



Titre: Caractérisation électrique et vieillissement de résistances de
Title: silicium polycristallin modifiées par laser

Auteur: Julie Fantoni
Author:

Date: 2010

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Fantoni, J. (2010). Caractérisation électrique et vieillissement de résistances de
Citation: silicium polycristallin modifiées par laser [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/472/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/472/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Michel Meunier, & Yvon Savaria
Advisors:

Programme: Génie physique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE ET VIEILLISSEMENT DE
RÉSISTANCES DE SILICIUM POLYCRISTALLIN MODIFIÉES PAR
LASER**

JULIE FANTONI

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 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE ET VIEILLISSEMENT DE RÉSISTANCES DE
SILICIUM POLYCRISTALLIN MODIFIÉES PAR LASER

présenté par : FANTONI Julie.

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

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

M.GODBOUT Nicolas, Ph.D, président.

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

M.SAVARIA Yvon, Ph.D, membre et codirecteur de recherche.

M.AUDET Yves, Ph.D., membre.

DÉDICACE

Fier d'être Marseillais

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur de recherche monsieur Michel Meunier pour m'avoir permis de réaliser mon projet de maîtrise au sein de son laboratoire de recherche et de son équipe de chercheurs. De plus, ses nombreux conseils techniques dans le domaine de l'optique et la physique ainsi que son soutien moral et financier m'ont permis de mener à bien ce projet dans de bonnes conditions de travail.

Je souhaite aussi remercier mon co-directeur de recherche Monsieur Yvon Savaria pour son aide et son soutien tout au long du projet et plus particulièrement dans le domaine de la microélectronique.

Je remercie les membres du jury, Nicolas Godbout et Yves Audet, d'avoir accepté de faire partie de mon jury pour l'obtention de mon diplôme de maîtrise et ainsi que du temps consacrés à la lecture de mon mémoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement Étienne Boulais qui fut mon partenaire en début de projet, ce qui m'a permis d'intégrer rapidement l'équipe de travail et d'obtenir de l'aide et des conseils sur le projet à réaliser.

Je voudrais aussi remercier Rémi Lachaine et Étienne Boulais pour leurs précieux conseils et toute l'aide qu'ils m'ont apportée pour approfondir mes connaissances et développer des compétences dans la manipulation et la compréhension des montages optiques.

Je remercie aussi mes collègues de bureau et plus particulièrement David Rioux, Mathieu Maisonneuve, Sébastien Besner et Paul Boyer pour le bon temps passé et la bonne ambiance dans le bureau.

Je souhaite en dernier lieu remercier Monsieur Alain Rochefort pour l'aide, le soutien moral et tout le temps qu'il m'a consacré en début de maîtrise pour me permettre de rester au sein de l'École Polytechnique de Montréal et poursuivre mon projet de recherche.

RÉSUMÉ

La technologie CMOS et les procédés de fabrication conventionnels pour des circuits intégrés sont associés à une incertitude sur la valeur des composants. Cette variabilité des procédés de fabrication peut avoir des conséquences sur les performances des circuits et plus particulièrement dans le domaine des circuits analogiques. De nos jours, les circuits intégrés sont constitués de technologies numériques qui tolèrent une incertitude de fabrication et de composants analogiques, tels que des résistances, qui nécessitent un ajustement précis de leur valeur. Cet ajustement peut être effectué à l'aide d'une méthode de post-fabrication ou bien par une modification du procédé de fabrication, afin d'obtenir des circuits performants et compétitifs. Plusieurs méthodes ont été développées pour améliorer les performances des résistances par des méthodes de post-fabrication dont l'ajustement de la valeur des résistances par laser.

Dans ce mémoire, les composants utilisés sont des résistances de silicium polycristallin (Poly-Si) fabriquées à l'aide d'une technologie CMOS de 180 nm sur des circuits intégrés permettant une intervention laser sur la surface des résistances. Pour réaliser les différents ajustements, un laser pulsé nanoseconde est utilisé dont la fluence d'opération est située autour ou en dessous de la fluence seuil de fonte du Poly-Si pour éviter des dommages à la structure du matériau. Cette méthode présente plusieurs avantages dont la diminution des risques d'endommager des circuits sensibles environnants. En effet, la forte localisation du traitement par laser permet de ne pas affecter les autres composants du circuit lors d'une intervention. De plus, les structures utilisées ne nécessitent pas d'étapes de fabrication supplémentaires, ce qui permet de réduire les coûts et prend peu de place sur le circuit. Cette méthode permet de réaliser un ajustement fin, précis et reproductible de la résistance avec une erreur maximale de 500 ppm.

L'objectif de ce projet de maîtrise est d'analyser les différents paramètres laser qui permettent d'obtenir un ajustement précis des résistances avec la meilleure stabilité possible.

Des mesures par spectroscopie Raman permettent d'observer et de caractériser les changements structuraux sur la couche de Poly-Si engendrés par l'intervention laser. Les mesures électriques de plusieurs résistances permettent de caractériser les paramètres laser permettant d'obtenir les composants les plus performants et les plus stables lors d'une irradiation par laser. Des mesures ont été réalisées à l'aide d'un four de chauffage pour simuler le vieillissement prématuré des structures et pour pouvoir caractériser la stabilité des résistances dans le temps. Il est démontré

qu'en fonction des applications et de la précision que l'on désire atteindre sur les résistances, la stabilité du composant est comparable à celle obtenue avec d'autres méthodes d'ajustement telle que la méthode par impulsion de courant.

De plus, un modèle électrique est établi pour permettre de prédire la valeur de la résistance en fonction de la fluence du laser, du nombre d'impulsions et de la longueur des impulsions utilisées. Lorsque la fluence de seuil de fonte est respectée, l'erreur maximale entre une modification expérimentale et la prédiction est de 1 500 ppm.

Après un chauffage des résistances de 300 heures dans un four à 150 °C, les composants non modifiés par laser ont une dérive de leurs valeurs initiales de 0.7 %, alors que les composants affectés par laser ont une dérive de 1.2 %. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par la méthode de modification par impulsions de courant où les résistances ajustées présentent une dérive de 1% par rapport à leurs valeurs initiales pour un chauffage de 162 °C pendant 200 heures.

Étant donné que beaucoup de paramètres peuvent varier pour permettre un changement de la valeur de la résistance, des recommandations sont faites en fin de ce mémoire pour permettre d'obtenir les résistances désirées avec les meilleures performances possibles en fonction de l'application souhaitée.

ABSTRACT

Several classes of integrated microelectronic circuits require highly precise and stable analog components that cannot be obtained directly through standard CMOS fabrication processes. Those components must thus be calibrated either by a modification of the fabrication process or by the application of a post-fabrication tuning procedure. Many successful post-fabrication tuning processes have been introduced in the field of resistor calibration, including resistor laser trimming which is the core subject of this thesis. In this thesis, trimmed components are standard CMOS 180nm technology polysilicon resistors, integrated in circuits specially designed to allow laser intervention on their surface. The laser used is a nanosecond pulsed laser for which the fluence is set below the melting threshold of polysilicon in order to prevent damage to the material structure. This novel low-power highly localized procedure reduces the risk of damaging sensitive surrounding circuits and requires no additional fabrication step, allowing smaller dies areas and reduced costs. Precise, reliable and reproducible devices have been tuned using this technique with a precision below 500 ppm. The main objective of this research is to study and analyze the effect of the laser parameters variation on the trimmed component properties and to optimize those parameters in regard of the desired precision and stability of the final product. Raman spectroscopic measurements are performed to observe and characterize structural modifications of the polysilicon material following laser irradiation as precise resistance measurements and standardized in-oven aging tests allow the complete characterization of the device in regard of precision and stability. It is shown that for a given precision, this novel low-power trimming technique produces devices with a stability comparable to those obtained with another trimming technology such as the pulsed current method. An electrical model is also developed to predict the resistance modification with the laser fluence, the number of pulses as well as the duration of those pulses. The model is shown to be 1 500 ppm accurate when laser fluence is set accordingly to the melting threshold of polysilicon. Concerning stability, results show that, following a 300 h, 150 °C aging procedure, laser trimmed components present a 1.2% resistance drift from their initial resistance value whereas a 0.7% drift is observed on untrimmed samples. Those results are comparable to those obtained with the pulsed current trimming technique which produces trimmed component with a 1% resistance drift following a 200 h 162 °C aging procedure.

Recommendations are given in the conclusion as to which laser parameters to modify and how to modify them in order to produce the desired trimmed devices with the best performance possible.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 TECHNIQUE DE MODIFICATION POST FABRICATION DE RÉSISTANCES POUR LA MICROÉLECTRONIQUE.....	3
1.1 Incertitude de la valeur des résistances dans un circuit intégré.....	3
1.2 Ablation laser de couches minces	5
1.3 Serpentin de résistances Poly-Si	6
1.4 Résistance diffusée par laser	8
1.5 MOSFET à grille flottante.....	9
1.6 Modification de résistances Poly-Si par impulsions de courant	10
1.7 Modification de résistances de Poly-Si par laser	11
CHAPITRE 2 SYSTÈME DE MODIFICATION PAR LASER DE RÉSISTANCES ET DE CIRCUITS INTÉGRÉS	13
2.1 Système de modification de résistances par laser nanoseconde.....	13
2.1.1 Le laser Nd : YAG	14
2.1.2 Formation des impulsions : modulateur acousto-optique	15

2.1.3	Carte de prototypage	15
2.1.4	Système de positionnement du faisceau laser	16
2.1.5	Montage de la mesure in-situ	16
2.1.6	Système de focalisation	16
2.2	Échantillons utilisés : Circuit intégré	18
2.2.1	Circuit intégré complet.....	19
2.2.2	Résistances de Poly-Si	22
CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION DU CHANGEMENT STRUCTURAL PAR SPECTROSCOPIE RAMAN DE POLY-SI TRAITÉE PAR LASER.....		28
3.1	Spectroscopie Raman	28
3.1.1	Principe de la spectroscopie Raman.....	28
3.1.2	Structure d'un spectromètre Raman.....	29
3.2	Spectroscopie Raman du Poly-Si modifié par laser	31
3.2.1	Conditions expérimentales	31
3.2.2	Spectre Raman de référence du silicium cristallin et amorphe	32
3.2.3	Spectre Raman d'un échantillon de Silicium polycristallin	33
3.2.4	Spectre Raman du Poly-Si modifié par laser	35
3.2.5	Zone affectée par le faisceau laser	37
3.3	Estimation de la modification structurale.....	38
CHAPITRE 4 MODIFICATION DE RÉSISTANCES DE POLY-SI MODIFIÉES PAR LASER NANOSECONDE		41
4.1	Conditions expérimentales	41
4.1.1	Fluence réelle sur l'échantillon	41
4.1.2	Type d'impulsion utilisée.....	42
4.1.3	Fluence seuil de fonte du Poly-Si.....	42

4.1.4	Mesure de résistances	43
4.2	Modification de résistances de Poly-Si sans couche de passivation	43
4.2.1	Effet de la puissance du laser sans chevauchement des impulsions	43
4.2.2	Effet de la durée de l'impulsion sans chevauchement des impulsions	48
4.2.3	Effet de la puissance de sortie du laser avec recouvrement total des impulsions	51
4.2.4	Effet de la durée des impulsions avec recouvrement des impulsions	52
4.3	Modification de résistances de Poly-Si avec une couche de passivation	54
4.3.1	Effet de la couche de passivation sur des résistances de Poly-Si sans chevauchement des impulsions	54
4.3.2	Effet du chevauchement des impulsions	57
4.4	Conclusion.....	58
CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION EN TEMPÉRATURE DE RÉSISTANCES POLY-SI MODIFIÉES PAR LASER		60
5.1	Coefficient de température des résistances	60
5.2	Conditions expérimentales	61
5.3	Test de vieillissement des résistances de Poly-Si.....	65
5.3.1	Effet de la fluence du laser	65
5.3.2	Effet du nombre d'impulsions.....	71
5.3.3	Effet d'une modification de 3% sur des résistances de Poly-Si.....	75
CHAPITRE 6 MODÉLISATION ET DISCUSSIONS		80
6.1	Modification de résistances de Poly-Si par laser	80
6.1.1	Mécanismes influençant la modification de résistance de Poly-Si	80
6.1.2	Schéma équivalent de la modification de résistances de Poly-Si.....	81
6.2	Vieillissement et stabilité des résistances de Poly-Si.....	87
6.3	Recommandations	89

CONCLUSION	91
BIBLIOGRAPHIE	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Méthodes d'ajustement post-fabrication de résistances	4
Tableau 2-1 : Épaisseur et composition des couches des résistances (Chateauneuf, 2008).....	23
Tableau 4-1 : Variation des résistances en ppm pour différentes fluences	47
Tableau 5-1 : Modification de résistances pour le test de vieillissement.....	67
Tableau 5-2 : Variation totale des résistances modifiées avec une seule impulsion de 300 ns	72
Tableau 5-3 : Variation totale des résistances modifiées	76
Tableau 6-1 : Dérive de résistances modifiées avec cinq impulsions pour plusieurs fluences	88
Tableau 6-2 : Dérive de résistance pour une modification de 3 % de la résistance initiale	89

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Différentes géométries pour l'ablation par laser de couches minces.....	6
Figure 1-2 : Vue en coupe d'une structure type de résistance serpentin Poly-Si.....	7
Figure 1-3 : Schéma d'un dispositif d'une résistance diffusée modifiée par laser (Meunier, 2002)	8
Figure 1-4 : MOSFET à grille flottante (Sweeney, 1989).....	9
Figure 1-5 : Technique de modifications de résistances par impulsions de courant (Feldbaumer, 1995).....	11
Figure 2-1 : Schéma de montage de fabrication de résistances de Poly-Si par laser et de mesures in-situ optiques (Laforte, 2006).....	14
Figure 2-2 : Rayon mesuré à l'aide de la mesure au couteau pour le laser Nd : YAG et le laser HeNe (Lachaine 2006)	18
Figure 2-3 : Circuit intégré final complet.....	21
Figure 2-4 : Image à fond sombre pour l'identification des couches minces (Chateaneuf, 2008)	23
Figure 2-5: Dessin de masques des résistances de Poly-Si	24
Figure 2-6 : Circuit électrique du module LPSP	25
Figure 2-7 : Schéma d'un fusible et d'un anti-fusible de connexion	26
Figure 2-8 : Réalisation d'un anti-fusible métallique de connexion (d'après Lachaine 2008)	26
Figure 3-1 : Principe de la spectroscopie Raman	29
Figure 3-2 : Description schématique d'un système Raman confocal (Noguera'03).....	30
Figure 3-3 : Spectre Raman de silicium cristallin, pic Raman à 520 cm^{-1}	32
Figure 3-4 : (a) Pic Raman du silicium amorphe à 480 cm^{-1} . (b) Spectre Raman du Silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H).....	33
Figure 3-5 : Spectre Raman du silicium polycristallin.....	34
Figure 3-6 : Spectre Raman de Poly-Si modifié par laser à 0.26 J/cm^2	35

Figure 3-7 : Spectre Raman d'un film de Silicium amorphe avant et après une intervention laser (Khait, 2002)	36
Figure 3-8 : Surface affectée par le faisceau laser pour une fluence de 0.45 J/cm ²	37
Figure 3-9 : Diamètre de la zone affectée par le laser à 50 % de cristallinité.....	38
Figure 3-10 : Pourcentage de cristallinité pour une fluence de 0.33 J/cm ²	39
Figure 3-11 : Pourcentage de cristallinité au centre de la zone affectée à différentes fluences	39
Figure 4-1 : Représentation schématique des impulsions laser sur une résistance	42
Figure 4-2 : Variation de la résistance (en ppm) en fonction du nombre d'impulsions de plusieurs résistances à 0.44 J/cm ²	44
Figure 4-3 : Variation de la résistance en fonction du nombre d'impulsions irradié à différentes fluences.....	45
Figure 4-4 : Variation de résistance en fonction de la fluence du laser	46
Figure 4-5 : Variation de la résistance en fonction du nombre et de la longueur des impulsions avec une puissance sur l'échantillon de 0.41 W.....	48
Figure 4-6 : Variation de résistance en fonction de la fluence du laser pour une série de quatre impulsions d'une durée de 100 ns	49
Figure 4-7 : Variation de résistance en fonction de la fluence du laser pour une série de quatre impulsions d'une durée de 200 ns	49
Figure 4-8 : Variation de résistance en fonction de la longueur de l'impulsion pour une fluence de 0.22 J/cm ²	50
Figure 4-9 : Variation de résistance en fonction du nombre d'impulsion et de la fluence laser pour une durée de 200 ns	51
Figure 4-10 : Variation de résistance en fonction du nombre d'impulsions et de la fluence laser pour une durée d'impulsion de 100 ns	52
Figure 4-11 : Variation de résistance en fonction du nombre d'impulsions et de la fluence laser pour une durée d'impulsion de 300 ns	53
Figure 4-12 : Variation de trois résistances de Poly-Si à 0.2 J/cm ²	54

Figure 4-13 : Variation de la résistance pour une puissance laser sur l'échantillon de 0.32 W.....	55
Figure 4-14 : Comparaison entre la variation de la valeur des résistances de Poly-Si avec et sans couche de passivation pour plusieurs fluences.....	56
Figure 4-15 : Variation de la valeur de résistances de Poly-Si pour une fluence de 0.2 J/cm ² avec chevauchement des impulsions au travers d'une couche de passivation	58
Figure 5-1 : Variation de la résistance en fonction de la température pour des résistances non modifiées et modifiées par laser	61
Figure 5-2 : Variation de résistance Poly-Si à la température de la salle grise	62
Figure 5-3 : Variation de la température de la salle grise	63
Figure 5-4 : Dérive d'une résistance modifiée par laser à 25 °C	65
Figure 5-5 : Cycle de chauffage du test de vieillissement.....	68
Figure 5-6 : Dérive relative de résistances chauffée à 150 °C pour une fluence de 0.3 J/cm ²	69
Figure 5-7 : Dérive relative en ppm de résistances Poly-Si dans le temps pour des fluences variant de 0.22 J/cm ² à 0.48 J/cm ²	70
Figure 5-8 : Dérivée de la variation en ppm par heure pour des fluences variant de 0.22 J/cm ² à 0.48 J/cm ²	71
Figure 5-9 : Cycle de chauffage du test de vieillissement.....	73
Figure 5-10 : Dérive de trois résistances Poly-Si pour une fluence de 0.33 J/cm ²	74
Figure 5-11 : Dérive relative des résistances de Poly-Si pour plusieurs fluences.....	75
Figure 5-12: Cycle de chauffage des résistances modifiées à 3%	77
Figure 5-13 : Dérive relative de résistances de Poly-Si pour différentes fluences	78
Figure 5-14 : Dérivée de la variation en ppm par heure pour des résistances modifiées à 3 %	79
Figure 6-1 : (a) Joints de grains avant la modification de résistances ; (b) Joints de grains après la modification de résistances	81
Figure 6-2 : Modèle électrique d'une surface de Poly-Si.....	82

Figure 6-3 : Modélisation électrique de la modification de résistances par laser pour plusieurs impulsions avec déplacement du faisceau laser.	83
Figure 6-4 : Variation de résistances de Poly-Si pour plusieurs fluences à l'aide d'une impulsion de 300 ns.....	84
Figure 6-5 : Comparaison de la variation expérimentale et la prédiction théorique pour plusieurs résistances à une fluence de 0.26 J/cm^2	86
Figure 6-6 : Comparaison de la modification théorique et expérimentale pour plusieurs fluences laser	87

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ABRÉVIATIONS

AFM	Microscope à force atomique (Atomic Force Microscope)
a-Si	Silicium amorphe
a-Si : H	Silicium amorphe hydrogéné
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxyde Semiconductor
c-Si	Silicium cristallin
EEPROM	Mémoire morte programmable et effaçable électriquement (Electrically Erasable Read Only Memory)
EPROM	Mémoire morte programmable et effaçable (Erasable Programmable Read Only Memory)
FIB	Faisceau d'ion focalisé (Focus Ion Beam)
HeNe	Hélium-Néon
LPP	Longue résistance de Polysilicium avec Passivation
LPSP	Longue résistance de Polysilicium Sans Passivation
LVS	Layout Versus Schematic
MET	Microscope électronique à transmission
MOSFET	Transistor à effet de champs métal oxyde (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor)
Nd : YAG	Grenat d'Yttrium-Aluminium dopée au Néodyne (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet)
PCB	Printed Circuit Board
PEELS	Spectroscopie de perte d'énergie des électrons parallèles (Parallel Electron Energy Loss Spectroscopy)

PIN	Positive Intrinsic Negative
Poly-Si	Polysilicium
ppm	Partie par million
SiO ₂	Oxyde de silicium
TCR	Coefficient de température des résistances
TSMC	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company

SIGLES

A _a	Amplitude amorphe (normalisé)
A _c	Amplitude cristalline (normalisé)
C _a	Pourcentage de cristallisation
Δ _{mes}	Variation de la modification (ppm)
F	Fluence (J/cm ²)
F _{seuil}	Fluence seuil de fonte du Poly-Si (J/cm ²)
L	Longueur des résistances (μm)
n	Nombre d'impulsions
P	Puissance (W)
ρ	Résistivité (Ω.m)
r	Rayon du faisceau laser (μm)
R _{init}	Résistance initiale non modifiée (Ω)
R _{mod}	Résistance modifiée (Ω)
R _p	Résistance parallèle (Ω)
R _{ref}	Résistance de référence à 25 °C (Ω)
T _{ref}	Température de référence de 25 °C
τ	Longueur des impulsions (ns)

INTRODUCTION

De nos jours, dans les pays développés et en voie de développement, une très grande partie de la population a accès à un ordinateur, téléphone cellulaire et lecteur de musique portatif. Dû à cette consommation d'appareils électroniques en constante progression, les circuits microélectroniques contenant des technologies analogiques et numériques ont besoin d'être de plus en plus performants pour un coût de fabrication moindre et une consommation d'énergie moindre.

Grâce à une bonne maîtrise et à l'évolution des méthodes de fabrication, des circuits CMOS de plus en plus denses sont fabriqués pour permettre une plus grande rapidité et de meilleures performances. Cependant, pendant la micro-fabrication des circuits, les incertitudes sur l'épaisseur des couches minces, la dimension des composants et le dopage ne sont pas négligeables. Pour les circuits numériques, la technologie CMOS permet de produire des circuits à faible coût qui sont peu affectés par les variations des procédés de fabrication. Malheureusement, pour les circuits analogiques, une haute précision est nécessaire et pour des résistances, l'erreur de micro-fabrication est supérieure à l'erreur maximale tolérée pour un circuit de haute performance. Pour compenser cela, plusieurs techniques de modifications post-fabrication ont été développées notamment à l'aide de laser. Par exemple, au cours des dernières années, la diffusion de dopant dans un MOSFET à l'aide d'un laser fut développée et brevetée par Meunier et al, en 2002 pour des circuits CMOS standard.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier une technique de modification de la valeur de résistances de polysilicium par laser pour des circuits intégrés en technologie CMOS. Avec cette méthode, il est possible d'abaisser la valeur de la résistance à une valeur souhaitée avec une grande précision et de nombreux avantages sont associés à cette technique. Pour cela, des modifications structurales sont apportées à la couche mince de Poly-Si déposée sur le circuit CMOS de technologie 180 nm à l'aide d'un laser pulsé opérant en dessous de la fluence seuil de fonte du Poly-Si. Les avantages majeurs de cette technique au niveau industriel sont la réduction des coûts de fabrication, puisqu'aucune étape supplémentaire de microfabrication n'est nécessaire, ainsi que la simplicité de mise en œuvre. De plus, la modification est localisée seulement à la résistance, ce qui permet d'éviter les dommages sur les autres composants présents sur le circuit. Dans ce mémoire, les différents paramètres laser influençant la modification de résistance ainsi que la stabilité des composants sont présentés et analysés.

Le chapitre 1 répertorie différentes méthodes permettant la modification post-fabrication de résistances sur circuits intégrés.

Le chapitre 2 décrit le montage laser nanoseconde Nd :YAG qui est utilisé tout au long des différentes expériences ainsi que les résistances de Poly-Si sur les circuits intégrés qui sont modifiées par le laser.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude de gaufrette de Poly-Si à l'aide de la spectroscopie Raman permettant de caractériser les différents changements structuraux apportés au Poly-Si lors d'une irradiation par laser. Les informations résultant de cette étude ont permis de déterminer l'aire de la surface affectée par le laser et l'impact sur la cristallisation du matériau.

Le chapitre 4 détaille les différents résultats expérimentaux obtenus avec les résistances de Poly-Si en fonction des différents paramètres laser. Deux méthodes d'utilisation du laser sont présentées : l'envoi de plusieurs impulsions laser mais distantes spatialement les unes des autres et l'envoi d'impulsions avec recouvrement, c'est-à-dire sans déplacement du laser ou de l'échantillon. Ces deux méthodes ont une influence différente sur l'évolution de la résistance mais sont complémentaires.

Le chapitre 5 présente l'étude de la stabilité des résistances modifiées par laser à travers plusieurs expériences en fonction des différents paramètres laser. Les résistances sont soumises à un échauffement thermique permettant de caractériser le vieillissement et la stabilité du composant à une température de 150 °C pendant 1 000 h. De plus, le coefficient de température des résistances de Poly-Si est déterminé.

Le chapitre 6 est constitué de la discussion des résultats obtenus dans les trois chapitres précédant et les différents phénomènes qui entrent en jeu lors de l'irradiation du Poly-Si par laser. De plus, un modèle électrique est présenté pour permettre de prédire l'évolution de la résistance en fonction du nombre et de la longueur des impulsions et de la fluence laser utilisée. Pour finir, quelques recommandations sont faites pour obtenir la valeur de la résistance souhaitée avec une excellente précision et une bonne fiabilité.

La conclusion de ce mémoire dresse un bilan des différents résultats obtenus et propose des investigations futures afin de rendre cette technique de modification de plus en plus performante.

CHAPITRE 1 TECHNIQUE DE MODIFICATION POST FABRICATION DE RÉSISTANCES POUR LA MICROÉLECTRONIQUE

1.1 Incertitude de la valeur des résistances dans un circuit intégré

De nos jours, les circuits numériques dominent le marché de l'électronique, comme par exemple pour les processeurs des ordinateurs de plus en plus performants. En revanche, pour les communications avec le monde extérieur, des circuits analogiques sont nécessaires et demandent de plus en plus de précision.

L'incertitude sur la valeur des résistances dans les circuits intégrés due aux variabilité des procédés de fabrication est un problème important pour des applications dans le domaine analogique. En effet, pour des applications numériques, une variation paramétrique est acceptable car les données sont transmises de façon binaire à l'aide de portes logiques. Seulement deux valeurs sont possibles : un "0" logique représenté souvent par une absence de tension ou un "1" logique pour la présence d'une tension. En revanche, pour les circuits analogiques, une infinité de valeurs de la tension est possible et donc une incertitude typique sur les résistances variant de 5 % à 25 % par rapport à sa valeur nominale peut affecter le comportement d'un circuit de façon importante.

Cette incertitude est bien connue et provient des tolérances du procédé de fabrication CMOS par rapport aux caractéristiques des résistances produites. Les phénomènes qui engendrent une erreur sur la résistance sont nombreux. Pour une résistance composée de couches minces de Poly-Si, les erreurs proviennent du dépôt des couches et des recuits. La variation des dimensions du composant, en particulier son épaisseur, provoque une variation de sa section et donc de la résistivité.

De plus, la concentration de dopant varie en fonction des méthodes utilisées pour l'implantation des dopants. Le recuit des gaufres de silicium influence la taille des grains, la densité de porteurs aux joints de grains et l'épaisseur de ces joints. Tous ces paramètres influencent la mobilité des porteurs et, par le fait même, la résistance de la couche de Poly-Si.

Toutes ces variations qui peuvent survenir pendant la fabrication des circuits intégrés augmentent l'incertitude sur la valeur des résistances. Il n'est généralement pas recommandé de changer les

procédés et étapes de fabrication pour des technologies CMOS à cause des coûts et de la complexité des étapes de fabrication. La solution envisageable pour obtenir des résistances les plus précises possibles est donc de modifier ces composants après la fabrication des circuits intégrés. Plusieurs méthodes d'ajustement de résistances post-fabrication sont connues et présentées dans le Tableau 1-1 qui seront développées au cours des prochains paragraphes. Peu d'entre elles présentent un potentiel aussi intéressant que celles utilisant l'irradiation laser des résistances de Poly-Si.

Tableau 1-1 : Méthodes d'ajustement post-fabrication de résistances

TYPE DE MODIFICATION	AVANTAGES	INCONVENIENTS	RÉFÉRENCES
Ablation de couches minces	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité • Rapidité 	<ul style="list-style-type: none"> • Étape de microfabrication supplémentaire • Dommages au matériau 	<ul style="list-style-type: none"> • Headley, 1973 • Ramirez-Angulo, 1987 • Badri Narayana, 1991
Serpentin de résistances de Poly-Si	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité • Rapidité 	<ul style="list-style-type: none"> • Espace sur le circuit • Étape de microfabrication 	<ul style="list-style-type: none"> • Parker, 1990 • Baker, 1997
Résistances diffusées par laser	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilité avec les procédés CMOS • Pas d'étape de microfabrication supplémentaire • Peu d'espace 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un contrôle externe • Impossibilité d'augmenter la résistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacourse, 2001 • Meunier, 2000

Resistances de poly-si modifiées par impulsions de courant	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilité avec les procédés CMOS • Pas d'étape de microfabrication supplémentaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Branchement électrique externe • Plots supplémentaires • Possibilité d'endommagement d'autres composants 	<ul style="list-style-type: none"> • Feldbaummer, 1995
MOSFET à grille flottante	<ul style="list-style-type: none"> • Rapidité • Très grande précision • Compatible avec les procédés CMOS 	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs étapes de microfabrication supplémentaires • Tensions de contrôle élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Sweeney, 1989 • Gao, 1994
Résistances de Poly-Si modifiées par laser	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilité avec les procédés CMOS • Pas d'étape de microfabrication supplémentaire • Très grande précision • Pas de dommages aux autres composants 	<ul style="list-style-type: none"> • Espace sur le circuit 	<ul style="list-style-type: none"> • Boulais, 2010

1.2 Ablation laser de couches minces

L'ablation de couche mince est une des premières technologies développées pour la modification de résistances par laser. Une méthode d'ablation par laser YAG fut présentée par (Headley, 1973).

Pour obtenir une modification de la valeur de la résistance, la forme du segment réalisée sur le matériau à l'aide d'un laser engendre des résultats différents sur l'ajustement de la valeur du composant. Certaines études comme celles de (Badri Narayana, 1991) ont été faites sur des

résistances où la région ablatée par le laser représente un segment dans la direction des électrodes (Figure 1-1). En fonction de la longueur et de la largeur du segment, il est possible de contrôler la diminution de la valeur de la résistance.

Aussi, il est possible de réaliser plusieurs segments sur une même résistance ou bien de réaliser des segments coudés pour augmenter la plage de modification des composants (Ramirez-Angulo, 1987). Il a été démontré que la géométrie des segments réalisés par ablation laser permettent de mieux contrôler la variation de la valeur de la résistance (Figure 1-1).

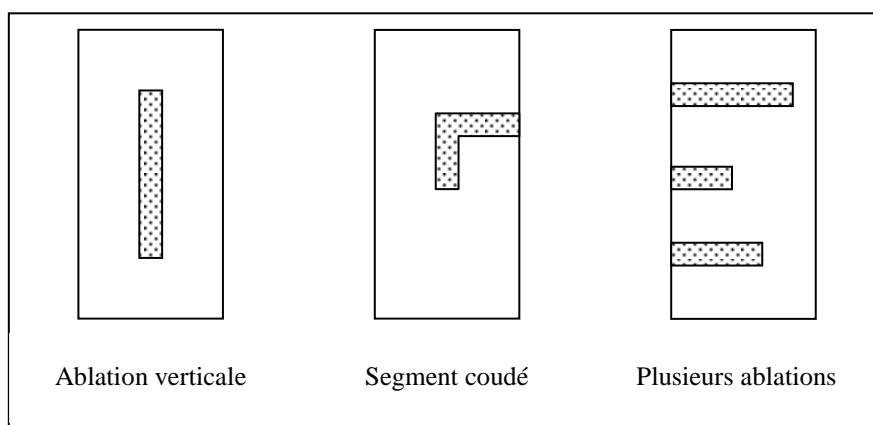


Figure 1-1 : Différentes géométries pour l'ablation par laser de couches minces

Les avantages de cette technique sont sa simplicité et sa rapidité, mais elle comporte certains inconvénients majeurs. En effet, pour avoir des résistances exploitables, il est nécessaire d'ajouter une étape supplémentaire de fabrication pour déposer une couche résistive qui sera la couche mince ablatée. De plus, l'ablation du matériau entraîne une modification physique et irréversible de la résistance entraînant l'apparition de microfissures. Celles-ci peuvent entraîner une instabilité sur la valeur de la résistance. Pour cette méthode, les paramètres du laser doivent être contrôlés de façon à vaporiser rapidement le matériau, ce qui provoque une éjection de matières entraînant une redéposition de résidus sur la surface de l'échantillon, ce qui peut engendrer une erreur sur la valeur de la résistance ou endommager les composants voisins sur le circuit. Finalement, avec cette technique, il n'est possible que d'augmenter la valeur de la résistance de façon permanente.

1.3 Serpentin de résistances Poly-Si

Une technique d'ajustement de résistances serpents de Poly-Si a été développée par (Parker, 1990) et quelques années plus tard par (Baker, 1997) pour des applications en

télécommunication. Plusieurs structures peuvent être envisagées pour la réalisation de ces résistances serpentins, la Figure 1-2 représente une structure typique d'un serpentin de Poly-Si.

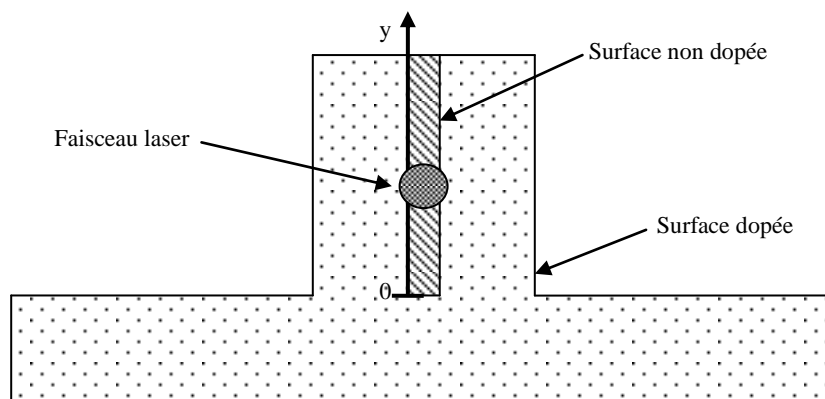


Figure 1-2 : Vue en coupe d'une structure type de résistance serpentins Poly-Si

La résistance est composée de deux parties distinctes : une région dopée de $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ au phosphore et une région non-dopée au centre. La surface non dopée a une longueur de $100 \mu\text{m}$ et une largeur pouvant varier de 2 à $4 \mu\text{m}$.

