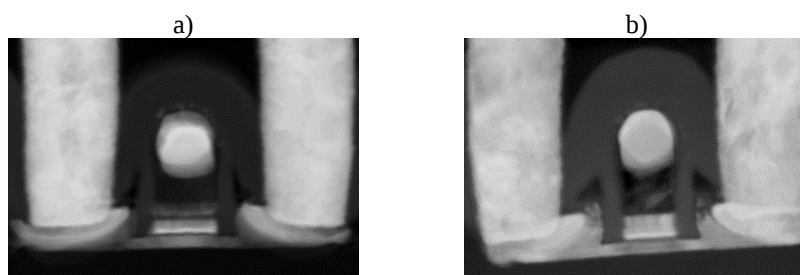


Figure II-12 : STEM – nMOS (a) et pMOS (b) de référence

4.4. Résultats

La figure II-13 montrent les transistors nMOS et pMOS après une stimulation au laser continu de longueur d'onde 1340 nm. L'ensemble des résultats montre que le défaut induit par le laser est principalement localisé au niveau de la grille du transistor. Pour les transistors nMOS et pMOS, des cas isolés de dégradations ont été observés entre 5 et 15 mW de puissance laser. Au-dessus de 15 mW, ces dégradations sont systématiques.

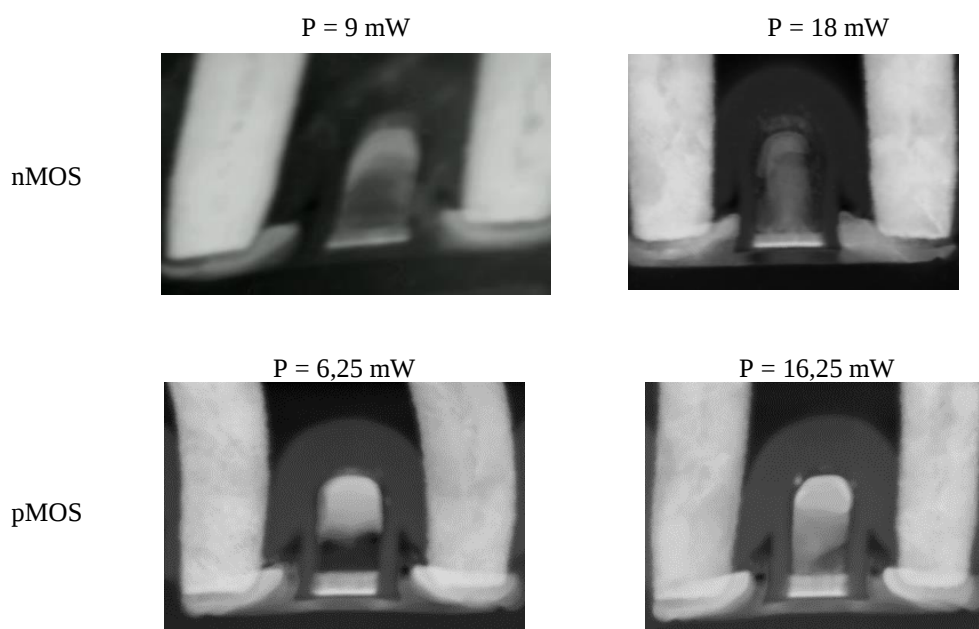


Figure II-13 : image STEM de transistors nMOS et pMOS stimulés au laser à des puissances de 6,25 mW et 16,25 mW

4.5. Conclusion

Quand on observe l'ensemble des résultats, on peut également définir arbitrairement 3 zones d'interaction associables à celles décrites dans la partie précédente sur la caractérisation électrique du défaut :

- la première zone va de 0 à 5 mW : les transistors sont tous semblables à la référence. Cette zone est associée à l'**interaction élastique**,
- la deuxième zone va de 5 à 15 mW : des cas isolés de dégradations principalement localisées au niveau de la grille sont observés. Cette zone peut être associée à l'**interaction plastique**,
- la troisième zone est à partir de 15 mW et au-delà : la dégradation est systématique. Tout comme le montre la figure II-14, ce défaut morphologique est aussi principalement localisé au niveau de la grille.

A puissance plus élevée, des cas extrêmes de dégradation ont aussi été observés.

Cependant, une analyse chimique est nécessaire afin de quantifier les éléments mis en jeu dans la dégradation

5. Caractérisation chimique du défaut

5.1. Introduction

La caractérisation chimique a été réalisée en utilisant la technique EDX qui permet de cartographier les éléments chimiques avec des résolutions de l'ordre du nm.

L'objectif est de caractériser et de quantifier plus précisément les longueurs de diffusion dans les défauts.

5.2. La cartographie chimique par Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)

L'EDX est une technique de caractérisation chimique utilisée en mode STEM basée sur l'interaction entre un faisceau d'électrons et un échantillon [JOS2003]. Sa mise en œuvre est liée au fait que chaque élément possède une structure atomique unique. Le faisceau d'électrons suffisamment énergétique excite un électron d'une couche inférieure d'un atome et génère des trous d'électrons. Ces trous sont ensuite comblés par les autres électrons des couches supérieures et on observe une émission spontanée de rayon X. L'énergie de ces rayons X étant caractéristique de chaque élément, en analysant le spectre (figure II-15) émis par l'échantillon, il est alors possible de

déterminer les espèces chimiques en chaque point scanné.

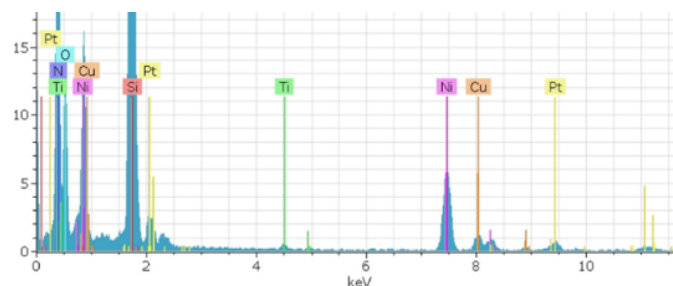


Figure II-14 : exemple de spectre d'énergie obtenue par analyse dispersive en énergie (EDX)

Dans les cartographies chimiques suivantes, on note que les chevauchements de pics d'éléments conduisent à la possibilité de trouver le signal Ni, Ge, Si, Hf et Pt dans la zone W (contact). Hf et Pt peuvent également être mélangés. En raison du grand grossissement et du temps d'exposition long, la dérive de l'échantillon peut provoquer des déformations de l'image. Le profil du pourcentage d'atomes le long de la grille, tel que les figures 16, 17 et 18, est également présenté pour quantifier toute diffusion d'élément.

5.3. Résultats

La caractérisation chimique de ces transistors révèle des cas isolés de diffusion verticale de nickel (Figure II-16-a) et de platine (Figure II-17-a) à travers la grille dans la plage de 5 mW à 15 mW. De plus, on a effectué des quantifications du rapport Ni, Pt et Si dans les zones A et B (figures II-16-a et II-17-a) couplées aux profils le long de la grille (figures II-16-b et II-17-b). Celles-ci montrent un pourcentage de Ni et Pt respectivement de 50% et 10% à un maximum de 30% et 3% avec une dégradation électrique/morphologique observable.

Au-delà de 15 mW, les cartographies chimiques indiquent que Ni et Pt remplissent totalement la grille avec un rapport dans la zone C de 25% et de 2-4% (figure II-16-a et II-17-a). La figure II-18 montre que Ti s'est également répandu dans la grille.

Au niveau EDX, aucune différence notable n'a été observée entre les transistors nMOS et pMOS. Les cartographies chimiques des transistors pMOS sont en annexes A.

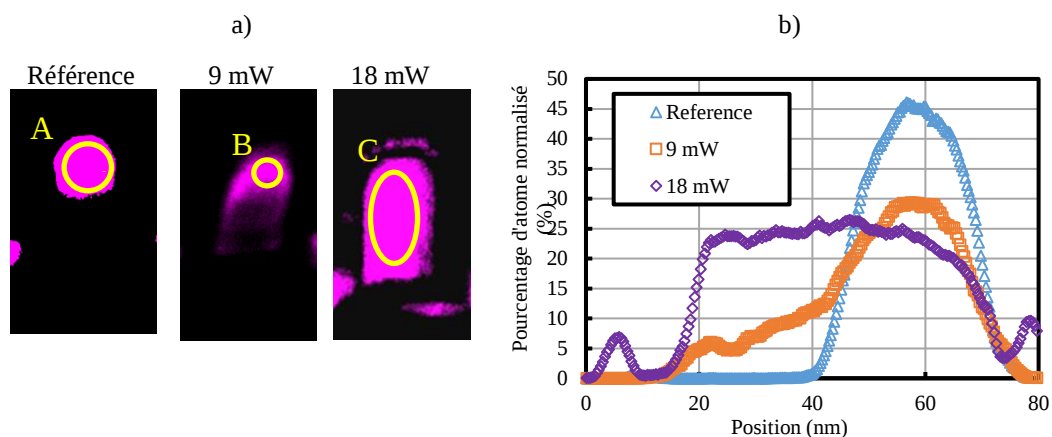


Figure II-15 : cartographie EDX (a) et profil (b) du Ni pour un transistor nMOS stimulé avec 3 puissances laser croissantes

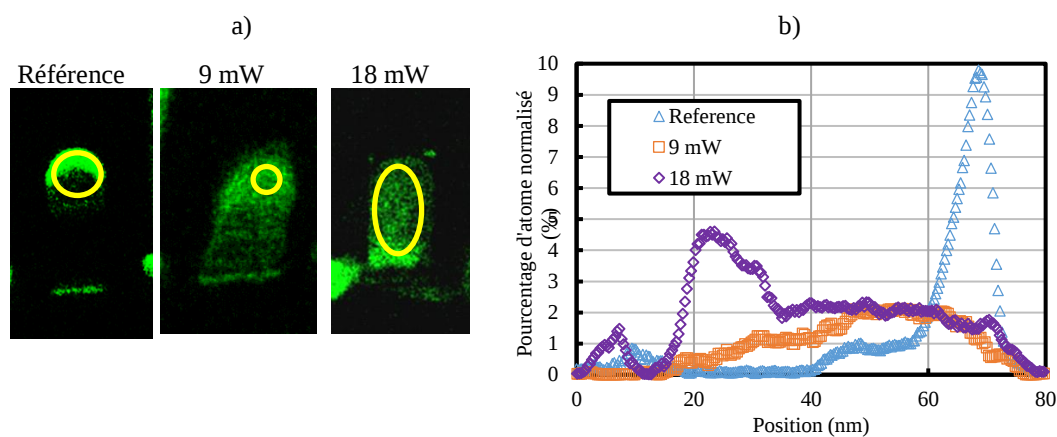


Figure II-16 : cartographie EDX (a) et profil (b) du Pt pour un transistor nMOS stimulé avec 3 puissances laser croissantes

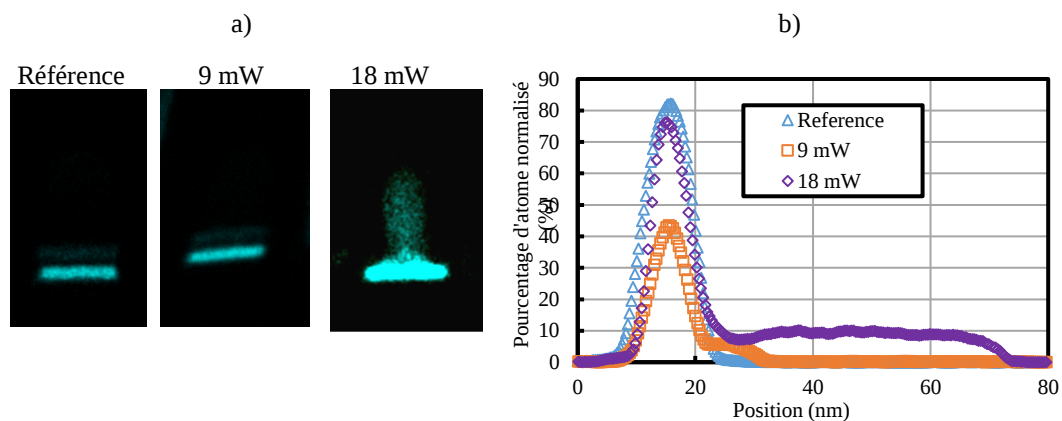


Figure II-17 : cartographie EDX (a) et profil (b) du Ti pour un transistor nMOS stimulé avec 3 puissances laser croissantes

Pour une puissance laser supérieure à 18 mW, 3 cas de dégradations « extrêmes » ont été observés. Dans la figure II-19-a, nous pouvons voir une déformation du film SOI situé sous le canal. Sur la même figure II-19-b, nous pouvons aussi voir un cas où la diffusion du NiSi a été tellement importante qu'un court-circuit entre la grille, le drain et la source a été créé. La figure II-19-c montre un claquage de transistor.

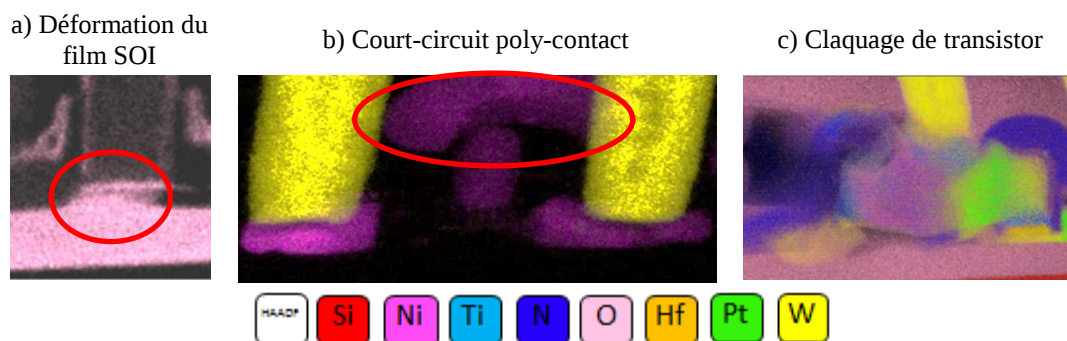


Figure II-18 : cartographie par EDX de 3 transistors stressés au laser à plus de 18 mW

5.4. Conclusion

La caractérisation chimique met en évidence que le défaut induit par le laser sur la technologie 28FDSOI est principalement la diffusion du nickel et du platine de la grille dans le silicium poly-cristallin. Ce type de défaut a déjà été mis en évidence sur des cas réels d'analyses.

Cette étude expérimentale met également en évidence, que lorsque la dose laser absorbée atteint un certain seuil, il y a diffusion verticale du titane de la grille. Ce défaut n'a pour le moment jamais été observé en analyse de défaillance. C'est un résultat intéressant, car cela montre que la diffusion simultanée du silicium, du platine et du titane est une signature de l'effet invasif du laser. La caractérisation chimique par EDX peut donc être utilisée pour lever les suspicions d'effet invasif du laser 1340 nm continu.

6. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, j'ai présenté une étude sur la reproduction et la caractérisation complète d'un défaut induit par un laser 1340 nm continu.

L'étude montre qu'il est effectivement possible de créer des défauts par stimulation laser dans une gamme de puissance optique accessible à l'utilisateur et dans des

conditions proche de l'analyse de défaillance.

L'utilisation de systèmes de caractérisation électrique et morphologique ont permis d'établir des conditions sûres d'utilisation du laser (figure II-20).

La caractérisation de l'impact morphologique et chimique a également mis en évidence une signature de l'effet invasif du laser avec la diffusion simultanée et verticale de nickel, de platine et de titane dans la grille. Cette découverte montre que sur de réels cas d'analyse de défaillance, il est possible par cette méthode de reconnaître ou de lever les suspicions de dégradation par le laser utilisé lors de l'analyse de défaillance.

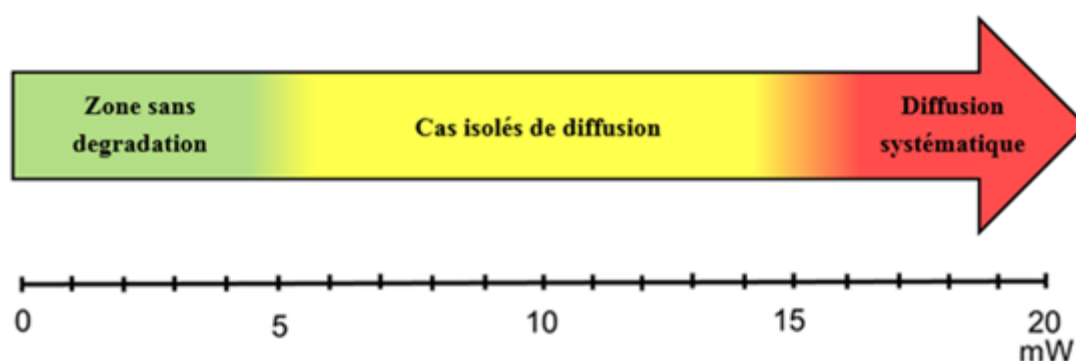


Figure II-19 : zone d'utilisation du laser 1340 nm continu sur la technologie 28FDSOI

Nous montrons également que certains défauts, observés dans sur d'anciens cas réels d'analyse, tels que des courts-circuits poly-contacts, des diffusions d'éléments, des trous, des déformations de film SOI, une grille métallique manquante auraient pu être induits par laser, même à faible puissance laser.

Le prochain chapitre aura donc pour objet de définir le mécanisme de défaillance amenant à la diffusion du siliciure dans la grille. En fonction du mécanisme de défaillance, un modèle T-CAD de stress induit par le laser 1340 nm continu sera proposé.

CHAPITRE III : Mécanismes de défaillances et simulation du stress thermique

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons caractérisé électriquement et morphologiquement les défauts induits par un laser 1340 nm continu sur la technologie 28FDSOI. La conclusion de cette étude a mis en évidence la problématique de la dose laser maximale admissible par les transistors. Il a aussi été montré que le défaut induit est principalement la diffusion du $\text{NiPt}_{10\%}\text{Si}$ et du Ti au niveau de la grille du transistor.

Dans la première partie de ce chapitre, nous nous intéresserons au mode de défaillance amenant à la diffusion de siliciure observée. Cette analyse bibliographique doit permettre d'identifier le paramètre clé permettant de simuler et donc de prédire l'invasivité du laser 1340 nm continu. Nous verrons ainsi que le paramètre important est la température.

