

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**MESURE *IN-SITU* DE LA ZONE FONDUE D'UN
CIRCUIT INTÉGRÉ LORS DE LA FABRICATION D'UNE
RÉSISTANCE DIFFUSÉE PAR LASER**

STÉPHANE LAFORTE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)
DÉCEMBRE 2006



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-47673-4
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-47673-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MESURE *IN-SITU* DE LA ZONE FONDUE D'UN CIRCUIT INTÉGRÉ LORS
DE LA FABRICATION D'UNE RÉSISTANCE DIFFUSÉE PAR LASER

présenté par: LAFORTE Stéphane

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. MARTINU Ludvik, Ph.D., président

M. MEUNIER Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. DUCHARME Mathieu, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, le professeur Michel Meunier, pour m'avoir fourni les outils nécessaires à la réalisation de mon projet et surtout pour m'avoir encadré tout le long de ma maîtrise. Grâce à son expérience dans le domaine et à son intérêt porté au projet, j'ai pu acquérir un apprentissage unique qui me servira tout au long de ma vie.

J'aimerais remercier les autres membres du groupe de recherche, particulièrement Jean-Yves Degorce, Étienne Boulais, Rémi Lachaine et Vincent Binet, pour leur aide et les conseils qu'ils m'ont apportés au cours des dernières années. Merci également aux autres membres du Laboratoire de Procédés Laser, dont notre technicien Jean-Paul Lévesque. Une bonne partie de ce travail a aussi été réalisé en collaboration avec le Centre de Caractérisation Microscopique des Matériaux (CM)² et je remercie particulièrement Jean-Philippe Masse pour son aide et soutien.

Je tiens à remercier sincèrement la compagnie *LTRIM Technologies* avec laquelle ce projet de collaboration université-industrie a été réalisé, rendant ma maîtrise motivante. Un merci particulier à Alain Lacourse et Mathieu Ducharme pour leur aide et pour le matériel et les échantillons qui nous ont été prêtés.

Je tiens à mentionner l'appui financier du Fond québécois de la recherche sur la nature et la technologie et de l'École Polytechnique de Montréal qui m'ont permis de me concentrer sur ma maîtrise.

Je remercie les membres du jury, Mathieu Ducharme et Ludvik Martinu, pour avoir accepté d'évaluer mon mémoire.

Finalement, j'aimerais remercier Marie-Claude Croteau pour son soutien et ses conseils lors de la rédaction de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Les procédés conventionnels de fabrication de circuits CMOS acceptent une certaine incertitude sur les valeurs des composantes construites telles que les résistances, entraînant une dérive dans la fonctionnalité d'un circuit analogique. Des méthodes ont été développées afin d'améliorer la précision des circuits sensibles, dont la fabrication de résistances diffusées par laser (Meunier et al. 2002). Celle-ci est basée sur la redistribution d'un profil de dopant lors de la fonte créée par un laser focalisé entre la source et le drain d'un transistor à effet de champs sans grille. Même si cette technique fonctionne très bien, il a été montré qu'elle est aussi sensible aux variations de fabrication et nécessite une méthode de contrôle afin d'être implémentée dans un procédé industriel. La méthode de contrôle développée dans ce travail se base sur le changement de réflectivité de la zone irradiée qui peut être détecté en analysant la puissance réfléchie d'un laser visible continu colinéaire au laser de fonte. L'objectif de ce projet de maîtrise est d'analyser en détail les mesures de puissances réfléchies et de les relier aux transformations structurales occasionnées par le laser de fonte dans le but de caractériser les résistances diffusées créées et éventuellement mieux contrôler le procédé.

Des mesures *in-situ* de la puissance réfléchie ont été prises sur des circuits intégrés fabriqués en divers technologies. Une comparaison est faite entre ces mesures, celles prises sur du silicium recouvert d'oxyde natif ainsi que des résultats de simulations. Les mesures sur les circuits intégrés montrent une plus grande sensibilité à l'intensité du laser de fonte que ce que les modèles prédisent et présentent des comportements différents tels des diminutions de la puissance réfléchie pendant l'irradiation et des augmentations après celle-ci.

Une caractérisation poussée des différentes couches diélectriques et de leurs comportements lors de l'irradiation a été faite sur la technologie *TSMC 180 nm*. Il est montré que certaines couches sont fortement influencées par l'irradiation et peuvent se

détruire. Des déformations de la surface de silicium (forme de *sombrero*) sont aperçues après qu'une fonte importante ait été induite. Ces déformations et modifications des différentes couches influencent grandement les mesures de puissance réfléchie.

Différentes hypothèses sont proposées afin d'expliquer les phénomènes de modification de la puissance réfléchie à l'aide des changements de propriétés des circuits sous irradiation. La déformation du silicium a été simulée et permet d'expliquer en partie les phénomènes de hausse de la puissance réfléchie après l'irradiation. Les autres différences avec le modèle théorique sont plutôt expliquées par la modification des caractéristiques optiques des couches diélectriques avec la température et l'interdiffusion entre elles.

Des variations allant jusqu'à 20% de la puissance réfléchie causées par les modifications des procédés de fabrication ont été observées sur les différents circuits. De telles variations influencent grandement la création de résistances diffusées. Plusieurs critères d'analyse, par exemple des puissances réfléchies à atteindre ou des temps de transition lors des mesures de la puissance réfléchie, ont été proposés afin d'utiliser les mesures de la puissance réfléchie comme méthode de contrôle efficace de la fabrication de résistances diffusées par laser. Une méthode de contrôle basée sur un changement de comportement des mesures de la puissance réfléchie a permis de détecter des dispositifs à problème et d'ajuster les paramètres de fabrication de façon efficace dans plus de 85% des cas. Les méthodes développées sont compatibles avec l'intégration dans un procédé de fabrication industriel.

ABSTRACT

While conventional CMOS manufacturing processes have been extensively developed and improved for digital microelectronics, they are not completely adapted for analog circuits, because of their inherent inaccuracies of the resulting resistive components. One of the methods developed to overcome these problems and improve sensitive circuits functionality is the laser diffused resistor technique (Meunier et al. 2002), consisting of irradiating the gap of a gateless field effect transistor, thus inducing the diffusion of dopants into the melted silicon and creating a resistive link. While this method has proven to be make precise resistors and accurate analog circuits, the resulting circuit functionality is still slightly sensitive to processing variations and control methods must be developed to accelerate industrial integration of this trimming technique. One such technique described in this master thesis is based on the reflectivity changes of the irradiated region that can be detected with a low power continuous wave laser. The objectives of this research are to analyse the reflected power measurements in terms of structural deformations caused by the irradiation and develop a control method for the laser diffusion resistor trimming technique.

Reflected power measurements, taken on different CMOS process technologies, are compared to those taken on bare silicon and simulation. Results on integrated circuits show a greater sensitivity to laser power and special behaviours such as a sudden decrease of the reflected power during the irradiation follow by an increase at the end of the pulse.

As revealed by microstructural characterization, dielectric layers of *TSMC 180 nm* circuits show strong variations caused by the laser irradiation and are nearly destructed. In addition, the silicon surface takes a sombrero shape when melted. Those modifications on silicon and dielectrics can cause great variations on the reflected power that are not included in the simulation model.

Different hypothesis are proposed to explain special phenomena observed on reflected power measurement of irradiated circuits. Simulations of the silicon deformation permit to partially explain the increase of reflected power after the laser pulse. Other behaviours could be explained by the melting of the dielectrics and the interdiffusion between these layers.

It is shown that manufacturing processes can cause up to 20% of variation on the reflected power from a circuit to another one, which could greatly affect the laser diffused resistor characteristics. To overcome these variations, it is proposed to use the reflected power measurements or a specific transition time to control the laser diffused resistor fabrication process,. Tests using the transition time criteria showed good results to adjust the irradiation power and permitted to reduce by 85% the diffused resistor fabrication errors on *TSMC 250 nm* technology. The developed method is totally compatible and can be integrated in any industrial processes.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
TABLE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xviii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 AJUSTEMENT DE RÉSISTANCES PAR LASER ET MÉTHODE DE CONTRÔLE	4
1.1 Nécessité de fabriquer des résistances dans un circuit intégré	4
1.2 Méthode de fabrication de résistances diffusées par laser	5
1.3 Méthodes de contrôle	7
1.3.1 Contrôle par mesures successives de la résistance	7
1.3.2 Contrôle spatial	8
1.4 Méthode in-situ optique	10
1.4.1 Simulation de la fonte	11
1.4.2 Simulation de la puissance réfléchie	13
CHAPITRE 2 MONTAGE EXPÉRIMENTAL DE FABRICATION DE RÉSISTANCES DIFFUSÉES ET DE MESURE <i>IN-SITU</i> OPTIQUE	16
2.1 Montage de fonte par laser	16
2.1.1 Laser	16
2.1.2 Formation des impulsions	18
2.2 Montage de mesure <i>in-situ</i> optique	20
2.2.1 Laser	20

2.2.2	Appareils de mesure de la puissance réfléchie	20
2.3	Système de focalisation	21
2.3.1	Système de positionnement	23
CHAPITRE 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DE MESURES <i>IN-SITU</i> DE		
	LA PUISSANCE RÉFLÉCHIE	24
3.1	Résultats de mesures de la puissance réfléchie sur le silicium	24
3.2	Résultats de mesures de la puissance réfléchie sur des circuits intégrés	27
3.2.1	Circuits intégrés de technologies 350 nm et 250 nm	28
3.2.2	Circuits intégrés fabriqués en technologie 180 nm	30
3.3	Mesure de la puissance réfléchie absolue	33
3.4	Différence de résultats entre le silicium nu et les CI de technologie 180 nm	35
CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION DE LA TECHNOLOGIE 180 nm		
4.1	Méthodes de caractérisation utilisées et préparation d'échantillons	38
4.1.1	Microscope optique	38
4.1.2	Microscope électronique à transmission (MET)	39
4.1.2.1	Mode imagerie	40
4.1.2.2	Analyse rayons X	40
4.1.2.3	Spectroscopie de perte d'énergie	42
4.1.3	Faisceau d'ions focalisés (F.I.B.)	43
4.2	Caractérisation d'une résistance non irradiée en technologie 180 nm	44
4.2.1	Imagerie des couches	46
4.2.2	Analyse chimique	48
4.2.3	Identification des couches diélectriques	51
4.3	Caractérisation des zones irradiées par laser	53
4.3.1	Impulsion longue et intense produisant un point noir	53
4.3.1.1	Imagerie des déformations	53
4.3.1.2	Analyse chimique	55
4.3.2	Impulsions moins intenses, produisant un point blanc	59
4.3.3	Irradiation courte	63
CHAPITRE 5 ANALYSE DES COMPORTEMENTS DE LA PUISSANCE		
	RÉFLÉCHIE	65
5.1	Variations des propriétés optiques des matériaux	65

5.2	Variations des propriétés physiques des matériaux	66
5.3	Analyse des mesures de la puissance réfléchie lors d'une impulsion en dent-de-scie	68
5.4	Analyse des mesures de la puissance réfléchie pour une impulsion carrée	71
5.5	Montée de la puissance réfléchie après l'impulsion	72
5.5.1	Déformation due au changement de densité	73
5.5.2	Déformation due aux effets Marangoni	77
5.6	Puissance réfléchie post-irradiation	79
CHAPITRE 6 APPLICATION DE LA MESURE DE LA PUISSANCE RÉFLÉCHIE COMME MÉTHODE DE CONTRÔLE <i>IN-SITU</i>		
6.1	Variation des caractéristiques de fabrication des dés	81
6.2	Moyens d'appliquer les mesures <i>in-situ</i> optiques comme méthode de contrôle	85
6.2.1	Approches d'utilisation	85
6.2.2	Données à analyser	86
6.3	Contrôle de la fabrication de résistances	88
6.3.1	Test de fabrication de résistance	88
6.3.2	Analyse des mesures de la puissance réfléchie	89
6.3.2.1	Analyse du temps associé au maximum de puissance réfléchie	89
6.3.2.2	Analyse du temps de passage de la première zone à la deuxième zone	91
6.3.2.3	Analyse de la puissance réfléchie maximale	92
6.3.3	Exemple d'application du contrôle <i>in-situ</i> optique	93
6.4	Contrôle de la valeur de la résistance créée	96
6.5	Adaptation du contrôle <i>in-situ</i> optique à un montage industriel . . .	98
6.5.1	Temps de traitement et délais	98
6.5.2	Optimisation des coûts	100
6.6	Autres utilisations de la mesure <i>in-situ</i> optique	101
CHAPITRE 7 CONCLUSION		104
BIBLIOGRAPHIE		107

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1.1	Schéma d'un dispositif d'une résistance diffusée n-p-n sous modification par laser.	7
FIGURE 1.2	Diminution de la résistance d'une jonction $p^+ - n - p^+$ en fonction du nombre d'impulsions laser identiques	8
FIGURE 1.3	Serpentin servant à ajuster la résistance d'un circuit intégré .	9
FIGURE 1.4	Coefficient de réflexion du silicium à différentes températures .	11
FIGURE 1.5	Évolution de la température pour trois points situés à la surface de la région fondue	13
FIGURE 1.6	Exemple d'axe de la cuvette de silicium liquide	13
FIGURE 1.7	Intensité du faisceau sonde réfléchi en fonction de son rayon au point focal (w_0) par rapport au rayon maximum de la zone fondue r_{max}	14
FIGURE 1.8	Intensité simulée du faisceau sonde réfléchi lors d'une irradiation en dent-de-scie de 400 ns causant un rayon fondu maximal de $1,4 \mu m$	15
FIGURE 2.1	Schéma du montage de fabrication de résistances diffusées par laser et de mesures <i>in-situ</i> optique.	17
FIGURE 2.2	Étude de stabilité en puissance d'impulsions en dent-de-scie de 1.5 W crête.	19
FIGURE 2.3	Profil de puissance obtenu par la méthode du couteau.	22
FIGURE 2.4	Rayons $1/e^2$ mesurés à partir de la méthode du couteau pour le laser HeNe et le laser Nd :Yag focalisés.	22
FIGURE 3.1	Mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions de 100 ns sur du silicium recouvert d'oxyde natif	25
FIGURE 3.2	Mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions en dent-de-scie de 400 ns sur du silicium avec oxyde natif	27

FIGURE 3.3	Mesures de la puissance réfléchie sur des CI de différentes technologies 350 nm et 240 nm	29
FIGURE 3.4	Mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions de 100 ns sur des CI de technologie 180 nm	31
FIGURE 3.5	Mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions en dent-de-scie sur des CI de technologie 180 nm	31
FIGURE 3.6	Déformations visibles lors d'irradiations sur des CI de technologie 180 nm	33
FIGURE 3.7	Comparaison des mesures <i>in-situ</i> de la puissance réfléchie effectuée sur le silicium nu et sur un circuit de technologie 180 nm	36
FIGURE 4.1	Exemple de l'utilisation de la profondeur de champ d'un microscope optique	39
FIGURE 4.2	Spectre rayon X de la couche de PSG d'un échantillon de la technologie 180 nm	41
FIGURE 4.3	Spectre PEELS typique.	42
FIGURE 4.4	Vue agrandie du pic de perte d'énergie de l'oxygène.	42
FIGURE 4.5	Visualisation d'une coupe transversale fait au FIB.	43
FIGURE 4.6	Vue du dessus d'un échantillon amincie au FIB afin de servir comme échantillon MET.	44
FIGURE 4.7	Schéma des principaux masques utilisés lors de la fabrication d'une résistance diffusée standard en technologie TSMC 180 nm	45
FIGURE 4.8	Vue générale des diélectriques présents au-dessus d'une résistance diffusée non-irradiée.	46
FIGURE 4.9	Vue agrandie des diélectriques pré-métalliques au dessus d'une résistance diffusée non-irradiée.	47
FIGURE 4.10	Image à résolution atomique du silicium et cliché de diffraction	48
FIGURE 4.11	Vue d'un via et de la première couche de métal au dessus du silicium.	49

FIGURE 4.12	Analyse des rayons X émis (EDS) au niveau des diélectriques pré-métalliques.	49
FIGURE 4.13	Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) des diélectriques pré-métalliques de la technologie 180 nm.	50
FIGURE 4.14	Mesure <i>in-situ</i> de la puissance réfléchie et image optique d'une impulsion en dent-de-scie de puissance crête de 1,5 W et de 400 ns	54
FIGURE 4.15	Images MET de la déformation créée par une pulsion en dent-de-scie de puissance crête de 1,5 W et de 400 ns.	55
FIGURE 4.16	Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) du silicium pour un échantillon fortement déformé.	56
FIGURE 4.17	Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) du silicium au centre de la cible pour un échantillon irradié et non irradié.	57
FIGURE 4.18	Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) du phosphore sur un échantillon fortement déformé.	58
FIGURE 4.19	Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) de l'oxygène à travers la déformation de silicium	59
FIGURE 4.20	Mesures de la puissance réfléchie et images optiques d'échantillons où l'irradiation a créé un point blanc et tout juste un point noir	60
FIGURE 4.21	Images MET de l'échantillon ayant tout juste créé un point noir	60
FIGURE 4.22	Images MET de l'échantillon ayant créé un point blanc	61
FIGURE 4.23	Diagramme de phase des alliages Si - O en fonction de la température	62
FIGURE 4.24	Mesure <i>in-situ</i> de la puissance réfléchie et profil temporelle d'une impulsion lors d'une irradiation de 20 ns et de puissance crête de 2,5 W	63

FIGURE 4.25	Image MET d'un échantillon irradié par 20 impulsions de 20 ns de puissance crête de 2,5 W.	64
FIGURE 5.1	Séparation d'une mesure de la puissance réfléchie (technologie 250 nm) en zones de comportements typiques.	69
FIGURE 5.2	Mesures de la puissance réfléchie prises pour des impulsions successives identiques	70
FIGURE 5.3	Algorithme de simulation de la déformation causée par le changement de densité du silicium.	75
FIGURE 5.4	Simulation des déformations dues au changement de densité d'une cuvette de silicium de 1,4 μm de rayon initiale et de 200 nm de profondeur initiale	76
FIGURE 5.5	Simulation de la puissance réfléchie lors de la variation de la déformation de surface due au changement de densité pour différents diamètres de faisceau sonde	77
FIGURE 5.6	Explication de la montée de la puissance réfléchie après l'impulsion	78
FIGURE 6.1	Comportements de deux circuits identiques fabriqués en technologie <i>TSMC 180 nm</i> lors d'une irradiation en dent-de-scie de 400 ns de 2,3 W crête.	82
FIGURE 6.2	Irradiation en dent-de-scie (puissance de 1 W et durée de 400 ns) à différents endroits d'une gaufre fabriquée en technologie <i>TSMC 250 nm</i>	83
FIGURE 6.3	Variation de la puissance réfléchie absolue à différentes positions sur une résistance en U à deux positions d'une gaufre de technologie <i>TSMC 180 nm</i>	84
FIGURE 6.4	Schématisation des données utilisées pour paramétrer les mesures de la puissance réfléchie.	87

FIGURE 6.5	Distribution de la différence de temps entre l'atteinte du maximum de la puissance réfléchie et la fin d'une impulsion pour les échantillons formant une résistance et ceux n'en formant pas	90
FIGURE 6.6	Distribution du temps de la transition de la première zone à la deuxième zone t_{1-2} pour les échantillons formant une résistance et ceux n'en formant pas	91
FIGURE 6.7	Distribution de la puissance réfléchie maximale pour les échantillons formant une résistance et ceux n'en formant pas	93
FIGURE 6.8	Algorithme utilisé pour le contrôle de la fabrication de résistances diffusées par laser.	94
FIGURE 6.9	Variation de la puissance déduite par l'algorithme de contrôle basé sur le temps de transition de la zone 1 à la zone 2 de la mesure de puissance réfléchie pour un circuit de comportement typique et un de comportement atypique.	95
FIGURE 6.10	Prédiction de la résistance formée d'après les caractéristiques des mesures de la puissance réfléchie	97

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1	Caractéristiques de l'objectif M Plan Apo 50X	21
TABLEAU 3.1	Comportement des circuits de technologie 180 nm lors d'irradiations en dent-de-scie.	34
TABLEAU 3.2	Résultats de mesures de la puissance réfléchie absolue avant ou après l'irradiation.	34
TABLEAU 3.3	Résumé des différences de mesure de la puissance réfléchie entre le silicium recouvert d'un oxyde natif et un CI de technologie 180 nm.	37
TABLEAU 5.1	Densité du silicium selon la phase	73
TABLEAU 6.1	Mesure de la puissance réfléchie absolue à différentes positions sur un quart de gaufre fabriqué dans la technologie <i>TSMC 180 nm</i>	84
TABLEAU 6.2	Taux de succès de création de résistances à l'aide de la méthode standard et par la méthode de contrôle <i>in-situ</i> optique.	95
TABLEAU 6.3	Écart face aux différentes prédictions de valeurs résistances.	98

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A - D	Analogique - Digital
AC	Courant Alternatif
ARC	<i>Anti Reflective Oxide</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
D	Coefficient de diffusion
D - A	Digital - Analogique
DC	Courant continu
EDS	<i>Energy Dispersion Spectroscopy</i>
EELS	<i>Electron Energy Loss Spectroscopy</i>
f	Fréquence
FIB	<i>Focused Ions Beam</i>
HeNe	Hélium-Néon
KTP	<i>Potassium Titanyl Phosphate</i>
MET	Microscope Électronique à Transmission
Nd :Yag	<i>Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet</i>
PECVD	<i>Plasma-Enhanced CVD</i>
PEELS	<i>Parallel Electron Energy Loss Spectroscopy</i>
PSG	<i>Phosphosilicate Glass</i>
RPO	<i>Resist Protective Oxide</i>
SRSO	<i>Silicon-Rich Silicon Oxide</i>
STEM	<i>Scanning Transmission Electron Microscope</i>
STI	<i>Shallow Trench Isolation</i>
T	Température

INTRODUCTION

Les dernières années ont été celles de la démocratisation de l'électronique au sein des pays industrialisés permettant ainsi d'avoir chez soi une télévision, une radio et pour plusieurs personnes des ordinateurs qui deviennent de plus en plus accessibles. En 2004, près de 90% des canadiens avaient accès à un ordinateur et plus de 70% à l'Internet. Face à ce développement fulgurant, l'industrie doit s'adapter, pousser sa recherche dans la microélectronique et créer des circuits plus performants et moins énergivores.

L'une des principales causes de l'avancement de la microélectronique est la plus grande maîtrise des technologies de microfabrication. Grâce à ces nouvelles méthodes de fabrication, des circuits plus denses peuvent être fabriqués permettant une plus grande rapidité et surtout, un plus faible coût de fabrication. Cependant, à chaque nouvelle génération de technologie de circuits intégrés (CI), les coûts initiaux associés à la fabrication d'une usine augmentent et atteignent aujourd'hui plusieurs milliards de dollars. De tels investissements sont justifiés seulement pour des circuits d'utilisation à grande échelle tels que les processeurs et les puces de traitement vidéo. Les besoins en microfabrication de ces circuits imposent alors leurs standards que les autres types de circuits, fabriqués en moins grande quantité, devront suivre.

L'une des conséquences de ces standards est l'acceptation d'une incertitude élevée sur les caractéristiques des résistances pouvant être fabriquées sur un circuit intégré. Les circuits analogiques de qualité requièrent de hautes précisions de résistances, souvent bien inférieures à 1%. Pour fabriquer ces circuits à faible coût, il y a nécessité de développer des techniques d'ajustement des résistances produites par les grandes usines de fabrication. Au cours des dernières années, une méthode de création par laser de résistances précises a été développée et brevetée (Meunier et al. 2002) sur des circuits de fabrication CMOS standard. Cette technique consiste à irradier localement une jonction p-n-p ou n-p-n afin qu'elle fonde permettant ainsi aux dopants de diffuser

vers la région centrale et de créer un lien résistif entre les deux autres régions. Cette méthode a déjà été implémentée dans la fabrication de circuits analogiques et est commercialisée sous le nom de FasTrimTM par la compagnie *LTRIM technologies*.

L'objectif de ce mémoire est de développer une méthode permettant d'améliorer la technique de fabrication de résistances diffusées par laser afin qu'elle soit plus rapide, emploie une plus petite surface sur le circuit intégré tout en gardant une précision de résistance égale ou supérieure. L'approche étudiée est celle des mesures *in-situ* optiques de la puissance réfléchie lors de l'intervention laser. À la différence des mesures électriques qui doivent être prises après que le dispositif soit refroidi, cette technique optique permet d'obtenir en temps réel de l'information sur le comportement de la région de silicium fondu lors de l'irradiation. Les bases de cette méthode ont déjà été développées sur le silicium nu (Magny 2005) mais la technique n'a jamais été appliquée sur des circuits intégrés. Dans ce mémoire, les divers comportements des mesures *in-situ* de la puissance réfléchie observés sur des CI sont expliqués en comparaison avec ceux observés sur le silicium nu ainsi que par la caractérisation physique des régions irradiées. L'applicabilité de la technique dans un procédé de contrôle de la méthode de création de résistances diffusées par laser y est également analysée.

Le mémoire se compose comme suit :

- Le premier chapitre présente la méthode de fabrication de résistances diffusées par laser et la compare aux autres techniques d'ajustement de résistances sur des CI. Les bases de l'approche de mesure *in-situ* de la puissance réfléchie y sont expliquées en résumant les travaux précédemment accomplis sur le sujet.
- Le second chapitre décrit le montage expérimental utilisé pour la fabrication de résistances diffusées ainsi que pour les mesures *in-situ* optiques .
- Le troisième chapitre présente les résultats de mesures de la puissance réfléchie sur le silicium et sur différents types de circuits intégrés.

- La caractérisation physique de la technologie *TSMC 180 nm* est présentée dans le chapitre 4 afin de déterminer les facteurs influençant les mesures de la puissance réfléchie.
- Dans le cinquième chapitre, les résultats obtenus sont analysés en apportant une explication des comportements des mesures de la puissance réfléchie.
- Le sixième chapitre discute de l'applicabilité de la méthode *in-situ* optique comme moyen de contrôle de la fabrication de résistances diffusées par laser.
- La conclusion dresse un bilan du travail accompli et propose des perspectives pour une investigation future.

CHAPITRE 1

AJUSTEMENT DE RÉSISTANCES PAR LASER ET MÉTHODE DE CONTRÔLE

1.1 Nécessité de fabriquer des résistances dans un circuit intégré

L'électronique est aujourd'hui largement dominée par les circuits numériques que l'on rencontre par exemple dans les processeurs modernes de nos micro-ordinateurs. L'information y est traitée de façon binaire à travers différentes formes de portes logiques reliées les unes aux autres. Cette information étant contenue par une absence de tension (« 0 » logique) ou par la présence d'une tension (« 1 » logique), les erreurs de traitement des données sont peu probables permettant ainsi l'obtention de circuits très rapides qui consomment peu d'énergie.

Le marché de l'électronique requière de plus en plus que les circuits communiquent avec le monde extérieur, en gérant par exemple des images ou des sons et permettant de nous protéger des accidents de voitures en analysant par exemple l'accélération et le freinage. Toutes ces données à analyser ne sont pas intrinsèquement binaires et il faut donc un autre type de circuit pour les traiter, soit les circuits analogiques. Dans un tel circuit, l'information est contenue par une valeur de tension et il va sans dire que la précision du circuit électronique est alors primordiale car une variation non contrôlée de la tension serait alors associée à une corruption de donnée. Ces circuits sont majoritairement caractérisés par la présence de résistances en plus des traditionnels transistors. Or, les méthodes de fabrications classiques d'une résistance en technologie CMOS ont une incertitude entre 5% et 25% sur sa valeur nominale, ce qui est beaucoup trop élevée pour la plupart des circuits analogiques. Plusieurs

recherches ont été réalisées afin de convertir des circuits fabriqués avec les méthodes standards en des circuits analogiques possédant des caractéristiques très précises.

1.2 Méthode de fabrication de résistances diffusées par laser

Il existe différentes façons d'ajuster la valeur d'une résistance sur un circuit intégré. La plupart des méthodes reposent sur le principe d'élimination d'une partie de matériel résistif d'un lien afin d'en augmenter la résistance. Il est possible par exemple de faire une ablation partielle d'un lien métallique avec un laser focalisé, augmentant aussi sa résistance. Ceci est une méthode assez rapide et précise mais qui comporte (en plus de l'étape d'ajustement par laser) des étapes de fabrication supplémentaires telle que le dépôt de la couche mince métallique. D'autres méthodes d'ajustement de résistances ont été développées. Citons la fabrication de lien dans du polysilicium (Parker et Weiling 1990), la fabrication de résistances en polymères (Narayana et al. 1992), les méthodes de tensions pulsées (Tobita et Takasago 1991), l'utilisation de grilles flottantes (Sackinger et Guggenbuhl 1975) ainsi que le court-circuitage de diodes (Erdi 1975). Pour plus de détails sur les différentes méthodes, voir le travail de Lacourse (2001).

Une autre méthode d'ajustement de résistances a été développée récemment par le Laboratoire de Procédé Laser de l'École Polytechnique de Montréal. Celle-ci est basée sur le principe publié par Canter et al. (1986) selon lequel il est possible de créer un lien ohmique de faible résistance en redistribuant le profil de dopant de deux diodes en série et opposées à l'aide d'un faisceau laser. Il a été démontré qu'en appliquant successivement des modifications au profil de dopant, il était possible de contrôler très précisément la valeur du lien résistif (Meunier et al. 2002). Cette méthode est connue sous le nom d'ajustement de résistances diffusées par laser.

Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire de fabriquer sur le circuit intégré un dispositif consistant essentiellement en un transistor à effet de champs MOS sans grille. Cela forme trois régions de silicium fortement dopées équivalentes à deux jonctions P-N face-à-face (voir figure 1.1). Avant l'intervention laser, seul un courant de fuite peut passer à travers une telle jonction, ce qui engendre des résistances supérieures à 1 M Ω . Lorsque le dispositif est chauffé à l'aide du faisceau laser focalisé, une région du silicium fond. Le coefficient de diffusion des dopants dans le silicium liquide est beaucoup plus grand que celui dans le silicium solide. Par exemple, pour le bore, le coefficient de diffusion dans le silicium solide est $D_{solide} = 1.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ alors que dans la phase liquide il est $D_{liquide} = 2.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (Hiroshi 1963). Il est facile de montrer que :

$$\frac{v_{liquide}}{v_{solide}} = \sqrt{\frac{D_{liquide}}{D_{solide}}} \quad (1.1)$$

où v est la vitesse des dopants dans le milieu. Dans le cas du bore, les dopants voyageant 1550 fois plus rapidement dans la région liquide que solide, il y a rapidement uniformisation du profil de dopant à l'intérieur de la région fondue après un certain temps de fonte. La région centrale étant moins dopée que les deux autres régions, un canal majoritairement dopé par le type du drain et de la source est formé et constitue le lien résistif. Expérimentalement, pour que le lien ait une résistance inférieure à 1 k Ω et un bon comportement ohmique, il faut que la zone fondue soit maintenue une centaine de nanosecondes.