Le faisceau laser nanoseconde Nd : YAG est focalisé sur la région non dopée, et une série d'impulsions est envoyée pour faire un balayage de la zone. Lorsqu'une impulsion laser est envoyée, une diffusion latérale des dopants est réalisée, ce qui engendre une réduction de la valeur de la résistance. Avec cette technique, le changement de la valeur de la résistance est très rapide lorsque la puissance du laser augmente car la diffusion des dopants en phase liquide du Poly-Si est plus rapide. Lorsque le seuil de la puissance du laser pour la diffusion des dopants est atteint, un plateau apparaît et peut atteindre 5% de modification de la résistance par rapport à la valeur initiale. Le changement de la résistance dépend de plusieurs paramètres laser mais aussi du positionnement statique en y du faisceau sur la région non dopée. Une variation de 3% peut être observée lorsque le faisceau laser s'éloigne du "0" de référence.

Les avantages de cette technique sont la précision de la modification, la simplicité et la rapidité pour effectuer un ajustement. De plus, le coefficient de température des résistances modifiées et non modifiées reste quasi-identique. Il y a cependant deux inconvénients majeurs à cette technique : les résistances prennent énormément de place sur le circuit intégré et une étape de fabrication supplémentaire pour le circuit doit être ajoutée afin d'éviter l'exposition de la région non-dopée lors de l'implantation ionique.

1.4 Résistance diffusée par laser

Une technique qui peut sembler similaire aux résistances serpentins de Poly-Si a été développée par (Meunier, 2002) et (Lacourse, 2001). Cette méthode est la création de liens par diffusion de dopant dans un puits de type n ou p dépendamment du dispositif. La Figure 1-3 représente le schéma en coupe d'une résistance diffusée par laser.

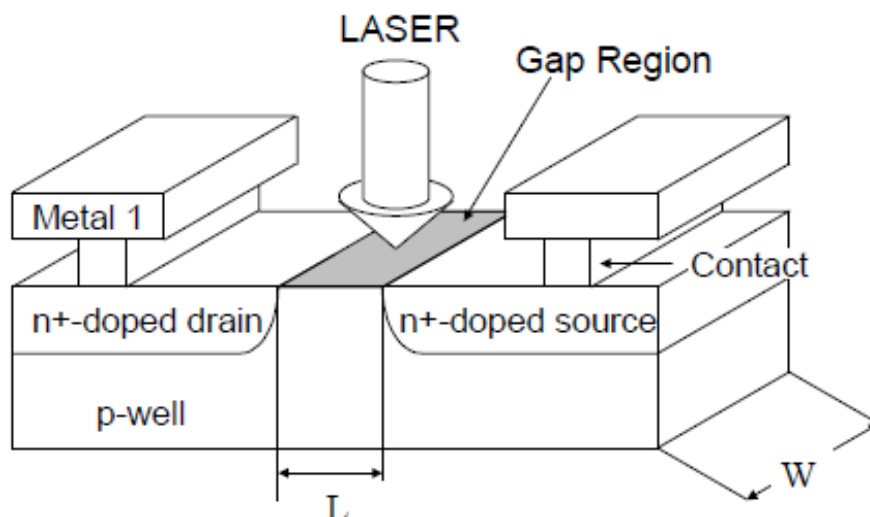


Figure 1-3 : Schéma d'un dispositif d'une résistance diffusée modifiée par laser (Meunier, 2002)

La structure est un MOSFET où la grille a été supprimée. Pour des résistances de type n, les deux régions n^+ hautement dopées représentant la source et le drain sont séparées d'une distance L par un puits dopé p, ce qui crée deux jonctions p-n. Le complément à cette structure pour une résistance de type p est possible avec des jonctions $p^+ - n - p^+$.

Avant l'intervention laser, cette structure représente un circuit ouvert. Un faisceau laser est focalisé sur le puits entre les jonctions. En irradiant cette surface, le silicium devient liquide, ce qui permet la diffusion des dopants des deux régions fortement dopées au centre du puits. Lorsque la zone n'est plus exposée au faisceau laser, le silicium se solidifie emprisonnant des dopants et permettant un lien électrique et donc résistif entre la source et le drain. La valeur de la résistance dépend des paramètres du laser (taille du faisceau, puissance laser, longueur et nombres d'impulsions), ce qui peut provoquer une diffusion plus ou moins importante des dopants dans le puits. Avec cette technique, l'ajustement de résistance variant de $100\ \Omega$ à

quelques méga-ohms avec une précision de 50 ppm peut être réalisé facilement et de façon contrôlée.

Les avantages de cette technique sont la très grande précision de l'ajustement de la valeur de la résistance, sa complète compatibilité avec les procédés CMOS sans étape de fabrication supplémentaire et le peu d'espace occupé sur le circuit intégré. Les inconvénients liés à cette méthode d'ajustement sont la nécessité d'avoir un contrôle externe dû au circuit ouvert et l'impossibilité d'augmenter la résistance car les dopants diffusés dans le puits ne peuvent plus être retirés. Aussi, pour une faible résistance (moins de 1.5 k Ω), le coefficient de température (TCR) est positif, alors qu'il devient négatif pour une résistance supérieure à 3 k Ω , et presque nulle pour une résistance autour de 2 k Ω . Un bon contrôle de la température est donc nécessaire.

1.5 MOSFET à grille flottante

Une méthode d'ajustement de composant pour des circuits analogiques à l'aide de transistor MOSFET à grille flottante est assez répandue (Sweeney, 1989) et (Gao, 1994). Un exemple de schéma d'un transistor à grille flottante est représenté à la Figure 1-4.

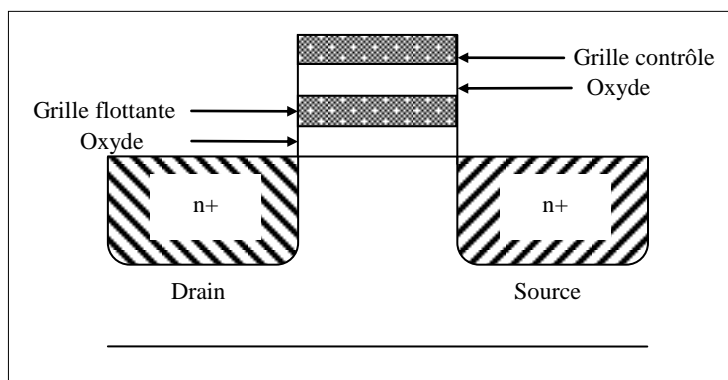


Figure 1-4 : MOSFET à grille flottante (Sweeney, 1989)

Ce composant est surtout utilisé en électronique numérique et plus particulièrement pour le stockage de données dans des EPROM et EEPROM. Pour faire fonctionner cette structure, un transfert de charges par effet tunnel à travers l'oxyde vers la grille flottante est réalisé. Le transfert de charge est contrôlé de manière programmable. Lorsqu'une tension positive est appliquée sur la grille de contrôle, les électrons sont injectés dans la grille flottante par effet tunnel et inversement, avec une tension négative, les électrons sont retirés de la grille flottante toujours par effet tunnel. Il est possible de contrôler le transfert de charge avec une très grande

précision en fonction de la tension appliquée. Ces composants peuvent être utilisés pour des applications liées à l'ajustement de tension de décalage des amplificateurs opérationnel (Richard Carley, 1989), au stockage de données et à l'ajustement de tension ou de courant de référence.

Les avantages de cette méthode sont la rapidité d'exécution pour effectuer l'ajustement de ce composant ainsi que la très grande précision de la modification pouvant être atteinte. Cette technologie est de plus entièrement compatible avec une technologie CMOS. En revanche, pour réaliser des composants avec cette structure, plusieurs étapes de fabrication sont nécessaires pour réaliser la grille flottante et les couches d'oxyde supplémentaires. Aussi, pour effectuer un transfert de charge par effet tunnel, la tension appliquée sur la grille de contrôle doit généralement excéder les tensions d'alimentation normales pour des circuits intégrés.

1.6 Modification de résistances Poly-Si par impulsions de courant

Des résistances de Poly-Si disponibles dans les procédés de fabrication CMOS peuvent être ajustées par des impulsions de courant (Feldbaumer, 1995). La structure de ces résistances, qui est totalement standard, est constituée d'une couche de Poly-Si d'une épaisseur de l'ordre de 300 nm déposée sur un oxyde et le substrat de Silicium. La couche mince de Poly-Si est normalement recouverte de plusieurs couches d'oxyde et de passivation.

Cette technique est utilisée pour l'ajustement de résistances individuellement et après que les dés de circuits intégrés soient encapsulés. L'ajustement des résistances est réalisé à l'aide d'une série d'impulsions de courant envoyée à travers la résistance par le biais des plots du circuit. L'amplitude des impulsions est augmentée à chaque impulsion. La Figure 1-5 représente la technique qui permet de modifier les résistances de Poly-Si avec des impulsions de courant.

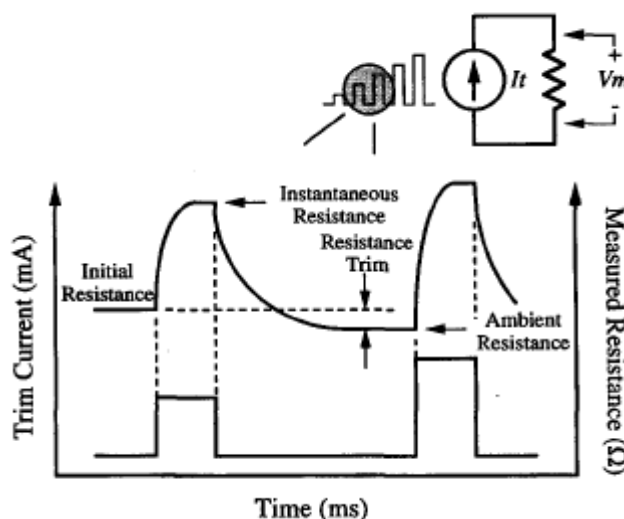


Figure 1-5 : Technique de modifications de résistances par impulsions de courant (Feldbaumer, 1995).

Avec cette technique, un échauffement du composant total est provoqué par les impulsions de courant, ce qui engendre une augmentation rapide de la valeur de la résistance dans un premier temps. Lorsque la résistance revient à la température ambiante, une diminution de sa valeur nominale est observée donc la résistance a été modifiée. Les paramètres qui permettent d'ajuster le pourcentage de modification avec les impulsions de courants sont la longueur et le nombre d'impulsions, et ainsi que l'intensité du courant utilisé. La valeur de la résistance peut être réduite de 50 % par rapport à cette valeur initiale avec une précision de 500 ppm.

Les avantages de cette technique sont la précision de la modification et la compatibilité totale avec les procédés de fabrication CMOS. De plus, aucune étape supplémentaire de fabrication n'est requise. En revanche, la nécessité d'avoir des branchements et des plots supplémentaires sur le boîtier pour accéder aux résistances augmente la surface et le coût du circuit. De plus, le fait d'injecter un courant dans le circuit peut endommager les autres composants présents sur celui-ci.

1.7 Modification de résistances de Poly-Si par laser

Une technique de modification de résistance de Poly-Si par laser peut être utilisée pour réaliser un ajustement précis des résistances. Cette méthode a été choisie dans ce mémoire car elle permet de regrouper de nombreux avantages des différentes techniques présentées précédemment. Avec des résistances de Poly-Si, aucune étape de fabrication supplémentaire n'est requise et les

composants sont des structures de résistance standard pour des procédés CMOS. De plus, contrairement aux résistances serpentins, un espace raisonnable sur le circuit est nécessaire. Avec la technique de modification par impulsion de courant, la précision d'ajustement est satisfaisante et les avantages de cette méthode sont très encourageants c'est pour cette raison que des structures de résistances de Poly-Si similaires sont utilisées pour un ajustement par laser des résistances.

L'utilisation d'un montage laser pour effectuer les modifications des résistances de Poly-Si permet d'éliminer tous les inconvénients liés à la méthode d'impulsion de courant. En effet, la modification peut être faite avant l'encapsulation des circuits intégrés et ne nécessite aucun branchement externe pour accéder aux résistances. Donc aucun plot supplémentaire n'est nécessaire et un gain significatif d'espace peut être obtenu, réduisant d'autant les coûts de fabrication. De plus, la modification est localisée à la résistance et non à l'ensemble des fils métalliques et autres composants traversés par les impulsions de courants. Aussi, le courant nécessaire à la modification dépend des dimensions de la résistance alors que la fluence nécessaire pour ajuster un composant est la même quelle que soit la taille du dispositif.

Finalement, aucune destruction de la structure de la couche mince de Poly-Si n'est faite contrairement à la technique d'ablation de couches minces. Ceci évite d'endommager des composants adjacents par l'éjection de matière. Donc la grande majorité des expériences sera réalisée en dessous du seuil de fonte du Poly-Si.

CHAPITRE 2 SYSTÈME DE MODIFICATION PAR LASER DE RÉSISTANCES ET DE CIRCUITS INTÉGRÉS

Au laboratoire, il est possible d'avoir accès à un laser Ti:saphir femtoseconde avec une longueur d'onde de 800 nm et un laser Nd:YAG nanoseconde doublé avec une longueur d'onde de 532 nm. Le laser nanoseconde Nd : YAG a été utilisé pour deux raisons.

Premièrement, puisque les oxydes recouvrant les circuits intégrés sont moins absorbants à 532 nm qu'à 800 nm, le laser nanoseconde est plus approprié pour effectuer des modifications sur circuit intégré, sans affecter les couches isolantes.

Deuxièmement, pour des raisons techniques, le montage optique et les mécanismes de positionnement du laser femtoseconde ne sont pas optimisés pour effectuer des modifications sur des circuits intégrés. Il est très difficile de positionner le faisceau précisément sur l'échantillon étant donné les petites dimensions des résistances utilisées (~ 40 μm). Le laser nanoseconde a été conçu pour la modification de composants présents sur des circuits intégrés. La table de positionnement du montage a une résolution de l'ordre de 0.1 μm qui convient bien pour nos travaux.

2.1 Système de modification de résistances par laser nanoseconde

Le montage expérimental utilisé est présenté schématiquement à la Figure 2-1. Notons que le montage est séparé en deux parties distinctes qui représentent le système de fonte par laser et le système de mesure in-situ. Les éléments du système sont soigneusement alignés pour une bonne fiabilité des résultats.

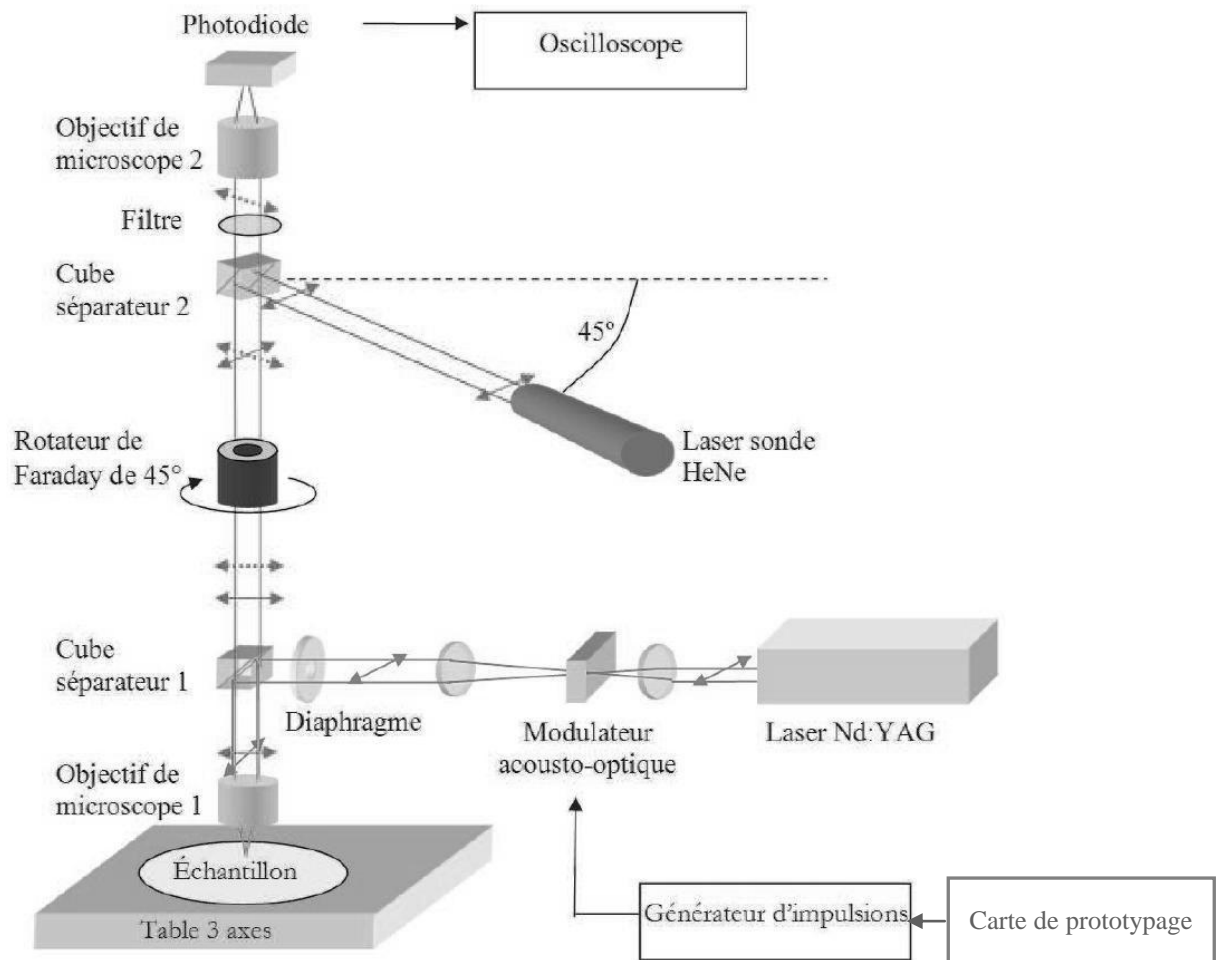


Figure 2-1 : Schéma de montage de fabrication de résistances de Poly-Si par laser et de mesures in-situ optiques (Laforte, 2006)

La partie du montage constituée de la mesure in-situ fut développée par Stéphane (Laforte, 2006) pour réaliser une mesure optique directe de la fabrication de résistances diffusées par laser. Ce montage n'est pas nécessaire à la modification de résistance Poly-Si mais il est d'une grande aide pour la préparation d'échantillons pour les différentes expériences. Chaque élément sera discuté séparément.

2.1.1 Le laser Nd : YAG

Pour la modification de résistances de Poly-Si, un laser Nd : YAG Millenium X de Spectra Physics continu et doublé en fréquence à 532 nm a été utilisé. À cette longueur d'onde (faisceau visible, couleur verte), la plupart des diélectriques recouvrant le circuit intégré sont transparents. La lumière peut traverser les couches sans absorption critique et atteindre les éléments actifs du

circuit intégré, entre autres les résistances de Poly-Si. La puissance de sortie du laser est contrôlée et varie de 0.2 à 10 W, ce qui est très largement suffisant pour nos expériences. Le bruit haute fréquence de la puissance de sortie du laser est de 5 %, ce qui peut sembler élevé, mais respecte néanmoins les normes du fabricant. Notons que la puissance de sortie du laser n'est pas la puissance qu'on retrouve sur l'échantillon. En effet, selon l'alignement et la propreté des miroirs, et surtout selon l'alignement du modulateur acousto-optique, la puissance transmise a été estimée entre 35 à 42 % de la puissance de sortie du laser.

2.1.2 Formation des impulsions : modulateur acousto-optique

Pour contrôler la modification apportée aux résistances de Poly-Si, un laser pulsé est nécessaire. Pour réaliser des impulsions avec un laser continu, un modulateur acousto-optique est utilisé. Ce dernier permet de changer l'indice de réfraction d'un cristal à l'aide d'une onde acoustique et d'ainsi faire diffracter le faisceau laser le traversant. Pour créer des impulsions, il faut utiliser le faisceau diffracté (ordre 1) et bloquer le faisceau non diffracté (ordre 0) à l'aide d'un iris placé après le modulateur. La puissance est contrôlée en faisant varier l'intensité du faisceau incident.

Le modulateur utilisé est fabriqué par la compagnie Neos Technology. Un courant sinusoïdal de 210 MHz est fourni au système à l'aide d'un générateur produisant l'onde acoustique. Avec un système bien aligné, une diffraction de 40 à 50 % du faisceau dans le premier ordre est possible.

2.1.3 Carte de prototypage

Pour réaliser les impulsions souhaitées, le montage est équipé d'une carte de prototypage qui permet de contrôler le générateur produisant l'onde acoustique. La carte de prototypage Stratix provient de la compagnie Altera. Une interface Matlab est utilisée pour le contrôle par ordinateur et l'information est transmise par un port série. Cette carte permet de réaliser un générateur d'impulsions à l'aide d'un signal de 0 à 1 V et elle est équipée de convertisseurs numérique-analogique pour générer les impulsions et la synchronisation. Donc le signal d'entrée du modulateur acousto-optique peut prendre seulement les valeurs 0 V et 1V représentant une amplitude minimale et maximale du signal respectivement.

A l'aide de ce système, il est possible de générer des impulsions de forme arbitraire constituées d'un nombre variable d'impulsions choisies par l'utilisateur (maximum de 227 impulsions) et la longueur minimale d'une impulsion est de 15 ns.

2.1.4 Système de positionnement du faisceau laser

Le faisceau laser est envoyé sur une table de positionnement où l'échantillon est déposé. La table permet un déplacement selon trois axes de mouvement avec une résolution de 0.1 μm , contrôlé par ordinateur à l'aide du logiciel Unidex 500 MMI. L'image de l'échantillon est réalisée à l'aide d'une camera CCD, d'un objectif et d'un miroir mobile. Lorsque le miroir est aligné avec une lumière blanche, la surface de l'échantillon peut être observée. Dans le cas contraire, le laser est focalisé sur l'échantillon et une intervention laser peut être effectuée.

2.1.5 Montage de la mesure in-situ

Un deuxième laser appelé le laser sonde est utilisé dans la partie du montage de la mesure in-situ. Ce laser de type HeNe possède une longueur d'onde de 633 nm (couleur rouge), un faisceau à cette longueur d'onde n'étant pas absorbé par les diélectriques des circuits intégrés. Ce laser a une longueur d'onde différente du laser dit de fonte (laser à 532 nm) permettant ainsi de séparer les deux faisceaux et d'obtenir une mesure de la réflectivité de la zone fondue par le laser Nd : YAG. La puissance moyenne du laser est de 2 mW, ce qui est suffisamment faible pour ne pas affecter les résistances de Poly-Si.

Le laser HeNe est envoyé sur l'échantillon puis réfléchi par la zone fondue. Un isolateur est utilisé pour récupérer la puissance réfléchie tout en évitant que ce faisceau n'endommage le laser HeNe. Il permet une rotation de la polarisation du faisceau dans le même sens, peu importe de la direction de propagation.

Un photo-détecteur NewFocus permet de récupérer des informations à 1 GHz du faisceau réfléchi sensible dans le visible, il est constitué d'une jonction PIN en silicium. Les mesures obtenues sont des variations de la puissance réfléchie du faisceau rouge par une surface. L'information est par la suite envoyée sur un oscilloscope pour une observation directe.

2.1.6 Système de focalisation

Les deux faisceaux servant à la modification de surface (laser Nd : YAG) et à la mesure in-situ (laser HeNe) sont superposés et dirigés vers l'objectif et donc vers l'échantillon à l'aide de miroirs. L'objectif utilisé est un M Plan Apo 50X de marque Mitutoyo permettant une grande

distance de travail, ce qui est nécessaire pour opérer avec des circuits intégrés équipés de boîtiers d'encapsulation.

Le rayon du faisceau laser après l'objectif dépend de plusieurs paramètres : les caractéristiques de l'objectif, la largeur du faisceau incident, la convergence initiale et l'iris placé en sortie du modulateur acousto-optique. Pour caractériser de façon expérimentale le diamètre des deux faisceaux laser, une mesure au couteau est réalisée (Mauck, 1979). Cette analyse fut réalisée sur ce montage par Rémi Lachaine en 2006 au cours d'un stage d'été au sein du Laboratoire des Procédés Laser de l'École Polytechnique de Montréal. Une lame de rasoir est placée sur la table de positionnement pour permettre de couper progressivement le faisceau du laser. En faisant l'hypothèse que le faisceau est gaussien lors de son entrée dans l'objectif, la puissance transmise P et en fonction de la position x du couteau est donnée par:

$$P = a + b \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x-c}{d}\right) \quad (2.1)$$

Où a , b , c et d sont des paramètres de lissage et la fonction d'erreur erf est :

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

La Figure 2-2 présente la mesure du rayon du laser Nd : YAG et du laser HeNe en fonction de la position. Puisque les deux longueurs d'onde sont différentes, le point focal des deux faisceaux lasers est différent, rendant difficile de focaliser à la même place. Étant donné que ce travail porte sur la modification de résistance, l'échantillon sera placé au point focal du laser de fonte.

Le rayon minimal mesuré pour le laser HeNe est de 1.1 μm et celui du laser Nd : YAG est de 2 μm .

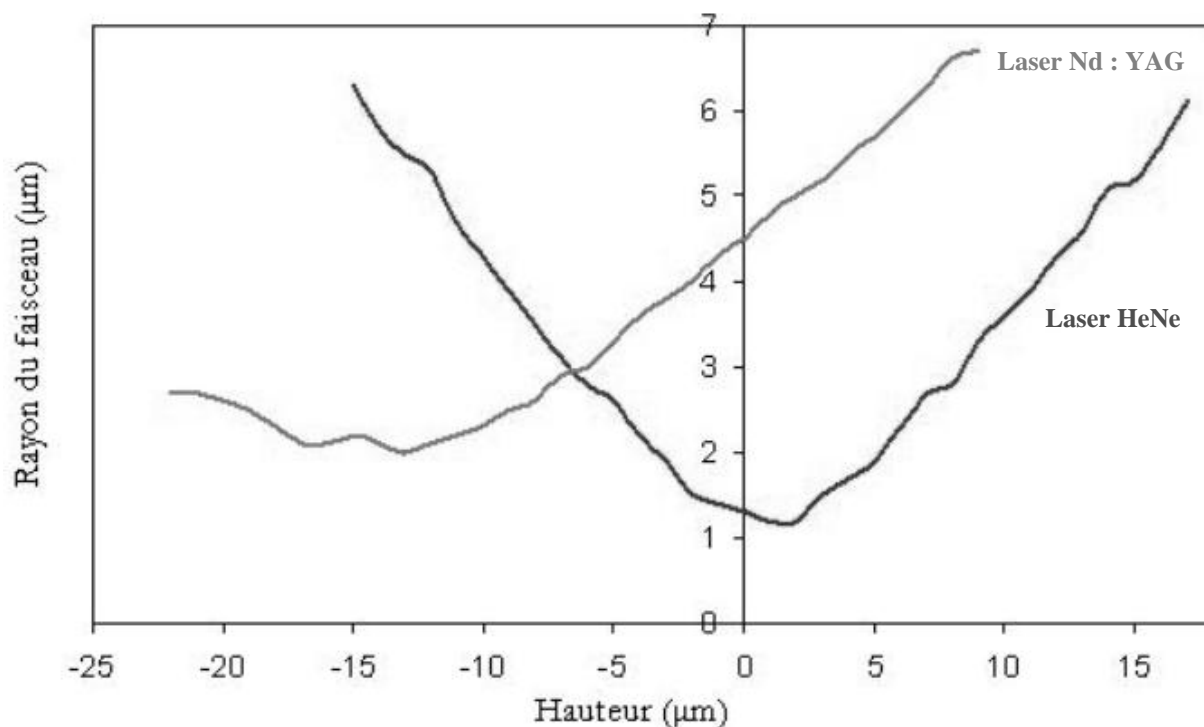


Figure 2-2 : Rayon mesuré à l'aide de la mesure au couteau pour le laser Nd : YAG et le laser HeNe (Lachaine 2006)

Puisque les deux faisceaux laser arrivent parallèlement sur la table de positionnement avec des points de focalisation différents, il faut aligner le point focal de la lumière blanche de la caméra CCD avec le point focal du laser Nd : YAG pour que l'image de la caméra soit à la même hauteur que le laser. Pour cela, un échantillon de silicium est placé sur la table et une série d'impulsions est envoyée avec un déplacement vertical de 5 μm et un déplacement en hauteur de 0.5 μm entre chaque impulsion. Par la suite, en observant la surface de l'échantillon, on détermine le point focal du laser en trouvant la distance à laquelle la plus grande modification est observée à la surface. Il faut alors se positionner à la hauteur correspondante au point focal du laser et déplacer la caméra pour obtenir l'image la plus nette possible à cette distance. Cette précaution est nécessaire afin d'obtenir des résultats reproductibles car une variation de 0.5 μm de la hauteur entraîne une variation de 3 à 4% de la fluence du laser.

2.2 Échantillons utilisés : Circuit intégré

Les premières analyses ont été réalisées avec des gaufres de silicium cristallin, de silicium amorphe et de silicium polycristallin. Ces différents échantillons ont servi à déterminer par

spectroscopie Raman l'influence d'une modification par laser sur une surface de Poly-Si sans avoir les contraintes liées aux couches diélectriques et de passivation présentes sur des circuits intégrés.

Comme l'intérêt de ce travail est d'analyser les changements électriques apportés à des résistances de Poly-Si présentes sur des circuits intégrés, la grande majorité des analyses a été effectuée sur des circuits intégrés réalisés par notre laboratoire.

2.2.1 Circuit intégré complet

Un premier circuit intégré conçu spécifiquement pour la réalisation des tests de résistances de Poly-Si a été réalisé en avril 2007 par Étienne Boulais, alors étudiant à la maîtrise. Le logiciel utilisé pour la réalisation du circuit est Cadence. Le circuit a été conçu dans la technologie de 180 nm sur une surface de 1.1 mm x 1.1 mm puis envoyé à TSMC pour la fabrication des circuits. Il comprenait plusieurs parties totalement indépendantes dont cinq modules comportant chacun 49 résistances de Poly-Si de dimensions différentes, trois modules constitués de plaque de Poly-Si permettant une mesure par effet Hall, sept modules de résistances jumelées, quatre modules avec des diodes PN et huit modules de capacité. Étant donné la complexité du circuit due au grand nombre de modules et à la date limite de soumission des dessins de masque à l'industrie, l'ensemble des modules n'a pas pu être simulé et validé par ordinateur avant la soumission. Par conséquent, après réception du circuit intégré, lors des premiers tests de mesure réalisés en août 2007, nous avons constaté qu'aucune des structures de résistance Poly-Si ne fonctionnait correctement due à des erreurs sur les dessins de masques. Donc, l'année suivante, un nouveau circuit a été soumis à la compagnie TSMC pour avoir des échantillons de résistances de Poly-Si exploitables.

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, un nouveau circuit de test a été réalisé en apportant des corrections nécessaires aux dessins du circuit réalisé précédemment. Tout d'abord, le circuit a été légèrement allégé en supprimant l'ensemble des modules permettant une mesure par effet Hall car l'étudiant travaillant sur ces échantillons avait pu utiliser le circuit précédent et donc terminer son travail.

Pour effectuer les tests du circuit par ordinateur avant la soumission des masques à CMC microsystemes, des comparaisons LVS (Layout Versus Schematic) ont été réalisées. Cette

méthode permet de comparer un schéma électrique du circuit avec les dessins de masque en précisant les bornes d'entrée et de sortie du circuit. Une erreur de conception est détectée par le logiciel dans le cas où des connexions sur les dessins de masques ne sont pas similaires à celles du schéma électrique (court-circuit, circuit ouvert, composants absents, non connectés, etc.).

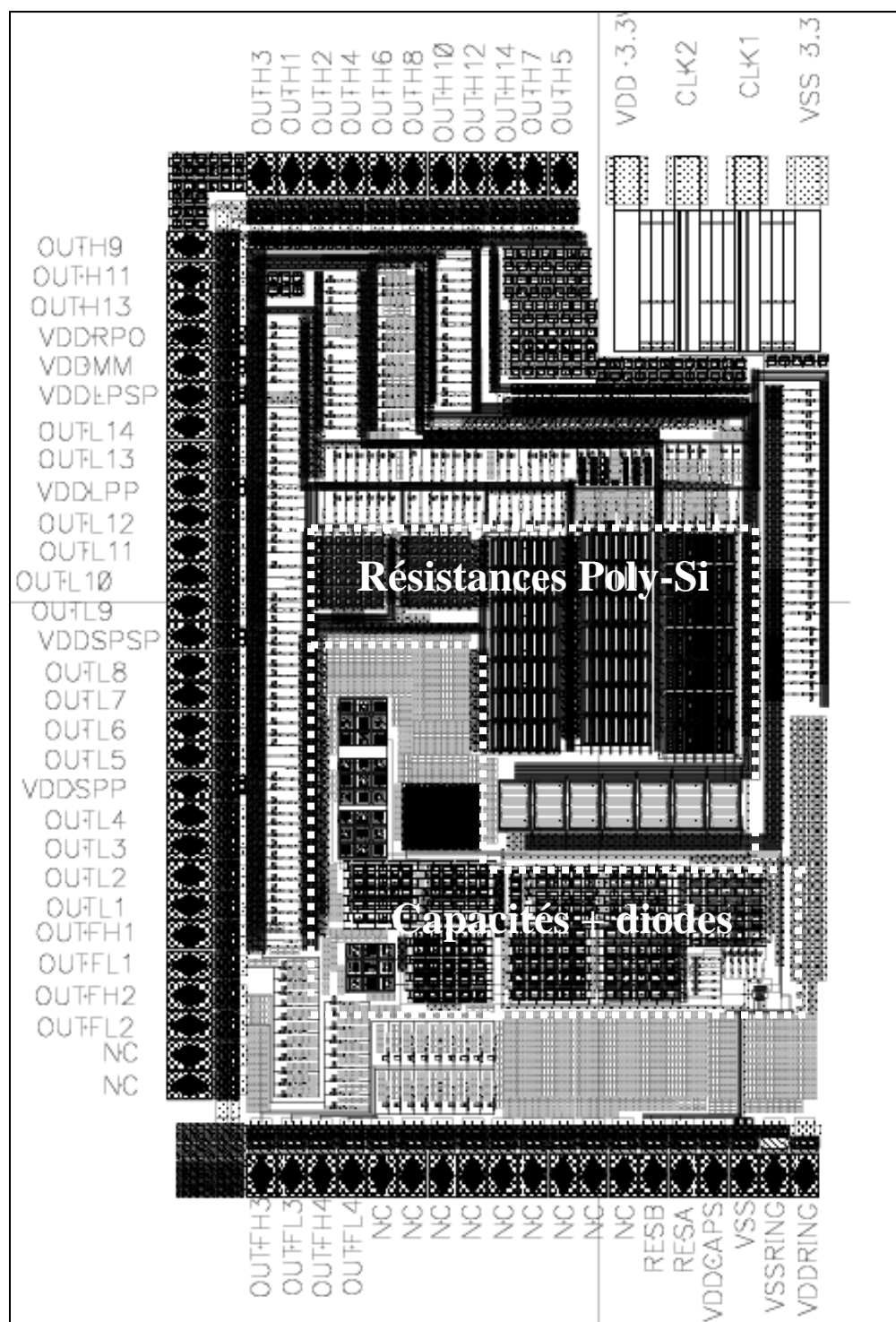


Figure 2-3 : Circuit intégré final complet

La Figure 2-3 représente le circuit intégré complet réalisé au laboratoire pour la caractérisation électrique et les tests de stabilité de résistances de Poly-Si modifiées par laser. Les dimensions de ce circuit sont 1.1 mm x 1.7 mm et il est composé de six modules de résistance Poly-Si dont un

de résistances jumelées, de plusieurs modules composés de diodes PN et de capacités. Notons que la grande majorité de la surface du circuit est occupée par les lignes de connexions, par des fusibles et des anti-fusibles dont l'utilité sera décrite par la suite.