La seconde partie proposera un modèle de stress thermique induit par le laser. L'objectif est de fournir un outil de modélisation permettant de prédire le seuil à partir duquel un laser 1340 nm continu est invasif lors d'une analyse de défaillance. En utilisant ce modèle, nous étudierons également l'effet des couches de métallisation sur l'échauffement induit par le laser.

Finalement, une corrélation entre les résultats expérimentaux du chapitre II, les résultats issus de la simulation et l'étude bibliographique sera faite pour s'assurer de la validité de la simulation.

2. Mécanisme de défaillance induit par le laser

2.1. Introduction

Les principaux phénomènes physiques mis en évidence dans la partie précédente sont des diffusions de matériaux. Cette section propose de rappeler différents éléments théoriques concernant les phénomènes de diffusion. Bien que les phénomènes de diffusion aient été étudiés dans de nombreux ouvrages [ADD66, PHI85] et que plusieurs modèles de diffusion existent, nous nous contenterons ici d'une description générale avec les lois de Fick et les caractéristiques de diffusion du siliciure de nickel-platine. Ces dernières sont très bien connues pour la technologie 28FDSOI (données process de STMicroelectronics).

2.2. Rappel sur la diffusion

2.2.1. Introduction

Les phénomènes physiques mis en évidence dans le chapitre II sont des diffusions du NiPt_{10%Si}.

L'objectif est de mettre en évidence le ou les paramètres physiques à l'origine de la diffusion de matériaux afin de définir le plus précisément possible le type de stress induit par le laser.

2.2.2. Principe de la diffusion

Le phénomène de diffusion des atomes est dû à l'existence d'un gradient de potentiel qui peut être d'origine chimique (gradient de potentiel chimique), mécanique (gradient de contraintes), ou thermique (gradient de température). Ce gradient est à l'origine de la force motrice de la diffusion.

Dans le cas des cristaux, la migration des atomes est rendue possible par l'existence de défauts ponctuels (lacunes, sites interstitiels) ou étendus (dislocations, joints de grains). Les principaux mécanismes de la migration des atomes dans les matériaux sont :

- le mécanisme lacunaire : dans un matériau, il existe un certain nombre de sites non occupés par les atomes (appelés lacunes). Ces sites vacants vont permettre un déplacement plus au moins rapide selon la nature de l'atome qui migre et par substitution la migration d'une lacune. Il s'agit donc à la fois d'un déplacement d'atomes et de lacunes. La figure II-2-a représente schématiquement ce phénomène,
- le mécanisme interstitiel direct (Figure II-2-b) : l'atome migre dans le réseau en sautant d'un site interstitiel à un autre. Ce mécanisme concerne principalement les éléments atomiques de petite taille. Ce mécanisme de diffusion permet un déplacement très rapide des atomes puisqu'il n'est pas limité par un nombre de lacunes utilisables.

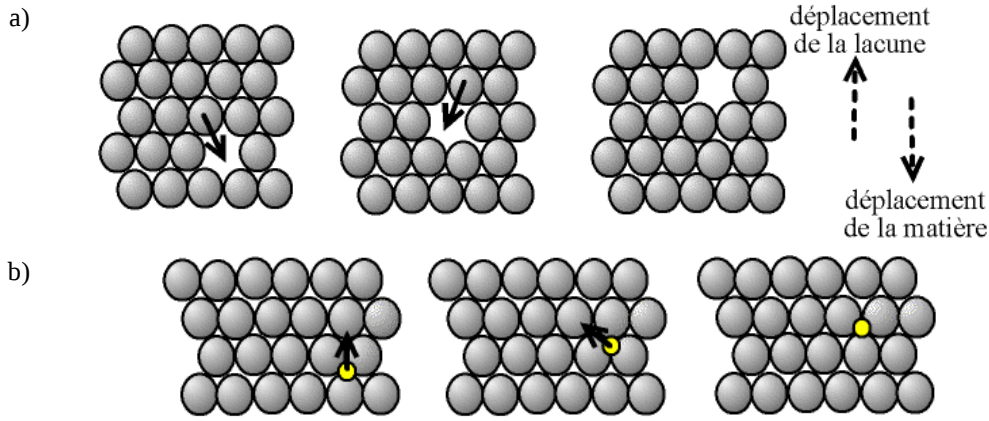


Figure III-1 : représentation schématique de la diffusion par mécanisme lacunaire (a) et par mécanisme interstitiel (b)

2.2.3. Equations de Fick

La première loi de Fick (équation 33) implique qu'en présence d'un gradient de concentration dans un matériau, la mobilité des particules génère un flux de matière qui tend à uniformiser la concentration. La diffusion a toujours lieu des régions où la concentration est la plus forte vers les régions où la concentration est la plus faible.

$$J_D = -D \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(c) \quad (33)$$

où c (mol.l^{-1}) est la concentration, D ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$) le coefficient de diffusion et J_D ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) le flux d'atomes. Lorsqu'un seul phénomène de diffusion est présent sur un domaine de températures données, le coefficient de diffusion suit une loi d'Arrhenius (équation 34).

$$D = D_0 e^{\frac{-\Delta E}{k_B T}} \quad (34)$$

où ΔE est l'énergie d'activation de la diffusion. Lorsque cette formule est associée à l'équation de la conservation de la masse (35), il vient l'équation (36) appelée deuxième loi de Fick ou équation de la diffusion.

$$\frac{\partial J_D}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (35)$$

$$D \cdot \Delta c = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (36)$$

L'équation (37) est la solution de l'équation de diffusion dans le cas d'un plaquage de

deux matériaux. Les conditions initiales et limites pour obtenir cette solution sont : $t = 0$, $x < 0$, $c = c_0$ et $x > 0$, $c = 0$.

$$c(x, t) = \frac{c_0}{2} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (37)$$

où c_0 est la concentration d'atomes à l'instant initial t_0 et erfc la fonction erreur complémentaire.

2.2.4. Conclusion

La température et le temps sont donc les deux principaux paramètres physiques qui permettent de définir le stress induit par le laser. Le premier est lié à la puissance moyenne du laser absorbée par le circuit et le second est égal au temps d'exposition au laser. Cela permet d'affirmer que la dose laser acceptable par les transistors est définie par la température seuil de diffusion du siliciure. La simulation du stress induit par le laser doit reposer sur un modèle thermique.

La partie suivante s'intéresse plus précisément aux données bibliographiques concernant les températures de recuit du $\text{NiPt}_{10\%}\text{Si}$ (formation, diffusion et dégradation). Ces valeurs seront ensuite utilisées comme références pour la simulation.

2.3. Le siliciure de nickel-platine (NiPtSi)

2.3.1. Introduction

Nous nous intéressons plus particulièrement aux propriétés de formation, de diffusion et de dégradation du $\text{NiPt}_{10\%}\text{Si}$ utilisé pour les interconnexions entre les contacts en W et la source, le drain et la grille.

Notre objectif est d'obtenir des points de référence pour la calibration de la simulation en se référant aux températures de diffusion et de dégradation de température du $\text{NiPt}_{10\%}\text{Si}$.

2.3.2. Propriétés du NiSi

Comme le montre le diagramme de phase (figure III-2), ce siliciure possède plusieurs phases stables à température ambiante [OTT81, LIE84] (entourée en rouge sur la figure III-2) et des phases intermédiaires [GER2005, LAV2003]. En microélectronique, la phase désirée est le NiSi . La particularité de cette dernière est d'offrir une résistance de contact très faible limitant ainsi les pertes et les effets

parasites [NAS87]. Pour améliorer la stabilité thermique de ce matériau, il est allié à 10% de Pt.

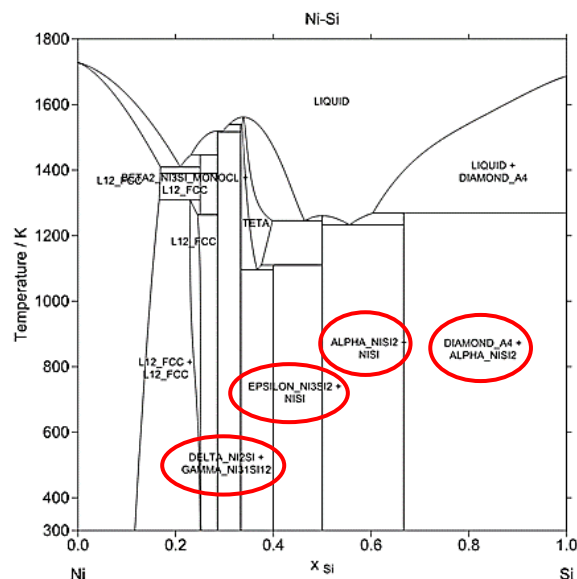


Figure III-2 : diagramme de phase du système Ni-Si [NAS87]

La figure III-3 [DEM2013] donne l'épaisseur de $Ni_{1-x}Pt_xSi$ dans du Si-mono en fonction de la température de recuit pour différents pourcentages de Pt. On voit que pour 10% de Pt, l'épaisseur du dépôt croît significativement à partir de 670 K.

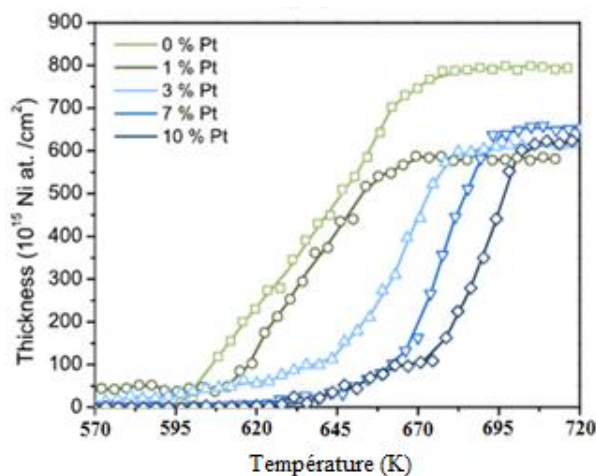


Figure III-3 : épaisseur de $Ni_{1-x}Pt_xSi$ en fonction de la température de recuit pour différents pourcentages de Pt [DEM2013]

En conclusion, de ce fait, la température considérée comme seuil de diffusion du $NiPt_{10\%}Si$ est 670 K.

2.3.3. Dégradation du NiPt_{10%}Si

Avec 10% de Pt, la première dégradation est l'agglomération du siliciure, qui empêche de réaliser de bons contacts à partir de 1200 K [GRE2011].

La deuxième dégradation est le changement de phase du NiSi en NiSi₂ qui est indésirable, car beaucoup plus résistive. Cette dernière est repoussée à des températures plus hautes grâce au 10% de Pt [MAN99].

Cependant, il y a une différence nette entre le Si-poly et le Si-mono [FRO2004] après un recuit excessif. La résistance carrée du siliciure sur Si-mono passe de 10 Ω/sq à 15 Ω/sq (+50%) alors que le Si-poly passe de 15 Ω/sq à 50 Ω/sq (+230%). Cette différence a aussi été observée lors de la caractérisation physique du défaut ; ce qui appuie d'avantage l'hypothèse d'un défaut induit par un stress thermique excessif.

2.3.4. Conclusion

L'analyse bibliographique montre que le siliciure peut diffuser et être dégradé par des recuits excessifs. Ce dernier diffuse à partir de 670 K et il se dégrade par agglomération à 1200 K.

Dans le cas d'un transistor, une diffusion du siliciure induit une dégradation de ses caractéristiques. C'est cette température qui sera prise pour seuil lors de la confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation.

2.4. Conclusion

Dans cette partie, les éléments théoriques des phénomènes de diffusion ont été rappelés et le cas particulier du NiPtSi a été exposé.

Les équations de la diffusion mettent en évidence le fait que la température et le temps sont les deux principaux facteurs à l'origine des dégradations induites par le laser.

L'étude bibliographique sur les siliciures de nickel-platine montre que la température à atteindre pour provoquer la diffusion du NiPtSi dans la grille doit être de l'ordre de 670 K. Des phénomènes d'agglomérations apparaissent également à 1200 K.

La modélisation du stress induit par le laser devra reposer sur un modèle thermique dont l'échelle de température devra inclure les températures de diffusion et de dégradation du siliciure.

3. Modélisation du stress thermique induit par le laser sur les transistors

3.1. Introduction

Dans la partie précédente, nous avons déterminé que le paramètre physique qui définit le mieux la stimulation induit par le laser est la température.

Dans cette seconde partie, un modèle de stress thermique laser sera proposé. Comme décrit dans l'état de l'art, la simulation de l'échauffement repose essentiellement sur quatre éléments (Figure III-4) :

- la création d'une configuration géométrique et la définition des conditions limites et des propriétés optiques et thermiques des matériaux utilisés,
- la propagation du faisceau à travers l'environnement,
- le calcul de la densité de photons absorbés,
- la résolution de l'équation de la chaleur.

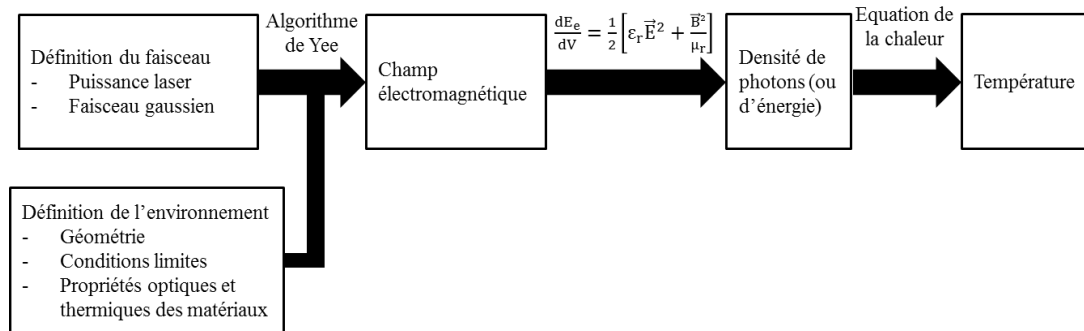


Figure III-4 : Méthodologie de la simulation

L'objectif de cette partie est de construire un modèle de stimulation thermique laser de référence qui pourra par la suite être utilisé sur des structures plus communes (NAND, inverseur, point mémoire, etc...).

3.2. Environnement de la simulation

3.2.1. Introduction

Dans cette partie, l'environnement de la simulation est créé en définissant à la fois la configuration géométrique du modèle et les propriétés optiques et thermiques des matériaux associés.

L'objectif est d'appliquer cette méthodologie de simulation à d'autres systèmes plus

complexe quelque soient leurs géométries.

Le premier modèle est un modèle élémentaire constitué d'un transistor unique et des différents niveaux de métallisation qui l'entourent. L'objectif est d'avoir un environnement représentatif d'un transistor pour que la propagation du faisceau laser et la température puissent être calculées et exploitées.

3.2.2. Géométrie avec transistor unique

La configuration des couches de métaux correspond à la structure utilisée au chapitre II. Elle est construite dans l'environnement de la simulation (voir figure III-5) avec les différents matériaux d'un circuit intégré standard (figure III-6). La structure est constituée d'un transistor MOS en 28FDSOI typique avec une grille en TiN et Si-poly. Les interconnexions entre la grille, la source, le drain et les contacts sont en NiSi. Les contacts sont en W et les niveaux de métallisation 1, 2, 3 et 4 sont constitués de Cu.

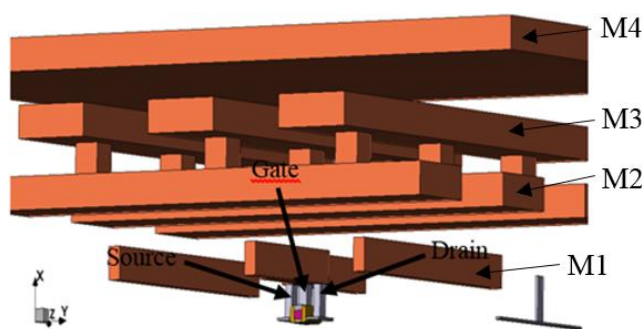


Figure III-5: représentation 3D de la structure et vue en coupe du transistor

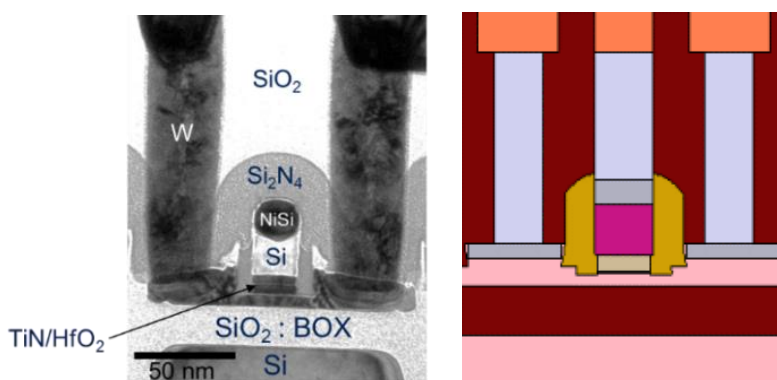


Figure III-6: représentation 3D de la structure et vue en coupe du transistor

3.2.3. Conditions limites et condition initiale

A l'instant initial, la température du système est à 300 K. Les conditions limites sont

représentées sur la figure III-7. La limite au bas de la structure est une interface air-silicium est associée à du rayonnement thermique. Le flux radiatif h est calculé avec la loi Stefan-Boltzmann (38).

$$h = -5,6703.10^{-12} \cdot \epsilon \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (38)$$

Dans l'équation 38, ϵ est l'émissivité du silicium, T (K) la température et T_0 la température ambiante (300 K). Le flux de chaleur au sommet et sur les côtés est défini avec l'équation de transfert de dissipation de la chaleur.

