

DEVELOPPEMENT ET APPLICATIONS DE TECHNIQUES LASER IMPULSIONNELLES POUR L'ANALYSE DE DEFAILLANCE DES CIRCUITS INTEGRES

Emeric Faraud

▶ **To cite this version:**

Emeric Faraud. DEVELOPPEMENT ET APPLICATIONS DE TECHNIQUES LASER IMPULSIONNELLES POUR L'ANALYSE DE DEFAILLANCE DES CIRCUITS INTEGRES. Electronique. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2012. Français. NNT : . tel-00997458

HAL Id: tel-00997458

https://theses.hal.science/tel-00997458

Submitted on 28 May 2014

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

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

N° d'ordre : 4677

THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par Emeric, FARAUD

POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Electronique

DEVELOPPEMENT ET APPLICATIONS DE TECHNIQUES LASER IMPULSIONNELLES POUR L'ANALYSE DE DEFAILLANCE DES CIRCUITS INTEGRES

Version préliminaire

Soutenue le : 6 Décembre 2012

Après avis de :

MM.	Jean-Michel PORTAL	Professeur	*IM2NP - Université Aix-Marseille*	Rapporteur
	Philippe DESCAMPS	Professeur	*LaMIPS - Université de Caen*	Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

MM.	Philippe DESCAMPS	Professeur	*LaMIPS - Université de Caen*	Rapporteur
	Jean-Michel PORTAL	Professeur	*IM2NP - Université Aix-Marseille*	Rapporteur
	Dean LEWIS	Professeur	*IMS - Université de Bordeaux I*	Directeur
	Vincent POUGET	Chargé de recherche	*IMS - CNRS*	Co-Directeur
	Thomas ZIMMER	Professeur	*IMS - Université de Bordeaux I*	Président
	DARRACQ Frédéric	Maître de conférences	*IMS - Université de Bordeaux I*	Examinateur

Remerciements

Les travaux de cette thèse présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre du projet MADISON.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux différents partenaires industriels et académiques impliqués dans ce projet.

Tout d'abord, je remercie la société STMicroelectronics et la société LFoundry qui ont contribué au financement de ce projet et pour l'intérêt qu'ils ont pu porter à mes travaux.

Je remercie les différents directeurs du laboratoire de l'Intégration des Matériaux aux Systèmes (IMS) à Bordeaux et les membres de l'équipe LASER qui m'ont fait confiance en mettant à disposition toutes les ressources nécessaires à la réussite de mes travaux.

Je suis sincèrement reconnaissant envers Mr Vincent POUGET pour sa disponibilité et pour avoir apporté son expertise à ce travail en qualité de co-directeur.

Je témoigne également ma reconnaissance à Monsieur Dean LEWIS pour avoir dirigé cette thèse avec dynamisme permettant l'aboutissement de ce travail de recherche collaboratif.

Je tiens à remercier Monsieur Bernard PICARD de m'avoir ouvert les portes de la plateforme d'analyse de défaillance CIMPACA à Rousset et aussi tous ceux qui ont contribué au bon déroulement de mes travaux sur cette plateforme. Je voudrais remercier la société PULSCAN et SECTOR Technologie pour leur disponibilité et leur réactivité.

J'exprime, également, toute ma gratitude aux professeurs Monsieur Philippe DESCAMPS et Monsieur Jean-Michel PORTAL pour avoir examiné ce travail en qualité de rapporteurs.

Je remercie Mr Thomas ZIMMER d'avoir présider mon jury de thèse et Mr Frédéric DARRACQ d'avoir accepté mon invitation pour assister à ma soutenance.

Je remercie l'ensemble des membres de l'équipe LASER et aussi mes compagnons d'aventures de doctorant, Kai, Issam, Mehdi, Nogaye et Adèle avec qui j'ai partagé des problématiques scientifiques tout au long ces années de recherche.

Mes remerciements s'adressent à l'ensemble du personnel du laboratoire IMS pour leur accueil et leur disponibilité.

Je suis également très reconnaissant d'avoir pu participer à divers séminaires et conférences qui ont été pour moi des sources de motivation supplémentaires pour continuer d'évoluer dans ce domaine de recherche.

Enfin, j'aimerais remercier mes amis et mes proches qui m'ont soutenu tout au long de cette thèse.

Table des matières

Introduction générale 15
Chapitre I : Etat de l'art des techniques optiques de localisation de défauts 21
I.1. Introduction 21
I.2. Techniques optiques de localisation de défauts 21
I.2.1. Voie optique passive 21
I.2.1.1. Technique d'imagerie thermique 21
I.2.1.2. Technique d'émission de photons 21
I.3. L'analyse par faisceau laser 23
I.3.1. Interaction laser circuit intégré 23
I.3.2. Principales propriétés optique du semiconducteur 23
I.3.2.1. Mécanismes d'absorptions suivant la longueur d'onde 23
I.3.2.2. Processus d'absorption 24
I.3.3. Stimulation Thermique Laser STL 25
I.3.4. Stimulation Photoélectrique Laser 26
I.3.5. Amélioration de la résolution spatiale 27
I.3.6. Energie laser SPA & TPA 29
I.3.7. Amélioration de la résolution 30
I.4. Technique d'analyse par faisceau laser continu 32
I.4.1. Technique laser sonde 32
I.4.1.1. Réflectométrie laser 32
I.4.1.2. Interférométrie laser 33
I.4.2. Techniques lasers pompe 34
I.4.2.1. Statiques 34
I.4.2.2. Semi-dynamiques 35
I.4.2.3. Dynamiques 37
I.4.3. Techniques de stimulation laser disponibles dans les équipements d'analyse industriels. 38
I.5. Stimulation par faisceau laser impulsionnel 38
I.5.1. Techniques laser orientées Radiation 39
I.5.1.1. Génération d'événements singuliers SEE 40
I.5.2. Technique d'analyse pour l'analyse de défaillance 40
I.5.3. Faible injection laser 40
I.5.3.1. Nb-obic SC-obic 41
I.5.3.2. TR-OBIC 41
I.5.3.3. Technique OBIC impulsionnel 41
I.5.4. Forte injection 42
I.5.4.1. Technique d'analyse PULS 42
I.5.4.2. Technique d'analyse TRLS 42
I.5.4.3. Technique laser Pompe-sonde 43
I.5.5. Transfert des techniques dans le domaine de l'analyse de défaillance 44
I.5.5.1. Objectif des travaux et du développement 44
I.6. Conclusion 46
Chapitre II : Matériels & méthodes 51
II.1. Introduction 51
II.1.1. Matériels 51
II.1.1.1. Les sources laser impulsionnelles 52
II.1.1.2. La chaîne laser femtoseconde 52
II.1.1.3. La chaîne laser picoseconde 53
II.1.1.4. Contraintes environnementales 54

II.1.1.5. Conclusion 54
II.1.1.6. Le prototype du module laser picoseconde 55
II.1.1.6.a. La source laser impulsionnelle fibrée 55
II.1.1.6.b. Isolateur optique 56
II.1.1.6.c. Les fibres optiques 57
II.1.1.6.d. Atténuateur motorisé fibré 58
II.1.1.6.e. Interface graphique 59
II.1.1.6.f. Sélecteur d'impulsion 60
II.1.1.6.g. Modulateur acousto-optique 60
II.1.1.6.h. Générateur de délai synchronisé (SDG) 61
II.1.1.6.i. Electronique de contrôle 63
II.1.2. Les microscopes 63
II.1.2.1. Le PROBER 63
II.1.2.2. La station sous pointes 63
II.1.2.3. Microscope inversé 64
II.1.2.3.a. Le LSM "laser scanning microscope" 64
II.1.2.4. Les instruments d'acquisition de données. 65
II.1.2.4.a. Châssis PXI 65
II.1.2.4.b. Les alimentations 65
II.1.2.4.c. Carte d'acquisition NI PXI 5152 66
II.1.2.4.d. Carte d'acquisition AQUIRIS 66
II.1.2.5. Logiciel d'interface SCANWORK. 66
II.1.2.5.a. L'interface graphique 66
II.1.3. Couplage du prototype du module laser picoseconde 68
II.1.3.1. Tests de structures logiques numériques 69
II.1.3.2. Tests de validation de l'interaction laser circuit 69
II.1.3.2.a. Oscillateur 800MHz 69
II.1.3.3. Etudes transitoires dans les portes logiques 72
II.1.3.3.a. Configuration de test PULS 72
II.1.3.4. Etude d'une chaîne d'inverseur 73
II.1.3.4.a. Signal PULS chaîne d'inverseurs 73
II.1.3.4.b. Signal P-OBIC Chaîne d'inverseur 75
II.1.3.4.c. Etude PULS dans une chaîne de porte XOR. 76
II.1.3.5. Analyse des données PULS 77
II.1.3.5.a. Conclusion 79
II.1.3.5.b. Conclusion Analyse Par Face Avant 80
II.1.3.5.c. Analyses par face arrière. 81
II.1.3.5.d. Ouverture de boîtier face arrière. 81
II.1.3.6. Analyse par approche face arrière 82
II.1.3.7. Mesure PULS Face arrière 82
II.2. Conclusion : 85
Chapitre III : Résultats expérimentaux obtenus avec le prototype IMS/ATLAS 89
III.1. Introduction 89
III.2. Etude de circuits numériques séquentiels par stimulation laser picoseconde 90
III.2.1. Objectif de l'étude 90
III.3. Mise en place expérimentale 91
III.3.1. Générateur de pattern 91
III.4. Test de la sensibilité de registres à décalages. 92
III.4.1. Stimulation laser picoseconde en mode asynchrone. 92
III.4.1.1. Description de registre testé. 92
III.4.2. Configuration expérimentale de test 92
III.4.2.1. Résultats en mode asynchrone 93
III.4.2.2. Acquisition d'une matrice de données. 94

III.4.2.3. Etude paramétrique de la sensibilité....96
III.4.3. Conclusion....97
III.4.4. Stimulation laser picoseconde synchrone....98
III.4.4.1. Description du registre à décalage 8bits....98
III.4.4.2. Configuration expérimentale de test....99
III.4.4.3. Synchronisation du test....99
III.4.4.4. Signatures électriques typiques....100
III.4.4.5. Traitement de la matrice de données....102
III.4.4.6. Optimisation de la fenêtre d'injection laser....103
III.4.4.7. Etudes paramétriques....103
III.4.4.8. Quantification de la sensibilité en fonction du temps....104
III.4.4.9. Distribution de la sensibilité en fonction de la tension de polarisation....105
III.4.4.10. Quantification....106
III.4.5. Conclusion....108
III.5. Etude SEL par Stimulation laser dans une SRAM....109
III.5.1. Rappel définition du SEL....109
III.6. Etude de la section efficace SEL....111
III.6.1. Mise en place du test....112
III.6.1.1. Préparation de l'échantillon....112
III.6.1.2. Mise en place expérimentale....112
III.6.1.3. Protocole de test SEL....112
III.6.1.4. Cartographie Laser SEL 2D....113
III.6.2. Etude courrant SEL....115
III.6.3. Cartographies à petite échelle en SPA et TPA....117
III.6.3.1. Cartographie SEL TPA....118
III.6.4. Etude de la section efficace par laser....121
III.6.5. Etude profil Seuil SEL en fonction de la profondeur de focalisation....122
III.6.5.1. Caractérisation du faisceau TPA....123
III.6.5.2. Profils de sensibilité SEL fonction de la focalisation....124
III.6.5.3. Estimation de la profondeur du volume sensible....126
III.6.6. Influence de la tension de polarisation sur profil SEL....127
III.7. Conclusion....128
Chapitre IV : Intégration et application en environnement industriel....133
IV.1. Introduction :....133
IV.2. L'équipement MERIDIAN-IV....134
IV.2.1. Module laser picoseconde....135
IV.3. Matériel....136
IV.3.1. Intégration du module :....137
IV.4. Mise en œuvre du module laser picoseconde....138
IV.4.1. Structures de tests....138
IV.4.1.1. Test de « PULSE CAPTURE »....138
IV.4.1.2. Mise en place de l'échantillon....138
IV.4.1.3. Analyse au travers du substrat (Face arrière)....139
IV.4.1.4. Configuration de test....139
IV.4.1.5. Stimulation laser 1064nm....139
IV.4.1.6. Etude du signal OBIC....140
IV.5. Etude du seuil de déclenchement laser....142
IV.5.1. Repérage des zones sensibles au laser....142
IV.5.2. Cartographie de la sensibilité....142
IV.5.3. Étude du seuil laser en fonction de la fréquence d'irradiation laser....145
IV.5.4. Conclusion....146
IV.5.5. Corrélation avec les simulations électriques....147
IV.5.6. Conclusion....148

IV.6. Mise en œuvre de stimulation laser dynamique....149
IV.6.1. Configuration de test dynamique....149
IV.6.2. Mise en place de la configuration de test DLS....149
IV.6.3. Configuration de test DLS....151
IV.6.4. Stimulation laser photoélectrique....152
IV.6.5. Stimulation laser 1064nm picoseconde.....152
IV.7. Optimisation de la boucle de test....153
IV.7.1. Conclusions....155
Conclusion....157
Chapitre V : r....161
Annexes....161
Références....169

Introduction générale

Les systèmes électroniques font partie intégrante de notre quotidien, leurs applications sollicitent les circuits intégrés (CIs) devant être plus performants et fiable. Le défi des fabricants a toujours été d'augmenter les performances des CIs tout en réduisant leur consommation énergétique.

Avec des architectures qui se complexifient, les fabricants de CIs doivent obtenir rapidement le meilleur rendement de production possible en respectant le cycle de vie des produits qui devient de plus en plus courts.

Pour cela, les fabricants de circuits intégrés ont mis en place une stratégie de conception orientée vers la testabilité du produit. Cela permet de fiabiliser les circuits et répondre aux attentes des secteurs de l'automobile, de l'aéronautique et du spatial.

La conséquence directe de l'augmentation de la complexité des circuits est la diminution de la taille des structures ce qui augmente de la difficulté à localiser les défauts à l'origine de leur défaillance. Si l'origine du défaut n'est pas rapidement identifiée, cela peut retarder la qualification des procédés de fabrication.

De nombreuses techniques de pré-localisation de défaut existent mais avec la diminution de la consommation électrique des CIs, celles basées sur l'observation optique statique deviennent moins efficaces.

En contrepartie les techniques d'analyses basées sur la stimulation laser restent aujourd'hui parmi les plus avancées qui existent. Elles permettent la stimulation thermique ou photoélectrique de façon très localisée sans contact physique ni préparation invasive du circuit.

Des problèmes se posent lors de l'analyse des zones actives des circuits VLSI ("Very Large Scale Integration") disposant de nombreux niveaux de métallisation qui obstruent le faisceau laser. C'est pourquoi aujourd'hui la stimulation laser est effectuée au travers du substrat.

La longueur d'onde des lasers des équipements est optimisée pour être la moins absorbée lors de la traversée du substrat. Un amincissement du substrat est indispensable pour la stimulation photoélectrique car celui-ci est fortement absorbant.

L'utilisation d'une source laser continue perturbe le fonctionnement du circuit même non défaillant avant que le faisceau laser puisse atteindre les zones actives du circuit. Les équipements d'analyses industriels disponibles sur le marché autorisent seulement une stimulation par laser continue couplée à une émulation électrique dynamique pour palier au problème de sensibilité des techniques par stimulation laser continu.

Certains laboratoires ont mis en place des méthodologies d'analyse utilisant des modulateurs de faisceau laser pour accroître la résolution. Même aujourd'hui, la performance des modulateurs laser ne permet toujours pas d'effectuer des analyses concluantes de défaillance sur des technologies avancées.

Par conséquent, les techniques d'analyses utilisant la stimulation laser continue restent souvent complémentaires aux autres techniques utilisées pour la pré-localisation de défauts avant l'analyse physique par faisceau d'électrons.

L'utilisation des sources laser impulsionnelles pour réaliser une stimulation laser photoélectrique existait dans quelques laboratoires d'analyses industriels comme (INTEL, CESTI) et dans le laboratoire IMS.

Cette thèse est portée par le projet MADISON (Méthodes d'Analyse de Défaillance Innovantes par Stimulation Optique dyNamique) a pour objectif d'augmenter le taux de succès des analyses de défaillance par l'utilisation de techniques utilisant une source laser impulsionnelle.

Le but a été d'effectuer un transfert des compétences en matière d'analyse par faisceau laser impulsionnel présentes dans le laboratoire IMS (TALENCE) vers le laboratoire d'analyses de défaillances pré-industriel CIMPACA (ROUSSET). Pour se faire, il a fallu intégrer un système optique très performant comprenant une source laser impulsionnelle dans un outil d'analyse industriel car les sources laser impulsionnelles ainsi que tout le matériel optique de mise en forme de faisceau étaient des équipements très onéreux et encombrants requièrant des compétences en optique pour leurs réglages.

La difficulté a été de développer un matériel compatible avec les contraintes environnementales industrielles et qui soit simple d'utilisation "press-bouton" par un opérateur non opticien. Un premier démonstrateur a été développé puis intégré sur la plateforme ATLAS. La description des choix technologiques ainsi que sa validation de fonctionnement sont illustrées en partie dans ce mémoire. Une version plus aboutie du module laser picoseconde est aujourd'hui intégrée et opérationnel dans le MERIDIAN-IV. Quelques études de sensibilité de circuit à la stimulation laser picoseconde sont présentées dans le dernier chapitre qui conclut ce mémoire et sanctionnent les travaux s'inscrivant dans le cadre de cette thèse.

Le premier chapitre de ce mémoire synthétise les différentes techniques optiques de localisation de défaut par faisceau laser existantes. Il passe en revue les techniques basées sur la stimulation par faisceau laser utilisées dans le monde de la microélectronique. En détaillant les principaux types de stimulation laser possibles ainsi que les paramètres clefs.

Le second chapitre est consacré à la présentation du développement du prototype du module laser picoseconde. Il présente le choix de la source laser qui a été définie à partir des contraintes du milieu industriel et celles liées à la stimulation au travers du substrat. L'analyse de véhicules de test, nous a permis de comparer les interactions obtenues avec la source laser fibrée picoseconde avec celles d'une source laser solide picoseconde de la plateforme ATLAS.

Le troisième chapitre est consacré à l'application de techniques d'analyse par faisceau lasers impulsionnels sur des structures numériques séquentielles. Il explique les paramètres de l'interaction laser avec le circuit servant à la caractérisation de circuits défaillants. Il présente une étude originale utilisant une chaîne laser impulsionnelle femtoseconde de la plateforme ATLAS pour étudier le phénomène Latchup.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre illustre l'aboutissement du travail mené tout au long de ce projet avec l'intégration du module laser picoseconde dans un outil d'analyse industriel MERIDIAN IV sur la plateforme CIMPACA. Les mesures effectuées sur des structures de tests ont permis de mettre en place différentes configurations expérimentales possibles pour l'analyse de circuits défaillants.

Chapitre I

Etat de l’art des techniques optiques de localisation de défauts

Chapitre I : Etat de l'art des techniques optiques de localisation de défauts

I.1. Introduction

Les techniques d'analyses par voie optique sont appréciées car elles sont simples à mettre en œuvre et non invasives. Pour les plus performantes elles sont basées sur la stimulation par faisceaux laser. La stimulation laser permet de stimuler ou de sonder localement sans contact physique avec le circuit. Un large panel de techniques d'analyses compatibles avec les équipements existant, mais les laboratoires d'analyses de défaillance rencontrent des difficultés à les appliquer des circuits de type VLSI.

I.2. Techniques optiques de localisation de défauts

Depuis ces dix dernières années, de nombreux équipements d'analyse industriels ont été développés pour les laboratoires d'analyse de défaillance. Trois types d'analyse optique sont possibles : la première est basée sur l'observation passive, la deuxième sur le sondage local par faisceau laser et enfin la stimulation laser.

I.2.1. Voie optique passive

I.2.1.1. Technique d'imagerie thermique

Les premières techniques d'analyse par voie optique ont été développées pour l'observation de points chauds dans les circuits. La plus ancienne des techniques de mesure de gradients de température est basée sur le transfert d'énergie par diffusion entre le circuit et un cristal liquide (LCD) déposé à la surface du circuit. Cette technique n'est quasiment plus utilisée en raison de sa faible résolution spatiale.

Aujourd'hui, la taille minimale des structures qui composent les circuits VLSI est de l'ordre de la dizaine de nanomètres avec un nombre élevé de niveaux de métaux qui rend difficile l'accès aux structures actives des transistors. Par conséquent, la majeure partie des analyses optiques sont utilisées au travers du substrat. Des caméras capables de mesurer directement le rayonnement dû à l'élévation de température remplace l'utilisation de LCD.