2.2.2 Résistances de Poly-Si

Sur le circuit intégré, il y a un grand nombre de résistances de Poly-Si conçues pour les analyses souhaitées. Nous allons nous intéresser principalement à deux modules complets de résistances composés chacun de 49 résistances. La différence entre les deux modules est la présence ou non d'une couche de passivation sur le dessus du circuit. Dans les deux cas, les couches de diélectrique et d'oxyde sont présentes et déposées uniformément sur l'ensemble du circuit.

La TSMC ne donne pas de renseignement sur la composition chimique et l'épaisseur des différentes couches minces entourant le Poly-Si. Cette analyse fut réalisée par Alexandre Châteauneuf en 2008. La Figure 2-4 montre les différentes couches et leur composition chimique par l'analyse chimique au rayon X du microscope électronique en transmission (MET). Les résistances sont découpées en tranches fines nécessaires à l'observation au MET à l'aide d'un faisceau d'ions localisés (FIB). Le Tableau 2-1 montre l'épaisseur et la composition des différentes couches entourant le Poly-Si. Les résultats sont obtenus à l'aide d'une mesure PEELS (Parallel Electron Energy Loss Spectroscopy).

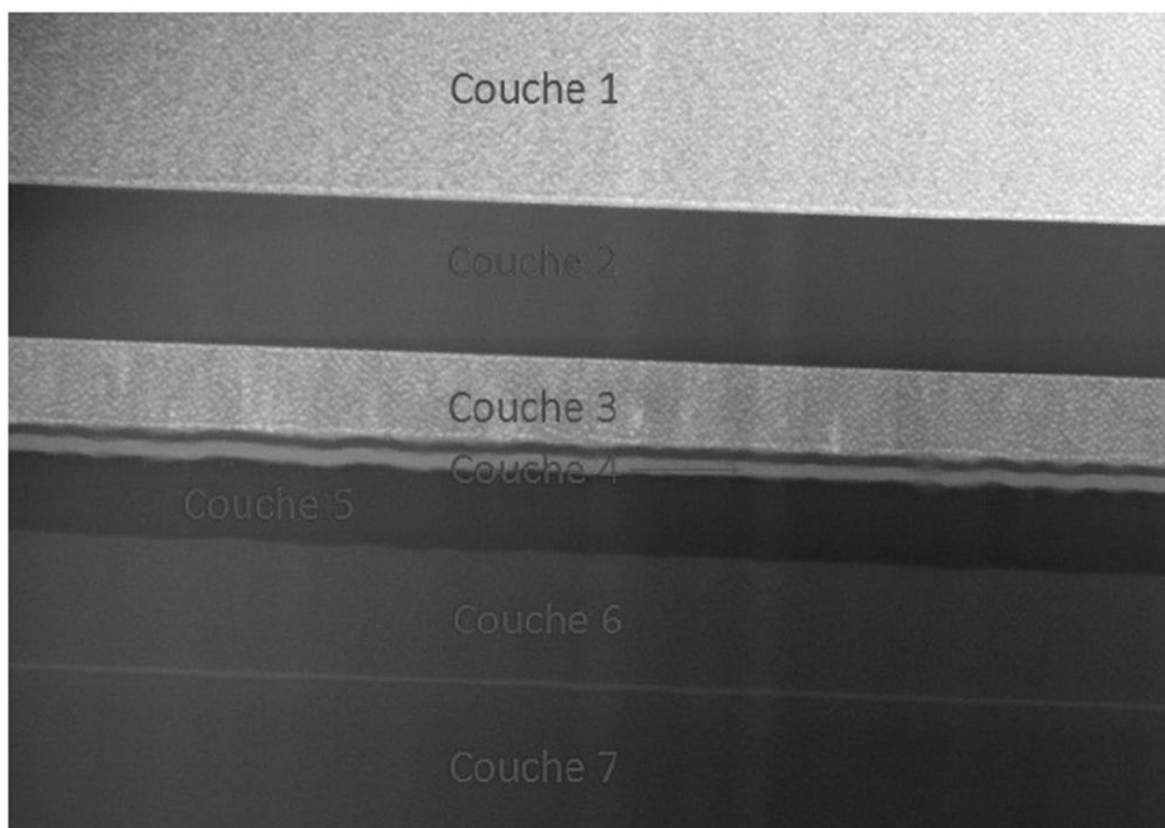


Figure 2-4 : Image à fond sombre pour l'identification des couches minces (Chateauneuf, 2008)

Tableau 2-1 : Épaisseur et composition des couches des résistances (Chateauneuf, 2008)

Numéro des couches	Composition	Épaisseur de la couche mince en nm
1	Silicium cristallin	< 169
2	SiO ₂	140
3	Poly-silicium dopé	163
4	SiO ₂ avec du phosphore	133
5	SiO ₂	129
6	SiO ₂ avec du fluor	135
7	SiO _x (x<2) avec du fluor	146

Toutes les résistances de Poly-Si utilisées sont dopées n^+ et présentent des dimensions de $4\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$. Les résistances sur le circuit sont disponibles pour réaliser une mesure 4 fils. Les résistances avec une couche de passivation sont appelées LPP (Longue Poly-Si Passivation), et les résistances sans couche de passivation LPSP (Longue Poly-Si Sans Passivation). Il y a une distinction entre les longues et les courtes résistances car le circuit dispose de résistances de $3\text{ }\mu\text{m} \times 6\text{ }\mu\text{m}$ qui n'ont pas été utilisées dans ce projet.

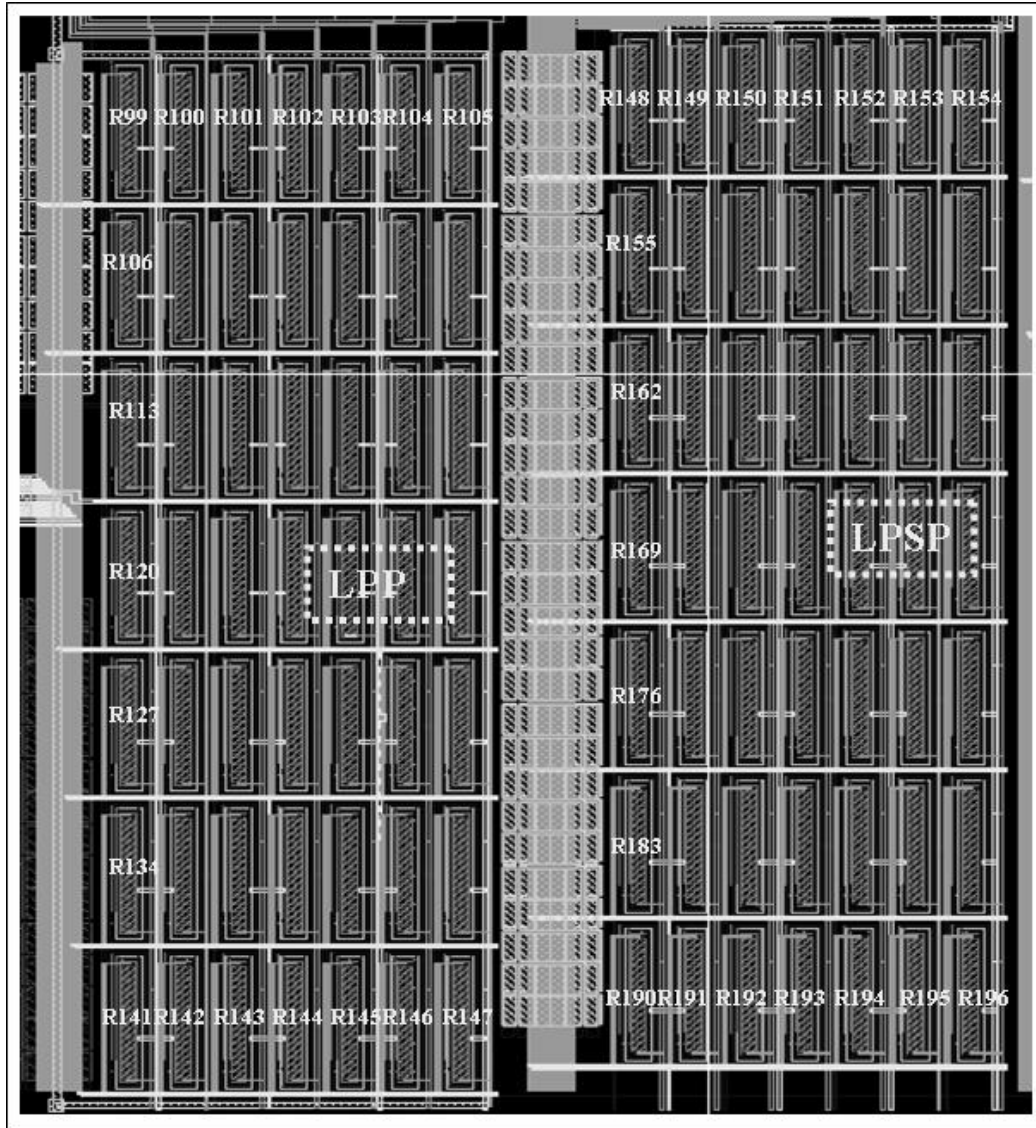


Figure 2-5: Dessin de masques des résistances de Poly-Si

La Figure 2-5 représente le dessin de masques des deux modules de longues résistances avec et sans couches de passivations, composés chacun de 49 résistances de $4\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$.

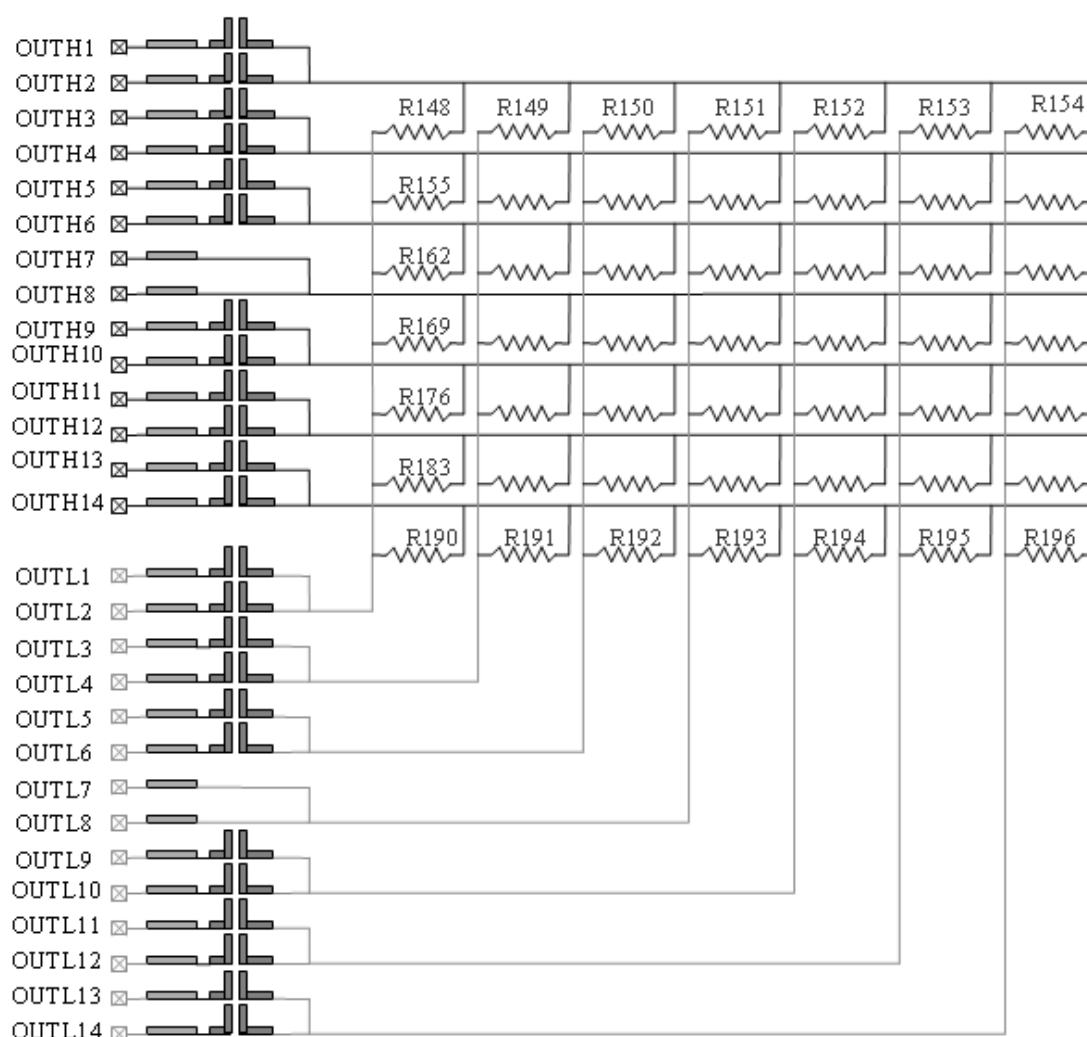


Figure 2-6 : Circuit électrique du module LPSP

La Figure 2-6 présente le circuit électrique du module de résistances LPSP. Il est constitué de 49 résistances et de 28 entrées / sorties pour effectuer des mesures 4 fils. Remarquons que ce module est aussi constitué de fusibles et d'anti-fusibles. En effet, étant donné que le circuit dispose au total de 301 résistances et de seulement 28 plots, il est nécessaire de pouvoir connecter et déconnecter les résistances souhaitées. Pour cela, chaque module a une résistance connectée par défaut à 4 plots pour effectuer le test de cette structure dès la réception du circuit. Les autres résistances ont en série un fusible et un anti-fusible que l'on peut connecter lorsque cela est nécessaire. Pour connecter une résistance, il suffit de faire fondre les quatre anti-fusibles créant ainsi un dispositif accessible pour une mesure 4 fils.

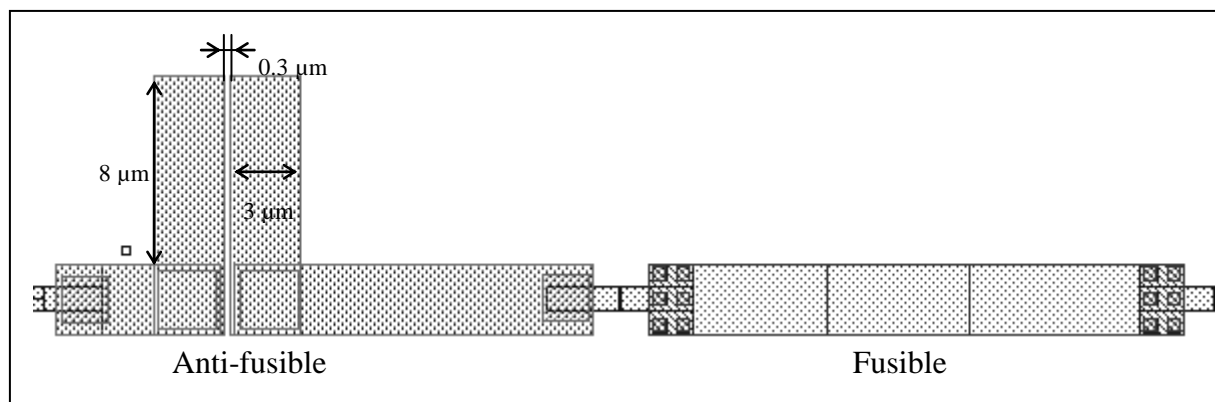


Figure 2-7 : Schéma d'un fusible et d'un anti-fusible de connexion

La Figure 2-7 montre le dessin de masques d'un fusible et d'un anti-fusible de connexion présents sur le circuit. Les fusibles métalliques ont des dimensions de $3\ \mu\text{m}$ par $19\ \mu\text{m}$ en métal. Ils sont constitués de deux couches de métal superposées sur le plan vertical, métal 5 et 6. Pour déconnecter un dispositif, il suffit de focaliser le laser Nd:YAG (532 nm) au centre du fusible et d'envoyer une impulsion de haute fluence (typiquement $1\ \text{J}/\text{cm}^2$) et donc de vaporiser l'ensemble des couches de métal.

Les anti-fusibles métalliques sont constitués de deux couches métalliques superposées sur le plan vertical, typiquement celles de métal 1 et de métal 2. La connexion d'anti-fusibles est plus difficile à réaliser que la déconnection des fusibles. En effet, pour créer un anti-fusible, le laser est focalisé entre les deux diélectriques espacés de $0.3\ \mu\text{m}$, produisant ainsi des fissures dans les diélectriques où le métal fondu des deux contacts peuvent diffuser, créant ainsi un lien permanent (Figure 2-8).

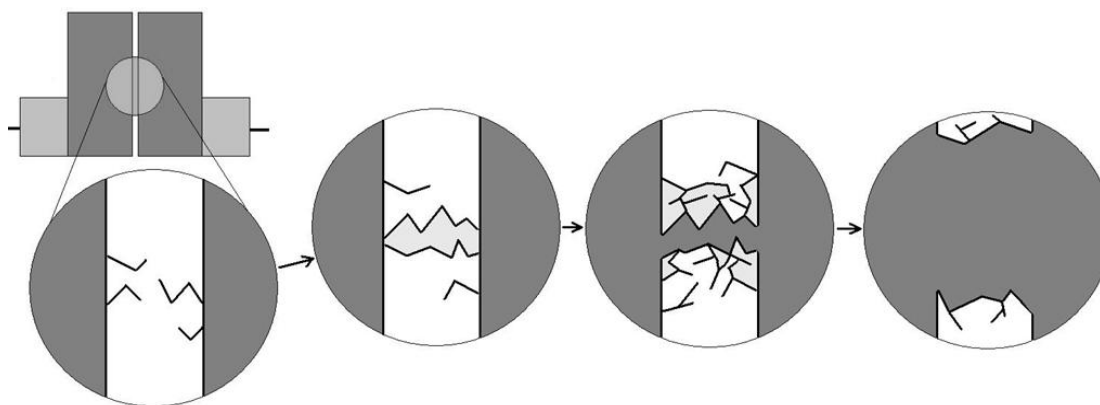


Figure 2-8 : Réalisation d'un anti-fusible métallique de connexion (d'après Lachaine 2008)

Le montage in-situ est nécessaire pour réaliser les liens anti-fusibles. Étant donné que les quatre plots qui relient une résistance ne sont pas connectés, une mesure électrique n'est pas possible lorsqu'on connecte un seul anti-fusible. Avec la mesure in-situ, il est possible de contrôler la réalisation d'un lien métallique entre les deux diélectriques. Un train d'impulsions est envoyé sur l'anti-fusible et lorsque le lien est créé par la diffusion de métal. Une augmentation de l'intensité réfléchie par le laser HeNe est observée. Pour créer un lien, une série de train d'impulsions est nécessaire pour provoquer petit à petit le craquement total des diélectriques, puis l'envoi des impulsions est arrêté lorsque le lien est réalisé. Les détails de la fabrication d'anti-fusible contrôlé par une mesure in-situ fait l'objet d'un article par R. Lachaine, E. Boulais et M. Meunier.

A travers ce chapitre, le montage laser Nd:YAG permettant la modification de résistances de Poly-Si a été présenté ainsi que les dispositifs qui vont être utilisés par la suite. Ce chapitre permet de comprendre les conditions expérimentales des analyses faite dans l'ensemble du mémoire.

CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION DU CHANGEMENT STRUCTURAL PAR SPECTROSCOPIE RAMAN DE POLY-SI TRAITÉE PAR LASER

Pour déterminer les effets engendrés par le traitement de résistance de Poly-Si par impulsion laser nanoseconde, la méthode utilisée est la spectroscopie Raman. Sachant que les circuits intégrés réalisés sont recouverts de plusieurs couches d'oxyde et éventuellement d'une couche de passivation, afin d'éviter toute influence de celles-ci et d'isoler les changements apportés par le faisceau laser, l'analyse a été réalisée sur des gaufres de silicium monocristallin, amorphe et polycristallin.

3.1 Spectroscopie Raman

3.1.1 Principe de la spectroscopie Raman

Le principe de fonctionnement de la spectroscopie Raman est relativement simple. Un faisceau laser est envoyé sur le matériau et la lumière diffusée est collectée et analysée par un détecteur.

La grande majorité des photons sont diffusés de façon élastique, conservant ainsi la même énergie et la même longueur d'onde que les photons incidents. Cependant, une petite partie de la lumière est diffusée à une énergie légèrement différente due à l'effet Raman. La différence entre l'énergie incidente et celle diffusée correspond à une énergie de vibration du matériau appelé phonon. Deux cas sont possibles : l'énergie du photon diffus peut être inférieure à l'énergie du photon incident, ce qui correspond à l'émission d'une quantité d'énergie vibrationnelle : c'est l'effet Stokes. A l'inverse, si l'énergie du photon diffusée est supérieure à celle du photon incident, on parle d'effet anti-Stokes correspondant à l'absorption d'un quantum d'énergie vibrationnelle. (Figure 3-1).

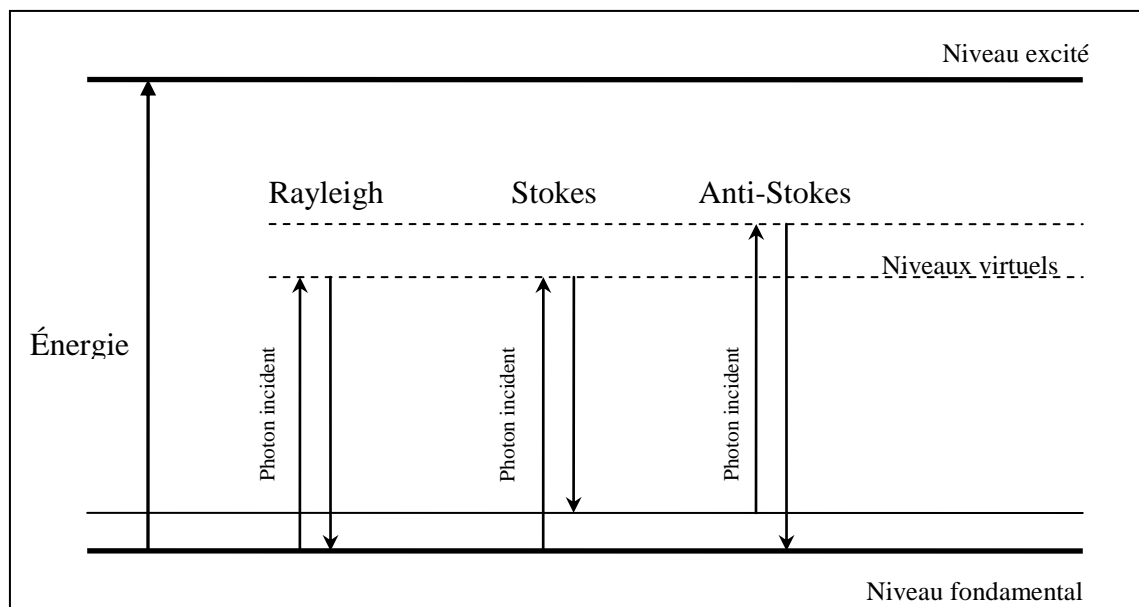


Figure 3-1 : Principe de la spectroscopie Raman

3.1.2 Structure d'un spectromètre Raman

La Figure 3-2 montre une représentation schématique du spectromètre Raman confocal utilisé au cours des analyses réalisées. Un système confocal permet de mesurer une petite partie de l'intensité lumineuse diffusée par l'échantillon. Un dispositif Raman expérimental est constitué de trois parties principales : une source excitatrice monochromatique, un système dispersif et un système de détection. Ces différentes parties sont maintenant décrites avec plus de détails.

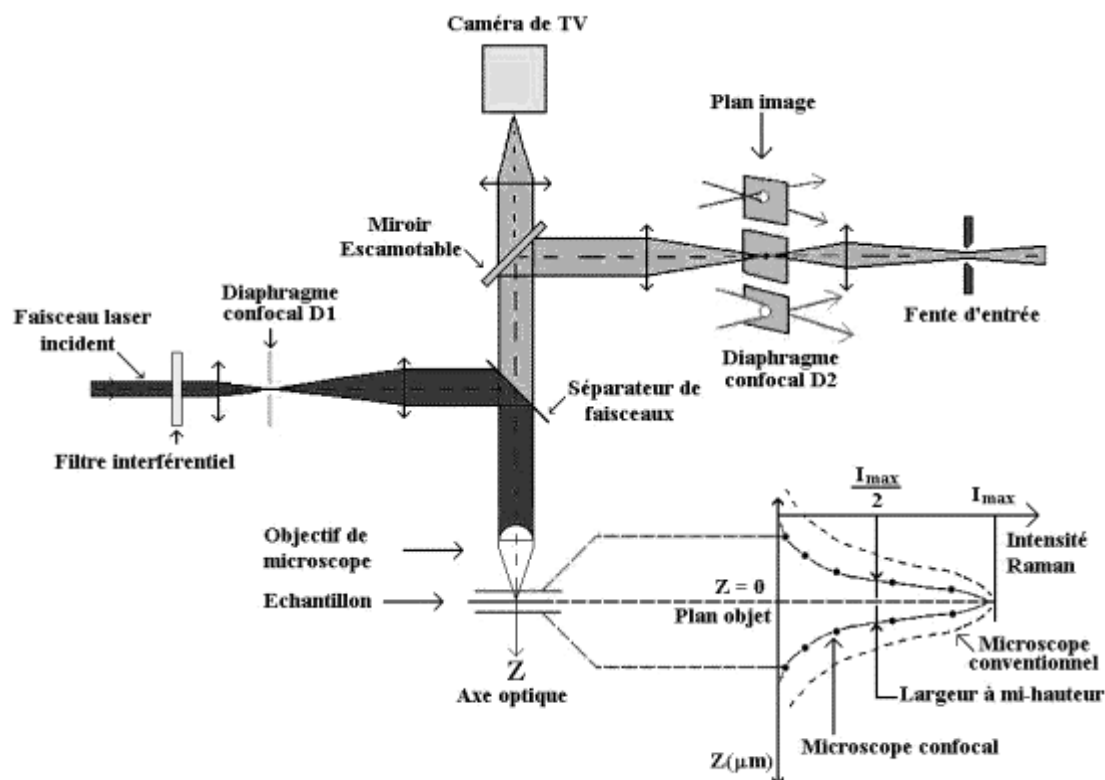


Figure 3-2 : Description schématique d'un système Raman confocal (Noguera'03)

En référence à la Figure 3-2, une source excitatrice monochromatique : La source lumineuse utilisée est une source de type laser dont la longueur d'onde peut varier en fonction du matériau que l'on souhaite analyser. Cependant, le faisceau incident doit traverser un filtre interférentiel spécifique à la longueur d'onde de travail, ou une série de prismes pour éliminer les raies d'émission du plasma qui rendent les lasers à gaz non strictement monochromatiques.

Un système dispersif : le système utilisé est un triple monochromateur pouvant fonctionner en mode additif ou en mode soustractif. Le pré-monochromateur (filtre passe bande) permettant d'éliminer la diffusion de Rayleigh est constitué de deux réseaux de diffraction séparés par une fente qui permet de séparer le faisceau en plusieurs longueurs d'onde. Ce faisceau est focalisé dans une autre fente pour sélectionner certaines longueurs d'onde que l'on désire éliminer (par exemple la raie de Rayleigh). Un second réseau est utilisé pour compenser la dispersion en longueur d'onde du premier. Finalement, un dernier réseau amène le faisceau focalisé au système de détection.

Un système de détection : la détection est réalisée par un détecteur CCD (Charge Coupled Device) qui permet une détection multicanal pour recueillir simultanément des informations spatiales et spectrales concernant l'échantillon.

Beaucoup d'informations peuvent être extraites à partir des spectres Raman. Le spectre fournit des informations sur le type de liaison et la structure cristalline d'un composé.

3.2 Spectroscopie Raman du Poly-Si modifié par laser

3.2.1 Conditions expérimentales

Le but de cette analyse est de déterminer, à l'aide d'un spectromètre Raman, la zone affectée par le laser nanoseconde et les modifications structurales apportées à l'échantillon pour chaque train d'impulsions envoyées à différentes fluences.

Outre des échantillons de Poly-Si, des mesures ont été effectuées sur des gaufres de silicium cristallin (c-Si) et amorphe (a-Si) pour permettre de faire l'analyse des transformations structurales du Poly-Si. Le fait d'utiliser une gaufre et non un morceau de Poly-Si déposé sur un circuit intégré permet d'éviter les problèmes liés aux couches d'oxyde, de passivation et diélectrique déposées sur le dessus du circuit. Cette étude permet donc de connaître avec précision les modifications apportées seulement au Poly-Si.

Un système de microscope Raman d'InVia Renishaw a été utilisé et la source lumineuse monochromatique est un laser argon à la longueur d'onde de 514,5 nm et d'une puissance de 25 mW. Les informations sont recueillies par le logiciel Wire 2.0 et les données sont traitées par Matlab.

3.2.2 Spectre Raman de référence du silicium cristallin et amorphe

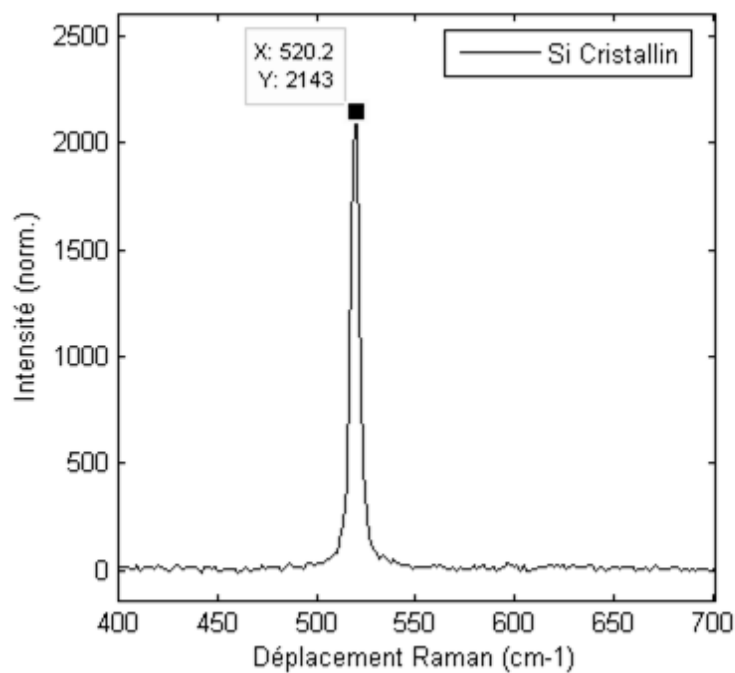


Figure 3-3 : Spectre Raman de silicium cristallin, pic Raman à 520 cm^{-1}

La Figure 3-3 présente un spectre Raman de silicium cristallin caractérisé par la présence d'un seul pic à 520 cm^{-1} . L'intensité de ce pic ne donne aucune information supplémentaire car cette valeur varie sensiblement d'une mesure à l'autre en fonction de la calibration du spectromètre.

L'échantillon de silicium amorphe analysé est une plaquette de verre recouverte d'une couche de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H).

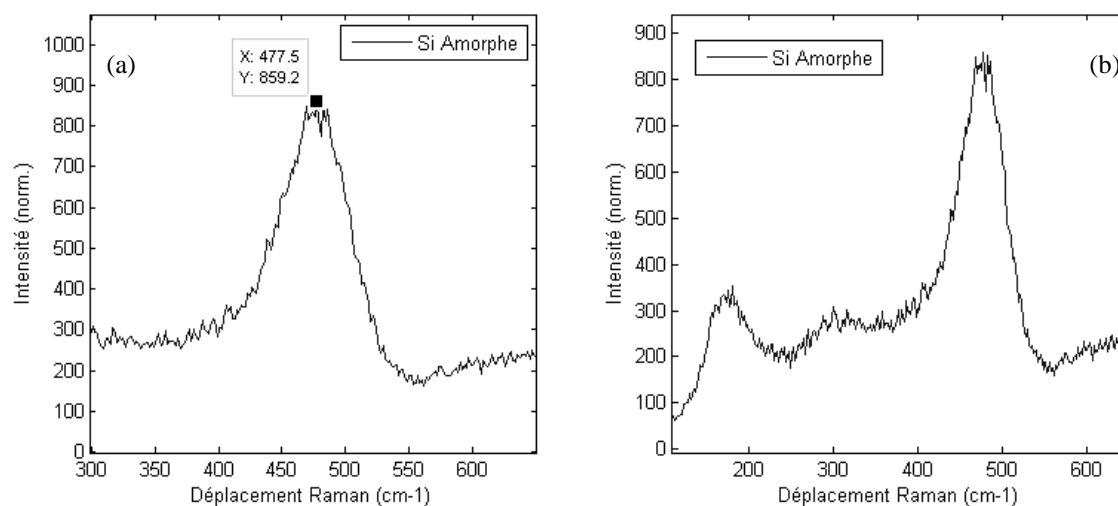


Figure 3-4 : (a) Pic Raman du silicium amorphe à 480 cm^{-1} . (b) Spectre Raman du Silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H)

Comme représenté sur la Figure 3-4, le large pic Raman du silicium amorphe centré à 480 cm^{-1} domine le spectre. Sur la Figure 3-4 (b), on observe le spectre Raman complet du silicium amorphe hydrogéné et deux pics significatifs apparaissent. Celui à 480 cm^{-1} représente le silicium amorphe et celui situé en dessous de 200 cm^{-1} est lié à la présence d'hydrogène sur l'échantillon (Smit, 2003).

Pour analyser le spectre complet du silicium amorphe, quatre gaussiennes sont nécessaires. Le spectre de l'amorphe peut être représenté par la somme de quatre profils gaussiens, chacun représentant des modes de vibration des phonons : vibrations longitudinales et transversales acoustiques et vibrations longitudinales et transversales optiques (Smit, 2003).

3.2.3 Spectre Raman d'un échantillon de Silicium polycristallin

L'échantillon utilisé est une gaufre de silicium cristallin (100) recouverte d'une couche d'isolant électrique de 500 nm de SiO_2 , puis d'une couche déposée de Poly-Si de 150 nm, d'une concentration moyenne de porteurs libres de $4.9 \cdot 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ (Chateauneuf, 2008).