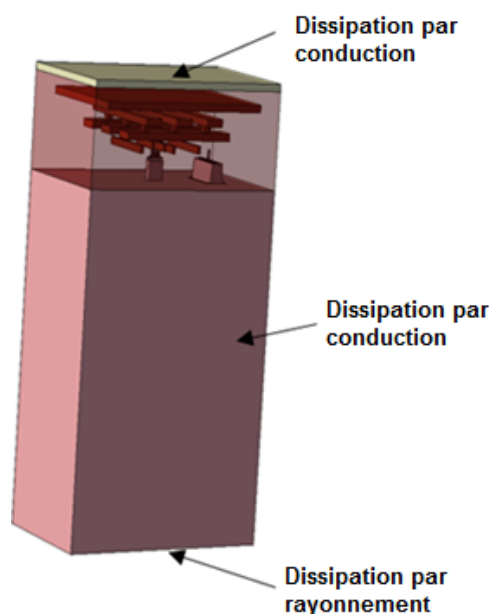


Figure III-7 : Conditions limites du modèle

3.2.4. Propriétés des matériaux

Les tableaux 1 et 2 résument les propriétés thermiques (à 300 K) et optiques (1340 nm) des principaux matériaux utilisés dans la simulation. Dans cette géométrie, nous ne prenons pas en compte la présence de dopage. On considère que les Si-mono et Si-poly ont les mêmes propriétés thermiques et optiques.

Matériaux	Masse volumique (g.cm-3)	Chaleur spécifique (J.kg-1.K-1)	Conductivité thermique (W.m-1.K-1)
Si	2,33	715	1,49
TiN	5,4	523	0,22
NiSi	4,02	443	0,91
W	19,3	132	1,74
Cu	8,96	384,4	4,1

Tableau 1: propriétés thermique des matériaux de la structure à 300 K

Matériaux	Indice de réfraction	Coefficient d'extinction
Si	3,49	≈ 0
SiO ₂	1,45	0
TiN	0,92	4.18
NiSi	0,92	4.18
W	3.14	4.45
Cu	0.6	9.44

Tableau 2 : propriétés optiques des matériaux de la structure à 1340 nm

3.2.5. Conclusion

Un environnement de simulation avec une géométrie à transistor unique et 4 niveaux de métallisation, des conditions limites et des propriétés de matériaux a été défini. Le choix de la configuration géométrique, notamment des couches de métaux, est arbitrairement basé sur la structure utilisée au chapitre II.

Il est donc possible de déterminer numériquement les paramètres de propagation du faisceau laser et d'en déduire la densité de photon absorbée et la température associée.

3.3. Propagation du faisceau laser

3.3.1. Introduction

La propagation du faisceau laser dans la structure a été calculée en utilisant l'algorithme de Yee. [KAN66].

Le but est de déterminer le champ électromagnétique dans la structure pour calculer la densité de photons absorbés en tout point de la structure.

3.3.2. Choix du modèle de propagation du faisceau

Il existe principalement 2 modèles de propagation d'un faisceau lumineux :

- le modèle corpusculaire : le faisceau de lumière est considéré comme un ensemble de photons se propageant en ligne droite. Ce modèle prend en compte les réflexions, la transmission et l'absorption des photons,
- le modèle ondulatoire : Il repose sur le calcul du champ électromagnétique du faisceau laser. Ce modèle tient également compte des effets de réflexions, de transmission, d'absorption et d'**interférences**.

Du fait de leur dimension sub-micrométrique, les transistors et les premiers niveaux

de métallisation ont des dimensions caractéristique qui pour la plupart sont en-dessous du critère de diffraction (critère de Rayleigh). Les phénomènes d'interférences telles que la diffraction ne sont pas négligeables et doivent donc être pris en compte dans la simulation. Le modèle qui répond le mieux à ce dernier critère est le modèle ondulatoire.

3.3.3. Méthode de calcul de la propagation du faisceau

La propagation du faisceau dans la structure est calculée par le programme EMW solver du logiciel Sentaurus qui résout les équations de Maxwell en tout point de l'espace [STM2016]. Ce programme utilise la méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD pour Finite-Difference Time-Domain).

La méthode FDTD [SCH2017] a été proposée par Kane S. Yee en 1966 [KAN66]. Elle est basée sur le fait que la modification du champ électrique $\vec{E}$ dans le temps dépend de la variation du champ magnétique $\vec{B}$ dans l'espace. Il en résulte la relation temporelle qui, à n'importe quel point de l'espace, associe une valeur du champ $\vec{E}$ dans le temps à la valeur précédente du champ $\vec{E}$ et à la distribution dans l'espace du champ $\vec{B}$. Compte tenu des équations de Maxwell le champ $\vec{B}$ possède le même type de dépendance vis-à-vis du champ $\vec{E}$. L'itération et les mises à jour de $\vec{E}$ et de $\vec{B}$ aboutissent au calcul de la propagation de l'onde électromagnétique dans un maillage.

3.3.4. Résultat

Rappelons tout d'abord les paramètres du faisceau laser qui est utilisé au laboratoire d'analyse de défaillance de STMicroelectronics Crolles :

- la longueur d'onde est 1340 nm,
- le faisceau laser est gaussien. Le rayon d à mi-hauteur est calculé à partir du critère de Rayleigh (Chapitre I - 5). Pour rappel, d est égal à 330 nm à 1340 nm et avec un NA de 2,45 (SIL),
- le temps d'exposition est de 128 μ s et correspond au temps d'exposition de chaque pixel lors d'une analyse LSM (128 μ s/pixel).

En utilisant la méthode décrite plus haut, le champ électromagnétique en un point est la somme du champ électromagnétique incident, réfléchi et diffracté de l'onde. Les figures III-8-a et III-8-b montrent respectivement une vue en coupe de la structure et le champ électrique du faisceau appliqué à tout instant dans la structure.

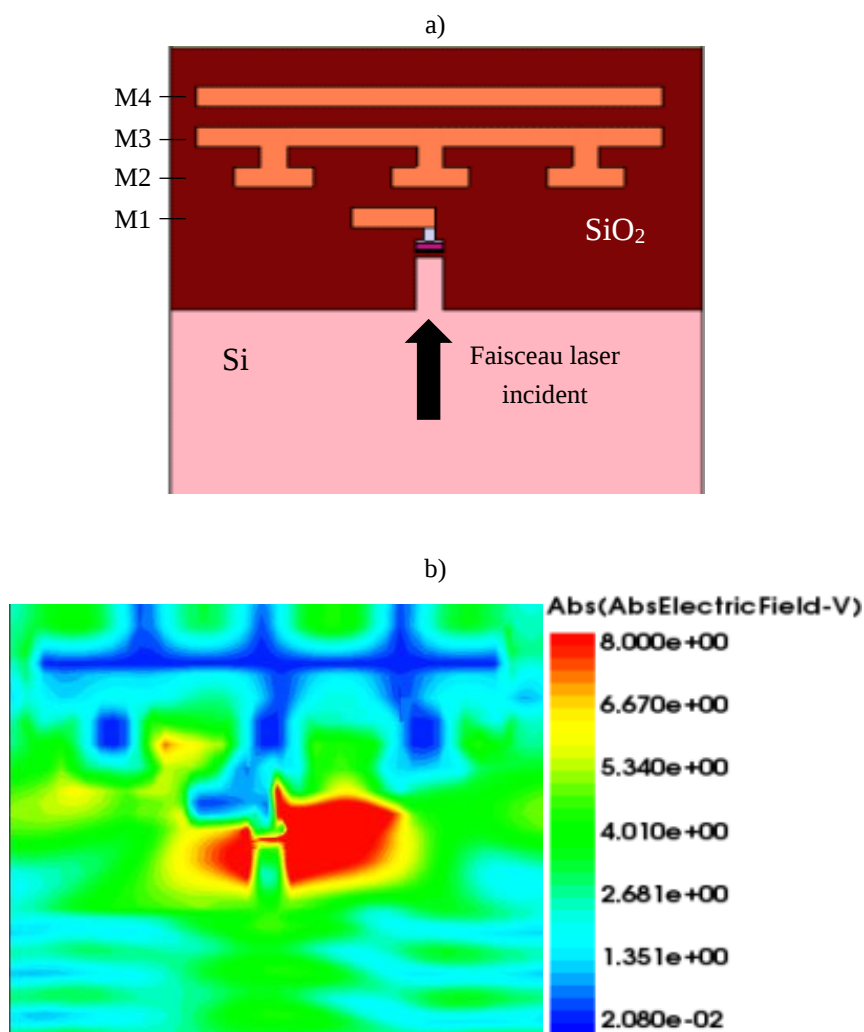


Figure III-8 : vue en coupe (a) et valeur absolue du champ électrique (b) dans la structure

Nous constatons que la focalisation du faisceau au niveau du transistor induit un champ électrique maximal dans cette région. Par contre, le champ électrique est très faible dans les régions métalliques (contact en W et ligne en Cu). Ceci est dû aux coefficients d'absorption optique du cuivre et du tungstène qui induisent des épaisseurs de peau de l'ordre de quelques nanomètres (voir Chapitre I – Partie 3.4) et se traduisent par une réflexion totale du faisceau laser.

3.3.5. Conclusion

Le modèle choisi pour le faisceau laser est un modèle ondulatoire basé sur le calcul du champ électromagnétique.

Le calcul montre un champ électrique très important au niveau du transistor et très faible à l'intérieur des métaux. Ce dernier résultat est très attendu compte tenu des

propriétés optiques de réflexion et d'absorption très élevées du Cu évoquées au chapitre I.

Maintenant que le champ électromagnétique est calculé, il est possible de déterminer la densité de photons absorbés en fonction des propriétés optiques de chaque matériau.

3.4. Densité de photons absorbés

3.4.1. Introduction

Le champ électromagnétique calculé précédemment est utilisé pour obtenir la densité de photons absorbés en tout point de l'espace.

3.4.2. Calcul de la densité de photons absorbés

L'échauffement résulte de l'interaction des différents matériaux qui composent la structure avec le champ électromagnétique calculé précédemment. Connaissant les propriétés électromagnétiques de chaque matériau, il est possible de déterminer la densité d'énergie absorbée en chaque point de la structure (Chapitre I – équation 32).

3.4.3. Résultat

La figure III-9 montre une vue en coupe de la densité de photons absorbés simulée dans un transistor avec une source laser 1340 nm continu. La simulation indique qu'un maximum de 7.10^{22} photon.cm⁻³.s⁻¹ se trouve dans les contacts et la première couche de métallisation M1. Les autres couches de métaux M2, M3 ont également absorbé et réfléchi l'onde électromagnétique. Le M4 qui recouvre entièrement la structure arrête et réfléchit totalement le faisceau.

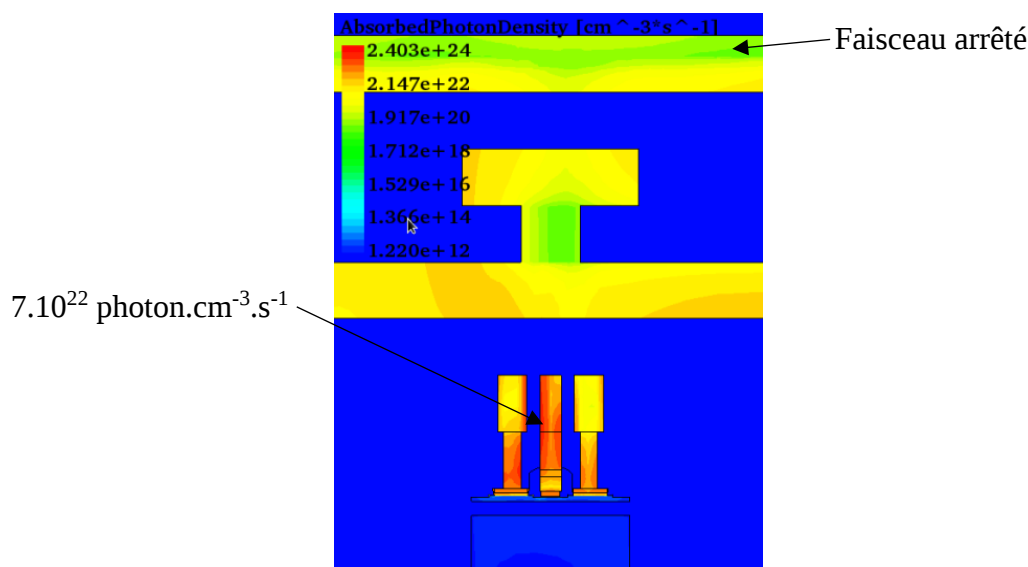


Figure III-9: vue en coupe de la densité de photons absorbés dans la structure avec une source laser continu à 1340 nm sur un transistor en 28FDSOI

Ce résultat confirme le fait qu'il n'est pas pertinent d'utiliser les techniques de localisation optiques au niveau transistor par la face avant du composant lorsqu'il y a plus de 3 ou 4 niveaux de métallisation.

3.4.4. Conclusion

Le résultat montre qu'une grande quantité de photons est absorbée au niveau des contacts (en W) de grille, drain et source ainsi qu'au niveau du M1 (en Cu) de la grille. Il y a également une absorption non négligeable au niveau des métaux supérieurs. Le faisceau est arrêté par le M4 qui recouvre toute la surface de l'environnement.

Maintenant que la densité de photons absorbés a été calculée (ou densité d'énergie en $J.m^{-3}$), il est aisé de remonter au terme source ($W.m^{-3}$) de l'équation de la chaleur.

3.5. Résultats de la simulation

3.5.1. Introduction

Connaissant la répartition spatiale de l'énergie absorbée, il est possible de calculer le terme source de l'équation de la chaleur et ainsi de résoudre cette dernière.

L'objectif de cette partie est de comprendre l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température induite sous stimulation laser. On veut en particulier comprendre quelles parties de la structure influencent le plus l'échauffement laser.

3.5.2. Température

A l'instant initial, le système est à 300 K. La figure III-10 montre la température à 15 mW à différents instants. À 10 ns, la température la plus élevée (374 K) est située sur le M1 connecté à la grille. À 100 ns, le point chaud est dans le M2 (560 K). Ensuite, la chaleur des couches métalliques supérieures se propage à travers l'oxyde jusqu'au transistor qui monte à 1040 K à 10 μ s. Enfin, à 36 μ s et au-delà, l'état stationnaire est atteint et le maximum de température est situé dans le contact de la grille à une température de 1129 K.

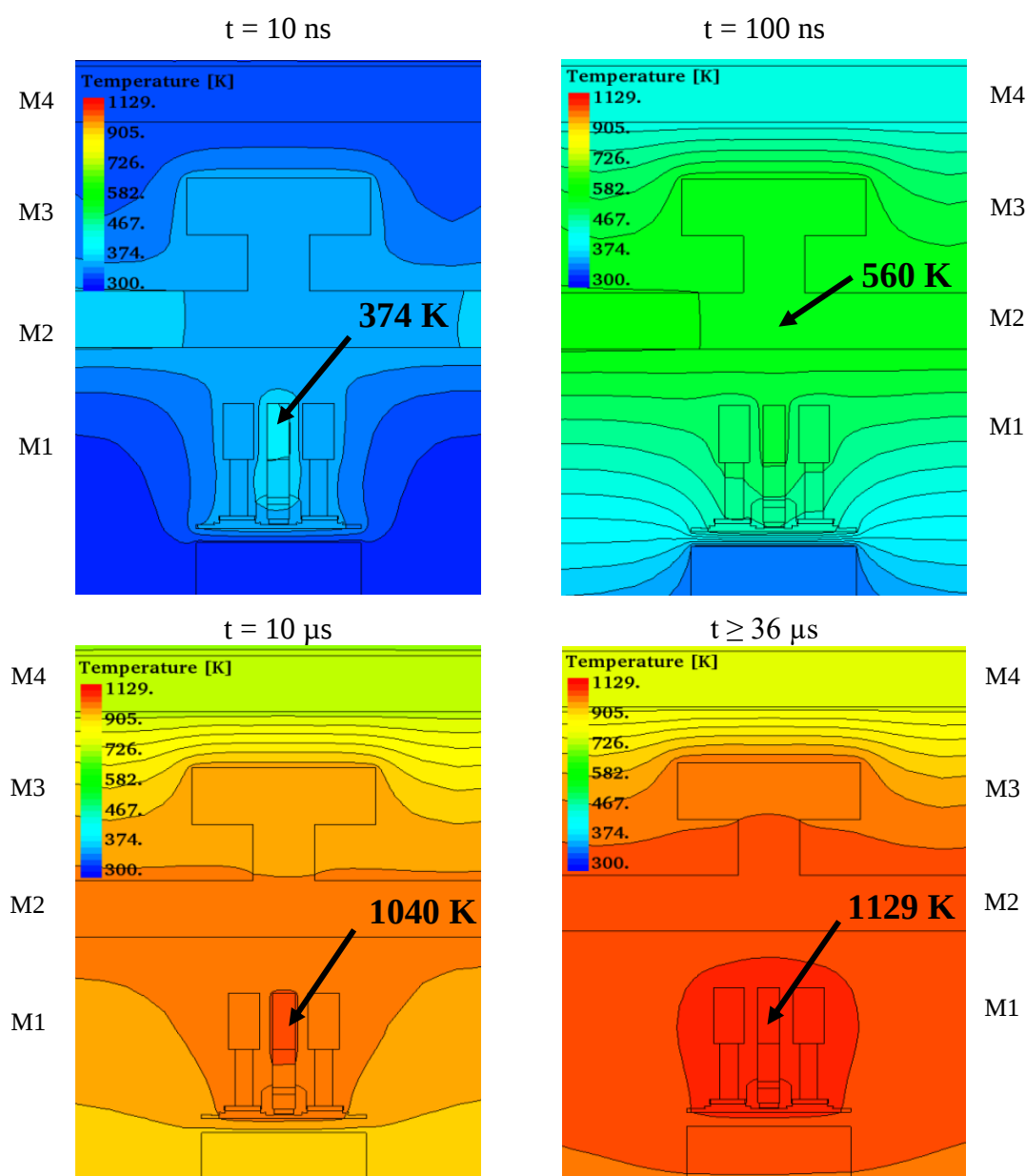


Figure III-10: vue en coupe à différents instants de la température simulée induite par une source laser continu à 1340 nm et un objectif SIL (NA 2,45) sur un MOS

Cette simulation montre que la température induite par le faisceau laser peut très largement atteindre les températures de diffusion du siliciure conduisant à la dégradation du transistor.

En analysant l'évolution temporelle de la température du siliciure de la grille (Figure III-9), on remarque 2 régimes : un régime transitoire et un régime permanent atteint à 36 μ s. Ce résultat est cohérent avec la simulation présentée dans la partie 5.3 du chapitre I qui montre des constantes de temps de l'ordre de 10 μ s dans des lignes de métaux.