I.2.1.2. Technique d'émission de photons

Les techniques d'émission de photons sont basées sur la mesure de la longueur d'onde et de la quantité de photons émis. Plusieurs types d'émissions peuvent être à l'origine de la lumière émise et sont la conséquence directe de phénomènes physiques.

Il existe deux principaux mécanismes d'émission :

- une émission de désexcitation par recombinaison inter-bande
- une émission induite par le freinage de porteurs chauds.

Le spectre d'émission dû aux porteurs accélérés est représenté en gris sur la Figure I-1.

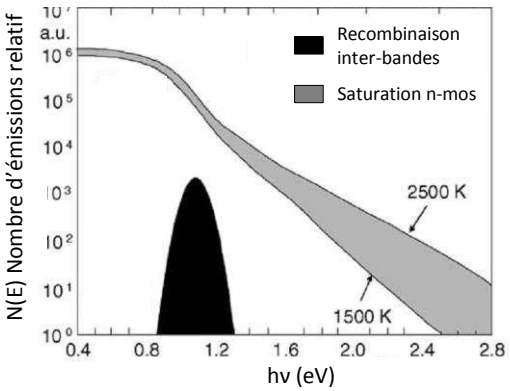
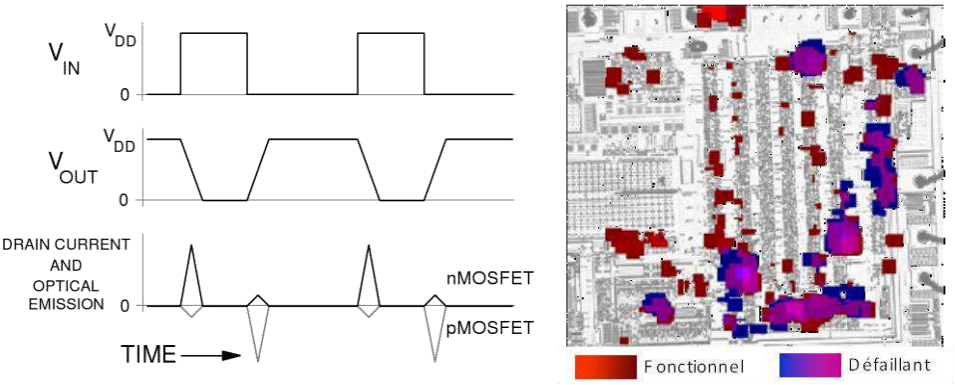


Figure I-1 : Répartition spectrale des différents types d'émission [Boit 2005].

Le spectre en noir représente l'émission due aux recombinaisons inter-bandes. Une partie du spectre reste difficilement observable au travers du substrat, car elle est comprise dans la bande d'absorption du silicium. Les techniques d'émission de photons peuvent utiliser une stimulation électrique statique ou dynamique.

La technique EMMI ("EMission-MIcroscopy") consiste en l'observation sur une grande fenêtre temporelle de l'émission d'une partie d'un CI. L'émission d'un circuit émulé dynamiquement est moyennée. L'EMMI peut nous renseigner sur des problèmes de polarisation interne ainsi que sur la nature d'un défaut lors de son activation.

La technique d'analyse appelée TRE ("Time-Resolved Emission"), est la version dynamique des techniques d'émission de photons. Elle consiste en l'observation de l'émission du CI sur une fenêtre de temps très courte. Elle permet de repérer les défauts suivant la condition de polarisation des transistors. Cette technique est plus riche en informations car elle donne la localisation spatiale de l'émission en fonction du temps.. Cette technique nécessite une bonne connaissance de la topologie du circuit afin d'interpréter les résultats, impliquant souvent des structures pas toujours défaillantes. Il est possible d'effectuer des mesures de phases entre les acquisitions pour améliorer le rapport signal sur bruit ou filtrer les sources d'émissions parasites.



a) b)

Figure I-2 : a) Emission en fonction du pattern électrique. [Boit 2008], b) comparaison des zones d'émission entre un circuit défaillant et un fonctionnel [Perdu 2009].

Les sources d'émission entre un composant fonctionnel et un défaillant peuvent être très différentes et son interprétation reste souvent difficile. Pour cette raison les images EMMI comme celle représentée sur la Figure I-2b sont utilisées de façon complémentaire à d'autres techniques d'analyse comme celles basées sur le sondage local par faisceau laser.

I.3. L'analyse par faisceau laser

L'utilisation du faisceau laser comme sonde locale permet une meilleure corrélation entre l'origine du défaut et la zone analysée.

I.3.1. Interaction laser circuit intégré

Dans le cas d'un faisceau laser continu émettant des photons ayant une énergie inférieure au gap du semiconducteur, il sera possible de créer un échauffement local STL (Stimulation Thermique Laser). Si l'énergie des photons est supérieure au bande-gap indirect du semiconducteur, chaque photon absorbé par le substrat va donner naissance à une charge pouvant être colletée par les structures actives du circuit.

I.3.2. Principales propriétés optique du semiconducteur

I.3.2.1. Mécanismes d'absorptions suivant la longueur d'onde

Le taux de génération de charges est sensible à l'énergie des photons incidents, qui est directement liée à la longueur d'onde du laser par l' Équation I-1 où h est la constante de Planck, C la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

$$E_{ph} = \frac{h.C}{\lambda} (\text{eV})$$ Équation I-1

La longueur d'onde est un paramètre qui va aussi définit le mécanisme d'absorption dominant.

I.3.2.2. Processus d'absorption

Les deux principaux mécanismes d'absorption sont : l'absorption linéaire SPA ("Single Photon Absorption") et l'absorption non linéaire TPA ("Two Photons Absoprtion"). L'absorption dite linéaire est un transfert direct d'énergie par absorption inter-bande. Le photon va exciter un électron du sommet de la bande de valence et le faire passer dans la bande de conduction laissant un trou dans la bande de valence. Cela se produit quand l'énergie d'un photon est plus élevée que la largeur de la bande interdite du semi-conducteur.

Pour le silicium le gap direct est de 3,6eV, il faudrait utiliser une longueur d'onde supérieure à 365nm (en bleu sur la Figure I-3) pour qu'un photon soit absorbé. Avec la contribution d'un phonon ou d'un champ électrique, il est possible qu'un photon d'énergie inférieure soit absorbé à condition d'avoir une énergie comprise entre le gap direct et indirect.

Le gap indirect du Silicium est de E_{gi} et de 1,14eV à température ambiante donc la longueur d'onde limite d'absorption est de 1100nm.

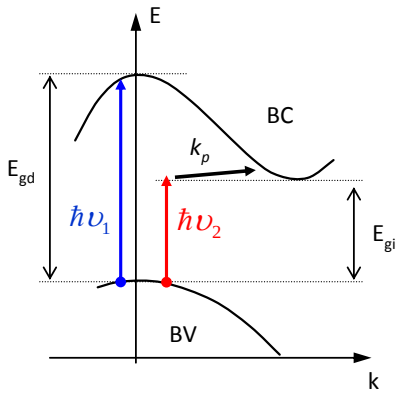
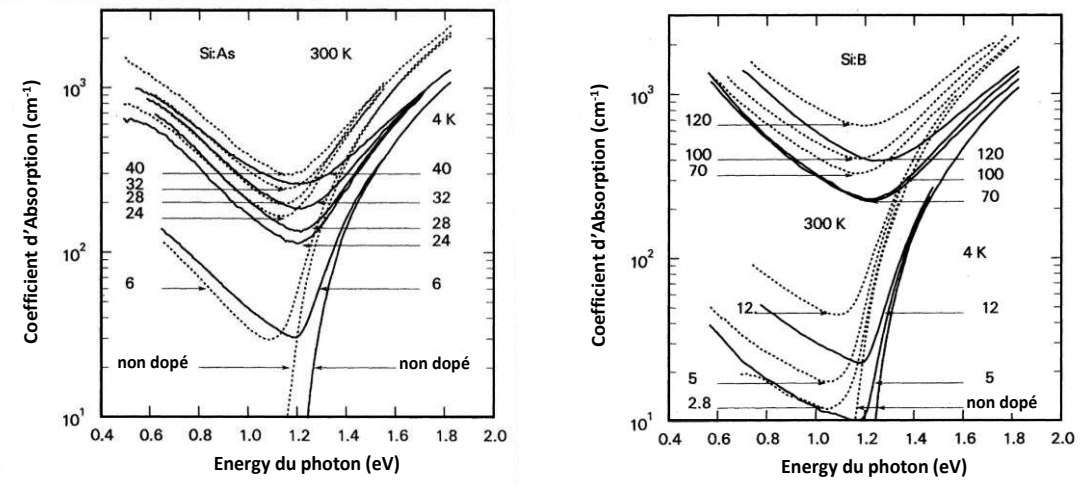


Figure I-3 : Diagramme des bandes du Semi-conducteur à gap indirect dans l'espace réciproque. $\hbar\nu_1$ travail nécessaire pour une absorption directe d'un photon et $\hbar\nu_2$ indirect avec un photon + phonon k_p.

Avec les dopages de type N, un photon ayant une énergie inférieure au gap indirect peut être absorbé sans l'aide d'un phonon. La faible concentration d'impuretés fait que l'on néglige ce mécanisme. L'absorption inter-bande et l'absorption par impuretés ont pour résultat la création de paires d'électron-trou. Dans le cas d'une absorption dite linéaire, on utilise le terme α pour qualifier le coefficient d'absorption du matériau. Il est complexe à mettre en équation car il doit prendre en compte plusieurs types d'absorptions en particulier en présence de porteurs libres.

Dans le cas ou les photons ont une énergie bien inférieure au gap, le phénomène d'absorption intra-bande apparaît, il est directement dépendant du dopage. Ce mécanisme se produit suivant le type de dopage aussi bien dans la bande conduction que de valence.

Le coefficient d'absorption du substrat va essentiellement dépendre du dopage, de la température et du champ électrique. Mr Schmid propose dans l'une de ses publications des valeurs mesurées du coefficient α représentées Figure I-4.



a) b)

Figure I-4 :Courbes du cœfficient d'absorption d'un substrat silicium pour un dopage de type Arsenic a) et de type Bore b) [Schmid 1981].

Lors de la stimulation laser via un substrat fortement dopé, l'absorption n'étant pas négligeable, nous essayons de limiter au maximum l'absorption du substrat pour que le dépôt d'énergie ait lieu jusque dans les zones actives du circuit. Pour cela on procède à un amincissement du substrat à une épaisseur de substrat raisonnable pour ne pas altérer les performances du circuit. Cette diminution de substrat permet de travailler à plus faible énergie laser tout en limitant les phénomènes de diffusion.

Pour que l'atténuation du faisceau pendant la traversée du substrat soit la plus faible possible, on utilise une longueur d'onde proche de la limite d'absorption pour qu'il y ait suffisamment d'énergie dans les zones actives tout en limitant l'élévation de température (si l'on procède à une stimulation photoélectrique). Dans le cas contraire nous pouvons utiliser une longueur d'onde encore moins absorbée pour réaliser de la stimulation thermique laser.

I.3.3. Stimulation Thermique Laser STL

La stimulation thermique laser consiste à créer une élévation locale de la température à l'aide de photons moins énergétiques que le Gap indirect. Dans les équipements d'analyse, la longueur d'onde laser est centrée autour de 1300nm pour limiter au maximum l'absorption de l'onde lumineuse au travers du substrat ainsi que la photogénération.

La plus populaire des techniques d'analyses est la technique appelée OBIRCh ("Optical Beam Induced Resistance Change") [Bardonnie 2005],[F. Beaudoin 2001]. Il s'agit d'une mesure de variation du courant dans le circuit suivant la position laser. Cette variation du courant est induite par le changement de la résistivité des structures métalliques sous l'échauffement local faisceau laser.

La technique TIVA ("Thermally Induced Voltage Alteration") est similaire, la polarisation du circuit est effectuée par une source de courant permettant une mesure des variations de tensions induites aux bornes de l'alimentation sous l'influence de l'irradiation laser [Cole Jr. 1999].

Il existe aussi une technique basée sur l'effet de thermocouple pouvant se produire lors d'une stimulation thermique laser à l'interface entre deux matériaux. La technique SEI ("Seebeck Effect Imaging") se base sur l'effet Seedbeck qui est l'apparition d'un potentiel entre les deux matériaux suite à une stimulation thermique. Lorsque le circuit n'est pas alimenté, il est possible de visualiser les interconnexions des pistes métalliques comme les jonctions via-métal ou métal-semiconducteur. C'est une technique difficilement applicable dans des structures complexes mais qui a démontré un potentiel pour l'étude des vias [Giowacki 2005], [Firiti 2005].

Les techniques de stimulation thermique laser sont limitées à l'étude des connexions intermétalliques ou des défauts pouvant être révélés par un échauffement localisé. Pour l'étude des zones actives, l'utilisation de la stimulation laser photoélectrique permet de réaliser des apports de charges pour des études fonctionnelles paramétriques des circuits.

I.3.4. Stimulation Photoélectrique Laser

La stimulation photoélectrique laser (SPL) consiste à injecter des charges dans le circuit par faisceau laser. Les charges résultent de la génération de paires électron-trou nécessitant des photons avec une énergie supérieure au Gap du semi-conducteur. Dans le cas d'un semiconducteur, l'absorption par le bande-gap indirect est possible avec l'aide d'un phonon ou d'un champ électrique.

Si l'injection de charge a lieu dans la zone de charge espace, les charges vont être directement séparées, donnant ainsi naissance à un photo-courant. Si les charges générées ne sont pas collectées, elles ont tendance à se recombiner naturellement et a créer un échauffement local. La longueur d'onde 1064nm est la plus souvent utilisée car l'énergie des photons est proche du gap indirect réduisant ainsi au maximum la contribution de l'effet thermique.

L'inconvénient de la stimulation laser au travers du substrat dans les circuits de type VLSI vient de l'absorption se produisant tout le long de la trace du faisceau laser. Si l'on augmente l'énergie laser pour compenser cette absorption, on perturbe sévèrement le fonctionnement du circuit ou on déclenche des événements bloquant le fonctionnement normal du circuit sous test. D'où l'intérêt d'utiliser une source laser impulsionelle afin de mieux maîtriser la quantité de charges dans le temps et donc dans l'espace car on limite les phénomènes de diffusion.

I.3.5. Amélioration de la résolution spatiale

L'utilisation de faisceau laser intense permet l'injection d'une faible quantité d'énergie vers les zones actives. Les premières techniques utilisaient des tailles de spots laser du même ordre de grandeur que les structures à analyser mais avec la diminution continue de la taille des structures, il devient impossible de perturber un seul transistor à la fois.

En microscopie classique, la résolution latérale est limitée par la longueur d'onde : plus elle est petite meilleure est la résolution. Il est possible d'améliorer la résolution spatiale avec l'utilisation d'une longueur d'onde plus grande. Cela est rendu possible de par le processus d'absorption non linéaire qui met à contribution plusieurs photons moins énergétiques comme illustrée sur la Figure I-5.

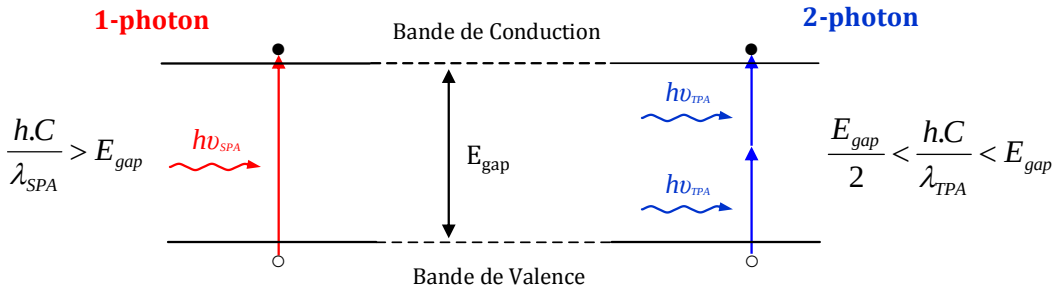
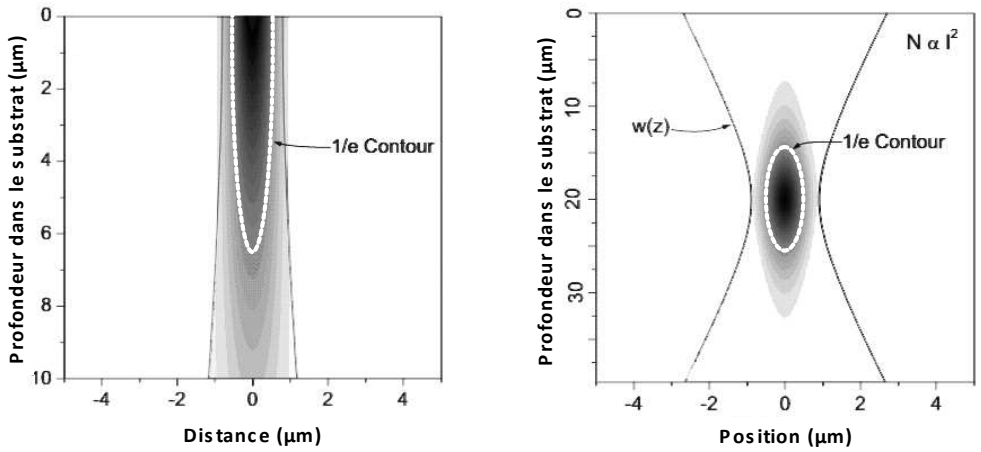


Figure I-5 : Diagramme de bandes

Soit $h\upsilon_{SPA}$ le travail pour l'absorption linéaire SPA et $h\upsilon_{TPA}$ l'énergie d'absorption non linéaire TPA. En régime deux photons, l'efficacité de l'interaction laser silicium résulte de plusieurs effets non-linéaires se produisant lors de la propagation du faisceau dans le substrat. Si l'on considère le faisceau laser gaussien, la taille de spot est définie comme le double du col du faisceau. Le col du faisceau noté w_0 est défini au point de focalisation comme étant la demi largeur de la gaussienne à 1/e Figure I-6.



a) b)

Figure I-6 : Distribution de l'énergie laser dans les substrat a) SPA, b) en TPA

Le processus d'absorption deux photons (TPA) met à contribution le travail de deux photons simultanément, on note le coefficient d'absorption "non linéaire" β. La probabilité d'absorption de deux photons simultanément est faible, donc nous utilisons des impulsions laser ultracourtes de type femtosecondes avec une énergie par impulsion de plusieurs kilowatts crête.

La durée des impulsions peut avoir une influence sur l'efficacité de la collection des charges qui dépend de plusieurs facteurs. Dans le calcul du taux de génération, la forme temporelle du dépôt d'énergie est considérée comme gaussienne [Pouget 2000].

En TPA, la densité d'énergie est telle que des distorsions des lignes de champ au moment du dépôt d'énergie influent sur l'efficacité de la collection des charges. Ce phénomène est appelé "funneling", il a été mis en évidence par Mr Hsieh lors d'une étude de collection de charges après le passage d'une particule α [Hsieh 1981]. La forte densité de charges vient déformer les lignes de champs électriques, modifiant ainsi la zone de charge espace donc la quantité de charges collectées.

Dans les transistors de type MOS, un autre phénomène lié à la présence d'une forte densité de porteurs pertube les lignes de potentiel dans le substrat. Ces variations locales du champ électrique peuvent conduire à la polarisation en directe de la jonction source/substrat, mettant en conduction un transistor bipolaire parasite [Musseau 1991].

Tous ces phénomènes ont été mis en évidence pendant l'étude de l'effet des particules et seront détaillés plus en détails par la suite lors de l'utilisation du régime impulsionnel femtoseconde.

Il faut être prudent avec le niveau d'énergie laser en régime femtoseconde, car il est possible de dégrader le fonctionnement du circuit. Mr PERDU donne quelques ordres de grandeur une des ces publications [Perdu 2005]. Les valeurs de seuils sont aujourd'hui bien plus basses car les technologies sont plus fragiles et les techniques de confinement de la lumière bien plus efficaces.

Pour éviter tout endommagement du circuit, il est préférable d'utiliser des impulsions de type picoseconde pour réaliser l'absorption linéaire SPA et femtoseconde pour l'absorption non linéaire TPA. Les impulsions permettent des temps d'irradiation plus courts que le temps de recombinaison des porteurs et limitent leur diffusion. Cet aspect permet de réaliser des analyses résolues en temps de très grande précision.