L'avantage principal de la méthode est qu'elle ne nécessite aucune étape de fabrication supplémentaire par la fonderie. Le dispositif est formé à partir des mêmes masques qu'un transistor standard, sauf en ce qui concerne la grille qui est enlevée. Cela permet de créer des résistances précises avec la plupart des technologies de microfabrication disponibles pour les circuits numériques standards. L'utilisation de cette approche réduit considérablement les coûts de fabrication analogique et permet d'accéder aux technologies de pointe associées aux circuits numériques. De plus, la technique de résistance diffusée ne requière pas d'ablation et ne provoque pas la dis-

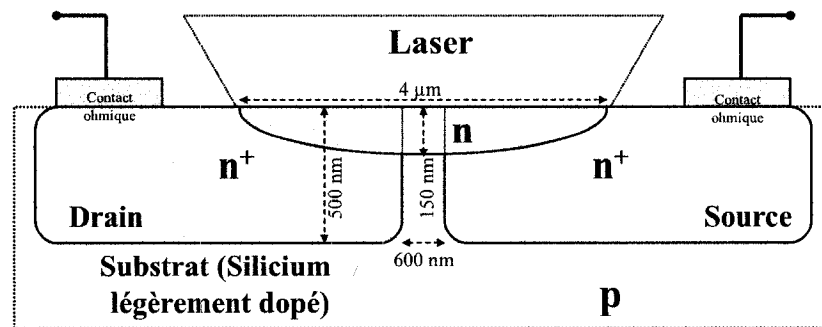


FIGURE 1.1 – Schéma d'un dispositif d'une résistance diffusée n-p-n sous modification par laser.

persion de dépôts métalliques sur le circuit qui pourraient nuire à la fiabilité de ce dernier. Un autre avantage est la possibilité de pouvoir irradier le dispositif soit au niveau de la gaufre de silicium pour une production de masse ou directement sur le dispositif encapsulé déjà prêt à l'utilisation. Cependant, comme pour plusieurs des techniques d'ajustement de résistance, cette méthode nécessite un appareillage dédié et coûteux.

1.3 Méthodes de contrôle

Même si la méthode de résistance diffusée permet de former un lien résistif dans un circuit intégré de technologie standard, elle requière des méthodes de contrôle permettant d'optimiser la création de résistances précises. C'est grâce à ces méthodes de contrôle que les résistances diffusées ajustées par laser prennent toute leur utilité. Deux approches ont été élaborées : le contrôle par mesures successives de la résistance et le contrôle spatial.

1.3.1 Contrôle par mesures successives de la résistance

Afin d'améliorer la précision du lien résistif, une technique brevetée par Gagnon et al. (2000) consistant à prendre des mesures successives de la résistance entre les

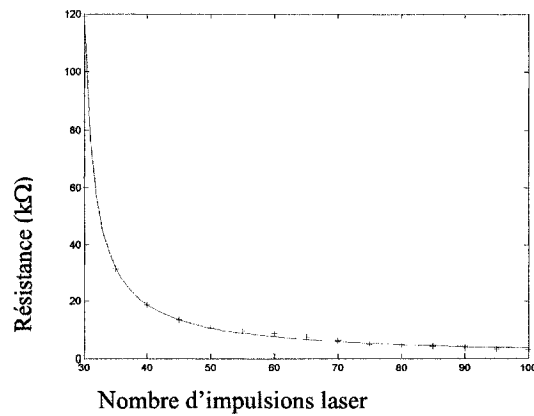


FIGURE 1.2 – Diminution de la résistance d’une jonction p^+-n-p^+ en fonction du nombre d’impulsions laser identiques de 70 ns envoyées sur celle-ci par un laser de 4,04 W ayant un rayon focal de 2 μm . (Magny 2005)

interventions laser a été proposée. Durant chaque envoi d’impulsions, plus de dopants se redistribuent dans la région fondue, formant ainsi un lien de moindre résistance. Tel que montré à la figure 1.2, cette valeur tend à se stabiliser après quelques dizaines d’interventions laser ce qui donne alors un pas d’ajustement très fin entre chaque impulsion envoyée.

Bien que très précise et utilisant un espace restreint, cette méthode est peu utilisée considérant le temps nécessaire pour chaque ajustement. Entre une intervention laser et une mesure électrique, il faut attendre que la résistance se refroidisse et se stabilise, ce qui peut prendre plusieurs dixièmes de seconde. De plus, pour les résistances plus élevées (supérieures à 1 $\text{k}\Omega$), la résistance mesurée varie de façon non négligeable dans les minutes, voire les heures suivant l’ajustement. Il devient difficile d’ajuster de façon précise et rapide un circuit sensible.

1.3.2 Contrôle spatial

Cette seconde méthode est basée sur l’intégration de la résistance diffusée dans un système plus global et d’utiliser sa position comme élément de précision. Cela peut se

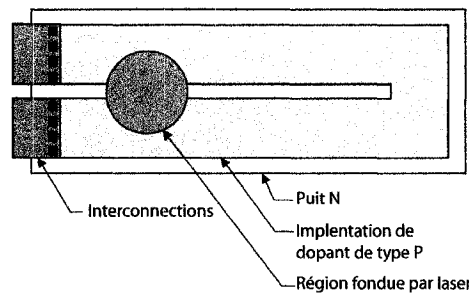


FIGURE 1.3 – Serpentin servant à ajuster la résistance d’un circuit intégré. La surface de silicium requise est d’environ $0,0032 \text{ mm}^2$

faire à l’aide d’un serpentin (voir Figure 1.3) formé d’une longue région résistive en forme de « U » (Rioux et al. 2005). Dans le cas qui nous intéresse, la région est formée du silicium fortement dopé qui forme normalement le drain et la source du transistor. En regardant une coupe transversale au niveau de l’intervention laser, on retrouve le même genre de dispositif tel que décrit précédemment (figure 1.1). Il est donc possible de créer un lien résistif qui, s’il est de valeur assez basse, va court-circuiter une partie du serpentin. On retrouve alors un système de trois résistances en série dont celle du centre (la résistance diffusée) sera faible et négligeable face aux deux autres. La valeur totale de la résistance est ajustée en variant l’emplacement du court-circuit, un lien créé plus près des interconnexions donnant une plus faible résistance.

Cette méthode permet d’avoir une précision de l’ordre de 0,5% et le serpentin peut être inséré dans un système de résistances plus grandes afin de diluer encore plus l’incertitude du lien diffusé. Cependant, la surface de silicium nécessaire au serpentin est relativement grande. En effet, pour que le lien diffusé soit vraiment négligeable et pour obtenir un fin ajustement spatial, les dimensions du serpentin doivent être plusieurs centaines de microns carrés. Le coût au mm^2 augmentant à chaque nouvelle technologie, la méthode du serpentin devient rapidement très dispendieuse.

1.4 Méthode in-situ optique

Le but de la présente recherche est de développer une nouvelle méthode de contrôle qui aurait l'avantage d'être rapide et d'utiliser une surface restreinte. De récents travaux ont été réalisés afin d'obtenir en temps réel les dimensions de la zone fondue du silicium et son temps de vie, paramètres essentiels à l'évaluation de la diffusion des dopants.

Une méthode efficace documentée est celle de la mesure *in-situ* optique, qui est basée sur le changement brusque d'indice de réfraction et de la réflectivité du silicium fondu. Tel que montré à la figure 1.4, une hausse de réflectivité de plus de 40% est observée lors du passage de la phase solide vers la phase liquide. La puissance d'un laser « sonde » réfléchi par la région irradiée augmentera de façon plus ou moins proportionnelle à la surface fondue. Cette mesure *in-situ* s'effectue en parallèle avec l'ajustement laser. Cette méthode est donc presque instantanée et facilement implémentable dans une technique de contrôle de la création de résistances diffusées. On anticipe qu'en la combinant à une (ou deux) des méthodes de contrôles présentées précédemment, la technique de formation de résistances diffusées par laser sera plus rapide et les dispositifs relativement plus compacts.

Plusieurs expériences ont déjà été réalisées à l'aide de la méthode *in-situ* optique. Il y a plus de 40 ans, la hausse subite de réflectivité a été utilisée afin d'obtenir des impulsions laser (Sooy et al. 1964). Par la suite, le phénomène a principalement été utilisé afin d'extraire des propriétés du silicium lors d'un chauffage rapide (D.Hoyland et Sands 2006) ou pour valider des modèles théoriques de fonte et de réflectivité (Lowndes et Jellison 1984), (Degorce et al. 2005). Dans le cadre de son travail de maîtrise, Magny (2005) a réalisé et optimisé un montage afin d'analyser la dynamique de fonte du silicium sous laser focalisé. Ces résultats, couplés à un modèle théorique, ont permis d'isoler un changement de régime lors de la fonte qui a été proposé comme agent de contrôle dans le procédé de fabrication de résistances diffusées. Cependant, ces résultats ont été obtenus à partir de morceaux de silicium recouverts d'oxyde natif,

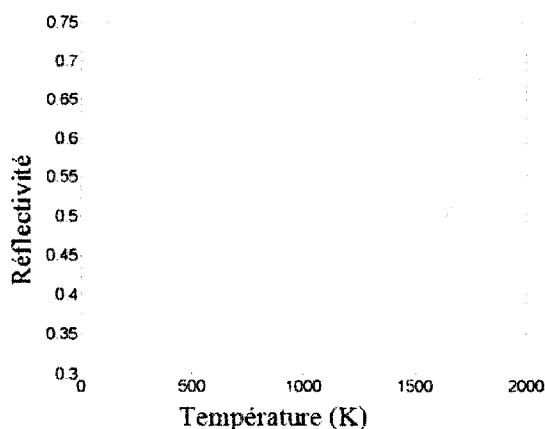


FIGURE 1.4 – Coefficient de réflexion du silicium à différentes températures (Magny 2005).

et comme nous le verrons dans ce mémoire, la présence des divers diélectriques des CI réels affecte sensiblement les mesures de la puissance réfléchie. Il est tout de même intéressant d’approfondir les phénomènes mis en jeux lors de la fonte du silicium.

1.4.1 Simulation de la fonte

Plusieurs modèles unidimensionnels ont été développés afin de décrire le processus de fonte par laser d’un semi-conducteur. Ce type de modèle est acceptable dans le cas où la surface irradiée est très grande par rapport à la longueur de diffusion thermique. L’approximation unidimensionnelle est justifiée entre autre pour simuler un recuit au laser CO₂. Dans le cas d’un laser focalisé, on peut généralement utiliser un modèle 2D en réduisant le problème à une géométrie cylindrique. Certaines approximations permettent d’obtenir un modèle analytique (Degorce et al. 2003) mais il ne permet pas d’avoir une description complète et temporelle de la région fondue. Il est donc nécessaire de développer un modèle numérique utilisant par exemple la méthode de calcul par éléments finis. Le modèle utilisé dans le cadre de cette recherche a été développé par Degorce et al. (2005).

Le calcul de la température à l'intérieur d'un matériau peut être obtenu avec l'équation classique de la chaleur :

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\kappa(T)\nabla T) + Q(T) + L(T) \quad (1.2)$$

où L est la chaleur latente de fonte du matériau, ρ la densité massique, c la chaleur massique et κ la conductibilité thermique. Le terme source $Q(T)$ représente la chaleur du laser absorbée à l'intérieur du matériau. Il est relié au coefficient de réflexion de la surface, à l'absorptivité du milieu et à l'intensité laser calculée à l'aide de la loi de Beer-Lambert. Il est à noter que ces propriétés sont toutes dépendantes de la température ce qui rend le problème hautement non linéaire. Aussi, lors de la fonte, il faut tenir compte de l'enthalpie associée au changement de phase :

$$\Delta H(T) = \int_{T_\infty}^T \rho(T)c(T)dT + U(T - T_{int})L(T_{int}) \quad (1.3)$$

où T_∞ est la température loin dans le matériau, T_{int} est la température de l'interface et $U(T - T_{int})$ est la fonction Heaviside. Cela nous permet de déduire par la suite la libération d'énergie à l'aide de l'équation d'enthalpie classique :

$$\frac{\partial \Delta H(T)}{\partial t} = \nabla (\kappa(T)\nabla T) + Q(T) \quad (1.4)$$

Le modèle requière quelques approximations introduites par Degorce et al. (2005) afin de faciliter les calculs numériques mais revient principalement à simuler les équations 1.2 et 1.4. Un calcul par éléments finis nécessite la détermination du domaine où s'appliquent les équations ainsi que des frontières bien définies.

La figure 1.5 montre un résultat de simulation de température pour certains points à la surface de la jonction Si-SiO₂. La température associée au point $r = 0$ (le point au centre du faisceau laser) augmente rapidement puis atteint un plateau associé au changement de phase. Lors de l'atteinte de la phase liquide ($T > 1683^\circ\text{C}$) la température

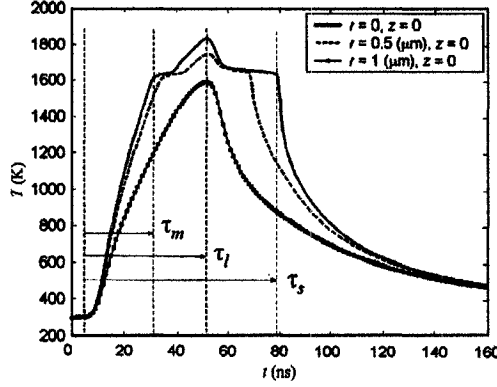


FIGURE 1.5 – Évolution de la température pour trois points situés à la surface de la région fondue, mais à des rayons différents. L'impulsion laser a une intensité de $I_0 = 1,35 \text{ W/cm}^2$, son rayon à 1/e est de $r_0 = 0,85 \mu\text{m}$ et sa durée est de 40 ns (Degorce et al. 2005).

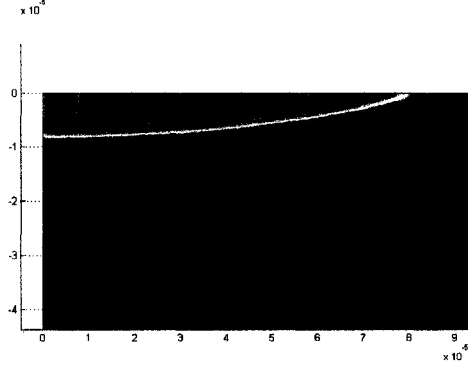


FIGURE 1.6 – Exemple d'axe de la cuvette de silicium liquide. La région en rouge représente le silicium où $T > T_{\text{fusion}}$ alors que dans la région bleu $T < T_{\text{fusion}}$.

continue à augmenter. À l'aide de ces résultats on déduit le comportement temporel d'une région fondue tel que $T > T_{\text{fusion}}$ (figure 1.6)

1.4.2 Simulation de la puissance réfléchie

Avec les données de fonte, il est possible d'associer une réflectivité à chaque point de surface. En appliquant les données de la figure 1.4 à chaque pas de temps, on obtient une simulation de la puissance réfléchie en temps réel. Il est important de convoluer la réflectivité locale avec l'intensité du laser sonde qui est celui servant à mesurer la puissance réfléchie. Le faisceau étant généralement gaussien, une variation de réflectivité au centre influencera davantage la puissance réfléchie totale qu'une variation située aux extrémités de celui-ci. De même, si la zone fondue devient plus grande que le faisceau sonde, il y aura un effet de saturation et la puissance totale réfléchie ne sera plus liée à la région fondue.

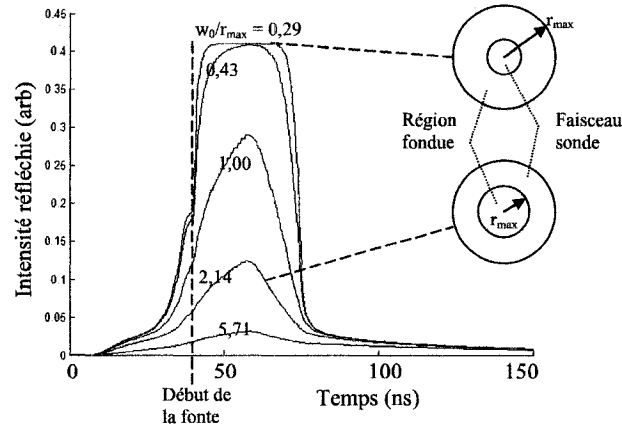


FIGURE 1.7 – Intensité du faisceau sonde réfléchi en fonction de son rayon au point focal (w_0) par rapport au rayon maximum de la zone fondue r_{max} . Le silicium est fondu sur un rayon maximal de $0,35 \mu\text{m}$ par une impulsion de 50 ns ayant une fluence de $0,85 \text{ J/cm}^2$ (Magny 2005).

La figure 1.7 présente différentes simulations de mesures de la puissance réfléchie où le rayon minimal du laser sonde varie pour une même irradiation de profil temporel carré, et donc pour un même comportement de fonte du silicium. La simulation présente bien le phénomène de saturation qui est caractérisé par l'atteinte d'un plateau de puissance réfléchie lorsque le ratio w_0/r_{max} est inférieur 1. À l'inverse, lorsque ce ratio est élevé (supérieur à 3), seule une variation très légère de la puissance réfléchie totale est mesurée. Un ratio w_0/r_{max} légèrement supérieur à 1 est préférable afin d'avoir une variation de puissance réfléchie facilement observable tout en évitant le phénomène de saturation.

Les résultats de simulation de la puissance réfléchie induite par une irradiation de forme carrée (figure 1.7) indiquent qu'une première augmentation de celle-ci est causée par une hausse de la température de silicium et non par son changement de phase. Une fois que la phase liquide apparaît, la puissance réfléchie augmente rapidement jusqu'à atteindre un maximum à la fin de l'impulsion de fonte. Après cela, il y a diminution de la puissance réfléchie jusqu'à atteindre le niveau initial.

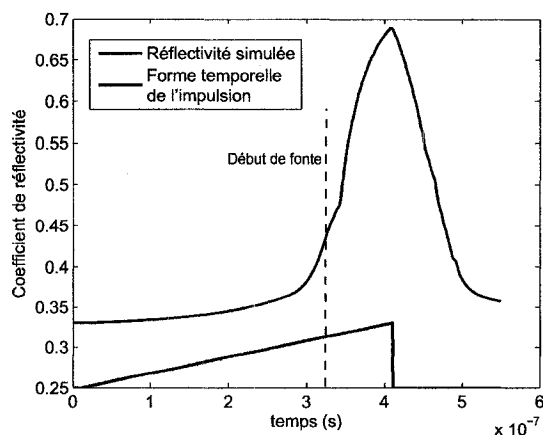


FIGURE 1.8 – Intensité simulée du faisceau sonde réfléchi lors d’une irradiation en dent-de-scie de 400 ns causant un rayon fondu maximal de $1,4 \mu\text{m}$.

La figure 1.8 présente la simulation de la puissance réfléchie lors de la fonte du silicium causée par une impulsion en dent-de-scie. On y observe sensiblement les mêmes étapes qu’à la figure 1.7 soit une première augmentation de puissance réfléchie due à la hausse de température du silicium, une augmentation plus rapide lors du changement de phase et une diminution après l’irradiation. Ce type de forme temporelle d’irradiation sera souvent utilisé dans ce travail.

CHAPITRE 2

MONTAGE EXPÉRIMENTAL DE FABRICATION DE RÉSISTANCES DIFFUSÉES ET DE MESURE *IN-SITU* OPTIQUE

Le schéma du montage expérimental utilisé est présenté à la figure 2.1. Le montage est séparé en deux parties : le système de fonte par laser et le système de mesures *in-situ* de la puissance réfléchie optique. Tous les éléments doivent être soigneusement alignés afin d'obtenir des résultats fiables et reproductibles. Les prochaines sections décrivent les pièces ainsi que les caractéristiques des faisceaux utilisés.

2.1 Montage de fonte par laser

2.1.1 Laser

Le laser (Millenium X) utilisé pour fabriquer les résistances diffusées est un Nd :YAG continue de la compagnie *Spectra Physics*. Son faisceau est doublé en fréquence par un cristal non linéaire KTP et possède une longueur d'onde de 532 nm. Cette longueur d'onde dans le visible (couleur verte) permet à la lumière de traverser la plupart des diélectriques (SiO_2 , Si_3N_4) recouvrant un circuit intégré sans absorption importante et d'atteindre directement le silicium. La puissance peut être stabilisée entre 200 mW et 10 W ce qui est amplement suffisant pour faire fondre les différents dispositifs. Le bruit haute fréquence sur la puissance est de l'ordre de 5%. Ceci est élevé, mais est la norme pour ce type de laser. Le faisceau est polarisé à la sortie de façon verticale.

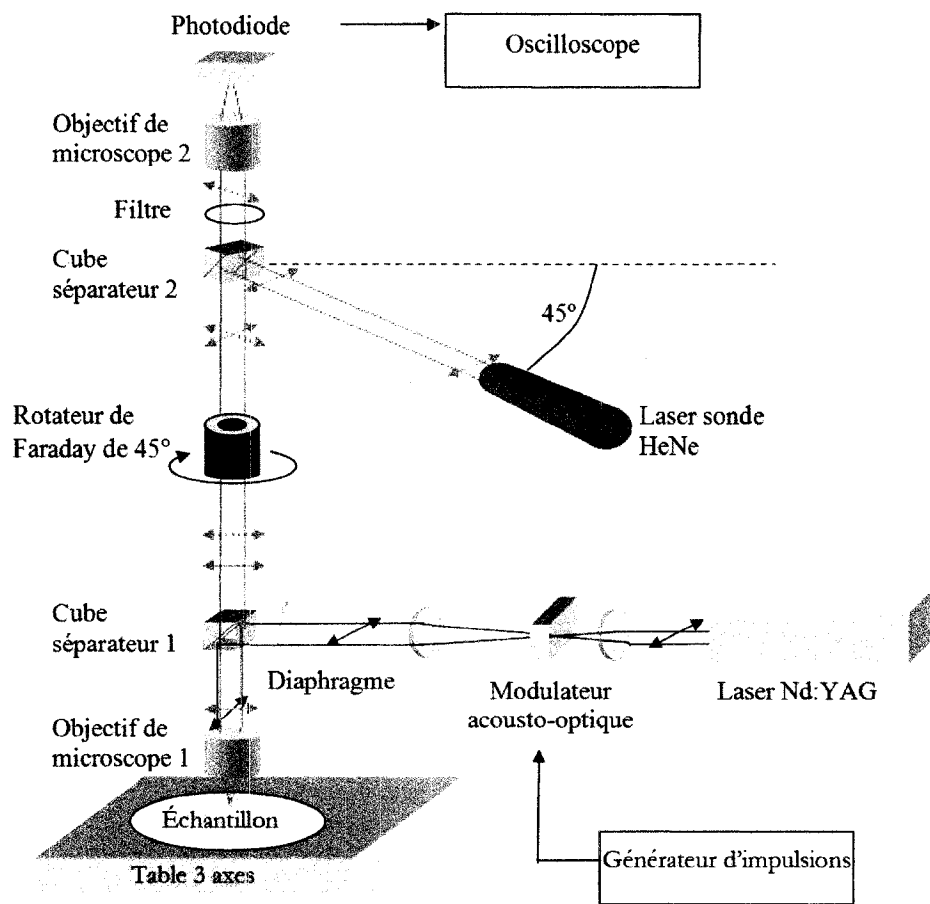


FIGURE 2.1 – Schéma du montage de fabrication de résistances diffusées par laser et de mesures *in-situ* optique.

2.1.2 Formation des impulsions

La méthode de fabrication de résistances requière un laser pulsé afin de bien contrôler la quantité de dopants diffusés. Un modulateur acousto-optique est utilisé pour modifier le faisceau laser continu en des impulsions requises par le procédé. L'effet acousto-optique est un effet optique où un milieu change d'indice de réfraction lorsqu'il est soumis à une onde mécanique. Plus l'onde est intense, plus grand sera le changement d'indice de réfraction dans le milieu. Lorsqu'une onde acoustique est générée dans un cristal possédant cette caractéristique, il se crée un réseau de Bragg de même pas que la longueur d'onde acoustique envoyée. En optimisant ce pas, on permet à la lumière de diffracter à des angles qui dépendront de la longueur d'onde et à des intensités qui varieront selon l'intensité acoustique. Pour pulser un faisceau continu, il faut bloquer le faisceau non diffracté (ordre 0) et utiliser le faisceau diffracté d'ordre 1 dont le contrôle de sa puissance se fera en variant l'intensité de l'onde acoustique incidente.

Le modulateur utilisé est fabriqué par la compagnie *Neos* et est optimisé pour le laser Nd :YAG doublé. Il fonctionne avec un générateur produisant une onde acoustique de fréquence $f = 210 \text{ MHz}$ fourni avec le système. Ce générateur permet de moduler l'amplitude via une entrée 0-1 V, 0 V étant associé à une amplitude nulle et 1 V étant associé à l'amplitude maximale. Entre ces deux valeurs, l'amplitude suit une relation non linéaire. Lorsque le système est bien aligné, il est possible de faire diffracter plus de 50 % du faisceau au premier ordre.

Le signal 0-1 V est produit par un générateur de pulse arbitraire formé d'une carte de prototypage Stratix (compagnie *Altera*) qui génère à travers deux convertisseurs numérique-analogique le signal de l'impulsion et celui de synchronisation. Les instructions sont transmises par un ordinateur connecté via un port série.

Le montage permet d'envoyer des impulsions de 15 ns et plus à un taux de répétition défini par l'utilisateur. De plus, il est possible de générer des impulsions optiques de forme totalement arbitraire en utilisant une fonction de transfert entre la

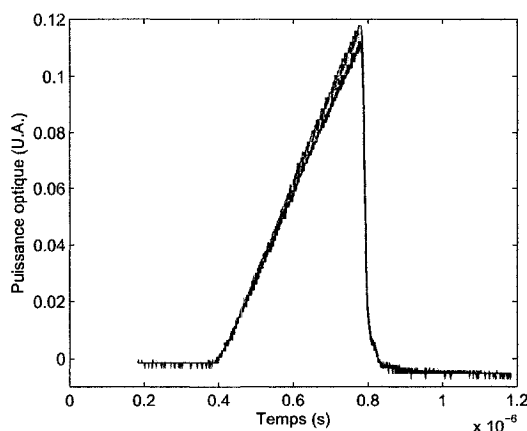


FIGURE 2.2 – Étude de stabilité en puissance d’impulsions en dent-de-scie de 1.5 W crête.

tension donnée au générateur haute fréquence et la puissance optique. La calibration de cette fonction doit être faite après chaque alignement du montage car la fonction de transfert change quelque peu selon l’alignement du faisceau sur le modulateur. Dans le cadre de ce travail, des impulsions carrées et en dent-de-scie (montée linéaire puis fin abrupte) seront principalement utilisés.

Des tests de stabilité sur la puissance optique obtenue ont été effectués en envoyant des impulsions en dent-de-scie pendant deux heures à intervalle de 10 minutes. Lorsque le laser était éteint entre chaque impulsion pour laisser refroidir le cristal, les résultats ont donné une variation d’intensité de 5% (figure 2.2). Des résultats semblables ont été obtenus avec le laser constamment ouvert, suggérant que le chauffage du modulateur par le laser ne cause pas d’instabilités supplémentaires. Cette variation de 5% étant inférieure à l’incertitude intrinsèque du laser, on peut considérer que le modulateur acousto-optique induit des variations négligeables de puissance d’une irradiation à l’autre.

2.2 Montage de mesure *in-situ* optique

2.2.1 Laser

Le laser utilisé afin de sonder la réflectivité de la zone irradiée est de type HeNe, opéré à la longueur d'onde de 633 nm qui n'est pas absorbée par les diélectriques standards. La méthode de mesure *in-situ* optique requière l'utilisation d'un deuxième laser de longueur d'onde différente de celui effectuant la fonte. Ceci permet de séparer les deux faisceaux de longueurs d'onde différentes et d'acquérir facilement une mesure de la réflectivité de la zone fondue sans qu'elle soit convoluée avec la forme de l'impulsion envoyée. La puissance moyenne du laser HeNe est de 2 mW mais est fortement instable à haute fréquence. Un fort bruit de l'ordre de la centaine de MHz est présent dû au battement d'interférence entre deux modes dans la cavité du laser. Ce bruit peut être négligé en appliquant un filtre passe-bas au signal de puissance réfléchi optique. Le laser est polarisé linéairement à sa sortie et sa puissance est assez faible pour ne pas influencer la fonte du silicium.

2.2.2 Appareils de mesure de la puissance réfléchi

Afin de capter le maximum de puissance réfléchi et éviter que le faisceau revienne dans le laser HeNe, le montage de mesure *in-situ* contient un isolateur optique constitué d'un rotateur de Faraday qui permet la rotation de la polarisation d'un faisceau laser dans un même sens, peu importe la direction de propagation du faisceau. Contrairement à une lame demi-onde, un faisceau polarisé linéairement passant une première fois dans l'appareil et puis une deuxième fois après avoir été réfléchi verra sa polarisation changer et peut donc être dévié par un cube polariseur vers un photo-détecteur.

Le photo-détecteur de marque *NewFocus* permet une acquisition à 1 GHz . Il est formé d'une jonction PIN au silicium lui permettant d'opérer dans le visible. Il est important de remarquer que ce photo-détecteur est couplé en mode alternatif

TABLEAU 2.1 – Caractéristiques de l’objectif M Plan Apo 50X

Caractéristique	Valeur
Grossissement	50X
Ouverture numérique	0,55
Distance de travail (mm)	13,0
Longueur focale (mm)	4
Résolution à 532 nm (μm)	0,48
Résolution à 632 nm (μm)	0,57
Profondeur de champs à 532 nm (μm)	0,88
Profondeur de champs à 632 nm (μm)	1,04

et ne permet pas de mesurer une puissance continue. Les mesures obtenues sont les variations de la puissances réfléchie par rapport à une moyenne et peuvent être positives ou négatives. Une sortie couplée en mode continue est présente, mais son taux de rafraîchissement est trop faible pour mesurer des variations inférieures à la microseconde. Elle est utilisée principalement lors de l’alignement du système.

2.3 Système de focalisation

Les deux faisceaux servant à la fonte et à la mesure de la puissance réfléchie sont superposés à l’aide de miroirs et dirigés à travers un objectif de microscope dont les principales caractéristiques sont listées au tableau 2.1. L’objectif utilisé est un M Plan Apo 50X de marque *Mitutoyo* et possède une distance de travail assez grande pour permettre de modifier des circuits encapsulés tout en gardant une ouverture numérique intéressante afin d’avoir un petit diamètre de faisceau.

Le diamètre du faisceau focalisé ne dépend pas seulement de l’objectif, mais aussi de la largeur du faisceau incident et de sa convergence initiale. Les diamètres expérimentaux ont été mesurés à l’aide de la méthode du couteau. Une lame de rasoir traverse le faisceau ce qui coupe progressivement la puissance du laser mesurée à l’aide d’un photo-détecteur. En faisant l’hypothèse que le faisceau est gaussien, cette puissance devrait suivre en fonction de la position en x du couteau une relation du

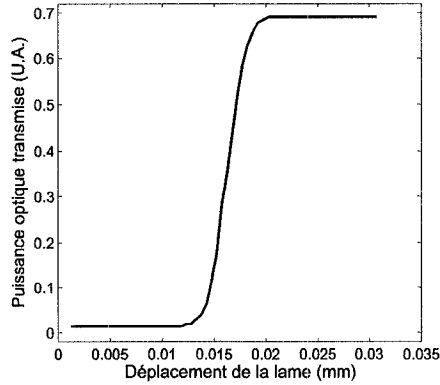


FIGURE 2.3 – Profil de puissance obtenu par la méthode du couteau.