Ceci indique que lors de l'utilisation de techniques pompe par laser thermique, le temps passé par pixel supérieur à cette constante contribue inutilement à l'augmentation de la dose.

Cependant, pour des raisons de rapport signal sur bruit (SNR pour Signal to Noise Ratio), il reste nécessaire aujourd'hui d'utiliser des vitesses de balayage de l'ordre de 36 μ s/pixel pour les techniques pompes.

Sur la figure III-11, le régime transitoire est dissocié en 2 phases. La première phase, qui a une constante de temps de l'ordre de la μ s, est directement liée à l'absorption de photons (incidents, réfléchis et diffractés). La deuxième phase est un échauffement indirect lié à la diffusion de la chaleur entre les métaux supérieurs et la grille (phénomène décrit précédemment).

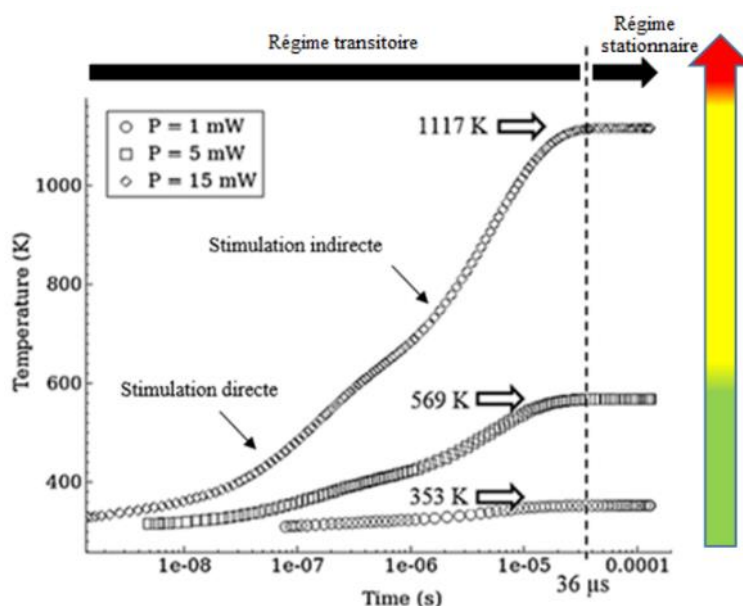


Figure III-11 : température du siliciure de la grille en fonction du temps (échelle logarithmique) pour des puissances laser de 1 mW, 5 mW et 15 mW

Nous pouvons d'ores et déjà faire un lien avec les différentes zones d'interactions entre le laser et le circuit intégré. La frontière entre :

- La zone verte sans dégradation et la zone jaune avec des cas isolés de dégradation correspond selon la simulation à une température de 569 K.
- La zone jaune et la zone rouge avec dégradation systématique correspond à une température de 1117 K.

3.5.3. Effet de la métallisation

Le modèle a été testé dans différentes configurations géométriques allant d'une structure avec seulement des contacts à une structure ayant les 4 niveaux de métallisation. Trois principaux paramètres donnés par la simulation ont été relevés : la densité de photons absorbés (Figure III-12), la constante d'échauffement laser (Figure III-13) et la constante de temps (Figure III-14).

La densité de photons absorbés par le siliciure de la grille augmente de $2.10^{22} \text{ cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$ quand il n'y a que le contact à $7.10^{22} \text{ cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$ lorsqu'il y a toutes les couches métalliques. Le cuivre a un coefficient de réflexion de 0,97 unités à 1340 nm. Par conséquent, chaque couche métallique réfléchit l'onde générant des phénomènes d'interférences constructives ou destructives augmentant ou diminuant la stimulation directe du siliciure. Par exemple, avec les niveaux M2 et M3, il y a augmentation de la densité de photons absorbés. Par contre, avec le niveau M4 qui est situé à environ 700 nm du siliciure, il y a potentiellement une interférence destructive générant une diminution de la densité de photons absorbés.

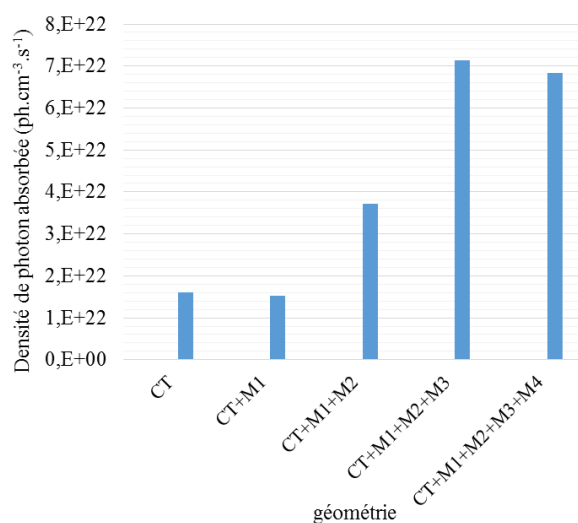


Figure III-12 : densité de photons absorbés par le siliciure de la grille en fonction de la configuration de la métallisation

La simulation indique que lorsqu'il n'y a que le contact ou le métal (qui est peu dense dans cette structure), l'échauffement (K.mW^{-1}) reste faible, de l'ordre de quelques K.mW^{-1} . Quand on rajoute des couches de métaux telle que le M2, le M3 et le M4, l'échauffement laser augmente jusqu'à atteindre 50 K.mW^{-1} sur cette structure. Lorsqu'on rajoute d'avantage de métaux (M5, M6, etc...), l'échauffement n'est pas plus important du fait que le faisceau est arrêté par le M4.

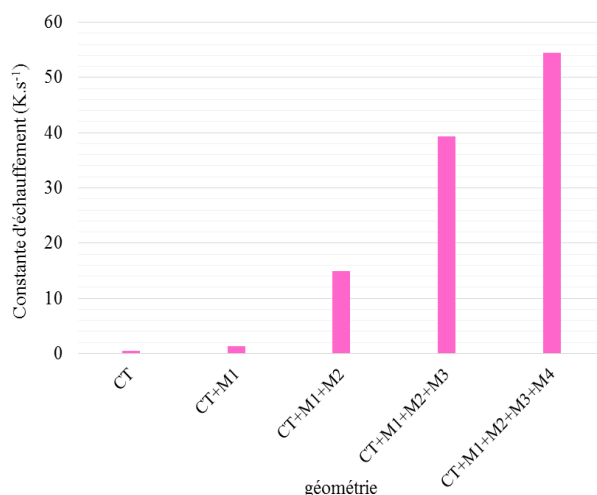


Figure III-13: échauffement laser en fonction de la configuration de la métallisation

La simulation indique qu'une augmentation de la densité de métaux tend à diminuer la constante de temps. Comme l'indique la figure III-14, elle est de $52 \mu\text{s}$ avec le niveau contact seul et de $36 \mu\text{s}$ avec 4 niveaux de métallisation supplémentaires.

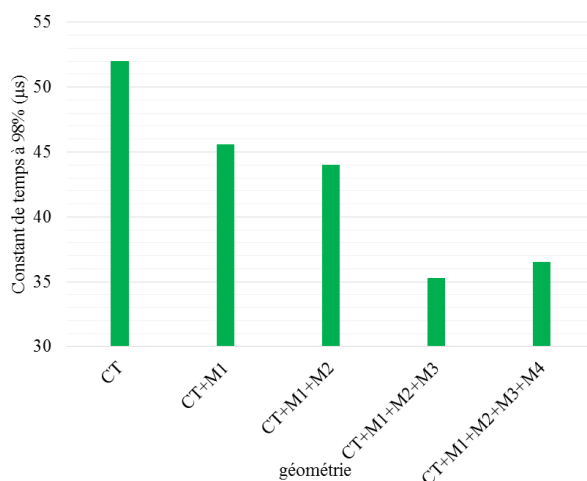


Figure III-14 : constante de temps à 98 % en fonction de la configuration de la métallisation

3.6. Conclusion

La température induite par le laser a pu être simulée dans une structure élémentaire inspirée d'un transistor de technologie 28FDSOI. En utilisant les résultats de simulation, on obtient une constante d'échauffement h_{laser} induit par le laser ($K.mW^{-1}$) pour une structure donnée. En utilisant cette grandeur, il est possible d'estimer la température théorique en utilisant l'équation 38 où T_0 est la température ambiante (300 K dans la simulation) et P (mW) la puissance laser.

$$T = T_0 + h_{laser} \cdot P$$

Les résultats montrent la présence d'une stimulation directe correspondant respectivement à l'absorption de photons et une d' stimulation indirecte induite par la diffusion de la température des couches supérieures de métaux vers le transistor.

Selon la simulation, les métaux ont un effet très important à la fois sur la composante directe et la composante indirecte amenant à une augmentation de l'échauffement induit par le laser et une diminution de la constante de temps.

Ces constats montrent que la dose laser acceptable par les transistors ne peut pas être simplement définie comme une densité de puissance laser et un temps d'exposition à ne pas dépasser, mais dépend fortement de l'environnement.

La partie suivante propose de corréler les résultats de la simulation avec les données process du NiPt_{10%}Si pour savoir si le modèle donne le bon ordre de grandeur.

4. Comparaison avec les recuits du process

4.1. Introduction

La connaissance des propriétés de diffusion du NiPt_{10%}Si ainsi que les résultats de la simulation, nous permettent d'établir une corrélation entre les deux. Ceci permet de vérifier que les valeurs de températures obtenues par la simulation sont situées dans un ordre de grandeur et de faire un lien avec les zones d'interaction entre le circuit et le laser.

4.2. Corrélation

Pour rappel, la dégradation du transistor commence à 670 K par diffusion du NiPt_{10%}Si et l'agglomération commence à 1200 K [GRE2011].

La figure III-15 rassemble l'ensemble des informations apportées par l'expérience, la simulation et la recherche bibliographique sur la siliciuration. On peut constater que la frontière entre la zone sans dégradation (verte) et la zone avec des cas isolés de dégradation (jaune) correspond une température de 570 K selon la simulation. La frontière entre la zone jaune et la zone avec des dégradations systématiques (rouge) correspond à une température de 1120 K.

Il y a donc une erreur d'environ 100 K entre le modèle et l'expérience. Cette erreur peut être expliquée par différents raisons :

- la structure simulée est un transistor seul tandis que les essais ont été réalisés sur une chaîne d'inverseurs,
- le modèle ne prend pas en compte la variation des propriétés thermiques et optiques des matériaux en fonction de la température.

Cependant, on remarque que les résultats de la simulation sont dans le bon ordre de grandeur. L'écart entre les températures de diffusion et de dégradation données respectivement par la simulation et la bibliographie sont identiques : 550 K.

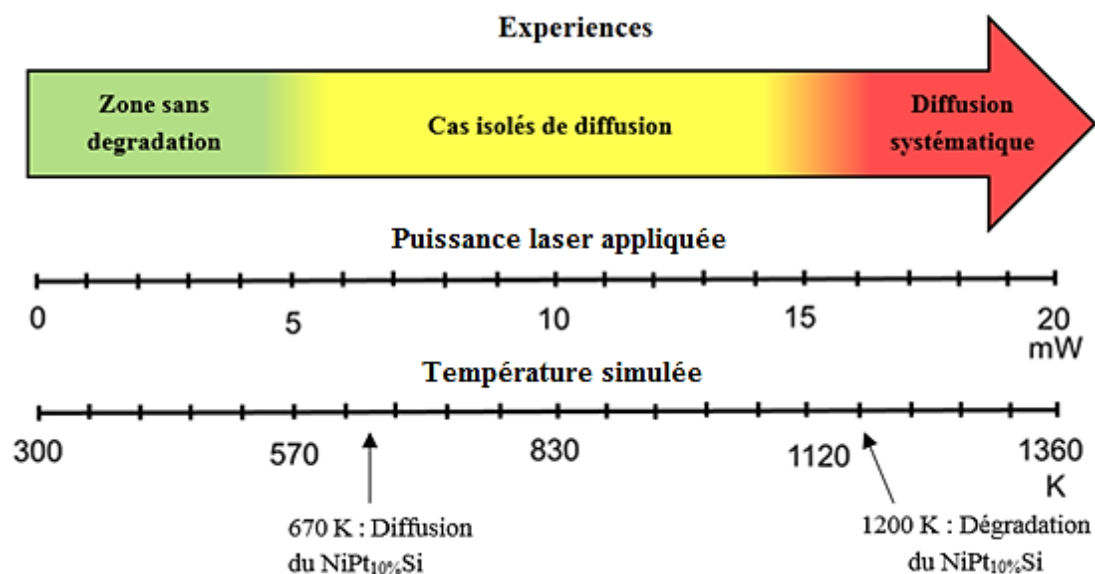


Figure III-15 : corrélation entre l'expérience, la simulation et le process

4.3. Conclusion

La synthèse des résultats expérimentaux, de la simulation et des données de process du NiPt_{10%}Si indique que le modèle permet d'estimer une température de dégradation pour un composant soumis à une stimulation laser à 1340 nm.

Les écarts peuvent être associés à la différence entre le modèle utilisé pendant la simulation (transistor unique) et la configuration réelle de la structure utilisée pendant les expériences (chaîne d'inverseurs).

5. Conclusion du chapitre

Une étude bibliographique du mécanisme de défaillance est présentée dans ce chapitre. Basée sur cette dernière, une simulation du stress thermique induit par le laser a été réalisée. Enfin une corrélation entre les résultats expérimentaux, les résultats de la simulation et les données process a été faite.

Les lois de base de la diffusion (loi de Fick) indique qu'un gradient de concentration d'une espèce associée à de la chaleur induit une diffusion de matériaux. L'analyse de données bibliographiques indique que la diffusion du $\text{NiPt}_{10\%}\text{Si}$ dans le silicium est activée à partir de 670 K et que le siliciure se dégrade par agglomération à partir de 1200 K.

De ce fait, le modèle utilisé repose sur l'équation de la chaleur. Les résultats de la simulation indiquent notamment que sans métallisation, l'échauffement au niveau du siliciure de la grille est négligeable, alors qu'avec plusieurs niveaux de métaux, l'échauffement croît au point d'atteindre des températures critiques amenant à la diffusion de siliciure.

La confrontation des résultats de l'ensemble des données (expérimentaux, simulation et données bibliographiques) indique que la simulation donne une température d'un bon ordre de grandeur de température. Une bonne correspondance est notamment trouvée entre les frontières limitant les différents régimes de fonctionnement ou de dégradation du composant.

Le problème que soulèvent ces résultats est la nécessité de valider le modèle sur des cas communs de structures rencontrées en analyse de défaillance. Cette démarche permettra dans le but d'affiner la corrélation et de réduire l'erreur du modèle. C'est l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE IV : Corrélation entre l'expérience et la simulation

1. Introduction

Dans le chapitre II, le défaut induit par un laser 1340 nm continu (thermique) a été caractérisé. Il a été mis en évidence une diffusion de siliciure dans la grille activée thermiquement. Le chapitre III a montré qu'il est possible de simuler la température induite par le laser et ainsi de prédire son invasivité sur les transistors. Il a également montré un effet non négligeable des niveaux de métallisation sur la constante d'échauffement du laser (K.mW^{-1}). Se pose alors la question de l'évolution des seuils de dégradation en fonction de l'intégration d'un circuit.

L'objectif de ce chapitre est de savoir si le modèle de stress thermique est capable de prédire le seuil de dégradation sous une stimulation laser 1340 nm continu pour différentes structures usuelles.

Pour répondre à cet objectif, j'ai choisi de confronter de nouveau l'expérience et la simulation sur les cas suivants :

- Une chaîne d'inverseurs avec 1 niveau de métallisation (Structure 1) pour étudier l'effet de la densité de transistors et de métaux par rapport à la structure du chapitre II.
- Une chaîne de bascules (Structure 2) pour faire la corrélation avec un cas réel d'analyse

Le défaut induit par le laser thermique étant déjà connu, les dégradations induites par ce dernier sont mesurées par cartographie de fréquence (fondamentale et seconde harmonique). Le choix d'utiliser ces paramètres est déterminé par leur sensibilité et l'information qu'il apporte sur la dégradation. La cartographie de la fondamentale (chapitre 1) indiquera si un signal peut se propager et celle de la seconde harmonique renverra à une dégradation du rapport cyclique ou des fronts du signal. Le fait d'étudier la dégradation en se basant sur la cartographie en fréquence permet également de fortement diminuer les variations de la focalisation du faisceau durant les analyses.

Pour répondre efficacement à la problématique de simulation, un outil permettant la construction 3D est également développé. La simulation est appliquée pour obtenir la constante d'échauffement du laser (K.mW^{-1}) sur les 2 structures.

Ensuite, les résultats expérimentaux et ceux de la simulation seront confrontés. On commencera par regarder l'effet de l'intégration sur la capacité du modèle à prédire la puissance laser seuil au-delà de laquelle des dégradations de la structure sous stimulation laser peuvent apparaître.

Finalement, nous verrons les conséquences opérationnelles d'une bonne connaissance des limites d'utilisation du microscope à balayage laser.

2. Partie expérimentale

2.1. Introduction

Les seuils de dégradation sous stimulation laser d'une chaîne d'inverseurs avec un seul niveau de métallisation et d'une chaîne de bascules sont étudiés par cartographie de fréquence. Il est intéressant de faire des essais sur une chaîne de bascules (appelées aussi bascules) dans la mesure où ces cellules sont les circuits logiques de base des circuits intégrés : mémoire, compteur, registres, etc...

L'objectif est d'obtenir la puissance laser seuil de dégradation (diffusion de siliciure) pour ces 2 structures.

2.2. Méthodologie de test laser

Une stimulation par laser thermique continu est appliquée avec une SIL monochromatique 220X dans des zones d'intérêt recouvrant arbitrairement une structure qui se répète : 3 inverseurs dans la structure 1 et 1 bascule dans la structure 2 (scan chain). La figure IV-1 montre les dessins du circuit jusqu'au M1 des structures 1 et 2. Un écart d'une cellule (un inverseur pour la structure 1 et une bascule pour la structure 2) est laissé entre chaque zone balayée. Dans la mesure où l'intégration de ces structures est plus importante, cela permet d'éviter le recouvrement entre chaque test laser.