En résumé, les paramètres clefs nécessaires aux analyses par faisceaux laser intenses sont : la longueur d'onde qui va régir le type de mécanisme d'absorption et la durée d'impulsion qui est souvent étroitement liée à l'énergie crête de l'impulsion.

I.3.6. Energie laser SPA & TPA

La quantité de paires électron/trou générées dans le silicium dépend directement de l'énergie laser E_0. Ce paramètre doit être maîtrisé car il faut générer suffisamment de paires pour perturber le fonctionnement du circuit sans le détériorer. La détérioration peut être due à une trop forte densité d'énergie ou à un excès de génération de porteurs, pouvant provoquer l'activation de transistors bipolaires parasites à l'origine d'événements tel que les latchups. Ce phénomène pouvant être destructif est étudié en détail par la suite avec l'utilisation du processus d'absorption SPA et TPA.

L'utilisation d'une longueur d'onde très faiblement absorbée par le substrat permet l'absorption seulement autour du point de focalisation du faisceau comme sur la Figure I-6b, à condition de travailler avec une énergie proche du seuil laser. La forte sensibilité au confinement de la lumière autour du point de focalisation apporte une dimension supplémentaire aux cartographies classiques.

Cette résolution axiale procurée par la focalisation du faisceau laser, peut être utilisée par les laboratoires d'analyses de défaillance pour localiser des défauts situés en profondeur dans le silicium.

Si l'on maîtrise les paramètres optiques d'injection, il est possible d'estimer la profondeur du volume sensible de collection des charges nécessaire au déclenchement d'un événement électrique. La stimulation par lasers impulsionnels a été principalement utilisée pour l'étude des SEEs ("Single Event Effect") qui sont une famille d'événements électriques observés par les personnes chargées de l'étude de l'effet de radiations sur les circuits. Le laser est un outil intéressant car il permet de localiser les structures les plus sensibles aux particules énergétiques [Fouillat 1996]. Cet indicateur de sensibilité peut être quantifié en fonction du flux laser puis comparé aux résultats obtenus en accélérateur de particules.

Pour ce type de mesures, la mise en forme du faisceau doit être de qualité car elle va déterminer la résolution des analyses laser qui au premier ordre découle de la taille du spot laser.

Une étude du déclenchement de latchup dans une mémoire est illustrée dans le chapitre3. Elle a été réalisée avec du matériel de la plateforme ATLAS car les sources laser femtosecondes ne sont pas encore disponibles dans les équipements d'analyse industriels.

Toute fois il est possible de déclencher des événements latchups avec une stimulation laser continu [Llido 2011].

I.3.7. Amélioration de la résolution

La limite de résolution spatiale d'un microscope est définie par la capacité à distinguer deux éléments. Avec l'utilisation d'objectifs classiques, il est difficile de résoudre en dessous de 0,2µm. Cette résolution dépend de trois paramètres : la longueur d'onde, l'ouverture numérique NA ("Numerical Aperture") et l'indice du milieu de sortie de l'objectif.

Pendant les analyses via le substrat, il n'est pas possible d'utiliser une longueur d'onde inférieure à 1100nm pour améliorer la résolution ni l'ouverture numérique de l'objectif qui est définie par la distance de travail souhaitée.

Des lentilles spécifiques appelées communément SIL ("Solid Immersion Lens") va servir à jouer sur l'indice du milieu en sortie de l'objectif comme pour les objectifs à immersions utilisant un liquide à haut indice de réfraction. A ce jour, les équipements industriels proposent l'utilisation d'une lentille spécifique qui diminue le saut d'indice à l'interface air/substrat.

Il existe différents types de lentilles SILs, les premières étaient collées à la surface du composant [Paniccia 1998]. La lentille peut être déposée à la surface ou encore gravée dans le substrat du circuit ("BULK-SIL", Figure I-7). Sa géométrie permet un grossissement local avec des résultats similaires aux objectifs immergés. Pour limiter les interférences aux interfaces, un traitement anti-reflet peut être utilisé en particulier pour les lentilles gravées directement dans le substrat.

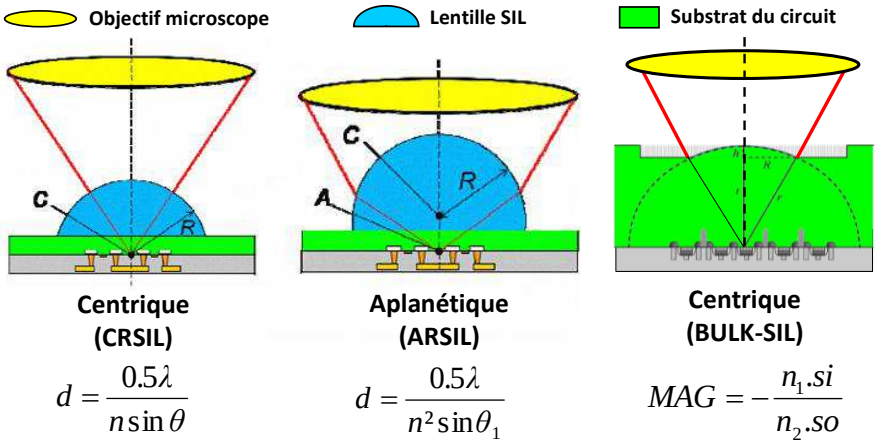


Figure I-7 : Illustration des différentes géométries des lentilles SIL [Altes et al. 2009].Avec d la résolution spatiale et MAG le grandissement.

La forme de la lentille influe sur la résolution. Par exemple la lentille aplanétique ARSIL illustrée Figure I-7 permet d'obtenir une meilleure résolution avec un champ de vue plus uniforme qu'avec une lentille CRSIL conventionnelle. Les objectifs équipés de lentilles ARSIL deviennent courants dans les systèmes optiques d'analyse [Scholz 2009].

La solution retenue par les équipementiers industriels est d'amincir le substrat puis de déposer la lentille sur celui-ci. La lentille est fixée au bout de l'objectif par un gel pour faciliter les déplacements à la surface du circuit. Ce type de lentille permet d'obtenir un gain considérable en terme de grandissement et de travailler avec de fortes ouvertures numériques (supérieures à 2).

Le Tableau I.1 récapitule l'ordre de grandeur des résolutions obtenues avec l'utilisation de lentilles SIL couplées à des sources lasers continues et l'utilisation d'amincissement UTS (Ultra Thin Substrate).

Tableau I.1: Comparaison de la résolution spatiale avec et sans SIL [Boit 2008].

Spectre Optique	Amincissement du Substrat	Résolution Spatiale	
		Optique Standard	Lentille SIL
IR	$\geq 30\mu m$	~400nm	~200nm
IR	UTS ~ 300 nm	~200nm	~100nm
UV	UTS ~ 300 nm	~100nm	~50nm

Dans les laboratoires académiques, il existe des lentilles SILs équipées de pupilles de filtrage permettant d'obtenir des polarisations lumineuses particulières [Phang 2009]. Comme ces modes de polarisation sont fortement dépendants de l'énergie, l'utilisation de ces lentilles est encore au stade expérimental [Ramsay 2007].

Maintenant que nous avons décrit les paramètres clefs de l'interaction laser avec le circuit, nous allons présenter les différentes techniques d'analyses utilisant un faisceau laser.

I.4. Technique d'analyse par faisceau laser continu

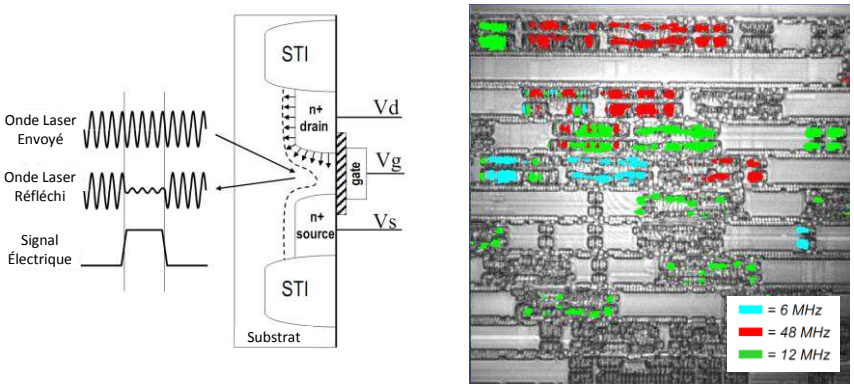
I.4.1. Technique laser sonde

I.4.1.1. Réflectométrie laser

La technique la plus populaire est basée sur la mesure du coefficient de réflexion optique. Elle permet d'obtenir l'état de polarisation des structures actives à partir de la variation des indices de réfraction des matériaux composant les zones actives du circuit. La mesure de la variation de cet indice nous donne des informations comme la température ou la concentration de porteurs. Avec ce type d'observation passive, nous obtenons une estimation du niveau électrique interne avec estimation de la tension. La limitation de cette technique est liée à la résolution optique et à l'observation de la conséquence du défaut.

La technique laser sonde utilise le déplacement du faisceau laser pour venir sonder localement. Le balayage du faisceau laser peut être réalisé par un déplacement de la carte par rapport au faisceau ou l'utilisation d'un microscope LSM ("Laser Scanning Microscope"). Un microscope LSM dispose d'un scanner optique couplé à une ou plusieurs sources laser comme sur le microscope PROBER de la plateforme ATLAS qui va être décrite plus en détails dans le second chapitre.

Sur la plateforme ATLAS le signal laser réfléchi sert principalement à se repérer dans les structures au travers du substrat sans caméra infrarouge. Cela permet d'obtenir une cartographie des zones métalliques comme celle représentée en niveaux de gris sur la Figure I-8b. Pour obtenir une corrélation très précise de la position entre deux faisceaux laser, il suffit de superposer leur alignement dans le microscope LSM.



a) b)

Figure I-8 :a) Principe de mesure de la technique LVP [Nonaka 2009], b) cartographie des différentes fréquences du circuit avec l'outil LVI [Dmitry 2009].

Il est possible de venir sonder localement les zones actives sous tension avec une source laser continue. L'onde laser réfléchie va être modulée en fonction des transitions électriques (Figure I-8a). En ajoutant une discrimination fréquentielle sur le capteur du signal réfléchi, il est possible de cartographier les différentes fréquences présentes dans un circuit (Figure I-8b). Cette mesure permet la discrimination d'un signal d'horloge. Les outils commerciaux proposent cette option sous le nom de LVI ("Laser Voltage Imaging") permettant de mesurer des signaux jusqu'à 7GHz.

Il est possible de sonder des signaux à plus hautes fréquences en utilisant un faisceau petit laser impulsionnel. L'outil LVP ("Laser Voltage Probing") est basé sur le même principe d'échantillonnage qu'un oscilloscope numérique (Figure I-9). Avec l'utilisation d'une boucle test répétant le signal électrique, l'échantillonnage permet de reconstituer des signaux électriques jusqu'à 20GHz.

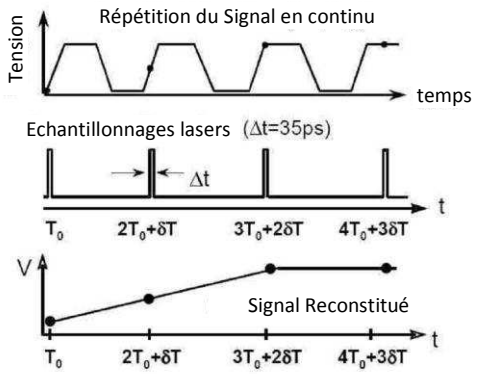


Figure I-9 : Digramme de reconstruction du signal par échantillonnage laser [Boit 2005].

Les techniques de sondage LVP permettent des mesures de niveau de densité de charges dans les structures actives et donnent une bonne estimation du niveau de tension.

I.4.1.2. Interférométrie laser

Les techniques d'analyse interférométriques utilisent un faisceau laser de référence pour interférer avec un deuxième faisceau sonde. Cela permet l'analyse des paramètres du faisceau laser réfléchi (intensité, phase, polarisation) avec une résolution liée à la cohérence de la source laser [Heinrich 1992].

La réflectométrie laser utilise le déplacement en surface d'une sonde laser pour la mesure de variations de paramètres physiques dans les matériaux du circuit comme la température, le champ électrique ou la densité de porteur [Greason 1989]. Ces techniques sont peu utilisées car elles nécessitent l'utilisation d'un faisceau de référence avec des performances similaires aux systèmes utilisant l'analyse de l'intensité de la réflexion directe du faisceau sonde comme le système LVP.

I.4.2. Techniques lasers pompe

Il existe un grand nombre de techniques laser développées dans le cadre de l'analyse de défaillance des circuits intégrés. Celles destinées à l'usage industriel sont principalement des techniques pompes car elles sont non invasives et simples à mettre en œuvre. L'effet de la perturbation induite par le faisceau laser peut être directement mesuré électriquement aux bornes du circuit. Même si leurs résolutions ne permettent pas toujours de résoudre les défauts, l'apport d'énergie localisée permet de pré-localiser les structures à l'origine de la mise en défaut du circuit.

I.4.2.1. Statiques

La stimulation laser par faisceau continu permet d'induire deux types d'effets qui régissent de mécanismes d'absorption différents. Si l'énergie des photons utilisés est inférieure au gap du semiconducteur, la stimulation sera thermique STL ("Stimulation Thermique Laser"). Dans le cas contraire, il y a création de porteurs donc une stimulation photo-électrique SPL ("Stimulation Photoélectrique Laser").

La technique d'injection de charges par laser OBIC ("Optical Beam Induced Current") consiste à mesurer le courant de l'alimentation du composant en fonction de la position du faisceau laser. La Figure I-10 illustre le courant en fonction de la position du laser dans une jonction pn.

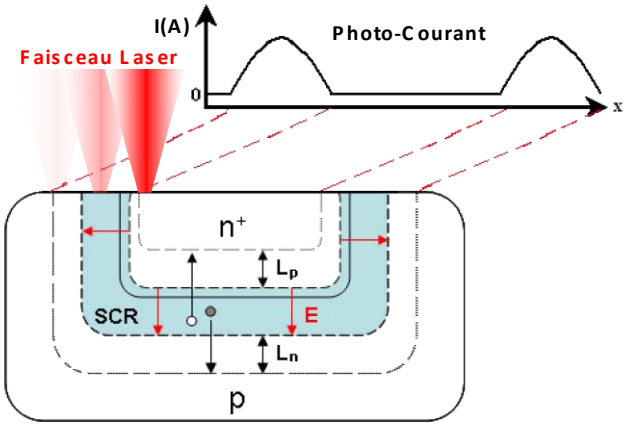


Figure I-10 : Signal OBIC en fonction de la position du laser dans une jonction pn.

La jonction est alimentée par une source de tension, ce qui permet d'observer l'évolution du courant induit par le passage du faisceau laser et de cartographier les zones actives du circuit. De nombreux défauts peuvent être à l'origine de la variation de la sensibilité des zones de collection mais la résolution est aujourd'hui limitée par la diffusion de porteurs générés.

La technique LIVA est similaire, elle utilise non pas une source de tension mais une source de courant constante. Les variations induites par le laser sont directement visibles aux bornes de l'alimentation. Cette technique est plus sensible car la tension du circuit permet la mesure du courant permettant de localiser les défauts dans le substrat ou les jonctions.

Ces deux techniques ne sont pas capables de mesurer de très faibles variations de courant dans un circuit sous tension car la signature laser est noyée dans le bruit de la consommation nominale du circuit. Ces techniques sont performantes dans des structures élémentaires de grandes dimensions comme les composants de puissance.

Tableau I.2 : Techniques de stimulation par faisceau laser continu statiques

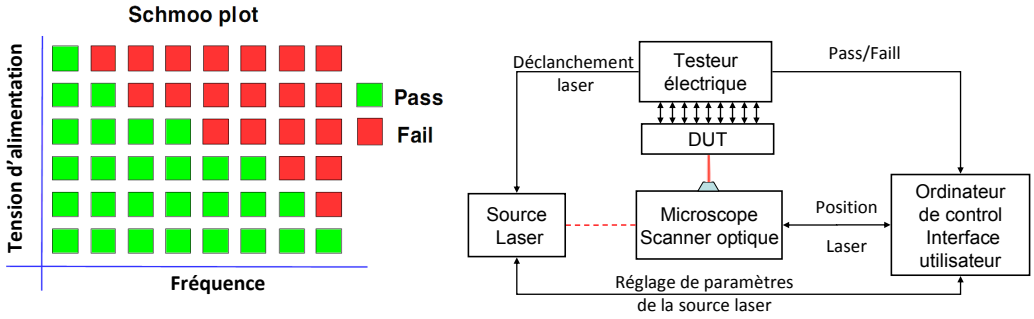
	OBIRCh	TIVA CC-OBIRCh	TBIP et XIVA	SEI
Stimulation électrique	Source Tension DC	Source Courant CC	Source Tension + Self	Source Courant CC
Sonde	Amplificateur de courant	Amplificateur de tension	Amplificateur tension	Amplificateur tension
Paramètre mesuré	$\Delta I = -\frac{\Delta R}{R^2} \cdot V$	$\Delta I = \Delta R \cdot I$	$\Delta I = -\frac{\Delta R \cdot V}{R}$	$\Delta V = Q \cdot \Delta T$

Des techniques dites semi-dynamiques ont été développées ; elles utilisent une stimulation électrique ou optique non statique durant le balayage du faisceau laser [Sanchez 2007].

I.4.2.2. Semi-dynamiques

Les techniques semi-dynamiques utilisent les mêmes sources lasers que les techniques dites statiques. Ces techniques ont pour but d'analyser des circuits plus complexes.

Les techniques dites DLS ("Dynamic Laser Stimulation") on été développées pour détecter les défauts non adressables en stimulation statique. La mesure est basée sur la sensibilité du circuit sous l'influence du faisceau laser et de son état de polarisation. Les conditions de test sont déterminées à partir du shmoo-plot fonctionnel du circuit. Le shmoo-plot est un graphique à deux dimensions qui consiste à déterminer la limite de fonctionnement du circuit en fonction de deux paramètres critiques comme la tension d'alimentation en fonction de la fréquence de fonctionnement Figure I-11a. Dans certain cas, il peut nous renseigner sur la nature du défaut par comparaison avec les bases de données de shmoo-plot établies à partir des résultats d'analyses précédentes.



a) b)

Figure I-11 : a) Schmoo-plot fonctionnel fonction de la tension d'alimentation versus fréquences de fonctionnement. b) Configuration classique DLS [Beaudoin 2005].

Pour basculer d'un état fonctionnel à un état non-fonctionnel sous l'influence d'un faisceau laser, le circuit est polarisé dans des conditions limites de fonctionnement ou disfonctionnement "à la frontière du shmoo-plot" représenté Figure I-11a.

Il existe plusieurs types de techniques semi-dynamiques basées sur le test fonctionnel (Pass/Fail) suivant le schéma Figure I-11b. Les trois techniques les plus répandues sont : la technique LADA ("Light Assisted Device Alteration"), SDL ("Soft Defect Localisation") et RIL ("Resistive Interconnection Localisation").

Pour les circuits les plus complexes à stimuler électriquement, un testeur est nécessaire pour envoyer les différents patterns de test durant l'irradiation laser d'un pixel. La synchronisation du système optique avec la stimulation électrique n'étant pas évidente avec les outils industriels, l'utilisation d'un déplacement continu du faisceau laser est préconisée. Pendant le balayage, la vitesse de déplacement est définie de façon à pourvoir exécuter tous les vecteurs de tests pour chaque pixel.

Pour diminuer le nombre de vecteurs de tests par pixel, les laboratoires ont développé des diagnostiques ATPG ("Automatic Test Pattern Generation") [Machouat 2008]. Ce sont des routines de test qui choisissent automatiquement les vecteurs de test en fonction des résultats obtenus durant les tests électriques et permettent d'augmenter la vitesse de balayage laser. Cette technique permet en partie de repousser la limitation due à la taille d'irradiation du spot laser Figure I-12.