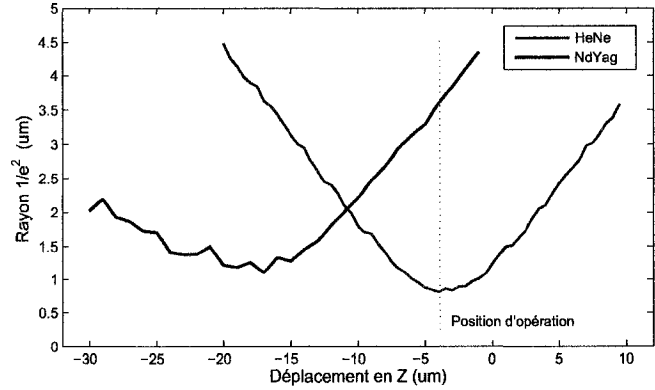


FIGURE 2.4 – Rayons $1/e^2$ mesurés à partir de la méthode du couteau pour le laser HeNe et le laser Nd :Yag focalisés.

type :

$$y = a + b \cdot \text{erf}((x - c)/d) \quad (2.1)$$

Où a , b , c et d sont des paramètres de lissage et où erf est définie par :

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.2)$$

On peut relier par la suite la valeur ajustée d au rayon $1/e^2$ du faisceau laser. La figure 2.3 montre le résultat d'une mesure au couteau et la figure 2.4 montre les rayons mesurés en fonction de la hauteur pour les deux lasers.

Les mesures donnent un rayon minimal pour le laser HeNe de $0,8 \mu m$ et une profondeur de champ de $3,25 \mu m$, en accord avec la théorie de la propagation d'un faisceau gaussien. En ce qui concerne le laser Nd :YAG, le rayon minimal est de $1,37 \mu m$ et l'angle de convergence n'est pas égal de chaque côté du point de convergence. Le comportement du rayon ne suit donc pas la théorie de propagation gaussienne probablement parce que le faisceau est déformé par le modulateur acousto-optique.

Une caractéristique très importante du comportement du laser de fonte est l'emplacement du rayon minimal. Les mesures expérimentales donnent un décalage d'une

quinzaine de microns entre les deux points de focalisations. Il est alors impossible de focaliser en même temps les deux faisceaux lasers. Dans le cadre de ce travail, afin d'obtenir des mesures optimales de la puissance réfléchie du faisceau sonde, l'échantillon sera placé au point focale du laser HeNe. Par conséquent, le rayon du faisceau de fonte à la hauteur de l'échantillon sera beaucoup plus grand, $3,5 \mu m$ selon la figure 2.4.

2.3.1 Système de positionnement

Le déplacement de l'échantillon s'effectue à l'aide d'une table trois axes précise au dixième de micron pouvant être contrôlée directement à partir de l'ordinateur. Un système de visualisation composé d'une caméra CCD, d'une lentille objective et d'un miroir rabattant est utilisé pour déterminer la hauteur à laquelle doit être placée la table. Le miroir sert à dévier le chemin optique sortant du microscope vers la caméra. Entre la caméra et le miroir est placée une lentille de faible convergence permettant l'ajustement de la focalisation de la caméra. Il faut s'assurer que l'image de la caméra soit à la même hauteur que le point de focalisation du laser HeNe. Pour cela, on place un objet réfléchissant sous l'objectif de microscope et on ajuste sa hauteur de façon à optimiser la puissance réfléchie du laser sonde. On ajuste alors la lentille objective de la caméra de façon à apercevoir clairement la surface de l'objet. Par la suite, lorsqu'un circuit est placé, il faut simplement ajuster la hauteur de celui-ci de façon à le voir clairement, assurant ainsi que l'échantillon soit au point focal du laser sonde avec une incertitude de plus ou moins la profondeur de champ. Sur notre montage, les contrastes de l'image varient peu pour un déplacement de $1 \mu m$. Cela a peu de conséquence sur le rayon du faisceau du laser HeNe puisque nous sommes à son point focal. Cependant, une variation de hauteur de $1 \mu m$ occasionne une variation de rayon du laser de fonte d'environ 150 nm, soit un peu plus de 4% , affectant aussi l'intensité maximale au centre du faisceau.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DE MESURES *IN-SITU* DE LA PUISSANCE RÉFLÉCHIE

Dans ce chapitre, les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie prises lors de différents types d'irradiations laser sont présentées. Des résultats ont été obtenus sur du silicium nu (recouvert seulement d'oxyde natif) afin de comparer les mesures avec les modèles de simulation présentés précédemment. Des tests ont également été effectués sur différents types de circuits intégrés afin de décrire leur comportement lors d'une irradiation laser.

3.1 Résultats de mesures de la puissance réfléchie sur le silicium

Les tests sur du silicium cristallin ont été effectués sur des morceaux de gaufre (100). Le silicium était recouvert d'une très mince couche d'oxyde natif, de stoechiométrie semblable au SiO_2 et d'une épaisseur typique de quelques nanomètres. Une couche aussi mince ne modifie généralement pas les processus d'absorption de la lumière et de diffusion de la chaleur. Cependant, la désorption de l'oxygène lors de l'irradiation peut changer les phénomènes de tension de surface et influencer les déformations causées par les effets Marangoni (Schwarz-Selinger 2001). Puisque ces effets ne sont pas tenus en compte dans les modèles du premier chapitre et que les circuits intégrés sont recouverts eux aussi d'oxyde, il n'est pas nécessaire d'enlever cette couche avant de faire des tests.

Des impulsions carrées de différentes puissances ont été envoyées sur le silicium. Les différentes mesures de la puissance réfléchie sont répertoriées à la figure 3.1. On remarque que pour des puissances de fontes inférieure à 1,5 W, habituellement

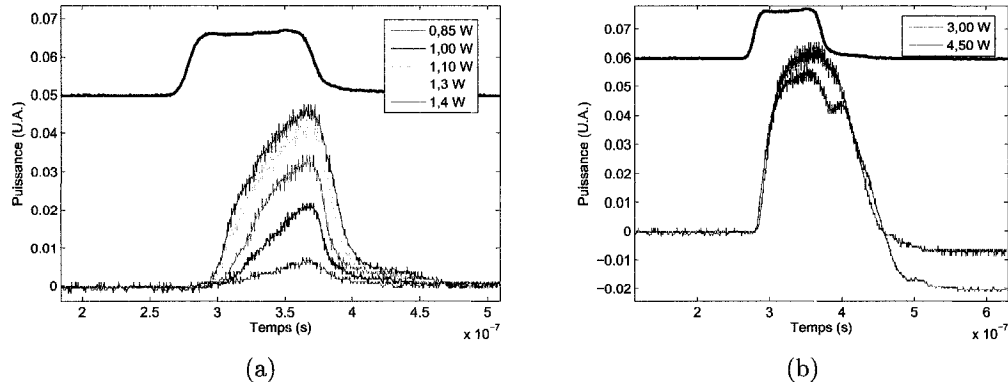


FIGURE 3.1 – Mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions de 100 ns sur du silicium recouvert d’oxyde natif. (a) : Puissances de fonte inférieures à 1,5 W. (b) : Puissances de fonte élevées. La forme temporelle de l’impulsion envoyée est superposée aux résultats de mesures de la puissance réfléchie.

utilisées durant la fabrication de résistances diffusées, la forme de la courbe de la puissance réfléchie s’approche des résultats de simulation (figure 1.7). On ne mesure cependant que peu la montée initiale de la puissance réfléchie associée à la hausse de température du silicium et on observe un signal non nul que lorsque la fonte devient assez importante. À faible puissance, l’intensité réfléchie maximale augmente avec la puissance laser et ne sature pas, confirmant que la région fondue est plus petite que les dimensions du laser sonde. De plus, la puissance réfléchie mesurée immédiatement après la fin de l’impulsion est essentiellement la même que celle avant l’impulsion signifiant que les déformations engendrées par la fonte sur le silicium à faible puissance sont peu significatives sur les résultats de mesure *in-situ* optique.

Lors de la montée de puissance réfléchie, un changement de pente est observé qui peut être expliqué par deux effets : le comportement gaussien du faisceau sonde et le changement de vitesse de l’interface solide-liquide de la zone fondue. Ce dernier effet, simulé par Degorce et al. (2005), est dû au fait qu’après un certain temps d’irradiation, la chaleur absorbée tend à augmenter la profondeur de la cuvette de silicium fondue au lieu de son rayon. La puissance réfléchie étant principalement modifiée par le rayon,

le gain en puissance réfléchi est moindre lorsque le phénomène apparaît. Une analyse de ces comportements est retrouvée dans le travail de Magny (2005).

Lorsqu'on augmente considérablement la puissance optique du laser de fonte (figure 3.1(b)), le comportement de la puissance réfléchi est clairement celui d'une saturation. Elle augmente rapidement pendant 30 ns puis tend à demeurer à une valeur presque constante avant de rediminuer. On remarquera aussi que plus la puissance laser est augmentée, plus le maximum de puissance réfléchi diminue et plus la puissance réfléchi après l'impulsion diffère de celle avant l'irradiation. Ce comportement peut s'expliquer par l'importance des déformations lors des irradiations à hautes puissances. De plus, on remarque dans le cas de la puissance laser à 4,5 W un phénomène particulier : lors du refroidissement, la puissance réfléchi augmente à nouveau afin de former un pic (situé à $t = 400$ ns sur la figure 3.1). Ces comportements liés aux déformations seront expliqués plus en détail à la section 5.5.

La montée graduelle en puissance des impulsions en dent-de-scie nous permet d'obtenir des informations temporelles supplémentaires. Contrairement aux mesures de la puissance réfléchi liées à des impulsions carrées, celles associées à des impulsions en dent-de-scie (figure 3.2) augmentent à des temps différents selon la puissance du laser de fonte. On peut remarquer une coupure bien distincte dans la pente lors de la montée de la puissance réfléchi pour les cas de faible puissance. Cela indique possiblement le point où la réflectivité de la zone de silicium près de la température de fonte devient prédominante telle que simulée à la figure 1.8. Dans le cas de puissances typiques de fonte (inférieur à 1,5 W) on observe une montée de la puissance réfléchi se créer sans trop de changement de pente ne laissant présager aucun problème de saturation. Aussi, lorsque l'impulsion laser est terminée, la puissance réfléchi diminue jusqu'à son niveau initial et démontre que les déformations de la surface de silicium sont négligeables.

Lorsque des impulsions plus intenses sont générées (puissance crête supérieure à 2,5 W), on observe la formation d'un plateau de puissance réfléchi signifiant une

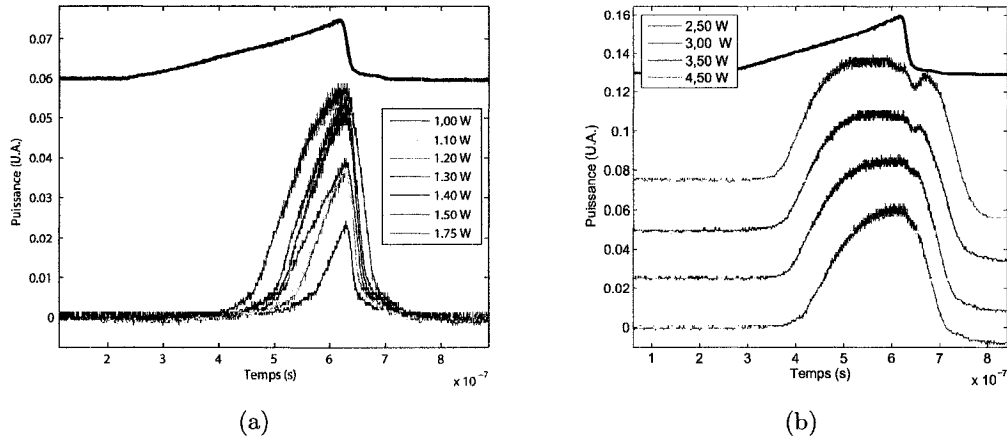


FIGURE 3.2 – Mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions en dent-de-scie de 400 ns sur du silicium avec oxyde natif. (a) : Puissances de fonte inférieures à 1,5 W. (b) : Puissances de fonte élevées (les courbes ont été intentionnellement décalées verticalement de façon à bien les distinguer). La forme temporelle de l'impulsion envoyée est superposée aux résultats de mesures de la puissance réfléchie.

saturation du laser sonde. Dans le cas des impulsions les plus intenses, on remarque même une légère baisse de la puissance réfléchie alors que l'impulsion n'est pas encore terminée. Dans ces cas, après l'impulsion, on remarque une seconde augmentation de la puissance réfléchie, semblable à celle qui est vue à la figure 3.1. Dans tous les cas, la puissance réfléchie finale est inférieure à celle initiale observée conséquence des fortes déformations à la surface du silicium.

3.2 Résultats de mesures de la puissance réfléchie sur des circuits intégrés

Chaque technologie de circuit intégré possède ses propres règles de conception et choix de matériaux affectant la fonte par le laser focalisé et la mesure *in-situ* de la puissance réfléchie. Dans le cadre de ce mémoire, trois technologies ont été étudiées : *TSMC 350 nm* , *TSMC 250 nm* et *TSMC 180 nm*. Les différents circuits et gaufres

comportant des designs de résistances diffusées ont été fournis par l'organisme *CMC Microsystems* et par la compagnie *LTRIM Technologies*.

3.2.1 Circuits intégrés de technologies 350 nm et 250 nm

Les technologies 350 nm et 250 nm de la *TSMC* sont toutes deux déjà utilisées pour la fabrication des circuits analogiques et des résistances diffusées par laser. Leurs diélectriques sont transparents et semblent stables aux hausses de températures causées par l'irradiation puisque l'opération laser ne laisse pas de marque visible au microscope optique. Elles semblent donc être de bonnes candidates pour les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie. Des exemples de mesures sur ces technologies sont présentés à la figure 3.3. Il a été vérifié que les comportements observés sont reproductibles pour les deux technologies après quelques impulsions envoyées.

Dans le cas de la technologie 350 nm, on remarque un comportement très semblable au silicium nu lorsque la puissance laser n'est pas trop élevée, inférieure à 1,3 W, et ce autant pour des impulsions carrées qu'en dent-de-scie. Cependant, lorsqu'on augmente la puissance de fonte au delà de 1,4 W, une diminution de la puissance réfléchie pendant l'irradiation laser est observée. Dans le cas du silicium nu, un phénomène semblable ne se produisait que pour des puissances très élevées (3,5 W et plus) et était beaucoup moins visible. De plus, la remontée de puissance réfléchie après la fin de l'irradiation est beaucoup plus importante et apparaît à des puissances de fontes beaucoup plus basses que dans le cas du silicium nu.

Les différences de comportements avec le silicium nu des mesures *in-situ* optiques sont encore plus accentuées dans le cas de la technologie 250 nm. Même pour des puissances du laser fonte très faibles (inférieures à 1 W), on observe une baisse de la puissance réfléchie durant l'irradiation et une augmentation de celle-ci après l'irradiation. Cette diminution de la puissance réfléchie est suffisamment importante pour qu'il soit possible de contrecarrer complètement la hausse de puissance réfléchie initiale.

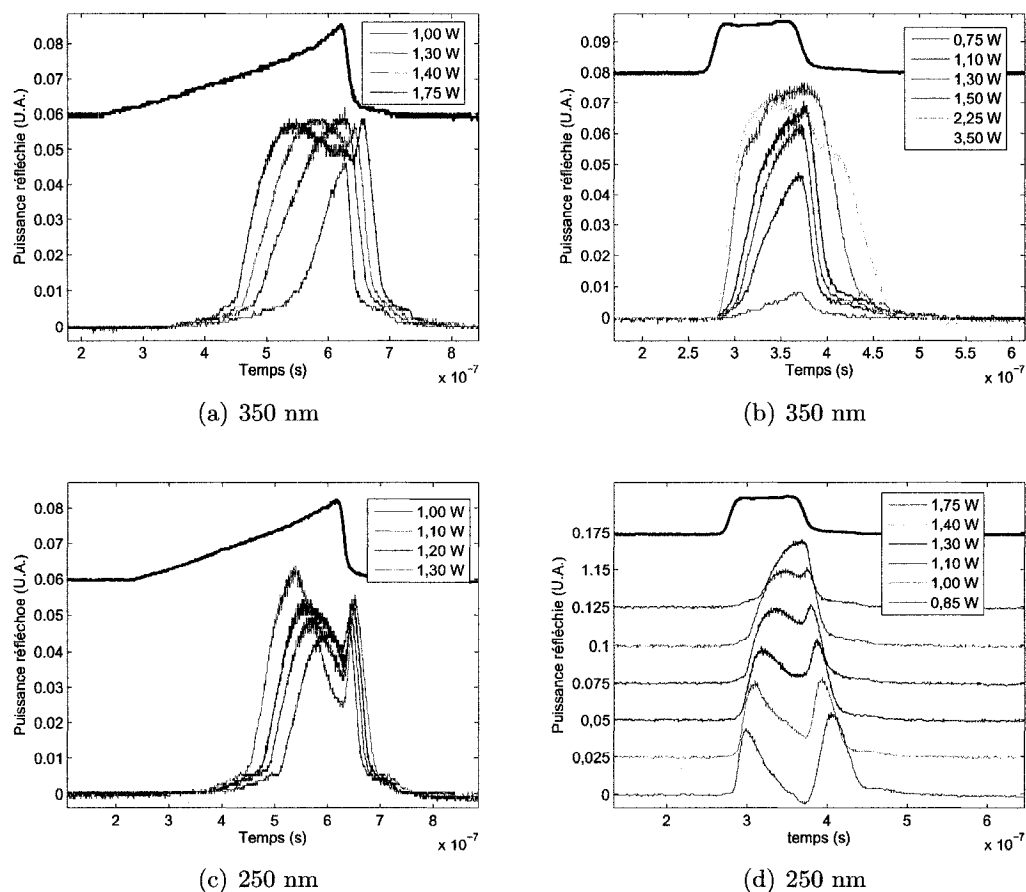


FIGURE 3.3 – Mesures de la puissance réfléchie sur des CI de différentes technologies. (a) et (b) : mesures sur technologie 350 nm. (c) et (d) : mesures sur technologie 250 nm. La forme temporelle de l'impulsion envoyée est superposée aux résultats de mesure de la puissance réfléchie. En (d), les mesures ont été intentionnellement décalées verticalement de façon à bien les discerner.

Ces comportements de la puissance réfléchie ne semblent pas être associés directement à une destruction du circuit. Des déformations majeures au niveau des diélectriques et/ou du silicium auraient alors diminué la puissance réfléchie ce qui n'est évidemment pas le cas puisqu'après les irradiations, même les plus intenses, elle revient toujours à sa valeur initiale. De plus, aucune altération du circuit n'est observable au microscope optique. Dans le cas des impulsions les plus intenses (supérieure à 3,0 W), il est possible de voir de légères déformations de la surface aussi observées dans le cas du silicium nu.

3.2.2 Circuits intégrés fabriqués en technologie 180 nm

La technologie de CI 180 nm, qui commence à être de plus en plus utilisée dans le domaine des circuits analogiques, est la plus avancée des technologies disponibles dans le cadre de ce mémoire. La création de résistances diffusées nécessite des puissances de fonte plus élevées que celles utilisées pour les autres technologies introduisant un comportement différent dans les mesures *in-situ* optique. Une étude plus approfondie de cette technologie sera faite au chapitre 4.

La figure 3.4 montre les mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions de 100 ns à différentes puissances crêtes. Les résultats sont assez semblables à ceux obtenus pour la technologie 250 nm présentés à la figure 3.3. Pour des puissances supérieures à 1,0 W, les courbes sont caractérisées par une forte diminution durant l'impulsion suivie d'une remontée et de la diminution finale à la fin de l'impulsion. Après l'irradiation, la puissance réfléchie revient à la même valeur que celle avant l'impulsion, quoique légèrement supérieure.

L'utilisation des impulsions en dent-de-scie génère un résultat intéressant (figure 3.5). On remarque d'abord que pour toutes les puissances de fonte utilisées, la puissance réfléchie après l'irradiation est supérieure à celle obtenue avant l'impulsion. Ce comportement est différent de celui observé sur les autres technologies et sur le silicium nu, où il y avait toujours une diminution de la puissance réfléchie après

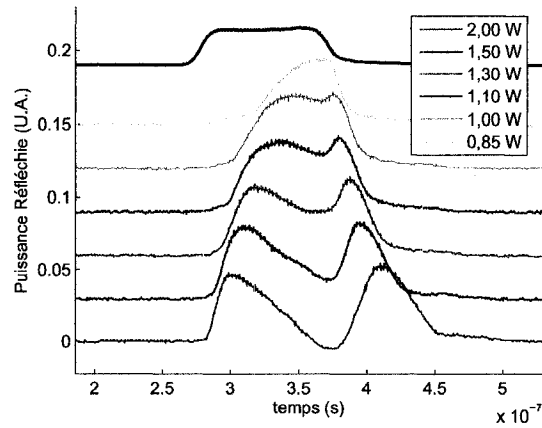


FIGURE 3.4 – Mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions de 100 ns sur des CI de technologie 180 nm. Les courbes ont été intentionnellement décalées de façon à bien les distinguer. La forme temporelle de l'impulsion envoyée est superposée aux résultats de mesure de la puissance réfléchie.

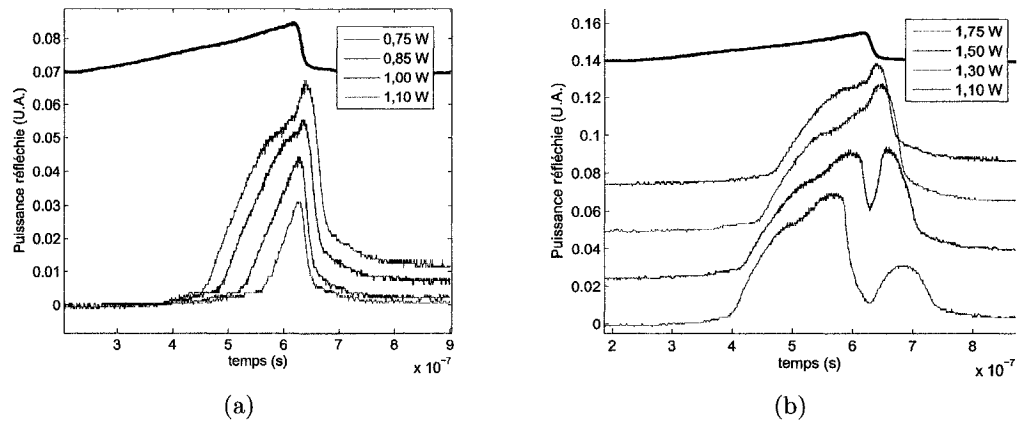


FIGURE 3.5 – Mesures de la puissance réfléchie pour des impulsions en dent-de-scie sur des CI de technologie 180 nm. (a) : Puissances de fonte inférieures à 1,1 W. (b) : Puissances de fonte plus élevées (Les courbes ont été intentionnellement décalées verticalement de façon à bien les distinguer). La forme temporelle de l'impulsion envoyée est superposée aux mesures de la puissance réfléchie.

des impulsions, ce qui était attribué à des déformations à la surface de silicium. Pour des puissances de fonte supérieure à 1,5 W, la puissance réfléchie finale diminue mais reste généralement supérieure à celle initiale. Seulement dans des cas d'intensités très élevées et supérieures à 3 W, on retrouve des puissances réfléchies finales très basses, la valeur finale variant cependant énormément d'une irradiation à l'autre.

Une autre particularité de la technologie 180 nm est le lien étroit entre les déformations optiques, la fabrication d'un lien résistif et les courbes de mesure *in-situ* de la puissance réfléchie. Lors des irradiations à des puissances suffisamment intenses, on peut noter au microscope optique l'apparition d'un point blanc et à plus forte puissance, d'un point noir (figure 3.6). Les impulsions de basses puissances ne laissent aucune marque optique sur le circuit même si elles sont envoyées en grand nombre et elles ne provoquent pas la diffusion des dopants puisqu'aucun lien résistif ne peut être formé. Si une irradiation produit un point blanc, un envoi successif d'impulsions laser fera que le point visible deviendra de plus en plus intense mais il n'y aura cependant pas de lien résistif créé. Finalement, si on augmente encore la puissance laser, un point noir apparaîtra au centre du point blanc et à une puissance encore plus élevée, seul un point noir sera visible. Lorsqu'il y a création d'un point noir, il est possible qu'un lien résistif soit formé, s'il ne l'est pas, quelques impulsions identiques finiront toujours par en créer un. Un lien étroit entre la création d'une résistance et l'apparition d'un point noir peut donc être observé. Autre fait intéressant, une fois le point noir apparu, il est possible de diminuer la résistance du lien en utilisant des impulsions qui n'auraient pas permis la création d'une résistance sans la présence préalable d'un point noir. Ces résultats suggèrent qu'une irradiation de faible intensité puisse quand même produire une cuvette fondue après la création d'un point noir, mais qu'elle ne le peut pas si seul un point blanc est visible.

L'apparition des points blancs et noirs peut être intimement associée à des comportements spécifiques de la puissance réfléchie, surtout dans le cas d'impulsion en dent-de-scie. Une baisse de celle-ci indique la formation d'un point noir alors que le

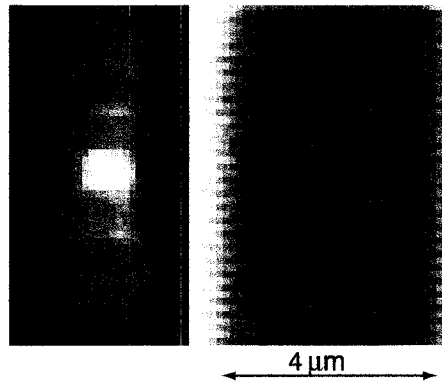


FIGURE 3.6 – Déformations visibles lors d’irradiations sur des CI de technologie 180 nm. Dans la zone de gauche on aperçoit un point blanc entre deux points noirs alors qu’à droite, on aperçoit un point noir entouré d’un anneau blanc.

changement de pente lors de la montée de la puissance réfléchie est associé aux points blancs. Le tableau 3.1 résume l’association faite entre les points visibles au microscope optique, les mesure *in-situ* de la puissance réfléchie ainsi que la possibilité de créer des liens résistifs.

3.3 Mesure de la puissance réfléchie absolue

Les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie avec les détecteurs en mode AC indiquent la variation de celle-ci durant l’irradiation mais pas sa valeur absolue (voir section 2.2.2). Cependant, mesurer la puissance réfléchie absolue de la surface de silicium pour chaque technologie peut nous informer sur les processus d’absorption du laser de fonte.

Les mesures ont été prises avec le même montage décrit au chapitre 2 mais en utilisant le photodétecteur en mode DC. Dans ces expériences, puisque le faisceau sonde est focalisé à l’interface silicium-diélectrique, les réflexions faites par l’interface air-diélectrique seront hors focus et n’atteindront pratiquement pas la photodiode. Le tableau 3.2 donne les résultats de mesure de la puissance réfléchie absolue du silicium provenant de différentes technologies de circuits intégrés.

TABLEAU 3.1 – Comportement des circuits de technologie 180 nm lors d’irradiations en dent-de-scie.

Déformation visible	Mesure de réflectivité Description	Exemple	Résistance formée	Commentaire
Aucune	Pas de changement de pente lors de la montée de la puissance réfléchie.	Fig. 3.5(a) 0,75 W avant 550ns	non	Aucun effet cumulatif d’une irradiation à l’autre.
Point blanc	Changement de pente lors de la montée de la puissance réfléchie.	Fig. 3.5(a) 0,75 W	non	S’il y a déjà présence d’un point noir, une telle impulsion diminuera la résistance.
Point blanc et point noir	Forte diminution de la pente de la mesure de la puissance réfléchie et/ou début de diminution de celle-ci.	Fig. 3.5(b) 1,1 0W	n.d.	Une seule impulsion ne crée généralement pas de lien, mais quelques unes vont en créer un.
Point noir	Baisse de puissance réfléchie pendant l’impulsion.	Fig. 3.5(b) 1,50 W	oui	

TABLEAU 3.2 – Résultats de mesures de la puissance réfléchie absolue avant ou après l’irradiation.

Substrat	Puissance réfléchie (U.A.)
Silicium nu	429
350 nm	160
250 nm	275
180 nm (intact)	8
180 nm (point noir)	143
180 nm (point blanc)	100
180 nm (point noir et contour blanc)	163

Dans tous les cas, la puissance réfléchie mesurée sur les circuits est inférieure à celle obtenue sur le silicium nu, ce qui est compréhensible car l'ensemble des couches diélectriques d'indice de réfraction légèrement différent forme un réseau réfléchissant. Par exemple, l'interface diélectrique-air peut causer à elle seule une réflexion entre 4% (SiO_2) et 15% (Si_3N_4) de la puissance initiale. Le fait que la puissance réfléchie provenant du silicium intact de la technologie 180 nm est très faible suggère qu'il y a une couche absorbante sur le silicium. Aussi, après irradiation, la mesure de la puissance réfléchie de la zone est modifiée et devient du même ordre de grandeur que les autres technologies, suggérant que la couche absorbante ait été endommagée. Une telle destruction des couches aura des conséquences importantes sur les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie.

3.4 Différence de résultats entre le silicium nu et les CI de technologie 180 nm

Les mesures de la puissance réfléchie ont démontré des comportements bien différents entre le silicium recouvert d'oxyde natif et les circuits intégrés de différentes technologies. Alors que les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie sont bien comprises et modélisées pour le silicium nu, plusieurs nouveaux comportements ont été observés sur les différents circuits. La figure 3.7 et le tableau 3.3 résument les principales différences entre les mesures prises sur le silicium nu et sur les circuits fabriqués en technologie 180 nm.

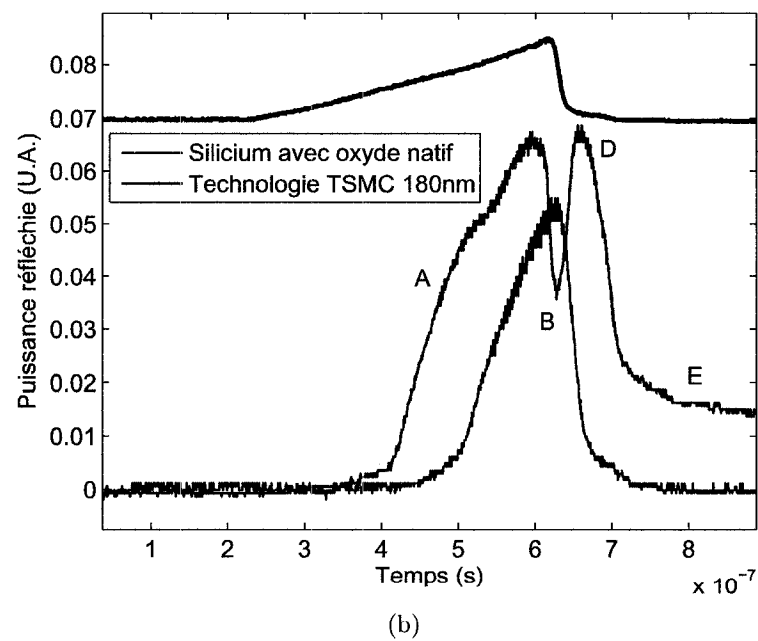
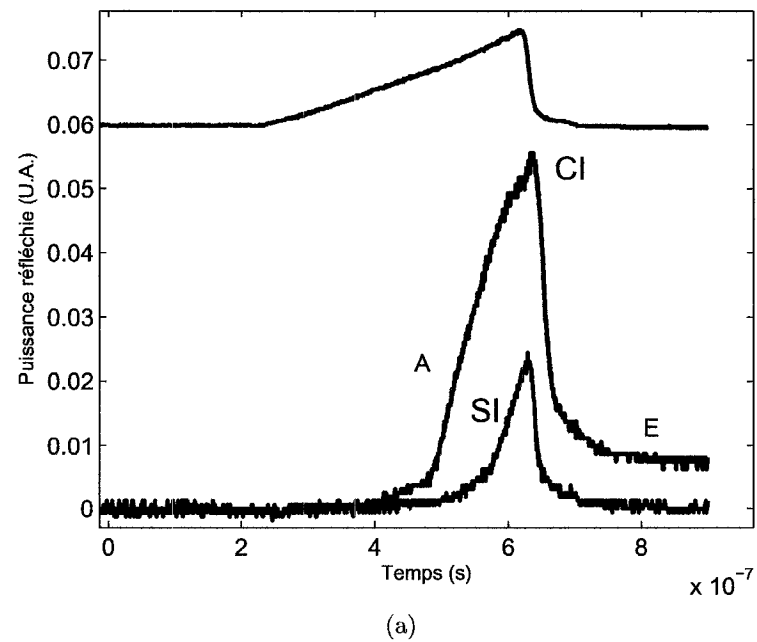


FIGURE 3.7 – Comparaison des mesures *in-situ* de la puissance réfléchie effectuées sur le silicium nu et sur un circuit de technologie 180 nm. Des irradiations en dent-de-scie de 400 ns de puissance crête de (a) 1,0 W et (b) de 1,5 W ont été utilisées.