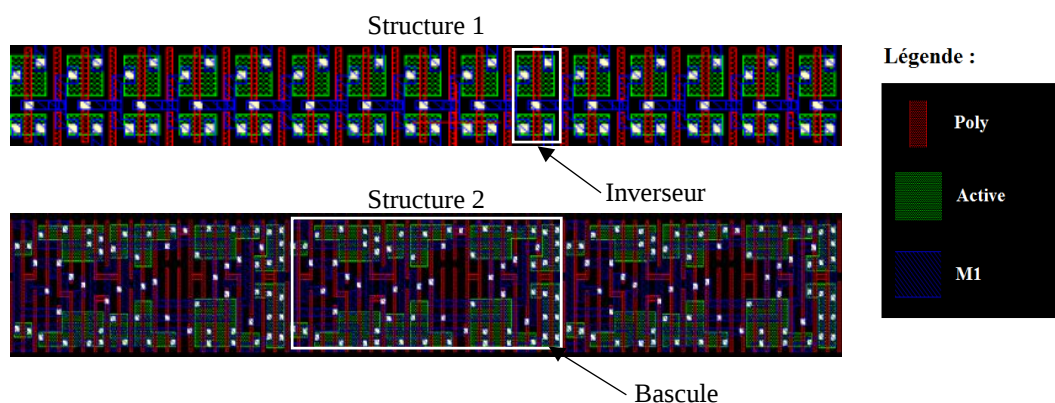


Figure IV-1 : Dessin des masques des structures 1 et 2

Dans la structure 1, un signal carré de fréquence 10 MHz est appliqué à $V_{\min}$ (0,6 V). La structure 2 est émulée avec un signal de données à 10 MHz et d'horloge à 40 MHz.

L'annexe B explique le fonctionnement d'une scan chain. Aucune différence n'a été observée en fonction de la tension d'alimentation au chapitre 2. Cependant, le laser induit un échauffement qui modifie de façon élastique les propriétés électriques des matériaux (OBIRCH) ou la fonctionnalité du circuit (SDL). Par conséquent, faire cette étude à $V_{\min}$ permet de rendre le circuit plus sensible aux variations de paramètre ou de fonctionnalité induites par le laser.

Etant donné les résultats obtenus au chapitre II et III, nous considérons également que l'invasivité du laser est négligeable à 1 mW donc cette puissance laser sera utilisée pour caractériser la dégradation avant et après stress laser. La puissance laser testée est augmentée par pas de 1 mW à partir de 2 mW jusqu'à la dégradation de la structure sur les cartographies de fréquence. La figure IV-2 résume la méthodologie qui est appliquée pour caractériser paramétriquement la dégradation à chaque puissance laser testée.

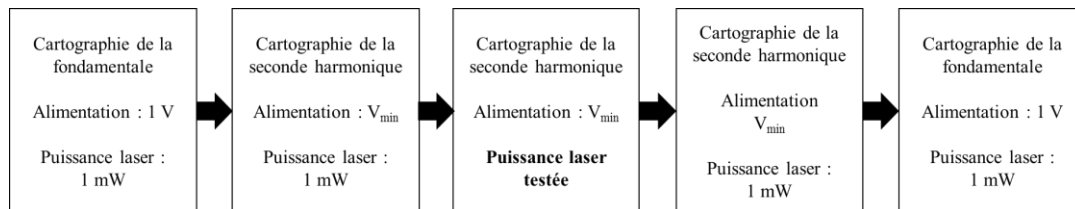


Figure IV-2 : méthodologie de caractérisation paramétrique du défaut

Cette méthode permet un ajustement très fin du focus et ainsi l'obtention d'une meilleure répétabilité des mesures. Les cartographies présentées plus loin sont moyennées sur 40 images avec une vitesse de balayage de 1 ms/pixel.

2.3. Résultats expérimentaux

2.3.1. Essais sur chaîne d'inverseurs (structure 1)

La figure 1 montre la cartographie de la fondamentale avant et après le test laser. Après le test à 11 mW, la propagation du signal est arrêtée.

Ce résultat est consolidé par la mesure de la seconde harmonique. La figure IV-4 montre l'amplitude de la seconde harmonique mesurée dans chaque zone stimulée en fonction de la puissance du laser. Nous voyons que l'amplitude du signal augmente de façon linéaire de 2 mW à 8 mW. Entre 8 mW et 10 mW, il y a une diminution de la signature pendant le stress laser. La 2nd harmonique avant et après les tests dans cette gamme de puissances ne montre aucune variation significative (exemple à 4 mW sur la figure IV-5) donc il s'agit d'une déformation réversible de la mesure par le laser que

j'associe à la zone élastique vue dans les précédents chapitres. À 11 mW, la signature de la 2nd harmonique est déformée de façon irréversible (figure IV-3).

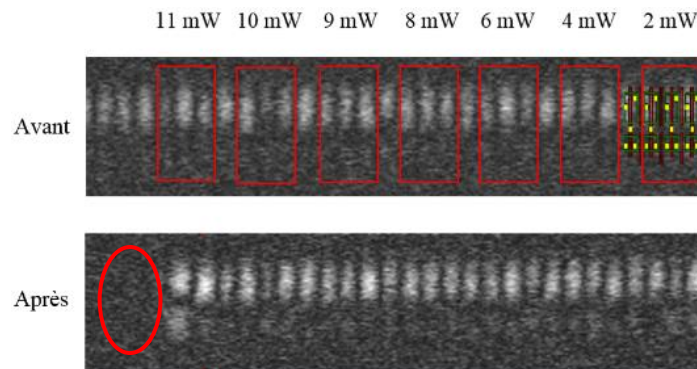


Figure IV-3 : cartographie de la fondamentale (10 MHz) d'une chaîne d'inverseurs avant et après les tests laser avec une partie de dessin de masque et les zones de stimulation laser

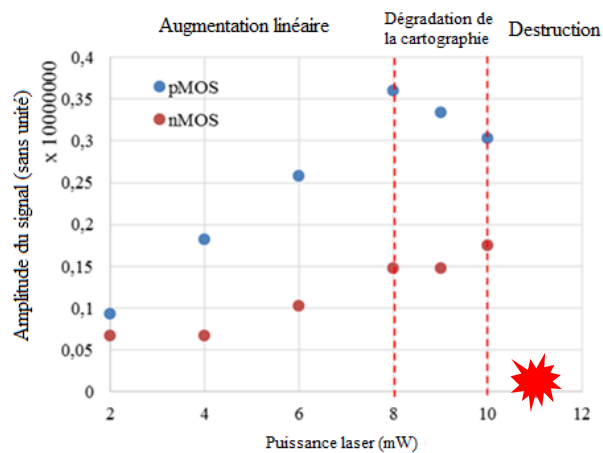


Figure IV-4 : amplitude de la 2nd harmonique en fonction de la puissance laser

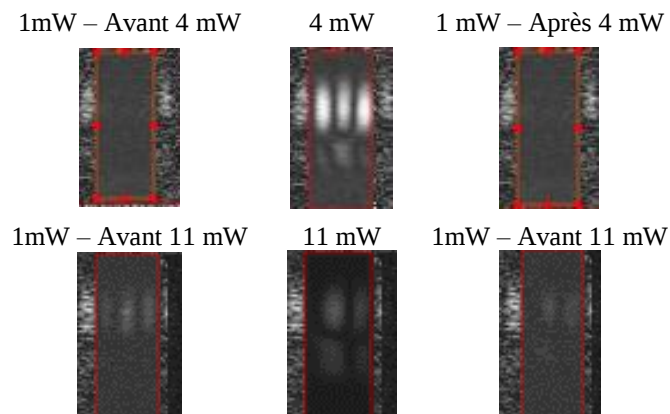


Figure IV-5 : cartographie de la 2nd harmonique (20 MHz) de 3 inverseurs

2.3.2. Essais sur une chaîne de bascules

La figure IV-6 présente la cartographie de la fondamentale à 1 mW après le test à 10 mW (et donc avant 11 mW) avec les zones d'intérêt et le dessin de la chaîne de bascules. Sur cette figure, on voit également que le signal est arrêté après le test à 11 mW.

Sur cette structure, la seconde harmonique a également été mesurée, mais ne donne pas de résultats significatifs.

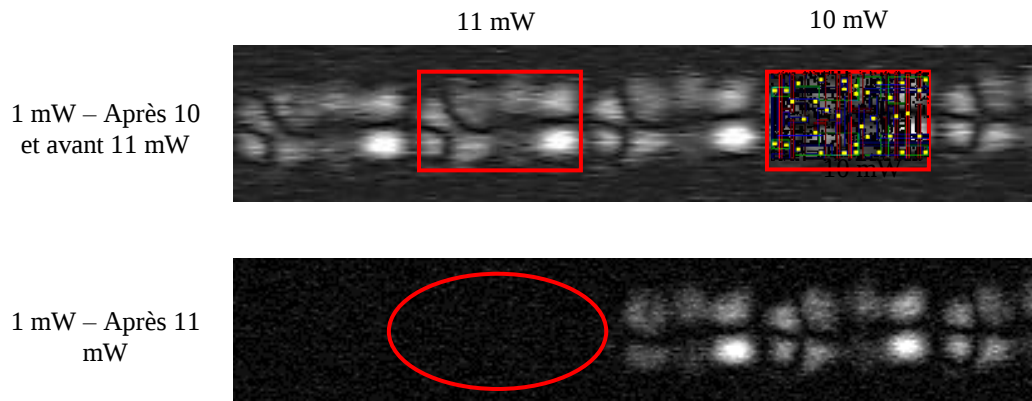


Figure IV-6 : cartographie de fréquence de la donnée à 10 MHz de la chaîne de bascules à 1 mW avant et après le test laser avec les ROIs (Region Of Interest)

2.4. Conclusion

Dans cette partie, nous avons finement mesuré le seuil de dégradation pour une structure en chaîne d'inverseurs avec peu de métallisations et pour une structure type chaîne de bascules.

La cartographie de fréquence de la fondamentale et de la 2nd harmonique indique que le seuil de dégradation irréversible pour la chaîne d'inverseurs et la chaîne de bascules est de 11 mW.

Il est maintenant intéressant de tester le modèle de stimulation thermique et de voir si les températures simulées aux seuils sont égales à 670 K.

3. Partie simulation

3.1. Introduction

Dans cette partie, nous développons un outil (Figure IV-7) permettant d'appliquer le modèle de stress thermique à n'importe quelle structure. L'outil utilise les dessins de la structure comme masque, simule des étapes de procédé de fabrication [SAU2016] pour construire la structure en 3D et applique la simulation du stress thermique (chapitre III).

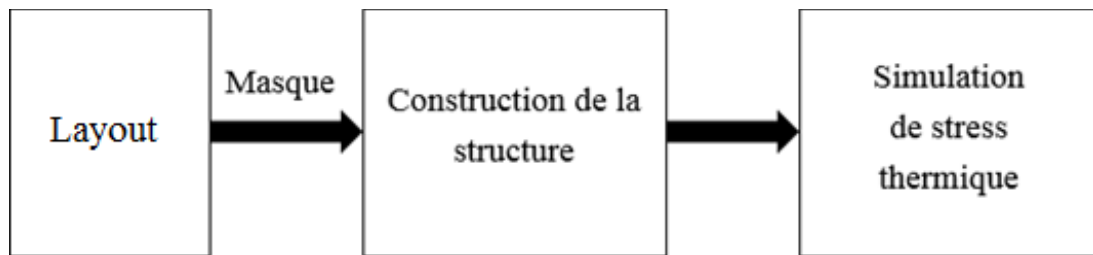


Figure IV-7 : principe de l'outil de simulation de stress thermique induit par le laser thermique en fonction du design

L'outil de simulation est testé sur les 2 structures. La première est la chaîne d'inverseurs avec 1 niveau de métallisation pour étudier l'effet de la densité de métaux. La deuxième structure est une partie de bascule pour valider le modèle sur un cas réel d'analyse.

3.2. Construction 3D de structures

La construction 3D est réalisée automatiquement en simulant les étapes de fabrication (dépôts et gravures de matériaux). Cette méthode présente plusieurs avantages :

- D'un point de vue opérationnel, il est beaucoup plus aisé de construire des structures quelque soit leur complexité.
- Tous les paramètres de design sont ajustables, comme par exemple l'épaisseur des métaux, l'épaisseur des oxydes intermétalliques, la profondeur du STI, etc... Ceci permet d'adapter le programme à n'importe quelles variantes de design ou à d'autres technologies.

Néanmoins, il faut faire attention à la taille de la cellule qui est construite, car ce procédé est très gourmand en mémoire vive. Une structure de $1 \mu\text{m}^2$ demande entre 50 et 90 Go de mémoire vive.

Les masques et constructions 3D des structures 1 et 2 sont représentés sur la figure IV-8. La structure 1 simulée est une chaîne de 5 inverseurs et la structure 2 est une partie de bascule.

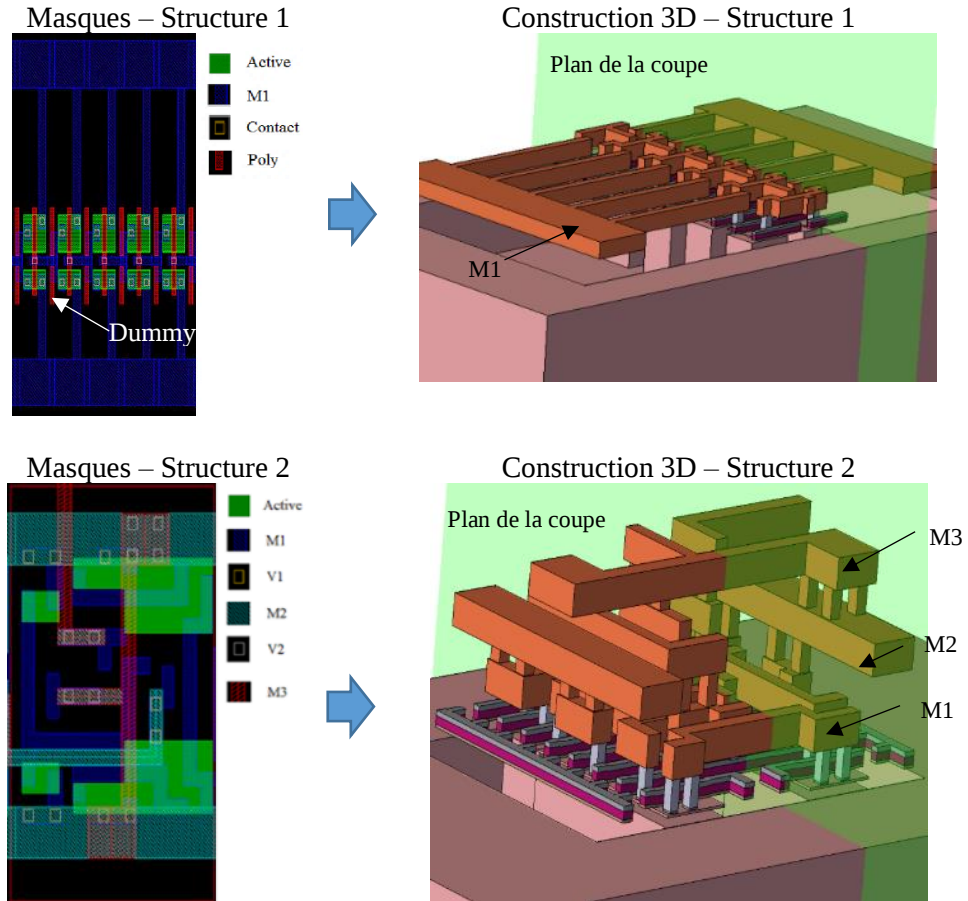


Figure IV-8: Masques et construction 3D des structures 1 et 2

3.2.1. Faisceau laser

La stimulation est faite à l'aide d'un faisceau laser en mode pointé. Le rayon à mi-hauteur est de 330 nm (critères de Rayleigh).

Dans les 2 cas, la focalisation du faisceau laser est faite sur un transistor (figure IV-9) avec un temps d'exposition de 128 μ s. Dans le modèle (chapitre I – Equation 20), la relation entre la température et la densité de puissance injectée par le faisceau est linéaire de sorte que la stimulation est réalisée à 1 mW pour obtenir la constante d'échauffement induit par le laser ($K.mW^{-1}$).

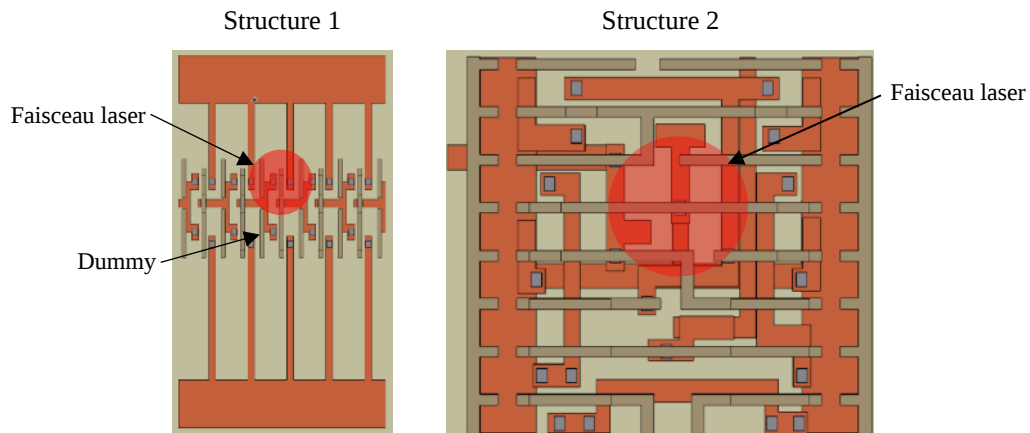


Figure IV-9 : face arrière des structures 1 et 2 avec les localisations des faisceaux lasers

3.2.2. Résultats de la simulation

La figure IV-10 montre une vue en coupe de la température induite par le laser dans la structure 1 et 2 à $128 \mu\text{s}$ (état stationnaire) à 1 mW de puissance laser. Dans la structure 1, une température de 339 K est simulée dans le siliciure de grille du transistor et 341 K dans le siliciure dummies. Dans la structure 2, la température augmente jusqu'à 342 K. Cela signifie un échauffement laser de 40 K/mW et 42 K/mW respectivement pour les structures 1 et 2.