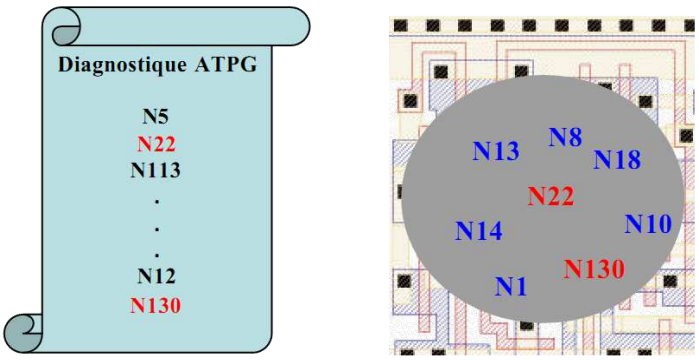


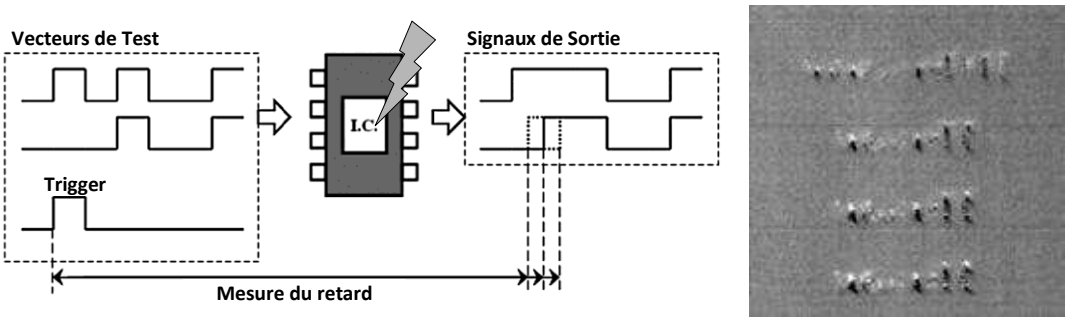
Figure I-12 : Diagnostique ATPG avec utilisation des vecteurs testés concernant les nœuds sous irradiation laser [Machouat 2008].

Les résultats obtenus sont sous forme de cartographies constituées des positions du laser qui ont contribué au changement d'état du circuit.

Les techniques semi-dynamiques les plus avancées utilisent des sources lasers modulées ou des vecteurs de test de longueur variables pour réaliser des mesures paramétriques [Deyine 2009].

I.4.2.3. Dynamiques

La technique DVM ("Delay Variation Mapping") a été développée pour réaliser des mesures paramétriques sur des circuits fonctionnels. Le testeur électrique génère un signal de référence temporelle permettant de mesurer des variations de délai de propagation induits par le passage du faisceau laser dans les structures Figure I-13 a.



a) b)

Figure I-13 Principe de mesure DVM b) Cartographie du délai induit par laser dans une chaîne d'inverseurs [Sanchez 2007]

Nous obtenons une cartographie des zones sensibles du circuit à partir des délais mesurés en fonction de la position du laser. Il est possible d'effectuer des mesures de phase entre le signal de référence et le signal en sortie du composant [Sanchez 2005] comme illustré Figure I-13.

I.4.3. Techniques de stimulation laser disponibles dans les équipements d'analyse industriels.

Les principales techniques d'analyses optiques utilisées dans les laboratoires d'analyses de défaillance ont été présentées selon leurs évolutions. Les techniques dites statiques permettent de détecter de nombreux types de défauts, mais ont dû évoluer vers le domaine dynamique afin d'augmenter la sensibilité et couvrir une plus large gamme de défauts physiques. Les techniques les plus populaires sont récapitulées dans le Tableau I.3 suivant le type de stimulation laser et leur mode de stimulation électrique.

Tableau I.3 : Classification de techniques d'analyses laser fonction du type de stimulation laser.

Type de Stimulation	Techniques Statiques	Techniques Dynamiques
Photo-électrique Laser Stimulation (PLS)	Optical Beam-Induced Current (OBIC)	Laser-Assisted Device Alteration (LADA)
	Light-Induced Voltage Alteration (LIVA)	Delay Variation Maping (DVM)
Thermique Laser Stimulation (TLS)	Optical-Beam-Induced Resistivity Change (OBIRCH)	RESISTIVE Interconnect Localization (RIL)
	Thermally Induced Voltage Alteration (TIVA)	Soft-Defect Localization (SDL)
	Seebeck Effect Imaging (SEI), Thermoelectric Voltage	Thermal-Delay Variation Maping (T-DVM)

Avec la diminution continue de la taille des transistors et l'augmentation de la complexité des circuits, les résultats des analyses dépendent fortement du temps de perturbation laser ainsi que de l'énergie. Même avec l'utilisation de modulateurs optiques ultra–rapides, il reste difficile de contrôler l'énergie injectée en fonction du temps.

La principale limitation des techniques d'analyse vient de la collection de porteurs diffusés qui complique considérablement les interprétations des résultats obtenus. Afin de déposer moins d'énergie en fonction du temps, nous allons voir des techniques d'analyse utilisant des impulsions laser ultracourtes.

I.5. Stimulation par faisceau laser impulsionnel

Les techniques par stimulations laser à impulsions ultracourtes sont principalement destinées à l'injection de charges. On considère un laser intense à impulsions ultracourtes quand sa densité d'énergie par impulsion est de l'ordre du 1000watt/cm² sur une durée inférieure à la nanoseconde. L'utilisation de ce type d'impulsion laser améliore la résolution spatiale des techniques lasers par la réduction de la longueur de diffusion des porteurs photo-générés ($< 0{,}1\mu m$).

Les impulsions ultracourtes permettent de déposer de fortes quantités d'énergie sur des temps très courts. Cet apport d'énergie transitoire permet d'effectuer des mesures de paramètres de sensibilité dans des zones très localisées. Les phénomènes de diffusion étant limités, il est possible de réaliser des mesures différentes de la stimulation laser continue. L'aspect temporel apporté par le dépôt d'énergie transitoire peut servir à l'étude de la réponse dynamique d'un circuit.

Jusqu'à ce jour, aucun équipement d'analyse industriel ne permettait de mettre en application les techniques d'analyses utilisant une source laser impulsionnelle. Beaucoup sont seulement disponibles sous forme expérimentale car elles nécessitaient l'utilisation des sources laser très sophistiquées [Douin 2007b].

Avec l'apparition de sources laser compactes fibrées, les laboratoires d'analyse de défaillance ont l'opportunité d'adopter la technologie laser fibrée à moindre coût afin d'améliorer la sensibilité de leurs techniques d'analyse et d'évoluer vers l'étude de la sensibilité des circuits pendant une stimulation électrique dynamique.

Avec l'évolution de la technologie des sources lasers, il est aujourd'hui possible d'intégrer ces techniques basées sur des faisceaux lasers impulsionnels dans des équipements d'analyse de défaillance communément utilisés dans les laboratoires d'analyse de défaillance industriels. En plus de rendre les techniques d'analyses plus performantes en termes de sensibilité, il sera alors possible aux laboratoires d'analyses de défaillance d'envisager d'utiliser des techniques résolues en temps similaires à celles développées à l'IMS.

I.5.1. Techniques laser orientées Radiation

La stimulation par faisceau laser intense a été développée principalement pour répondre à un besoin d'analyse pour l'étude des effets de radiations dans les CIs. La majeure partie des techniques d'analyse utilisant un faisceau laser impulsionnel ont été développées afin de simuler le dépôt de charges résultant de l'ionisation du circuit lors du passage d'une particule très énergétique. Diverses techniques d'analyse on été développées afin de pouvoir comparer les différents types d'événements pouvant découler de l'interaction avec un circuit et les résultats obtenus lors de tests réalisés en accélérateurs de particules [Pouget 2000].

Les techniques d'injection de charges par faisceau laser résolues en temps permettent de déterminer précisément la vulnérabilité d'une fenêtre temporelle lors du fonctionnement d'un circuit. L'application de ces techniques s'étend à de nombreux domaines d'application. Elles sont utilisées pour la fiabilisation de systèmes afin d'anticiper d'éventuels disfonctionnements pouvant remettre en cause la sécurité d'un système entier.

I.5.1.1. Génération d'événements singuliers SEE

L'étude des effets des radiations se fait généralement sous accélérateur de particules pour déclencher des événements électriques. Ces événements sont classés en plusieurs familles, comme celle des SEEs ("Single Event Effect").

L'inconvénient du test en accélérateur de particules est de ne pas connaître très précisément le point d'impact de la particule. Les techniques d'analyse laser sont utilisées de façon complémentaire aux tests pour déterminer la position de la zone sensible aux particules [Pouget 2000].

L'utilisation d'impulsions ultracourtes semble bien adapté à ce genre d'analyses, deux plateformes de test mettent leurs bancs de test à disposition : la plateforme ATLAS à BORDEAUX et le Naval Research Laboratory (NRL) aux Etats-Unis.

L'étude des SEEs ne nécessite pas forcement de synchronisation entre la stimulation laser et le circuit. On utilise un système de capture synchronisé seulement pour des composants très sensibles ou fragiles ou les circuits numériques complexes.

Les signaux transitoires induits par laser sont classés dans la famille des SETs ("Single Event Transient") [Buchner 2002]. Les transitoires sont plus simples à visualiser dans les circuits analogiques que dans les circuits numériques, car dans les circuits numériques de type CMOS, les conditions doivent êtres favorables pour que le transitoire puisse exister et se propager jusqu'à un point de capture.

Le plus souvent, les transitoires ne sont pas visibles en sortie du circuit car la bande passante de l'électronique d'interface donnant accès aux signaux internes est limitée. La durée de l'impulsion laser a une influence sur l'interaction et peut influer sur la propagation des transitoires qui est dépendante de la topologie du circuit. Dans les circuits complexes actuels disposant des sorties multiplexées, il est souvent difficile d'avoir une bande passante élevée.

I.5.2. Technique d'analyse pour l'analyse de défaillance

Les configurations mises en place pour l'étude des SEEs ont donné naissance à des techniques d'analyse orientées pour l'analyse de défaillances. Celles-ci utilisent des sources lasers impulsionnelles pouvant êtres classées en deux grandes familles selon la puissance laser utilisée.

I.5.3. Faible injection laser

L'avantage de l'utilisation de source laser impulsionnelle est de limiter le dépôt d'énergie laser dans le temps donc limiter le phénomène de diffusion.

I.5.3.1. Nb-obic SC-obic

La technique NB-OBIC est basée sur la mesure de photos-courants induits par laser dans un circuit non polarisé. Il est possible de réaliser des mesures avec un laser continu mais compte tenu du niveau de signal, il faut une sensibilité accrue qui est seulement accessible en régime impulsionnel.

Avec cette technique, il est possible de localiser des défauts pouvant être masqués par la surconsommation d'autres structures saines impactée par le défaut lors de la mise sous tension. Avec l'utilisation d'une détection synchrone et une source laser impulsionnelle, on obtient un bon rapport signal sur bruit [Koyama 1995].

La technique SC-OBIC est similaire, elle ne nécessite qu'un seul contact et permet de cartographier les jonctions dans les circuits intégrés. Elle est basée sur le principe de charge et de décharge de capacités parasites du circuit. Le courant SC-OBIC transitoire va varier en fonction de l'éloignement du faisceau laser par rapport à la capacité ainsi que la valeur de la capacité [Beauchene 2002].

I.5.3.2. TR-OBIC.

Des techniques plus complexes comme la technique TR-OBIC ("Time-Resolved OBIC") [Bergner 1992] permet l'extraction d'informations temporelles du circuit par une méthode de type pompe-sonde. Le circuit est polarisé de façon statique, puis la stimulation laser va générer une quantité de charges suffisante pour créer une perturbation électrique qui peut être sondée par réflectométrie laser. Cette technique permet la visualisation de la propagation du transitoire généré par le faisceau pompe dans la structure sous test. Elle reste lourde à mettre en place et n'est donc pas utilisée par les laboratoires d'analyse de défaillance.

I.5.3.3. Technique OBIC impulsionnel

La technique P-OBIC ("Pulsed-OBIC") est identique à la technique OBIC utilisant un laser continu [Beauchene 2003]. L'avantage de l'utilisation d'un faisceau laser impulsionnel est la génération d'une forte densité de charges sur un très court instant. Cela permet l'injection de charges plus localisée et ainsi la détection de défauts plus ou peu sensibles.

Il est possible de travailler en mode cumulatif en envoyant un train d'impulsions afin d'établir un courant plus conséquent ou en mode mono-coup qui permet de réaliser l'acquisition du courant transitoire pour chaque impulsion envoyée [Essely 2006]. Ce mode est préconisé pour la visualisation d'événements comme les départs de microlatchups dans les circuits.

Les microlatchups se manifestent avant le verrouillage du mécanisme Latchup qui appartient à la famille des SEEs. La particularité de ce type d'événements est qu'ils se produisent qu'une seule fois avant de rendre le circuit non opérationnel. Il sera décrit plus en détail au travers de l'étude de sensibilité d'une SRAM dans le troisième chapitre.

Les techniques résolues en temps sont difficiles à mettre en place avec des outils d'analyse industriels standards car elles requièrent une synchronisation entre l'appareil de mesure électrique et la source laser. Jusqu'a présent, les sources laser impulsionnelles n'étant pas disponibles dans les outils d'analyse industriels, les techniques sont restées sous forme expérimentale dans quelques laboratoires.

I.5.4. Forte injection

De nombreuses techniques utilisant des sources laser impulsionnelles existent, en particulier pour simuler l'ionisation d'un circuit par une particule. Elles sont orientées vers la quantification de la vulnérabilité par la perturbation du bon fonctionnement du circuit.

Les techniques utilisant une forte injection de charges disposent d'une synchronisation de leur système de mesure avec la source laser. Elles sont utilisées dans le domaine des radiations pour l'étude fine de la sensibilité de fenêtre temporelle.

Les performances des outils de tests ont permis le développement de techniques d'analyses résolues en temps comme les techniques PULS et TRLS qui ont été développées au laboratoire IMS et permettent de faire des mesures de sensibilité paramétrique.

I.5.4.1. Technique d'analyse PULS

La technique PULS ("PUlsed Laser Stimulation") est une configuration de test qui est similaire à la technique P-OBIC. Elle est basée sur un système d'acquisition synchronisé sur les impulsions laser. La différence vient de la voie d'observation des signatures électriques, qui s'effectue sur les entrées/sorties du circuit.

Cette technique met à profit l'aspect dynamique de la stimulation laser afin d'extraire des informations temporelles. La configuration de test peut servir de base pour les techniques d'injection de charges plus détaillées dans les chapitres suivants.

I.5.4.2. Technique d'analyse TRLS

Une autre technique développée au sein du laboratoire IMS est la technique TRLS ("Time-Resolved Laser Stimulation") c'est une mesure de la sensibilité du circuit en fonction de la phase entre le stimulus électrique pilotant le circuit sous test et l'envoi de l'impulsion laser [Pouget 2004].

Le signal peut être observé directement sur les entrées/sorties du composant par l'intermédiaire d'un oscilloscope synchronisé ou d'un testeur électrique. L'intérêt est de pouvoir visualiser l'évolution de la sensibilité du composant à différents instants qui peut nous renseigner sur l'état logique interne des transistors au travers de leur efficacité de collection en fonction du temps [Douin 2007b].

La mise en place de la configuration de test est rendue possible par l'utilisation de sources laser impulsionnelles et des chaînes de synchronisation entre les instruments de mesures. Ce couplage permet de contrôler précisément l'arrivée des impulsions sur le circuit par rapport à un stimulus électrique au circuit.

Sur la plateforme ALTAS, les instruments sont interfacés de telle sorte que l'on puisse faire des analyses avec différents retards pendant des séquences de tests. Cependant, la résolution temporelle de cette technique dépend énormément de la capacité de synchronisation des instruments. Ce type d'analyse sert à réaliser l'injection de charges résolue en temps pour mesurer une fenêtre de vulnérabilité.

Les charges peuvent êtres injectées de manière à rendre le composant fonctionnel au moment du passage du laser avec une configuration de test proche de la technique d'analyse DLS (PASS/Fail) par stimulation laser continue.

Si l'on n'arrive pas à rétablir la fonctionnalité du composant avec un faible apport de charges, il est possible d'injecter beaucoup plus de charges afin de générer un transitoire pouvant être capturé ou se propager en aval du défaut vers une sortie du circuit afin de remonter à l'origine de la rupture de continuité du signal.

I.5.4.3. Technique laser Pompe-sonde

Une technique toute optique permet d'analyser et de sonder la structure du circuit sans contact. On utilise le laser pour générer une onde de choc en surface qui va se propager dans le circuit et se réfléchir aux différentes interfaces. Cette technique de type pompe-sonde utilise deux impulsions, une première impulsion laser pour perturber localement le circuit puis une deuxième impulsion sonde chargée de la mesure de la perturbation induite par la première impulsion.

La première impulsion laser pompe va générer une onde acoustique au moment de l'impact à la surface du circuit. Pour que l'impact donne naissance à une onde acoustique, la durée d'impulsion doit être inférieure ou de l'ordre de la picoseconde. L'onde acoustique se propage à la vitesse longitudinale du son dans le matériau, elle est partiellement réfléchie à chaque interface entre deux matériaux, créant ainsi des échos.

Lors de sa propagation, l'impulsion acoustique modifie localement les propriétés optiques du milieu, ce qui se traduit lors de son retour à la surface de l'échantillon par une variation du coefficient de réflexion optique. Cette variation peut être observée par l'envoi d'une seconde impulsion lumineuse qui va être modulée par les échos acoustiques.

Le signal acoustique fournit plusieurs informations sur la structure sondée. Outre la mesure d'épaisseur des couches, la forme des échos acoustiques est influencée par la qualité des interfaces. Ainsi, il est possible d'analyser des défauts d'adhésion, des couches d'inter diffusion, ou des délaminations.

L'acoustique picoseconde est une méthode qui a été développée au laboratoire IMS. Elle reste difficilement applicable au travers du substrat et sa limite de résolution d'analyse est de 3 niveaux de métaux dans son état expérimental car cela nécessite une bonne connaissance et un bon contrôle des propriétés du faisceau laser [Andriamonje 2005].

I.5.5. Transfert des techniques dans le domaine de l'analyse de défaillance

I.5.5.1. Objectif des travaux et du développement

Pour identifier le ou les défaut(s) à l'origine du disfonctionnement d'un circuit, les laboratoires privilégient depuis une dizaine d'années les techniques optiques. Elles sont le plus souvent sans contact et permettent de localiser rapidement le défaut voire nous renseigner sur sa nature. En 2007, Mr Vallett avait fait une prédiction des résolutions nécessaires afin de résoudre les nœuds technologiques actuels [Vallett 2007].

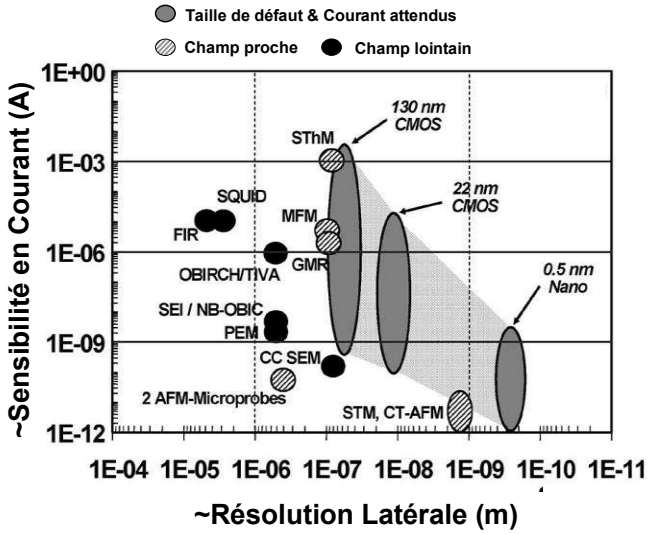


Figure I-14 : Capacité des techniques d'analyse à résoudre les technologies avancées [Vallett 2007].

Une représentation des différentes techniques d'analyse existantes suivant leur sensibilité de détection de courant versus résolutions spatiales peut être établie. Ces prédictions sont toujours d'actualité, la Figure I-14 met en évidence l'incapacité des techniques optiques (OBIRCH, TIVA, SEI, OBIC) à résoudre les défauts des technologies les plus récentes. Elle montre clairement que seules les techniques d'analyse par champ proche sont capables de résoudre aisément les technologies en dessous de la centaine de nanomètres.

Des outils comme E-BEAM permettent de visualiser l'activité interne du circuit avec une bonne résolution spatiale. Quelques techniques apparaissent avec des mesures de contraste de potentiel mais ne sont pas capables d'injecter une grande quantité de charges dans un circuit sous tension.

I.6. Conclusion

Les techniques d'analyse par stimulation laser possible avec les équipements d'analyse industriels sont limitées à l'utilisation d'une stimulation optique statique et électrique dynamique. La stimulation laser photoélectrique utilisant des sources lasers continues devient difficilement applicable dans les circuits car elle est limitée par une génération excessive de charges qui perturbent le fonctionnement des structures saines.

En pratique, les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse consistaient à améliorer le système laser avec l'utilisation d'une source laser impulsionnelle. Cette source permet un dépôt d'énergie bref à un endroit plus localisé qu'avec une source laser continue.