TABLEAU 3.3 – Résumé des différences de mesure de la puissance réfléchie entre le silicium recouvert d'un oxyde natif et un CI de technologie 180 nm.

Description	TSMC 180 nm	Silicium recouvert d'oxyde natif
A Montée rapide de la puissance réfléchie	Même à basse puissance, la puissance réfléchie augmente rapidement.	Demande une irradiation plus forte pour créer une hausse de puissance réfléchie.
B Baisse de la puissance réfléchie durant l'irradiation	Très forte baisse de la puissance réfléchie (jusqu'à annuler toute l'augmentation initiale). Présence de la diminution aux puissances où le silicium nu semble commencer à fondre.	Présente seulement lorsque le faisceau sonde est fortement saturé et à puissance très élevée.
C Présence de points ou déformations visibles au microscope optique	Présence d'un point noir après une irradiation permettant la fonte (lorsque création de résistance) et d'un point blanc pour des puissances inférieures.	Quelques faibles déformations visibles lors d'impulsions très intenses.
D Montée de la puissance réfléchie à la fin de l'irradiation	Remonté de la puissance réfléchie très marquée surtout s'il y a eu chute pendant l'irradiation.	Présence d'une faible remontée de la puissance réfléchie après une irradiation très intense.
E Puissance réfléchie post-irradiation	Forte variation de la puissance réfléchie après intervention laser, pouvant être positive ou négative. Variation même à basse intensité laser. Variation négative lors d'irradiation très intense.	Pratiquement pas de changement pour des irradiations d'intensité généralement utilisée pour la fabrication de résistances dif-fusées.
F Puissance réfléchie absolue	Puissance réfléchie quasi nulle avant intervention laser. Augmente par la suite.	Puissance réfléchie importante avant et après l'irradiation.
G Création de résistances et fonte	La montée de la puissance réfléchie n'indique pas nécessairement la création possible d'un lien résistif. On peut donc déduire que cette augmentation n'est pas nécessairement liée à une fonte.	Lorsqu'il y a une augmentation non négligeable de la puissance réfléchie, il y a fonte.

CHAPITRE 4

CARACTÉRISATION DE LA TECHNOLOGIE 180 nm

Afin de comprendre les phénomènes en jeu lors des mesures de la puissance réfléchie sur des circuits intégrés, il faut analyser leurs particularités physiques. Ce qui différencie principalement un circuit intégré d'une gaufre de silicium, au niveau optique et thermique, est la présence de plusieurs couches de matériaux diélectriques, de métaux et d'autres composés servant à fabriquer le réseau de contacts au-dessus du silicium. Les épaisseurs de ces couches varient de quelques nanomètres à quelques microns. Pour analyser des matériaux de telles dimensions, il faut utiliser des outils de caractérisation poussés et spécialisés.

4.1 Méthodes de caractérisation utilisées et préparation d'échantillons

4.1.1 Microscope optique

L'utilisation du microscope optique est rapide et peu coûteuse mais sa résolution maximale est du même ordre de grandeur que les longueurs d'onde visibles, soit environ à $0,5\ \mu\text{m}$. Il est donc impensable de caractériser les circuits intégrés en utilisant seulement ces microscopes. Cependant, ils sont utiles pour analyser rapidement les altérations causées par le laser sur la surface de silicium et dans les diélectriques. La profondeur de champ très restreinte de certains microscopes permet de déterminer l'emplacement de la déformation et le lieu où l'énergie a été principalement absorbée (figure 4.1).

Une autre limitation du microscope optique est qu'il est peu sélectif au niveau chimique. La plupart des diélectriques utilisés dans les circuits intégrés sont transpa-

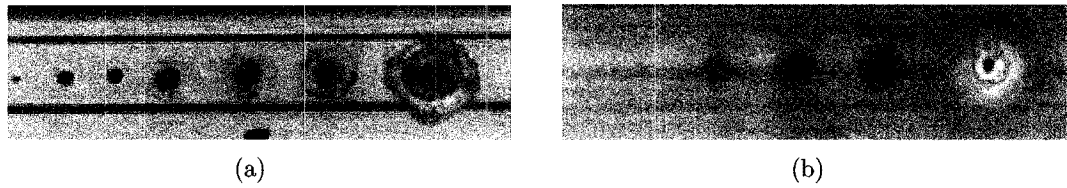


FIGURE 4.1 – Exemple de l'utilisation de la profondeur de champ d'un microscope optique. (a) Le microscope est focalisé sur le silicium. On y voit plusieurs défauts causés par le laser. (b) : Le microscope est au même endroit, mais focalisé sur le dessus des diélectriques. On voit que ceux-ci ont été endommagés lors de certaines irradiations, ce qui n'aurait pu être déterminé en (a).

rents à ces longueurs d'onde et il est donc difficile de différencier une couche de Si_3N_4 d'une couche de SiO_2 .

4.1.2 Microscope électronique à transmission (MET)

La microscopie électronique permet d'atteindre une meilleure résolution que celle optique. Ces microscopes utilisent un faisceau d'électrons focalisé par des lentilles électromagnétiques qui permettent d'avoir une résolution de l'ordre de l'Angström (10^{-10} m). L'échantillon doit être soit très mince (inférieur à 300 nm) pour que les électrons puissent traverser en quantité suffisante et former une image de haute résolution.

L'appareil utilisé est un JEM-2100F de la compagnie *Jeol* et comprend un canon à effet de champ fonctionnant à une tension d'accélération de 200 kV. Le microscope est doté d'un spectromètre à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) et est couplé à un spectromètre de perte d'énergie des électrons transmis à collection parallèle (PEELS). Ces ajouts permettent de faire une analyse chimique locale d'un échantillon. Les prochains paragraphes décrivent brièvement comment analyser les résultats de l'appareil. Pour plus d'informations sur le fonctionnement du MET voir (Reimer 1993).

4.1.2.1 Mode imagerie

Deux modes sont disponibles sur le microscope utilisé. Le premier est le mode standard à projection parallèle consistant à irradier la surface de l'échantillon par des électrons. L'image résultante de la nature de l'échantillon et de sa cristallinité est ensuite agrandie à l'aide de lentilles électromagnétiques. Ce mode est particulièrement pratique afin de déceler des structures cristallines dans un matériau telles les formations de grains et de dislocations.

Le deuxième mode disponible est le STEM (*Scanning Transmission Electron Microscopy*). Dans ce mode, le faisceau d'électrons est focalisé à la hauteur de l'échantillon un seul point à la fois. Selon les caractéristiques de ce point (cristallinité, numéro atomique, épaisseur) la trajectoire des électrons sera affectée. Un détecteur annulaire (fond sombre) ou circulaire (fond clair) permettront de capturer les électrons respectivement déviés ou non déviés. Une image complète de l'échantillon est obtenue en balayant le faisceau électronique sur la surface à sonder.

Les échantillons présentés dans les prochaines sections ont principalement été analysés en mode STEM qui est plus facile à utiliser et interpréter, surtout dans le cas où les diélectriques recouvrant le silicium sont amorphes et n'ont donc pas de contraste cristallin.

4.1.2.2 Analyse rayons X

Le détecteur EDS (*Energy Dispersion Spectroscopy*) permet l'analyse chimique de l'échantillon en captant les rayons X produits par le passage du faisceau d'électrons à travers l'échantillon. Lorsqu'un électron d'énergie suffisante passe à proximité d'un atome, il est possible qu'il ionise ce dernier en expulsant un de ses électrons de coeur. L'atome se retrouve dans un état excité et peut relaxer son surplus d'énergie sous différentes formes, dont l'émission de photons rayon X possédant des énergies de l'ordre de 1 keV. Comme chaque type d'atome est caractérisé par des orbitales

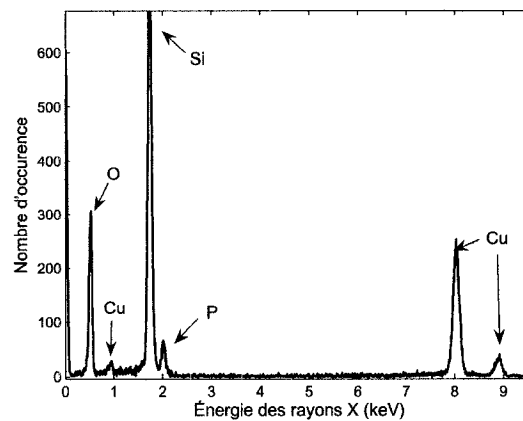


FIGURE 4.2 – Spectre rayon X de la couche de PSG (*Phosphosilicate Glass*) d'un échantillon de technologie 180 nm. Les pics associés au cuivre proviennent du porte-échantillon.

d'énergies spécifiques et différentes, il est alors possible d'identifier la composition en analysant le spectre de rayons X émis.

La figure 4.2 montre un exemple de spectre EDS. On peut y voir différents pics associés au silicium, à l'oxygène et au phosphore. L'intensité des pics est proportionnelle au nombre de photons captés mais elle n'est pas une identification de l'abondance de l'élément dans l'échantillon. En effet, selon l'environnement du point sondé, il peut y avoir absorption des rayons X émis par un atome de type A par d'autres types atomes diminuant le nombre de rayons X captés par le détecteur, ou réémission de rayons X par d'autres atomes A situés près de l'endroit sondé augmentant la quantité de rayons X captés. À cause de ces phénomènes, il est hasardeux de faire une analyse quantitative des éléments d'un échantillon surtout sans échantillon standard. Ce mode sera principalement utilisé pour obtenir qualitativement les éléments en jeux dans les différentes couches composant le circuit intégré.

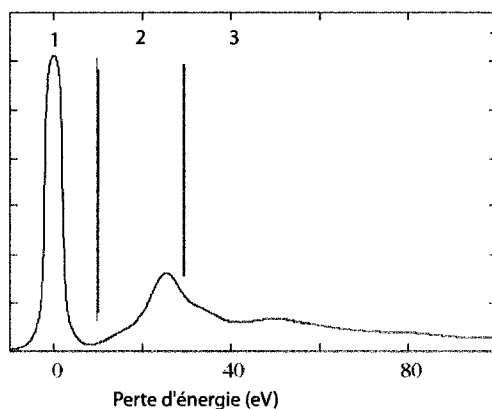


FIGURE 4.3 – Spectre PEELS typique.

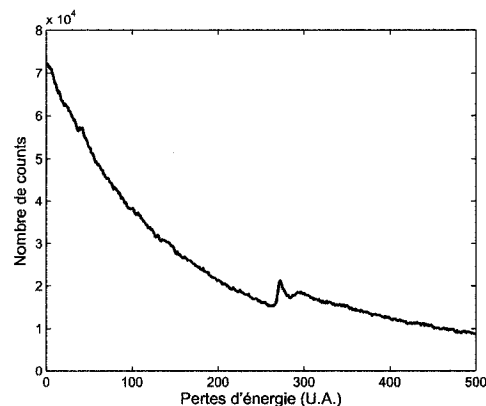


FIGURE 4.4 – Vue agrandie du pic de perte d'énergie de l'oxygène.

4.1.2.3 Spectroscopie de perte d'énergie

Le deuxième outil de caractérisation chimique disponible sur le MET est le détecteur PEELS qui mesure les pertes d'énergie des électrons ayant traversé l'échantillon. La figure 4.3 montre un exemple de spectre PEELS. Les électrons qui ont peu ou pas perdu d'énergie donnent le premier pic autour de zéro. Viennent ensuite des pics plasmon associés à l'excitation de modes dans le nuage électronique de l'échantillon et finalement les pics dus aux pertes élastiques et inélastiques, dont leur analyse permet de déterminer la nature de l'échantillon. Afin d'effectuer une étude quantitative, il faut modéliser le bruit de fond du spectre, tenir compte de l'épaisseur de l'échantillon et d'autres paramètres associés à chacun des types d'atomes détectés. Dans notre cas, cette modélisation se fait directement par l'entremise d'un logiciel fourni avec le microscope.

Il est à noter que l'analyse PEELS demande des échantillons soigneusement préparés. L'échantillon doit être assez épais pour obtenir un nombre suffisant d'interactions électron-atome, mais assez mince pour limiter la production de plasmons, qui ajoutent du bruit sur les pics de pertes inélastiques et diminuent la probabilité qu'un

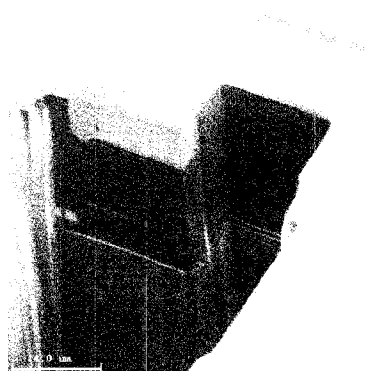


FIGURE 4.5 – Visualisation d’une coupe transversale fait au FIB.

électron incident ait deux interactions avec l’échantillon. Dans notre cas, afin d’avoir des résultats satisfaisants, les épaisseurs des échantillons doivent être entre 50 nm et 100 nm.

4.1.3 Faisceau d’ions focalisés (F.I.B.)

Le microscope électronique à transmission nécessite des échantillons très minces afin que le faisceau d’électrons traverse l’échantillon. Parmi toutes les techniques de préparation de lame minces pour le MET, celle utilisant le faisceau d’ions focalisés ou FIB (*Focused Ion Beam*) présente l’avantage de prendre la lame à l’endroit précis où l’analyse doit être effectuée, ce qui est nécessaire pour les CI modifiés par laser. Le FIB fonctionne à l’aide d’un faisceau d’ions (habituellement de gallium) qui sont accélérés et focalisés à l’aide de lentilles électromagnétiques sur une zone de l’échantillon. Les ions sont massifs et interagissent beaucoup plus fortement avec la matière que les électrons, produisant alors une ablation de matière.

Il est possible d’utiliser l’appareil pour faire de la modification de circuits, de la microfabrication ou de l’imagerie de coupe transversale (figure 4.5) lorsque couplé avec des détecteurs d’électrons ou d’ions secondaires. Ce dernier mode d’imagerie peut être utile pour visualiser les différentes couches couvrant le silicium sur un circuit intégré. Il est même possible d’utiliser l’appareil pour visualiser des déformations à l’interface

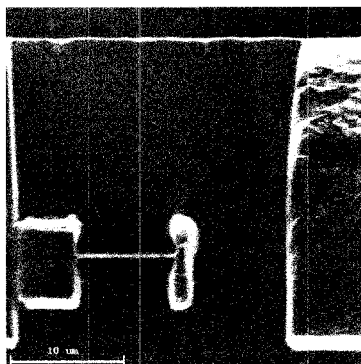


FIGURE 4.6 – Vue du dessus d’un échantillon amincie au FIB afin de servir comme échantillon MET.

silicium-diélectriques. Par contre, à cause des effets d’accumulation de charge dans les diélectriques, la résolution est amoindrie et le contraste chimique entre les couches est faible. Il est possible de différencier les couches métalliques des couches diélectriques, mais très difficile de distinguer deux couches diélectriques de natures différentes.

L’utilisation principale du FIB dans le cadre de ce travail a été la préparation d’échantillon pour le MET. Il est possible en effet de graver dans la matière une lame qui sera amincie par le faisceau d’ions à une épaisseur idéale pour le MET, soit entre 100 nm et 300 nm (figure 4.6). Tous les échantillons MET de ce travail ont été préparés avec un FB2000A de *Hitachi* en suivant une méthode semblable à celle décrite par Liao (2005).

4.2 Caractérisation d’une résistance non irradiée en technologie 180 nm

Faire une caractérisation complète d’une technologie et de ses réactions à l’irradiation laser est très demandant en temps et en moyens financiers. Pour ces raisons, la suite de ce chapitre portera exclusivement sur les CI de la technologie 180 nm fabriqués par la *TSMC* (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Ltd.). Le

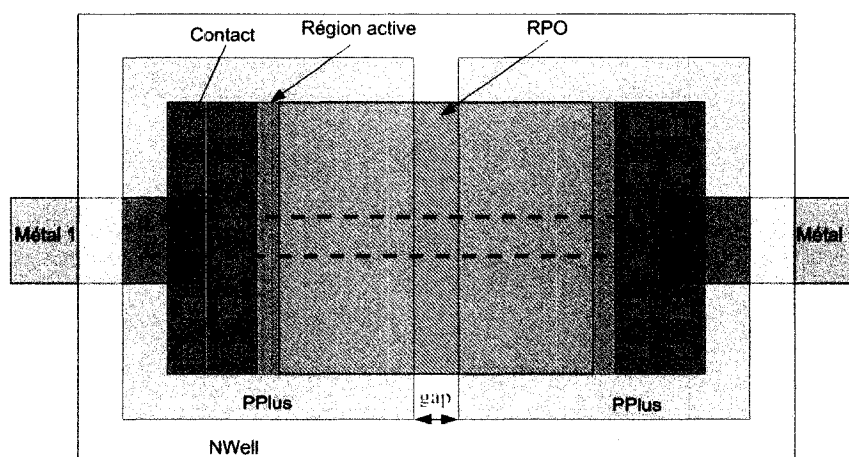


FIGURE 4.7 – Schéma des principaux masques utilisés lors de la fabrication d'une résistance diffusée standard en technologie TSMC 180 nm. Le cadre pointillé indique la vue de dessus de l'échantillon normalement utilisé pour la caractérisation au MET. (Wild 2005).

choix de celle-ci est motivé par un fort comportement optique pendant et après la fonte, une bonne disponibilité de dés à tester ainsi qu'un intérêt marqué par l'industrie de faire de la recherche et du développement sur cette technologie. Un dessin typique des principaux masques utilisés dans la fabrication d'une résistance diffusée peut être retrouvé à la figure 4.7.

La technologie TSMC 180 nm utilisée possède 6 niveaux de métal. Elle est aussi caractérisée par l'utilisation d'une isolation *STI* (*Shallow Trench Isolation*) entre les régions actives et de diélectriques intermétalliques dopés au fluor afin de diminuer les délais de propagation de signal. D'après le dessin des masques d'une résistance diffusée, on devrait retrouver une seule zone active et la couche d'oxyde RPO au centre du dispositif, et le métal 1 et ses contacts sur les côtés. Afin de bien définir les couches en présence, des analyses ont été faites sur une résistance diffusée non irradiée.

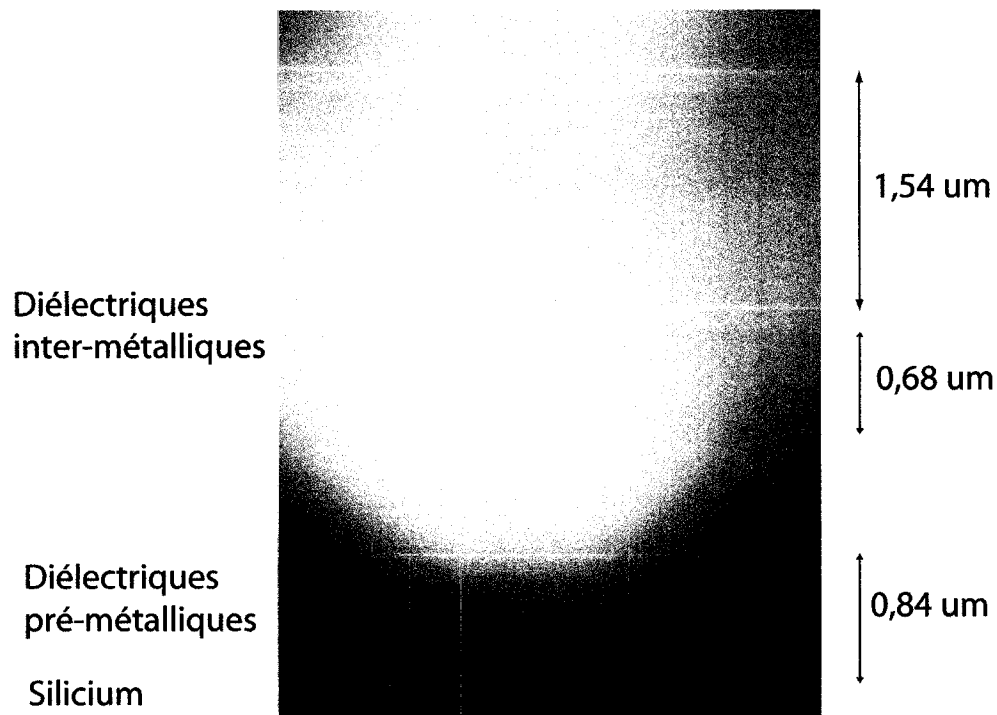


FIGURE 4.8 – Vue générale des diélectriques présents au-dessus d’une résistance diffusée non-irradiée.

4.2.1 Imagerie des couches

Un circuit intégré est formé principalement de quatre parties. La première couche à la surface, formée d’une couche de SiO_2 sous une couche de Si_3N_4 , est la passivation qui sert principalement à protéger le circuit des chocs physiques ainsi que des réactions chimiques avec l’environnement qui pourraient réduire son temps de vie. La passivation recouvrant les résistances diffusées a été localement enlevée directement à la fonderie, permettant au laser de fonte de mieux atteindre le circuit car la puissance optique réfléchie à l’interface air- Si_3N_4 est plus élevée que celle air- SiO_2 .

Sous la passivation suivent les diélectriques intermétalliques et les diélectriques pré-métalliques servant à isoler et à maintenir les liens métalliques du circuit intégré. La figure 4.8 montre quelques couches de ces diélectriques. Entre chaque couche de métal on peut apercevoir 3 à 4 couches de diélectrique dont l’épaisseur totale est

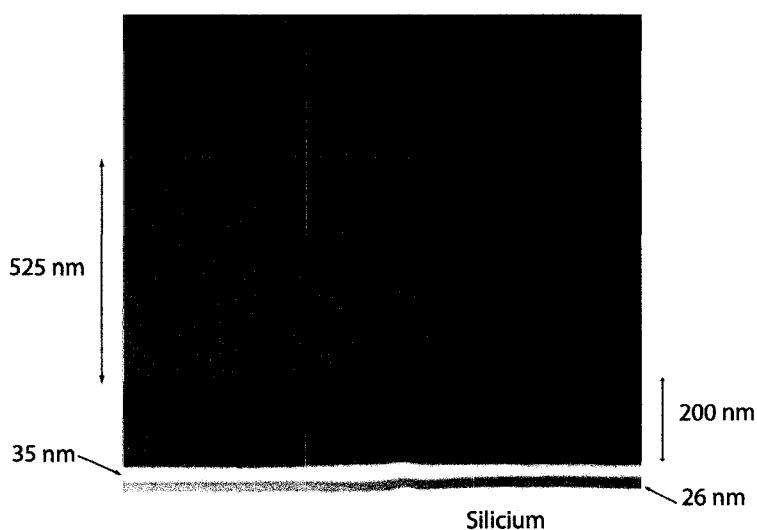


FIGURE 4.9 – Vue agrandie des diélectriques pré-métalliques au dessus d’une résistance diffusée non-irradiée.

d’environ $1,5 \mu\text{m}$. Cette figure montre également les diélectriques pré-métalliques formés de 4 couches distinctes qui ont une épaisseur totale d’environ 850 nm. Ces dernières couches sont celles qui nous intéressent le plus car ce sont ces diélectriques qui sont en contact avec le diamètre minimal du faisceau laser et qui peuvent interagir avec la région de silicium fondu. Au total, il y a environ $8 \mu\text{m}$ de diélectrique au dessus de la zone de silicium à irradier.

La figure 4.9 montre une vue agrandie des diélectriques pré-métalliques prise en mode STEM en fond sombre. Les deux premières couches sur le silicium sont très minces. Le contraste de la deuxième couche, 35 nm d’épais, est très clair. Cette forte diffraction indique que ce diélectrique est caractérisé par une densité massique plus élevée que celle des autres couches, approchant celle du silicium.

Sous les couches diélectriques se trouve le silicium cristallin. Ce dernier est orienté de façon à ce que l’axe [100] soit perpendiculaire à l’interface avec les diélectriques car tous les échantillons MET ont été coupés perpendiculairement à l’axe de zone [110]. Un cliché de diffraction ainsi qu’une image à résolution atomique du silicium sont montrés à la figure 4.10. Aucun défaut (grain, dislocation) n’est visible au MET

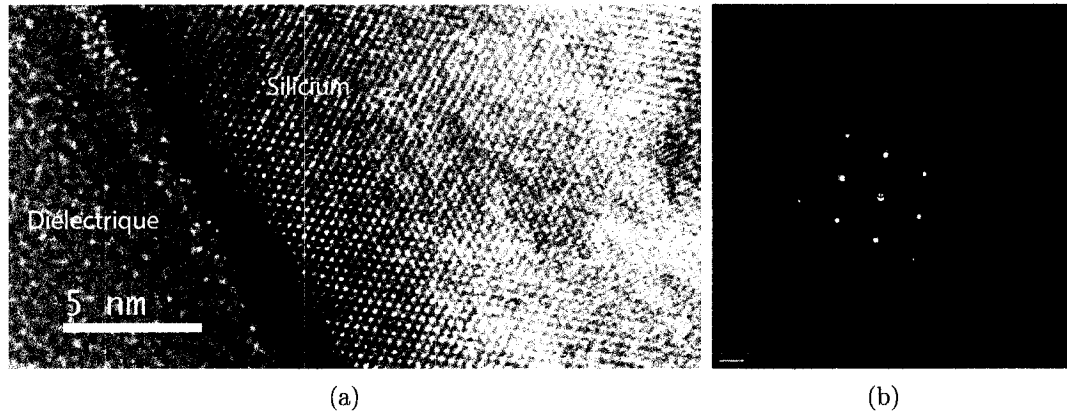


FIGURE 4.10 – (a) : Image à résolution atomique du silicium (à la droite de l'image) et de la première couche d'oxyde (à la gauche de l'image). (b) : Cliché de diffraction du silicium cristallin.

sauf aux endroits où il y a eu implantation ionique de dopants. Cette caractéristique nous sera utile plus loin car, lorsque le silicium se solidifie après une irradiation, il redevient presque parfaitement cristallin (des défauts ponctuels sont formés mais un recuit est nécessaire afin de les apercevoir sous forme de dislocations (Liao 2005)). La disparition des défauts dus à l'implantation ionique après resolidification nous indique alors le diamètre maximum de la surface fondue lors de l'irradiation laser.

Des couches métalliques peuvent être aperçues sur les différents échantillons analysés. La figure 4.11 montre un via ainsi que la première couche de métal probablement formée d'aluminium, de cuivre et de tungstène (Cote et al. 1999). Puisque ces couches ne sont pas présentes au dessus des zones irradiées, une caractérisation plus poussée n'a pas été réalisée.

4.2.2 Analyse chimique

Une analyse EDS a été effectuée pour obtenir la caractérisation chimique des couches diélectriques recouvrant une résistance diffusée. La figure 4.12 montre l'intensité des pics associés au silicium, à l'oxygène, au phosphore et au fluor selon l'emplacement du faisceau électronique sur les diélectriques pré-métalliques. Comme ex-

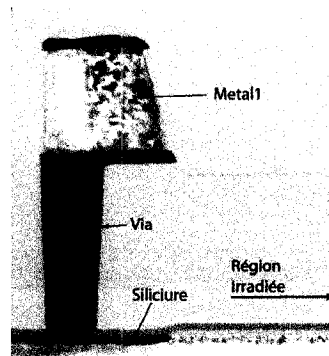


FIGURE 4.11 – Vue d'un via et de la première couche de métal au dessus du silicium.

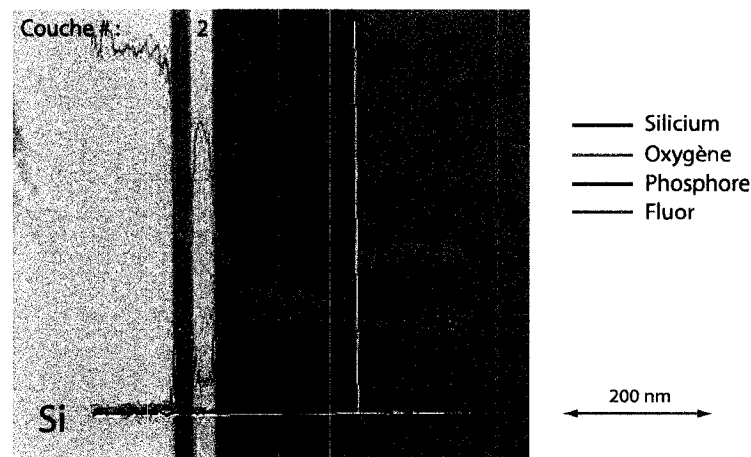


FIGURE 4.12 – Analyse des rayons X émis (EDS) au niveau des diélectriques pré-métalliques.

pliqué précédemment, l'intensité des pics n'est pas directement proportionnelle à la présence d'un élément et il est difficile de déterminer précisément la stoechiométrie des couches.

Aucun autre élément n'est détecté dans le silicium même s'il est dopé, la concentration des impuretés étant plus faible que la limite de détection de 1% de la méthode EDS. Les couches diélectriques 1 et 4 ont une composition très semblable. La première étant déjà identifiée comme l'oxyde RPO, on s'attend à ce que la couche 4 soit aussi formée de SiO_2 . Au niveau de la couche 2, on remarque une hausse significative du signal rayon X lié au silicium et une baisse correspondante du signal de l'oxygène.

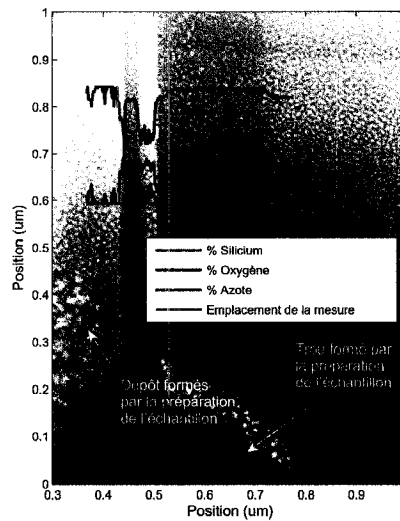


FIGURE 4.13 – Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) des diélectriques pré-métalliques de la technologie 180 nm.

La comparaison avec les signaux des couches 1 et 4 suggère une composition de type SiO_x où x est inférieure à 2. Finalement, la couche 3 est caractérisée par la présence du signal rayon X du phosphore et d'une baisse de celui du silicium, suggérant la présence dans cette couche d'un oxyde fortement dopé.