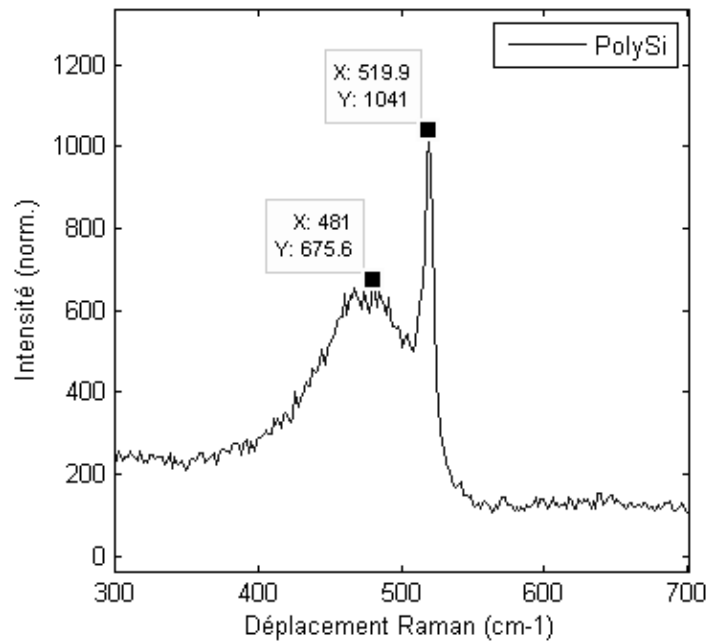


Figure 3-5 : Spectre Raman du silicium polycristallin

La Figure 3-5 représente le spectre Raman d'un échantillon de Poly-Si. On remarque que ce spectre est composé de deux pics distincts ; un pic au alentour de 480 cm^{-1} qui représente le silicium amorphe et un autre à 520 cm^{-1} caractéristique du silicium cristallin.

Avec cet échantillon, la fraction cristalline de cette surface peut être déterminée en séparant les deux pics Raman du s-Si et c-Si. La méthode utilisée consiste à représenter ce spectre par trois gaussiennes : la première représentant la fraction amorphe du pic à 480 cm^{-1} , puis les deux autres, les pics à 500 cm^{-1} et 520 cm^{-1} pour représenter l'asymétrie de la partie cristalline. La cristallinité est déterminée à l'aide des amplitudes du pic cristallin et de l'amorphe. Selon (Ledinsky, 2006), la cristallinité peut être calculée par :

$$C_A = A_C / (A_C + b * A_a) \quad (6.3)$$

où A_c est l'amplitude cristalline, A_a l'amplitude de l'amorphe, et $b = 1,25$ représente le coefficient empirique exprimant le rapport de la section transversale du Raman des amplitudes (Ledinsky, 2006).

Basée sur le modèle, la portion cristalline de l'échantillon est de 10%. Cette méthode sera très utile par la suite car elle permettra de déterminer la cristallinité de la zone modifiée par laser et de connaître l'influence exacte de cette modification.

3.2.4 Spectre Raman du Poly-Si modifié par laser

Pour cette étude, la gaufre de Poly-Si est constituée des mêmes couches minces que précédemment.

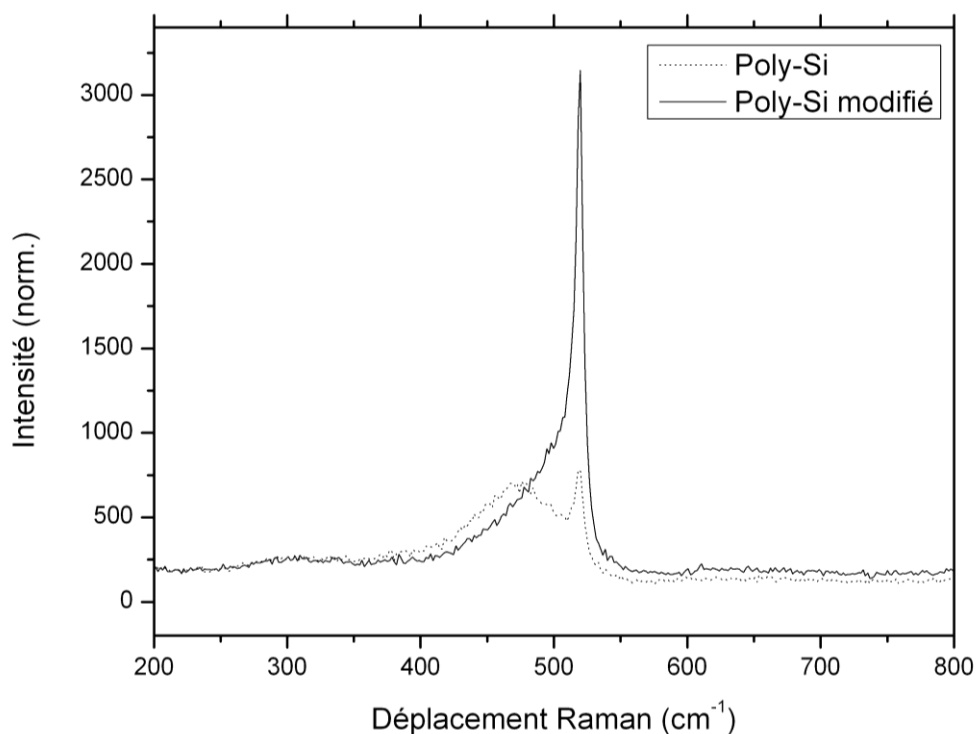


Figure 3-6 : Spectre Raman de Poly-Si modifié par laser à 0.26 J/cm²

La Figure 3-6 présente les spectres Raman de la gaufre de Poly-Si modifiée par laser par un train de 10 impulsions d'une longueur de 300 ns, pour un intervalle entre chaque impulsion de 96 ns et une fluence laser de 0.26 J/cm².

Notons qu'après traitement laser, le pic du silicium cristallin à 520 cm⁻¹ est quatre fois plus intense que celui du Poly-Si non modifié et que le pic du silicium amorphe à 480 cm⁻¹ a presque disparu, suggérant que la principale modification est la cristallisation de la zone affectée. Ce résultat de l'apparition d'un pic plus intense à 520 cm⁻¹ lors d'un chauffage laser est comparable à l'analyse effectuée par (Khait, 2002) sur des couches minces de silicium amorphe hydrogéné.

Khait, Y et al, ont réalisé une étude sur la cristallisation de Silicium amorphe par laser à basse température en la comparant à la cristallisation du même matériau par chauffage dans un four. La Figure 3-7 représente l'analyse réalisée à l'aide d'un spectromètre Raman d'un film de silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) déposé sur une plaque de verre et irradié par laser. Le laser utilisé est un laser Argon de 514.5 nm opérant à une puissance de 10 – 15 mW.

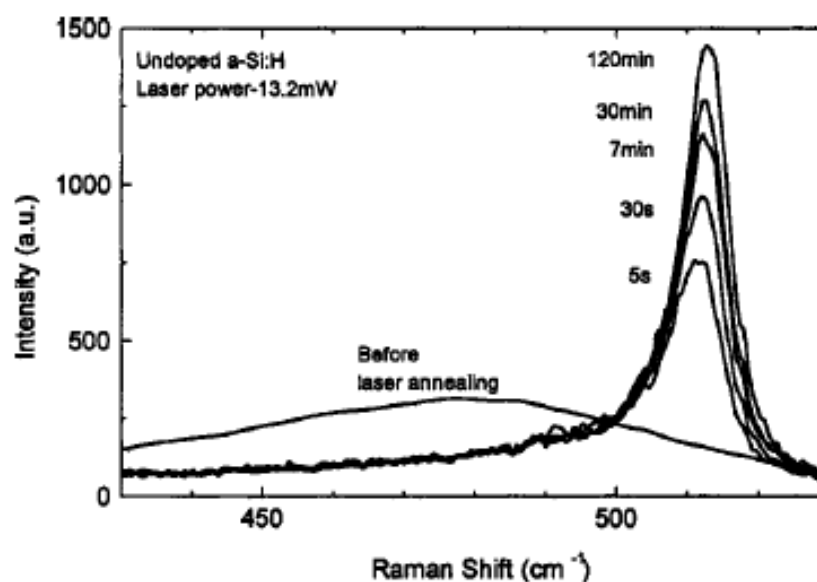


Figure 3-7 : Spectre Raman d'un film de Silicium amorphe avant et après une intervention laser (Khait, 2002)

Sur le spectre Raman de la Figure 3-7, il est facile d'observer le pic à 520 cm^{-1} qui représente le pic Raman caractéristique du silicium cristallin. Le facteur dominant qui engendre la cristallisation du silicium amorphe est la température de chauffage. Pour observer un changement dans la structure du silicium amorphe, Khait et al ont déterminé une température minimale de 600K.

Les résultats présentés peuvent être comparés à l'analyse réalisée sur la gaufre de Poly-Si, car un changement de la structure atomique du Poly-Si en silicium cristallin est observé lors d'une irradiation laser de l'échantillon. Étant donné que le Poly-Si est constitué de 54 % de portion cristalline et qu'il est possible de cristalliser ce matériau, la cristallisation du Poly-Si va se produire pour une température similaire à celle de l'amorphe.

3.2.5 Zone affectée par le faisceau laser

La caractérisation de la surface traitée par le laser est faite pour des fluences variant de 0.15 à 0.45 J/cm². Le nombre d'impulsions par train est de 227, d'une longueur de 300 ns et d'un intervalle de 96 ns.

Avec le spectromètre Raman, il est possible de créer des cartes de la surface de l'échantillon avec une résolution de 1 μm et d'en déduire le modèle de la surface affectée par le traitement laser (Figure 3-8). Avec cette cartographie et en faisant le rapport des intensités des pics cristallin et de l'amorphe sur le même spectre Raman, la surface affectée par le faisceau laser peut être connue avec précision en fonction de la fluence du laser.

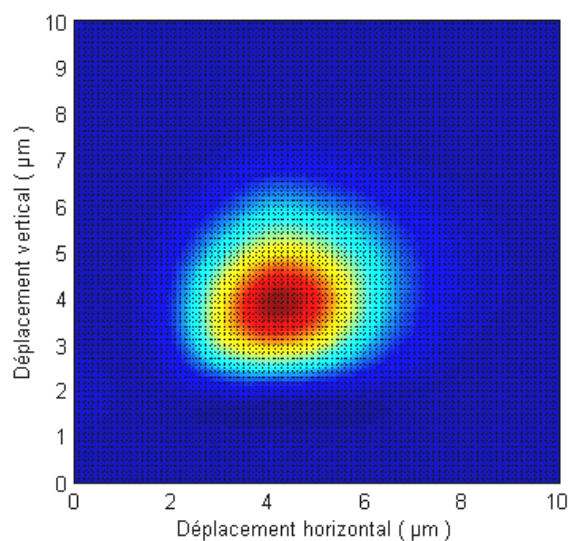


Figure 3-8 : Surface affectée par le faisceau laser pour une fluence de 0.45 J/cm²

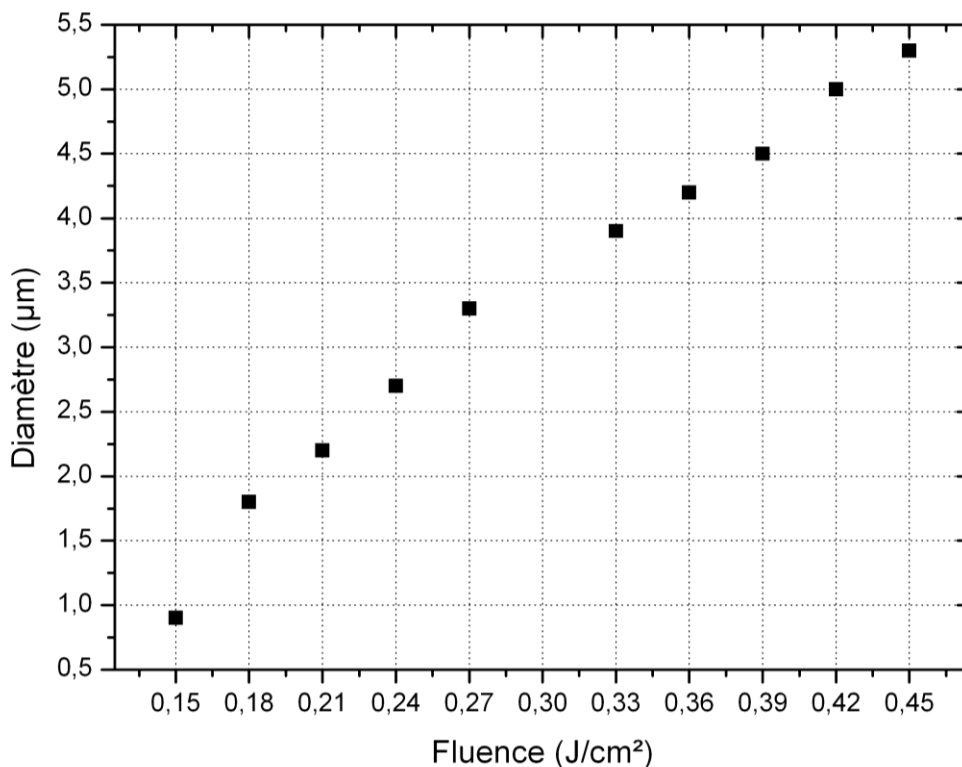


Figure 3-9 : Diamètre de la zone affectée par le laser à 50 % de cristallinité

La Figure 3-9 représente le diamètre de la zone de Poly-Si traitée par le faisceau laser en fonction de la fluence lorsque le pourcentage de cristallinité du matériau est de 50 %. Ce diamètre est composé de la taille du faisceau laser (environ 3μm) sur l'échantillon mais aussi la diffusion de la chaleur sur la surface, ce qui provoque une surface modifiée plus importante que le faisceau. Notons aussi que le diamètre de la zone affectée est relativement linéaire, ce qui permet de prédire la surface traitée.

Ce résultat nous permet de connaître avec précision la surface modifiée par le laser, et donc lorsque des modifications seront apportées à des circuits intégrés, nous pouvons savoir si les composants disposés autour du composant traité vont être affectés par le faisceau laser.

3.3 Estimation de la modification structurale

Il a été mentionné précédemment (section 3.2.3) qu'il était possible de déterminer le pourcentage de cristallinité d'un échantillon de Poly-Si en ajustant des profils gaussien aux spectres expérimentaux Raman et d'appliquer l'équation (6.3).

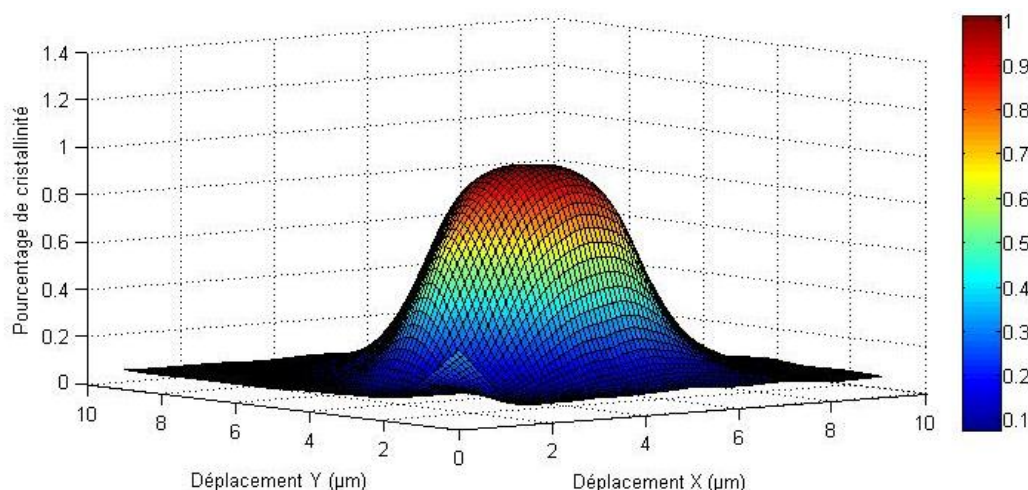


Figure 3-10 : Pourcentage de cristallinité pour une fluence de 0.33 J/cm^2

La Figure 3-10 présente le pourcentage de cristallinité en 2 dimensions pour une fluence de 0.33 J/cm^2 et un train de 227 impulsions de 300 ns de longueur. Constatons qu'en se rapprochant du centre de la zone traitée, le zone devient de plus en plus cristalline jusqu'à atteindre une cristallisation totale de l'échantillon au centre.

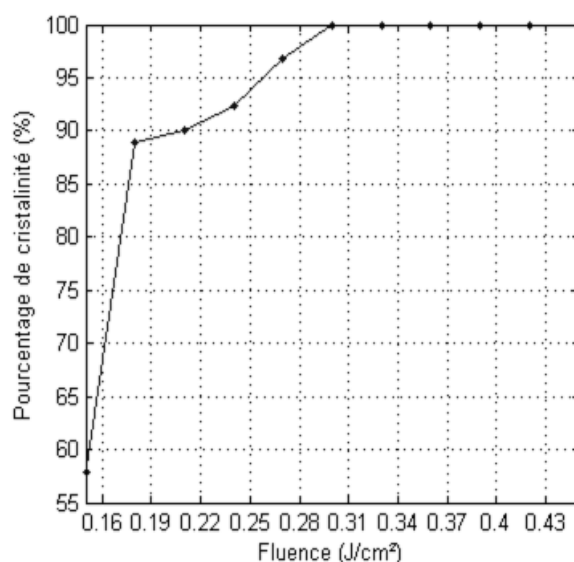


Figure 3-11 : Pourcentage de cristallinité au centre de la zone affectée à différentes fluences

Le pourcentage de cristallinité au centre de la zone traitée en fonction de la fluence laser envoyée est montré sur la Figure 3-11. La fluence la plus faible est de 0.15 J/cm^2 , aucune modification notable par l'analyse Raman n'étant détectée pour des fluences plus faibles. Cette valeur correspond à la fluence minimale nécessaire pour affecter le Poly-Si. Pour des fluences en

dessous de 0.15 J/cm^2 , la fluence du laser est trop faible pour apporter une cristallinité de la surface. En augmentant la fluence, la zone affectée devient de plus en plus cristalline jusqu'à atteindre le maximum de cristallinité. Cependant, il n'est pas nécessaire d'avoir 100% de cristallinité pour modifier un composant électronique.

Toute l'étude effectuée avec le spectromètre Raman a permis de caractériser le changement structural du Poly-Si lors d'un traitement par le laser nanoseconde pour différentes fluences. Nous pouvons conclure que le phénomène dominant lors d'une intervention laser est la cristallisation de la surface. Donc, lorsque des résistances de Poly-Si vont être irradiées, nous pouvons supposer que ce changement structural va affecter la mesure électrique des résistances. En conséquence, l'étude Raman donne une bonne base pour comprendre les changements qui vont être observés avec les résistances de Poly-Si dans la suite de ce mémoire.

CHAPITRE 4 MODIFICATION DE RÉSISTANCES DE POLY-SI MODIFIÉES PAR LASER NANOSECONDE

4.1 Conditions expérimentales

4.1.1 Fluence réelle sur l'échantillon

Comme il y a plusieurs sources de pertes tout au long du chemin optique du faisceau laser, il est nécessaire de déterminer la fluence réelle sur l'échantillon. Le système optique induit des pertes dues largement au modulateur acousto-optique, car on utilise seulement le premier ordre de diffraction du faisceau. Les pertes sont aussi liées aux différents miroirs et au cube séparateur. Au total, le système transmet à l'échantillon une fraction variant de 38 à 42% de la puissance de sortie du laser. Cette fraction dépend de l'alignement du montage et plus particulièrement de celui du modulateur acousto-optique. Les pertes sont facilement mesurables à chaque expérience à l'aide d'un puissance-mètre placé en fin du parcours optique, juste avant l'échantillon. Puisque la puissance maximale du laser varie de 0 à 10 W, la puissance peut varier de 0 à 4.2 W sur l'échantillon.

La puissance mesurée précédemment n'est pas celle disponible sur la résistance de Poly-Si. En effet, un circuit intégré est recouvert de plusieurs couches d'oxydes et dans certains cas d'une couche de passivation résultant en des pertes qui sont difficiles à quantifier. Puisque les couches d'oxyde et de passivation sont uniformes sur toute la surface de l'échantillon et d'un circuit à un autre, les pertes devraient être identiques et nous utiliserons la puissance mesurée par le puissance-mètre placé juste avant l'échantillon.

La fluence du faisceau laser sur l'échantillon est donnée par :

$$F (J / cm^2) = \frac{P_{mes} \cdot \tau}{\pi r^2} \quad (4.1)$$

où F représente la fluence sur l'échantillon sans tenir compte des pertes due au montage et aux couches d'oxydes et de passivation, P_{mes} est la puissance mesurée sur le puissance-mètre, τ étant la longueur des impulsions, et r est le rayon du faisceau laser.

4.1.2 Type d'impulsion utilisée

Une impulsion d'une durée variant de 100 à 300 ns sera utilisée dans les différentes expériences. De plus, le nombre d'impulsions par train d'impulsion et la fluence du laser peuvent être variables. En revanche, l'intervalle de temps entre chaque impulsion est fixé à 96 ns dans le cas d'utilisation de trains d'impulsions.

Au niveau du déplacement du faisceau laser sur l'échantillon, il y aura deux cas possibles dans les expériences : soit aucun chevauchement des différentes impulsions, ou soit un recouvrement total des impulsions (envoi de plusieurs impulsions sans déplacement de l'échantillon). En aucun cas, un recouvrement partiel n'a été effectué.

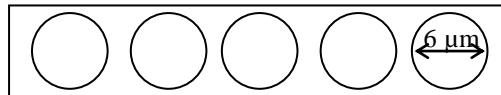


Figure 4-1 : Représentation schématique des impulsions laser sur une résistance

4.1.3 Fluence seuil de fonte du Poly-Si

Les expériences doivent être effectuées en dessous de ce qu'on appelle la fluence seuil de fonte F_{seuil} du Poly-Si. Pour déterminer précisément cette fluence, des analyses ont été réalisées par (Châteauneuf, 2008) sur le même montage expérimental et laser. La méthode utilisée consiste à réaliser une grande série d'impulsions laser de 300 ns avec une puissance variant de 0.2 à 0.4W par pas de 0.02W. Par la suite, les oxydes et couches de passivation sont gravées à l'acide fluorhydrique afin de libérer la surface du Poly-Si des résistances pour effectuer des mesures avec un microscope à force atomique (AFM). Au cours des différentes analyses, il est possible de constater que la puissance de 0.3W représente la puissance de seuil et donc a été adoptée pour les expériences. En utilisant l'équation (4.1), la puissance de 0.3W correspond à une fluence seuil de fonte de 0.33 J/cm².

Afin de confirmer l'absence de fonte du Poly-Si, une méthode de contrôle extérieure a été utilisée. À l'aide du laser sonde He-Ne focalisé sur la région affectée par le laser, il est possible de détecter le changement de réflectivité en fonction de la température. En effet, lors du

changement de phase solide à liquide, il y a un saut brusque dans le coefficient de réflectivité qui est donc facilement détectable.

Il est déterminant de contrôler ce paramètre afin d'éviter le risque de déformation de la couche de Poly-Si, des oxydes de silicium qui recouvrent celles-ci et des contacts métalliques. De plus, la fonte des oxydes et du Poly-Si peut entraîner une modification de la composition chimique, de la diffusion des dopants ou de la migration d'éléments métalliques provenant des contacts.

Néanmoins, dans la suite de ce mémoire, certaines expériences vont être réalisées en dessus du seuil de fonte du Poly-Si pour observer l'effet de ce paramètre sur la mesure électrique des résistances.

4.1.4 Mesure de résistances

La valeur des résistances est prise à l'aide d'une mesure 4-fils avec un multimètre Keithley 2002. Cet appareil a été choisi pour sa résolution de 8.5 chiffres qui est indispensable notamment pour les tests de vieillissement.

Une mesure 4-fils est nécessaire car la longueur des connexions et des fils métalliques sur le circuit intégré ajoute une résistance en série non négligeable ($\sim 200 \Omega$) par rapport à la résistance qui sera modifiée par le laser ($\sim 800 \Omega$).

4.2 Modification de résistances de Poly-Si sans couche de passivation

Les circuits intégrés réalisés de façon conventionnelle disposent d'une couche de passivation qui recouvre l'ensemble du circuit. Pour évaluer la variation de la résistance en fonction de différents paramètres laser, des résistances de test ont été réalisées sans couche de passivation. Avec ces dispositifs, il est possible d'évaluer plus précisément le changement apporté à la résistance sans les réflexions et les pertes de puissance à travers la couche de passivation.

4.2.1 Effet de la puissance du laser sans chevauchement des impulsions

Le but de cette expérience est de déterminer l'influence de la variation de la puissance de sortie du laser. Les fluences choisies sont autour de la fluence seuil pour observer les changements apportés à la résistance à forte et faible fluence. La longueur des impulsions a été fixée et les

impulsions laser ne se chevauchent pas. Il y a un espace de $3\mu\text{m}$ entre chaque impulsion et le diamètre du faisceau laser est de $6\mu\text{m}$. Le test a été effectué avec la même procédure sur 24 résistances de Poly-Si distinctes en faisant varier la puissance de sortie du laser de 0.5 à 1.1 W, ce qui correspond à une fluence sur l'échantillon de 0.22 à 0.48 J/cm^2 .

La variation de la valeur de la résistance est exprimée en partie par million (ppm). Elle est définie comme :

$$\Delta_{mes} = \frac{R_{mod} - R_{init}}{R_{init}} \cdot 10^6 \quad (4.2)$$

où R_{mod} représente la résistance modifiée par laser et R_{init} la résistance initiale.

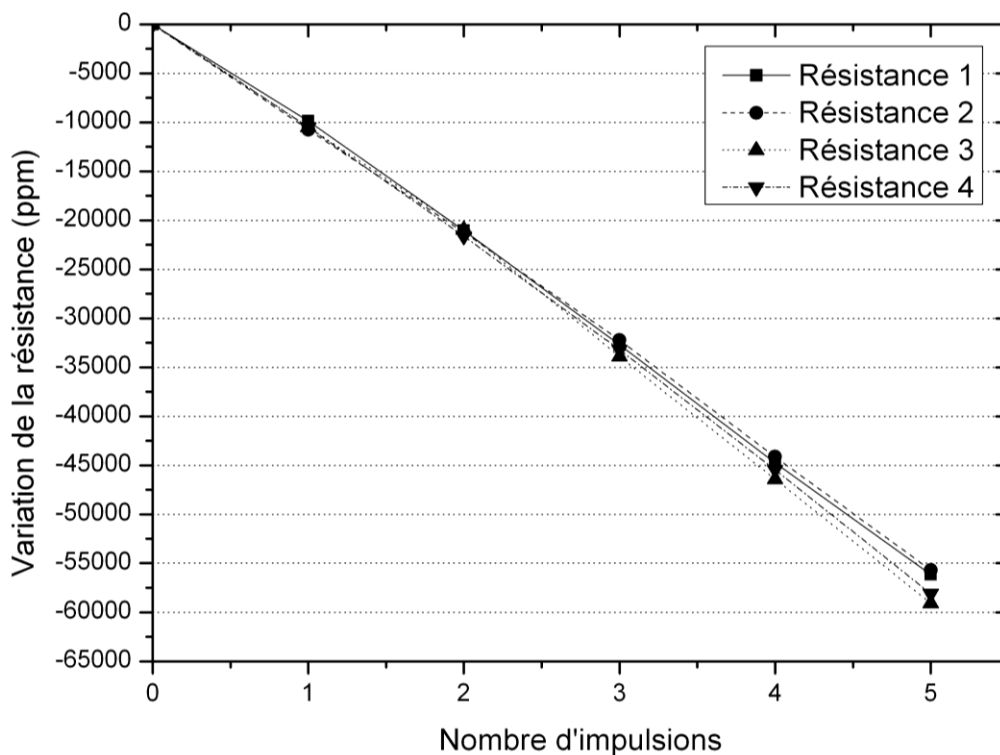


Figure 4-2 : Variation de la résistance (en ppm) en fonction du nombre d'impulsions de plusieurs résistances à 0.44 J/cm^2

Sur la figure 4-2, on observe l'évolution de quatre résistances distinctes en fonction du nombre d'impulsions envoyées sur l'échantillon à une fluence de 0.44 J/cm^2 . Pour des séries de 5 impulsions sans chevauchement, une diminution assez linéaire et reproductible de la résistance

est observée. Ceci permet donc de prédire l'évolution de la résistance en fonction du nombre d'impulsions laser utilisées.

La Figure 4-3 présente la variation de plusieurs résistances irradiées à différentes fluences en fonction du nombre d'impulsions. À faible fluence, la variation est linéaire et a tendance à dériver un peu de cette linéarité lorsque la fluence augmente jusqu'à 0.48 J/cm^2 . Notons que plus la fluence du laser est importante plus la variation de la résistance est importante.

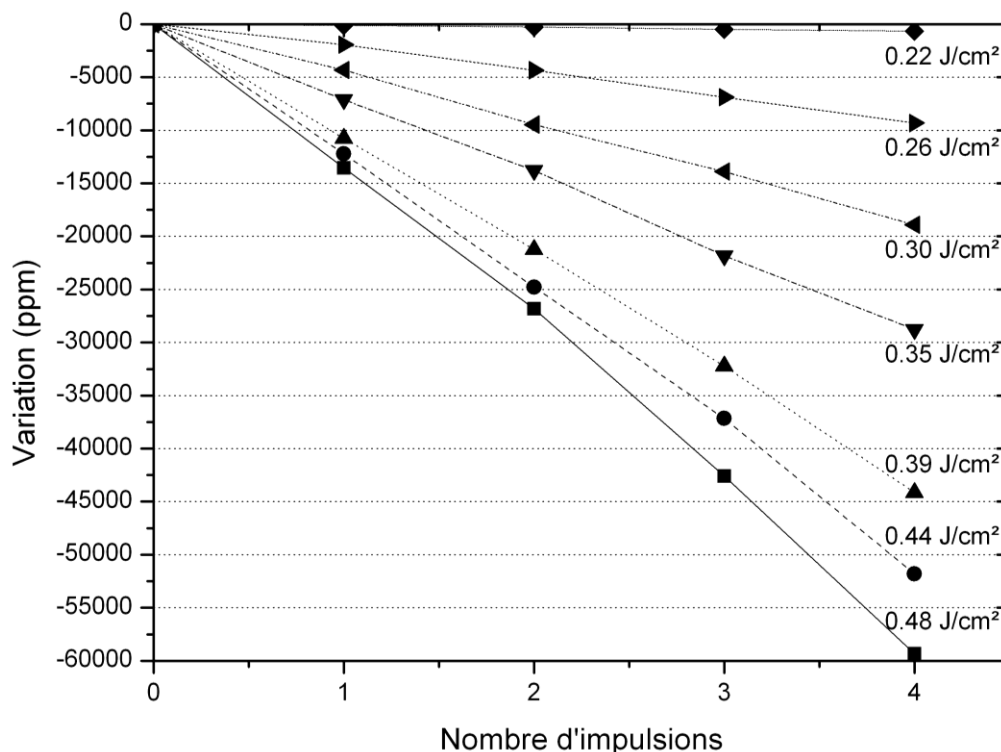


Figure 4-3 : Variation de la résistance en fonction du nombre d'impulsions irradié à différentes fluences

La Figure 4-4 montre la variation de la résistance en fonction de la fluence du laser suite à une irradiation. Cette variation de la modification est essentiellement linéaire sur la plage de fluences utilisées avec une légère dérive vers 0.35 J/cm^2 , probablement due au fait que le traitement s'est effectué au dessus de la fluence de seuil de fonte du Poly-Si, modifiant différemment la structure du Poly-Si. Pour effectuer une modification de résistances reproductible, il est préférable d'utiliser des fluences $F < F_{\text{seuil}}$. En effet, à ces fluences, les variations de résistances sont plutôt linéaires avec le nombre d'impulsions et la fluence, facilitant l'utilisation de la technique.

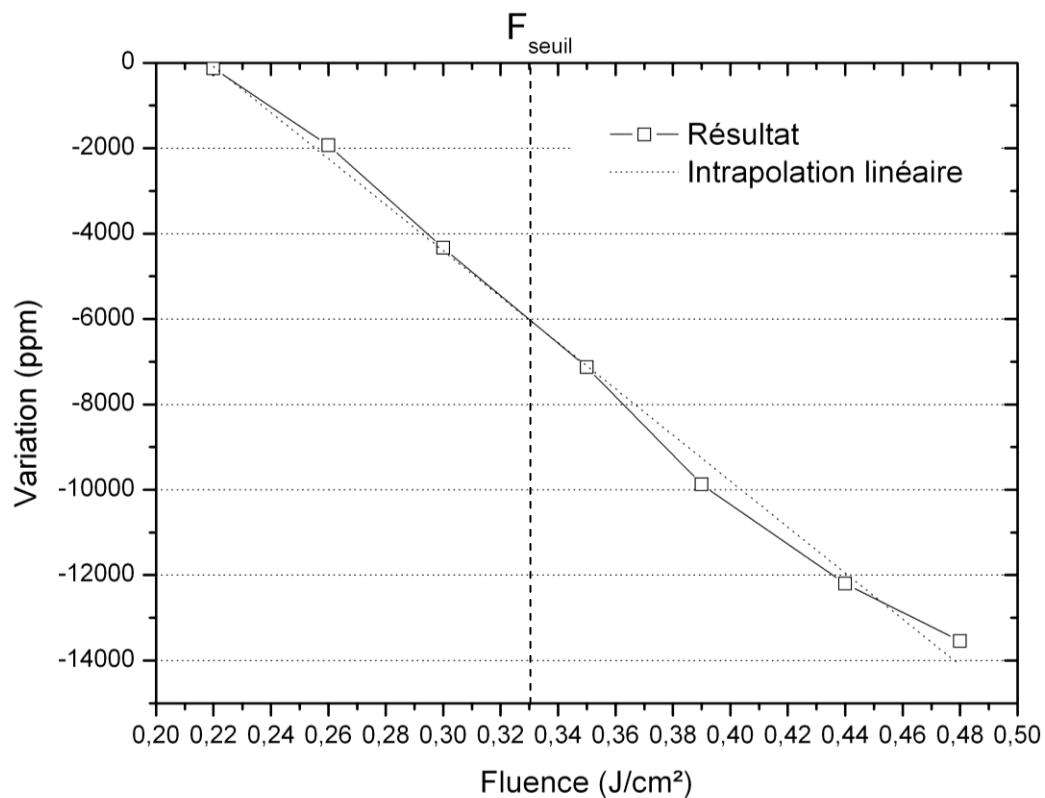


Figure 4-4 : Variation de résistance en fonction de la fluence du laser

Le Tableau 4-1 présente la variation de la valeur de la résistance en ppm pour chaque impulsion laser. La précision de la modification par laser est en moyenne de 365 ppm avec une erreur maximale d'environ 550 ppm. Donc il est possible de contrôler avec une bonne précision la variation de la résistance irradiée par laser.

Tableau 4-1 : Variation des résistances en ppm pour différentes fluences

<i>Fluence 0.48 J/cm²</i>				
Nombre d'impulsions	Résistance 1	Résistance 2	Résistance 3	Précision
1	- 13540	- 13529	- 13585	45 ppm
2	- 13480	- 13460	- 13912	452 ppm
3	- 13587	- 13444	- 14092	505 ppm
<i>Fluence 0.44 J/cm²</i>				
1	- 12219	- 12204	- 12034	185 ppm
2	- 12475	- 12729	- 12887	412 ppm
3	- 12845	- 12697	- 13252	555 ppm
<i>Fluence 0.39 J/cm²</i>				
1	- 10508	- 10404	- 10758	354 ppm
2	- 11233	- 10924	- 10785	448 ppm
3	- 11843	- 12047	- 11524	523 ppm
<i>Fluence 0.35 J/cm²</i>				
1	- 6906	- 6851	- 7125	219 ppm
2	- 7197	- 7509	- 7708	511 ppm
3	- 7946	- 7707	- 8165	458 ppm
<i>Fluence 0.3 J/cm²</i>				
1	- 4678	- 4602	- 4333	345 ppm
2	- 4864	- 4456	- 4860	408 ppm
3	- 5305	- 4762	- 5063	543 ppm
<i>Fluence 0.26 J/cm²</i>				
1	- 2307	- 1933	- 1827	480 ppm
2	- 1906	- 2419	- 1930	489 ppm
3	- 2250	- 2561	- 2667	417 ppm
<i>Fluence 0.22 J/cm²</i>				
1	-126	-238	-215	112 ppm
2	-141	-101	-224	123 ppm
3	-222	-140	-124	98 ppm

4.2.2 Effet de la durée de l'impulsion sans chevauchement des impulsions

Pour ces expériences, un espacement de $2\text{ }\mu\text{m}$ est utilisé entre chaque impulsion envoyée sur l'échantillon. La longueur des impulsions varie de 100 ns à 300 ns et la puissance en sortie du laser est constante dans un premier temps.