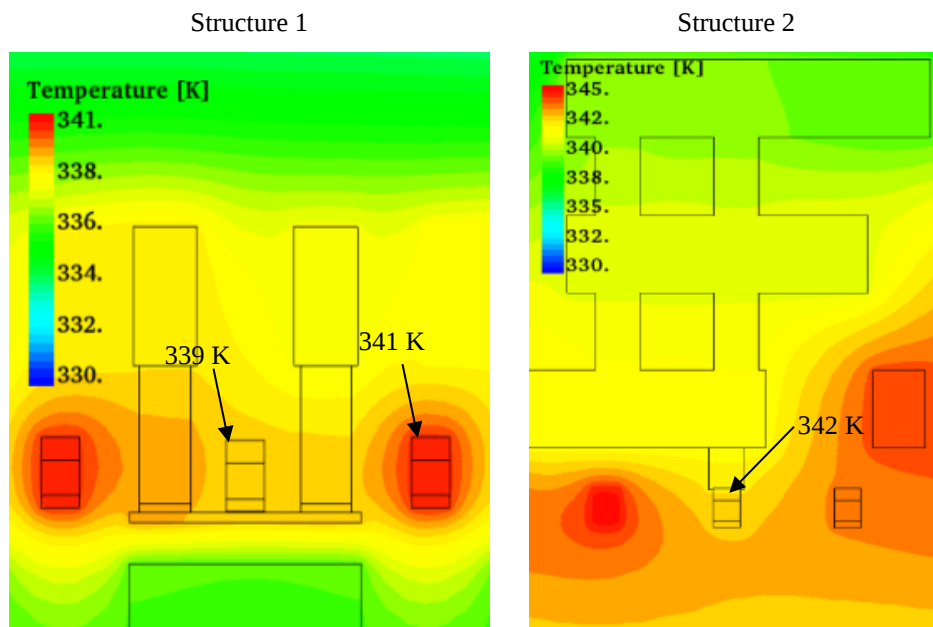


Figure IV-10 : vues en coupe des structures 1 et 2 avec les températures simulées à l'état stationnaire sous une stimulation à 1 mW

3.3. Conclusion

Les simulations de stress thermique induit par un laser 1340 nm continu sur les structures en chaîne d'inverseurs avec 1 niveau de métallisation (structure 1) et une chaîne de bascules (structure 2) ont été réalisées. Elles indiquent des échauffements respectifs de 40 K/mW et 42 K/mW.

Il est maintenant possible de confronter ces résultats avec ceux obtenus expérimentalement dans la partie précédente.

4. Confrontation de la simulation et de l'expérience

4.1. Introduction

Précédemment, les seuils de dégradation ont été déterminés expérimentalement et théoriquement sur 2 structures logiques.

L'objectif est de faire un lien entre les résultats de l'expérience et de la simulation.

4.2. Confrontation des résultats sur structure fortement intégrée

Le tableau 1 résume les résultats expérimentaux et simulés. La puissance seuil peut être simulée à partir de la constante d'échauffement et de la température de diffusion du siliciure (qui est de 670 K).

	Structure 1	Structure 2
Seuils de puissance expérimentale (mW)	11	11
Seuils de puissance théorique (mW)	9,25	8,8
Erreurs (%)	-16	-20

Tableau 1 : résumé des puissances laser seuils mesurées expérimentalement et théoriquement

Les valeurs issues de la simulation sont très proches des valeurs expérimentales. Il y a néanmoins une erreur de l'ordre de 18% sur les structures 1 et 2 en faveur de l'utilisateur. Les sources d'erreurs de la simulation sont principalement dues :

- Aux effets de bords. En effet, la taille de la cellule reconstruite n'excède pas 1 μm^2 pour des raisons de ressources informatiques décrites précédemment.
- A la non prise en compte de la variation des propriétés optiques et thermiques en fonction de la température.

4.3. Corrélation des résultats avec le chapitre II

Pour confirmer la capacité du modèle à prédire le seuil de dégradation, ce dernier a aussi été appliqué sur la structure utilisée au chapitre II. Une puissance laser seuil de 5 mW avait été estimée sur cette chaîne d'inverseur en anneau. La figure IV-11 représente les masques de la structure et la construction 3D. L'intégration de cette structure à 4 niveaux de métallisation est moins importante et l'écart entre les transistors permet de ne stimuler qu'un seul inverseur.

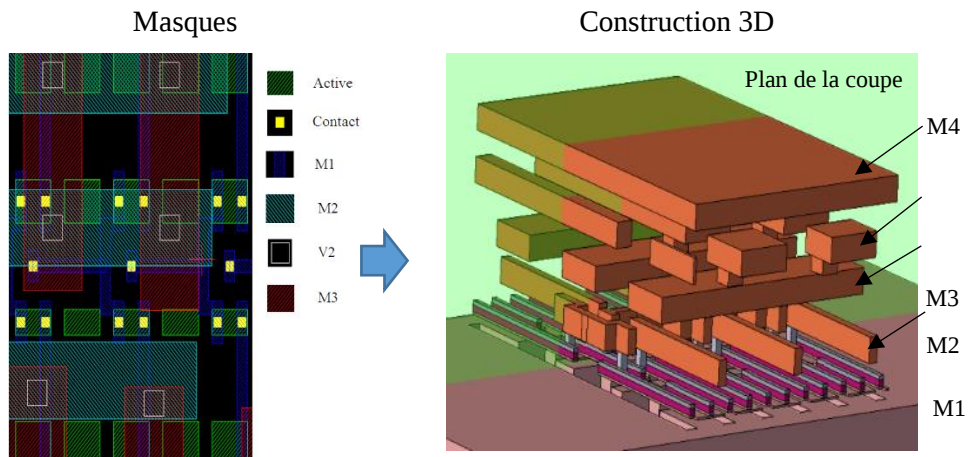


Figure IV-11 : masques et construction 3D de la structure

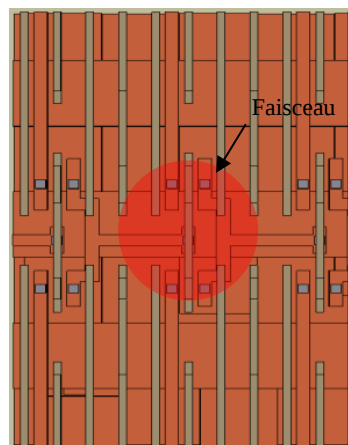


Figure IV-12 : face arrière de la structure avec la localisation du faisceau laser

Pour cette structure, le seuil de dégradation ayant été défini arbitrairement à 5 mW. La caractérisation n'est pas aussi fine que sur les 2 structures étudiées précédemment. En effet, une émulation à une fréquence donnée n'est pas possible, mais est imposée par la structure intrinsèque d'oscillateur en anneau. L'instabilité du circuit ne permet pas une cartographie de fréquence fiable et donc une estimation expérimentale précise du

seuil à partir duquel apparaissent les dégradations.

De plus, au chapitre III, nous avons observé avec la simulation un effet très marqué des couches de métallisation sur l'échauffement induit par le laser au niveau du siliciure. L'hétérogénéité de la métallisation dans cette structure a provoqué de fortes variations de l'échauffement. Cet effet explique les cas isolés de dégradation observés.

La figure IV-13 est une vue en coupe de la structure. La cartographie en température est simulée avec une puissance laser de 1 mW. La température augmente jusqu'à 374 K. Par conséquent, l'échauffement est de 74 K/mW, ce qui correspond à une puissance seuil théorique de 5 mW.

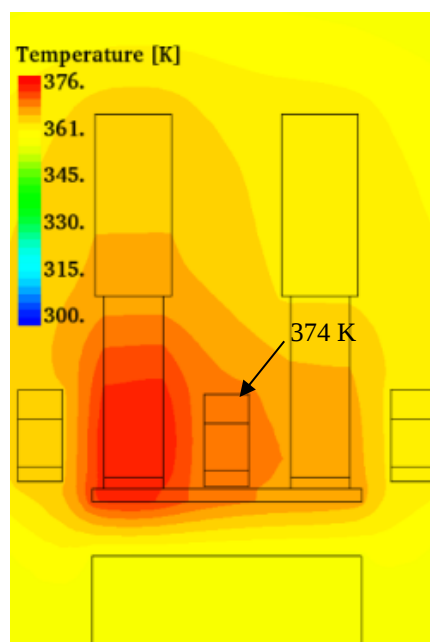


Figure IV-13 : vue en coupe de la structure avec les températures simulées à l'état stationnaire sous une stimulation laser à 1 mW

4.4. Conclusion

Cette étude démontre de manière rigoureuse une bonne corrélation entre la simulation et les expériences.

Néanmoins, il y a tout de même une surestimation de l'ordre de 20% de la température amenant à un seuil de puissance laser théorique 20% plus bas que la valeur expérimentale.

On confirme également l'effet local de la métallisation sur l'augmentation de

l'échauffement laser de façon théorique et par l'expérience.

5. Conséquences opérationnelles

Actuellement, les analystes utilisent des puissances laser autour de 1 mW pour ne pas créer une dégradation morphologique. En se basant sur les résultats des expériences et de la simulation, on peut de façon fiable étendre la plage opérationnelle des techniques lasers jusqu'à 4 mW. Ceci est particulièrement intéressant sur les analyses à basse tension.

Par exemple, les figures IV-14-a et IV-14-b montrent respectivement les cartographies et les profils de la fondamentale (10 MHz) moyennée sur 40 images dans une bascule et une vitesse de balayage de 1 ms/pixel. La tension appliquée est 0,6 V. Avec une puissance laser de 1 mW, la cartographie donne peu d'informations. Le rapport Signal sur Bruit augmente significativement entre 2 et 3 mW : l'amplitude maximale du signal passe de 0,9 à 1,2 (+33%) sur les 2 profils.

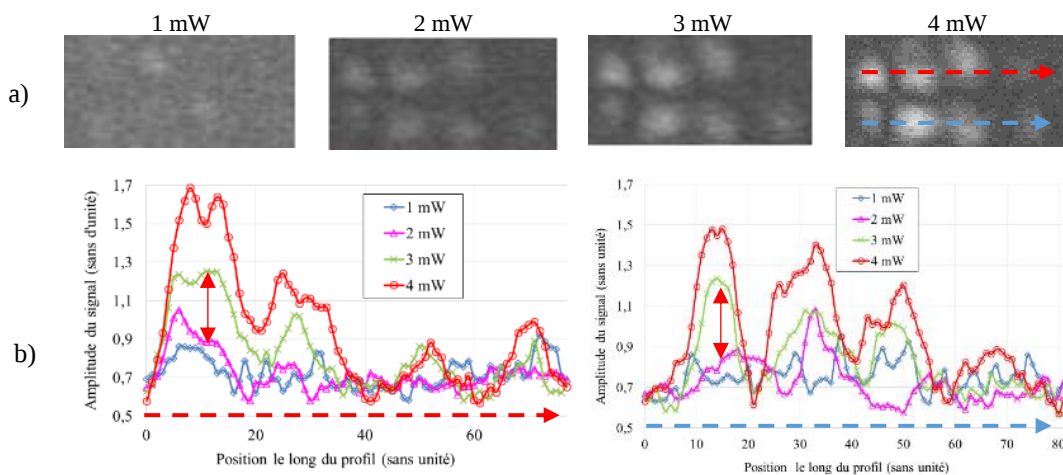


Figure IV-14 : cartographie (a) et profil (b) de cartographie de fréquence (10 MHz) dans une bascule alimentée à 0,6 V pour des puissances laser de 1 mW, 2 mW, 3 mW et 4 mW

6. Conclusion du chapitre

Une caractérisation fine sur une chaîne d'inverseurs avec 1 niveau de métal et sur une chaîne de bascules indique que leur seuil de puissance laser acceptable est de 11 mW pour la technologie considérée.

La simulation prédit des échauffements de 40 K/mW et 42 K/mW ce qui correspond théoriquement à des puissances lasers seuil de 9,25 mW et 8,8 mW pour atteindre 670

K.

La confrontation des résultats expérimentaux, de la simulation et de la température de recuit du siliciure indique globalement une bonne capacité du modèle à prédire le seuil de dégradation quelque soit la structure. Il y a toutefois une erreur de l'ordre de 20% explicable par la limitation en ressources informatiques et par le manque de littérature concernant les coefficients thermo-optiques des matériaux.

L'effet de la densité de métaux sur la température induite au niveau transistor est également confirmé par la théorie, mais aussi par l'expérience. Il est alors possible, à partir de l'ensemble des résultats, de redéfinir de façon plus générale les zones d'interaction laser-circuit intégré données au chapitre II et III en fonction de la densité de métallisation (Figure IV-15).

La connaissance de la dose laser acceptable peut améliorer l'acquisition de la cartographie. Nous avons montré une amélioration significative du rapport Signal sur Bruit (+33%) lors des cartographies de fréquences à 0,6 V avec une puissance laser de 3 à 4 mW.

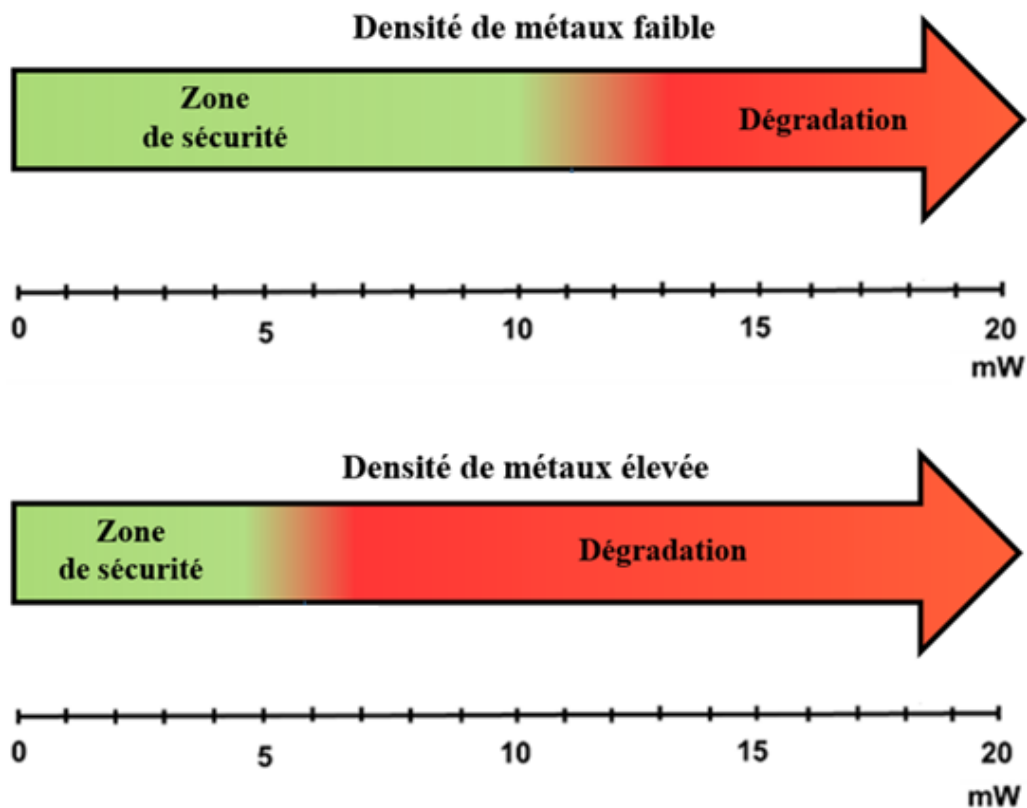


Figure IV-15 : zones d'interaction entre le laser-IC ayant une faible et une haute densité de métaux

Conclusion générale & perspectives

1. Conclusion

Le travail présenté dans ce manuscrit montre qu'il est possible de prédire le seuil de puissance laser 1340 nm continu admissible par les transistors 28FDSOI lors de l'utilisation de techniques laser par la face arrière. Il faut rappeler que l'ensemble des expériences ont été réalisées sur des transistors sans défauts. L'étude peut être résumée en une partie expérimentale, une partie simulation et une partie validation de la simulation.

La partie expérimentale a montré une reproduction et une caractérisation complète de défaut induit par ce laser sur les transistors permettant ainsi de définir des zones d'interaction laser-circuit intégré. La caractérisation électrique et morphologique a mis en évidence l'existence de défauts signatures de l'effet invasif du laser en fonction de la puissance laser :

- Dans la zone élastique, tous les transistors sont semblables à un transistor de référence.
- Dans la zone plastique, la caractérisation électrique met en évidence une augmentation du courant de fuite drain-source et une diminution de la tension. La caractérisation morphologique par STEM et EDX montre que dans cette zone, il y a diffusion verticale du siliciure (NiPtSi) dans la grille.
- Dans la zone de destruction, les caractéristiques électriques ne sont plus des caractéristiques de transistors. Cette destruction est associée à une diffusion du NiPtSi et du Ti de la grille.

Dans la partie simulation, on s'est intéressé au mécanisme de défaillance et à la simulation du stress thermique induit par le laser sur une structure à un transistor et 4 niveaux de métaux.

La littérature concernant la diffusion et la dégradation du siliciure a montré qu'il s'agit de phénomènes thermiquement activés respectivement à partir de 670 K et 1200 K.

Basée sur cette étude bibliographique, la simulation a été construite autour de l'équation de la chaleur. La propagation du faisceau a été modélisée à partir d'un modèle électromagnétique pour tenir compte des phénomènes d'interférences.

Le modèle a d'abord été validé sur une structure simple avec un seul transistor et 4 niveaux de métaux. En regardant l'évolution de la température dans le siliciure sous stimulation laser en fonction du temps, on voit très clairement la stimulation directe (absorption de photons) et la stimulation indirecte (diffusion de la chaleur) et l'état

stationnaire qui est atteint au bout de quelques dizaines de microsecondes. Lors de la stimulation laser (SDL ou OBIRCH), le temps d'exposition par pixel après avoir atteint l'état stationnaire participe inutilement à l'augmentation de la dose reçue par le transistor.