Pour s'affranchir des inconvénients liés à l'absorption du substrat pendant une stimulation photoélectrique, nous avons utilisé une longueur d'onde laser à 1064nm qui se situe en limite de la bande d'absorption Silicium. Cette longueur d'onde permet de générer des charges autour des zones fortement dopées (autour des zones actives) et de travailler avec un amincissement du circuit jusqu'à quelques centaines de micromètres d'épaisseur.

Deux modules lasers picosecondes ont été développés, dans un premier temps, un prototype du module laser a été conçu sur la plateforme ATLAS puis un deuxième plus abouti a été intégré dans un outil d'analyse industriel de la plateforme CIMPACA.

Dans le chapitre suivant nous présenterons la technologie de source laser impulsionnelle fibrée choisie pour sa compatibilité avec les contraintes d'utilisation en milieu industriel. Ce développement est illustré par des exemples d'applications des techniques d'analyse TRLS et PLUS effectués sur la plateforme ATLAS.

Chapitre II

Matériels & méthodes

Chapitre II : Matériels & méthodes

II.1. Introduction

Les bancs d'analyses de circuits par faisceaux lasers utilisant des sources lasers impulsionnelles étaient présents dans seulement quelques laboratoires pour l'analyse de défaillance de circuits intégrés VLSIs. La principale raison de l'absence de ce type de source laser dans les laboratoires d'analyse de défaillance industriel vient des contraintes liées à leur environnement, encombrement, entretient et réglages.

Quelques outils d'analyse industriels intègrent des sources lasers impulsionnelles non amplifiées avec une énergie par impulsion limitée ne permettant pas de réaliser de forte injection de charges. Maintenant que la technologie laser impulsionnelle a évolué avec l'apparition de sources laser fibrées amplifiées, il est possible d'avoir des systèmes compacts beaucoup moins contraignants que les chaînes lasers de la plateforme ATLAS.

Une partie de cette thèse a été consacrée à l'identification de matériels ayant les spécifications adéquates pour l'élaboration d'un module laser compact capable de délivrer et mettre en forme des impulsions laser avec une durée de l'ordre d'une dizaine de picosecondes.

Dans un premier temps, un prototype démonstrateur du module laser picoseconde a été conçu puis couplé aux microscopes de la plateforme ATLAS. Cela a permis de valider l'interaction des impulsions laser avec des circuits par comparaison avec des résultats de tests sur des structures élémentaires déjà caractérisées avec une source laser picoseconde (non fibrée) de la plateforme.

Ce chapitre commence par décrire les deux principales chaînes laser ainsi que le matériel de mise en forme du faisceau de la plateforme ATLAS.

II.1.1. Matériels

La plateforme ATLAS dispose de différents microscopes, sources laser et sélecteurs d'impulsions servant à mettre en forme les faisceaux laser. Tous d'abord, nous allons vous présenter les deux principales chaînes laser présentes sur la plateforme ATLAS. Elles sont encombrantes et sophistiquées mais très performantes car elles délivrent des impulsions très courtes dans un spectre optique allant du visible au proche infrarouge.

II.1.1.1. Les sources laser impulsionnelles

La plateforme de test laser ATLAS est équipée de plusieurs types de sources laser solides pouvant êtres injectées dans différents microscopes. Ces sources sont dites "Solides" car leurs cavités laser sont en espace libre et se composent de miroirs et d'un cristal comme milieu amplificateur. Les oscillateurs optiques à la tête des deux chaînes laser illustrées Figure I-9 sont composés de cristaux monolithiques Titane-Saphir.



a) b)

Figure II.1 : Principales chaînes laser de la plateforme ATLAS a) Chaîne laser femtoseconde "LIBRA+OPERA" b) Chaîne laser picoseconde laser "Tsunami".

II.1.1.2. La chaîne laser femtoseconde

La chaîne laser femtoseconde délivre des impulsions ultracourtes de l'ordre de la centaine de femtosecondes. Ce type d'impulsion permet un dépôt d'énergie très important sur des temps très courts. Cela est particulièrement bien adapté aux techniques d'analyses destinées à la simulation des effets des radiations[Pouget 2000]. Ces impulsions optiques très confinées temporellement autorisent des analyses par techniques optiques basées sur l'absorption non-linéaire.

Cette chaîne dispose d'une cavité basée sur l'amplification paramétrique permettant de couvrir une large gamme du spectre allant de 400nm à 2µm. Cette grande plage d'accordabilité est rendue possible par ses différents modules de mise en forme des impulsions laser représentés Figure II.2.

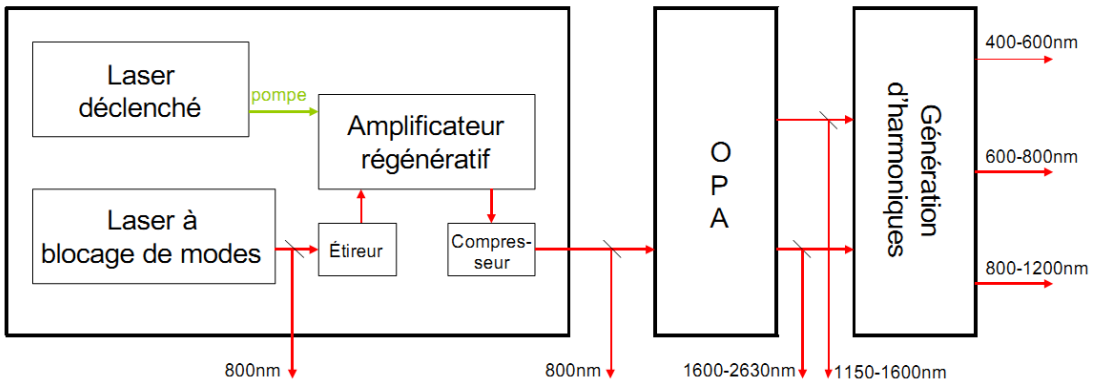


Figure II.2 : Diagramme de la chaîne laser femtoseconde composée des sources LIBRA+OPERA de la société COHERENT.

Suivant la longueur d'onde laser désirée, le faisceau est prélevé à différents étages de la chaîne laser. Le bruit d'amplitude en sortie du LIBRA est inférieur à 1% en mode de déclenchement continu (multi-coups) et de 17% en mode mono-coup.

Cette chaîne sera utilisée avec une longueur d'onde de 1300nm afin de déclencher le processus d'absorption deux photons nécessaire à l'étude de cas TPA décrite dans le chapitre suivant.

II.1.1.3. La chaîne laser picoseconde

La chaîne laser picoseconde est illustrée Figure I-9b. C'est une source laser impulsionnelle accordable dans le proche infrarouge de 760nm à 1080nm, qui est principalement utilisée en mode picoseconde pour les analyses par processus d'absorption linéaire (SPA). C'est le modèle "Tsunami" de la compagnie SPECTRA-Physique.

Cet oscillateur est capable de délivrer des impulsions picoseconde ou femtoseconde à une cadence de 80MHz. L'oscillateur laser est pompé par un laser continu pouvant atteindre une puissance de 10W qui permet à l'oscillateur laser en mode picoseconde de délivrer des impulsions d'une durée d'1ps avec une puissance moyenne de 0,5W soit 6nJ par impulsion.

Le principal inconvénient de cette source est la mise en service qui nécessite des réglages optiques manuels longs voire fastidieux. Cependant, une fois le régime établi, la stabilité de la source permet d'obtenir un bruit d'amplitude en sortie de l'ordre du pourcent.

Pendant les analyses, le taux de répétitions laser doit être diminué afin que le circuit irradié ait le temps d'évacuer toutes les charges induites par le faisceau laser entre deux impulsions et ainsi éviter un endommagement par effet thermique du circuit sous test.

Pour cela, cette chaîne laser est équipée d'un sélecteur d'impulsion permettant de diminuer le taux de répétions laser. Ce sélecteur d'impulsion est composé d'un modulateur acousto-optique qui, en déclenchement interne est capable de travailler entre 4MHz et 400Hz. En déclenchement externe, il est possible de travailler en monocoup mais cela dégrade ses performances de sélection. Pour ne sélectionner qu'une seule impulsion laser, nous disposons d'une électronique de synchronisation dédiée.

II.1.1.4. Contraintes environnementales

L'utilisation de sources laser "solides" composées de plusieurs cavités en cascade impose un environnement régulé afin de minimiser l'effet des dérives mécaniques induites par des fluctuations de température ou d'humidité. Les cavités laser étant en espace libre, elles sont extrêmement sensibles aux vibrations, car certains régimes impulsionnels ont besoin de conditions optimales pour exister. Pour éviter leur disfonctionnement, les sources laser sont placées sur des dalles flottantes et impérativement installées sur des tables optiques chargées d'absorber les vibrations.

La cohérence de la source ainsi que la divergence d'une source laser dépend de sa cavité laser. Pour les sources lasers impulsionnelles, la cavité mesure généralement plus d'un mètre, ce qui les rend particulièrement encombrantes.

Les lasers de pompe sont composés de diodes laser très puissantes, qui ont une durée de vie limitée et nécessitent le plus souvent un groupe de refroidissement indépendant demandant un entretient régulier.

II.1.1.5. Conclusion

Toutes ces contraintes mettent en évidence l'impossibilité d'intégrer ce type de source laser dans un équipement destiné à un environnement industriel tel que celui prévu dans ce travail de thèse. A l'issue de l'élaboration du cahier des charges intégrant tous les contraintes d'intégration de la source laser impulsionnelle dans l'équipement d'analyse MERIDIAN-IV, une source laser a été identifiée. Cette source est totalement fibré donc plus simple d'utilisation mais moins polyvalent que les sources lasers solides de la plateforme ATLAS.

Dans un premier temps, un prototype a été développé sur la plateforme ATLAS. Il comprend la source laser fibrée, un sélecteur d'impulsion et un atténuateur optique. Aujourd'hui le prototype du module laser picoseconde fait partie intégrante des outils de la plateforme ATLAS et a servi à tous les tests réalisés dans ce chapitre et le suivant.

II.1.1.6. Le prototype du module laser picoseconde

Le prototype développé est l'équivalent de la chaîne laser picoseconde de la plateforme ATLAS. Les éléments ont été choisis à partir d'un cahier des charges qui a été établi à partir des contraintes imposées par son intégration dans le MERIDIAN-IV. Il dispose de plusieurs interfaces d'entrées et de sorties afin de pouvoir dialoguer avec les outils d'analyse utilisés dans les laboratoires d'analyse de défaillance de CIMPACA.

Le deuxième module laser destiné au milieu industriel dispose d'une électronique de contrôle chargée la synchronisation et de faire l'interface avec l'utilisateur.

II.1.1.6.a. La source laser impulsionnelle fibrée

Les avantages principaux d'une source laser fibrée sont le confinement du faisceau laser qui lui procure une immunité aux fluctuations environnementales. En plus de l'aspect sécurité, cela lui procure un faible encombrement et une flexibilité au niveau de son couplage avec d'autres systèmes optiques voir une autre fibre optique. La technologie laser fibrée dans le domaine du proche infrarouge est possible grâce à l'apparition de fibres optiques dopées au Erbium/Ytterbium [Ee-Leong Lim 2011].

La source laser choisie intègre un sélecteur d'impulsion interne et un amplificateur permettant d'atteindre de hautes énergies par impulsion. Le sélecteur est situé en amont de l'amplificateur. Cette configuration permet de réduire le taux de répétition de 20MHz avec une puissance moyenne de plusieurs watts.

Notre source laser fibrée picoseconde illustrée Figure II.3 délivre des impulsions d'une durée de 30ps à une longueur d'onde de 1064nm. Il est possible d'obtenir des impulsions plus courtes, mais il a fallu faire un compromis entre la durée d'impulsion et la puissance maximale. La puissance crête induit des effets non linéaires dans la fibre optique provoquant un étalement du spectre optique des impulsions.

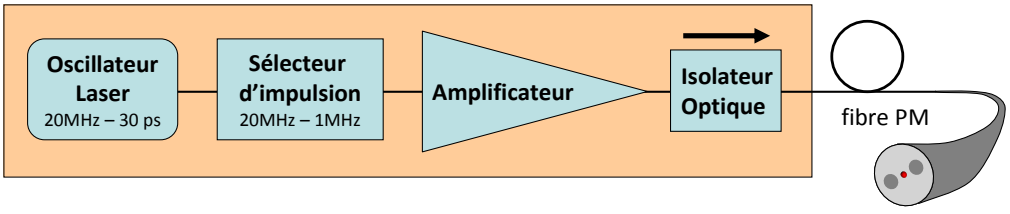


Figure II.3 : Diagramme de la source laser fibrée picoseconde.

Les effets non linéaires sont à l'origine de problèmes de guidage et deviennent dominants à partir d'un certain niveau d'énergie. Les principaux effets non linéaires responsables de la dégradation des impulsions sont l'effet Raman et Brillouin [Mandelbaum 2003]. R.G. Smith propose des équations pouvant servir à évaluer le seuil d'énergie critique [Smith 1972].

La longueur d'émission est en limite de la bande d'absorption du silicium et l'étalement spectral va provoquer une diminution de l'interaction laser avec le circuit. En effet, une partie du spectre de l'impulsion se situant hors de la bande d'absorption ne sera pas absorbée et peut donc induire un échauffement local. Durant les analyses on préférera travailler en dessous de ce seuil afin d'avoir la meilleure interaction possible avec le circuit sans le dégrader.

Comme dans tous systèmes optiques, il peut y avoir des réflexions entre les différents éléments optiques. Dans un système fibré, cela est critique car la lumière est toujours bien guidée quelque soit son sens de propagation. Pour éviter l'endommagement de la source laser, celle-ci intègre un isolateur optique.

II.1.1.6.b. Isolateur optique

L'isolateur optique agit comme une diode optique. Il autorise le passage de lumière dans un seul sens de propagation. Celui-ci est composé de deux lames biréfringentes taillées en biseau et d'une section non réciproque comme sur la Figure II.4. La section non réciproque est matérialisée par un cristal de rotation Faraday. Ce cristal est chargé de faire tourner la polarisation de 45°. La particularité de la rotation de la polarisation dans un rotateur Faraday est de se produire toujours dans le même sens quelle que soit la direction de l'onde lumineuse qui le traverse.

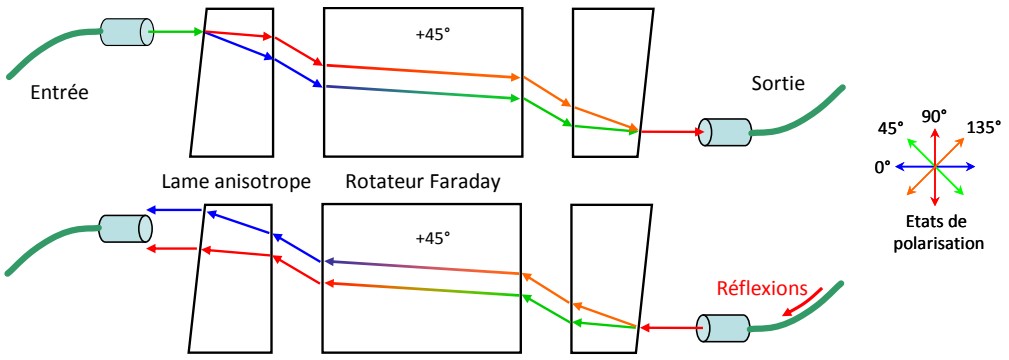


Figure II.4 : Principe de blocage des réflexions dans un l'isolateur optique fibré.

Comme l'illustre la Figure II.4, la première lame décompose l'onde lumineuse selon deux axes de polarisation. La polarisation de ces deux composantes va subir une rotation de 45° en traversant le cristal, puis une autre lame va les recombiner afin qu'elles soient de nouveau guidées dans la fibre de sortie.

Les réflexions parasites venant de la fibre de sortie sont à leurs tours décomposées par la lame de sortie en deux composantes qui vont elles aussi subir une rotation de 45°. Ces deux composantes arrivent dans un état de polarisation orthogonale à celui nécessaire au guidage. Par conséquent, elles sont déviées au lieu d'être guidées dans la fibre d'entrée.

L'avantage de ce type d'isolateur est de conserver les deux composantes de polarisation du faisceau contrairement aux isolateurs classiques qui polarisent le faisceau selon un axe. Le maintient de la polarisation est important car les systèmes en aval de la source sont sensibles à la polarisation.

Afin de maintenir une énergie stable en sortie du système et minimiser la dégradation temporelle des impulsions, le transport des impulsions laser est effectué dans des fibres de type monomode à maintien de polarisation.

II.1.1.6.c. Les fibres optiques

La fibre optique guide la lumière de part ses interfaces créées par la différence d'indice entre son cœur (où vont êtres guidés les photons) et sa gaine. Il existe plusieurs types d'interfaces cœur/gaine. Les plus classiques sont les fibres à saut d'indice comme illustrées en annexe1.

L'inconvénient de ce type de fibre est la décomposition ou dispersion du spectre optique des impulsions laser durant leur propagation. Les impulsions sont temporellement détériorées en sortie de fibre. Pour limiter cet effet, il existe des fibres à gradient d'indice. La variation de l'indice de réfraction entre le cœur et la gaine est progressive. Cela minimise les pertes aux interfaces et permet de travailler avec différentes longueurs d'ondes simultanément.

Si la taille du cœur de la fibre est très supérieure à la longueur d'onde de la lumière, la lumière peut parcourir différents chemins. Ces chemins correspondent aux modes de propagation autorisés dans la fibre. Le nombre de modes est déterminé par la taille du cœur de la fibre et de la longueur d'onde utilisée.

Dans notre cas, nous utiliserons des fibres optiques monomode SMF ("Single Mode Fiber"). Elles possèdent un cœur très fin dans le but de contraindre la lumière à se propager dans l'axe de la fibre.

Le maintient de la polarisation dans le chemin optique est important car les différents éléments optiques fibrés sont sensibles à la polarisation. La stabilité de la polarisation permet de minimiser les variations de puissance en sortie du système en fonction des conditions environnementales.

Pour le développement du module laser picoseconde, nous avons choisi la fibre type PANDA (illustré en annexe1) car ses caractéristiques de maintien de polarisation et de tenue aux flux laser correspondaient à notre cahier des charges.

L'objectif du développement de ce système est de maîtriser le dépôt d'énergie. Pour maîtriser la puissance en sortie du système, nous ne pouvons pas utiliser seulement le réglage du gain de l'amplificateur laser car l'amplificateur a un temps de stabilisation après chaque consigne. Le contrôle de la puissance laser est donc effectué via un atténuateur optique de précision motorisé fibré placé en sortie du sélecteur d'impulsion.

II.1.1.6.d. Atténuateur motorisé fibré

L'atténuateur fibré motorisé permet un contrôle rapide de l'énergie avec une grande précision.

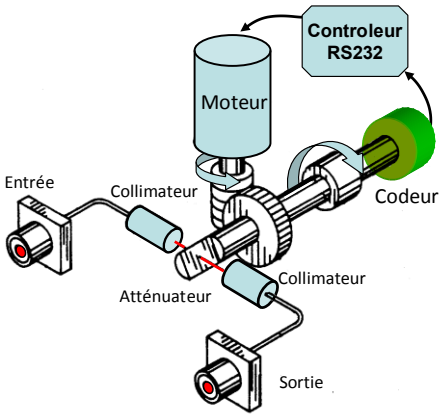


Figure II.5 : Schéma de principe de l'atténuateur fibré motorisé.

Le VOA ("Variable Optical Attenuator") représenté Figure II.5 est composé de deux collimateurs chargés de guider le faisceau en espace libre. L'atténuation se fait par l'insertion de pertes de transmission engendrées par l'obstruction progressive du faisceau entre les deux collimateurs. La consigne d'atténuation se fait à distance par l'intermédiaire d'un contrôleur chargé de commander le moteur qui entraîne l'obturateur. Le tout est relié à un codeur de précision qui mesure l'atténuation à appliquer en fonction de la consigne. La résolution autorise des pas de 0,01dB avec une très bonne reproductibilité indispensable lors des tests réalisés à des énergies autour du seuil laser.

Pour limiter les pertes dans le chemin optique du système et les éventuels endommagements aux interfaces entre les fibres optiques, les connecteurs on été supprimés puis remplacés par des soudures. Les soudures ont été réalisées avec une soudeuse spécifique capable d'aligner les contraintes des fibres avant leur assemblage. Les différents modules ont été soudés entre eux en respectant les axes de polarisation afin d'optimiser la transmission.