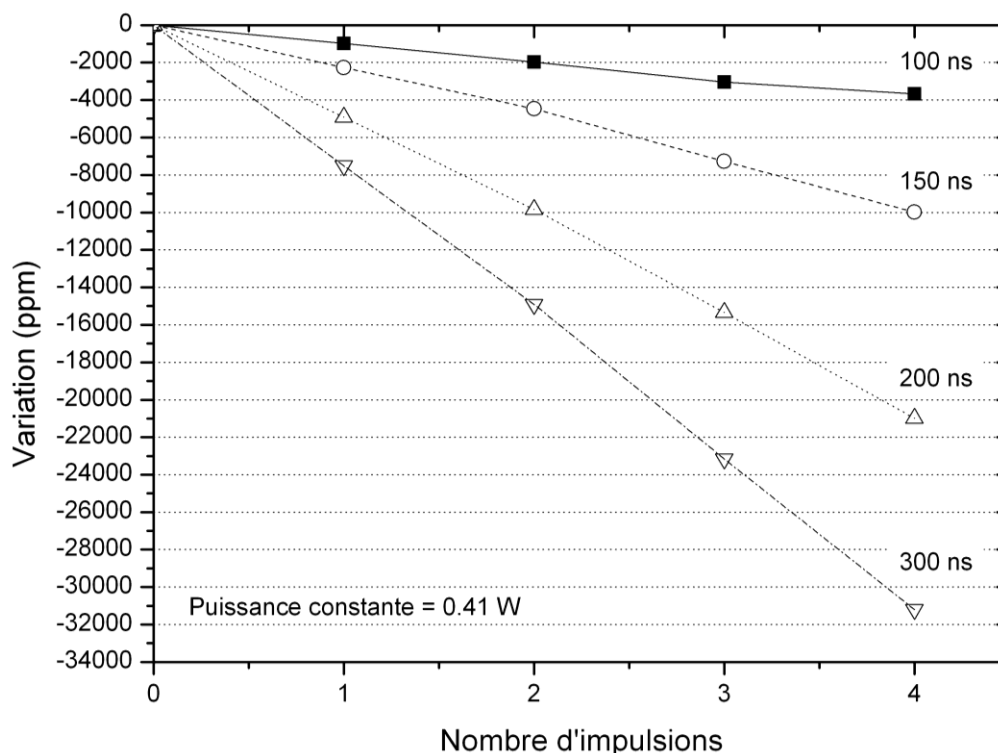


Figure 4-5 : Variation de la résistance en fonction du nombre et de la longueur des impulsions avec une puissance sur l'échantillon de 0.41 W

La Figure 4-5 montre la variation de la résistance en fonction du nombre d'impulsions pour des longueurs d'impulsion variant de 100 à 300 ns. Nous observons que sur une série de quatre impulsions, plus la longueur de l'impulsion augmente, à puissance constante, plus la modification devient importante.

La Figure 4-6 et la Figure 4-7, présentent respectivement la variation de résistance en fonction du nombre d'impulsions pour une durée de 100 ns et 200 ns injectées à plusieurs fluences. La puissance sur l'échantillon varie de 0.8 à 1.1 W pour une longueur de 100 ns. La fluence est donc de 0.12 à 0.16 J/cm². Pour une durée d'impulsion de 200 ns, la puissance de sortie varie de 0.5 à 1.1 W et donc la fluence est de 0.15 à 0.32 J/cm².

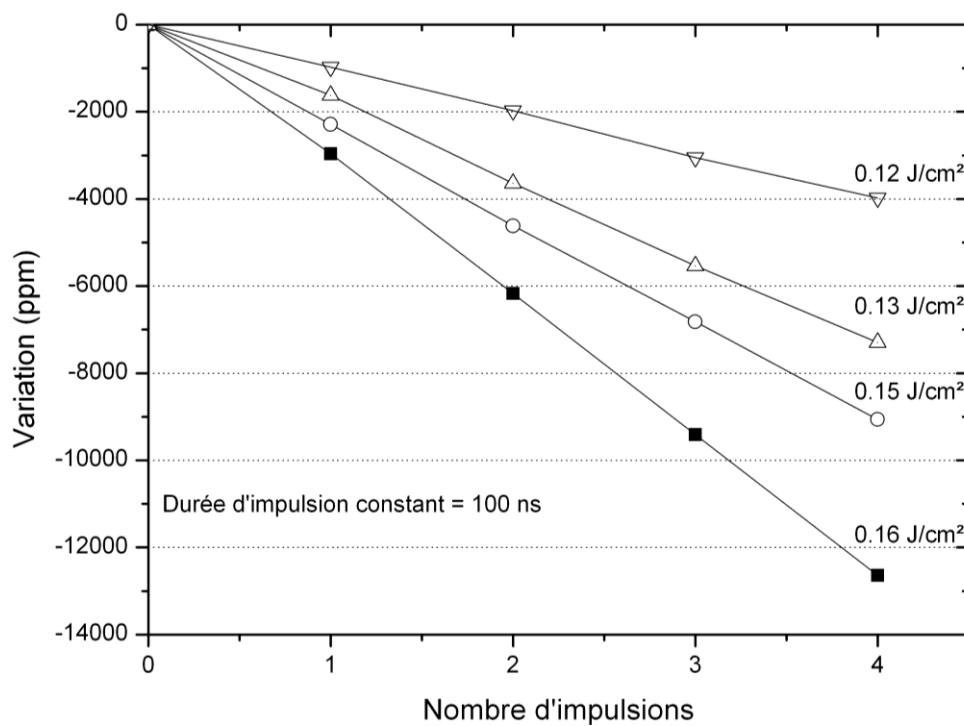


Figure 4-6 : Variation de résistance en fonction de la fluence du laser pour une série de quatre impulsions d'une durée de 100 ns

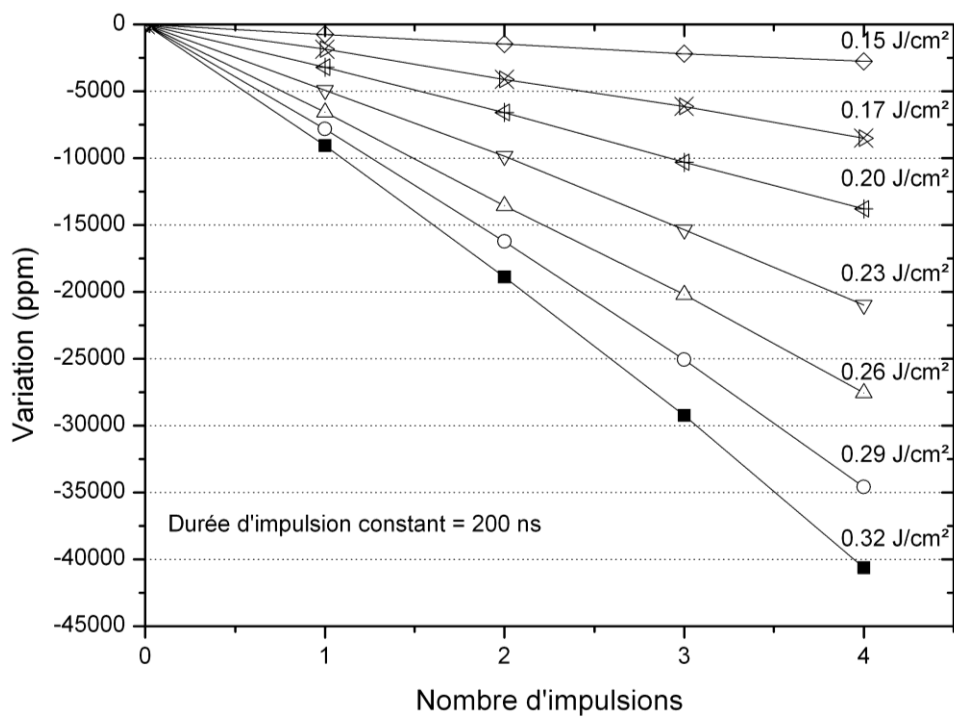


Figure 4-7 : Variation de résistance en fonction de la fluence du laser pour une série de quatre impulsions d'une durée de 200 ns

Pour une durée d'impulsion variant de 100 ns à 300 ns, la variation est linéaire en fonction du nombre d'impulsions envoyées. Avec les Figure 4-6 et Figure 4-7, il est possible de confirmer que la modification de résistance Poly-Si par laser est reproductible avec une très bonne précision, quelque soit la durée des impulsions utilisée et la puissance choisie.

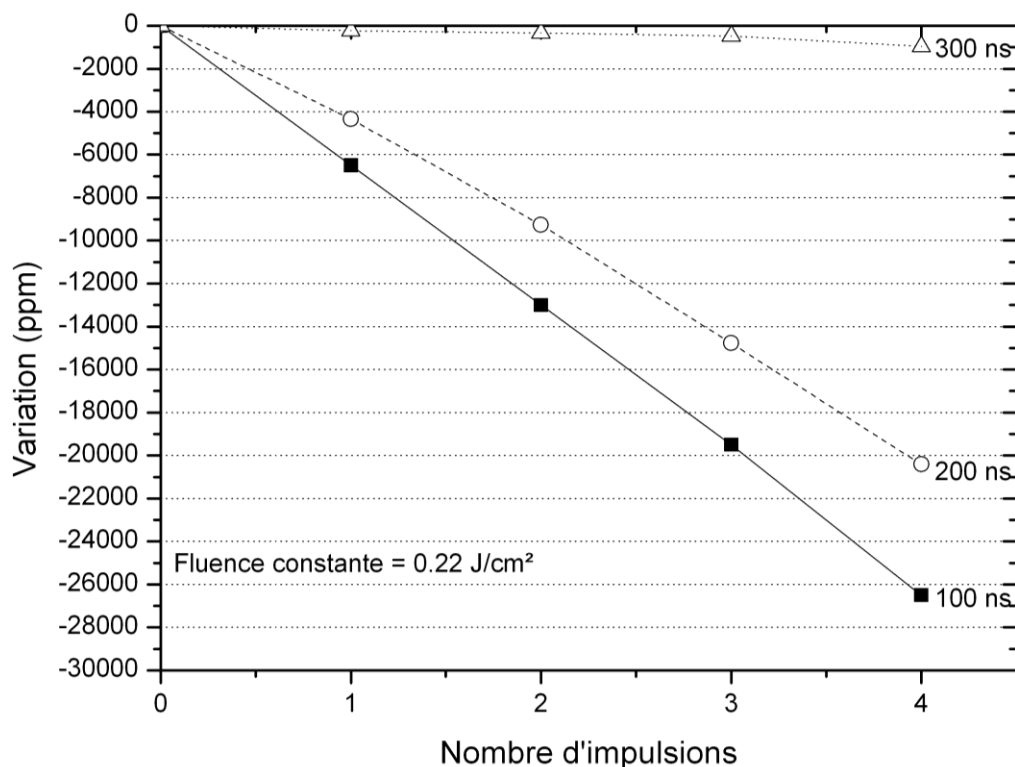


Figure 4-8 : Variation de résistance en fonction de la longueur de l'impulsion pour une fluence de 0.22 J/cm².

La Figure 4-8 présente la variation de résistance en fonction du nombre d'impulsions, lorsque la durée de l'impulsion varie de 100 à 300 ns, à une fluence fixe de 0.22 J/cm². Pour obtenir une fluence constante de 0.22 J/cm², la puissance de sortie du laser sur l'échantillon a due varier respectivement de 0.6 W, 0.3 W et 0.2 W pour 100 ns, 200 ns et 300 ns. La décroissance de la résistance est beaucoup moins importante lorsque la durée de l'impulsion augmente. À fluence constante, lorsque le temps de l'impulsion augmente, la température maximale diminue dû principalement au fait que l'énergie fournie au matériau à plus de temps pour diffuser. Ceci minimise la modification structurale et la variation de résistance.

4.2.3 Effet de la puissance de sortie du laser avec recouvrement total des impulsions

Maintenant, nous allons nous intéresser au pourcentage de variation de résistance Poly-Si avec un recouvrement total entre chaque impulsion envoyée par le laser. Dans un premier temps, seule la fluence du laser varie de 0.17 à 0.29 J/cm² par impulsion avec une longueur d'impulsion de 200 ns. Remarquons que la fluence choisie pour l'analyse est en dessous de la fluence de seuil de fusion du Poly-Si.

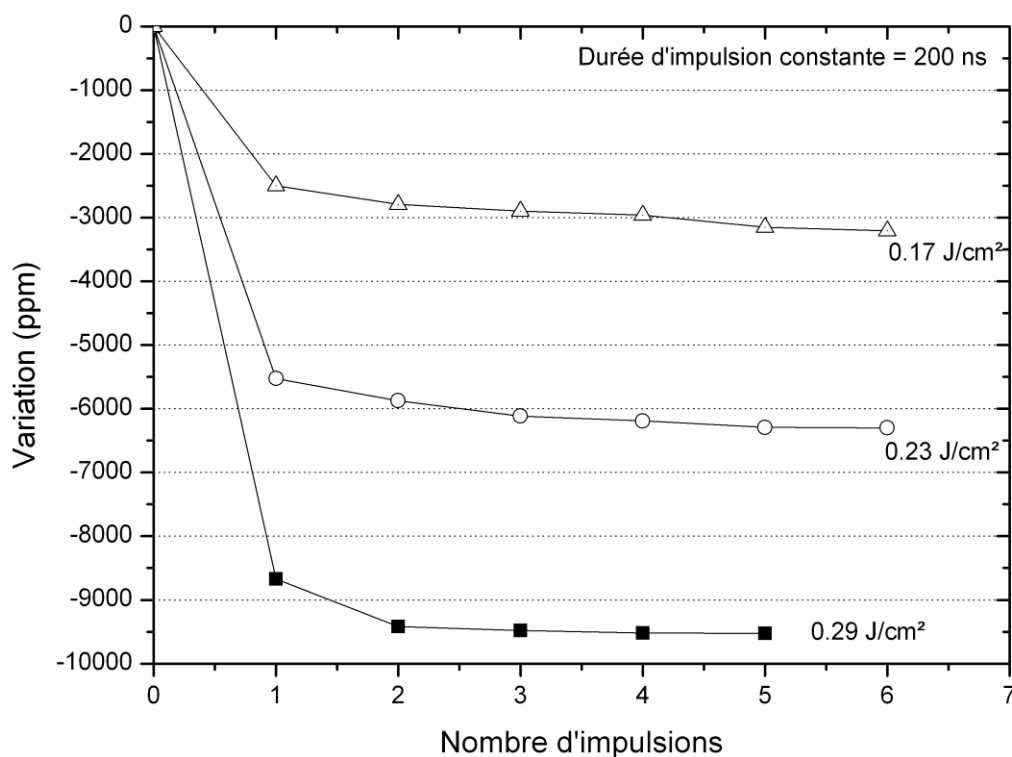


Figure 4-9 : Variation de résistance en fonction du nombre d'impulsion et de la fluence laser pour une durée de 200 ns

La Figure 4-9 présente la variation de la valeur de résistances Poly-Si en fonction du nombre d'impulsions lorsque les impulsions sont envoyées sur l'échantillon sans déplacement du faisceau laser. Notons qu'après une seule impulsion, la modification est la plus importante et que les 2 à 4 impulsions envoyées au même endroit par la suite ont peu d'impact sur la valeur de la résistance.

Puisque toutes les impulsions sont superposées spatialement, ceci indique que la modification structurale se produit essentiellement en une impulsion, toutes les autres qui suivent n'entraînant que de légères modifications additionnelles.

4.2.4 Effet de la durée des impulsions avec recouvrement des impulsions

Nous avons observé précédemment que lorsque nous utilisons un recouvrement des impulsions, un train d'impulsions est nécessaire pour atteindre une modification totale de la surface traitée et que la valeur devienne stable(même si la première impulsion cause la plus grande partie de cette modification). Maintenant, la même expérience est réalisée en faisant varier la durée des impulsions de 100 ns à 300 ns.

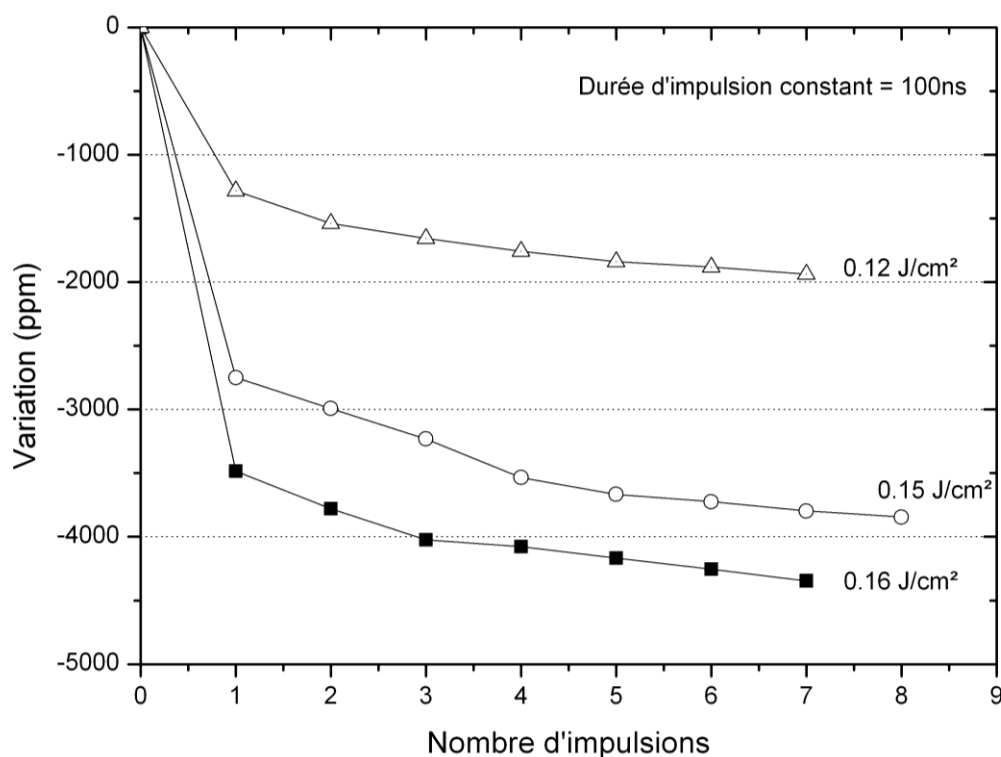


Figure 4-10 : Variation de résistance en fonction du nombre d'impulsions et de la fluence laser pour une durée d'impulsion de 100 ns

La Figure 4-10, montre la variation de valeur de résistances de Poly-Si traitées par laser sans déplacement du faisceau en fonction du nombre d'impulsions d'une longueur de 100 ns pour une fluence variant de 0.12 à 0.16 J/cm². Notons qu'au bout de huit impulsions laser, la variation de

résistance ne devient pas totalement stable, comme c'est le cas pour une longueur d'impulsion de 200 ns.

Ceci s'explique par le fait que puisque les fluences et le temps d'impulsion sont plus faibles que dans le cas de la Figure 4-9, plusieurs impulsions sont nécessaires afin de compléter une modification structurale presque complète.

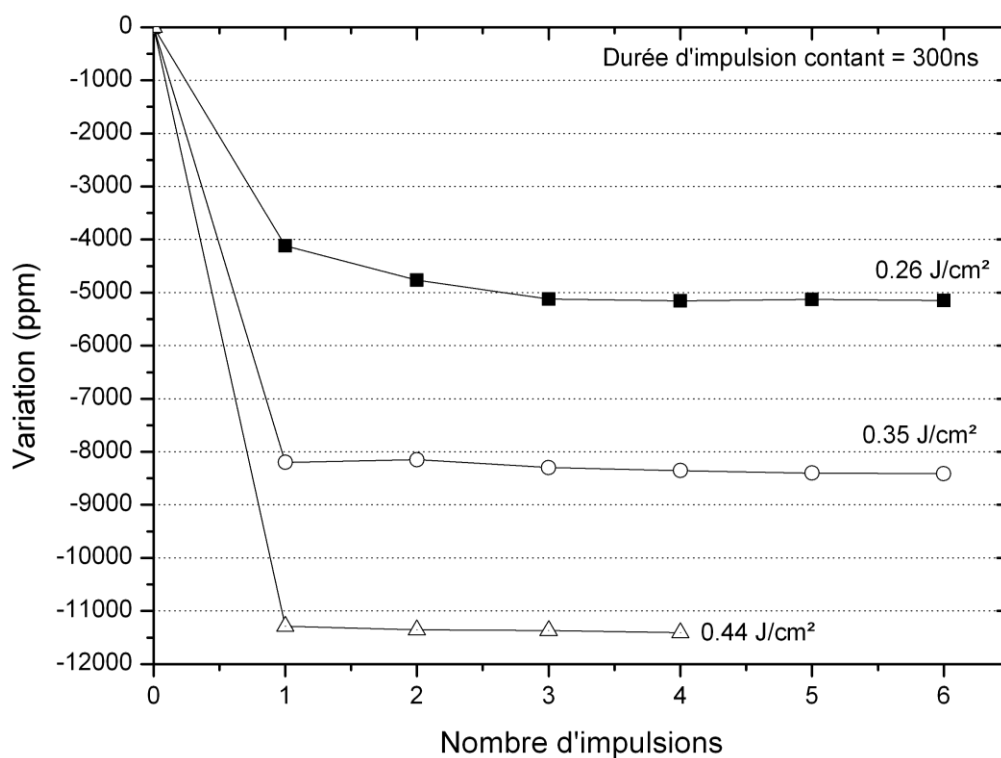


Figure 4-11 : Variation de résistance en fonction du nombre d'impulsions et de la fluence laser pour une durée d'impulsion de 300 ns

La Figure 4-11 présente aussi la variation de résistance en fonction du nombre d'impulsions et pour plusieurs fluences lorsque les impulsions laser d'une durée de 300 ns se superposent. Observons que dans ce cas, une impulsion laser, voire deux, sont suffisantes pour rendre la modification totalement stable, et que donc l'ensemble de la surface exposée au faisceau laser est modifiée en un seul passage.

4.3 Modification de résistances de Poly-Si avec une couche de passivation

Les circuits intégrés conventionnels possèdent une couche de passivation et d'oxyde sur le dessus du circuit afin d'assurer la protection des différents composants. Maintenant, intéressons nous à l'influence de cette couche de passivation sur les résistances de Poly-Si.

4.3.1 Effet de la couche de passivation sur des résistances de Poly-Si sans chevauchement des impulsions

Puisque cette couche de passivation n'est habituellement pas uniforme, elle entraînera de la variabilité dans les résultats. Les fluences choisies sont en dessous de la fluence seuil de fonte du Poly-Si. Le but de cette expérience est de déterminer l'influence de la présence de couche de passivation sur les résistances de Poly-Si. Dans ce cas, la longueur des impulsions ne varie pas et les impulsions laser envoyées par le laser sur l'échantillon ne se chevauchent pas.

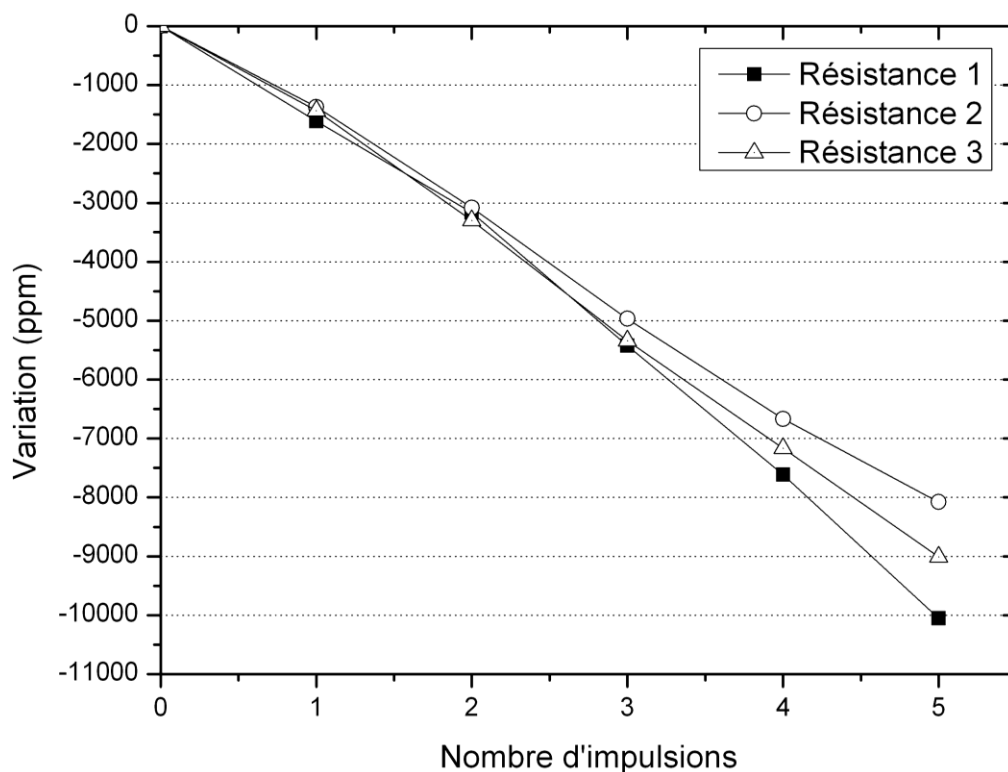


Figure 4-12 : Variation de trois résistances de Poly-Si à 0.2 J/cm²

La Figure 4-12 présente la variation de trois résistances Poly-Si modifiées par laser pour une fluence de 0.2 J/cm^2 et une durée d'impulsion de 200 ns. Constatons que la variation de la résistance est quasi-linéaire avec le nombre d'impulsion mais qu'elle n'est pas pleinement reproductible d'une résistance à l'autre. Après cinq impulsions, il peut y avoir une variation de 2 000 ppm pour des résistances modifiées dans les mêmes conditions expérimentales. Donc la couche de passivation entraîne des variations non négligeables sur la valeur de la résistance qui sont certainement dues à la non-uniformité de l'épaisseur de cette couche.

Maintenant, nous allons nous intéresser à l'influence de la durée des impulsions envoyées sur l'échantillon sans recouvrement de l'impulsion. Un déplacement de $2 \mu\text{m}$ est utilisé entre chaque impulsion envoyée sur l'échantillon et la puissance de sortie du laser est constante à 0.32 W.

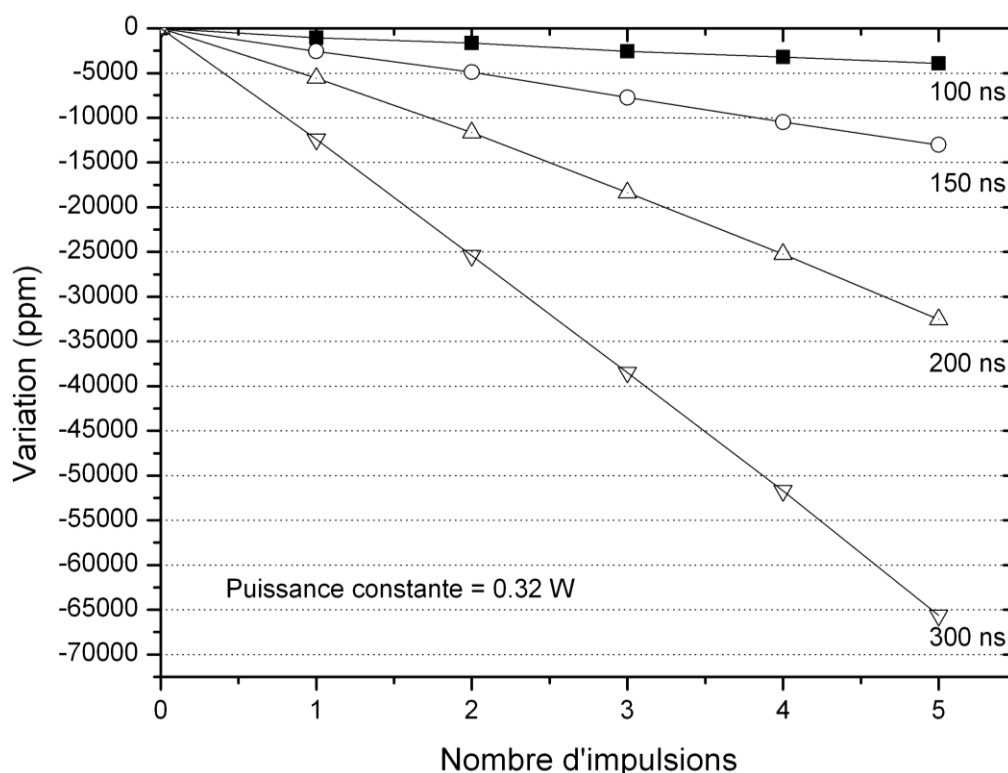


Figure 4-13 : Variation de la résistance pour une puissance laser sur l'échantillon de 0.32 W

La Figure 4-13 montre la variation de la résistance en fonction du nombre d'impulsions pour des longueurs d'impulsion variant de 100 à 300 ns. Les comportements sont semblables à ceux observés lorsqu'il n'y a pas de couche de passivation, c'est-à-dire une décroissance linéaire de la valeur de la résistance en fonction du nombre d'impulsions avec une augmentation de la variation lorsque la longueur des impulsions augmente.

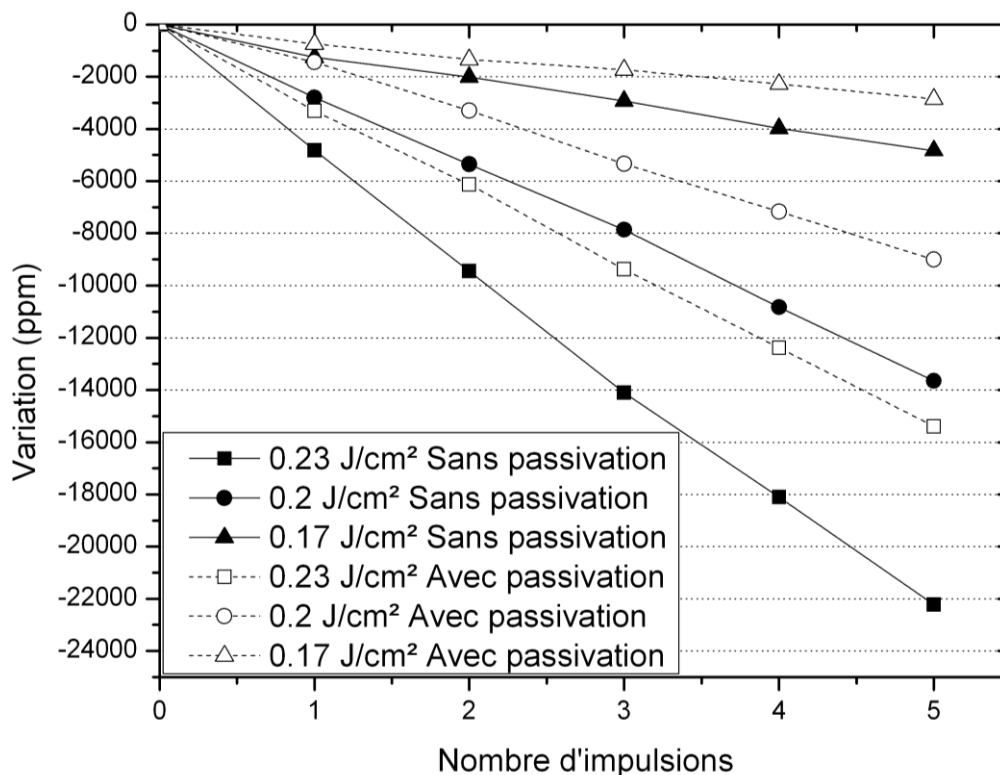


Figure 4-14 : Comparaison entre la variation de la valeur des résistances de Poly-Si avec et sans couche de passivation pour plusieurs fluences

La Figure 4-14 présente la variation de plusieurs résistances avec et sans couche de passivation modifiées par laser avec une fluence variant de 0.17 J/cm^2 à 0.23 J/cm^2 pour une durée d'impulsion de 200 ns. Comme observé précédemment, le comportement des résistances est similaire avec et sans la présence de la couche de passivation. Pour une fluence de 0.23 J/cm^2 , suite à la première impulsion, la variation entre les deux résistances est de 1 511 ppm, ce qui entraîne au bout de 5 impulsions une différence entre une résistance avec et sans passivation d'environ 7 200 ppm. Lorsque la fluence diminue, la variation entre les deux résistances est moins importante respectivement pour 0.2 J/cm^2 et 0.17 J/cm^2 . L'erreur est d'environ 4 640 ppm et 1 970 ppm avec cinq impulsions envoyées. Néanmoins, ces résultats ne peuvent pas être pris comme référence, car la modification de résistances avec une couche de passivation est difficilement reproductible.

La couche de passivation présente sur le dessus des résistances de Poly-Si permet quand même d'effectuer une décroissance de la valeur de la résistance en fonction de la fluence, de la durée et du nombre d'impulsions. Par contre, contrairement aux résistances sans couche de passivation, la

variation de la modification est difficilement reproductible. Il est alors préférable de faire une mesure électrique pour prévoir et ajuster la modification désirée. En conclusion, la présence d'une couche de passivation provoque une variation de la modification par laser lorsqu'on change de circuit ou de résistance, phénomène dû essentiellement à l'épaisseur de la couche de passivation qui n'est pas uniforme. Par contre, même avec une couche de passivation, il est possible de modifier une résistance par laser. Il est cependant préférable d'utiliser une plus grande durée d'impulsion ou une plus grande fluence que pour des résistances sans couche de passivation. Ceci permet de se rendre plus facilement à la couche de Poly-Si.

4.3.2 Effet du chevauchement des impulsions

Dans cette étude, la durée des impulsions est de 200 ns et la puissance de sortie du laser reste constante. Le but de l'analyse est d'observer la reproductibilité des résultats de l'expérience pour plusieurs résistances de Poly-Si avec une couche de passivation dans les mêmes conditions.

La Figure 4-15 représente la variation de plusieurs résistances de Poly-Si avec une couche de passivation en fonction du nombre et de la durée des impulsions de 200 ns avec une fluence de 0.2 J/cm^2 . Nous pouvons observer le même phénomène que pour des résistances de Poly-Si sans couche de passivation, c'est-à-dire que la modification tend à devenir quasiment stable au bout de plusieurs impulsions. Cependant, un plus grand nombre d'impulsions est nécessaire pour atteindre un comportement stable (4 à 5 impulsions) alors que pour des résistances sans couche de passivation deux impulsions suffisent pour atteindre une modification maximale (chapitre 4.2.3). Donc, pour atteindre la résistance de Poly-Si, il est préférable d'utiliser un train d'impulsions et une fluence plus importante de façon à passer au travers de la couche de passivation qui joue son rôle de protection des composants.