En testant le modèle dans différentes conditions de métallisation, il a été montré :

- Une augmentation de l'absorption de photons du siliciure due aux multiples réflexions du faisceau par les couches de métaux.
- Une augmentation de l'échauffement induit par le laser d'une quantité négligeable lorsqu'il n'y a que les contacts à des valeurs pouvant effectivement générer la diffusion du siliciure dans le poly-silicium de la grille.
- Une diminution de la constante de temps qui montre que les métaux agissent comme un réservoir de chaleur.

Finalement, en confrontant les résultats des expériences, de la simulation et de la bibliographie sur la diffusion et la dégradation du siliciure, on voit que le modèle est valide : il donne le bon ordre de grandeur de température. Dans la gamme de puissance laser étudiée (0 à environ 20 mW), on trouve une erreur de l'ordre de 20% imputable aux propriétés thermo-optiques des matériaux et à la taille de la cellule simulée.

La partie validation du modèle a consisté à confronter la mesure fine et la simulation des seuils de puissance laser admissibles pour une structure en chaîne d'inverseurs et une chaîne de bascules.

Les mesures fines ont été réalisées en utilisant la cartographie de fréquence de la fondamentale et de la seconde harmonique. Les résultats ont montré des puissances seuils de 11 mW (dégradation plastique) sur les 2 structures.

Pour des raisons d'efficacité, un programme permettant de reproduire automatiquement n'importe quelle structure à partir des masques été mis en place. L'application de la simulation sur une chaîne de 5 inverseurs et sur une partie de bascule a prédit des puissances lasers seuil de 9,25 mW et 8,8 mW.

Globalement, une bonne capacité du modèle à prédire le seuil de puissance laser a été observée avec toutefois une erreur de 20% en faveur de l'utilisateur. Cette erreur est explicable par la non-prise en compte des propriétés thermo-optiques des matériaux et par la limitation informatique qui génère un effet de bord. De plus, la limitation informatique n'a pas permis d'étudier l'effet des métaux loin du faisceau.

De nombreuses possibilités de conception existent, mais avec l'ensemble des résultats expérimentaux et théoriques obtenus durant cette thèse, il est possible de définir 2 principaux seuils de puissances lasers en fonction de la densité de métaux. Avec seulement 1 niveau de métal, le seuil est à 11 mW tandis qu'avec 4 niveaux de métaux, le seuil est à 5 mW.

Une conséquence opérationnelle intéressante de ces travaux est la possibilité, sur des transistors sans défauts, d'augmenter la puissance laser pour augmenter le rapport Signal sur Bruit des techniques sondes telle que la cartographie de fréquence. Cet avantage a notamment été montré lors de l'utilisation de basses tensions.

2. Perspectives

Ces travaux offrent de nouvelles perspectives : l'étude du temps d'exposition et l'effet des lasers de longueur d'ondes plus courtes.

2.1. Temps d'exposition au laser

Durant cette thèse, des essais ont été réalisés pour mettre en évidence l'effet du temps d'exposition sur des durées allant de 2 minutes à 20 minutes sans résultats significatifs.

A première vue ce résultat peut sembler surprenant, car on peut s'attendre à observer une augmentation progressive de la dégradation des transistors. Cependant, quand on examine la croissance du siliciure ($\text{NiPt}_{10\%}\text{Si}$) en fonction de la température (chapitre III – partie 2.2.2. – figure 3), on voit que l'on passe de la zone sans diffusion (en-dessous de 630 K) à une zone avec une forte croissance du siliciure (670 K) soit 40 K de différence. Selon la simulation, cette différence correspond à une puissance laser de l'ordre de 1 mW, ce qui est du même ordre de grandeur que le pas utilisé dans les expériences.

Malgré tout, il reste des suspicions d'effet invasif du laser à des puissances laser plus basses (moins de 5 mW), mais sur des temps d'exposition de l'ordre de plusieurs jours. En EFA, on rencontre cette situation lorsque le défaut est très fin et que la densité de transistors est particulièrement élevée telle que les mémoires. D'un point de vue pratique, il semble par contre difficile d'étudier de façon rigoureuse l'effet du temps d'exposition au laser sur des durées aussi longues (notamment à cause de la stabilité du focus de la SIL).

Une approche possible est la modélisation de la diffusion et de la croissance de phases durant la siliciuration. Un outils de simulation T-CAD pour ces types de phénomènes

est disponible, mais nécessite encore du développement pour être représentatif des phénomènes physiques mis en jeu. Cette thèse a entre autres servi de point de départ pour lancer une collaboration entre les équipes de R&D process de siliciuration, l'équipe T-CAD et les développeurs de logiciels de simulation. Le modèle sera ensuite calibré à partir de toutes les données procédés de fabrication.

2.2. Longueurs d'onde plus courtes

La miniaturisation des technologies continue avec notamment du 14FinFET. Pour pallier le manque de résolution spatial, les fabricants de microscope à balayage laser proposent de plus en plus des systèmes utilisant des longueurs dans le visible couplés à des SIL GaP.

Comme montré dans l'état de l'art, les propriétés du Si à ces longueurs d'ondes sont une combinaison d'un effet photoélectrique et d'un effet thermique, en particulier pour le cuivre qui présente une absorption thermique dans le visible.

Il peut donc être intéressant de s'interroger sur le type de défaut induit à des longueurs d'ondes plus courtes que 1340 nm. La figure ci-dessous montre les cartographies chimiques d'un nMOS sans défaut (jusqu'à 4 mW) et d'un nMOS avec défaut généré par un laser 1064 nm pulsé également dans des conditions d'EFA.

On voit très clairement une diffusion de nickel, de titane du contact et d'oxygène du BOX au niveau du canal. Visiblement, sur cet exemple la diffusion du Ti a eu lieu du contact de drain vers la source. Un déséquilibre en silicium est également observé entre le drain et la source. Tout comme les défauts observés durant cette thèse, il s'agit de défauts thermiquement activés.

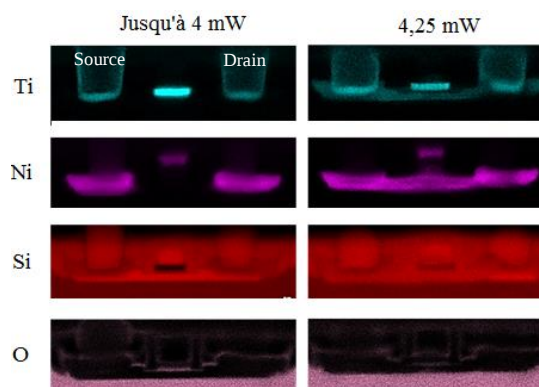


Figure 2 : cartographie chimique (EDX) d'un transistor de référence et d'un transistor stimulé avec une source laser 1064 nm pulsé de 4,25 mW de puissance moyenne

On peut alors se poser la question : est-ce que l'élévation de température a pour origine la composante thermique, la composante photoélectrique de la stimulation laser pulsé à 1064 nm ou encore une combinaison des deux ?

Annexes

ANNEXE A : cartographie chimique (EDX) des pMOS

Comme expliqué dans le chapitre I – Partie 5.3, le laser 1340 nm continu utilisé en analyse de défaillance électrique peut générer des diffusions de matériaux. Dans le texte principal, nous voyons les résultats de la caractérisation chimique sur les nMOS. Les figures A-1, A-2 et A-3 ci-dessous montrent la caractérisation chimique des pMOS avec les cartographies en a) et les profils le long de la grille (de bas en haut) en b). On voit que l'effet est identique.

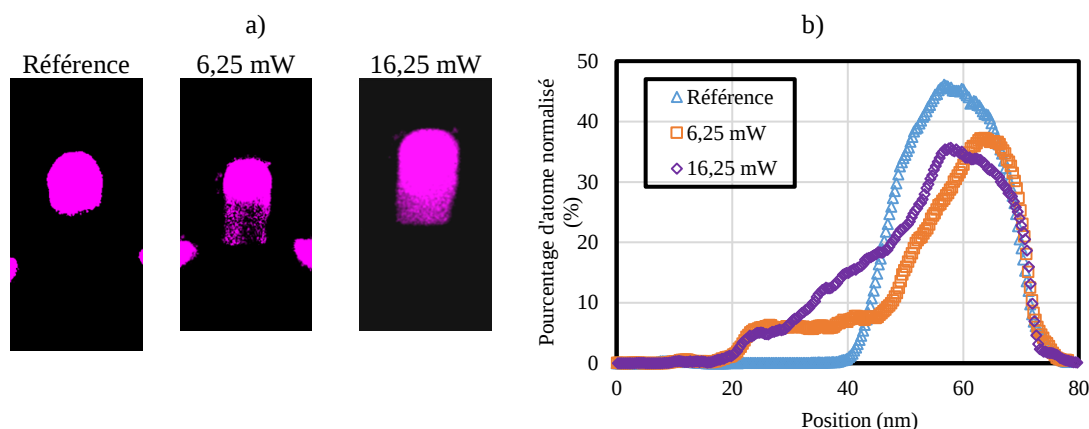


Figure A-0-1 : cartographie EDX (a) et profil (b) du Ni pour un transistor pMOS stimulé avec 3 puissances laser croissantes

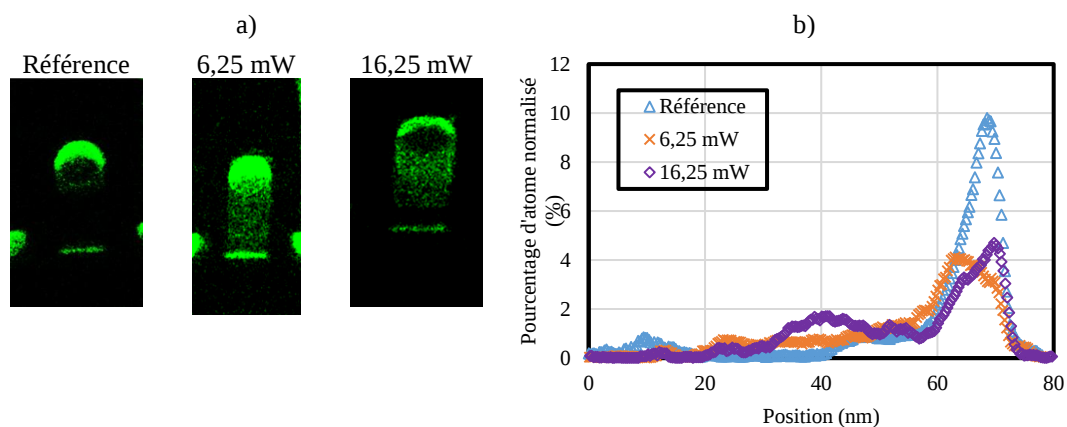


Figure A-0-2 : cartographie EDX (a) et profil (b) du Pt pour un transistor pMOS stimulé avec 3 puissances laser croissantes

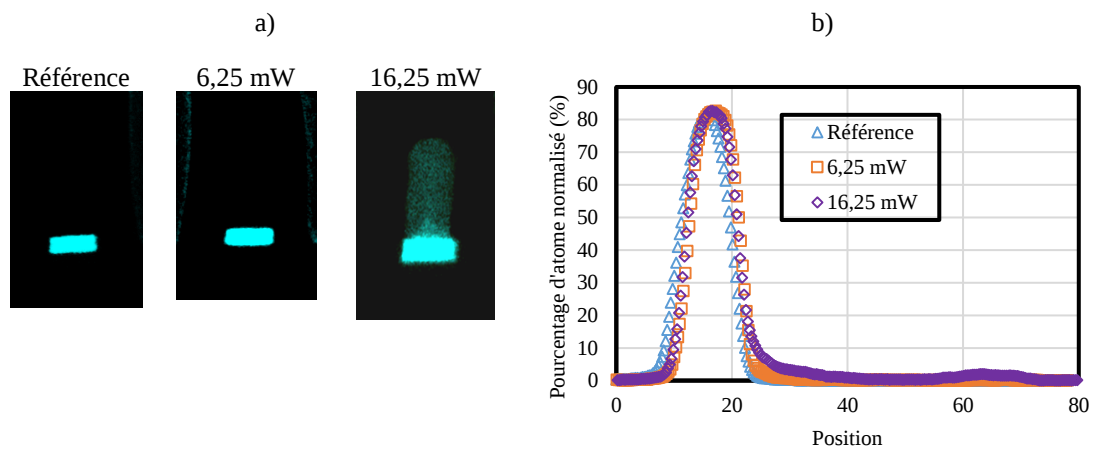


Figure A-0-3 : cartographie EDX (a) et profil (b) du Ti pour un transistor pMOS stimulé avec 3 puissances laser croissantes

ANNEXE B : scan chain (chaîne de bascules)

Aujourd’hui, les scan chain (Figure B-1) sont des éléments très importants, car ils sont notamment à la base de l’auto-diagnostic des ICs. L’élément de base d’une scan chain est une bascule. Une bascule est un circuit logique capable de maintenir les valeurs de ses sorties malgré les changements des valeurs d’entrées. Cet élément permet le passage de la logique combinatoire à la logique séquentielle.

Les bascules utilisées dans le cadre du chapitre 4 sont des bascules D. La sortie Q prend et maintient la valeur de l’entrée D à la réception d’un front d’horloge CLK montant. Etant donné que ce type de structure permet la mémorisation d’état logique, D est souvent appelé « signal de donnée ». Le tableau B donne la table de vérité de ce type de bascule.

Deux signaux sont nécessaires pour faire fonctionner une bascule. Dans le cadre des expériences réalisé au chapitre 4, on utilise 2 signaux carré de rapport cyclique 50%. D est à 10 MHz et CLK est à 40 MHz. La figure B-2 donne le chronogramme d’une bascule correspondant à ces 2 signaux.

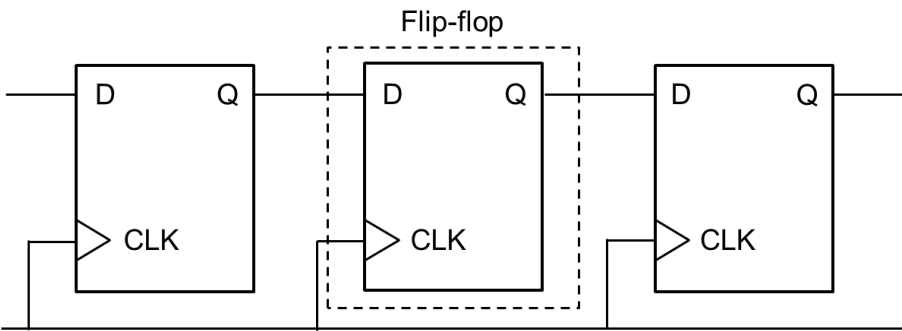


Figure B-0-4 : scan chain

D	CLK	Q_n	Q	remarque
D	Front d’horloge montant	D	non d	Q recopie D
X	1, 0, front d’horloge descendant	Q_{n-1}	non Q_{n-1}	mémorisation

Tableau B : table de vérité d’une bascule (bascule D)

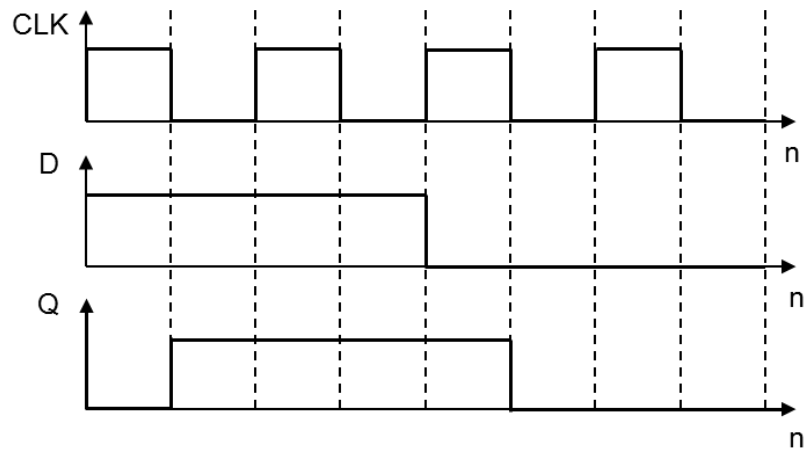


Figure B-0-5 : chronogramme d'une bascule pour un signal de donnée D de fréquence f et de fréquence d'horloge CLK $4f$.