Des analyses ont aussi été faites sur toutes les couches diélectriques intermétalliques. Les intensités rayon X sont semblables à celles d'un oxyde de silicium avec en plus un signal lié au fluor dont l'intensité varie de façon brusque à chaque couche intermétallique visible au MET.

Afin de détecter la présence de l'azote et déterminer plus précisément la composition relative des éléments dans les couches, une tranche MET d'un échantillon non irradié a été amincie localement de façon à faire un trou et ainsi avoir une épaisseur idéale pour les mesures EELS. Un tel amincissement local implique un bombardement perpendiculaire à la zone étudiée avec le faisceau de gallium du FIB et peut entraîner une modification des ratios d'élément de l'échantillon. Cela explique aussi la formation de dépôt tel que vu sur la figure 4.13.

Les résultats de la figure 4.13 indiquent la présence d'une faible quantité d'azote dans la deuxième couche diélectrique, ce que ne permettait pas l'analyse EDS. Le signal EELS du silicium et de l'oxygène tend à varier d'une couche à l'autre de façon semblable aux résultats au rayon X. Le signal du phosphore n'a pas été considéré puisque la modélisation de son bruit de fond était trop influencée par le signal du silicium.

Bien que l'analyse qualitative EELS est cohérente avec les résultats EDS, l'analyse quantitative donne des résultats improbables, par exemple un taux d'oxygène beaucoup trop élevé dans les couches d'oxyde (couches 1, 3 et 4) pour être chimiquement stable. Cela est probablement causé par la méthode de préparation d'échantillon et par les erreurs de modélisation du bruit de fond du logiciel d'analyse.

4.2.3 Identification des couches diélectriques

À l'aide des résultats précédents et de références de bases sur les matériaux utilisés dans les circuits intégrés, il est possible de faire l'identification des couches diélectriques et d'en déduire leurs propriétés.

La première couche située directement au-dessus du silicium est l'oxyde RPO (*Resist protective Oxide*) qui sert de masque et empêche le métal de former des siliciures lors de la fabrication des vias métalliques. Même s'il y a peu d'information disponible sur la nature de cette couche on sait qu'elle est déposée par CVD et que son ratio silicium - oxygène est stoechiométriquement semblable au SiO_2 afin qu'elle adhère bien au silicium et qu'elle résiste bien à la température nécessaire à la formation des siliciures (Cote et al. 1999)

La deuxième couche est principalement composée de silicium, d'oxygène et d'azote. La principale utilisation de ces oxynitrides de silicium est la fabrication de couches antiréfléchissantes (ARC) nécessaires dans les nouveaux procédés de photolithographie. L'un des problèmes qui diminue la résolution d'un procédé de fabrication photolithographique est la présence d'interférences dans la résine photosensible engendrées par

la lumière incidente et celle réfléchiée par le silicium ou par une couche métallique. Le fait que la résine ne soit pas également irradiée augmente les dimensions critiques du procédé. Il est possible de contrer ce phénomène en incorporant une couche de SiO_xN_y qui a comme fonction d'annuler la réflexion par absorption ou par interférence. Dans le premier cas, le ratio d'oxygène et d'azote est ajusté de façon à égaler l'indice de réfraction de la couche suivante tout en gardant un coefficient d'absorption non nul. Dans le deuxième cas, l'épaisseur de la couche est ajustée de façon à ce que la réflexion sur la couche de SiON interfère négativement avec la réflexion sur la couche inférieure de silicium ou métallique. En pratique, les couches antiréfléchissantes combinent les deux effets afin d'avoir un résultat optimal neutralisant presque complètement les effets d'interférence dans la résine aux longueurs d'onde du spectre ultraviolet utilisées en photolithographie (Kumar et al. 2004).

Les couches de SiON peuvent être déposées par CVD et n'ont pas une stoechiométrie stable avec la température (Cote et al. 1999). Aussi, à cause de leurs propriétés optiques différentes des autres diélectriques, on entrevoit des problèmes particuliers lors de l'irradiation laser.

La troisième couche diélectrique est formée de silicium, d'oxygène et de phosphore. Ce type de diélectrique est couramment nommé PSG (*Phosphosilicate Glass*). Les oxydes de silicium dopés au phosphore sont très répandus comme diélectrique pré-métallique dans le domaine des circuits intégrés. Ils ont comme principales caractéristiques de très bien remplir les trous de rapport d'aspect (*aspect ratio*) élevé et d'être déposés par plusieurs techniques à basse température (Adler et al. 1995). Ils s'intègrent bien aux méthodes de fabrication car ils sont caractérisés par une très bonne sélectivité de gravure et un taux élevé de polissage. Finalement le dopage au phosphore permet au PSG de capter les ions provenant des dépôts par plasma des étapes subséquentes de fabrication avant qu'ils n'atteignent et endommagent la grille et la surface de silicium. On insère dans l'oxyde entre 3% et 8% massique de phosphore afin de garder des propriétés mécaniques nécessaires à la longévité des circuits.

Comme le PSG est transparent dans le visible, sa présence ne devrait pas affecter le parcours du faisceau laser. Cependant, son dopage diminue sa stabilité mécanique et son point de fusion sous 1000°C (Cote et al. 1999), et il est possible que cette couche soit altérée si la diffusion de la chaleur de la zone fondue devient importante.

Les autres couches diélectriques sont des oxydes de silicium, principalement dopés au fluor, qui sont déposées par plasma (PECVD). Ces FSG (*fluorosilicate glass*) ont la particularité d'avoir une permittivité diélectrique basse qui diminue le délai RC des interconnexions métalliques. La permittivité d'un oxyde standard varie autour de 4,1 - 4,2 F/m alors que ceux dopés au fluor voient leur permittivité baisser entre 3,0 - 3,7 F/m. Les FSG sont stables jusqu'à un ratio F/O de 4% mais pour contrer les problèmes d'électromigrations, les fonderies utilisent plutôt un dopage de l'ordre de 3% (Cote et al. 1999).

4.3 Caractérisation des zones irradiées par laser

4.3.1 Impulsion longue et intense produisant un point noir

Afin de clarifier les étapes se passant lors de l'irradiation d'une résistance diffusée par laser, des échantillons ayant subi des irradiations associées à des comportements de la puissance réfléchie précis ont été analysés. Le premier échantillon a subi une impulsion en dent-de-scie de puissance crête de 1,5 W et d'une durée totale de 400 ns. Une telle impulsion permet normalement à une quantité suffisante de dopants de migrer et de former un lien résistif. Aussi, l'irradiation laisse un point noir d'environ 1,5 μm de diamètre (figure 4.14) visible au microscope optique.

4.3.1.1 Imagerie des déformations

La figure 4.15 montre des images prises au MET de la tranche de l'échantillon de la figure 4.14. On y aperçoit plusieurs modifications autant au niveau des diélectriques que du silicium. On remarque que la distance entre les déformations liées aux régions

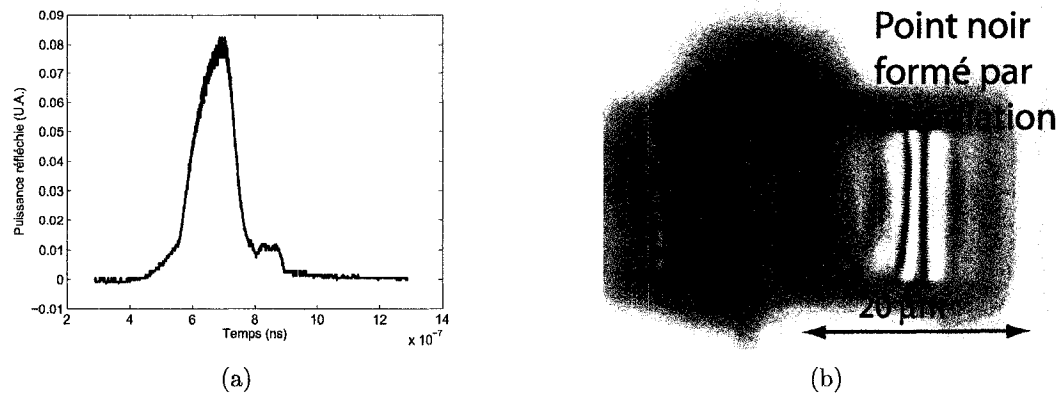


FIGURE 4.14 – (a) : Mesure *in-situ* de la puissance réfléchie d'un échantillon ayant subi une impulsion en dent-de-scie de puissance crête de 1,5 W et de 400 ns. (b) : Point noir formé par l'impulsion sur la cible du circuit intégré

dopées atteint $2,8 \mu\text{m}$ ce qui est beaucoup plus grand que le diamètre du laser sonde. De plus, l'interface silicium-diélectriques est fortement altérée et ressemble à un « sombrero », qui est une forme typique résultant de la fonte de silicium par un laser focalisé. Elle peut être occasionnée par des effets Marangoni et par un phénomène de changement de densité lors de la solidification du silicium. Ces phénomènes seront traités plus en détail au prochain chapitre. Au centre de l'irradiation, les interfaces des deux premières couches de diélectrique ont disparues suggérant qu'elles ont fondu et qu'elles se sont mélangées. Il en va de même pour la couche de PSG qui a été altérée par la déformation du silicium. De chaque côté du sombrero, on aperçoit des trous créés à l'intérieur du dispositif lors de l'irradiation.

Il est à remarquer que la largeur du sombrero correspond au diamètre du point noir vue au microscope (figure 4.14). Il est difficile cependant de savoir si ce point optique est principalement causé par le fait que la lumière incidente réfléchie sur la bosse n'est pas redirigée vers le microscope ou par une plus grande absorptivité des diélectriques fondus et mélangés.

Les autres interfaces semblent beaucoup moins affectées. L'interface entre la couche de PSG et l'oxyde située au-dessus semble légèrement courbée au niveau de la bosse de

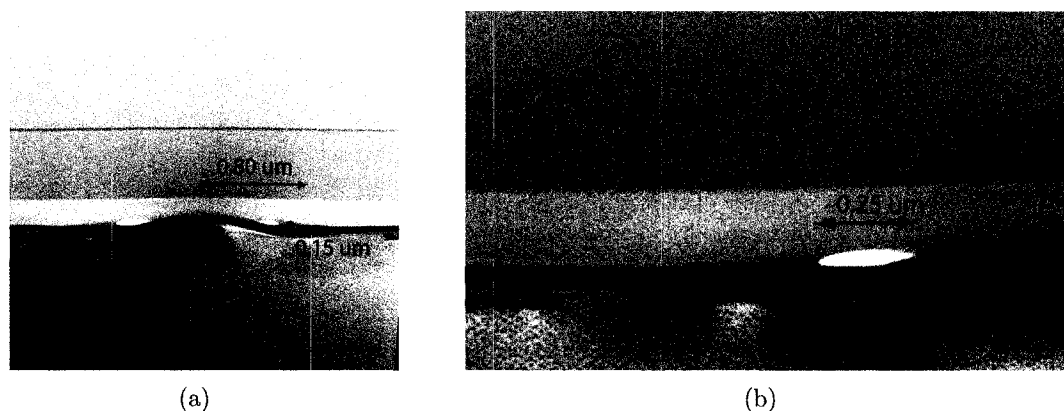


FIGURE 4.15 – Images MET de la déformation créée par une pulsion en dent-de-scie de puissance crête de 1,5 W et de 400 ns. (a) : Vue d'ensemble. (b) : Agrandissement du trou gauche de (a).

silicium. Il en est de même pour l'interface entre cette couche d'oxyde et la première couche d'oxyde intermétallique mais dans proportion bien moindre (déviations de moins de 15 nm par rapport à la frontière initiale). Toutes les couches plus élevées n'ont pas été affectées par l'irradiation laser.

4.3.1.2 Analyse chimique

Des analyses EELS ont été réalisées afin de déterminer la composition des diélectriques suite aux déformations. La figure 4.16 montre le pourcentage atomique de silicium calculé à différents endroits de la surface déformée.

On remarque que les profils de concentrations de silicium ressemblent sensiblement à celui mesuré sur un échantillon non irradié (figure 4.17). Même si les frontières ne sont plus visibles en mode imagerie du MET, on détecte au-dessus de la bosse de silicium deux minces couches de compositions chimiques semblables à l'oxyde RPO et à la couche ARC. Cette dernière s'est élargie indiquant une diffusion importante du silicium dans les couches de RPO et PSG avoisinantes. Les mesures plus éloignées du centre de l'irradiation sont caractérisées par la présence d'un plateau de concentration de silicium au-dessus de la couche de ARC et qui coupe abruptement à l'intérieur de

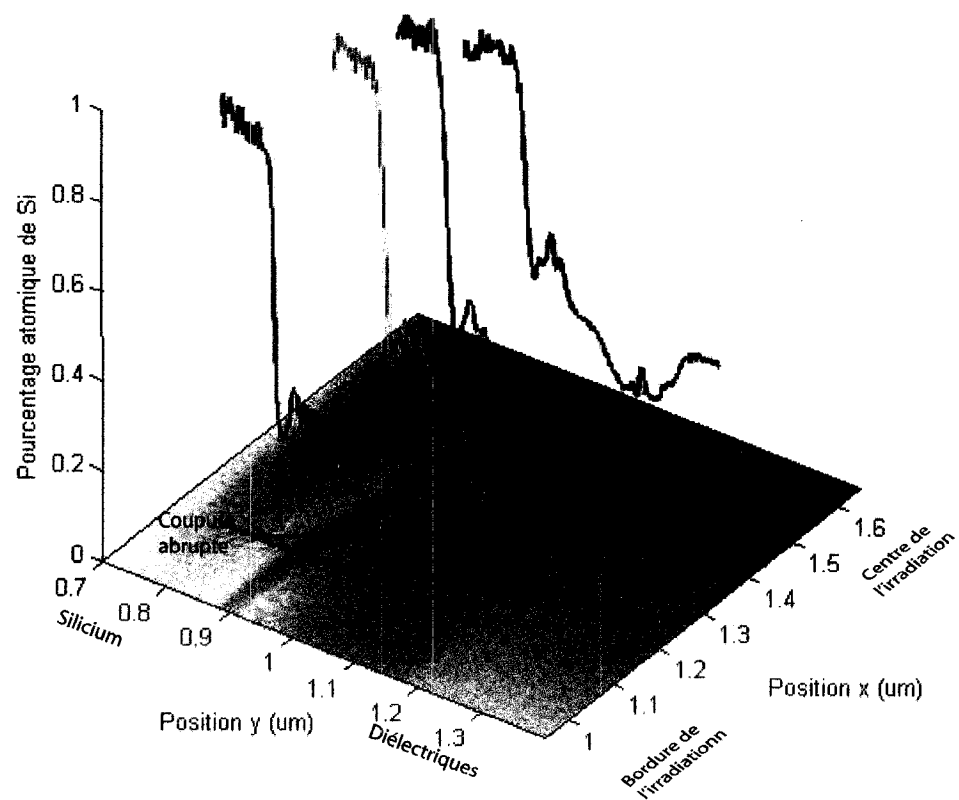


FIGURE 4.16 – Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) du silicium pour un échantillon fortement déformé.

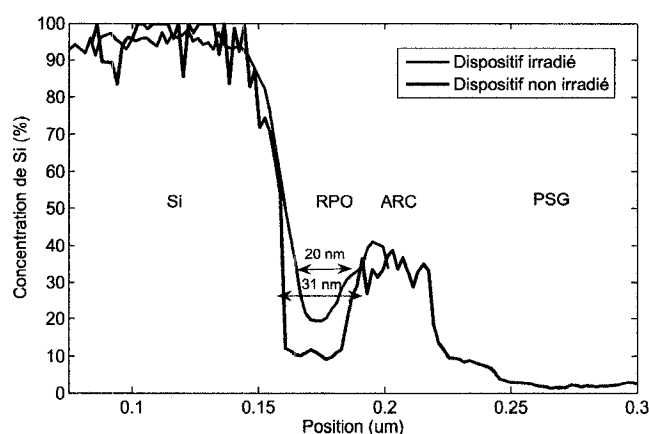


FIGURE 4.17 – Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) du silicium au centre de la cible pour un échantillon irradié et non irradié.

la couche de PSG. Ce résultat suggère que la fonte de la couche de PSG a progressé jusqu'à cette épaisseur laissant diffuser librement le silicium de la couche de ARC liquide. Cette hypothèse est aussi appuyée par le fait qu'à partir de cette coupure, la composition chimique des diélectriques semble inchangée. En s'approchant du centre de l'irradiation, on voit apparaître un pic de silicium à l'intérieur de la couche de PSG. À cela est aussi associée une transition beaucoup plus graduelle du taux de silicium entre la couche de ARC et de PSG indiquant qu'au centre de l'irradiation, toute la couche de PSG a été modifiée par la chaleur et la pression causée par la bosse de silicium, alors qu'en bordure d'irradiation, seule une partie de la couche semble avoir été affectée.

La figure 4.18 montre le résultat de l'analyse EELS pour le phosphore. Cet élément, présent initialement seulement dans la couche de PSG, a diffusé dans les couches adjacentes. La présence du pic de phosphore à la frontière Si - Diélectriques est difficile à expliquer. Il ressemble à un pic de ségrégation en solution, mais ce phénomène est généralement assez faible dans le cas du phosphore (le coefficient de répartition dans l'oxyde de silicium n'est pas connu, mais dans le silicium on a $k = 0,35$ (Yoshikawa et Morita 2003)). Aussi, la concentration de l'impureté vers la région contenant le

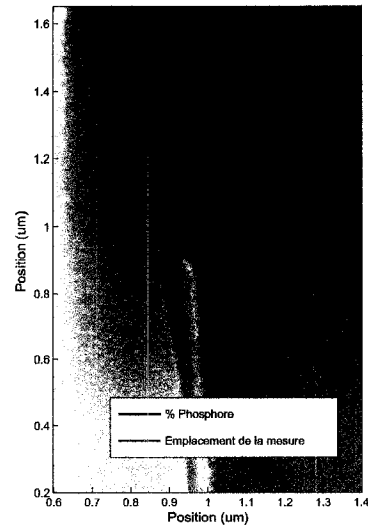


FIGURE 4.18 – Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) du phosphore sur un échantillon fortement déformé.

dopant diminue normalement dans les cas de ségrégation de solution alors que dans ce cas elle augmente (Wood et al. 1981). Le pic serait donc une erreur du traitement du bruit fond du spectre EELS entre la frontière Si - Diélectrique.

La valeur de la résistance diffusée étant généralement déterminée par les propriétés du silicium, une analyse EELS a été faite au centre du *sombrero* en silicium. L'azote et le phosphore n'ont pas été détectés dans cette région mais on aperçoit la présence de quelques pourcents atomiques d'oxygène (figure 4.19). Il est connu que l'oxygène diffuse dans le silicium lors de la création de résistances diffusées par laser influençant son comportement électrique et diminuant son point de fusion (Liao 2005).

Les analyses chimiques sur l'échantillon fortement déformé par l'irradiation laser montrent que les différentes couches diélectriques n'ont pas été totalement détruites. Les résultats suggèrent que ces dernières ont bel et bien fondu, ont été repoussées par la déformation de silicium et ont diffusé entre-elles, mais qu'il est toujours possible d'apercevoir leur frontière.

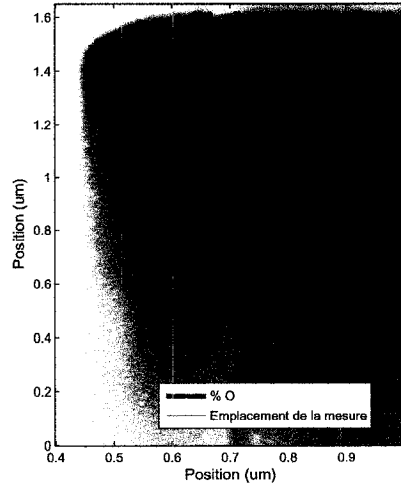


FIGURE 4.19 – Spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) de l'oxygène à travers la déformation de silicium. Noter que le trou est le résultat de l'amincissement local de l'échantillon.

4.3.2 Impulsions moins intenses, produisant un point blanc

Les prochaines expériences servent à analyser le comportement du circuit intégré lors de la transition entre la création d'un point blanc (juste avant la baisse de la puissance réfléchie) et d'un point noir (après cette baisse). Les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie associées aux impulsions envoyées ainsi que les déformations visibles au microscope optique sont montrées à la figure 4.20.

Des images MET ont été prises de l'échantillon ayant un point noir visible optiquement (figure 4.21). On remarque qu'il y a beaucoup moins de déformation que dans l'échantillon de la figure 4.15. La couche d'oxyde RPO ainsi que la couche de ARC sont aussi fortement endommagées au centre de l'irradiation. Une protubérance à l'intérieur des couches diélectriques un peu semblable au *sombrero* décrit précédemment est visible. La dimension de la bosse et du bris des couches diélectriques est la même que celle du point noir observé optiquement, soit $0,65\ \mu\text{m}$. On peut donc considérer que le point noir est formé par ces phénomènes.

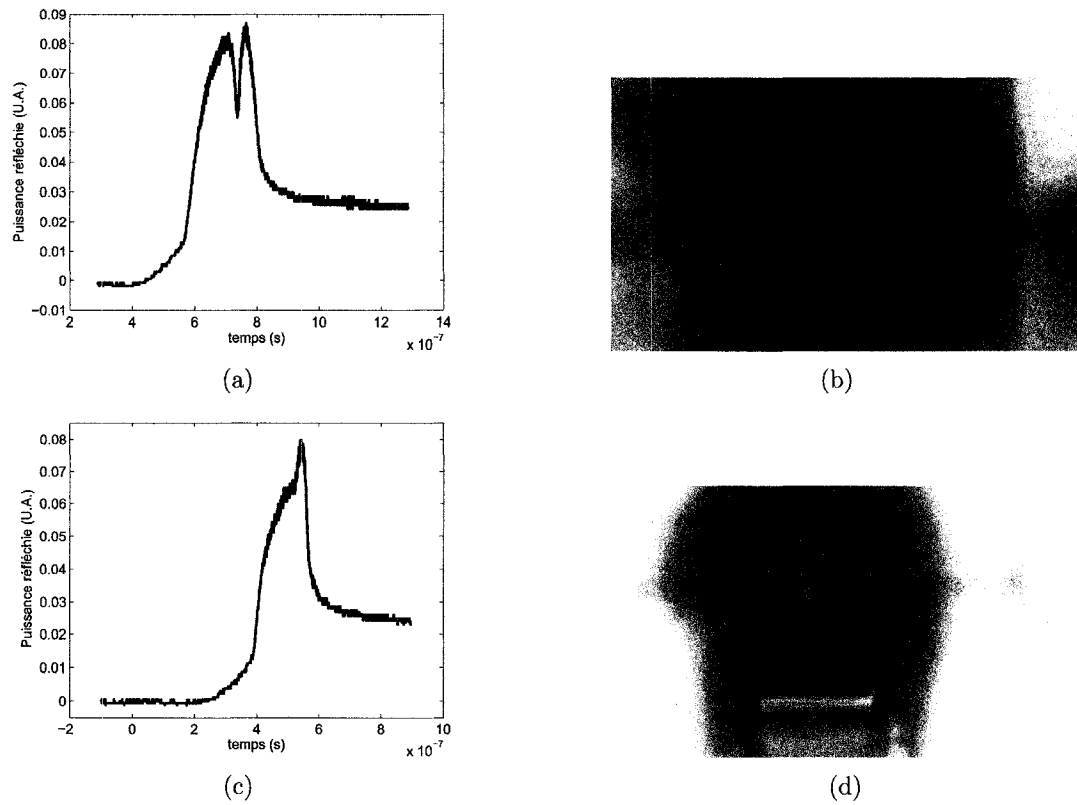


FIGURE 4.20 – Mesures de la puissance réfléchie, (a) et (c), et images optiques, (b) et (d), d'échantillons où l'irradiation a créé un point blanc (d) et tout juste un point noir (b). (a) et (b) : Pulse en dent-de-scie de 344 ns et 1,29 W crête. (c) et (d) : Pulse en dent-de-scie de 312 ns et 1,43 W crête.

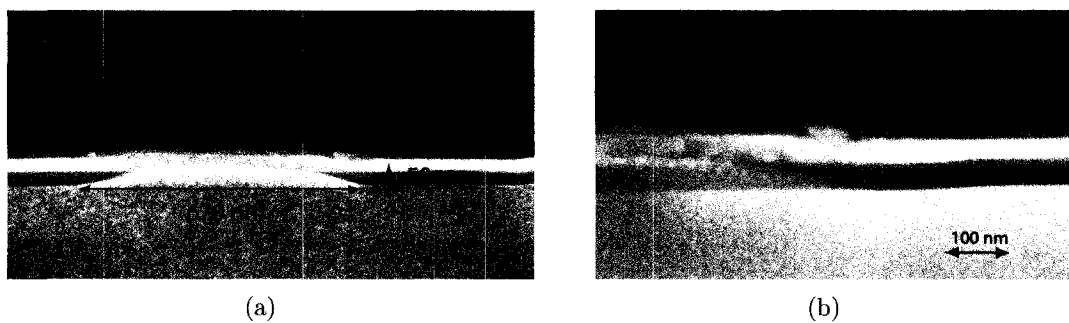


FIGURE 4.21 – Images MET de l'échantillon ayant tout juste créé un point noir. (a) : Vue générale. (b) : Agrandissement de la partie de droite de (a).

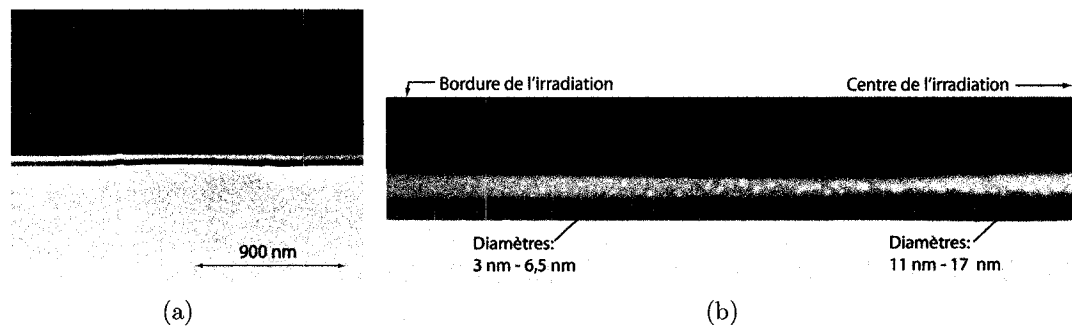


FIGURE 4.22 – Images MET de l'échantillon ayant créé un point blanc. (a) : Vue générale. (b) : Agrandissement de la partie de gauche et dimensions des phases vues de la couche de ARC.

Lorsqu'on regarde l'image agrandie, on remarque que seule la couche de ARC semble touchée loin du centre de la zone irradiée. Cela démontre une plus grande fragilité de cette couche face aux hausses de température et/ou une absorption plus importante d'énergie optique que les autres couches.

La figure 4.22 montre les images prises au MET d'un échantillon irradié de façon à produire seulement un point blanc visible au microscope optique. On remarque qu'il n'y a pas de déformation visible provoquée par l'irradiation (les deux légères bosses présentes au niveau du silicium sont des défauts créés par le processus de fabrication du circuit et non de l'irradiation). La couche de ARC présente des précipités seulement détectés dans un échantillon irradié et qui grossissent lorsqu'on se rapproche du centre de l'irradiation.

Il a été impossible de déterminer avec certitude la nature chimique ou la cristallinité des précipités à cause de leurs petites tailles par rapport à l'épaisseur de l'échantillon. Cependant, le fait qu'ils soient plus clairs que la matrice en mode fond sombre du STEM indique qu'ils ont une densité plus élevée que celle-ci. Il est fort probable que ces précipités soient formés de silicium. Comme décrit à la section 4.2.3, la couche de ARC est formée d'un composé non stoechiométrique de silicium, d'oxyde et d'azote. Le diagramme de phase du silicium et de l'oxygène (figure 4.23) indique que pour des températures allant jusqu'à 1300 ° C, le système tend à former une phase

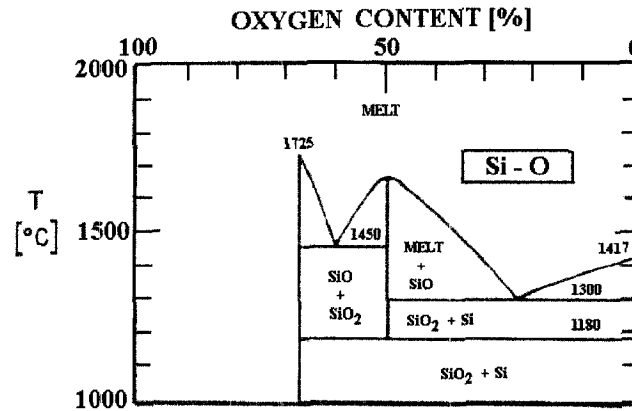


FIGURE 4.23 – Diagramme de phase des alliages Si - O en fonction de la température (Wolf 1969).

de SiO_2 et une autre de Si pur. En chauffant la couche avec le laser, une redistribution des éléments est stimulée de façon à être plus stable en formant des nanoparticules de silicium.

Ce phénomène est bien connu dans les couches de SRSO (*Silicon-Rich Silicon Oxide*) qui sont très semblables en composition aux couches de ARC. Les couches de SRSO sont surtout utilisées dans la fabrication de dispositifs optoélectroniques dans le silicium. En chauffant ces couches entre 1100 $^{\circ}\text{C}$ et 1300 $^{\circ}\text{C}$, il est possible de produire une bonne quantité de nanoparticules émettant une photoluminescence entre 700 nm et 900 nm lorsqu'irradiées par un laser argon (488 nm) (Iacona et al. 2000). Des études à l'aide de diffraction de rayons X ont révélé que de telles nanoparticules sont fortement cristallines et que leur dimension augmentait avec le temps de recuit. Il est fortement probable que ces conclusions s'appliquent aux nanoparticules détectées dans la couche de ARC.

Dans les couches de ARC irradiées et chauffées par le laser, les nanoparticules de silicium agiraient comme centre de diffusion de la lumière dans le microscope optique, créant ainsi un point blanc. En comparant les dimensions du point blanc et la distribution spatiale des nanoparticules des images MET, on déduit que seules

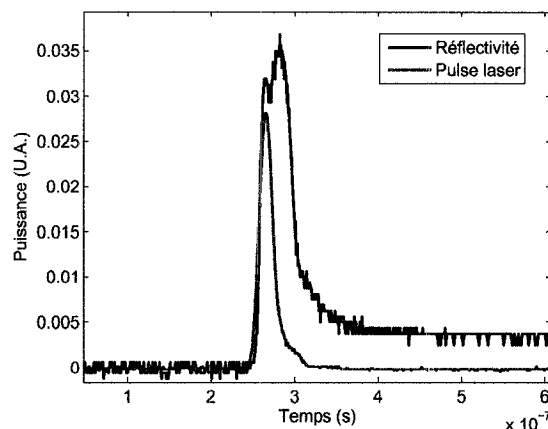


FIGURE 4.24 – Mesure *in-situ* de la puissance réfléchie et profil temporelle d'une impulsion lors d'une irradiation de 20 ns et de puissance crête de 2,5 W

les plus grosses nanoparticules, dont le diamètre est supérieur à 12 nm, modifient suffisamment la couche pour provoquer une tache visible au microscope optique.