Cette technologie entièrement fibrée, pouvant être contrôlée à distance, est particulièrement bien adapté à une intégration dans un milieu industriel car elle peut être facilement interfacée.

II.1.1.6.e. Interface graphique

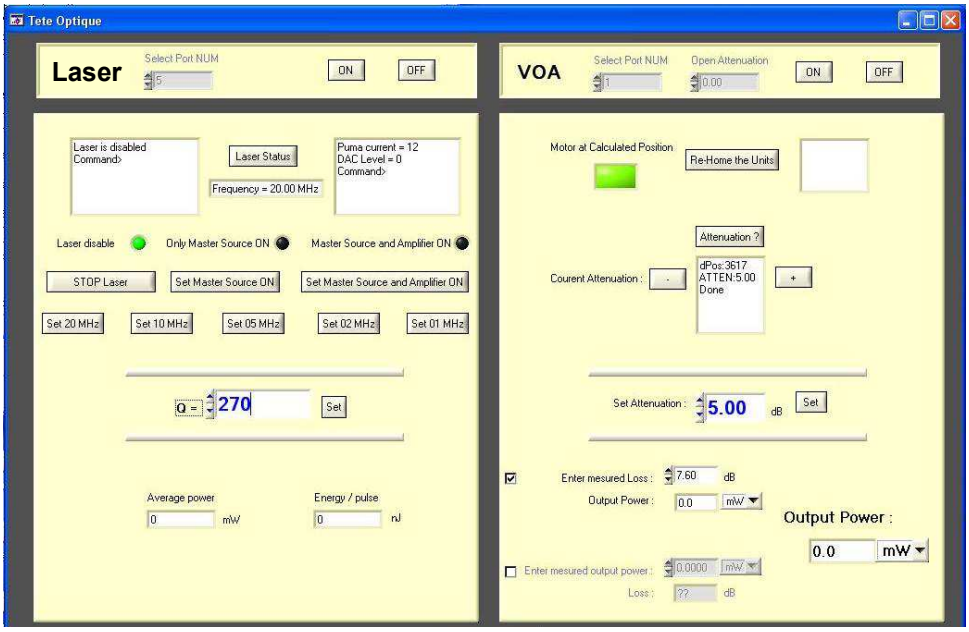


Figure II.6 : Interface graphique de contrôle de l'énergie laser du prototype.

L'interface graphique du prototype permet aux utilisateurs de contrôler plusieurs paramètres. Le programme intègre les séquences de démarrage du laser afin de respecter les temps de chauffe et donne accès au gain de l'amplificateur et le choix de la fréquence de la source laser par un simple clic.

Cette même interface intègre le contrôle de l'atténuateur optique fibré. A partir des pertes optiques du système, le logiciel estime l'énergie en sortie du système complet. Il est possible de rentrer directement la puissance désirée en sortie du système ou de modifier la valeur de l'atténuation à appliquer. Un prélèvement optique en sortie du système permet d'informer l'utilisateur de la puissance réelle en sortie du système.

Afin de travailler avec des taux de répétitions moins élevés que ceux proposés par l'oscillateur laser (< 1MHz), le prototype intègre un deuxième sélecteur d'impulsion.

II.1.1.6.f. Sélecteur d'impulsion

Le sélecteur d'impulsions est placé en sortie de la source laser. Il permet de réduire le taux de répétitions du laser ou de travailler en mode mono-coup. Comme nous l'avons déjà mentionné, la réduction de la fréquence de répétition est indispensable afin de ne pas créer un effet d'accumulation de charges dans le circuit sous test. Il est nécessaire que le circuit ait le temps d'évacuer l'ensemble des charges générées par une impulsion laser avant qu'une seconde impulsion vienne l'impacter. Si ce n'est pas le cas, il risque d'y avoir un effet d'accumulation des charges modifiant les conditions initiales du test. La sélection d'une seule impulsion est rendue possible grâce à une technologie de modulateurs acousto-optiques particulièrement performante.

II.1.1.6.g. Modulateur acousto-optique

Les MAOs (Modulateurs acousto-optique) sont basés sur le changement d'indice d'un matériau sous l'influence d'un stress électrique. Le stress électrique est un signal radio fréquence chargé de créer une onde acoustique longitudinale formant un réseau d'indices de réfraction dans un cristal. Ce changement d'indice local modifie la trajectoire de la lumière suivant l'intensité du stress électrique comme illustré en annexe 2.

Avec notre source laser, le taux de répétition initial est bien plus faible, il est donc plus facile de sélectionner une seule impulsion. La gigue sur la synchronisation du déclenchement de la fenêtre d'ouverture n'influe en rien sur la qualité de la sélection de l'impulsion.

La sélection d'une impulsion se fait avec un MAO fibré. Il fonctionne sur le même principe physique que celui décrit dans la chaîne picoseconde. Ces performances permettent de créer des fenêtres d'ouverture suffisamment rapides afin de ne laisser passer qu'une seule impulsion sans la tronquer Figure II.7.

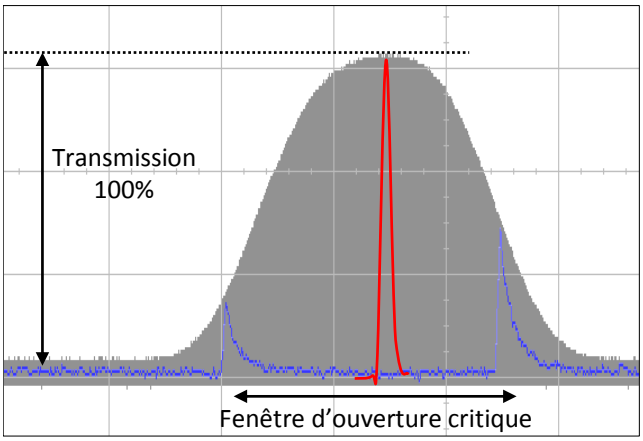


Figure II.7 : Relevé de la fenêtre d'ouverture minimal du MOA.

Si l'on règle le laser à basse fréquence, il est d'autant plus simple de sélectionner une impulsion car les impulsions sont temporellement plus espacées. Comme la réduction du taux de répétition se fait en amont de l'amplification, il est possible d'obtenir un contraste maximal en sortie. La Figure II.7 représente l'enveloppe de la fenêtre d'ouverture du MOA avec une désynchronisation entre la source laser et la commande du MAO.

L'utilisateur du sélecteur d'impulsion est particulièrement intéressant pour les analyses par faisceau laser car nous avons besoin de sélectionner les impulsions laser à des instants précis notamment par rapport au cycle d'horloge du circuit sous test.

Le prototype n'intègre par de générateur de délais dédié pour la commande du MAO.

Le déclenchement du sélecteur d'impulsion se fait par un générateur de délais synchronisé ou remplacé par une carte dédiée qui embarque un FPGA dans le module laser industriel.

II.1.1.6.h. Générateur de délai synchronisé (SDG)

Pour simplifier la mise en place de configurations de synchronisées avec les instruments d'acquisition sur la plateforme ATLAS, on préfère l'utilisation d'un générateur de délai synchronisé. Ce matériel dispose de plusieurs voies configurables à souhait avec une interface accessible par la face avant de l'appareil. Le générateur de délai est un module électronique pouvant être synchronisé avec un signal d'horloge de référence. Le plus souvent, on utilise un prélèvement optique en sortie de source laser pour déclencher l'instrument qui, à sont tour, déclenche cinq signaux synchrones. Quatre d'entre eux peuvent être retardés avec une précision de 20ps.

On dédie une voie pour la commande de l'ouverture du MOA avec une fenêtre laissant passer une ou plusieurs impulsions laser. Les autres voies sont généralement utilisées pour le déclenchement pour d'autres instruments comme par exemple un oscilloscope.

L'appareil dispose d'une entrée inhibition permettant d'arrêter son fonctionnement à tout instant. Cette entrée est utilisée pour l'étude de composants très sensibles aux latchups. En effet, suite à un premier latchup, il faut éviter qu'un second soit généré car il peut être destructif pour le circuit.

La version industrielle du module laser picoseconde embarque une électronique de synchronisation chargée de remplacer le générateur de délai et de faire l'interface avec l'utilisateur via une interface WEB.

II.1.1.6.i. Electronique de contrôle

Le générateur de délais embarque un FPGA sur lequel est implémenté un serveur web permettant de faire l'interface avec l'utilisateur via un port Ethernet. Différentes entrées sorties de synchronisation sont disponibles : Un signal de référence à 10MHz synchronisé sur la source laser; deux entrées et une sortie synchrones au déclenchement du sélecteur d'impulsion et enfin une sortie analogique servant à la visualisation de l'amplitude des impulsions en sortie du sélecteur d'impulsion.

Une fois tous ces modules assemblés, le prototype a été couplé à un microscope de la plateforme ATLAS afin de valider ses performances.

II.1.2. Les microscopes

La plateforme ATLAS est équipée de plusieurs microscopes. Le microscope du banc photoélectrique est composé de platines de translation chargées de déplacer le circuit sous le faisceau laser. Sa résolution vient principalement de ses platines de translation qui sont sous les contraintes mécaniques du câblage de la carte de test. Le temps de réponse du déplacement mécanique additionné au temps de latence de communication avec les instruments est en moyenne de 10pixels/s.

Pour nos analyses, nous avons utilisé le microscope nommé "PROBER". Il est construit sur la base d'une station de test sous pointes qui permet de polariser de circuits sur des wafers complets.

II.1.2.1. Le PROBER

Le banc de test "PROBER" illustré Figure II.8b est composé de deux parties.

La première est une station de test sous pointes, qui est une version modifiée d'un équipement standard industriel du modèle PM-8 du constructeur SUSS MicroTec.

La deuxième partie est un microscope confocal inversé équipé d'un scanner optique.

II.1.2.2. La station sous pointes

La station dispose d'un plateau à dépression chargé du maintient des wafers sous test. Il est entouré d'un plateau parfaitement plan pouvant accueillir simultanément six pointes et d'une colonne optique supérieure servant à placer les pointes sur le wafer. Elle dispose aussi d'une entrée fibrée laser pour réaliser des irradiations ponctuelles du circuit.

II.1.2.3. Microscope inversé

Le microscope LSM est un microscope inversé embarquant un scanner optique permettant d'effectuer des balayages laser très rapides dans des zones très localisées.

Une deuxième colonne optique située sous le plateau permet de réaliser de l'irradiation de circuit par la face arrière au travers du substrat avec différents faisceaux lasers. Le chemin optique de la colonne est schématisé Figure II.8a. Cette configuration confocale permet d'avoir plusieurs équipements analysant le même plan d'imagerie optique simultanément.

Cette colonne est équipée d'une caméra CCD et d'une caméra IR, dédiées à la navigation au travers du substrat et d'un scanner optique chargé du déplacement du faisceau laser lors du balayage au travers des objectifs.

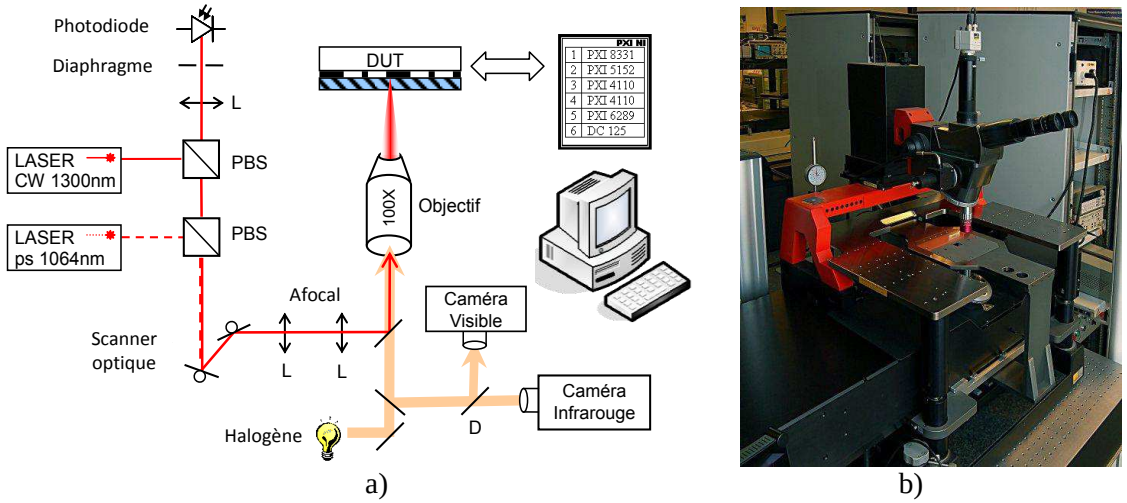


Figure II.8 : a) Schéma de principe du microscope inversé LSM couplé à la station de test sous pointes, b) microscope PROBER.

II.1.2.3.a. Le LSM "laser scanning microscope"

Le scanner optique est constitué de deux miroirs commandés par des moteurs galvanométriques à deux axes. Cela permet de déplacer légèrement le faisceau laser à l'entrée de la pupille, donc d'effectuer des déplacements très rapides avec une grande précision en sortie d'objectif.

Une petite source laser continue émettant à 1300nm est employée pour l'obtention des images LSM. L'image LSM cartographie l'intensité laser réfléchie sur les structures internes du circuit en fonction de la position du scanner. Elle est semblable à l'image obtenue avec la caméra infrarouge, sauf que chacun des ses pixels est composée des coordonnées du scanner.

Ces coordonnées sont importantes pour corréler la position des zones sensibles du circuit lors des cartographies d'injection de charges avec la topologie du circuit.

Un avantage de ce microscope est la résolution axiale apportée par son aspect confocal. Le diaphragme placé avant la photodiode LSM schématisé Figure II.8a élimine les réflexions parasites dues aux interfaces des optiques d'imagerie et limite la profondeur du champ de vue d'objectif.

La résolution axiale est principalement liée au type d'objectif des microscopes utilisés. Différents objectifs de 5x, 20x, 50x et 100x sont montés sur un barillet rotatif pour faciliter le changement de grossissement. Ce sont des objectifs particuliers car ils disposent d'une grande distance de travail et sont optimisés pour travailler dans le proche infrarouge.

Le champ de vue d'un microscope LSM est limité par le phénomène de vignetage qui se caractérise par la perte d'intensité aux abords du champ de l'objectif. Pour avoir l'irradiation du champ la plus uniforme possible, on limite la zone de balayage.

Nous allons décrire le logiciel SCANWORKS dédié au pilotage de ce microscope qui permet de définir tout les paramètres de balayage du scanner et ceux des instruments chargés de l'acquisition de la réponse électrique du circuit. Le codage du logiciel développé par Mr Vincent POUGET permet d'atteindre une vitesse d'analyse laser de 20k pixels/s. Cette performance est en partie permise par l'utilisation d'un matériel d'acquisition de donnée spécifique.

II.1.2.4. Les instruments d'acquisition de données.

Les expérimentations résolues en temps ont été réalisées avec des matériels semi-industriels intégrés dans les modules du châssis PXI du constructeur National Instrument disposant de bus de données ultra rapides.

II.1.2.4.a. Châssis PXI

Le châssis PXI comprend plusieurs emplacements où il est possible de connecter différents modules. Nous disposons de deux modules d'alimentation, de deux oscilloscopes et d'une carte d'entrées sorties numériques.

II.1.2.4.b. Les alimentations

Les deux modules d'alimentation embarquent une voie symétrique plus une voie. Sur les ports symétriques, la résolution de mesure du courant est de quelques microampères. Cette résolution est suffisante pour la détection d'un amorçage de mécanisme latchup. L'avantage de ces modules d'alimentations est leur vitesse d'échantillonnage permettant de réaliser des cartographies de courant à plusieurs kilohertz et un contrôle rapide permettant la protection du circuit sous test. Le denier point positif est le temps de cycle de redémarrage de l'alimentation permettant d'intégrer des cycles d'alimentation dans une boucle de test.

II.1.2.4.c. Carte d'acquisition NI PXI 5152

Un des modules d'acquisitions du constructeur National Instrument est un oscilloscope capable de travailler sur deux canaux en parallèle. Sa bande passante est de 350MHz avec un taux d'échantillonnage de 2Gs/s. Il dispose aussi d'une entrée trigger qui a une résolution de 5ps. L'avantage de l'utilisation de cette carte est l'entrée haute impédance contrairement au deuxième oscilloscope plus performant mais disposant d'entrées adaptées de 50Ω.

II.1.2.4.d. Carte d'acquisition AQUIRIS

Un autre module embarquant un oscilloscope est lui aussi équipé de deux voies. Celles-ci sont adaptées sur 50Ω, ce qui permet d'atteindre une bande passante de 2 GHz avec un échantillonnage de 4 Gs/s. La carte dispose aussi d'une entrée trigger ayant une résolution de 10ps. La communication haute vitesse du châssis avec le logiciel du microscope est permise grâce à un module dédié au dialogue haute vitesse avec l'ordinateur.

II.1.2.5. Logiciel d'interface SCANWORK.

Le logiciel chargé de l'interfaçage de tous ces matériels est baptisé SCANWORK, il a été développé à l'IMS et intègre le pilotage du scanner optique. L'accès à son code source et son architecture m'a permis d'intégrer des fonctions nécessaires au pilotage de divers instruments utilisés pendant les séquences de test.

II.1.2.5.a. L'interface graphique

L'interface graphique illustrée Figure II.9 donne accès à de nombreux paramètres.

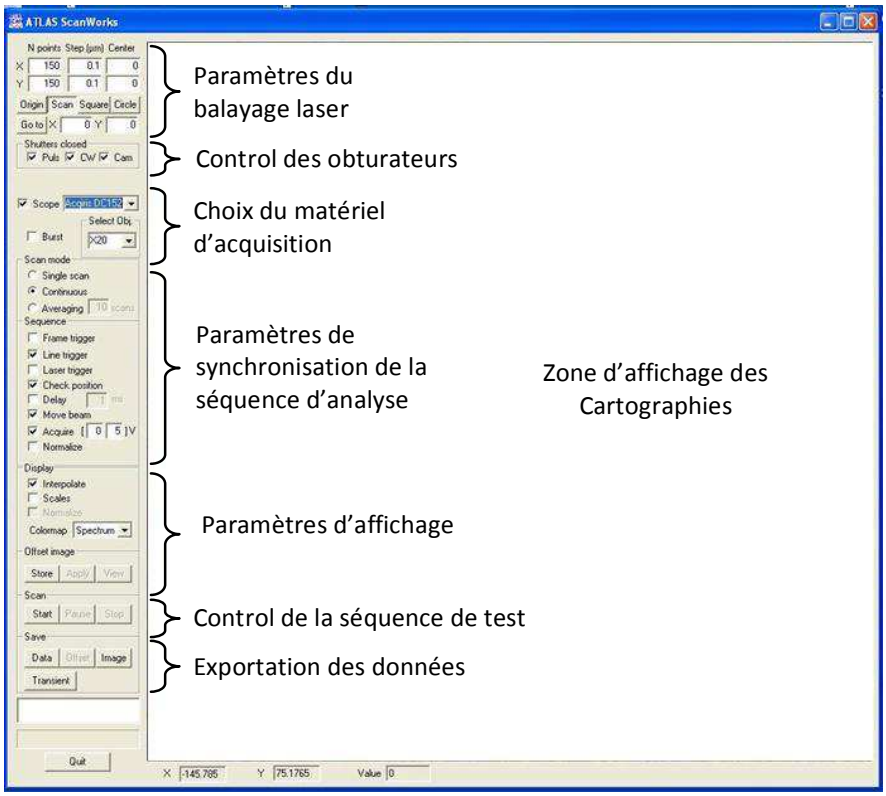


Figure II.9 : Illustration de l'interface graphique du logiciel SCANWORKS.

La procédure de démarrage d'une cartographie est simple. L'utilisateur peut définir une zone de test et choisir la forme du balayage, le nombre de points qui la composent et sa taille définie par la distance entre chaque point.

L'interface intègre un contrôle des obturateurs de faisceau permettant la sélection de la source laser à utiliser. Une protection du logiciel ferme automatiquement les obturateurs des caméras quand les lasers sont activés et vice et versa afin de les protéger. La fermeture automatique peut être programmée à tout moment dans la séquence de test afin de protéger le circuit.