ANNEXE C : programme de construction 3D

```

source ./LAYOUTS/LayerMap_28FD.txt
    set layersNameList [list]
    set layersNumberList [list]
    foreach layerNN $layerDefinition {
        lappend layersNameList [lindex $layerNN 0]
        lappend layersNumberList [lindex $layerNN 1]
    }

set 3dcutName @CUT@

string compare @CUT@ "MY_DOMAIN" == 0 } {
set 3dcutCoord {3861857.900 823527 3863621.300 825080}

icwb gds.file= "./LAYOUTS/@STRUCTURE@.gds" cell= "@TOPCELL_NAME@_MK"
layer.names= $layersNameList layer.numbers= $layersNumberList sim3d= $3dcutCoord
domain.name= @CUT@ scale= 1.e-3

    foreach curentLayer $layerDefinition {
        icwb.create.mask layer.name= [lindex $curentLayer 1] name= [lindex
        $curentLayer 0] polarity= [lindex $curentLayer 2]
    }

LogFile "Liste des masques: [mask list]"
transform.mask translate= {0 -0.65 -0.9113}

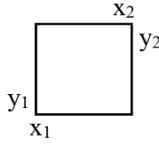
photo mask= ACTIVE_SOI_0 thickness= 0.010
etch material=Silicon type= anisotropic thickness = 0.3 mask= nMOS
etch material=Silicon type= anisotropic thickness = 0.3 mask= pMOS
strip Resist
deposit Oxide type= fill mask= nMOS coord= -0.140
deposit Oxide type= fill mask= pMOS coord= -0.140

```

Permet de récupérer la liste des masques et les informations :

- Nom du masque dans le programme
- Numéro du masque dans le layout
- Type de masque (positif ou négatif)

Coordonnées en nm du GDS (x₁,y₁,x₂,y₂)



Nom du fichier layout

Nom de la cellule dans le layout

Création des masques à partir du layout

Le layout et le domaine de simulation n'ont pas le même référentiel. Il faut traduire les masques pour les centrer sur le domaine de simulation

Création du STI (figure C-1) :

Profondeur du STI (µm)

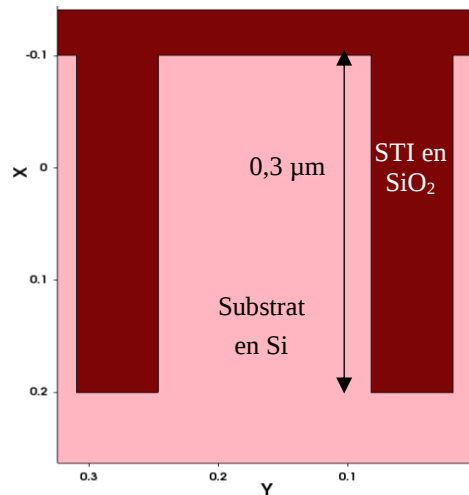


Figure C-1 : construction du STI

Création de la zone active (Figure C-2) :

etch material=Oxide type= anisotropic thickness = 0.01 mask= ACTIVE_SOI_0
 deposit Silicon type= anisotropic thickness= 0.0075 mask= ACTIVE_SOI_0

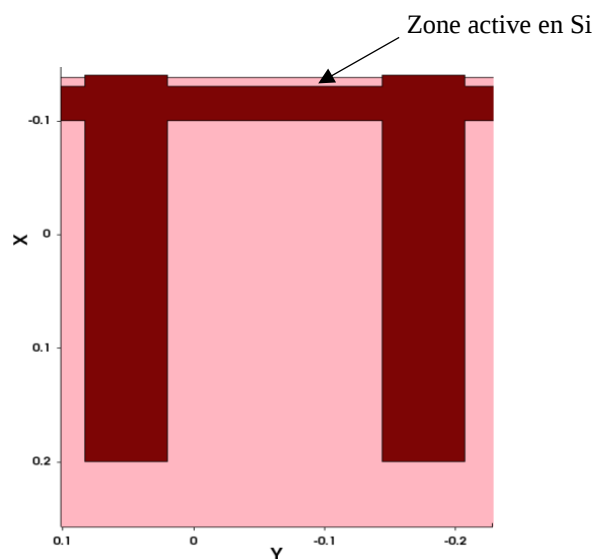


Figure C-2 : construction des zones actives

Création de la grille et des interconnexions (Figure C-3) :

deposit Oxide type = isotropic thickness = 0.001 mask = POLY_D_0
 deposit TiNitride type= isotropic thickness= 0.008738 mask= POLY_D_0
 deposit PolySilicon type= isotropic thickness= 0.026 mask= POLY_D_0
 deposit NickelSilicide type= isotropic thickness= 0.0163 mask= POLY_D_0
 photo mask= S_D thickness= 0.2
 deposit NickelSilicide type= fill coord= -0.1435

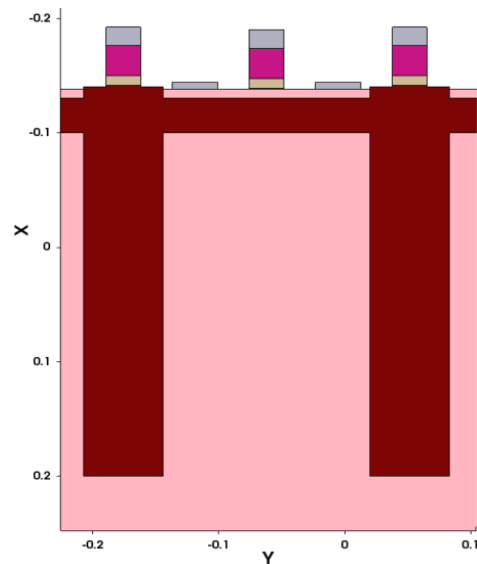


Figure C-3 : construction de la grille et des interconnexions

Création des contacts et de l'isolation électrique (Figure C-4) :

deposit Tungsten type= fill coord= -0.2435
 strip Resist
 deposit Oxide type= fill coord= -0.1894
 photo mask= Gate thickness= 0.2
 deposit Tungsten type= fill coord= -0.2435
 strip Resist
 deposit Oxide type= fill coord= -0.2435

Figure C-4 : création des contacts et de l'isolation électrique

Création d'une couche de métal (Figure C-5) :

photo mask= METAL1_0 thickness= 0.1
 deposit Copper type= fill coord= -0.3435
 strip Resist
 deposit Oxide type= fill coord= -0.3435

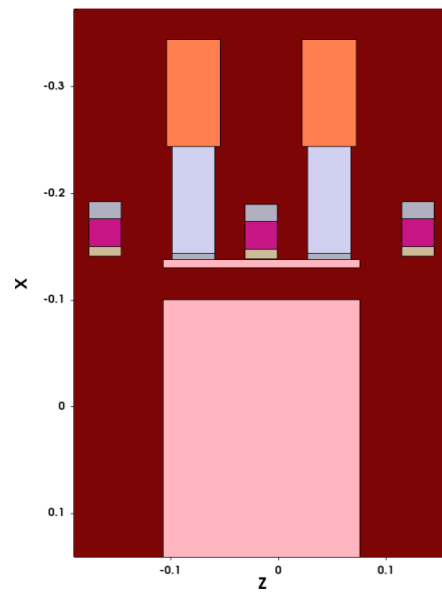


Figure C-5 : création des contacts et de l'isolation électrique

Bibliographies

[ADD66] Y. Adda, J. Philibert, « la diffusion dans les solides », Presses Universitaires de France, Paris, (1966).

[AUT2012] C. Auth et al., “A 22nm high performance and low-power CMOS technology featuring fully-depleted tri-gate transistors, self-aligned contacts and high density MIM capacitors,” Dig. Tech. Pap. - Symp. VLSI Technol., vol. m, no. 2003, pp. 131–132, 2012. <https://doi.org/10.1109/VLSIT.2012.6242496>

[BIN82] Binnig, G., H. Rohrer, et al. (1982). "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy." *Physical Review Letters* 49(1) : 57.

[CEL2011] G. Celi, S. Dudit, P. Perdu, A. Reverdy, T. Parrassin,, D. Lewis, M. Vallet, " LVI detection on passive structure in advance CMOS technology: new opportunities for device Analysis", *Microelectronics Reliability*, Septembre 2011,51 (9-11) pp.1662-1667

[CEL2013] G. Celi, « Etude, applications et améliorations de la technique LVI sur les défauts rencontrés dans les technologies CMOS avancées 45nm et inferieur.», Manuscrit de thèse, p. 112-113

[CEL2013-2] G. Celi, « Etude, applications et améliorations de la technique LVI sur les défauts rencontrés dans les technologies CMOS avancées 45nm et inferieur.», Manuscrit de thèse, p. 159

[CHE83] I. Chen and S. Lee, “Transcient temperature profiles in solids heated with scanning laser”, *Journal of Applied Physics*, 54(2), 1983, p1062-1066.

[DEA96] D. Lewis, “Réalisation d’un banc optique d’imagerie thermique et thermoélastique pour composants électroniques en fonctionnement : application de l’effet Peltier généré aux contacts ohmiques de circuits intégrés et la caractérisation du comportement thermique de diode laser”, manuscrit de thèse, chapitre 2, 1996

[DEM2013] J. Demeulemeester, D. Smeets,, M. Comrie, N. P. Barradas, A. Vieira, C. Van Bockstael, C. Detavernier, K. Temst, et A. Vantomme, “On the growth kinetics of Ni(Pt) silicide thin films”, *Journal of Applied Physics* 113, 163504 (2013)

[DEN74] R. Dennard, F. Gaensslen, W.-N. Yu, L. Rideout, E. Bassous, and A. Le Blanc, “Design of Ion-Implanted Small MOSFET’S Dimensions with Very,” *IEEE J. Solid State Circuits*, vol. 9, no. 5, pp. 257–268, 1974. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1974.1050511>

- [ERN2009] R. Erni, M. D. Rossell, C. Kisielowski, and U. Dahmen, "Atomic-resolution imaging with a sub-50-pm electron probe," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 9, pp. 1–4, 2009. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.096101>
- [FER83] F. Ferrieu and G. Auvert, "Temperature evolution in silicon induced by a scanned cw laser beam, pulsed laser, or electron beam", *Journal of Applied Physics*, 54(5), 1983, p2646-2649.
- [FEX2011] F. Beaudoin, R. Desplats, P. Perdu, C. Boit "Principles of Thermal Laser Stimulation Techniques", *Microelectronics Failure Analysis*, 2011, p340-348
- [FRA58] W. Franz. Einfluss eines elektrischen Feldes auf eine optische Absorptionskante. *Z. Naturforschung* 13a, pages 484-489, 1958
- [HEC87] Hecht. *Optics*. Eddison-Wesley Publishing Company, second edition, 1987.
- [FRO2004] B. Froment, V. Carron, Y. Morand et al. Optimized nickel silicide process formation for high performance sub-65nm CMOS node. In : *Electrochemical Society Proceedings*. 2004, p. 191.
- [FUK2012] Fukui, M.; Nara, Y.; Fuse, J. (2012). "Characteristics Variability Evaluation of Actual LSI Transistors with Nanoprobing". 2012 IEEE 21st Asian Test Symposium. p. 4. ISBN 978-1-4673-4555-2. doi:10.1109/ATS.2012.80.
- [GER2005] P. Gergaud, C. Rivero, M. Gailhanou, O. Thomas, B. Froment, et H. Jaouen et V. Carron. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (2005) 041904.
- [GRE2011] M. Gregoire, R. Beneyton, P. Morin "Millisecond Annealing for Salicide Formation Challenge of NiSi Agglomeration Free Process" in 2011 IEEE International Interconnect Technology Conference.
- [ITRS2011] ITRS, "International Technology Roadmap for Semiconductors," 2011. [Online]. Available: <http://www.itrs2.net/>.
- [JOH72] P. B. Johnson and R. W. Christy. Optical Constants of the Noble Metals, *Phys. Rev. B* 6, 4370-4379 (1972)
- [KAN66] Kane S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14, 1966, S. 302-307

[KHU86] N. Khurana, C. L. Chiang « Analysis of Product Hot Electron Problems by Gated Emission Microscopy », Proceeding IRPS, IEEE, pp.189-194, 1986.

[KRA27] H. A. Kramers (1927). « La diffusion de la lumière par les atomes » in Atti del Congresso internazionale dei fisico. Transactions of Volta Centenary Congress 2: 545-557.

[KRO26] R. de L. Kronig, « On the theory of the dispersion of X-rays », Journal of the Optical Society of America, vol. 12, 1926, p. 547-557 [LIL27] J.E. Lilienfield US Patent 1,877,140 and 1,900,018

[LAV2003] C. Lavoie, F. M. d'Heurle, C. Detavernier, et C. Cabral Jr. Micro. Eng., **70** (2003) 144

[LAX77] M. Lax, "Temperature rise induced by a laser beam", Journal of Applied Physics, 48(9), 1977, p3919-3924.

[LIA85] E. Liarokapis and Y.S. Raptis, "Temperature rise induced by a cw laser beam revisited", Journal of Applied Physics, 57(12), 1985, p5123-5126

[LIE84] C.-D Lien, M.-A. Nicolet, and S. S. Lau. Phys. Stat. Sol. 81, 1984, 123.

[MAN99] D. Mangelinck, J.Y. Dai, J.S. Pan, S.K. Lahiri, Applied Physics Letters 75 (1999) 1736.

[MOO65] G.E. Moor, "Cramming more components onto Integrated Circuits", Electronics Magazine, Vol. 38(8), 1965

[MOO82] J.E. Moody and R.H. Hendel, "Temperature profiles induced by a scanning cw laser beam", Journal of Applied Physics, 53(6), 1982, p4364-4371

[MOS73] T.S. Moss, G. J. Burrell, and B. Ellis, Semiconductor Opto-Electronics, London: Butterworths, 1973

[NAS87] P. Nash et A. Nash, Bulletin of alloy phase diagramms, 8, 1987, 1.

[NIS80] Y.I. Nissim, A. Lietoila, R.B. Gold and J.F. Gibbons, "Temperature distribution produced in semiconductors by a scanning elliptical or circular cw laser beam", Journal of Applied Physics, 51(1), 1980, p274-279.

- [OTT81] G. Ottaviani and K. N. Tu, J.W. Mayer, *Physical Review B*, 24(6), 1981, 24.
- [PAL98] Palik, Edward D. ; Ghosh, Gorachand: *Handbook of optical constants of solids*. San Diego : Academic Press, 1998 – ISBN 0125444206
- [PLA2012] N. Planes et al., “28nm FDSOI technology platform for high-speed low-voltage digital applications,” *Dig. Tech. Pap. - Symp. VLSI Technol.*, vol. 33, no. 4, pp. 133–134, 2012. <https://doi.org/10.1109/VLSIT.2012.6242497>
- [PHI85] J. Philibert, « *Diffusion et transport dans les solides* », Editions de physique, 1985.
- [SAU2016] *Guide d’utilisation Sentaurus™ Process User Guide and Sentaurus™ Device Electromagnetic Wave Solver*, Version M-2016.12, Synopsys, Inc., 2016
- [SB87] R. A. Soref and B. R. Bennett. Electrooptical effects in silicon. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-23, 1987.
- [SCH81] P. E. Schmid, “Optical absorption in heavily doped silicon,” *Phys. Rev. B*, vol. 23, p. 5531, May 15, 1981.
- SCH2017] J. B. Schneider, « *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method* », Chapitre 3, p.33-39, April 5, 2017, <http://www.eecs.wsu.edu/~schneidj/ufdtd/ufdtd.pdf>
- [SKO03] T. Skotniki, F. Boeuf, *Introduction à la physique du transistor MOS*, 2003
- [SPA76] M. Sparks, “Theory of laser heating of solids: Metals”, *Journal of Applied Physics* 47(3), 1976,p837-849.
- [SPI57] W. Spitzer and H. Y. Fan, “Infrared absorption in n-type silicon,” *Phys. Rev.*, vol. 108, p. 268, 1957.
- [STM2016] *Sentaurus™ Process User Guide and Sentaurus™ Device Electromagnetic Wave Solver User Guide*, Version M-2016.12, Synopsys, Inc., 2016.
- [TOH2007] Toh, S. L.; Mai, Z. H.; Tan, P. K.; Hendarto, E.; Tan, H.; Wang, Q. F.; Cai, J. L.; Deng, Q.; Ng, T. H.; Goh, Y. W.; Lam, J.; Hsia, L. C. (2007). "Use of Nanoprobng as the Diagnostic Tool for Nanoscaled Devices". 2007 14th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. p. 53. ISBN

978-1-4244-1014-9. doi:10.1109/IPFA.2007.4378057

[TOH2008] Toh, S. L.; Tan, P. K.; Goh, Y. W.; Hendarto, E.; Cai, J. L.; Tan, H.; Wang, Q. F.; Deng, Q.; Lam, J.; Hsia, L. C.; Mai, Z. H. (2008). "In-Depth Electrical Analysis to Reveal the Failure Mechanisms with Nanoprobing". IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 8 (2): 387.

[WC65] P.H. Wendland and M. Chester. Electric field effects on indirect optical transitions in silicon. Phys. Rev., 140(4A):1384{1390, 1965.

[WIL96] D. B. Williams and C. B. Carter, Transmission Electron Microscopy. Springer, 1996. <http://doi.org/10.1007/978-1-4757-2519-3>

[WYN68] J. J. Wynne and G. D. Boyd, "Study of optical difference mixing in Ge and Si using a CO₂ gas laser", Appl. Phys. Lett., vol. 12, pp. 191-192, 1968

Titre : Caractérisation et simulation de défauts induits par laser 1340 nm continu sur la technologie 28FDSOI en analyse de défaillance électrique

Résumé :

Face à la densité importante d'intégration des transistors et du nombre de niveau de métallisation, la localisation de défaut en analyse se fait principalement par la face arrière du composant. Cette analyse par la face arrière impose l'utilisation systématique de lentille à immersion solide et de la microscopie à balayage laser afin de limiter la contrainte de la résolution spatiale et de la sensibilité. Les objectifs sont de déterminer les dégradations induites par un laser 1340 nm continu sur la technologie 28FDSOI et de fournir un outil de simulation permettant de prédire la dose admissible par les transistors. L'étude commence par la reproduction et la caractérisation du défaut induit par le laser. Les résultats montrent principalement une diffusion des interconnexions grille-contacts en NiPtSi. Basé sur ces observations, un modèle de stimulation laser thermique est construit, puis testé sur une structure élémentaire. Les résultats montrent que la température peut atteindre des valeurs suffisamment élevées pour provoquer la diffusion du siliciure et expliquer les observations. Dans la dernière partie, le modèle est mis à l'épreuve sur des structures réelles. Le défaut est caractérisé paramétriquement en utilisant la cartographie de fréquence. Parallèlement, la simulation est appliquée sur ces mêmes structures. Les résultats montrent une bonne capacité du modèle à prédire le seuil de dégradation des transistors sous stimulation thermique laser.

Mots clés :

Analyse de défaillance électrique – Stimulation laser – 28FDSOI
Caractérisation – Simulation

Title: Characterization and simulation defects induced by a continuous wave 1340 nm laser on 28FDSOI technology in electrical failure analysis

Abstract:

Faced with the high density of integration of the transistors and the number of metallization level, fault localization in analysis is mainly done by the rear face of the component. This backside analysis requires the systematic use of solid immersion lenses and laser scanning microscopy to limit the stress of spatial resolution and sensitivity. The objectives are to determine the degradation induced by a continuous 1340 nm laser on the 28FDSOI technology and to provide a simulation tool for predicting the allowable dose by the transistors. The study begins with the reproduction and characterization of the laser-induced defect. The results mainly show a diffusion of grid-contact interconnections in NiPtSi. Based on these observations, a model of thermal laser stimulation is built and then tested on an elemental structure. The results show that the temperature can reach sufficiently high values to cause the diffusion of the silicide and to explain the observations. In the last part, the model is put to the test on real structures. The defect is characterized parametrically using frequency mapping. Simultaneously, the simulation is applied to these same structures faithfully. The results show a good ability of the model to predict the degradation threshold of the transistors under laser thermal stimulation.

Keywords:

Laser stimulation – Electrical Failure Analysis – 28FDSOI
Characterization – Simulation

Unité de recherche

Laboratoire d'Intégration du Système au Matériaux, UMR5218, UNIVERSITE DE BORDEAUX,
Bâtiment A31, 351 cours de la Libération 33405 TALENCE CE