Il est aussi important de constater que la variation est difficilement reproductible à cause de la non-uniformité de l'épaisseur de la couche de passivation. Après cinq impulsions, une erreur de 380 ppm est observée.

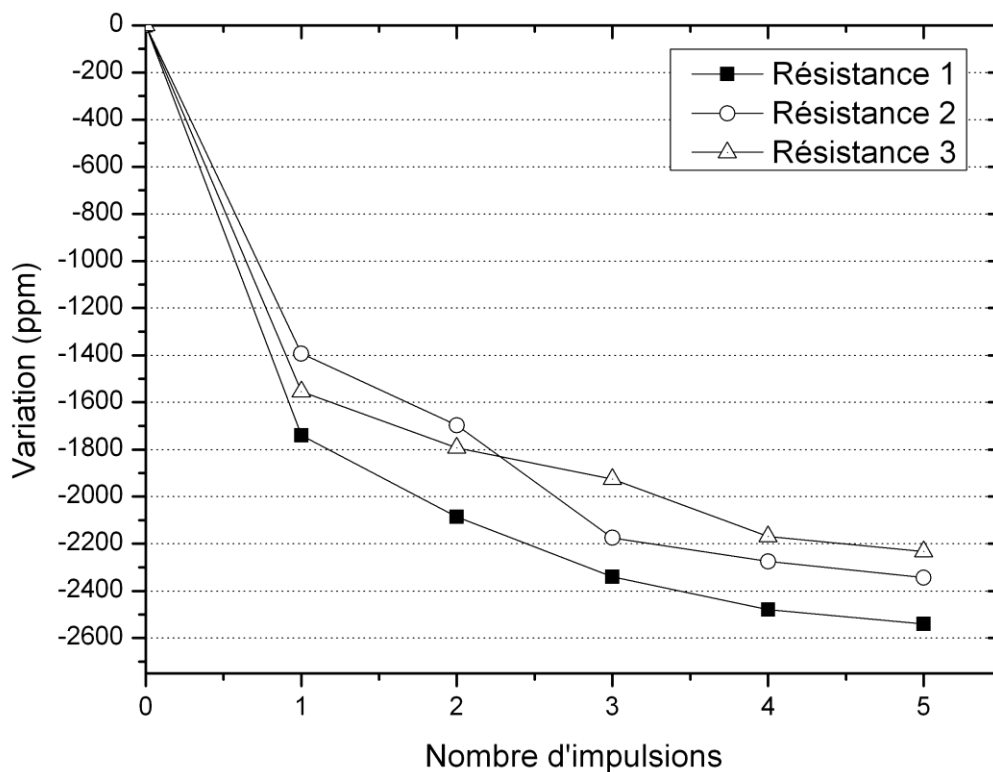


Figure 4-15 : Variation de la valeur de résistances de Poly-Si pour une fluence de 0.2 J/cm^2 avec chevauchement des impulsions au travers d'une couche de passivation

4.4 Conclusion

L'ensemble de l'étude réalisée dans ce chapitre portait sur la caractérisation électrique de résistances de Poly-Si sur circuit intégré. Deux types d'échantillons ont été utilisés pour réaliser ces analyses : des résistances de Poly-Si en présence d'une couche de passivation sur le dessus et des résistances de Poly-Si sans couche de passivation. Après cette étude, nous pouvons dire que les modifications par laser apportées sur des résistances de Poly-Si sont contrôlées et que la variation est linéairement décroissante dans tous les cas. Par conséquent, il est possible d'avoir des modifications de résistances reproductibles et il est aisé de faire des prédictions de la variation d'une résistance en fonction des paramètres laser choisis après calibration.

Avec cette méthode de modification, la plus petite variation qu'il est possible d'effectuer est de l'ordre de 50 ppm et la variation maximale est de 500 ppm. La plage de variation de 50 à 500 ppm est en grande majorité due au système de focalisation du laser. En effet, pour trouver le point focal du laser, la table de positionnement est ajustée en hauteur et contrôlée seulement à l'aide de

l'œil humain donc on peut introduire une erreur sur la hauteur de l'échantillon qui peut atteindre 5 μm dans cet environnement.

Avec des résistances de Poly-Si recouvertes d'une couche de passivation, la modification est plus difficile à prévoir car la couche n'est pas uniforme sur l'ensemble du circuit intégré et de la gaufre de Poly-Si. Une erreur allant jusqu'à 2 000 ppm (Figure 4-12) peut être observée pour plusieurs résistances modifiées avec les mêmes paramètres laser. Ceci rend difficile la reproductibilité des résultats en comparaison avec des résistances sans couche de passivation. Néanmoins, pour une même résistance, la surface utilisée pour la modification est assez petite (environ 30 μm pour 5 impulsions) pour que l'épaisseur de la couche de passivation ne varie pas de façon significative. Ceci permet d'avoir une variation linéaire décroissante et il est donc possible de contrôler la variation à condition de faire simultanément une mesure électrique de la résistance.

Pour des résistances avec et sans couche de passivation, un ajustement fin de la variation peut être réalisé avec un choix judicieux des paramètres laser et à l'aide du recouvrement des impulsions laser.

CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION EN TEMPÉRATURE DE RÉSISTANCES POLY-SI MODIFIÉES PAR LASER

On a montré que les résistances de Poly-Si peuvent être modifiées par un laser nanoseconde de façon linéaire, contrôlée, reproductible et prédictible. Cependant, il est possible que ces dispositifs modifiés ne supportent pas une évolution dans le temps ou que les résistances aient une durée de vie raccourcie à cause des changements apportés à la structure du matériau. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de réaliser une analyse en température et du vieillissement de plusieurs résistances modifiées selon différents paramètres du laser.

5.1 Coefficient de température des résistances

Le coefficient de température des résistances (TCR) doit être mesuré dans un premier temps, car il permet de connaître la variation de la valeur de la résistance en fonction de la température. Étant donné que des tests en température vont être réalisés tout au long de ce chapitre, il est essentiel de connaître le TCR des résistances Poly-Si présentes sur les circuits intégrés avant qu'elles ne soient modifiées par laser.

Pour cela, trois circuits intégrés différents ont été utilisés pour obtenir un résultat représentatif de l'ensemble des échantillons. De plus, une comparaison du TCR pour des résistances de Poly-Si non modifiées et des résistances de Poly-Si traitées par laser est réalisée.

Les mesures de TCR sont faites sur une plage de températures variant de 25 °C à 35 °C. La limite maximale de 35°C est justifiée par le fait que des températures supérieures peuvent provoquer un vieillissement prématuré de l'ensemble des résistances présentes sur le circuit et donc, par la suite, affecter les autres tests de vieillissement. Comme nous ne disposons pas d'un grand nombre de circuits, il a fallu limiter cette plage de température de vieillissement afin de conserver ces circuits pour plusieurs tests.

Pour cette étude, six résistances de Poly-Si sont utilisées, dont trois non modifiées et trois traitées par laser dans les mêmes conditions. Les paramètres laser utilisés sont une série de trois impulsions sans recouvrement d'une durée d'impulsions de 300 ns et avec une fluence de 0.34 J/cm². Le pourcentage de variation total des résistances modifiées est d'environ 27 000 ppm après l'envoi des trois impulsions.

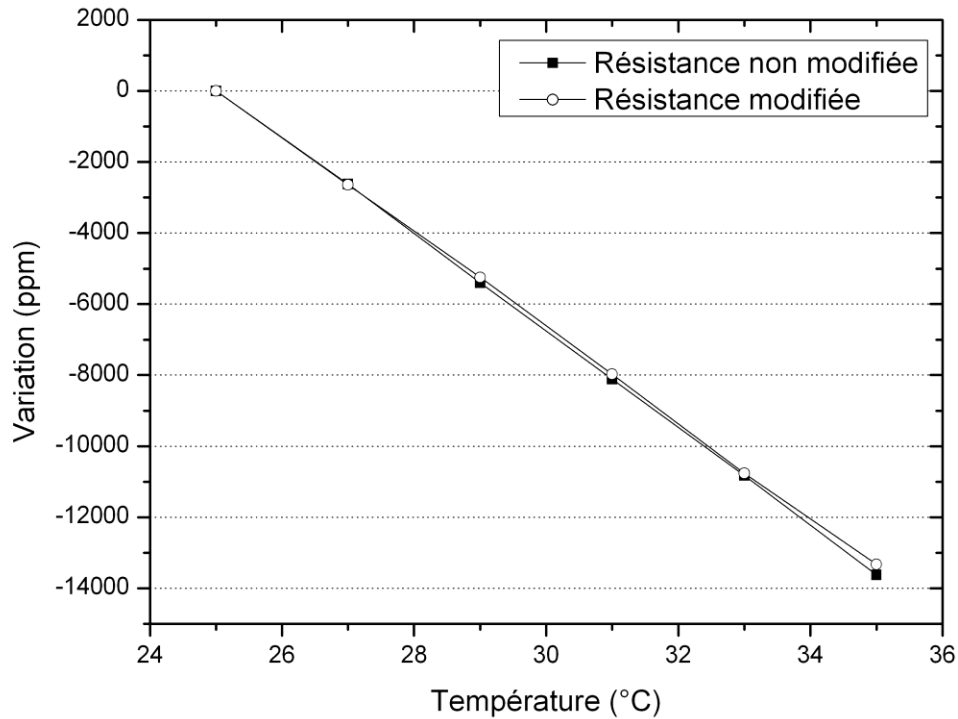


Figure 5-1 : Variation de la résistance en fonction de la température pour des résistances non modifiées et modifiées par laser

La Figure 5-1 représente l'évolution de la moyenne des résistances modifiées et non modifiées en fonction de la température. Il est facile de constater que des résistances traitées par laser évoluent selon le même ordre de grandeur que des résistances non traitées et donc qu'elles ont essentiellement le même coefficient de température. Pour déterminer le coefficient de température α des résistances, la relation suivante est utilisée :

$$R = R_{ref} \left[1 + \alpha (T - T_{ref}) \right] \quad (5.1)$$

R_{ref} et T_{ref} représentent respectivement la résistance et la température de référence prises à 25°C et R et T la résistance et température prises à 35 °C. Alors, le TCR des résistances de Poly-Si est de - 0.00136 $\Omega/^\circ\text{C}$ ce qui correspond à - 1 363 ppm/°C.

5.2 Conditions expérimentales

Pour réaliser des tests de vieillissement, il y a certaines précautions à prendre pour obtenir des résultats représentatifs. En effet, la variation que nous désirons observer est de l'ordre de 100 ppm donc très faible ce qui impose un contrôle serré des conditions.

Tout d'abord, pour obtenir une mesure fiable de la résistance sans l'influence de la longueur des câbles de mesure et des fils de métal sur le circuit intégré, une mesure 4 fils est utilisée. Un multimètre de haute précision, le Keithley 2002, est indispensable pour effectuer les mesures avec une résolution de 8.5 chiffres. Les résistances de Poly-Si qui sont analysées ont une valeur de l'ordre de $800\ \Omega$, ce qui signifie qu'avec cet appareil de mesure, une résolution de 100 ppm est possible.

De plus, compte tenu que les dispositifs ont un coefficient de température variant en fonction de la température, il est nécessaire de contrôler cette température. Le four utilisé provient de la compagnie Thermotron qui permet d'avoir une plage de température de $-70\ ^\circ\text{C}$ à $+185\ ^\circ\text{C}$. Il est possible de programmer le four pour effectuer des cycles de température contrôlés en fonction du temps et des rampes pour atteindre une température déterminée. Ce four est placé en salle grise, où la température de la pièce est stable à $\pm 0.9^\circ\text{C}$.

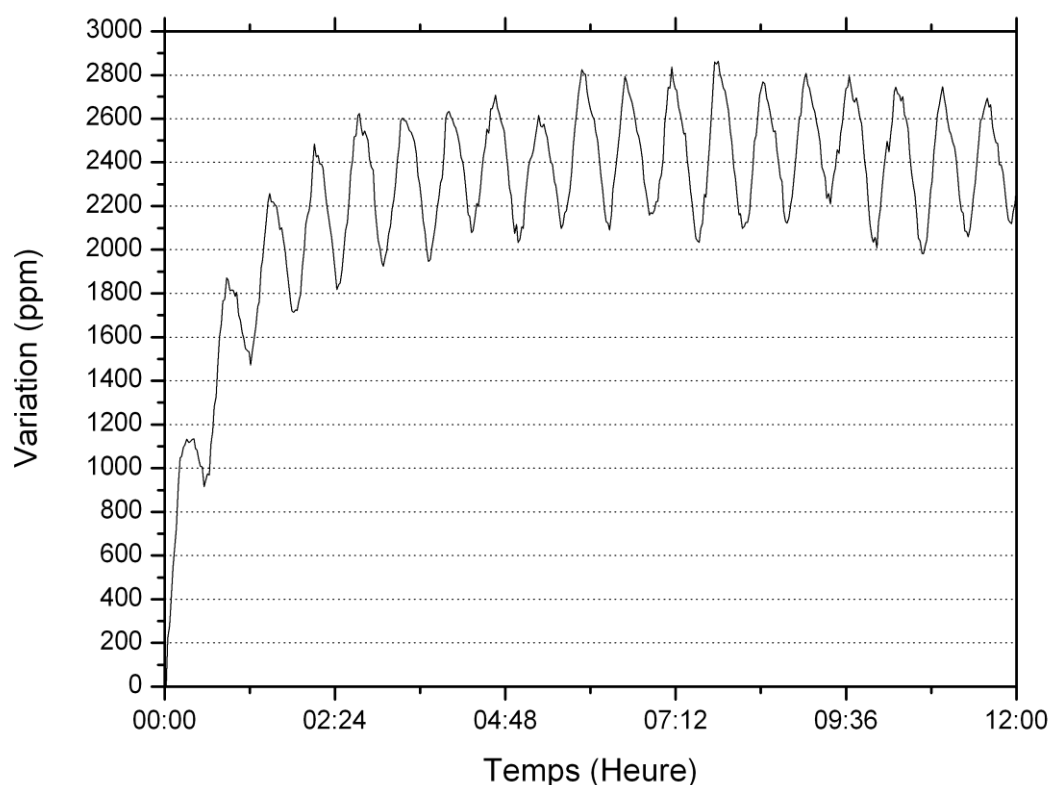


Figure 5-2 : Variation de résistance Poly-Si à la température de la salle grise

La Figure 5-2 présente le pourcentage de variation d'une résistance de Poly-Si sur une durée de 12 heures lorsque le dispositif et le montage de mesure sont placés dans la pièce. La mesure de la résistance oscille dans le temps avec une amplitude d'environ 850 ppm. Probablement due à la variation de la température de la pièce (Figure 5-3). En effet, la température varie d'environ 20.1 à 21.9 °C ce qui représente une différence allant jusqu'à 1.7 °C dans le pire des cas. Le période de régulation de la température de la pièce est de 45 min. Puisque cette erreur de 850 ppm n'est pas acceptable pour des tests de vieillissement représentant l'évolution de la résistance à haute température dans le temps, et qu'une mesure à la température pièce n'est pas envisageable, toutes les mesures sont prises dans le four à une température fixe de 25 °C avec une erreur de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

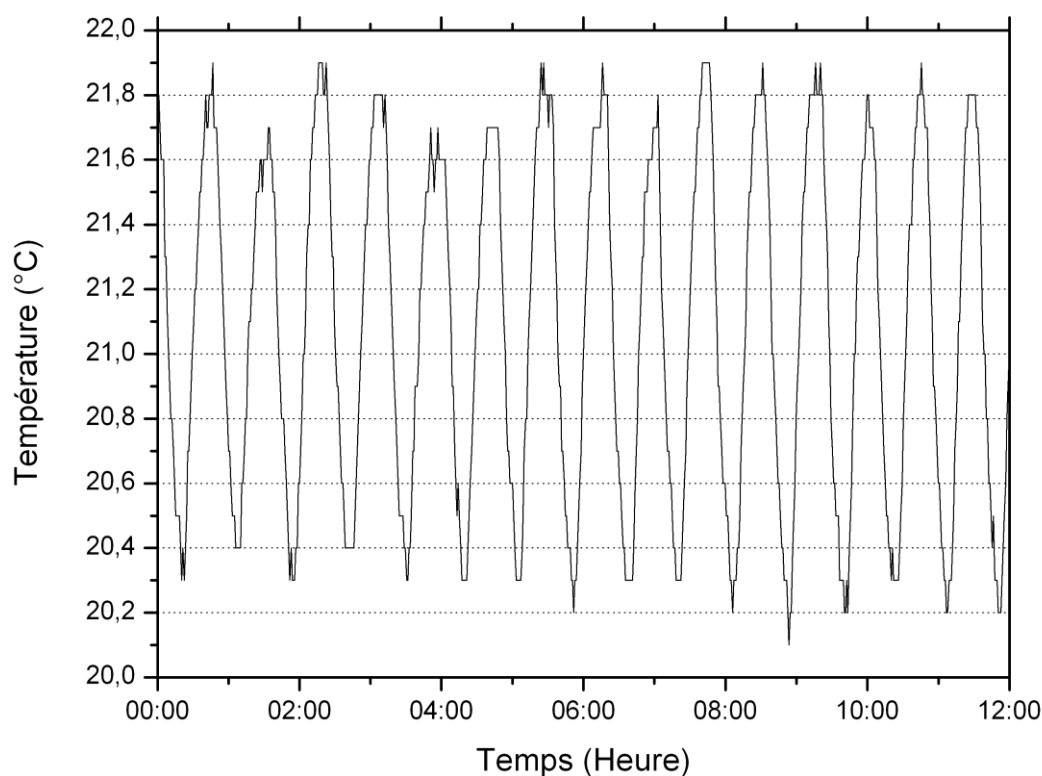


Figure 5-3 : Variation de la température de la salle grise

Sur la Figure 5-2, nous observons aussi la présence d'un régime transitoire au début de la prise de mesure qui est probablement dû à l'effet du courant traversant la résistance en entraînant un échauffement du composant jusqu'à atteindre un état d'équilibre.

De plus, une différence de mesure allant jusqu'à 500 ppm a été observée pour la même résistance lorsque les câbles de mesure sont déconnectés puis reconnectés du circuit via le PCB (Printed

Circuit Board). Lorsque le circuit est retiré du PCB puis remis pour une autre mesure, une erreur du même ordre de grandeur est constatée. Par conséquent, les mesures réalisées pendant toute la durée d'une analyse doivent être prises sans changer le montage de test, le PCB et les câbles de mesure, afin d'éviter des erreurs expérimentales.

Les circuits intégrés sont placés dans le four à une température de 25 °C sur les PCB et les câbles de mesure sont connectés en tout temps quelle que soit la température du four. Les tests de vieillissement sont réalisés à une haute température de 150 °C pendant une durée de 1 000 heures. Ces paramètres et la méthode de test ont été définis à l'aide du document JESD22-A103C de JEDEC Solid State Technology Association : *High Temperature Storage Life*.

Étant donné que le PCB et les câbles vont subir les mêmes tests que le circuit, un PCB a été spécialement conçu pour supporter une température de 150 °C, avec des connecteurs appropriés à cette caractéristique. Les câbles qui sont connectés sur le PCB (donc dans le four) sont en téflon et ne contiennent pas de connecteurs plastiques susceptibles de fondre ou de se dégrader à cette température.

Un autre test a été réalisé pour caractériser le vieillissement qui se produit à la température de la pièce. La Figure 5-4 représente la dérive relative d'une résistance modifiée par laser avec quatre impulsions de 300 ns pour une fluence de 0.33 J/cm². La résistance qui subit l'intervention laser à température de la pièce (20.5 à 22 °C), est placée immédiatement après dans le four à une température de 25 °C. Une mesure est prise toutes les minutes pendant 8 jours (192 heures). Nous constatons qu'un vieillissement se produit à une température de 25°C pour une résistance modifiée, qui peut atteindre 1 000 ppm à la fin de cette analyse.

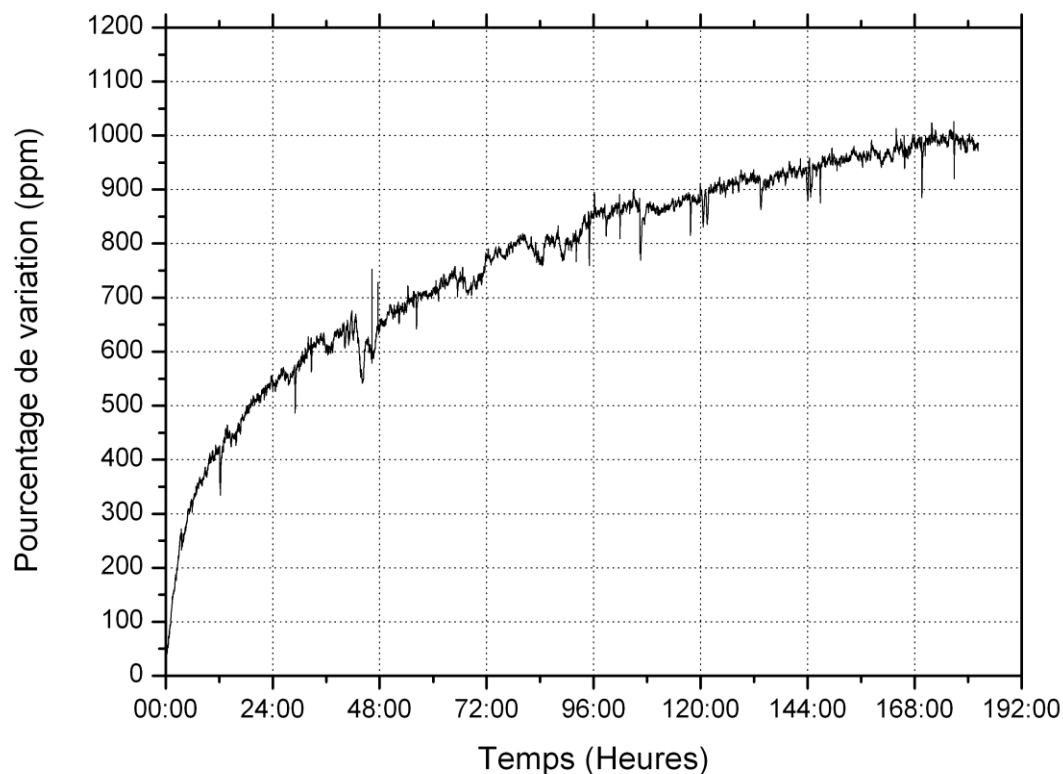


Figure 5-4 : Dérive d'une résistance modifiée par laser à 25 °C

5.3 Test de vieillissement des résistances de Poly-Si

Les tests de vieillissement ont été réalisés de manière à reproduire un échauffement prolongé d'une résistance modifiée par laser liée à une utilisation réelle du circuit. Tous les tests ont été réalisés à une température de 150 °C mais avec des temps de chauffage variables. Des mesures sont prises tout au long de l'expérience à différentes périodes à une température de 25 °C. Trois tests majeurs ont été réalisés afin d'observer l'influence de la fluence du laser, du nombre d'impulsions envoyées sur la résistance et du vieillissement des résistances de Poly-Si modifiées de 3 % par rapport à leur valeur initiale.

5.3.1 Effet de la fluence du laser

Pour réaliser une étude représentative et statistiquement valable, un grand nombre d'échantillons est nécessaire. Les résistances utilisées sont sur le circuit intégré et font partie du module LPSP pour permettre un meilleur contrôle de la modification des résistances. Nous disposons de 31 résistances, toutes identiques et situées sur le même circuit.

Pour étudier l'influence de la fluence laser utilisée pour la modification de résistance, les résistances ont toutes été modifiées à l'aide de 5 impulsions sans recouvrement (espacement de 3 μm entre deux traitements laser) d'une longueur de 300 ns pour des fluences variant de 0.22 à 0.48 J/cm². Sur les 31 échantillons, trois ne sont pas affectés par le laser et servent de référence. Le Tableau 5-1 montre la variation obtenue (en ppm) des résistances pour les 29 dispositifs modifiées par laser à différentes fluences.

Tableau 5-1 : Modification de résistances pour le test de vieillissement

<i>Fluence laser de 0.48 J/cm</i>					
	Résistance 1	Résistance 2	Résistance 3	Résistance 4	Moyenne
Variation	-72 752	-69 846	-78 856	-80 566	- 75 505
<i>Fluence de laser 0.44 J/cm</i>					
	Résistance 5	Résistance 6	Résistance 7	Résistance 8	Moyenne
Variation	-67 053	-66 582	-66 293	-67 906	- 66 958
<i>Fluence de laser 0.39 J/cm</i>					
	Résistance 9	Résistance 10	Résistance 11	Résistance 12	Moyenne
Variation	-56 142	-55 707	-59 061	-58 096	- 57 251
<i>Fluence de laser 0.35 J/cm</i>					
	Résistance 13	Résistance 14	Résistance 15	Résistance 16	Moyenne
Variation	-39 060	-33 882	-37 411	-43 419	- 38 443
<i>Fluence laser de 0.3 J/cm</i>					
	Résistance 17	Résistance 18	Résistance 19	Résistance 20	Moyenne
Variation	-25 734	-24 154	-25 982	-21 425	- 25 972
<i>Fluence de laser 0.26 J/cm</i>					
	Résistance 21	Résistance 22	Résistance 23	Résistance 24	Moyenne
Variation	-11 904	-11 611	-12 103	-14 364	- 12 495
<i>Fluence de laser 0.22 J/cm</i>					
	Résistance 25	Résistance 26	Résistance 27	Résistance 28	Moyenne
Variation	-778	-757	-1 146	-1 504	- 1 046

Ce test de vieillissement a une durée totale de 1 080 heures mais le temps de chauffage du circuit à 150 °C est de 1 006 heures. Les 74 heures restantes représentent la durée totale où le four est à 25 °C pour effectuer les mesures.

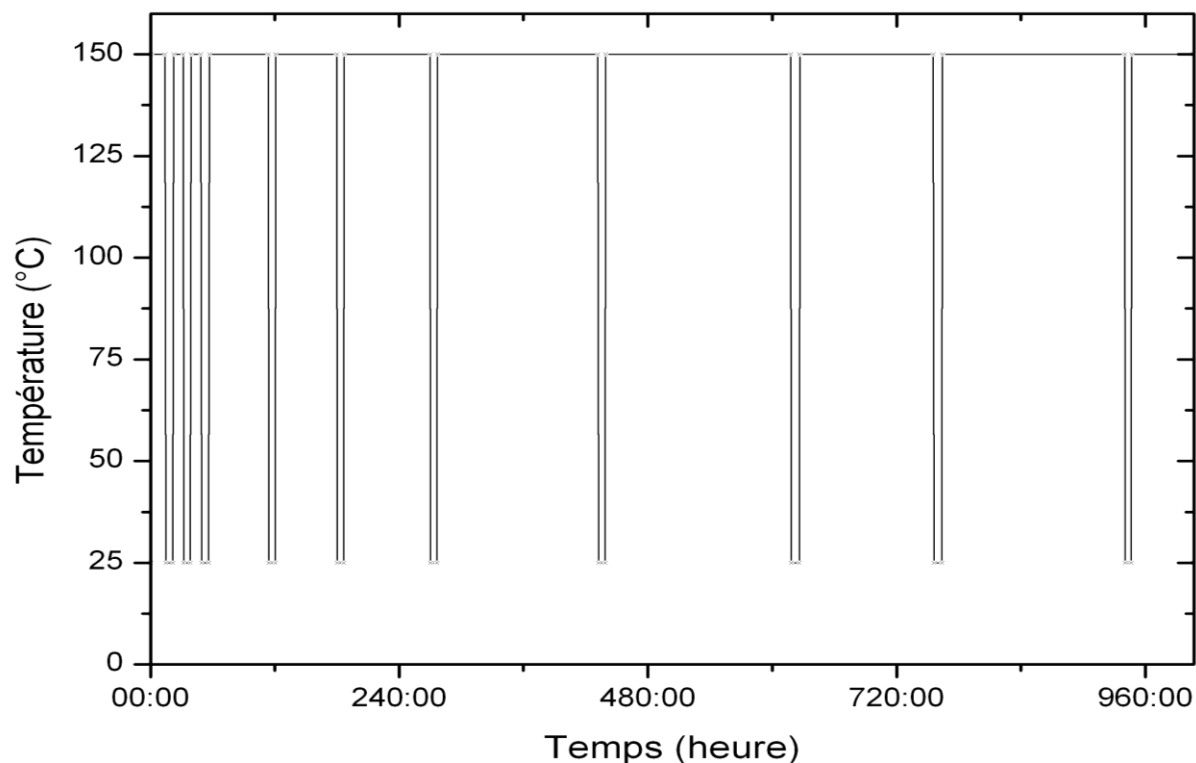


Figure 5-5 : Cycle de chauffage du test de vieillissement

La Figure 5-5 représente le cycle de chauffage qui a été utilisé pour le test de vieillissement. Notons que des mesures plus rapprochées (tous les jours pendant quatre jours) ont été réalisées car normalement, au début du chauffage, nous pouvons observer des changements significatifs. En moyenne, le temps à 25 °C nécessaire pour faire une mesure des 31 échantillons est d'environ 6 heures.

En observant la Figure 5-6 qui présente la dérive relative dans le temps à haute température de plusieurs résistances qui ont été traitées par laser à une fluence de 0.3 J/cm², nous pouvons constater que le vieillissement est quasi identique pour les trois résistances modifiées avec des paramètres laser identiques. Ceci permet de confirmer que des résistances modifiées par laser avec les mêmes conditions expérimentales évoluent dans le temps du même ordre de grandeur. La dérive totale de la résistance après 1 000 h d'exposition à 150 °C est d'environ $13\,900 \pm 520$ ppm.

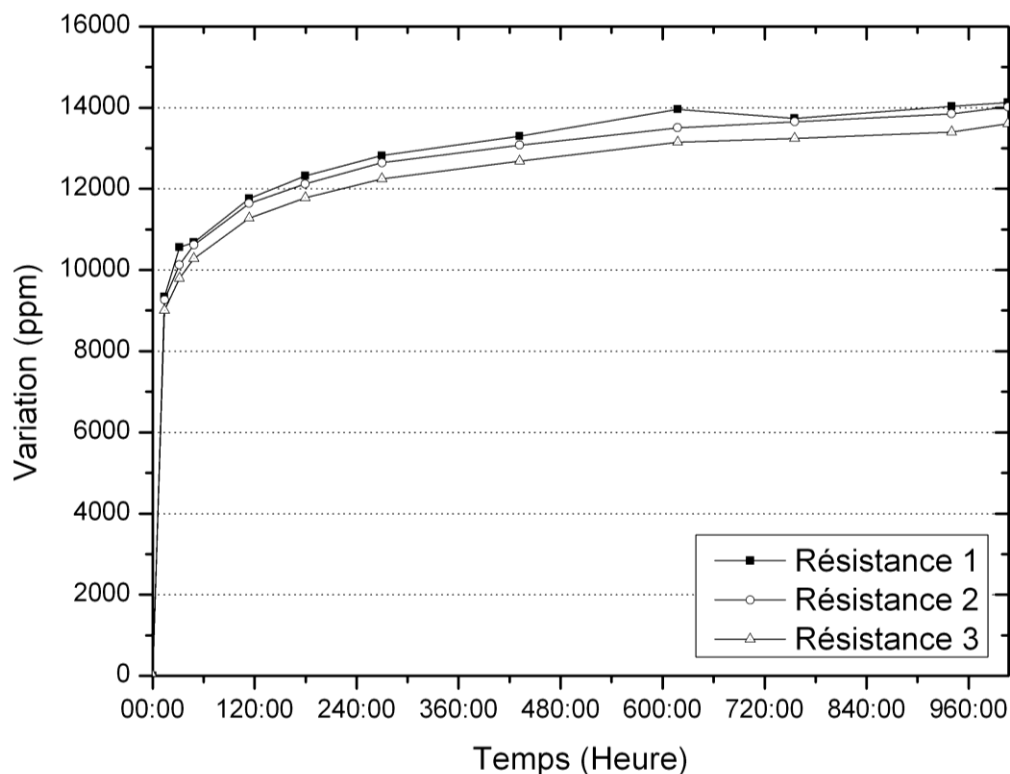


Figure 5-6 : Dérive relative de résistances chauffée à 150 °C pour une fluence de 0.3 J/cm²

La Figure 5-7 montre la dérive relative de plusieurs résistances modifiées par laser à différentes fluences pour une durée de 1 000 h à 150 °C. Pour chacune des fluences, la moyenne des quatre résistances traitées dans les mêmes conditions est représentée. Remarquons que pour l'ensemble des résistances modifiées et non modifiées par laser, le vieillissement le plus important se produit au début du chauffage avant 270 heures, puis par la suite l'évolution des échantillons devient plus lente.

Constatons aussi que des résistances modifiées par laser avec cinq impulsions, pour des fluences variant de 0.3 à 0.48 J/cm², ont un vieillissement quasi identique avec une différence maximale de 1 250 ppm. Cela signifie que quelque soit la fluence utilisée et le pourcentage de variation total de la modification de résistance Poly-Si, le vieillissement est identique. Par conséquent, il est possible de modifier une résistance sans se préoccuper de la dérive du composant dans le temps étant donné que celle-ci est uniforme lorsqu'une fluence supérieure à 0.3 J/cm² est utilisée. Pour des fluences de 0.22 et 0.26 J/cm², l'évolution totale dans le temps des résistances est 1.75 fois plus faible que pour des fluences plus hautes. Ceci est probablement dû à la surface modifiée

sur la résistance qui est moins importante à cause de la zone affectée par le laser qui est plus faible.

Une résistance non modifiée par laser présente une dérive totale de 4 750 ppm, ce qui est bien inférieur à celle des autres résistances qui peuvent atteindre 15 000 ppm.