4.3.3 Irradiation courte

Les irradiations utilisées pour former les échantillons précédents étaient suffisamment longues pour laisser le temps à la chaleur de se propager dans le silicium et dans les diélectriques, permettant aussi aux effets de convection et Marangoni de bien s'établir. Un échantillon a donc été fait avec une succession d'impulsions carrées très courtes de 20 ns et de 2,5 W, suffisamment intense pour créer une résistance. La figure 4.24 montre que la mesure *in-situ* de la puissance réfléchie a une largeur à mi-hauteur de 40 ns, ce qui est une indication du temps d'interaction de la chaleur sur le dispositif.

Les images acquises au MET sur un échantillon irradié par 10 impulsions (afin de créer un lien résistif) sont assez semblables à celles sur l'échantillon de la section 4.3.1. Il y a une déformation de type *sombrero* sur la surface de silicium, destruction des deux premières couches diélectriques, présence de trous à l'interface PSG - ARC et diffusion marquée au bas de la couche de PSG. Il faut faire attention cependant dans

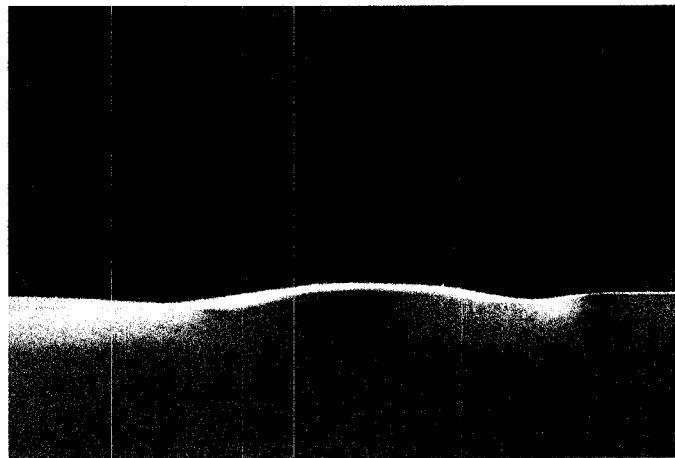


FIGURE 4.25 – Image MET d'un échantillon irradié par 20 impulsions de 20 ns de puissance crête de 2,5 W.

l'analyse des dimensions puisque plusieurs indices lors de la fabrication de l'échantillon laissent présager que la coupe a été décentrée par rapport au centre de l'impulsion. À la différence de tous les autres échantillons étudiés précédemment, le diamètre du point noir optique observé sur cet échantillon est plus grand que la déformation sur l'image MET et les trous sont relativement très gros par rapport à la déformation *sombrero*. Ces mesures suggèrent qu'il est impossible d'éviter de créer la formation de déformations et de défauts dans les diélectriques lors de la création d'une résistance diffusée en technologie 180 nm.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES COMPORTEMENTS DE LA PUISSANCE RÉFLÉCHIE

Les résultats de mesures *in-situ* de la puissance réfléchie montrent de grandes différences selon que ce soit un silicium nu ou un circuit intégré qui est analysé. Il a aussi été démontré que l'irradiation d'un circuit par un laser focalisé intense cause plusieurs variations structurales. Le présent chapitre fera des liens entre ces modifications au circuit et les mesures de la puissance réfléchie de façon à obtenir le plus d'informations possibles de la mesure *in-situ* optique.

5.1 Variations des propriétés optiques des matériaux

Les matériaux identifiés au chapitre précédent ont des propriétés optiques qui varient grandement avec la température. Par exemple, la réflectivité du silicium augmente de façon monotone avec la température et présente un saut rapide lors du changement de phase. Comme ces changements sont pris en compte dans le modèle de la section 1.4.2, ils ne peuvent à eux seuls expliquer les comportements de la puissance réfléchie des circuits intégrés sous irradiation.

Les propriétés optiques de l'oxyde de silicium sont peu connues à des températures élevées et encore moins au-dessus de son point de fusion. Une étude montre que la présence d'une couche d'oxyde sur le silicium a pour effet d'augmenter la réflectivité à haute température (Heller et al. 1999). L'ajout d'une couche d'oxyde de $2\ \mu\text{m}$ sur du Si diminue légèrement la réflectivité à la température ambiante mais l'augmente de l'ordre de 15% à 20% à plus haute température (tests effectués avec la longueur d'onde $\lambda = 633\ \text{nm}$). La présence d'une couche d'oxyde peut donc expliquer la montée

beaucoup plus rapide de la puissance réfléchie sur les circuits intégrés comparée aux résultats sur silicium nu. Néanmoins, il faut faire attention avant d'extrapoler ces résultats aux températures atteintes par le procédé de fabrication de résistances diffusées car ces travaux ont été effectués à des températures maximales de 260 ° C.

Dans le cas spécifique de la technologie 180 nm, la couche de ARC possède probablement des propriétés optiques variant fortement avec la température. Même si la couche est conçue pour être absorbante à basse température dans l'ultraviolet, les résultats de mesure de la puissance réfléchie absolue de la section 3.3 indiquent qu'il est fort probable qu'elle absorbe aussi dans le visible. Aussi, à haute température, il y a probablement la formation de précipités de silicium dans cette couche ce qui augmente sa réflectivité et son absorptivité optique. Comme ces précipités demeurent après refroidissement, ils seraient partiellement responsables de la montée de la puissance réfléchie observée après une irradiation formant un point blanc visible à la surface.

Il y a peu d'information sur le comportement optique en température des autres couches diélectriques (PSG, FSG). On présume qu'ils agissent comme des oxydes réguliers augmentant ainsi la réflectivité du dispositif lors de la montée de la température.

5.2 Variations des propriétés physiques des matériaux

Les propriétés mécaniques des couches ont aussi des conséquences sur les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie. Lors du chauffage, la diffusion intercouche et les mouvements de convection changent la structure des interfaces entre les diélectriques, affectant grandement de la puissance réfléchie optique.

En technologie 180 nm, la couche de ARC change énormément de propriétés physiques. C'est probablement cette couche qui est la première à être endommagée

par l'irradiation. Si elle est absorbante à la longueur d'onde de fonte (532 nm) sa température va monter très rapidement car elle est isolée thermiquement par les autres couches diélectriques. Cette hausse de température permet aux nanocristaux de silicium de se former très rapidement. En supposant que la distance moyenne qu'un atome doit se déplacer lors d'une impulsion de $\Delta t = 200 \text{ ns}$ pour permettre la formation des précipités soit de l'ordre de $x = 4 \text{ nm}$ (soit environ le quart du diamètre d'un de ces précipités), le coefficient de diffusion D correspondant vaudrait :

$$D = \frac{x^2}{2 \cdot \Delta t} = 0.9 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad (5.1)$$

ce qui est très élevé pour un milieu solide (Hiroshi 1963). Il est fort probable que la couche de ARC soit partiellement fondue lors de la formation des nanocristaux.

Si la couche de ARC atteint une température près de son point de fusion, les couches diélectriques avec lesquelles elle est en contact doivent aussi atteindre des températures élevées à cause de la diffusion thermique. Comme ces couches sont formées d'oxyde ayant un point de fusion inférieur à l'oxyde cristallin, autour de 1000°C dans le cas du PSG, si elles ne sont pas liquides, elles devraient avoir perdu beaucoup de leur propriété mécanique (rigidité) lorsque la couche de ARC change de structure. Elles peuvent alors facilement se déformer.

Que ce soit par conduction ou par absorption optique, la couche de silicium monte en température durant l'irradiation. Le silicium fond à une température de 1687 K , température généralement inférieure à celle de fusion de l'oxyde de silicium cristallin mais supérieure à la plupart des températures de fusion des diélectriques présents. Lorsque la région fondue est assez importante, des courants de convection de type Marangoni poussent sur les diélectriques de façon à adopter une forme de sombrero (Bäuerle 2000) présente à la figure 4.15. Si les diélectriques avaient conservé toutes leurs propriétés mécaniques, ils empêcheraient une telle déformation. Cependant, les mesures montrent que le silicium perce les couches diélectriques et force les éléments de ceux-ci à se déplacer vers les bords ou dans les autres couches.

Les conséquences sur la puissance réfléchie des changements de propriétés physiques (telles les déformations) se doivent d'être assez différentes pour la première irradiation que pour les irradiations subséquentes. Si la transition d'un empilement plat à un empilement déformé cause une modification permanente lors de la première mesure *in-situ* de la puissance réfléchie, cette modification devrait être peu ou pas présente lors des irradiations subséquentes. Les expériences montrent que pour des irradiations longues de quelques centaines de nanosecondes il y a peu ou pas de changements dans les mesures de la puissance réfléchie, suggérant que les déformations d'une irradiation à l'autre soit faibles et que seule la diffusion intercouche s'accroît à chaque irradiation. L'effet de ces déformations sur la puissance réfléchie devrait donc être unique à la première impulsion.

5.3 Analyse des mesures de la puissance réfléchie lors d'une impulsion en dent-de-scie

Les courbes de mesure de la puissance réfléchie du chapitre 3 mesurées sur des technologies de circuits intégrés ont en général une forme représentée à la figure 5.1. On remarque que la courbe peut être séparée en trois zones aux comportements différents.

La première zone est caractérisée par une montée plutôt linéaire de la puissance réfléchie. Si on envoie plusieurs impulsions identiques montrant un comportement de la puissance réfléchie atteignant seulement la première zone, la mesure obtenue est toujours semblable. Aucune déformation ou modification permanente n'est aperçue sur le circuit si l'impulsion ne devient pas assez puissante pour faire passer la puissance réfléchie dans la prochaine « zone ». De plus, il est certain que le silicium ne fond pas entre autre puisqu'aucune résistance ne peut être formée à cette étape. Cette montée de puissance réfléchie est donc simplement associée à une montée de la réflectivité

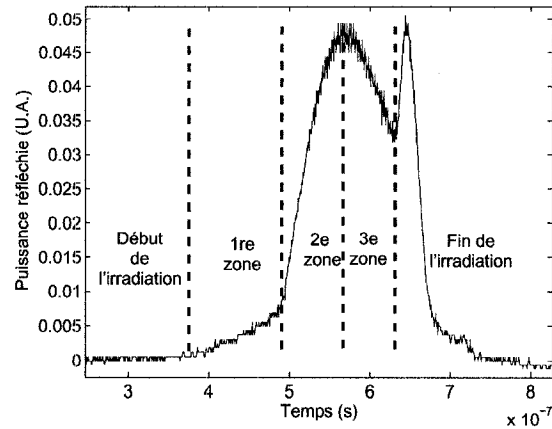


FIGURE 5.1 – Séparation d’une mesure de la puissance réfléchie (technologie 250 nm) en zones de comportements typiques.

du silicium avec la température, ce qui est d’ailleurs prédit dans les simulations de la section 1.4.2 sur silicium nu.

La deuxième zone est caractérisée par une montée linéaire de la puissance réfléchie possédant une pente beaucoup plus élevée que celle de la zone précédente. Elle est également peu influencée par le nombre d’impulsions de ce type envoyées au même endroit. Les résultats du modèle de simulation sur le silicium nu associent ce type de pente à la fonte de silicium ou du moins à l’atteinte d’une température proche du point de fusion. Les expériences démontrent cependant que le silicium ne fond probablement pas lorsque cette montée arrive car il est impossible de créer un lien résistif et aucune déformation n’est visible à la surface de silicium. De plus, on observe cette montée avec des irradiations de puissance bien inférieure à ce qui serait nécessaire pour avoir le même comportement sur silicium nu. Dans le cas de la technologie *TSMC 180 nm*, cette zone correspond aussi à la création de nanoparticules dans la couche de ARC. On peut alors faire l’hypothèse que cette zone est caractérisée par une montée importante de la température des diélectriques, affectant leur épaisseur et leur indice de réfraction. Il est possible que vers la fin de cette zone, il y ait une légère fonte du silicium et que les diélectriques commencent à interdiffuser entre eux.

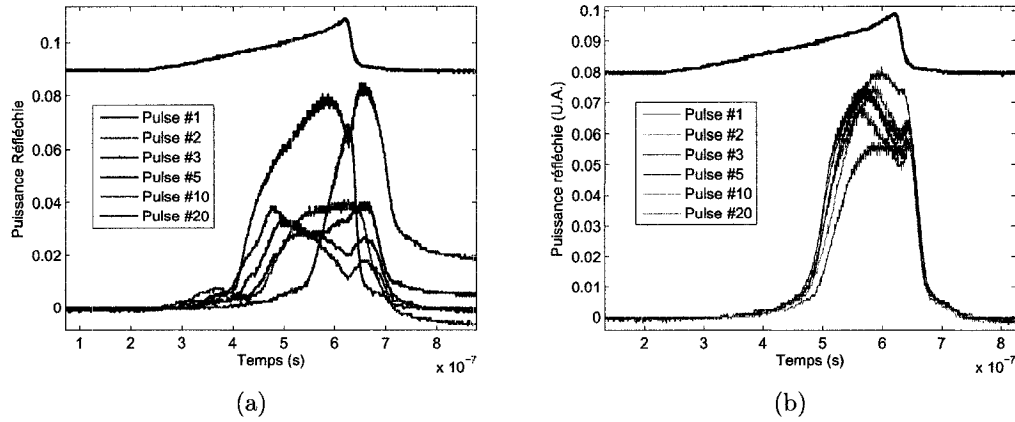


FIGURE 5.2 – Mesures de la puissance réfléchie prises pour des impulsions successives identiques. (a) : Impulsions en dent-de-scie de 1,5 W sur technologie 180 nm. (b) : Impulsions en dent-de-scie de 1,5 W sur technologie 350 nm.

La troisième zone est caractérisée par une baisse de la puissance réfléchie suivie d'un comportement aléatoire, surtout lorsque l'intensité laser maximale est très grande. Les analyses de la section 4.3 montre que pour la technologie *TSMC 180 nm*, la troisième zone est intimement liée au déplacement du silicium dans les couches diélectriques. Pour permettre cela, un changement des propriétés mécaniques des diélectriques est nécessaire, principalement au niveau de leur rigidité. Même si les propriétés optiques à très haute température de ces diélectriques ne sont pas connues, on anticipe que ces modifications de propriétés ont pour conséquence de diminuer la puissance réfléchie expliquant ainsi la baisse de puissance de la zone 3.

Tel que présenté à la figure 5.2, lorsque plusieurs impulsions du même type sont envoyées et dont la première montre le profil de la troisième zone, les mesures de la puissance réfléchie subséquentes sont généralement assez différentes suggérant l'implication d'un processus cumulatif d'une irradiation à l'autre lorsqu'on atteint cette zone. En technologie *TSMC 180 nm*, on observe généralement une diminution de la puissance réfléchie maximale lors des impulsions suivant la première. Ce phénomène est probablement relié à la destruction des premières couches diélectriques et principa-

lement de la couche de ARC, qui ne peuvent plus engendrer la même hausse rapide de la puissance réfléchie typique de la deuxième zone pour les impulsions subséquentes. Il est intéressant d'observer qu'après plusieurs impulsions (une vingtaine) le comportement de la puissance réfléchie devient très semblable à celui mesuré sur le silicium nu, comme si l'influence des couches diélectriques était rendue nulle lorsqu'elles sont trop endommagées.

Dans le cas des deux autres technologies analysées, les couches diélectriques sont moins affectées possiblement en raison de l'absence de la couche de ARC. La diminution de la puissance réfléchie du faisceau sonde n'est observée que durant les premières impulsions et disparaît essentiellement après plusieurs irradiations. Il est probable que l'interdiffusion entre les diélectriques et le silicium augmente l'absorption optique et abaisse la température de fonte des diélectriques leur permettant pour une même puissance laser d'avoir une plus grande modification de leurs propriétés mécaniques et donc une plus grande diminution de la puissance réfléchie. Même si le mécanisme n'est pas entièrement compris, les résultats suggèrent que lorsque cette interdiffusion devient trop importante, l'intégrité des couches n'est plus gardée ce qui change le comportement de la puissance réfléchie.

5.4 Analyse des mesures de la puissance réfléchie pour une impulsion carrée

Même si l'impulsion de fonte en dent-de-scie donne une mesure de la puissance réfléchie riche en information, c'est l'impulsion carrée qui est plus intéressante à être utilisée dans un procédé industriel, nécessitant des équipements moins coûteux pour la produire. Les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie résultant d'une telle impulsion sont plus difficiles à interpréter dues à la superposition de plusieurs phénomènes. La hausse de la puissance réfléchie de la zone 1 est par contre très difficile à observer (voir figure 5.1 pour une impulsion en dent-de-scie) pour des puissances laser standard

(supérieure à 1 W). Le silicium passe en effet de la température de la pièce à celle de la fusion du Si beaucoup trop rapidement pour que les étapes intermédiaires soient visibles.

Aussi, lors de la montée de la puissance réfléchie, on perd toutes les données temporelles qui étaient présentes lors des mesures associées à des impulsions en dent-de-scie, surtout pour les impulsions d'intensité élevée assurant la création d'une résistance diffusée. Dans ces cas, la montée de la puissance réfléchie se fait dès le début de l'impulsion. Une dizaine de nanosecondes plus tard, la puissance réfléchie atteint un plateau ou encore diminue. Les temps des changements de comportement de la puissance réfléchie sont donc plus dictés par l'impulsion de fonte que par la composition du circuit intégré.

Malgré tout, les mêmes comportements des mesures de la puissance réfléchie surviennent, soient une montée assez linéaire et rapide suivie par une baisse de celle-ci. La baisse de puissance réfléchie durant les irradiations fortes semble assez semblable à celle observée pour des impulsions en dent-de-scie d'une même puissance de fonte. Les mesures à l'aide d'impulsions de fonte carrées donnent donc sensiblement les mêmes informations que celles de la troisième partie d'une mesure associée à une impulsion en dent-de-scie et l'explication des phénomènes physiques en jeux serait probablement identique à celle proposée à section 5.3.

5.5 Montée de la puissance réfléchie après l'impulsion

Un phénomène surprenant est la montée subite de la puissance réfléchie après la fin de l'impulsion. La plupart des mesures *in-situ* de la puissance réfléchie sur des circuits intégrés font apparaître ce pic lorsque la fonte est assez importante pour créer un lien diffusé. Sur le silicium nu, un pic semblable mais d'intensité faible est observé seulement à de très hautes intensités laser. Ce phénomène ne peut être expliqué par le

TABLEAU 5.1 – Densité du silicium selon la phase (Mito et al. 2005)

État	Densité (g/cm ³)
Solide (cristallin)	2,53
Liquide	2,30

modèle de base (section 1.4.2) qui prévoit une diminution monotone de la puissance réfléchie après l'irradiation car elle ne dépend que du rayon de la région fondue.

Une première hypothèse est que ce pic est relié aux mêmes phénomènes qui créent la baisse de la puissance réfléchie dans les mesures prises sur les circuits intégrés. Puisque ces phénomènes semblent réversibles, s'ils disparaissent plus rapidement que la diminution du rayon fondu, la puissance réfléchie devrait augmenter à la fin de l'impulsion. Comme ces phénomènes sont peu compris, ils ne peuvent pas être simulés. Cependant, ce phénomène n'explique pas non plus la présence d'un pic post-irradiation dans le cas du silicium nu où il n'y a pas de diminution drastique de la puissance réfléchie pendant l'impulsion.

Une seconde hypothèse expliquant ce phénomène est l'apparition de déformations à la surface du silicium ne modifiant pas directement la puissance réfléchie, mais diffusant suffisamment la lumière pour l'empêcher d'être captée par le photodétecteur. Deux phénomènes peuvent provoquer des déformations de surfaces dans les intervalles de temps impliqués : le changement de densité du silicium lors de la fusion et la convection de type Marangoni.

5.5.1 Déformation due au changement de densité

Lorsque le silicium fond, sa structure passe de sa phase cristalline de coordination 4 à la phase liquide et amorphe de coordination 6. Ce changement de phase est noté par une variation de sa réflectivité ainsi que par un changement de densité tel que montré au tableau 5.1.

En passant à la phase liquide, la densité du silicium augmente résultant en une diminution du volume et une déformation de surface. Si la solidification se fait très rapidement, le silicium ne pourra pas reprendre son volume initial et la matière se concentrera vers le centre de la cuvette fondue formant une déformation de type *sombrero*. Ce phénomène a déjà été utilisé afin d'expliquer la fabrication de matrice de cône de silicium sous illumination laser (Wysocki et al. 2003).

En simulant ces déformations, il est possible de suivre par la suite le comportement du faisceau laser réfléchi sur la bosse. Pour cela, les mêmes approximations que celles introduites par Emmony et al. (1975) seront utilisées. Tout d'abord, la forme de la cuvette de silicium fondu peut être approximée par une sphère. En effet, le modèle de fonte (section 1.4.1) considère déjà une symétrie cylindrique et l'utilisation d'une fonction radiale quadratique est cohérente avec les résultats obtenus. Comme la tension de surface du silicium liquide est assez élevée et en négligeant les phénomènes de convection de type Marangoni, on peut approximer l'interface silicium liquide - vide aussi par une partie de sphère. Finalement, la conductivité thermique élevée du silicium solide permet de considérer la solidification comme uniforme et radiale, le fond la cuvette fondue peut toujours être représenté par une partie de sphère.

L'algorithme de simulation numérique est schématisé à la figure 5.3. Le calcul se fait de façon itérative où chaque pas correspond à la solidification d'une certaine épaisseur de silicium au fond de la cuvette. Par conservation de la masse, on calcule le volume restant de silicium fondu et on en déduit la forme de l'interface en se basant sur les hypothèses précitées.

La simulation est faite pour une cuvette fondue équivalente à celle de l'échantillon fortement déformé de la figure 4.15. Tel que présenté à la figure 5.4, avec une profondeur fondue de 200 nm, la déformation finale possède une hauteur de 40 nm ce qui correspond environ au quart de la déformation mesurée sur le circuit intégré. Afin d'avoir une déformation simulée finale de 120 nm tel que mesurée expérimentalement, une profondeur de cuvette de l'ordre de 600 nm serait nécessaire, ce qui est beaucoup

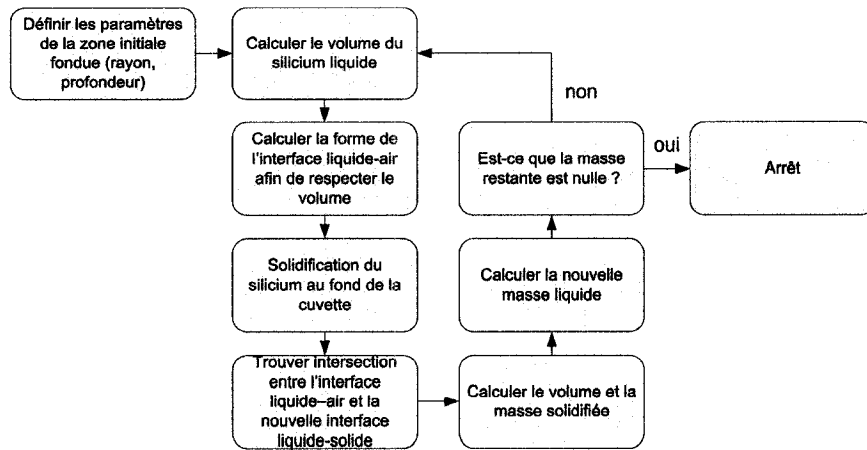


FIGURE 5.3 – Algorithme de simulation de la déformation causée par le changement de densité du silicium.

plus grand que ce qui est mesurée à partir du modèle de fonte. Il est clair que le changement de densité n'est pas le seul phénomène entraînant des déformations de surface, surtout pour des irradiations de longue durée.

Afin d'analyser l'effet de ces déformations sur les mesures optiques *in-situ*, une simulation de la réflexion d'un faisceau sonde fortement focalisé est nécessaire. Les dimensions physiques des déformations étant de l'ordre de la longueur d'onde utilisée ($\lambda = 633 \text{ nm}$), il est nécessaire de simuler le comportement ondulatoire de la lumière. Un simple modèle d'optique linéaire ne serait pas représentatif. Le logiciel *OptiFDTD 6* spécialisé dans la caractérisation de guide d'onde a été utilisé afin de simuler le train d'onde. Ce logiciel calcule par différence finie l'amplitude et la phase de l'onde et permet aussi l'utilisation de conditions frontières libres ne causant aucune réflexion.

Lorsque le faisceau sonde frappe le silicium déformé, une certaine partie de la lumière ne sera pas redirigée vers la lentille de microscope. Pour quantifier cette perte, le train d'onde réfléchi est simulé jusqu'à une distance où un modèle d'optique géométrique peut être utilisé. Selon le modèle de propagation d'un faisceau gaussien, après une distance de quelques longueurs de Rayleigh, le diamètre augmente linéairement de façon identique à un rayon classique dans une lentille. Dans

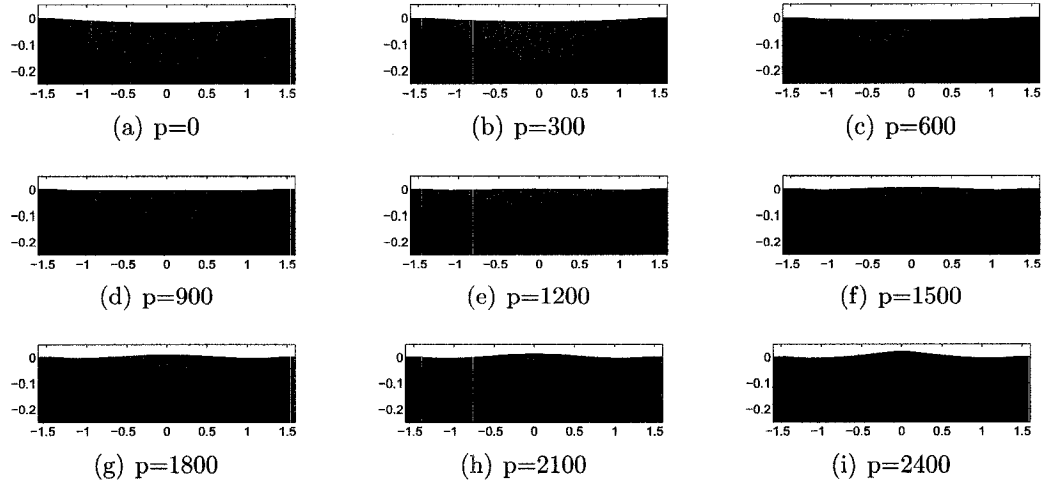


FIGURE 5.4 – Simulation des déformations dues au changement de densité d'une cuvette de silicium de $1,4 \mu\text{m}$ de rayon initiale et de 200 nm de profondeur initiale. La partie fondue est représentée en rouge. Le pas de simulation p n'est pas proportionnel au temps.

notre cas, la simulation a été effectuée jusqu'à une distance de $35 \mu\text{m}$ et toute la puissance optique ayant un angle de divergence supérieur à celui d'un faisceau réfléchi sur une surface plane sera considérée comme perdue.

La figure 5.5 présente la puissance réfléchie simulée pour une déformation de $1,8 \mu\text{m}$ de diamètre calculée pour des faisceaux laser de différents rayons. Il est à noter que la variable en abscisse est le pas de la simulation des déformations et n'est pas linéaire avec le temps. Les simulations démontrent bien la présence d'une montée de puissance réfléchie au début de la solidification qui est associée à un aplatissement de la cuvette de la surface de silicium fondu (voir figure 5.6). Cette montée de la puissance réfléchie est de l'ordre de 3% à 6% de la puissance réfléchie avant déformation et de 10% à 15% de la montée de puissance réfléchie lors de la fonte. On observe également que la montée de la puissance réfléchie après l'impulsion est plus importante lorsque la déformation est plus grande que le faisceau sonde. La puissance réfléchie après la resolidification totale du silicium est légèrement inférieure de

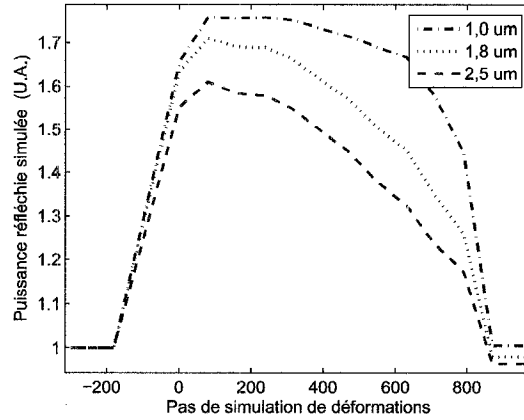


FIGURE 5.5 – Simulation de la puissance réfléchie lors de la variation de la déformation de surface due au changement de densité pour des diamètres de faisceau sonde de 1,0, 1,8 et 2,5 μm . Une déformation initiale de 1,8 μm de diamètre a été utilisée. À $x < 0$ la région n'est pas fondue, à $x = 0$ la région est fondue à son rayon maximal et pour $x > 0$ la région fondue se solidifie.

quelques pourcents de celle sur surface plane (3% dans le cas où le diamètre est de 1,8 μm).

Ces résultats semblent expliquer la hausse de la puissance réfléchie après irradiation dans le cas du silicium recouvert d'oxyde natif. L'intensité du pic est du même ordre de grandeur pour les fortes irradiations. L'absence de ce pic pour les irradiations plus faibles s'expliquerait entre autre par une déformation beaucoup plus petite que le faisceau sonde. La montée de la puissance réfléchie simulée n'est pas assez grande pour expliquer les mesures faites sur les circuits intégrés où des montées de l'ordre de 50% et plus de la puissance réfléchie peuvent être observées.

5.5.2 Déformation due aux effets Marangoni

La convection due aux effets Marangoni provenant des variations de tensions de surface selon la distance du centre de l'irradiation peut aussi causer des déformations sur la surface de silicium. Le gradient de température est le premier facteur à causer un gradient de tension de surface. La force thermocapillaire créée tend à repousser la

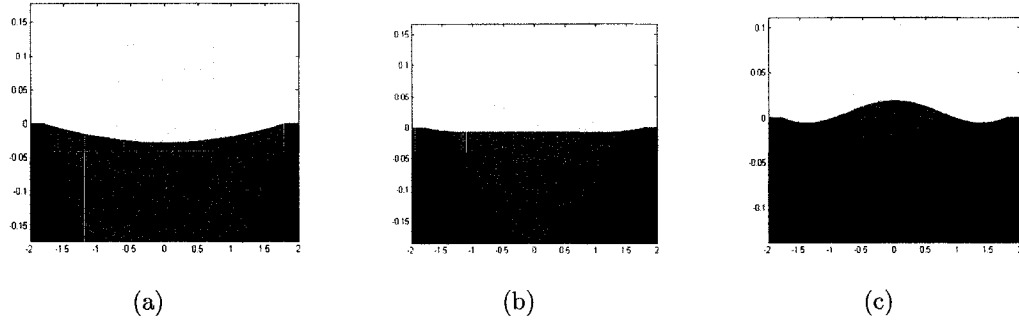


FIGURE 5.6 – Explication de la montée de la puissance réfléchie après l’impulsion. (a) : Condition initiale juste avant la resolidification. La courbure diminue la puissance atteignant le détecteur. (b) : Après le début de la solidification, l’interface du silicium liquide est plane d’où un maximum de puissance réfléchie. (c) : Vers la fin de la solidification, le rayon de la zone fondue est faible et il y a de fortes déformations.

matière vers l’extérieur et à former un anneau autour de la région irradiée. Lorsqu’il y a présence d’une couche diélectrique au-dessus de la région fondue, il peut avoir apparition d’une force chemicapillaire. Cette dernière force créée par l’adsorption ou la désorption de surfactant peut entrer en compétition avec la force précédente et ainsi former une bosse au centre (Bennet et al. 1997). Dans le cas du silicium, si toutes les couches d’oxyde le recouvrant sont enlevées, la déformation formée sera un creux au centre alors que si l’oxyde natif est présent, on aura plutôt une déformation de types *sombrero* (Schwarz-Selinger 2001).