Des signaux de synchronisation sont activables par l'interface graphique, ils permettent la modification de séquence de test pendant la mise en place des configurations de test sans avoir à éditer le code source. Les paramètres de nombreux matériels d'acquisition sont implémentés dans le code du logiciel. Cela permet d'utiliser le matériel le plus adapté à la grandeur électrique à observer. Pour nos besoins un système de fichier d'échange contient divers paramètres de configuration des matériels d'acquisitions. Ce fichier a été mis en place lors de l'implémentation des instruments semi-industriels qui ne disposent pas de consoles physiques pour leurs paramétrages. Ce système de fichier d'échange permet la récupération des configurations des matériels d'acquisition. Ces fichiers sont édités par l'intermédiaire d'autres petits logiciels dédiés aux différents instruments. Ces fichiers de configurations associés aux matériels sélectionnés sont nécessaires pour effectuer l'initialisation de la séquence de test. Après initialisation des différents paramètres de la séquence d'analyse, la structure du code autorise le séquençage de tests répétitifs permettant d'obtenir rapidement des cartographies de grandeur électrique.

L'avantage de ce microscope LSM est de pouvoir réaliser des cartographies LSM qui permettent d'effectuer la focalisation des faisceaux au travers du substrat dans les zones actives du circuit au niveau des pistes métalliques. Comme nous l'avons dit précédemment, les faisceaux lasers étant superposés, la superposition des cartographies des zones sensibles avec l'image LSM est très précise.

La structure du logiciel codé en programmation orientée objet rend le code très performant et permet d'effectuer des traitements de données en temps réel afin de visualiser la grandeur physique en fonction de la position du faisceau laser en temps réel à l'écran. Par un simple clic sur la cartographie, il est possible de déplacer la position du faisceau. Ce mode statique est utile afin de rechercher le seuil en énergie d'un événement en un point précis du circuit.

Le logiciel permet l'export de la cartographie sous forme d'image ou au format OSE qui est un format compatible avec la suite de logiciels utilisés sur la plateforme ATLAS.

Nous avons choisi de coupler le prototype du module laser picoseconde à ce microscope car ses performances sont proches de celles des équipements d'analyse industriels. Il a notamment une rapidité de balayage du faisceau qui a permis de valider plus rapidement les méthodologies d'analyses.

II.1.3. Couplage du prototype du module laser picoseconde

La flexibilité de la sortie fibrée du prototype a permis de le coupler facilement au microscope inversé par l'intermédiaire de l'entrée optique laser impulsionnel.

II.1.3.1. Tests de structures logiques numériques

Cette section présente les premiers tests consistant à comparer les résultats de différentes analyses de structures embarquées dans un véhicule de test ayant déjà été caractérisé avec un faisceau laser picoseconde à 800nm. Les analyses avaient été effectuées dans le cadre de la thèse Mr DOUIN pour le développement des techniques d'analyse TRLS et PULS avec la source laser TSUNAMI de la plateforme ATLAS [Douin 2008].

Le Tableau II.1 récapitule les différentes sources laser de la plateforme ATLAS mises à ma disposition.

Tableau II.1 : Durées des pulses lasers et longueurs d'onde laser utilisées pour les tests

	Longueur d'onde	Fréquence de répétition	Durée du pulse	Application
Tsunami	800nm	≥ 4MHz	~1ps	SPA
LIBRA	1300nm	≥ 1kHz	~150fs	TPA
Laser fibré	**1064nm**	**≥ 1MHz**	**~30ps**	**SPA**

La longueur d'onde de notre source laser fibrée est de 1064nm donc l'interaction devrait être moins marquée qu'à 800nm.

II.1.3.2. Tests de validation de l'interaction laser circuit

Dans un premier temps, nous avons étudié des structures de tests élémentaires, des chaînes de portes logiques câblées en inverseurs et un oscillateur. Les tests ont été effectués sur le même véhicule de test qu'avait utilisé et conçu Mr DOUIN dans une technologie AMS BICMOS 350nm.

II.1.3.2.a. Oscillateur 800MHz

La configuration de test de l'oscillateur embarqué sur ce véhicule de test est très simple à mettre en œuvre. Comme sous accélérateur de particules, le système de capture d'événements électriques est totalement asynchrone.

Nous avons utilisé un oscilloscope à grande bande passante pour capturer les événements induits par le faisceau laser. L'oscilloscope observe en continue la sortie de l'oscillateur puis déclenche un signal lors de l'apparition d'événements électriques anormaux.

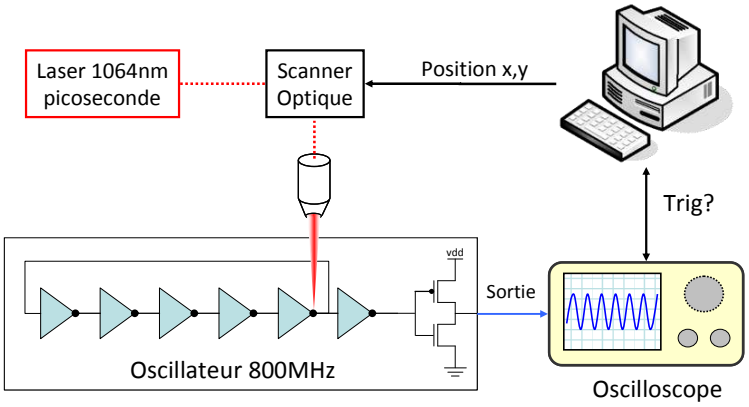


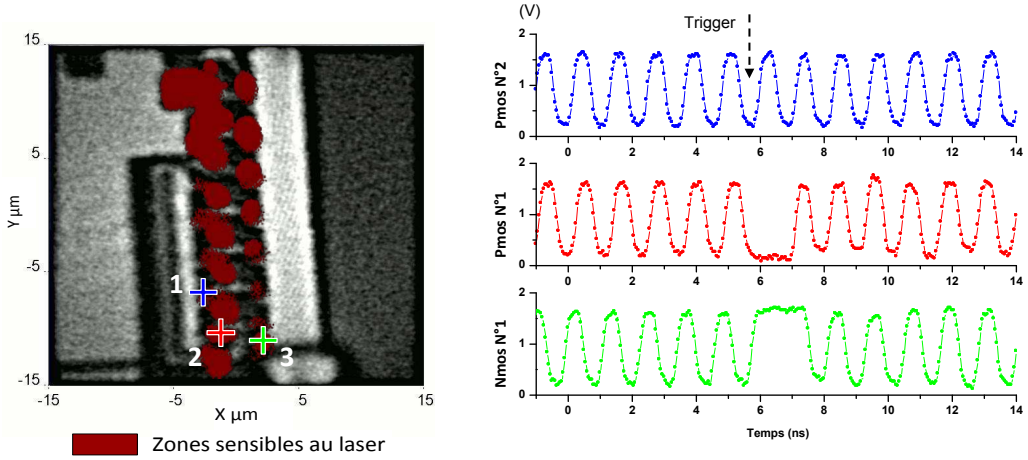
Figure II.10 : Configuration de test de l'oscillateur 800MHz.

L'oscilloscope dispose d'une sortie "Trig_0ut" synchronisée au double trigger de l'oscilloscope chargé d'informer de la détection d'un événement électrique. Cette sortie a été connectée à l'entrée PASS/FAIL du microscope PROBER comme représenté Figure II.10. A partir de ce signal, le logiciel SCANWORKS génère une cartographie de l'état de l'entrée PASS/FAIL ou d'une grandeur électrique en fonction de la position du scanner.

Nous avons dû utiliser une énergie de plusieurs nanojoules par impulsion pour traverser les différentes couches de passivations circuit car la longueur d'onde laser utilisée, 1064nm, n'est pas la plus adaptée pour des analyses face avant.

Du fait des nombreuses transitions électriques liées à la fréquence de travail, la probabilité d'interaction avec le laser est élevée. Cela a permis de réaliser une cartographie des zones sensibles représentée Figure II.11a. Les zones non uniformes de la cartographie sont principalement dues à la probabilité d'interaction qui, en mode d'acquisition asynchrone, n'est pas de 100% car la sensibilité dépend de l'état de polarisation des transistors. Dans le but d'augmenter la probabilité d'interaction et de visualiser toutes les zones de l'oscillateur, les tests ont été effectués avec une énergie légèrement au dessus du seuil de déclenchement.

Les différences entre nos mesures et celles effectuées avec une longueur d'onde de 800nm avec la chaîne laser TSUNAMI sont notables. Les tests réalisés par Mr DOUIN sont fortement bruités par la fuite optique à 80MHz du sélecteur d'impulsion de la chaîne laser. Cette fuite induit des charges en continue et bruite le signal de sortie de l'oscillateur. Les signatures électriques obtenues avec la source laser fibrée sont représentées Figure II.11b. Elles sont similaires aux signatures électriques obtenues dans les simulations effectuées par Mr DOUIN [Douin 2008].



a) b)

Figure II.11 : a) Cartographie des zones sensibles d'un oscillateur 800MHz superposée avec l'image LSM en niveaux de gris, b) Signaux relevés aux pixels pointés sur la cartographie a).

Ces premiers résultats valident l'interaction laser silicium par injection de charges par la face avant à 1064nm. Les zones colorées de la Figure II.11a représentent les zones sensibles au passage du faisceau laser. Il est possible d'identifier des géométries de sensibilité liée à l'obstruction du faisceau par les pistes métalliques. Cela est le cas notamment dans la zone sensible des Pmos proche du buffer de sortie de l'oscillateur situé sur la gauche de la partie haute de la cartographie. Dans cette zone, la sensibilité s'étend jusqu'à l'obstruction par la couche métallique voisine.

Les trois principales signatures électriques observées ont été relevées Figure II.11b. La première correspond à une légère diminution de la période d'une oscillation, elle résulte de l'irradiation au pixel noté N°1 sur la cartographie Figure II.11a. Ce pixel est assez éloigné des zones actives des inverseurs, d'où la faible signature électrique. D'après sa localisation, la signature résulte d'une injection de charges dans la diffusion P d'un transistor PMOS.

La deuxième signature électrique a été relevée au pixel noté 2. Elle est caractérisée par un élargissement d'une commutation suite à l'irradiation d'un transistor PMOS.

Quant à la troisième signature, elle est associée au pixel numéro 3. La zone sensible autour de ce pixel est moins étalée donc les transistors de type Nmos collectent moins de charges. Cela peut se vérifier avec une étude plus fine des courants transitoires.

Dans ce circuit, les courants transitoires sont difficiles à observer mais on peut déjà constater la signature d'appels de courant d'après les légères variations de l'amplitude des transitions sur quelques nanosecondes après l'événement électrique détecté.

Ces premiers résultats d'interaction laser semi-conducteur ont été encourageants. En comparaison avec les résultats de Mr DOUIN, et malgré la forte quantité d'énergie déposée, les réponses électriques ne nécessitent aucun post-traitement afin d'être visualisées.

Pour mieux visualiser les effets induits par le laser, nous avons analysé des chaînes des portes logiques câblées en inverseur avec la technique PULS puis avec la technique P-OBIC pour la visualisation des courant transitoires.

II.1.3.3. Etudes transitoires dans les portes logiques

La deuxième étape a été d'utiliser la technique PULS (PUlsed Laser Stimulation) pour l'analyse d'une chaîne d'inverseur. La technique PULS consiste à faire l'acquisition de la réponse électrique transitoire de manière synchrone aux impulsions laser.

Pour accélérer la vitesse d'analyse, nous avons utilisé les cartes d'acquisitions semi-industrielles. Leur résolution temporelle est plus basse que celle de l'oscilloscope utilisé dans l'étude précédente mais elles sont capables d'effectuer plusieurs milliers d'acquisitions par seconde à la volée.

II.1.3.3.a. Configuration de test PULS

On utilise le sélecteur d'impulsion pour diminuer le taux de répétions laser de 1Mhz à 1kHz. Sa commande se fait par l'intermédiaire du générateur de délai synchronisé sur la source laser. Il permet le déclenchement d'une fenêtre qui va laisser passer une impulsion toutes les millisecondes.

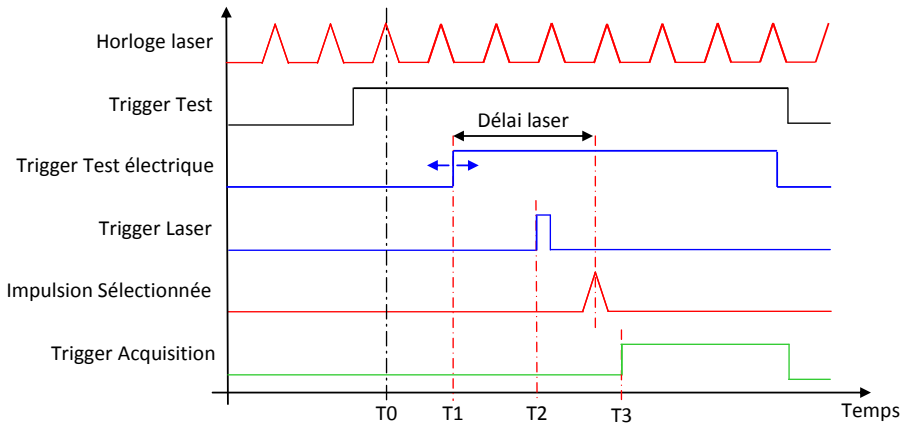


Figure II.12 : Chronogramme de synchronisation du sélecteur d'impulsion.

Une seconde voie du générateur est utilisée pour déclencher la fenêtre d'acquisition de l'oscilloscope. La troisième voie va définir la période de répétition du laser en sortie du sélecteur. La configuration de test synchrone représentée Figure II.13 a servi à l'application de la technique PULS dans un circuit logique combinatoire.

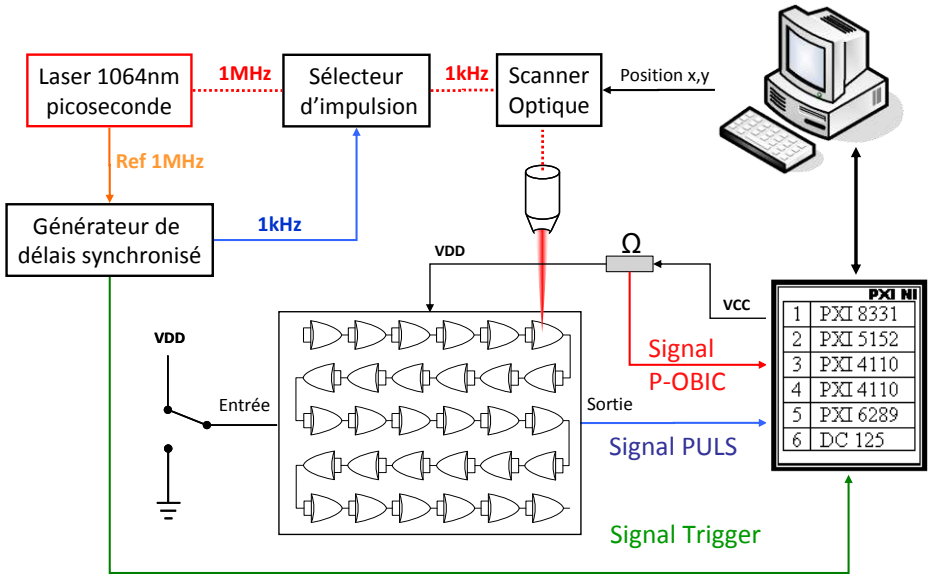


Figure II.13 : Configuration du test PULS utilisé pour l'analyse des chaînes d'inverseurs.

Le circuit est polarisé statiquement avec l'application d'un niveau haut ou bas en entrée des chaînes durant l'irradiation. Un oscilloscope est chargé de la capture de la réponse électrique des chaînes pendant l'irradiation. La particularité de cette technique d'analyse est la méthode d'acquisition en synchronisme avec les impulsions laser.

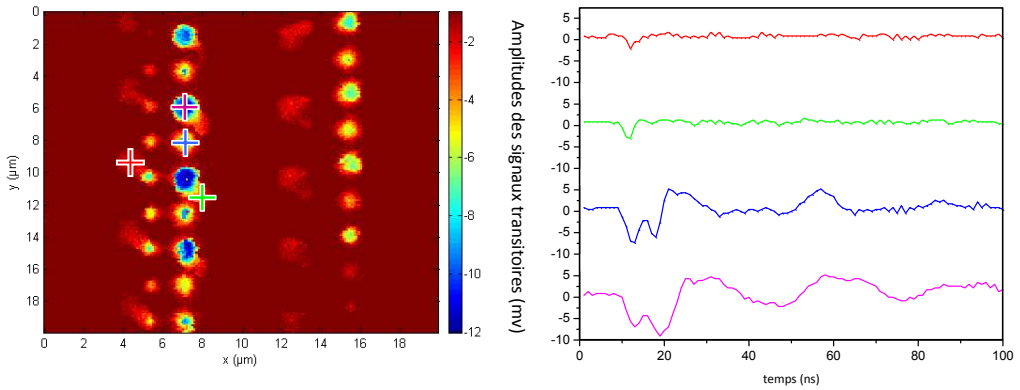
Dans un premier temps, nous avons analysé de simples chaînes de portes câblées en inverseurs. Chaque chaîne est composée de 100 portes logiques de technologie AMS BICMOS 0,35µm.

II.1.3.4. Etude d'une chaîne d'inverseur

L'étude de ces chaînes va nous permettre d'étudier la sensibilité des portes logiques sous irradiation par faisceau laser impulsionnel.

II.1.3.4.a. Signal PULS chaîne d'inverseurs

Le balayage laser est effectué sur une zone restreinte de 20µm*20µm avec un pas de 0,01µm. Quelques minutes sont nécessaires pour effectuer l'acquisition, le balayage de la zone et acquérir les données qui vont constituer la matrice PULS. La matrice PULS se constitue des réponses électriques pour chacun des pixels de la zone scannée par le faisceau laser.



a) b)

Figure II.14 : a) Cartographie de l'amplitude des transitoires observés en sortie de la chaîne d'inverseurs. b) transitoires électriques associés aux pixels pointés sur la cartographie.

A partir d'une simple analyse de la matrice PULS, il est possible d'extraire des grandeurs électriques différentes. La cartographie illustrée Figure II.14a par exemple représente l'amplitude maximale des transitoires électriques mesurés en sortie de chaîne en fonction de la position laser.

L'amplitude des transitoires est ici faible car les transitoires sont filtrés par les multiplexeurs en sortie de chaîne. Un motif de sensibilité répétitif peut être identifié dans ces deux colonnes d'inverseurs car il y a un lien entre l'état logique de l'inverseur et sa sensibilité au faisceau laser.

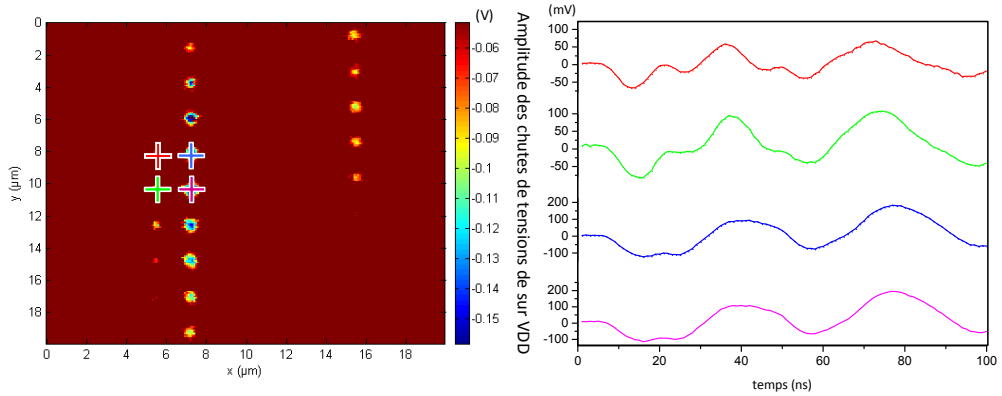
Nous pouvons constater que les motifs de sensibilité ne sont pas exactement de la même amplitude dans tout le champ analysé. L'utilisation de l'objectif 100x permet d'obtenir une taille de spot laser de l'ordre du micromètre mais nous avons limiter le champ du scanner à 20µm*20µm pour avoir l'intensité la plus homogène possible.

Il est possible d'analyser les signaux relevés Figure II.14b. Les deux premiers signaux provenant de pixels sensiblement éloignés des transistors composant les inverseurs, comportent un seul transitoire de tension. Sur les zones fortement sensibles, deux pics par transitoires sont présents. Le premier pic est en synchronisme avec l'irradiation quelque soit l'inverseur de la chaîne irradiée. Ce premier pic serait une signature des appels de courant car il ne se propage pas dans la chaîne. Pour mieux l'étudier, nous avons réalisé une cartographie P-OBIC.