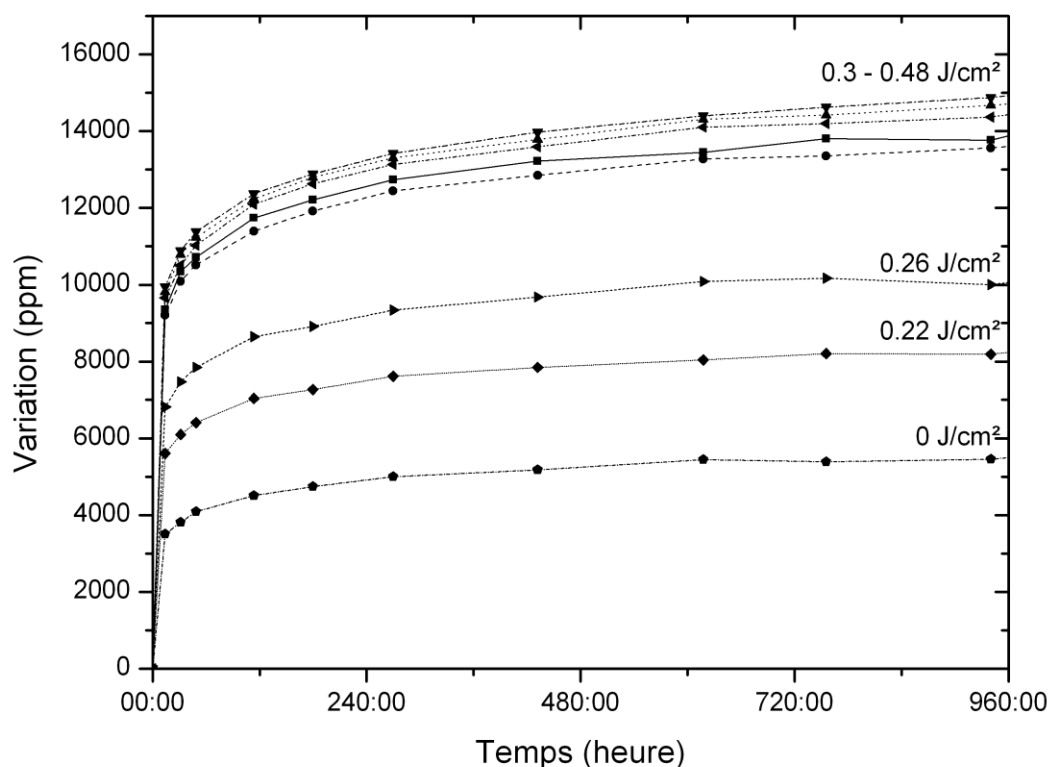


Figure 5-7 : Dérive relative en ppm de résistances Poly-Si dans le temps pour des fluences variant de 0.22 J/cm² à 0.48 J/cm²

La Figure 5-8 montre la dérivée de la variation en ppm/heure des résistances modifiées pour des fluences variant de 0.22 J/cm² à 0.48 J/cm² en fonction temps. Sur cette figure, nous pouvons observer aisément qu'à chaque intervalle de temps l'évolution de la variation par heure et constater que la valeur de la variation est inférieure à 5 ppm/h après 180 heures de chauffage et tend à se stabiliser et devenir de plus en plus faible.

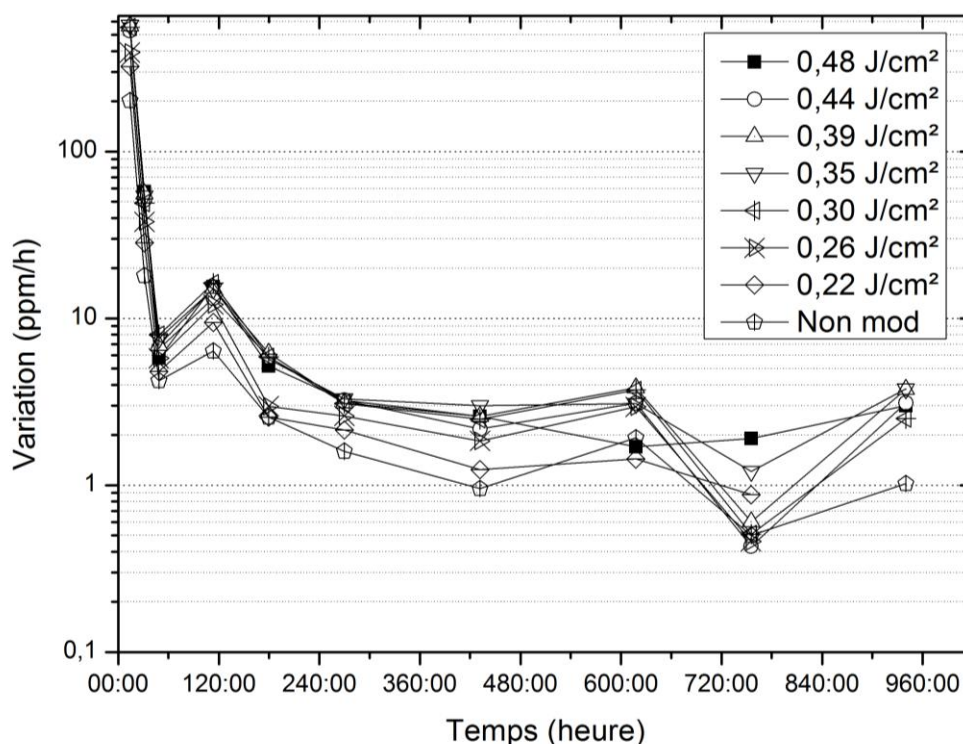


Figure 5-8 : Dérivée de la variation en ppm par heure pour des fluences variant de 0.22 J/cm² à 0.48 J/cm²

5.3.2 Effet du nombre d'impulsions

Dans l'analyse précédente, le nombre d'impulsions était constant et la fluence sur l'échantillon variait de 0.24 à 0.41 J/cm². Nous avons constaté que pour des fluences entre 0.3 et 0.48 J/cm², le vieillissement est quasi-identique. De plus, la grande majorité (~ 72 %) de la dérive de la résistance dans le temps se produit en moins de 14 h.

Dans la prochaine expérience, nous nous intéressons au nombre d'impulsions utilisées pour modifier les résistances de Poly-Si. Un nombre moins important d'échantillons est utilisé contrairement à précédemment. Nous disposons de 12 résistances de Poly-Si identiques faisant partie du module LPSP pour un meilleur contrôle de la modification. Parmi ces dispositifs, 9 sont traités par laser avec une fluence variant de 0.44 à 0.26 J/cm², une seule impulsion de 300 ns est envoyée sur chaque résistance. Les trois résistances restantes ne sont pas modifiées par laser. De plus, un plus grand nombre de mesures ont été effectués avant les 14 premières heures pour

observer au bout de combien de temps les résistances atteignent la majeure partie du vieillissement.

Le Tableau 5-2 présente la variation des résistances Poly-Si modifiées après l'intervention par laser. Étant donné que la fluence varie et que seulement une impulsion est utilisée, la variation totale de la résistance est différente pour chaque dispositif.

Tableau 5-2 : Variation totale des résistances modifiées avec une seule impulsion de 300 ns

<i>Fluence laser de 0.41 J/cm</i>			
	Résistance 1	Résistance 2	Résistance 3
Variation (ppm)	-8159	-7877	-7264
<i>Fluence de laser 0.33 J/cm</i>			
	Résistance 4	Résistance 5	Résistance 6
Variation (ppm)	-1643	-2584	-2973
<i>Fluence de laser 0.24 J/cm</i>			
	Résistance 7	Résistance 8	Résistance 9
Variation (ppm)	-296	-237	-191

Ce test de vieillissement a une durée totale de 480 heures mais le temps de chauffage du circuit à 150 °C n'est que d'environ 100 heures, sachant que la dérive de la résistance évolue très lentement après cette période.

La Figure 5-9 présente le cycle de chauffage utilisé pour cette analyse. Étant donné que nous souhaitons faire une analyse avec des temps rapprochés, la mesure des différentes résistances est prise après une heure de chauffage à 150 °C puis le circuit reste à 25 °C le temps de stabiliser la température de l'échantillon et la prise de mesure, ce qui représente environ une journée. Ceci explique l'écart d'environ 24 h entre chaque prise de mesure. Sept mesures sont prises après un chauffage de 1 h, puis pour observer plus rapidement l'évolution totale de la résistance, la durée de l'exposition à 150°C augmente de 10 h puis de 20 h.

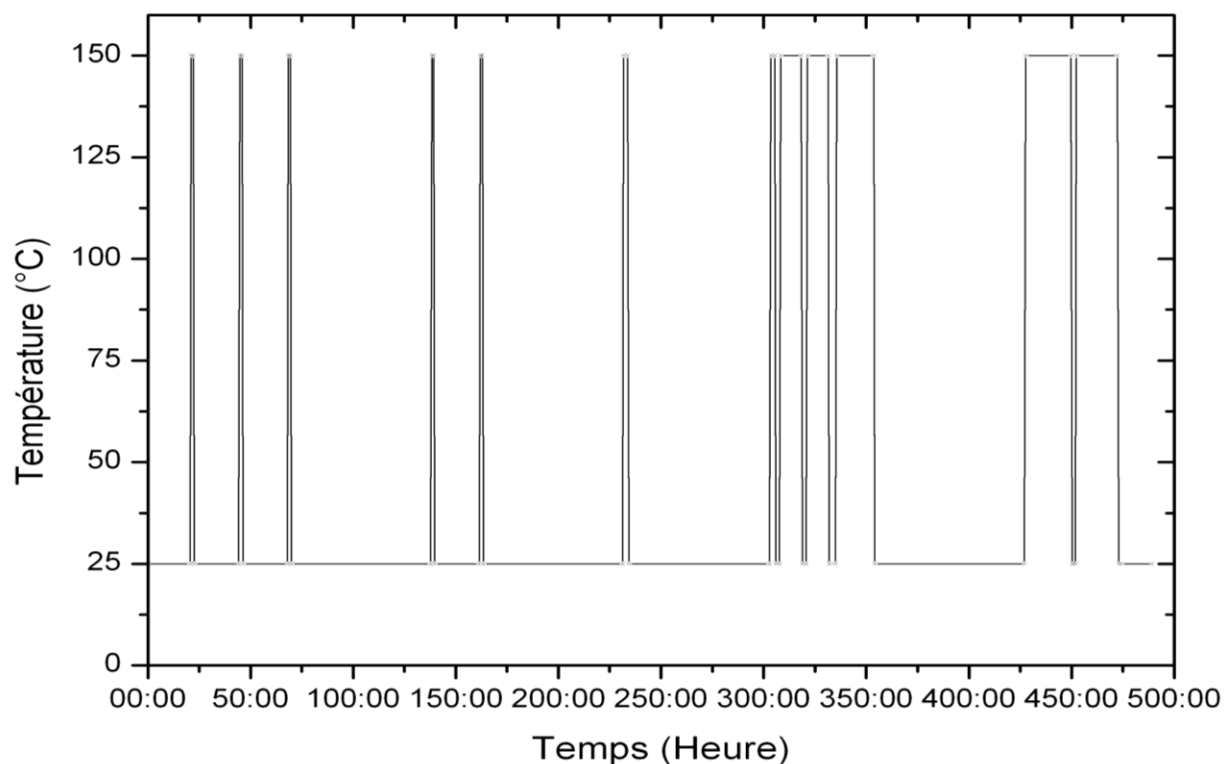


Figure 5-9 : Cycle de chauffage du test de vieillissement

La Figure 5-10 représente la dérive relative des résistances de Poly-Si modifiées par laser avec une fluence 0.33 J/cm^2 en fonction du temps de chauffage. La variation relative totale n'est pas exactement identique pour des résistances modifiées dans les mêmes conditions, mais la différence entre chacune d'elle est au maximum de 300 ppm. De plus, la dérive relative des dispositifs n'est pas aussi stable que pour le cas précédent (Figure 5-6), probablement dû au cycle rapide et fréquent de chauffage qui influence très fortement la stabilité des résistances.

Par contre, il est important de constater que la majeure partie ($\sim 87 \%$) du vieillissement pour les résistances de Poly-Si se produit en moins de 1 h de chauffage à 150°C .

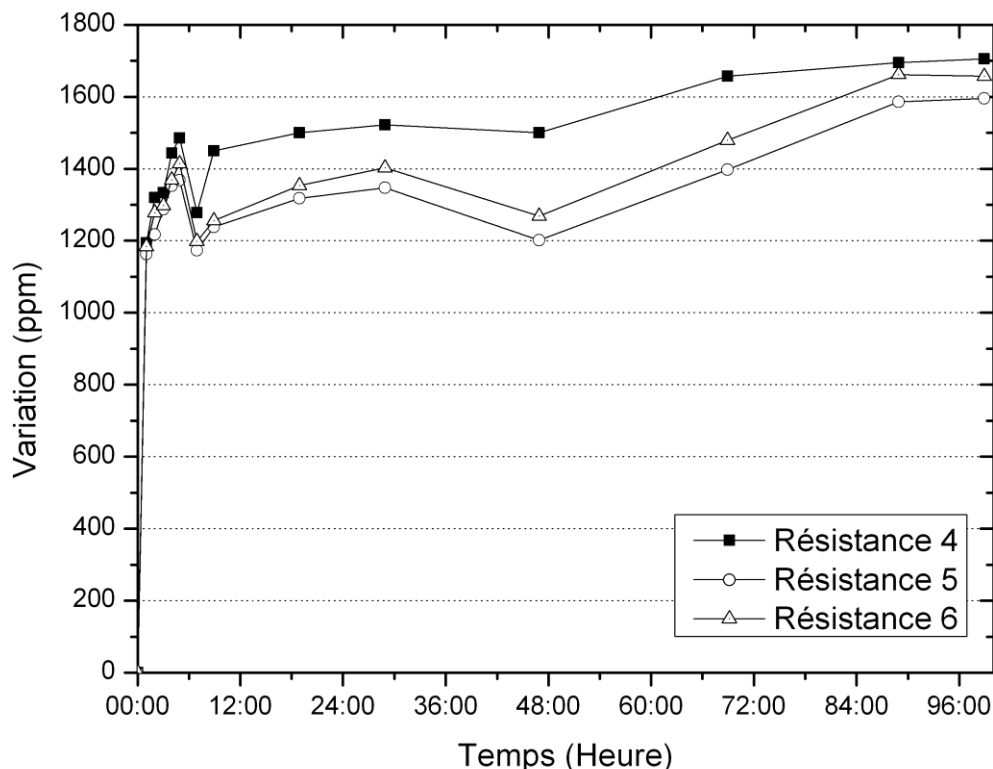


Figure 5-10 : Dérive de trois résistances Poly-Si pour une fluence de 0.33 J/cm²

La Figure 5-11 représente le vieillissement de l'ensemble des résistances de Poly-Si modifiées à l'aide d'une seule impulsion de 300 ns pour des fluences de 0.24, 0.33 et 0.41 J/cm². Le temps total de chauffage est de 100 heures. Chaque caractéristique représente la moyenne des résistances modifiées par laser dans les mêmes conditions expérimentales et celles non traitées par laser. Constatons que pour l'ensemble des résistances, la variation n'est pas stable dû au cycle de chauffage comme mentionné précédemment.

Rappelons que sur la Figure 5-7, les résistances de Poly-Si ont été modifiées à l'aide de 5 impulsions laser pour différentes fluences. En comparant cette figure à la Figure 5-11, le vieillissement est environ 6 fois plus faible pour une résistance traitée avec seulement une impulsion, suggérant que le principal paramètre influençant le vieillissement pour des résistances de Poly-Si modifiées par laser est le nombre d'impulsions. On peut en conclure que chaque impulsion apporte une contribution presque égale, puisque la distance entre chaque impulsion est suffisante pour que les modifications locales ne se chevauchent pas.

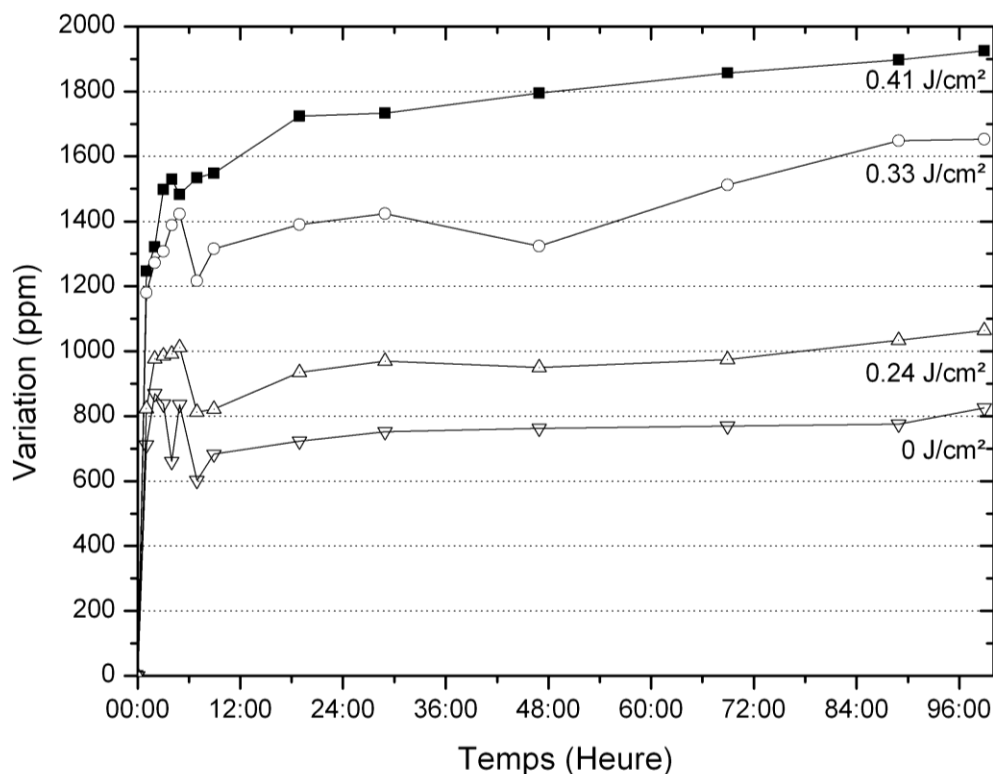


Figure 5-11 : Dérive relative des résistances de Poly-Si pour plusieurs fluences

Deux conclusions peuvent être tirées de ces résultats. Premièrement, la majeure partie du vieillissement des résistances Poly-Si modifiées par laser se produit en moins de 1 heure, ce qui présente un avantage au niveau industriel, car il est possible d'obtenir une valeur finale et stable au bout de seulement 1 heure de vieillissement dans un four. De plus, pour que la valeur d'une résistance modifiée soit stable dans le temps, il est préférable d'utiliser un nombre d'impulsions limité, afin de réduire la surface modifiée du Poly-Si.

5.3.3 Effet d'une modification de 3% sur des résistances de Poly-Si

L'objectif de l'utilisation de la technique laser proposée est de modifier la valeur de la résistance pour qu'elle atteigne la valeur souhaitée. Pour ce faire, on peut utiliser plusieurs impulsions à relativement faibles fluences ou quelques impulsions à fortes fluences. Le but de cet étude est de déterminer laquelle de ces approches donne les résistances les plus stables. Ce test de vieillissement est réalisé sur des résistances diminuées d'une valeur fixe de 3 %. La fluence du laser a été variée de 0.27 à 0.36 J/cm², et le nombre d'impulsions a été adapté pour obtenir une modification d'environ 3 %.

Pour réaliser cette expérience, 16 résistances de Poly-Si sont utilisées dont 3 non modifiées par laser. Les 13 résistances restantes sont traitées avec des impulsions de 300 ns sans recouvrement, pour des fluences variables, jusqu'à atteindre une modification totale d'environ 3 % de la résistance initiale. Le 3 % a été atteint de façon approximative, aucun ajustement fin n'étant réalisé. Ceci a entraîné une erreur allant jusqu'à 0.38 %. Le Tableau 5-3 présente le nombre d'impulsions nécessaires pour atteindre une diminution d'environ 3 % de la résistance pour les différentes fluences. Notons que le nombre d'impulsions n'est pas identique pour les résistances traitées par laser avec les mêmes paramètres. Ceci est dû à la différence du point focal de la caméra CCD sur l'échantillon et donc du point focal laser. Pour une fluence de 0.36 J/cm², 0.31 J/cm² et 0.27 J/cm² environ 4, 5-6 et 12 impulsions sont respectivement nécessaires pour atteindre 3 % de modification.

Tableau 5-3 : Variation totale des résistances modifiées

<i>Fluence laser de 0.36 J/cm</i>					
	Résistance 1	Résistance 2	Résistance 3	Résistance 4	Résistance 5
Variation (ppm)	-32146	-32562	-33140	-31814	-29630
<i>Fluence de laser 0.31 J/cm</i>					
	Résistance 6	Résistance 7	Résistance 8	Résistance 9	Résistance 10
Variation (ppm)	-27412	-28904	-28015	-33808	-30878
<i>Fluence de laser 0.27 J/cm</i>					
	Résistance 11	Résistance 12	Résistance 13		
Variation (ppm)	-29218	-28952	-31585		

Le cycle de chauffage utilisé pour cette expérience est représenté à la Figure 5-12. La durée de l'analyse est de 1 080 heures mais le temps de chauffage des résistances à 150 °C est de 1 002 heures. Étant donné qu'avec les expériences précédentes, l'évolution de la dérive de la résistance en fonction du temps est connue, les mesures ont été prises à des intervalles de temps plus grands mais un peu plus rapprochés au début de chauffage, afin de détailler les modifications rapides du début du vieillissement.

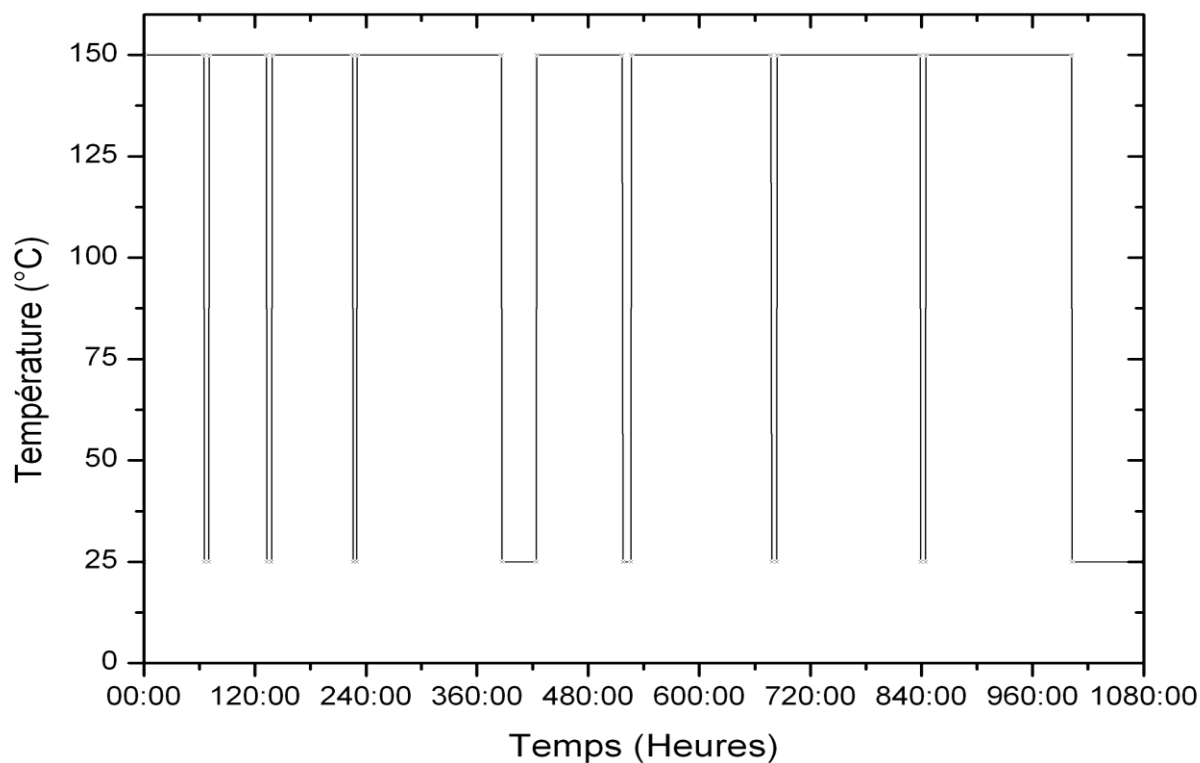


Figure 5-12: Cycle de chauffage des résistances modifiées à 3%

La Figure 5-13 présente la dérive relative de résistances de Poly-Si diminuées de 3 % dans le temps pour des fluences variables. Le même phénomène que précédemment est observé, c'est-à-dire que la majeure partie du vieillissement se produit en moins de 64 h dans ce cas et que l'évolution devient lente et tend à se stabiliser par la suite. Cependant, il est important de remarquer que pour une fluence de 0.31 et 0.36 J/cm², la dérive totale est de 13 000 ppm alors que pour une fluence de 0.27 J/cm² qui requière environ trois fois plus impulsions, la dérive est de 17 500 ppm.

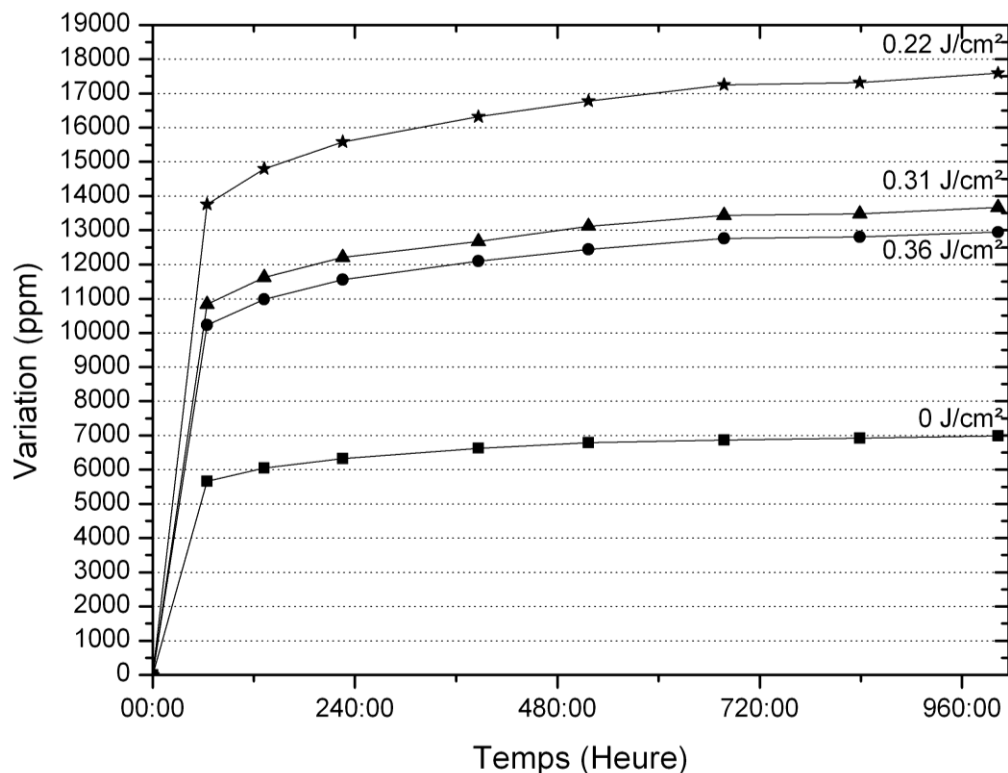


Figure 5-13 : Dérive relative de résistances de Poly-Si pour différentes fluences

De plus, ce phénomène s'accroît dans le temps car à chaque fois qu'une mesure est prise, la variation relative par rapport à la mesure précédente est toujours plus importante pour une fluence de 0.27 J/cm² en comparaison avec les fluences plus hautes (moins d'impulsion). Ceci peut être observé aisément sur la Figure 5-14 5.14 qui représente la dérivée de la variation par heure des résistances de Poly-Si non modifiées et des résistances traitées pour des fluences variant de 0.27 J/cm² à 0.36 J/cm².

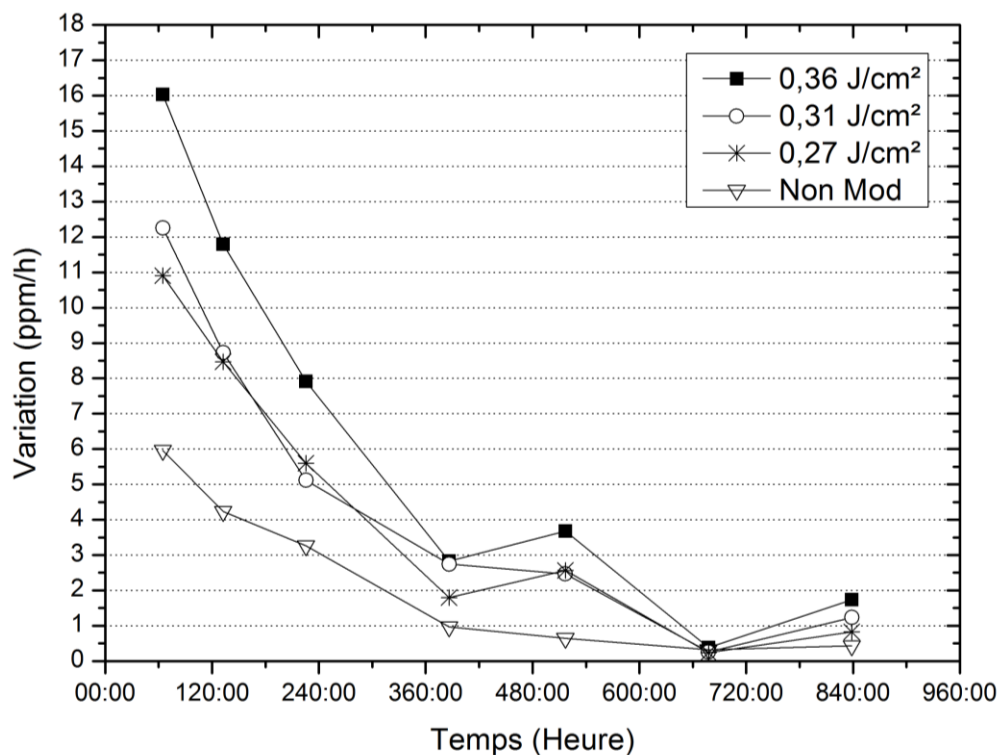


Figure 5-14 : Dérivée de la variation en ppm par heure pour des résistances modifiées à 3 %

En se basant sur tous les résultats, on peut conclure que pour limiter la dérive des dispositifs modifiés par laser, il faut réduire le nombre d'impulsions le plus possible et augmenter la fluence jusqu'à des valeurs de 0,33 J/cm². De plus, le fait que la majeure partie du vieillissement se produise en moins d'une heure est un grand avantage pour cette technique de modification

CHAPITRE 6 MODÉLISATION ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, les résultats de variations de résistances et leur stabilité seront comparés à la littérature et plus particulièrement aux résistances de Poly-Si ajustées par impulsions de courant, car cette technique est celle qui se rapproche le plus de la méthode de modification par laser.

6.1 Modification de résistances de Poly-Si par laser

6.1.1 Mécanismes influençant la modification de résistance de Poly-Si

La technique d'ajustement de résistances Poly-Si qui s'approche le plus de la méthode de modification par laser est celle modifiant ce matériau fortement dopée par impulsions de courant.

Les différents phénomènes pouvant expliquer la modification de la valeur électrique de résistances de Poly-Si ont été développés par (Feldbaumer, 1995). Plusieurs mécanismes sont répertoriés comme la taille des grains, la ségrégation des dopants, la réduction de la hauteur de la barrière de potentiel, la migration d'aluminium provenant des contacts.

Avec la technique de modification par impulsions de courant, une migration d'atomes d'aluminium vers la résistance de Poly-Si est observée car l'impulsion de courant traverse les contacts de métal et engendre un déplacement des atomes d'aluminium, ce qui n'est évidemment pas le cas pour une modification par laser car le traitement laser est très localisé sur la surface de Poly-Si.

La hauteur de la barrière de potentiel peut être réduite par la présence de pièges au niveau des joints de grains. Ces pièges peuvent capturer des porteurs libres et créer une conduction au niveau des grains. Cependant, ce phénomène n'est pas majeur et ne permet pas d'expliquer la décroissance de la valeur des résistances. Pour un composant dopé, l'abaissement de la barrière de potentiel dû à la concentration de pièges n'est pas suffisant (moins une dizaine de meV) pour engendrer une variation significative de la valeur de la résistance.

Un changement dans la taille des grains pourrait expliquer la variation de la valeur de résistances de Poly-Si. Cependant, en se basant sur une analyse par AFM, (Chateaufneuf, 2008) conclut que la variation de la taille des grains suite à un traitement laser n'est pas significative lorsque la fluence choisie est inférieure à la fluence seuil de fonte du Poly-Si.

En regroupant les analyses faites par (Feldbaumer,1995) et (Chateaneuf, 2008) avec les observations rapportées dans ce mémoire, il semble que le phénomène prépondérant engendrant la diminution de la valeur de résistances de Poly-Si est la réduction de la taille des joints de grains. En effet à partir de l'analyse Raman de la section 3.2, il a été observé qu'une cristallisation du Poly-Si survenait de manière plus ou moins importante en fonction de la fluence du laser. Le passage d'un silicium polycristallin vers un silicium cristallin entraîne probablement une diminution de la taille des joints grains. En effet, comme les joints de grains ont une structure désordonnée, ils sont plus sensibles au changement de température apporté par le laser, ce qui provoque un réarrangement des atomes et donc une réduction des joints de grains. Ce phénomène est représenté schématiquement à la Figure 6-1 de (Feldbaumer, 1995).

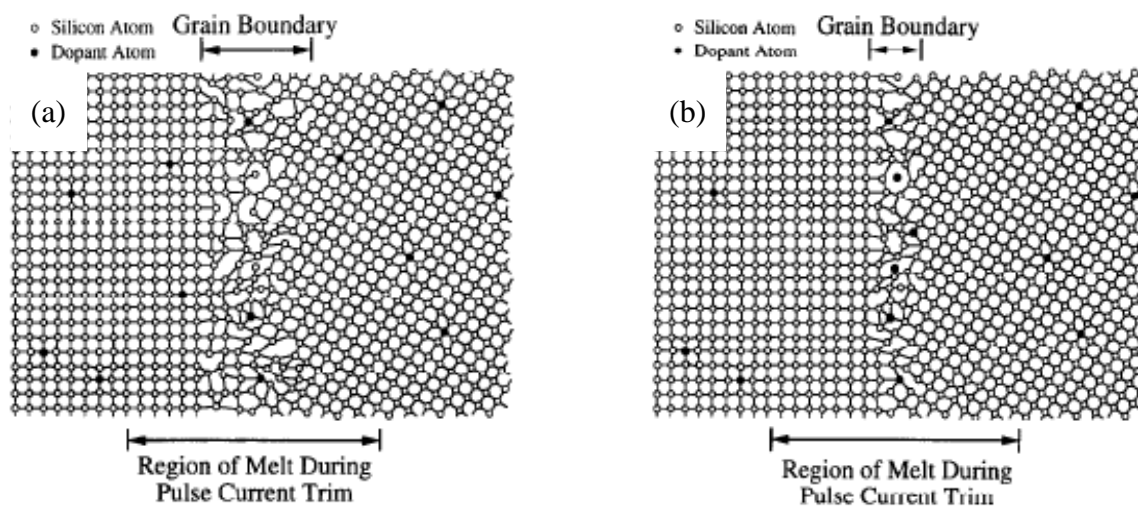


Figure 6-1 : (a) Joints de grains avant la modification de résistances ; (b) Joints de grains après la modification de résistances

6.1.2 Schéma équivalent de la modification de résistances de Poly-Si

Étant donné que la modification de résistances de Poly-Si par laser est reproductible, contrôlée et linéaire, il est possible de trouver un schéma électrique équivalent pour prédire théoriquement la fluence et le nombre d'impulsions nécessaires pour atteindre une valeur désirée.

La surface de Poly-Si des résistances non modifiées par laser est représentée électriquement par la mise en série de plusieurs résistances. Chaque résistance représente la portion de la surface de Poly-Si pouvant être modifiée par le laser. Le schéma équivalent est représenté à la Figure 6-2.