Ce type de déformation a principalement été étudié pour le Ni-P, un alliage employé dans les disques durs d’ordinateur et dont une déformation induite par laser peut servir comme appui et point de repère pour la tête de lecture. Plusieurs résultats d’expériences montrent des déformations sur Ni-P mais presque toujours avec des impulsions de l’ordre de la dizaine de nanosecondes (Strand et al. 1998), (Tam et al. 1996). De plus, ces études ne s’attardent qu’à la déformation finale et non aux formes transitoires qui nous intéressent. Plusieurs chercheurs ont développé des modèles théoriques mais qui se sont toujours limités à des impulsions laser très

courtes (inférieures à 15 ns) et sans la présence de la force chemicapillaire entraînant une déformation en « V » (Vatsya et Nikumb 2003), (Tam et al. 1996). Ces modèles ne sont donc pas directement applicables à notre situation.

Simuler les déformations de type *Marangoni* et faire une analyse du même type que la section précédente n'est pas possible car le problème est trop complexe. Des simulations de la puissance réfléchie avec le logiciel *OptiFDTD 6* permettent cependant de conclure que plus la déformation *sombrero* est profonde, plus la puissance réfléchie détectée est faible et que plus la zone liquide est large, plus grande sera la puissance réfléchie détectée, même pour un faisceau sonde plus petit que la région fondue. Lors de l'expérience, une fois l'impulsion laser terminée, le gradient de tension de surface décroît et entraîne une diminution de la hauteur de la déformation. Cela aura comme conséquence d'augmenter temporairement la puissance réfléchie et pourrait aussi expliquer la présence du pic après la fin de l'impulsion laser.

Pendant l'irradiation, les déformations *Marangoni* ont également une influence sur la puissance réfléchie la faisant diminuer de 5% à 15% d'après des simulations de déformation de silicium liquide. Même si ces chiffres sont élevés, ils ne peuvent expliquer la baisse importante de la puissance réfléchie pendant l'irradiation. En effet, autant le silicium avec oxyde natif que celui d'un circuit intégré sont susceptibles aux effets *Marangoni* et rien n'indique que les déformations d'un circuit intégré soient beaucoup plus importantes que celles sur le silicium recouvert d'un oxyde natif. Si les déformations *Marangoni* causaient le creux de puissance réfléchie sur les circuits, ils devraient avoir le même effet sur le silicium avec l'oxyde natif, ce qui n'est pas le cas.

5.6 Puissance réfléchie post-irradiation

Le dernier aspect des courbes de mesures de la puissance réfléchie à analyser est celui de la puissance réfléchie post-irradiation qui dans la plupart des cas reste semblable ou diminue par rapport à la puissance réfléchie initiale. Ce phénomène peut être

en partie expliqué par les déformations de la surface de silicium. Cependant, comme les baisses de la puissance réfléchie sont beaucoup plus prononcées expérimentalement que celles produites par les simulations, l'effet de l'interdiffusion entre les oxydes et le silicium qui diminue le coefficient de réflectivité de ce dernier (Liao 2005) devrait être considéré.

La technologie 180 nm démontre un comportement différent puisque des hausses de la puissance réfléchie après irradiation sont observées. Deux phénomènes sont à considérer : la formation des nanoparticules de silicium dans la couche de ARC et la destruction de la couche de ARC. Le premier explique la montée de la puissance réfléchie dans le cas des irradiations de plus faibles intensités où le silicium ne fond pas. La lumière diffusée et réfléchie par les nanoparticules n'est pas absorbée par la couche de ARC et augmente la puissance réfléchie mesurée. Le phénomène de destruction de la couche de ARC est bien montré par les mesures au MET pour des impulsions suffisamment fortes pour fondre le silicium (figure 4.15), laissant la surface de silicium libre de réfléchir la lumière. Même si la surface de silicium est fortement déformée ou qu'elle ait absorbé de l'oxygène, le coefficient de réflectivité de la lumière est beaucoup plus grand car il n'y a plus la couche de ARC. Ces comportements ne peuvent être présents dans les circuits des autres technologies ou sur le silicium recouvert d'oxyde natif puisqu'il n'y a pas présence d'une couche optiquement absorbante près du silicium.

CHAPITRE 6

APPLICATION DE LA MESURE DE LA PUISSANCE RÉFLÉCHIE COMME MÉTHODE DE CONTRÔLE *IN-SITU*

Les derniers chapitres montrent l'analyse de différentes courbes de mesure *in-situ* de la puissance réfléchie permettant l'obtention d'informations sur les comportements de la portion de circuit intégré irradiée. La prochaine section porte sur l'utilisation de cette mesure dans le cadre de la production de résistances diffusées et les façons qu'elle pourrait être implémentée en industrie.

6.1 Variation des caractéristiques de fabrication des dés

La plupart des procédés de fabrication de circuits intégrés ne garantissent pas une reproductibilité exacte des paramètres de fabrication d'un dé à l'autre. Cela se traduit par des variations de la valeur des résistances, d'où la nécessité d'avoir des techniques d'ajustement. Dans notre cas, la variation des procédés de fabrication entraîne aussi que les différentes couches diélectriques recouvrant le silicium n'auront pas toujours les mêmes épaisseurs et/ou composition affectant l'énergie du faisceau du laser de fonte arrivant sur le silicium et donc de la valeur du lien diffusé. Cela aura aussi des conséquences sur les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie.

Lors de l'expérimentation, la plupart des circuits irradiés ont été obtenus via l'organisme *CMC Microsystème* qui recueille les commandes de plusieurs universités afin de les joindre et ainsi baisser les coûts de fabrication. On ne connaît pas les conditions de fabrication des circuits étudiés car ceux-ci peuvent provenir de différentes zones sur plusieurs gaufres de silicium différentes. Puisqu'il n'y a pas autant d'incer-

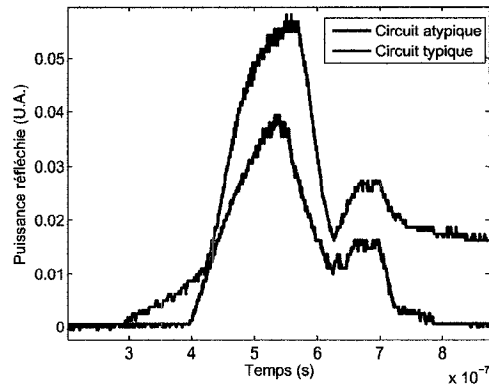


FIGURE 6.1 – Comportements de deux circuits identiques fabriqués en technologie *TSMC 180 nm* lors d’une irradiation en dent-de-scie de 400 ns de 2,3 W crête. Le circuit atypique nécessite un temps d’irradiation plus grand avant qu’il y ait une hausse de la puissance réfléchie et la puissance réfléchie maximale atteinte est beaucoup plus faible.

titude sur les caractéristiques des couches fabriquées d’une gaufre à l’autre pour un même emplacement sur une même gaufre, il y a peu de modifications d’un circuit à l’autre. Cependant, il est quand même possible de trouver quelques circuits ayant un comportement différent mais seulement en petite quantité (figure 6.1).

Il a été possible de faire des tests directement sur une gaufre de silicium de technologie *TSMC 250 nm* fournie par *LTRIM Technologies*. Bien que l’équipement de prises de mesures électriques des résistances formées sur une gaufre n’est pas disponible dans notre laboratoire, il est possible d’évaluer les variations de mesures de la puissance réfléchie. On remarque sur la figure 6.2 que celles-ci varient fortement selon l’endroit sondé sur la gaufre. Trois courbes ont le même temps de passage entre la première et deuxième zone définies à la section 5.3, mais présentent une diminution de la puissance réfléchie bien différente. La diminution de la puissance réfléchie lors de l’irradiation étant liée à des modifications physiques des couches diélectriques, on en déduit que ces trois courbes représentent une absorption d’énergie semblable, mais que les diélectriques n’ont pas commencé leur processus de modification au même moment selon leur emplacement sur la gaufre. La même figure montre également deux autres

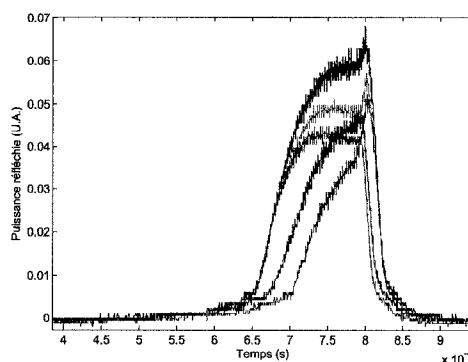


FIGURE 6.2 – Irradiation en dent-de-scie (puissance de 1 W et durée de 400 ns) à différents endroits d’une gaufre fabriquée en technologie *TSMC 250 nm*.

courbes dont le temps associé au début de l’augmentation de la puissance réfléchie est beaucoup plus élevé. Aussi, ces deux courbes démontrent peu (courbe mauve) ou pas (courbe bleue) de diminution de pente de la mesure *in-situ* de la puissance réfléchie suggérant que la puissance et/ou le rayon du faisceau arrivant sur le silicium sont plus faibles.

Une autre façon d’observer les variations de procédés de fabrication sur une gaufre est de mesurer sa puissance réfléchie absolue avec un laser focalisé. Le tableau 6.1 montre certaines puissances réfléchies mesurées selon leur emplacement sur la gaufre. On remarque une importante variation de plus de 20% selon l’emplacement de la mesure, soit au centre comparativement à une extrémité de la gaufre. La différence est encore plus marquante pour les circuits adjacents à une coupe (la gaufre utilisée est en fait un quart de gaufre). La coupe modifie les propriétés de réflectivité, en induisant ou en libérant des tensions dans le substrat ou en provoquant des défauts dans les couches diélectriques.

On observe aussi des variations de la puissance réfléchie absolue sur de plus courtes distances. La figure 6.3 présente un profil de puissance réfléchie absolue le long d’une résistance en forme de U. On peut y voir une variation non négligeable des mesures pour la résistance à l’extrémité de la gaufre approchant 5%.

TABLEAU 6.1 – Mesure de la puissance réfléchie absolue à différentes positions sur un quart de gaufre fabriqué dans la technologie *TSMC 180 nm*.

Emplacement	Puissance réfléchie (U.A.)
Centre (A)	300
Mi-rayon (B)	232
Extrémité (C)	265, 247, 273
Près d'une coupe (D)	141

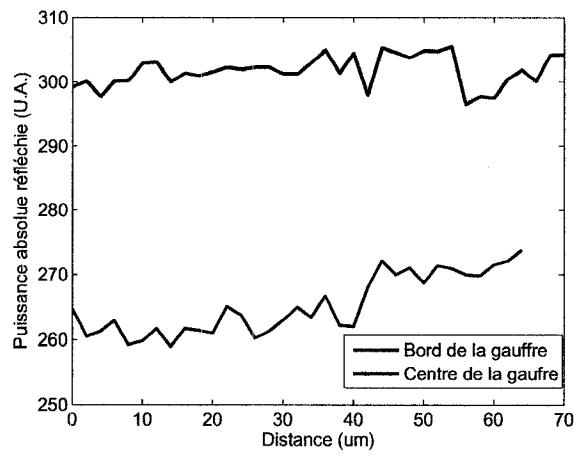
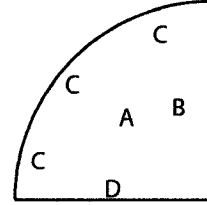


FIGURE 6.3 – Variation de la puissance réfléchie absolue à différentes positions sur une résistance en U à deux positions d'une gaufre de technologie *TSMC 180 nm*.

Toutes ces variations ont des conséquences importantes sur la fabrication de résistances diffusées. Une variation de la puissance réfléchie absolue signifie soit une hausse d'énergie absorbée par le dispositif au niveau du silicium ou une baisse d'énergie lumineuse atteignant la cible. Dans les deux cas, la dimension de la cuvette fondue et le temps de fonte sont affectés ainsi que la quantité de dopant pouvant diffuser afin de former un lien résistif.

6.2 Moyens d'appliquer les mesures *in-situ* optiques comme méthode de contrôle

6.2.1 Approches d'utilisation

Les variations des procédés de fabrication démontrées à la dernière section engendrent une grande incertitude sur les résistances diffusées par laser créées dans les mêmes conditions d'irradiation. En détectant ces variations avec les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie, nous pourrions ajuster l'intervention laser. Plusieurs approches peuvent être considérées.

La première approche est basée sur l'utilisation d'une impulsion « sonde » qui précéderait la série d'irradiation servant à la création de résistances afin d'en déterminer les propriétés, telles que le nombre, la durée, la puissance et la fréquence. Idéalement, cette impulsion serait d'intensité réduite afin d'être peu ou pas destructive par rapport à la zone irradiée. Cette méthode présente l'avantage de nécessiter qu'un seul calcul et permet ainsi une analyse plus poussée de la mesure recueillie. Cependant, cette méthode est une sorte de prévision et ne permet pas un ajustement à des phénomènes peu prévisibles ou aléatoires, comme par exemple les variations de puissance du laser.

Une autre approche est la prise de mesures de la puissance réfléchie à chaque impulsion envoyée et de les analyser en groupe afin d'effectuer un ajustement final en ajoutant quelques impulsions par exemple. Cette méthode permet d'obtenir

un échantillon de mesures assez grand pour faire une étude statistique simple, par exemple calculer une moyenne, ce qui facilite l'interprétation des mesures. L'analyse se faisant après l'intervention, elle permet seulement l'ajustement dans un sens car si le train d'impulsions précédant était trop intense, on ne peut faire augmenter de nouveau la valeur de la résistance.

Une troisième approche est d'analyser les mesures *in-situ* de la puissance réfléchie après chaque impulsion. Comme la création d'une résistance implique plusieurs dizaines voir quelques centaines d'impulsions, le temps de calcul d'une analyse ne doit pas dépasser quelques microsecondes. Cette méthode permet cependant une optimisation complète du procédé de calibrage par laser et donne plus de flexibilité aux ajustements à faire.

Une dernière approche est l'utilisation des mesures de la puissance réfléchie en boucle fermée de manière à ajuster en temps réel la puissance du laser de fonte. Cependant, le temps de propagation de l'information dépend principalement des délais du modulateur acousto-optique et des convertisseurs A-D et D-A des appareils de mesure. Puisque le temps entre la mesure de la puissance réfléchie et la modification de la puissance laser est d'environ une centaine de nanosecondes, i.e. du même ordre de grandeur que la durée de l'impulsion laser, l'application de cette approche n'est pas réalisable.

6.2.2 Données à analyser

Les mesures de la puissance réfléchie ont jusqu'à présent été analysées de façon comportementale. Dans l'optique d'utiliser ces courbes dans un moyen de contrôle automatisé, il faut quantifier ces comportements. La figure 6.4 représente les différents types de données qui peuvent être utilisés lors de l'analyse des mesures de la puissance réfléchie.

Les données d'intensités sont celles liées à la valeur de la puissance réfléchie captée par le photo-détecteur. Parmi celles-ci, on retrouve la puissance maximale P_{max} , la

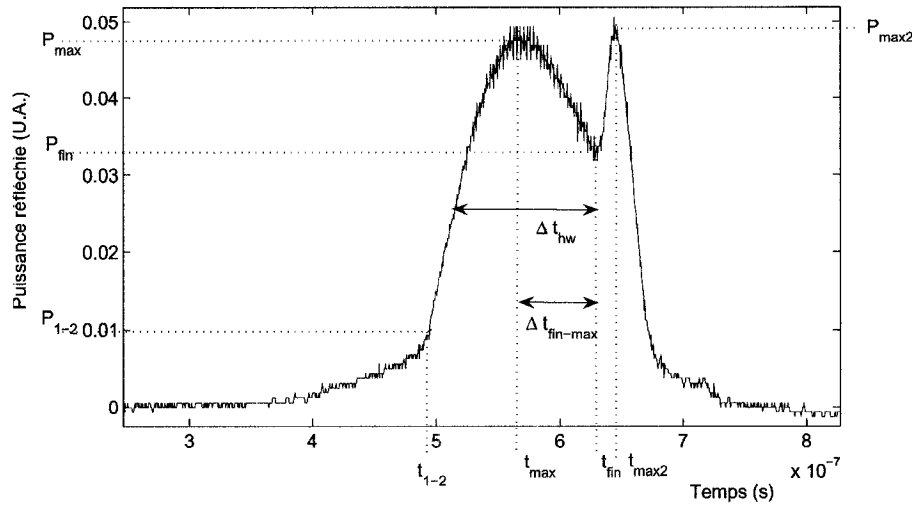


FIGURE 6.4 – Schématisation des données utilisées pour paramétriser les mesures de la puissance réfléchie.

puissance à la fin de l'irradiation P_{fin} , la puissance maximale après l'irradiation $P_{max\ 2}$, les pentes et les puissances au changement de « zone » P_{1-2} . Ces valeurs varient beaucoup d'une irradiation à l'autre et suivent majoritairement des comportements assez prévisibles avec la puissance d'irradiation. Le désavantage de ces mesures est la forte influence de l'alignement du système sur ces mesures. En effet, sur notre montage, une variation de plus de 5% de la puissance réfléchie peut être observée d'une journée à l'autre et ce, même avec un alignement minutieux des pièces optiques. Pour contrer cela, il faudrait mettre en place un procédé de calibration et la conception d'un montage plus stable. De plus, les mesures de puissance sont influencées par la mise au point focal de l'échantillon. Un échantillon légèrement défocalisé verra la puissance réfléchie du laser sonde diminuer énormément et ce, même si les effets sur le laser de fonte sont minimes. Par exemple, si l'échantillon est défocalisé de $5\ \mu\text{m}$, la puissance réfléchie mesurée du laser sonde diminue d'environ 75% alors que le laser de fonte fera fondre tout autant le silicium.

Les données temporelles sont celles associées à l'apparition d'un événement. On retrouve parmi celles-ci le temps associé à la valeur maximale t_{max} , le temps de transition d'une « zone » à l'autre t_{1-2} et la largeur à mi-hauteur de la courbe de puissance réfléchie Δt_{hw} . L'avantage de ces valeurs est qu'elles ne sont pas influencées par les variations du montage inhérentes aux valeurs de puissance. En effet, si on multiplie la courbe expérimentale par un facteur arbitraire, on retrouvera les mêmes valeurs temporelles. Cependant, les valeurs temporelles varient moins d'une courbe à l'autre ce qui les rend souvent plus difficile à analyser. De plus, elles sont presque inexistantes lors de l'utilisation d'impulsions carrées dues à l'imposition des temps de transitions par les paramètres des impulsions de fonte.

6.3 Contrôle de la fabrication de résistances

La méthode de contrôle spatial de la valeur de la résistance (section 1.3.2) est déjà bien implémentée au niveau industriel. Pour que celle-ci soit efficace, il faut s'assurer qu'un lien résistif de bonne qualité soit formé. Une première approche proposée du contrôle *in-situ* optique est de déterminer qu'un tel lien a bel et bien été créé.

6.3.1 Test de fabrication de résistance

Afin de faire une analyse de type statistique, plusieurs résistances ont été fabriquées par laser sur des circuits provenant de quelques puces *T25MAY03* de la compagnie *LTRIM Technologies*. Ces puces ont été fabriquées en technologies *TSMC 250 nm* et contiennent une grande quantité de résistances diffusées identiques que l'on peut calibrer par laser. Dans le cadre de ce test, des jonctions comportant un écart de $1\ \mu\text{m}$ entre les régions fortement dopées ont été testées. Chaque jonction a été irradiée par quinze impulsions en dent-de-scie de puissance crête de 1,1 W. Dans ces conditions, la plupart des dispositifs forment un lien résistif de valeur inférieure à $1\ \text{k}\Omega$. Cependant, certains dispositifs n'ont pas créé de lien. À chaque impulsion de fonte

envoyée, une mesure *in-situ* de la puissance réfléchie et une mesure de résistivité de la jonction ont été enregistrées. En tout, 151 mesures de puissance réfléchie sont associées à la création de résistances diffusées et 87 mesures sont associées à un échec de fabrication. Avant chaque série d'irradiation, la position de l'échantillon (emplacement x-y ainsi que focalisation) a été soigneusement ajustée afin d'éliminer l'incertitude associée à l'emplacement.

6.3.2 Analyse des mesures de la puissance réfléchie

Le but de l'analyse est d'interpréter les mesures de la puissances réfléchies afin de faire un lien clair avec les mesures électriques. Parmi les seize dispositifs irradiés selon la démarche du paragraphe précédant, dix ont pour caractéristique finale une résistance inférieure à 30 k Ω et six une résistance supérieure à 1 M Ω . Nous classerons ces résistances comme étant réussies et non réussies, respectivement.

6.3.2.1 Analyse du temps associé au maximum de puissance réfléchie

Une conclusion des derniers chapitres est que la présence d'une baisse de la puissance réfléchie pendant l'irradiation est pratiquement toujours associée à la création d'un lien résistif. Une valeur numérique temporelle correspondante à ce comportement est le temps associé au maximum de puissance réfléchie avant la fin de l'impulsion t_{max} . Lorsque ce comportement de la puissance réfléchie intervient, le maximum se situe quelques centaines de nanosecondes avant la fin de l'impulsion alors que dans le cas contraire il coïncide avec la fin de l'impulsion. La figure 6.5 montre les statistiques $\Delta t_{fin\ max}$ dans les cas réussis ou d'échec lors de la fabrication de résistances.

Tel qu'appréhendé, les résultats indiquent presque toujours un maximum de la puissance réfléchie situé temporellement au même endroit que la fin de l'impulsion (ou $\Delta t_{fin\ max} = 0$) lorsqu'il n'y a pas création d'un lien résistif diffusé. Lorsque la mesure de réflectivité indique une valeur de $\Delta t_{fin\ max}$ non nulle, il est fort probable que le processus de création a réussi. L'inverse n'est cependant pas vrai car une valeur

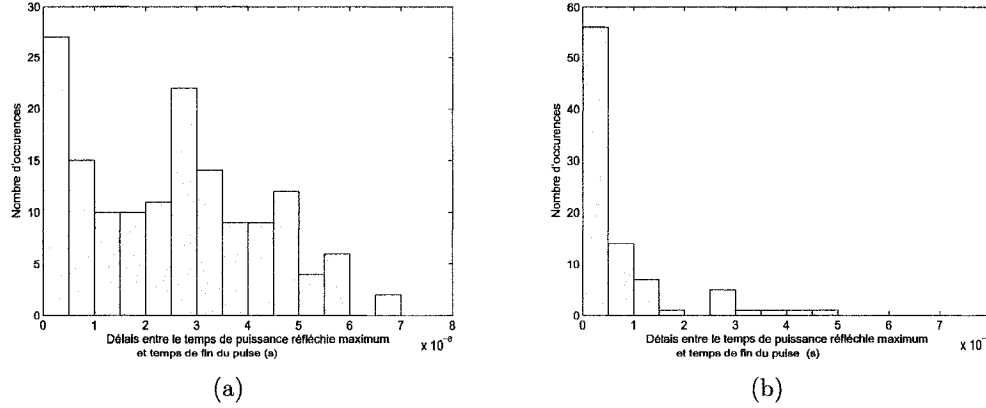


FIGURE 6.5 – Distribution de la différence de temps entre l’atteinte du maximum de la puissance réfléchie et la fin de l’impulsion pour (a) les échantillons formant une résistance et (b) ceux n’en formant pas.

nulle de $\Delta t_{fin\ max}$ peut autant être associée à la réussite du processus de création de résistances qu’à un échec.

Une méthode de contrôle utilisant ce critère d’analyse n’est probablement pas efficace car il est difficile d’établir une cible à atteindre. Une méthode de contrôle possible aurait été d’augmenter la puissance des impulsions de fonte jusqu’à atteindre une valeur cible de $\Delta t_{fin\ max}$, nous assurant ainsi après quelques impulsions la création d’une résistance. Il a été précisé à la section 5.3 que pour des puissances assez élevées et/ou pour un nombre d’impulsions important, le phénomène de diminution de puissance réfléchie disparaît et ce même si on augmente la puissance laser. La valeur $\Delta t_{fin\ max}$ peut donc rester nulle peu importe la puissance utilisée ce qui rend le contrôle inefficace. Précisons finalement que ce critère d’analyse devrait être modifié si des impulsions carrées sont utilisées puisque la valeur $\Delta t_{fin\ max}$ est soit très proche de la largeur de l’impulsion ou est nulle, sans vraiment atteindre de valeur intermédiaire.

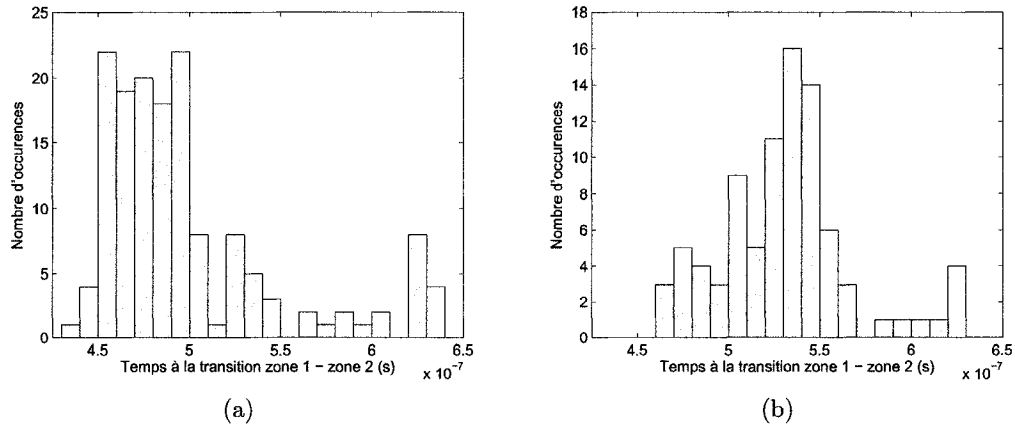


FIGURE 6.6 – Distribution du temps de la transition de la première zone à la deuxième zone t_{1-2} pour (a) les échantillons formant une résistance et (b) ceux n'en formant pas.

6.3.2.2 Analyse du temps de passage de la première zone à la deuxième zone

Une valeur numérique temporelle qui est liée à la puissance du laser de fonte est le temps de passage de la première zone à la deuxième zone t_{1-2} . L'algorithme utilisé pour identifier ce point consiste à ajuster des droites lors de la montée de la puissance réfléchie, et à trouver le point où le changement de pente est le plus élevé. La figure 6.6 présente la distribution de t_{1-2} selon qu'un lien résistif ait été formé ou non.

L'analyse de ces résultats permet de déduire que la valeur moyenne des t_{1-2} est de 500 ns lorsqu'un lien a été créé alors qu'elle est de 531 ns en cas d'échec. Cependant, les variances assez élevées des distributions, soit 35 ns et 50 ns respectivement, font qu'une quantité non négligeable de mesures *in-situ* de la puissance réfléchie liées aux processus ayant échoué ont un temps de transition semblable aux processus réussis. Une méthode de contrôle ajustant la puissance du laser de fonte afin d'atteindre un temps de transition cible (par exemple 470 ns) diminuerait le nombre de circuits ouverts mais laisserait quand même certains dispositifs mal ajustés. De plus, cette

méthode est facilement applicable puisque le point de transition tend à augmenter de façon monotone avec l'accroissement de la puissance laser.

Un désavantage de ce critère est qu'il n'est pas présent lors de l'utilisation d'impulsions carrées, la première zone n'étant pas détectée pour de telles impulsions aux puissances nécessaires pour créer une résistance. De plus, l'analyse mathématique nécessaire pour isoler le changement de régime requière des calculs de dérivés deuxièmes qui génèrent beaucoup de bruit et est donc beaucoup plus complexe à traiter que de trouver un maximum. Il faut donc soit utiliser des filtres numériques ou faire de l'ajustement de courbes. L'algorithme utilisé, basé sur de l'ajustement de courbes, nécessitait 0,3 s de calcul sur le logiciel *Matlab*. Ce temps est trop élevé pour que cette approche soit utilisée dans un processus de fabrication industriel et des tests d'optimisations devraient préalablement être complétés afin d'évaluer l'applicabilité du critère.

6.3.2.3 Analyse de la puissance réfléchie maximale

Bien qu'étant très sensible à l'alignement du montage et celui de l'échantillon, la puissance réfléchie maximale est une autre valeur numérique pouvant être utilisée comme critère de contrôle. Tel que montré à la figure 6.7, on remarque que cette valeur tend à augmenter lorsqu'il y a création d'une résistance.

La distribution associée au processus réussi de la création de résistances est assez étendue, probablement due à la très grande sensibilité de la puissance réfléchie maximale par rapport à la focalisation du faisceau ainsi que la présence du phénomène de diminution de la puissance réfléchie pendant l'irradiation, coupant parfois la montée de la puissance réfléchie à des intensités semblables à celles atteintes lors de processus ne créant pas de lien résistif. Comme les résultats de la section 5.3 ont montré que ce phénomène disparaissait après plusieurs impulsions pour la technologie *TSMC 250 nm*, l'une des solutions est de ne considérer que les mesures de la puissance réfléchie pour les impulsions de rang élevé. Lorsque le phénomène est absent, l'inten-

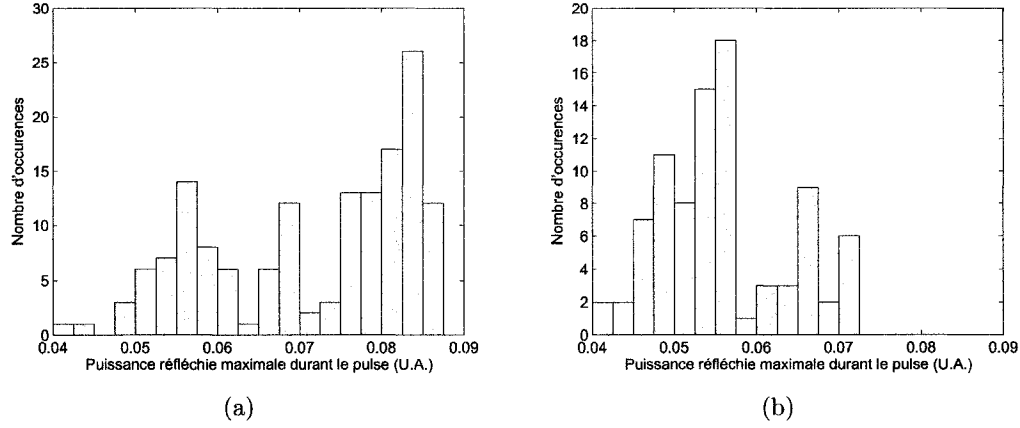


FIGURE 6.7 – Distribution de la puissance réfléchie maximale pour (a) les échantillons formant une résistance et (b) ceux n'en formant pas

sité maximale tend à croître avec la montée de la puissance de fonte, ce qui faciliterait l'implémentation de cette approche dans un processus de contrôle. L'algorithme nécessiterait très peu de calcul et consisterait à augmenter la puissance de fonte jusqu'à atteindre une puissance réfléchie maximale typique d'une résistance réussie.

Bien que traité individuellement dans ce travail, il est possible de combiner divers critères afin d'en former un plus complexe mais plus fiable. Par exemple, ceux de la puissance réfléchie maximale et du temps d'atteinte de celle-ci se complètent bien. Cette approche permet de contourner le problème de la diminution de puissance, phénomène critique associé à P_{max} mais qui est facilement détectable à l'aide du critère utilisant t_{max} .

6.3.3 Exemple d'application du contrôle *in-situ* optique

Les critères présentés aux sections précédentes peuvent être insérés dans un algorithme de contrôle de création de résistances. Comme exemple d'application de la technique, un processus de contrôle a été développé utilisant le critère du temps de transition t_{1-2} qui est celui montrant le moins de recouvrement entre la distribution de résistances réussies ou échouées (voir figure 6.6). L'algorithme de contrôle est

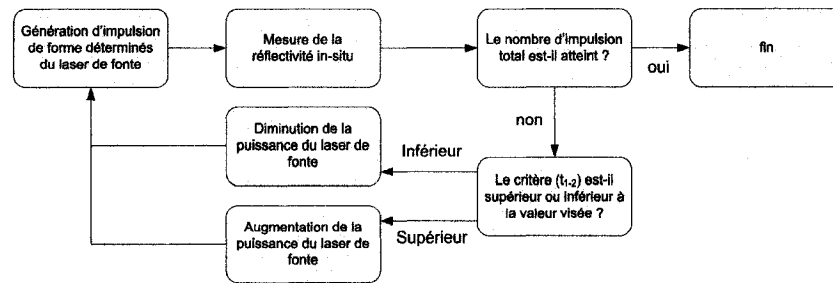


FIGURE 6.8 – Algorithme utilisé pour le contrôle de la fabrication de résistances diffusées par laser.

présenté à la figure 6.8. Une série de 35 impulsions en dent-de-scie est envoyée sur différents dispositifs de résistances diffusées. Après chaque irradiation, la mesure de la puissance réfléchiée est analysée de façon à déterminer si le temps de transition t_{1-2} est inférieur ou supérieur à un temps cible. Si le temps mesuré est inférieur à la cible, la puissance du prochain pulse sera diminuée de 5% alors que dans le cas contraire, elle sera augmentée de 5%. L'algorithme varie donc la puissance des irradiations de façon à stabiliser t_{1-2} autour de la valeur cible.

Le test est effectué sur des circuits *T25MAY03* identiques à ceux de la section précédente. La moitié des 24 dispositifs irradiés provient de circuits ayant un comportement standard (résistance typique) tandis que les autres circuits présentent des problèmes d'ajustement et nécessitent des puissances plus élevées. Le but de ce test est de constater si l'algorithme est capable de détecter les cas problématiques et de compenser la puissance envoyée en conséquence. Pour effectuer une comparaison, des dispositifs semblables ont été irradiés de façon conventionnelle, soit avec des puissances constantes permettant la création de lien résistif de façon standard. Le tableau 6.2 montre les résultats des deux tests.

On remarque une augmentation significative du taux de réussite de création de résistances lorsqu'on utilise la méthode de contrôle basée sur le temps de transition t_{1-2} . Sur la plupart des circuits atypiques, l'algorithme a augmenté suffisamment la puissance laser de façon automatique pour compenser les variations de fabrication.

TABLEAU 6.2 – Taux de succès de création de résistances à l’aide de la méthode standard (puissance constante) et par la méthode de contrôle *in-situ* optique (variation automatique de la puissance).

Méthode de création	Taux de réussite		
	Résistances typiques	Résistances atypiques	Global
Puissance constante	100%	0%	50%
Puissance ajustée par algorithme	100%	83%	92%

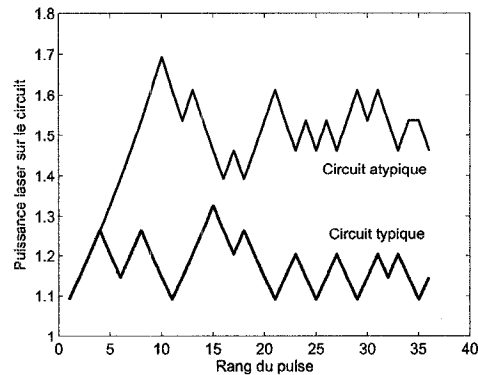


FIGURE 6.9 – Variation de la puissance déduite par l’algorithme de contrôle basé sur le temps de transition de la zone 1 à la zone 2 de la mesure de puissance réfléchie pour un circuit de comportement typique et un de comportement atypique.

La figure 6.9 montre un exemple d’ajustements effectués par l’algorithme pour un circuit typique et atypique. On y remarque que peu d’ajustements sur la valeur de départ de la puissance ont été faits afin d’assurer la création d’une résistance pour un circuit typique alors qu’une augmentation de l’ordre de 30% a été nécessaire dans le cas de la résistance du circuit atypique.

Cette expérience démontre la pertinence des mesures *in-situ* de la puissance réfléchie dans le cadre d’un contrôle de la formation d’une résistance diffusée par laser. Des tests devront cependant être faits sur un plus grand échantillonnage de dispositifs ajustables et avec des circuits fabriquées dans des conditions variées. Il serait intéressant de refaire ce test directement sur une gaufre dans des conditions industrielles.

6.4 Contrôle de la valeur de la résistance créée

Être informé si une résistance a été créée ou non est un pas très important pour l'utilisation du procédé de fabrication de résistances diffusées par laser. Cependant, il faut toujours utiliser une méthode de contrôle spatiale pour ajuster la valeur de la résistance. Utiliser les mesures *in-situ* optiques afin de contrôler la valeur précise de la résistance serait un grand avantage. Des tests ont donc été faits pour explorer cette possibilité.

Afin de faciliter l'analyse des résultats, des dispositifs ajustables ayant des comportements de la puissance réfléchie semblables ont été irradiés. Ceux-ci proviennent du même type de circuit décrit à la section 6.3.1. Cependant, seuls des dispositifs contigus, présentant donc de légères différences de conditions de fabrication ont été utilisés. Une série de dix impulsions en dent-de-scie de 400 ns et de puissance crête de 1 W a été envoyée sur chaque jonction de façon à produire une résistance. Sur dix-huit essais, dix-sept ont été un succès donnant une résistivité inférieure à 1 k Ω et une seule n'a pas créé de lien, probablement dû à un mauvais alignement du circuit. Ce dernier résultat n'a pas été inclus dans les prochaines analyses.

Des différents paramètres d'analyse indiqués précédemment, certains ne peuvent pas être appliqués à cause d'une trop grande similarité des courbes mesurées. Par exemple, la variation du temps de transition t_{1-2} (utilisée à la section 6.3.2.2) est du même ordre de grandeur que son incertitude. Ce sont les paramètres liés à la diminution de puissance réfléchie pendant l'irradiation qui montrent le plus de variation et qui seront utilisés dans cette analyse.

Le temps d'atteinte du maximum de puissance réfléchie t_{max} est facile à extraire et a déjà été utilisé efficacement pour vérifier la création de résistances (section 6.3.2.1). Puisque c'est une valeur temporelle, elle est très peu sujette à des variations d'alignement du montage.

Un autre critère d'analyse intéressant est la diminution de la puissance réfléchie après l'atteinte du maximum. Pour quantifier cette diminution tout en diminuant les

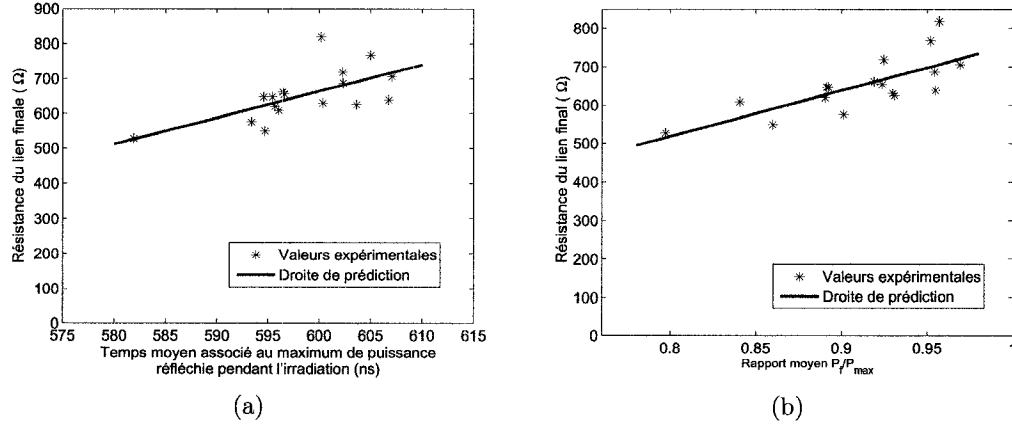


FIGURE 6.10 – Prédiction de la résistance formée d'après les caractéristiques des mesures de la puissance réfléchi en utilisant comme critère : (a) t_{max} , (b) P_{fin}/P_{max} .

incertitudes d'alignement du montage, on utilise le rapport adimensionnel entre P_{fin} et P_{max} . Plus ce rapport est élevé, moins la baisse de puissance réfléchi pendant l'irradiation est importante. On s'attend à obtenir une valeur de résistance qui augmente lorsque ce rapport augmente, indiquant une diminution plus importante de la puissance.

La figure 6.10 présente les valeurs de résistances créées en fonction de la moyenne de t_{max} et de P_{fin}/P_{max} évaluées sur dix courbes de puissance réfléchi *in-situ*. Les résultats expérimentaux sont cohérents avec l'hypothèse que la valeur de la résistance créée diminue avec la diminution de t_{max} et de P_{fin}/P_{max} . La figure indique également dans chacun des cas une droite de régression pouvant servir à prédire la résistance créée par une série de dix impulsions identiques. Une fois la prédiction faite, un ajustement serait effectué afin d'atteindre une résistance cible inférieure.

Le tableau 6.3 présente les écarts types des résultats expérimentaux en lien avec la moyenne et aux valeurs prédites par les résultats de la figure 6.10. Par rapport à l'approche sans prédiction, on obtient une diminution supérieure à 35% de l'écart type en utilisant le rapport d'intensité comme critère de contrôle. Ce résultat est intéressant mais n'est pas suffisamment élevé pour confirmer l'utilité des mesures *in-*

TABLEAU 6.3 – Écart face aux différentes prédictions de valeurs résistances.

	Valeur prédite	Écart moyen (Ω)
Sans prédiction	653.3 Ω	73.2
Prédiction par temps de puissance maximale	Relation linéaire	54.4
Prédiction par rapport de puissance	Relation linéaire	46.8

situ optique dans un processus de contrôle de la valeur du lien résistif formé. De plus, cette méthode n'aurait pu être appliquée à des dispositifs dont les variations de fabrication sont grandes dues à une trop grande différence des comportements de la puissance réfléchie, ce qui limite son utilité dans un procédé de fabrication industriel.

6.5 Adaptation du contrôle *in-situ* optique à un montage industriel

Les méthodes de contrôle suggérées fonctionnent sur un montage expérimental. Il faut cependant s'assurer que cette technique fonctionne sur un montage industriel et pouvoir l'optimiser de façon à diminuer les coûts d'achat et d'entretien.

6.5.1 Temps de traitement et délais

La rapidité du procédé est importante lorsqu'on vise une fabrication à grande échelle. Lors de la fabrication d'une résistance diffusée, l'étape la plus longue est le déplacement de l'échantillon d'une zone à irradier à l'autre. Cela prend un temps minimal de plusieurs dizaines de millisecondes. Pour ne pas ralentir le processus, le temps ajouté par la méthode de contrôle doit être environ un ordre de grandeur inférieur, soit autour de 1 ms. La série d'irradiation, comprenant l'acquisition des données, leur analyse ainsi que l'envoi des impulsions doit se faire à l'intérieur de ce délai. En prenant comme hypothèse que le nombre maximum d'impulsions envoyées est de 100, le temps permis pour une boucle d'analyse devrait être d'environ 10 μ s.

La boucle commence par l'acquisition des données de la puissance réfléchie. La photodiode du montage expérimental rafraîchit ses données toutes les nanosecondes. Cette information analogique doit être convertie en valeur numérique afin d'être analysée. Présentement, cela se fait à l'aide de l'oscilloscope, les mesures étant transférées par port GPIB vers l'ordinateur qui les traite. Ce transfert d'information prend plusieurs millisecondes ce qui est inacceptable. Il est nécessaire d'utiliser des convertisseurs analogique-numérique pour communiquer directement avec un circuit dédié ou un processeur. Un essai a été tenté avec deux convertisseurs AD9433 (fabriqués par *Analog Device*) déjà présents sur la carte de prototypage utilisé pour la formation des impulsions. Ces convertisseurs ont un taux d'échantillonnage de 125 millions de données par seconde, une précision de 12 bits et un délai de transfert de donnée de 10 cycles, soit 80 ns. Même si ce délai est fort acceptable et la précision est suffisante, les tests ont montré que le taux d'échantillonnage était trop faible (8 ns par point) par rapport aux besoins. Un taux d'échantillonnage de 400 ou 500 millions de points par seconde permettrait la latitude nécessaire pour la prise de données. Un exemple de convertisseur compatible à nos besoins est le *AT84AS001*.

Après la mesure de puissance réfléchie numérisée et mise en mémoire, elle doit être traitée par un processeur ou un circuit dédié, inclus par exemple dans une carte de prototypage telle que celle déjà présente dans le montage. Certains calculs tels celui de la recherche de la puissance maximale atteinte sont très rapides à compléter. Dans ce cas particulier, même en prenant 1 cycle d'horloge pour chaque point mémorisé, le délai est inférieur à la microseconde.

Le calcul effectué, il faut alors transférer l'information sur la prochaine impulsion au modulateur acousto-optique. Celle-ci doit passer par un convertisseur numérique-analogique. Ceux de la carte de prototypage (*DAC904* fabriqué par *Texas Instruments*) ont une précision de 14 bits et un taux d'échantillonnage de 165 millions de points par seconde. Il n'est pas nécessaire d'avoir un taux d'échantillonnage plus élevé puisque le temps de montée du modulateur acousto-optique est de toute façon

de l'ordre de 5 ns à 10 ns. Après la création de l'onde acoustique dans le cristal, elle doit se propager jusqu'au faisceau laser ce qui prend une centaine de nanosecondes et plus dépendamment de l'alignement de l'appareil. Le faisceau laser se propage à travers l'optique, interagit avec le circuit ce qui change la puissance réfléchie mesurée et referme la boucle.

Tous les délais sommés, on obtient une boucle pouvant se refermer en moins de $2\ \mu\text{s}$ ce qui est largement inférieur au temps cible de $10\ \mu\text{s}$. Le temps résiduel peut être utilisé afin d'exécuter des calculs plus poussés lors de l'analyse des courbes de puissances réfléchies.

6.5.2 Optimisation des coûts

L'utilisation d'un laser continu pulsé en externe permet une très grande flexibilité lors de l'établissement des conditions d'irradiation et permet un contrôle de la forme de l'impulsion, sa durée et l'intervalle temporel entre les irradiations. Un tel laser est cependant plus dispendieux et demande plus d'entretien qu'un laser de même puissance mais pulsé à l'interne. Il serait souhaitable que la méthode de contrôle *in-situ* optique soit compatible avec un laser pulsé à l'interne, ce qui faciliterait grandement son intégration en milieu industriel.

Une nécessité de la méthode de contrôle est l'ajustement rapide de la puissance des impulsions. En utilisant un laser pulsé, cela peut encore être réalisé avec un modulateur acousto-optique. Au lieu de créer une impulsion, le modulateur sert alors à filtrer de façon continue la puissance des impulsions du laser, l'ajustement s'effectuant entre les impulsions envoyées.

C'est la modulation externe des impulsions du laser qui permet de modifier la forme temporelle de celles-ci. Les lasers pulsés ont généralement des impulsions de formes gaussiennes ou carrées, ce qui ne donne pas autant de flexibilité dans l'analyse des mesures de la puissance réfléchie que des formes arbitraires, telles les impulsions en dent-de-scie. L'analyse du temps de passage de la première à la deuxième zone

ne pourrait être faite par exemple avec des impulsions carrées. Certains critères telle la puissance réfléchie maximale lors de l'irradiation pourrait cependant s'appliquer permettant la compatibilité du contrôle *in-situ* optique avec un laser pulsé.

Afin de diminuer la quantité d'équipement et le coût du système, il serait intéressant d'utiliser la puissance réfléchie par le laser de fonte plutôt que d'utiliser un laser sonde. La mesure de la puissance réfléchie serait alors la convolution de mesures semblables à celles obtenues dans ce travail et la forme temporelle de l'impulsion du laser de fonte. Évidemment, l'information sur la puissance réfléchie après l'impulsion serait perdue. De plus, la photodiode utilisée lors de ce travail ne mesure que la différence de puissance réfléchie. L'utilisation de l'impulsion de fonte engendrerait une mesure de la puissance de base superposée à la différence de la puissance réfléchie, diminuant considérablement le contraste. L'utilisation d'un même laser pour fondre et pour mesurer la puissance réfléchie présente plusieurs problèmes qui devront être considérés avant son introduction en industrie.

6.6 Autres utilisations de la mesure *in-situ* optique

En plus de contrôler les propriétés de la résistance diffusée créée, le montage de mesure de puissance réfléchie peut être utilisé pour d'autres applications lors de l'ajustement du circuit. L'information provenant du faisceau laser sonde peut être interprétée différemment et transmettre de l'information sur la position du circuit.

En plus des paramètres de fonte, une caractéristique très importante lors de la création de résistances diffusées est la position de l'irradiation. Même si les conditions de fonte sont idéales, si l'irradiation n'est pas centrée sur le dispositif, il ne pourra pas y avoir création d'un lien diffusé. Les irradiations présentées dans ce travail ont été soigneusement alignées par l'utilisateur à l'aide d'une caméra. Dans ces conditions, chaque alignement prend quelques dizaines de secondes, ce qui est inacceptable dans

le cadre d'une fabrication industrielle. Lors d'une fabrication de masse, l'échantillon est déplacé de façon automatique en suivant les plans de conception du circuit. L'incertitude sur les tables de déplacements et sur la fabrication du circuit s'accumulent d'une irradiation à l'autre et pour cette raison, après une série d'interventions laser, il est nécessaire de replacer le système à l'aide d'un patron de reconnaissance inséré dans le circuit. Un logiciel de reconnaissance d'image analyse la position du patron et replace le circuit à sa position idéale. Puisque cette étape est longue, elle ne peut être exécutée entre chaque irradiation.

Il serait intéressant d'utiliser les propriétés de mesures en temps réel de la puissance réfléchie pour analyser les déplacements. En plaçant intentionnellement une couche de métal à un niveau inférieur, près du dispositif ajustable et sur le chemin du laser, nous devrions observer des variations de la puissance réfléchie lors du déplacement. Cette mesure pourrait être associée aux données temporelles et spatiales du déplacement afin de déterminer la nécessité d'un ajustement de position.

L'analyse de la position en z de l'échantillon serait également intéressante et facile à utiliser. La focalisation se fait elle aussi souvent par reconnaissance d'image d'un patron particulier inséré dans le circuit lors de procédés industriels. Le temps nécessaire à ce protocole d'ajustement est une fois de plus trop important pour être utilisé avant chaque irradiation. L'une des propriétés de la puissance réfléchie captée par le montage, est qu'elle est sensible seulement à ce qui se passe au point de focalisation. Si l'échantillon est mal positionné en z , la puissance réfléchie chute rapidement. Il serait alors intéressant d'implémenter un algorithme analysant la puissance réfléchie absolue en fonction de la position en z , et ensuite replacer l'échantillon à l'endroit où la réflexion est maximale. On s'assure ainsi d'avoir toujours les mêmes conditions d'irradiation et d'analyse et ce, de façon totalement automatique.

Ces méthodes n'ont pas été testées dans un cadre industriel. Il est impossible de déterminer s'ils permettent une augmentation de la précision et si les conditions de déplacement, comme les vibrations et la reproductibilité bidirectionnelle des moteurs,

permettent une application plus rapide que les méthodes classiques. Cependant, ils pourraient rentabiliser l'intégration du montage de mesure *in-situ* dans le processus de fabrication.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était de développer une méthode de contrôle de création de résistances diffusées par laser à partir de mesure *in-situ* de la puissance réfléchie. Pour cela, il fallait vérifier l'applicabilité de la prise de mesure de la puissance réfléchie sur différentes technologies de circuits intégrés ainsi que caractériser les phénomènes physiques et chimiques influençant ces mesures. À partir de ces résultats, des méthodes de contrôles de la fabrication de résistances diffusées par laser devaient aussi être proposées et testées.

Dans un premier temps, des mesures de la puissances réfléchies ont été prises sur divers substrats. Les circuits, fabriqués selon différentes technologies de circuits intégrés, ont présentés des comportements différents comparés aux mesures expérimentales sur silicium recouvert d'oxyde natif obtenues par Magny (2005). On a noté parmi ceux-ci une sensibilité accrue de la puissance réfléchie aux faibles irradiations ainsi qu'une diminution de cette puissance lors d'irradiations de plus fortes intensités. Sur la technologie *TSMC 180 nm*, un lien étroit a été créé entre la formation de défauts optiques visibles sur le circuit et les mesures de la puissance réfléchie.

Dans un deuxième temps, une caractérisation poussée de la technologie *TSMC 180 nm* a été faite afin de connaître les couches diélectriques présentes sur le dispositif ajustable ainsi que les conséquences des irradiations sur celles-ci. Il a été montré que sur ces circuits, une couche anti-réfléchissante était présente à quelques dizaines de nanomètres au-dessus du silicium et qu'elle réagissait fortement à l'irradiation. Une association a été également réalisée entre les déformations observées sur le silicium, la destruction des premières couches diélectriques et la possibilité de créer un lien résistif dans le dispositif.

Différentes approches ont été tentées afin de réaliser le lien entre les phénomènes physiques en jeu lors d'une irradiation sur un circuit intégré et les profils de puissance réfléchie mesurés expérimentalement. Une simulation des déformations de la surface de silicium a permis d'expliquer en partie certains phénomènes dont la baisse de la puissance réfléchie pendant l'irradiation à des puissances très élevées et l'augmentation de celle-ci après la fin de l'impulsion. L'apparition de ces phénomènes à plus faible intensité est donc due aux propriétés optiques à haute température des diélectriques utilisés, qui sont malheureusement très peu connues.

Finalement, diverses approches d'utilisation des mesures de puissance réfléchie comme contrôle de la fabrication de résistances diffusées par laser ont été proposées. Plusieurs critères tels que la puissance maximale réfléchie, le temps d'atteinte de ce maximum ainsi que le temps de transition entre deux comportements typiques des courbes expérimentales ont démontré un bon potentiel pour prédire la création ou non d'un lien résistif après une série d'irradiation. L'utilisation de ce dernier critère dans un processus de contrôle a permis une diminution de 85% du taux d'erreur de fabrication sur des circuits au comportement atypique en milieu expérimental. Des tests ont été effectués afin de lier les mesures *in-situ* à la valeur de la résistance créée mais les résultats ne sont pas suffisamment convaincants pour que cette approche soit implémentée tel quel dans un procédé de fabrication de résistances diffusées par laser.

Les résultats encourageants de contrôle de la création de résistances devront être confirmés dans un milieu industriel. Les tests devront être refaits sur un échantillonnage plus grand de résistances diffusées et sur des circuits fabriqués dans divers conditions. Pour cela, il serait intéressant de travailler directement sur une gaufre à divers emplacements tel que les extrémités et le centre.

Il serait aussi intéressant d'effectuer des tests de contrôle *in-situ* optique sur des circuits de technologie *TSMC 180 nm*. Les premiers résultats sur ces circuits ont montré un lien très étroit entre la création de résistances et les divers comportements de mesures de la puissance réfléchie, mais des test plus poussés n'ont pu être exécutés

car aucun circuit fabriqué avec cette technologie et en notre possession n'est formé d'un nombre suffisant de résistances identiques ayant des variations de fabrication intéressantes à détecter.

Lorsque ces tests seront réalisés avec des résultats concluants, il sera justifié d'investir dans un montage industriel comportant un système de contrôle *in-situ* optique. De plus, tout indique que la méthode permettrait de grandement améliorer le taux de réussite et la qualité des résistances diffusées par laser sur des circuits intégrés.

BIBLIOGRAPHIE

- ADLER, E., DEBROSSE, J., GEISLER, S., HOLMES, S., JAFFE, M., JOHNSON, J., KOBURGER, C., LASKY, J., LLOYD, B., MILES, G., NAKOS, J., NOBLE, W., VOLDMAN, S., ARMACOST, M. ET FERGUSON, R. 1995. « The evolution of IBM CMOS DRAM technology ». *IBM Journal of Research and Development*. 39:1-2. 167–88.
- BENNET, T., KRAJNOVICH, D., GRIGOROPOULOS, C., BAUMGART, P. ET TAM, A. 1997. « Marangoni mechanism in pulsed laser texturing of magnetic disk substrates ». *IEEE Transactions on Magnetics*. 119. 589–596.
- BÄUERLE, D. 2000. *Laser Processing and Chemistry*. Springer.
- CANTER, J., CHAPMAN, G., MATHUR, B., NAIMAN, M. ET RAFFEL, J. 1986. « A laser-induced ohmic link for wafer-scale integration in standard cmos processing ». *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. 33:11. 1861.
- COTE, D., NGUYEN, S., STAMPER, A., ARMBRUST, D., TOBBEN, D., CONTI, R. ET LEE, G. 1999. « Plasma-assisted chemical vapor deposition of dielectric thin films for ULSI semiconductor circuits ». *IBM Journal of Research and Development*. 43:1-2. 5–39.
- DEGORCE, J.-Y., GILLET, J.-N., MAGNY, F. ET MEUNIER, M. 2005. « Three-dimensional transient temperature field model for laser annealing ». *Journal of Applied Physics*. 97:3. 033520–6.
- DEGORCE, J.-Y., SAUCIER, A. ET MEUNIER, M. 2003. « A simple analytical method for the characterization of the melt region of a semiconductor under focused laser irradiation ». *Applied Surface Science*. 208-209. 267–71.
- D.HOYLAND, J. ET SANDS, D. 2006. « Temperature dependent refractive index of amorphous silicon determined by time-resolved reflectivity during low fluence excimer laser heating ». *Journal of Applied Physics*. 99:6. 063516–4.

- EMMONY, D. C., PHILLIPS, N. J., TOYER, J. H. ET WILLIS, L. J. 1975. « Topography of laser-irradiated germanium ». *Journal of Physics D : Applied Physics*. 8:13. 1472–1479.
- ERDI, G. 1975. « A precision trim technique for monolithic analog circuits ». *IEEE J. Solid-State Circuits*. Sc-10:6. 412–416.
- GAGNON, Y., SAVARIA, Y. ET MEUNIER, M. 2000. *Method and apparatus for tuning the impedance of integrated semiconductor devices*. World Intellectual Property Organization : WO200077836-A1.
- HELLER, J., BARTHA, J. W., POON, C. C. ET TAM, A. C. 1999. « Temperature dependence of the reflectivity of silicon with surface oxide at wavelengths of 633 and 1047 nm ». *Applied Physics Letters*. 75:1. 43–45.
- HIROSHI, K. 1963. « Diffusion coefficients of impurities in silicon melt ». *Japanese Journal of Applied Physics*. 186:1-4. 52–56.
- IACONA, F., FRANZO, G. ET SPINELLA, C. 2000. « Correlation between luminescence and structural properties of si nanocrystals ». *Journal of Applied Physics*. 87:3. 1295–1303.
- KUMAR, R., WONG, T. K. S. ET SINGH, N. 2004. « Dielectric bottom anti-reflective coatings for copper dual damascene interconnects ». *Microelectronic Engineering*. 71:2. 125–132.
- LACOURSE, A. 2001. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- LIAO, Y. 2005. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal.
- LOWNDES, D. ET JELLISON, G. 1984. *Semiconductors and semimetals. Vol.23 : Pulsed laser processing of semiconductors*. Academic Press. 691p.
- MAGNY, F. 2005. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- MEUNIER, M., GAGNON, Y., SAVARIA, Y., LACOURSE, A. ET CADOTTE, M. 2002. « A novel laser trimming technique for microelectronics ». *Applied Surface Science*. 2:4. 212–219.

- MITO, M., TSUKADA, T., HOZAWA, M., YOKOYAMA, C., LI, Y.-R. ET IMAISHI, N. 2005. « Sensitivity analyses of the thermophysical properties of silicon melt and crystal ». *Measurement Science and Technology*. 16:2. 457–466.
- NARAYANA, T. B., RAMKUMAR, K. ET SATYAM, M. 1992. « Mechanism for downward trimming of polymer resistor ». *Journal of Physics D : Applied Physics*. 25:4. 717–721.
- PARKER, D. ET WEILING, H. 1990. « Polysilicon resistor trimming by laser link ». *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. 3:2. 80–83.
- REIMER, L. 1993. *Transmission electron microscopy : physics of image formation and microanalysis*. 3 ed. Springer-Verlag.
- RIOUX, S., LACOURSE, A., SAVARIA, Y. ET MEUNIER, M. 2005. « Design methods for CMOS low-current finely tunable voltage references covering a wide output range ». *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 5. 4257–4260.
- SACKINGER, E. ET GUGGENBUHL, W. 1975. « An analog trimming circuit based on a floating-gate device ». *IEEE J. Solid-State Circuits*. Sc-23:6. 1437–1440.
- SCHWARZ-SELINGER, T. 2001. « Micron-scale modifications of Si surface morphology by pulsed-laser texturing ». *Phys. Rev. B*. 64. 155323.
- SOOY, W. R., GELLER, M. ET BORTFELD, D. P. 1964. « Switching of semiconductor reflectivity by a giant pulse laser ». *Applied Physics Letters*. 5:3. 54–56.
- STRAND, T., TAM, A., BAUMGART, P. ET COLONIA, J. 1998. « Bump formation and growth by multiple laser pulses on Ni-P disk ». *IEEE Transactions on Magnetics*. 34:4. 1786–1788.
- TAM, A., POUR, J., NGUYEN, T., KRAJNOVICH, D., BAUMGART, P., BENNETT, T. ET GRIOROPOULOS, C. 1996. « Experimental and theoretical studies of bump formation during laser ». *IEEE Transactions on Magnetics*. 32:5. 3771–3773.

- TOBITA, T. ET TAKASAGO, H. 1991. « New trimming technology of a thick film resistor by pulse voltage method ». *IEEE Transactions on Components, Hybrid and Manufacturing Technology*. 14:3. 613–617.
- VATSYA, S. ET NIKUMB, S. 2003. « Modeling of fluid dynamical processes during pulsed-laser texturing of material surfaces ». *Physical Review B*. 68:3. 035410–5.
- WILD, G. 2005. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- WOLF, H. F. 1969. *Silicon Semiconductor Data*. Pergamon Press. 648p.
- WOOD, R. F., KIRKPATRICK, J. R. ET GILES, G. E. 1981. « Macroscopic theory of pulsed-laser annealing. ii. dopant diffusion and segregation ». *American Physical Society*. 23:10. 5555.
- WYSOCKI, G., DENK, R., PIGLMAYER, K., ARNOLD, N. ET BAUERLE, D. 2003. « Single-step fabrication of silicon-cone arrays ». *Applied Physics Letters*. 82:5. 692–693.
- YOSHIKAWA, T. ET MORITA, K. 2003. « Removal of phosphorus by the solidification refining with Si-Al melts ». *Science and Technology of Advanced Materials*. 4:6. 531–534.