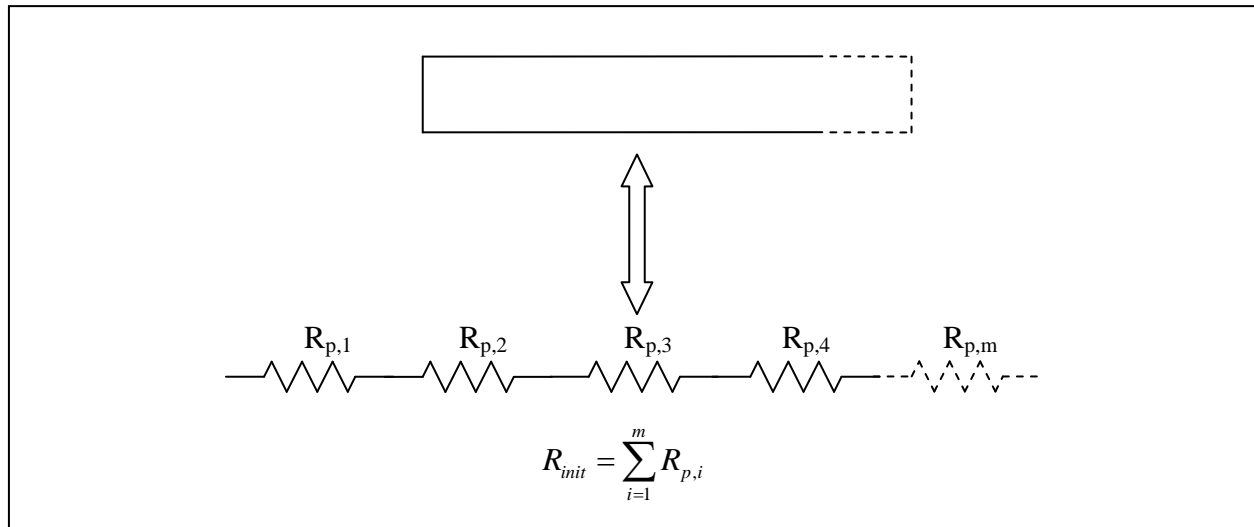


Figure 6-2 : Modèle électrique d'une surface de Poly-Si

Le nombre m de résistances dépend de la taille du faisceau laser et de la longueur des résistances de Poly-Si utilisées. Lorsqu'une impulsion est envoyée sur la surface, la zone affectée est modélisée par une modification de la valeur d'une seule résistance R_p .

Pour établir le schéma électrique équivalent, l'hypothèse faite est qu'une impulsion laser est modélisée par l'ajout d'une résistance en parallèle à la résistance R_p existante comme représenté à la Figure 6-3. Le modèle proposé considère le cas où une seule impulsion est appliquée à chaque endroit. De plus, les impulsions laser sont appliquées avec une séparation suffisante pour éviter toute influence des changements apportés par une impulsion sur ceux apportés par les autres.

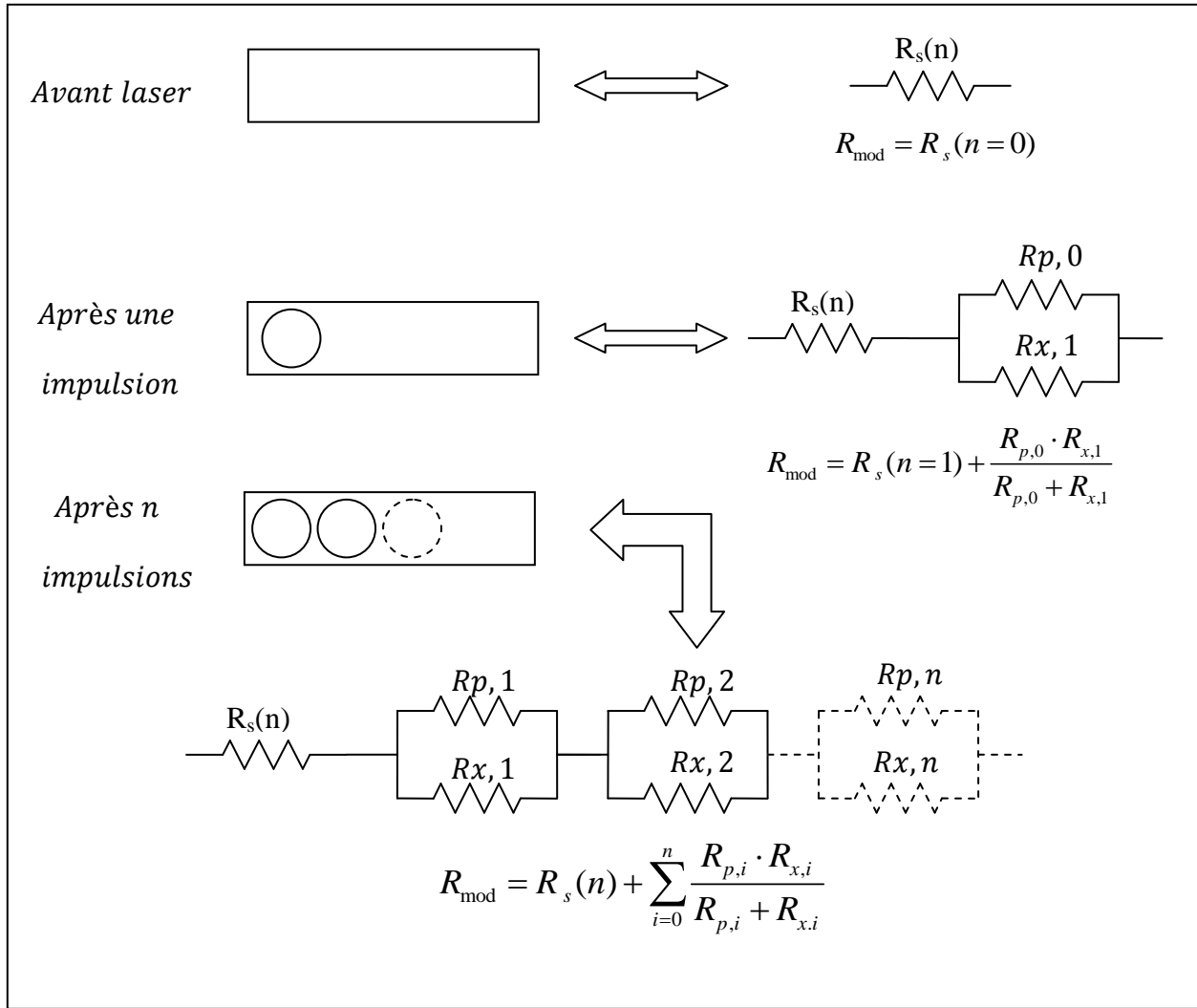


Figure 6-3 : Modélisation électrique de la modification de résistances par laser pour plusieurs impulsions avec déplacement du faisceau laser.

La résistance en série R_s dépend du nombre n d'impulsions utilisées et représente la surface de la résistance de Poly-Si non modifiée.

$$R_s(n) = R_{\text{init}} - nR_p \quad (6.1)$$

où R_{init} représente la résistance initiale (non modifiée).

La résistance R_p représente une portion de la surface de Poly-Si modifiée par laser.

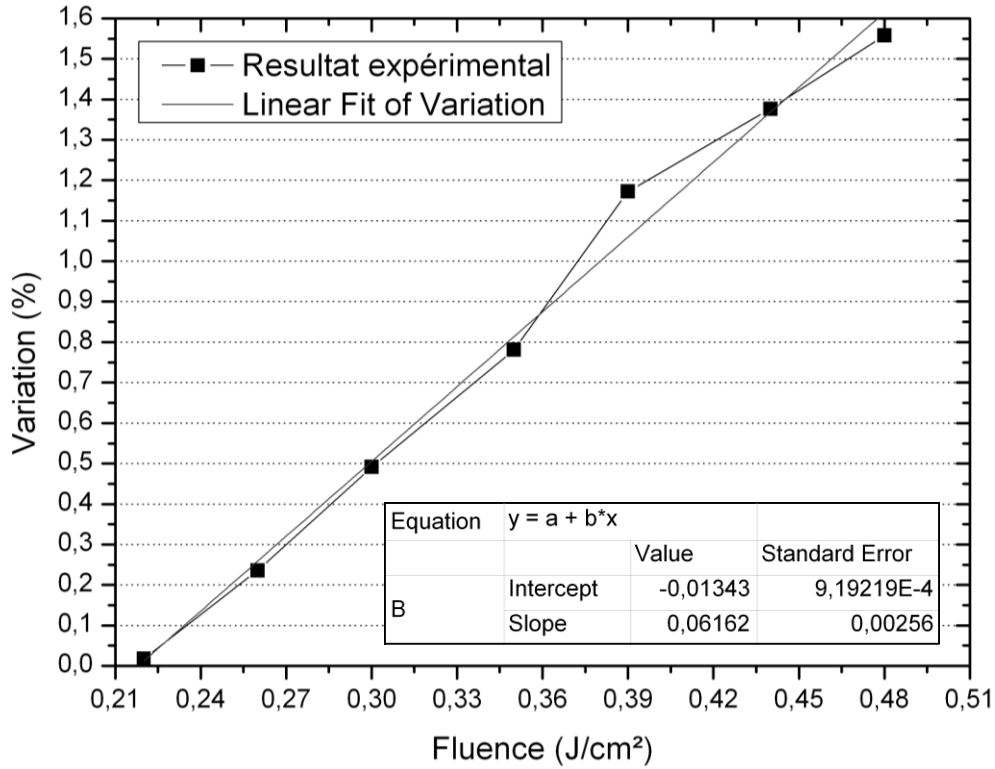


Figure 6-4 : Variation de résistances de Poly-Si pour plusieurs fluences à l'aide d'une impulsion de 300 ns

La Figure 6-4 représente la variation de résistance de Poly-Si pour une impulsion de 300 ns et une fluence variant de 0.22 à 0.48 J/cm². Cette courbe peut être approximée par une droite d'équation $y = ax + b$. Pour cette courbe, l'équation représentant la variation de la résistance en fonction de la fluence est :

$$f(F) = 0.0616F - 0.0134 \quad (\Omega \text{cm}^2 / J) \quad (6.2)$$

Pour un nombre n d'impulsions avec déplacement du faisceau laser, la valeur de la résistance modifiée R_{mod} est définie par :

$$R_{mod} = R_s(n) + n \frac{R_p \cdot R_x}{R_p + R_x} \quad (6.3)$$

où R_x représente la résistance ajoutée en parallèle à la portion affectée par le laser.

Pour $n = 1$, en utilisant l'équation (6.2), on obtient :

$$R_{equ} = R_p // R_x = R_p [1 - (m-1)f(F)] \quad (6.4)$$

Donc

$$R_x = R_p \cdot \frac{1 - (m-1)f(F)}{(m-1)f(F)} \quad (6.5)$$

Pour n impulsions identiques, la résistance modifiée de Poly-Si en fonction de la fluence et du nombre n est donnée par :

$$R_{\text{mod}} = R_s(n) + n \cdot \frac{R_p \cdot R_x}{R_p + R_x} \quad (6.6)$$

$$R_{\text{mod}} = \frac{R_{\text{init}}}{m} \cdot \left\{ (m-n) + n \left[1 - (m-1)f(F) \right] \right\} \quad (6.7)$$

La Figure 6-5 compare les données expérimentales et les résultats de l'équation (6.7) et des résistances modifiées à une fluence de 0.26 J/cm² et une impulsion de 300 ns. Pour trois résistances différentes dont on connaît la valeur initiale (non modifiée), la courbe résultant de l'équation est très proche des résultats expérimentaux. L'erreur maximale entre la courbe théorique et expérimentale est de 1 550 ppm, et la moyenne est de 844 ppm. Cette valeur est proche de l'erreur qui peut se produire lors d'une modification de résistance par laser donc il est possible de prédire avec une bonne précision la valeur finale de la résistance en fonction du nombre d'impulsions.

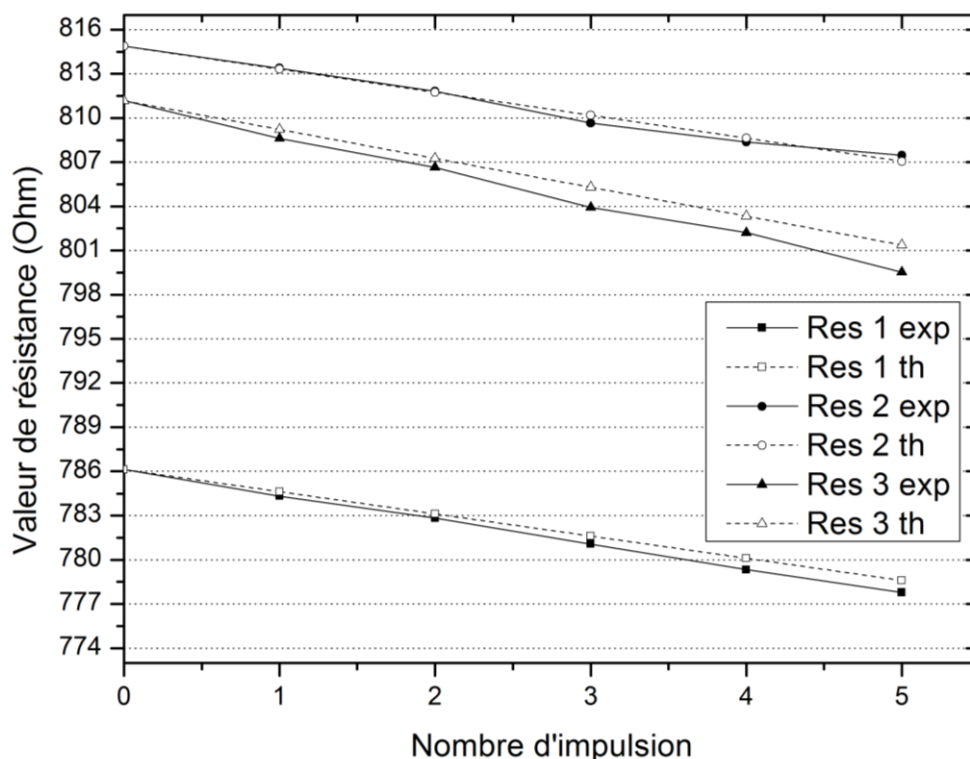


Figure 6-5 : Comparaison de la variation expérimentale et la prédiction théorique pour plusieurs résistances à une fluence de 0.26 J/cm^2

La Figure 6-6 présente la comparaison les données expérimentales et la prédiction théorique pour différentes résistances modifiées à des fluences variant de 0.2 à 0.44 J/cm^2 et une impulsion de 300 ns . Lorsque la fluence seuil de fonte du Poly-Si est atteinte (0.33 J/cm^2), l'erreur entre la courbe théorique et expérimentale peut atteindre $2\,470 \text{ ppm}$ (fluence de 0.44 J/cm^2) alors qu'en dessous de la fluence seuil, l'erreur maximale est de $1\,550 \text{ ppm}$ (fluence de 0.26 J/cm^2). Ce résultat n'est pas surprenant car il a déjà été observé à la section 4.2.1 que lorsque la fluence de seuil de fonte du Poly-Si est atteinte, la modification de la résistance est plus difficilement prévisible et l'évolution de celle-ci n'est plus totalement linéaire.

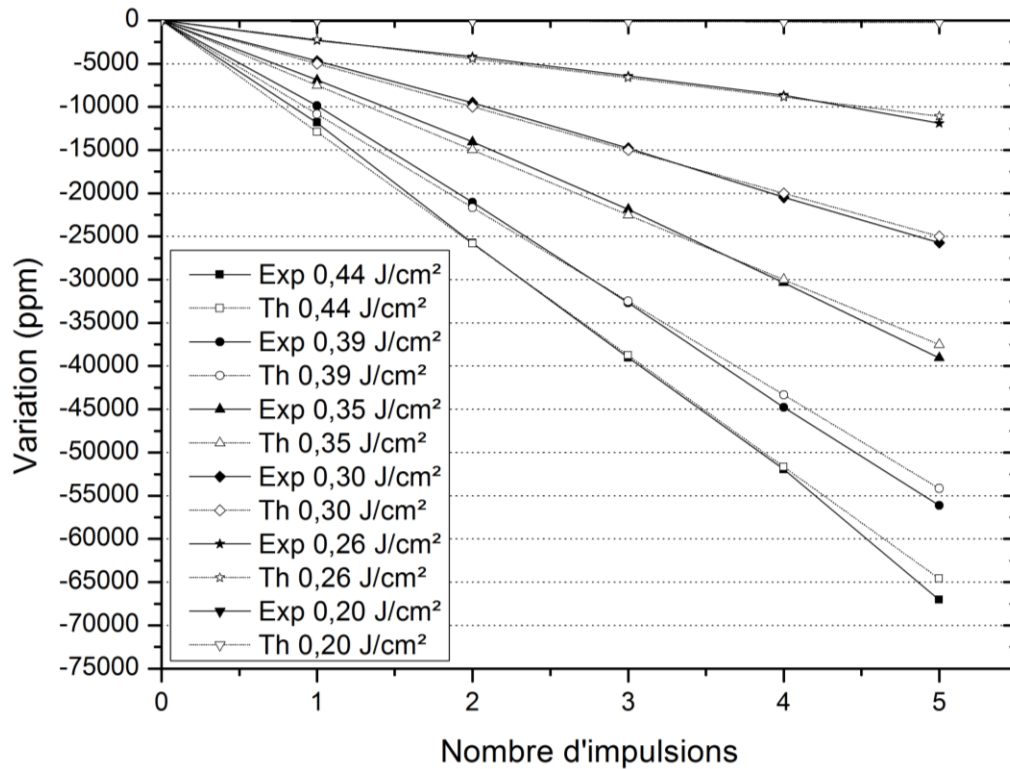


Figure 6-6 : Comparaison de la modification théorique et expérimentale pour plusieurs fluences laser

L'équation (6.7) permet de prédire la valeur de la résistance modifiée en fonction du nombre d'impulsions et des paramètres laser avec une précision proche de celle qu'il est possible de réaliser lors de la modification de résistances de Poly-Si par laser.

De plus, il est possible de représenter à l'aide d'un raffinement de ce modèle équivalent la modification de résistance de Poly-Si avec un recouvrement des impulsions en ajoutant des résistances $R_{x,n}^j$ en parallèle aux résistances R_p (où j représente le nombre d'impulsions au même endroit). La valeur de $R_{x,n}^j$ pourrait facilement être tabulée pour coller sur le comportement expérimental afin de capturer les effets non-linéaires en jeu.

6.2 Vieillessement et stabilité des résistances de Poly-Si

Le Tableau 6-1 présente la dérive dans le temps de résistances de Poly-Si modifiées par laser pour une fluence variant de 0.22 à 0.48 J/cm² avec cinq impulsions laser de 300 ns. Pour des fluences supérieures à 0.3 J/cm², la dérive des résistances à une température de 150 °C est

seulement de 1 000 ppm au bout de 14 h. Ceci signifie que quelque soit la fluence utilisée, la dérive de la valeur de la résistance sera du même ordre de grandeur alors que la différence entre une résistance modifiée avec cinq impulsions à 0.3 et 0.48 J/cm² est de 5 300 ppm.

Tableau 6-1 : Dérive de résistances modifiées avec cinq impulsions pour plusieurs fluences

Fluence (J/cm²)	Variation des résistances (ppm)			
	14 h	114 h	618 h	1006 h
0.48	8 747	10 931	12 494	13 159
0.44	9 072	11 252	12 969	13 424
0.39	9 255	11 562	13 475	13 969
0.35	9 885	12 398	14 452	15 013
0.3	9 637	12 099	14 126	14 723
0.26	7 352	9 188	10 667	11 004
0.22	5 647	7 128	8 209	8 601
Résistance non modifiée	3 371	4 362	5 174	5 274

Les résultats obtenus dans la section 5.3.3 pour des résistances modifiées par laser de 3 % montrent que la dérive de la valeur des résistances est comparable avec ceux de (Dziedzic, 2004). Dans ce papier, le vieillissement est réalisé à 162 °C pendant 200 h, puis la température augmente à 207 °C et 253 °C pour une durée de 200h à chacun des paliers de température. Les résistances utilisées sont de 100 Ω/carreau et elles sont modifiées par des impulsions de courant. Dans notre cas, les résistances sont de 80 Ω/carreau et après un vieillissement de 300 h, les résistances modifiées ont subi une variation de 1.2 % alors que les résistances non modifiées ont vu leur valeur changée de 0.7 % (Tableau 6-2).

Tableau 6-2 : Dérive de résistance pour une modification de 3 % de la résistance initiale

Fluence (J/cm ²)	Variation des résistances (ppm)	
	225 h	1000 h
0.36	11 391	12 708
0.31	12 332	13 811
0.27	15 665	17 678
Résistances non modifiées	6 328	6 992

Avec une modification de résistance par impulsion de courant et un vieillissement de 162 °C pendant 200 h, la dérive de la résistance modifiée est de 1 %, ce qui peut être comparée avec les résultats de vieillissement de résistance modifiées par laser.

6.3 Recommandations

La technique de modifications de résistances de Poly-Si par laser est relativement simple à mettre en œuvre au niveau industriel, mais il est nécessaire d'avoir tout l'équipement optique permettant l'ajustement des résistances.

Il a été démontré que l'ajustement des résistances est possible et qu'on peut atteindre les valeurs souhaitées avec une précision de 400 ppm. Cependant quelques recommandations peuvent être utiles concernant les paramètres lasers. Dépendamment de l'utilité des résistances dans le circuit, un ajustement grossier peut être acceptable. Donc avec un choix judicieux de la fluence, la modification peut s'effectuer d'une façon très rapide. Cependant, si un ajustement fin est requis, il est recommandé de combiner les deux techniques de modification, c'est à dire, des impulsions laser distantes les unes des autres et un recouvrement des impulsions. Il faut s'approcher de la valeur de résistance désirée sans jamais la dépasser avec des impulsions laser espacées et un choix approprié pour les paramètres laser, puis effectuer un recouvrement des impulsions pour affiner et atteindre la valeur souhaitée. Cependant, il ne faut pas dépasser une longueur

d'impulsions de 250 ns en utilisant un recouvrement des impulsions car au-delà de cette valeur, une seule impulsion est suffisante pour atteindre le maximum de variation (section 4.2.4). Il est possible et fortement recommandé d'utiliser une combinaison de plusieurs fluences pour une même résistance ainsi que le recouvrement des impulsions pour obtenir un résultat très satisfaisant avec une précision maximale de 400 ppm. Par contre, pour obtenir des résistances stables, reproductibles et précises, une fluence inférieure à la fluence seuil de fonte du Poly-Si doit être utilisée pour éviter des dommages au Poly-Si.

Pour des résistances de Poly-Si avec une couche de passivation, la reproductibilité des résultats est plus difficile mais tout à fait possible. Il est préférable dans ce cas de contrôler la valeur de la résistance à l'aide d'une mesure électrique.

Au niveau du vieillissement et de la stabilité des résistances de Poly-Si, il a été constaté dans la section 5.3 que la fluence du laser n'influence pas de façon significative la dérive dans le temps des résistances modifiées. Le paramètre important pour obtenir une résistance stable est le nombre d'impulsions utilisée. En effet, le vieillissement de résistances modifiées à 3% est plus stable pour une fluence de 0.36 J/cm² que pour une fluence de 0.27 J/cm² (Tableau 6-2). Pour atteindre 3 % de modifications totale, respectivement quatre impulsions et onze impulsions ont été nécessaires pour une fluence de 0.36 J/cm² et 0.27 J/cm². Donc, il est recommandé d'utiliser le moins d'impulsions possible pour atteindre la valeur de résistance désirée tout en obtenant un composant le plus stable possible.

De plus, dans la section 5.3.2, il a été observé que la majeure partie du vieillissement se produit en moins d'une heure, permettant ainsi d'obtenir très rapidement une idée de la dérive totale de la valeur de résistance. Des tests plus approfondis à ce sujet doivent être fait, mais il est possible de supposer qu'un vieillissement de 1 à 5 h avant d'effectuer la modification par laser pourrait réduire la dérive de la valeur de la résistance et tendre à atteindre la valeur des résistances non modifiées et donc la stabilité du composant.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était de caractériser une technique d'ajustement post-fabrication de la valeur de résistances de Poly-Si par laser. Pour cela, différents paramètres laser ont été étudiés afin d'observer les changements structuraux ainsi que la variation de valeur électrique des différentes résistances. De plus, il a été important de caractériser la stabilité des dispositifs pour permettre une analyse complète de cette méthode d'ajustement de résistances et d'observer les performances dans le temps des résistances modifiées par laser.

La première conclusion est au niveau de la structure atomique du Poly-Si. L'analyse effectuée par spectroscopie Raman a permis d'observer un changement de la structure atomique du Poly-Si. Lorsque ce matériau subit une intervention par laser, un réarrangement des joints de grains du Poly-Si se produit, ce qui entraîne une cristallisation de la surface irradiée par laser. Ce résultat est important car il permet de comprendre les changements structuraux qui se produisent sur le matériau et par conséquent sur les résistances de Poly-Si. De plus, il a permis de déterminer les paramètres laser qui engendrent la cristallisation de la surface du matériau représentant le diamètre du faisceau et la diffusion de la chaleur. Ceci permet d'éviter d'endommager les composants adjacents aux résistances sur un circuit intégré.

La deuxième conclusion qui peut être faite à l'aide de cette étude concerne la reproductibilité et la prédictibilité des résultats. En effet, il a été démontré que lorsqu'une résistance de Poly-Si est irradiée par laser, une décroissance de la valeur de la résistance se produit et il est possible de contrôler sa valeur avec une précision de 500 ppm. La reproductibilité du phénomène a permis d'établir un modèle basé sur la construction d'un schéma électrique équivalent permettant de prédire la valeur finale de la résistance en fonction de la fluence du laser et du nombre d'impulsions utilisé pour le traitement (section 6.1.2). À partir de l'équation (6.4), on constate que la différence entre les résultats expérimentaux et les courbes théoriques est en moyenne de l'ordre de 850 ppm. Ce résultat étant de l'ordre de l'erreur introduite lors d'une intervention laser, le schéma électrique équivalent permet d'établir avant la modification des résistances les paramètres laser et le nombre d'impulsions nécessaires pour atteindre une valeur de résistance désirée.

Néanmoins, si cette précision de 500 ppm n'est pas suffisante, un ajustement fin de l'ordre de 50 ppm est possible avec la méthode de recouvrement total des impulsions (sections 4.2.3 et 4.2.4).

En effet, lors d'une intervention laser à faible fluence, il est possible de superposer les impulsions. Ceci permet de ne pas modifier complètement la structure atomique du Poly-Si et de tendre à une saturation de la valeur de la résistance en fonction du nombre d'impulsions et donc d'effectuer un ajustement fin et précis de la valeur.

La troisième conclusion concerne la stabilité et du vieillissement des résistances de Poly-Si modifiées par laser. Les tests de vieillissement effectués dans le Chapitre 5 permettent de conclure que les composants modifiés par laser ont un vieillissement plus important que celui des composants non modifiés lorsqu'ils sont soumis à une température de chauffage de 150 °C. On peut conclure à travers les différentes analyses le nombre d'impulsion qui influence la stabilité dans le temps des résistances de façon importante. En effet, lorsqu'on augmente le nombre d'impulsions, la surface de la résistance modifiée par laser est plus grande ce qui entraîne une augmentation de l'ampleur des effets associés au vieillissement par rapport aux résistances non modifiées. Il est donc préférable, afin de maximiser la stabilité du circuit résultant, de limiter le nombre d'impulsions lors du traitement laser. Cette technique présente cependant l'inconvénient de réduire la précision de l'ajustement, l'ajustement fin s'obtenant par de multiples interventions à basse fluence. En fonction de la fonctionnalité du circuit et des paramètres que l'on désire atteindre, un compromis doit donc être fait entre le vieillissement, la stabilité et la précision de l'ajustement du composant.

Aussi, il a été montré dans le Chapitre 5 que la majeure partie du vieillissement se produit en moins d'une heure, ce qui permet d'obtenir rapidement une idée de la dérive de la résistance dans le temps. Ceci constitue un avantage majeur au niveau industriel car il est possible de déterminer 79 % du vieillissement total en 5 h engendrant ainsi un gain de temps et une diminution des coûts de fabrication. Il est possible d'envisager un pré-vieillissement d'une dizaine d'heures des résistances après avoir réalisé la modification par laser sur le composant. Ceci pourrait permettre à l'industrie de proposer des composants plus stables dans le temps et d'éviter une dégradation de la fonctionnalité du système.

Pour toutes ces raisons, la méthode post-fabrication de modification de la valeur des résistances de Poly-Si par laser est une technique très prometteuse au niveau industriel.

Finalement, à la suite de cette étude, des recommandations peuvent être faites sur le travail à poursuivre au niveau du développement et de l'élargissement de certaines expériences. Dans un

premier temps, une analyse de la valeur des résistances modifiées par laser pourrait être réalisée en élargissant la plage de fluence, et en faisant une variation plus fine de la longueur des impulsions. Ceci pourrait permettre de contrôler une plus grande plage de modification.

Les circuits intégrés utilisés en majeure partie dans ce mémoire sont des circuits dont la couche de passivation sur le dessus du circuit n'est pas présente. Lors de la fabrication de composant microélectronique, habituellement cette couche est déposée pour protéger le circuit. Donc, l'analyse réalisée à la section 4.3 doit être développée et approfondie. Il a été démontré qu'il est possible d'ajuster la valeur des résistances de Poly-Si avec une couche de passivation mais elle est plus difficilement contrôlable. Alors, cette étude pourrait permettre d'obtenir de meilleurs résultats sur la reproductibilité et la prédictibilité de la variation en élargissant la plage de fluence et en variant les différents paramètres laser comme la puissance, et la durée des impulsions.

Les tests de vieillissement et de stabilité des résistances sont aussi à approfondir. En effet, il a été observé que la majeure partie du vieillissement du composant se produit en moins d'une heure et tend à se stabiliser. Un aspect important qui n'a pas été testé dans ce mémoire serait de réaliser un pré-vieillissement de quelques heures à 150 °C des résistances après l'intervention laser ce qui pourrait entraîner une meilleure garantie de stabilité aux industriels.

De plus, des tests de vieillissements et de stabilité n'ont pas été réalisés sur des résistances de Poly-Si avec la présence d'une couche de passivation. En approfondissant l'analyse sur ce type de circuit, il est nécessaire de développer des tests sur la stabilité et de vieillissement pour obtenir une analyse complète sur ce type de dispositif et d'estimer le potentiel d'un ajustement post-fabrication par laser de résistances de Poly-Si au niveau industriel.

L'approfondissement de cette étude permettraient une meilleure compréhension des phénomènes électrique et physique qui entre en jeu lors de la modification de résistances de Poly-Si par laser et ainsi, faciliter l'utilisation de cette technologie dans l'industrie.

BIBLIOGRAPHIE

BAKER, M.F. (1997). " *Low ohm resistor series for optimum performance in high voltage surge applications* ". Microelectronics International, Vol. 14 Iss. 2, 22 - 24

BOULAIS, E. FANTONI, J., CHATEAUNEUF, A., SAVARIA, MEMBER, IEEE,, Y. AND MEUNIER,M. (2011), " *Laser Induced Fine Tuning of Integrated Polysilicon Thin Film Resistance* ". iee transaction on electron devices

RICHARD CARLEY, L. (1989). " *Trimming analog circuits using floating-gate analog MOS memory* ". IEEE journal of solid-state circuits, vol. 24, No.6

CHATEAUNEUF, A. (2008). " *Caractérisation de résistances de silicium poly-cristallin modifiées par laser* ". M.Sc.A, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

DZIEDZIC, A., KOLEK, A., EHRHARDT, W., THUST, H., (2005). " *Advanced electrical and stability characterization of untrimmed and variously trimmed thick-film and LTCC resistors* ". Microelectronics reliability, Vol. 46, 352-359.

FELDBAUMER, D.W. & BABCOCK, J.A. (1995). " *Theory and Application of Polysilicon Resistor Trimming* ". Solid-State Electronics, Vol. 38, No. 11, 1861-1869.

FELDBAUMER, D.W., BABCOCK, J.A., MERCIER V.M. & CHUN, C.K.Y. (1995). " *Pulse Current Trimming of Polysilicon Resistors* ". IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 42, No. 4, 689-696.

GAO, W. & SNELGROVE, W.M. (1994) " *Floating gate charge-sharing : a novel circuit for analog trimmin* ". IEEE Conference, Circuits and Systems, 1994. ISCAS '94., 1994 IEEE International Symposium on. Vol.4, 315-318

HEADLEY, R.C., POPOWICH, M.J., & ANDERS, F.J., (1973) " *YAG laser trimming of the thick film resistors* ". ICIST 23rd Electronic Component Conference, pages 47-55

KAITH, Y.L., BESERMAN, R., CHACK, A., WEIL,R., & BEYER, W. (2002) " *Kinetics of the laser-induced low-temperature crystallization of amorphous silicon* ". Applied physics letters, Vol.81, No.18, 3347-2249

LACHAINE, R., BOULAIS, E., MEUNIER, M. (2010) " *Optical in situ probing method for laser antifuse linking* ". Semiconducteur science and technology 25, 065015.

LACOURSE, A. (2001). " *Caractérisation électrique des résistances diffusées par faisceau laser* ". M. Sc. A. inédit., École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

LAFORTE, S. (2006). " *Mesure in-situ de la zone fondue d'un circuit intégrée lors de la fabrication d'une résistance diffusée par laser* ". M. Sc. A. inédit., École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

LEDINSKY, M., FEKETE, L., STUCHLIK, J., MATES, T. , FEJFAR, A., & KOCKA J., (2006) " *Characterization of mixed phase silicon by Raman spectroscopy* ". Journal of non-crystalline solids 352, 1209-1212.

MAUCK, M. (1979). " *Knife-edge profiling of Q-switched Nd:YAG laser beam and waist* ". Optical society of America, Applied optics, Vol. 18, No. 5.

MEUNIER, M., GAGNON, Y., LACOURSE, A., SAVARIA, Y. & CADOTTE, M. (2001). *"A Novel Laser Trimming Process For Microelectronics"*. Applied Surface Science, Vol. 186, No 1-4, 52-56.

MEUNIER, M., GAGNON, Y., SAVARIA, Y., LACOURSE, A. & CADOTTE, M. (2001). *"Laser Tuning Silicon Microdevices for Analog Microelectronics"*. Proceedings of the SPIE, Vol. 4637, 75-81.

BADRI NARAYANA, T., RAMKUMAR, K., SATYAM, M. (1991). *"Downward laser trimming of thick film resistors"*. IEEE transaction of components, hybrids, and manufacturing technology, Vol. 14, No. 4, 894-899

NOGUERA, O., *"Propriétés structurales, vibrationnelles et diélectriques de matériaux à base d'oxyde de telure"*. Ph.D, Université de Limoge, France

PARKER, L. & HUANG, W. (1990). *"Polysilicon Resistor Trimming by Laser Link Making"*. IEEE Transactions of Semiconductors Manufacturing, Vol. 3, No. 2, 80-83.

SMIT, C., VAN SWAAIJ, R. A. C. M. M., DONKER, H., PETIT, A. M. H. N., KESSELS, W. M. M. & VAN DE SANDEN, M. C. M., (2002) *"Determining the material structure of microcrystalline silicon from Raman spectra"*. Journal of applied physics, Vol. 94, No. 5, 3582-3588.

RAMIREZ-ANGULO, J., GEIGER, R.L., SANCHEZ-SINENCIO, E. (1987). *"Characterization, evaluation, and comparison of laser-trimmed film resistors"*. IEEE Journal of solid-state circuits, Vol. sc-22, No.6, 1177-1189

SWEENEY, J., & GEIGER, R. (1989) " *Very high precision analog trimming using floating gate MOSFETS* " IEE Conference Publication, No. 308, 652-655