II.1.3.4.b. Signal P-OBIC Chaîne d'inverseur

Dans la configuration P-OBIC, seule la voie de mesure change par rapport à la configuration de test PULS. Les courants transitoires sont mesurés sur l'alimentation. Pour cela, nous avons ajouté une résistance de 100Ω en série sur l'alimentation. Les mesures transitoires représentées Figure II.15b ont été effectuées en mode AC aux bornes du circuit pour s'affranchir au maximum de la bande passante du circuit d'alimentation. Seule l'amplitude du premier pic est intéressante car la suite du signal se compose essentiellement de rebonds électriques induits par le câblage.

La cartographie Figure II.15 a) représente l'amplitude du premiers pic de courant. La sensibilité ne semble pas être corrélée avec l'état des transistors. La différence de sensibilité semble venir du type de transistor.



a) b)

Figure II.15 a) Cartographie des amplitudes de chute de tension observées sur l'alimentation, b) Signature relevée aux bornes de l'alimentation du circuit.

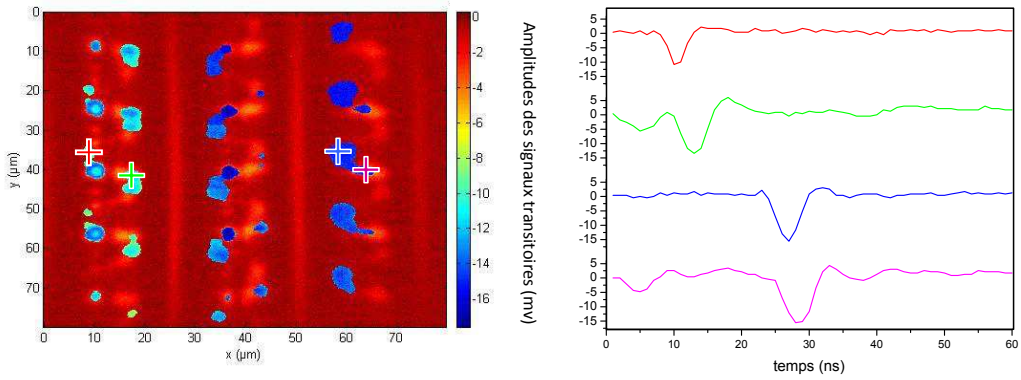
Pour cette étude, les mesures auraient requis une sonde de courant à effet hall amplifiée à grande bande passante. Par la suite, nous ne nous intéresserons plus au courant car notre configuration de test permet seulement de visualiser les forts courants transitoires.

Pour étudier plus en détails les pics observés pendant les mesures PULS, nous avons réalisé une étude sur des portes plus complexes donc plus lentes pour mieux visualiser la vitesse de propagation des deuxièmes pics se propageant dans les portes logiques.

II.1.3.4.c. Etude PULS dans une chaîne de porte XOR.

Dans les circuits complexes, les faibles courants transitoires sont difficilement observables sur l'alimentation car ils sont noyés dans le bruit de l'alimentation. C'est pour cette raison que notre travail sera plus porté sur l'étude des transitoires dans la logique car ils sont plus facilement observables et plus riches en informations étant donné qu'ils sont ici capables de se propager dans la chaîne.

Une deuxième série de mesures a été effectuée sur une chaîne composée de portes ou exclusives. La cartographie Figure II.16a représente l'amplitude des transitoires.



a) b)

Figure II.16 : Cartographie de l'amplitude des transitoires pendant l'irradiation de la chaîne de portes XOR avec l'objectif 100X, b) Signaux électriques transitoires présents dans les motifs de sensibilité des pixels pointés sur la cartographie a).

Le motif de sensibilité a changé avec la complexité des portes, plusieurs niveaux de sensibilités sont présents en particulier d'une colonne à l'autre. Cela peut être la conséquence de nombreux facteurs. Les principaux facteurs sont le filtrage par le multiplexeur de sortie ainsi que la mise en forme du transitoire pendant sa propagation au travers des portes. La distribution des alimentations des différentes colonnes peut jouer un rôle en particulier pendant les appels de courants. Une rotation du circuit a été effectuée afin d'éviter d'incriminer la non homogénéité du faisceau en sortie d'objectif.

Les premiers tests réalisés sous l'objectif 100X ont révélé de forts appels de courant. La cartographie a été réalisée assez loin de la sortie afin de décorréler les signatures purement transitoires propagées de celles induites par les appels de courant sur l'alimentation.

Dans cette chaîne, le temps de propagation de porte à porte est plus long que celui dans la chaîne d'inverseur, donc les signatures induites par les appels de courant sont plus espacées des transitoires électriques se propageant.

Si l'on étudie les réponses électriques d'une même porte Figure II.16b, pendant l'appel de courant aucun transitoire n'est généré. En effet, le transitoire se propageant est produit seulement après la diminution de la chute de potentiel induit par l'appel de courant.

Ce phénomène peut justifier la proportionnalité du déphasage entre les maximums des transitoires ayant une signature de départ de courant et ceux sans, dans une même porte logique.

La signature électrique de ces appels de courant est en phase avec la perturbation laser. Elle peut être un amorçage de mécanisme latchup appelé aussi microlatchup qui se produit quand il y a une très forte densité des charges dans les diffusions.

Ces microlatchups peuvent créer des déphasages au moment de la génération d'un transitoire, rendant les cartographies difficilement exploitables.

Pour limiter les microlathups, il est possible de travailler en dessous du seuil d'énergie nécessaire à l'activation de ces événements en diminuant la densité de photons par unité de surface. Pour cela, nous avons utilisé un grossissement plus faible pour favoriser la génération de transitoires dans la chaîne capable de se propager sans créer de départ de microlatchup. Le champ de vue sera plus grand et l'énergie sera moins confinée car la taille de spot laser est plus grande.

Dans ces conditions, la probabilité de départ de micro latchup sera plus faible et la matrice de données PULS pourra être utilisée pour caractériser temporellement la vitesse de propagation des transitoires induits par laser.

II.1.3.5. Analyse des données PULS

Les zones colorées Figure II.17a superposées à l'image LSM en niveaux de gris sont les zones sensibles au laser. Les couleurs représentent le délai de propagation des transitoires pour atteindre la sortie de la chaîne. Cette représentation du temps de propagation du transitoire généré jusqu'à la sortie de la chaîne d'inverseurs permet de faire des mesure de propagation.

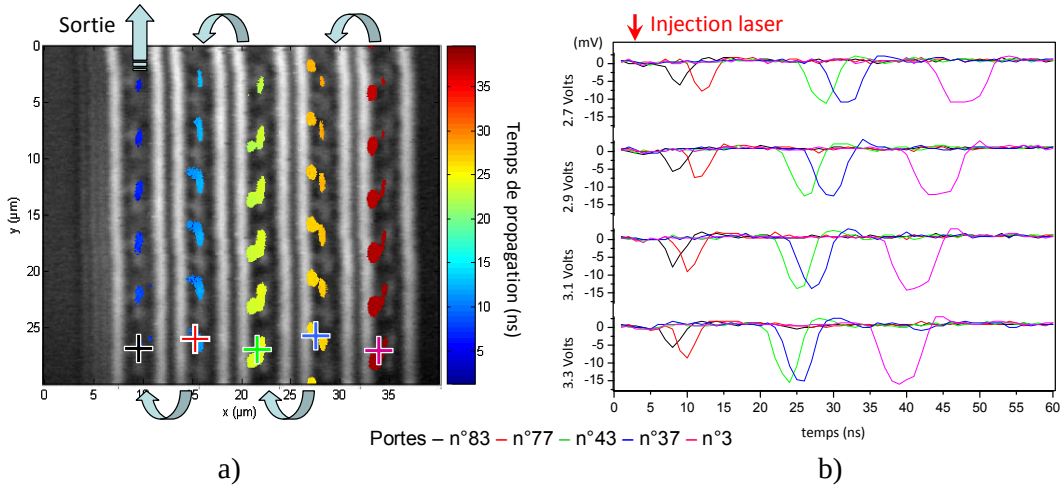


Figure II.17 : Les zones sensibles on été colorisées, elles représentent le temps de propagation des transitoires pour atteindre la sortie de la chaîne. b) Signatures électriques échantillonnées dans différentes colonnes de la chaîne pour différentes tensions de polarisation.

Les signaux représentés Figure II.17b on été extraits des matrices PULS pour différents pixels, dans différentes colonnes de la chaîne, pour différentes tensions d'alimentation.

Les signaux électriques représentés Figure II.17b sont associés aux pixels pointés des croix de repérage sur la cartographie Figure II.17a.

L'amplitude ainsi que la largeur des transitoires dépendent de l'éloignement de la zone analysée par rapport à la sortie de la chaîne. Ces deux paramètres sont faiblement impactés par le changement de tension d'alimentation. Avec cette faible résolution spatiale, les zones sensibles composant les motifs de sensibilité sont quasi identiques suivant la tension de polarisation.

La largeur du transitoire et l'intervalle qui les séparent dépendent du nombre de portes traversées. Les signaux représentés Figure II.17b ont été prélevés dans chaque colonne de la cartographie. Comme la chaîne de portes est en lacet, le nombre de portes varie entre les différents points de prélèvement. L'espacement temporel qu'il y a entre les transitoires dépend directement du temps de propagation par porte multiplié par le nombre de portes.

A partir de la matrice PULS, il est possible de mesurer le retard entre un transitoire généré en début et en fin de chaîne. Cela permet ainsi obtenir le temps de propagation par porte puis il suffit de diviser le retard par le nombre de portes qui les séparent.

Les temps mesurés sont cohérents avec les résultats attendus aux incertitudes près de mesure. L'incertitude découle principalement de notre faible taux d'échantillonnage. Comme le décrit l'Équation II-1, l'incertitude ε_{Tp} dépend de la période d'échantillonnage du signal T_S et du nombre de portes représentées par N_G.

$$\varepsilon_{Tp} = \frac{2T_s}{N_G} \qquad \text{Équation II-1}$$

Dans notre cas, l'échantillonnage est d'une nanoseconde et la mesure se fait entre les portes numéro 3 et 83 soit un total de 80 portes. D'après l'Équation II-1, si l'on prend une incertitude de 20ps induit par le déclenchement du générateur de délai, nous obtenons les temps de propagation par portes suivants :

Tableau II.2 : Temps de propagation par porte dans la chaîne XOR.

Tension d'alimentation (Volts)	2,7	2,9	3,1	3,3
Temps de propagation par porte (ns) +/- 32ps	0,48	0,44	0,4	0,38

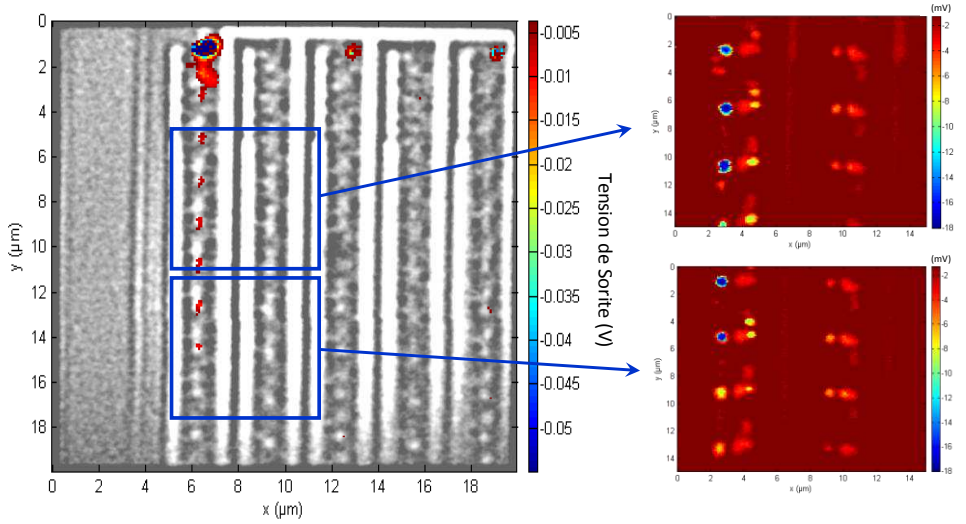
La forte dépendance de la vitesse de propagation des transitoires suivant la tension d'alimentation montre que la mesure de temps de propagation de transitoires peut servir à des caractérisations paramétriques de l'efficacité de collection des charges.

II.1.3.5.a. Conclusion

Ces premiers résultats de la technique PULS confirment la validité du prototype pour des analyses paramétriques. Cette technique permet de générer des transitoires capables de se propager jusqu'en sortie du composant. Il peut y avoir un intérêt de mettre à profit cet aspect dans le domaine d'analyse de défaillance. Cela est notamment le cas dans des circuits qui comportent un "hard defect" les rendant non testables par la voie électrique.

Nous avons eu l'occasion d'appliquer cette technique sur une chaîne défaillante où, quelque soit sa tension ou fréquence d'utilisation, aucun signal ne se propage entre l'entrée et la sortie de la chaîne.

Avec la technique PULS nous avons pu générer des transitoires se propageant quelques portes avant la sortie. Dans le reste de la chaîne, les transitoires induit par laser ne s'effectuaient plus vers la sortie de la chaîne. La discontinuité du motif de sensibilité présent sur la cartographie Figure II.18a met en évidence un problème de discontinuité de la fonctionnalité de la chaîne de portes. Une pré-localisation du problème a été effectuée après l'étude des motifs à plus fort grossissement Figure II.18b.



a) b)

Figure II.18 : a) Cartographie de l'amplitude des transitoires avec la Technique PULS sur une chaîne de portes XOR défaillante superposée à l'image LSM en niveaux de gris. b) zooms des zones sensibles avec l'objectif 100x.

L'arrêt de la propagation des transitoires se manifeste par le changement des motifs de sensibilité, en particulier les zones de pixels bleus Figure II.18b qui ne sont pas présents dans toute la chaîne. Seul les transitoires de faibles amplitudes synchrones à l'irradiation laser sont visibles dans toute la chaîne. Ces transitoires sont la signature de faibles appels de courant qualifiés de microlatchup pendant l'analyse P-OBIC.

L'analyse n'a pas été poussée car la puce ne pouvait pas être détruite, d'autres structures de test non défaillantes étant embarquées sur celle-ci. Ces premiers résultats montrent qu'avec une simple méthode comparative des zones de sensibilité, il est possible de faire de la pré-localisation de zones non fonctionnelles.

II.1.3.5.b. Conclusion Analyse Par Face Avant

Ce type d'étude basée sur la propagation de transitoire utilise la réponse dynamique d'un circuit, ce qui fait partie des avantages des tests par faisceau laser impulsionnel intense. Ce type d'analyse n'est pas envisageable avec un faisceau laser continu ou modulé car la perturbation laser n'est pas suffisamment confinée dans le temps.

La deuxième étape de validation de l'interaction du laser fibré avec un circuit a consisté à effectuer le même type d'analyse avec une injection laser au travers du substrat du circuit.

II.1.3.5.c. Analyses par face arrière.

Le but est d'injecter des charges directement au travers du substrat en évitant les occultations causées par les métallisations de la circuiterie de la face avant.

Le laser LSM utilise les réflexions sur les métallisations pour reconstituer l'image structurelle. Sa longueur d'onde de 1300nm est particulièrement bien adaptée car l'absorption est limitée durant la traversée du substrat.

Le faisceau laser picoseconde 1064nm est quand à lui absorbé par le substrat de silicium. Il faut donc utiliser une énergie conséquente pour compenser l'absorption du substrat ayant lieu avant d'atteindre les zones de collection de charges. Si l'on augmente simplement l'énergie laser pour compenser l'absorption de tout le substrat, on risque de dégrader le silicium. Un compromis doit donc être fait entre l'énergie laser envoyée et l'épaisseur du substrat [Lewis 2001].

Des techniques de polissage de wafer complet sont couramment utilisées dans les laboratoires d'analyse de défaillance. N'ayant pas le privilège d'avoir des wafers complets à ma disposition, nous procédons à l'usinage des boîtiers contenant nos circuits.

II.1.3.5.d. Ouverture de boîtier face arrière.

Pour les boîtiers classiques, l'accès au substrat se fait par une ouverture en face arrière. Sur les composants flips-chip, le substrat est au dessus de la puce donc l'accès se fait via le dessus.

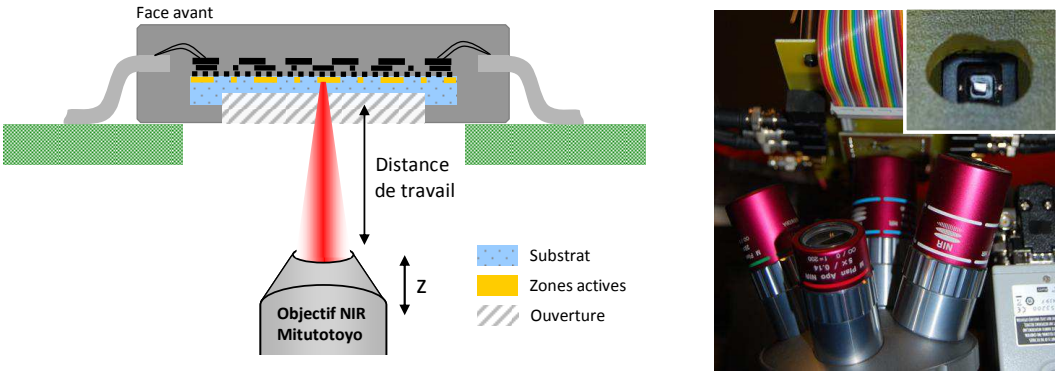
Pour l'ouverture de boîtiers en céramique ou plastique, des techniques de préparation mécanique existent. La technique la plus répandue est l'utilisation d'une micro fraiseuse, servant à usiner le boîtier et le "die-paddle" sur lequel est fixé le circuit.

Notre micro fraiseuse ASAP-1 à la particularité d'avoir une fraiseuse flottante qui supprime une partie des contraintes mécaniques durant l'usinage et permet le polissage de la surface du silicium. La qualité du polissage est rendue homogène grâce à un système de plateau réalisant des mouvements pseudo aléatoires.

Avec cet outil, nous pouvons atteindre facilement des amincissements de substrat en dessous de la centaine de micromètres. Il existe des outils commerciaux basés sur l'usinage par ablation laser, permettant d'obtenir des épaisseurs plus fines avec un meilleur contrôle de la profondeur. Ces outils restent encore très onéreux et dispensables pour nos applications. Pour des applications particulières, il est toujours possible de faire l'amincissement ultra-fin par FIB.[Boit 2008].

II.1.3.6. Analyse par approche face arrière

Pour les analyses via le substrat, il faut prendre en compte les propriétés optiques du substrat qui influent sur la propagation du faisceau jusqu'aux zones actives du circuit. L'atténuation du faisceau lié à l'absorption, paramètre important qui a déjà été abordé au début de ce manuscrit. Le deuxième paramètre important est l'indice de réfraction. Si l'on avance l'objectif d'un micron par rapport au circuit, le point de focalisation du faisceau dans le substrat va avancer de 3,5 fois dans un substrat silicium.



a) b)

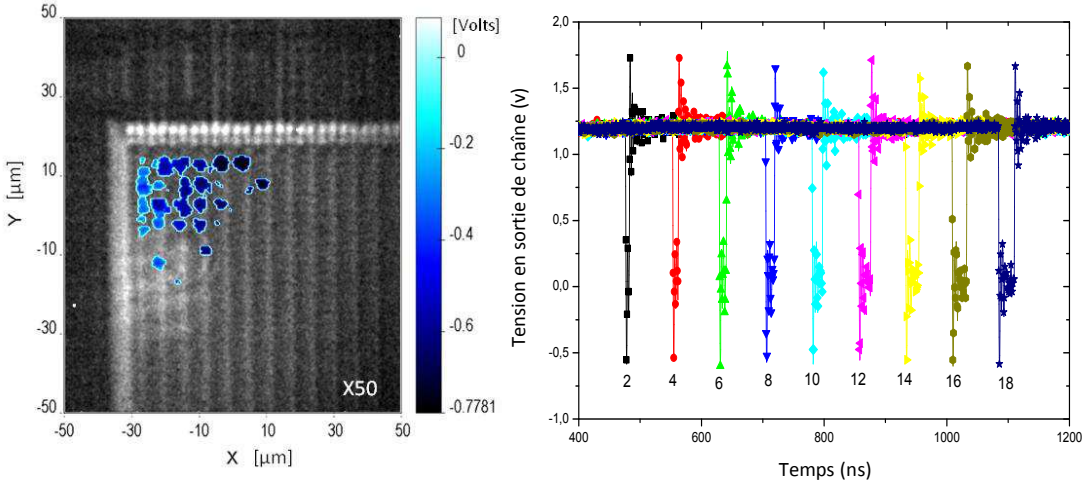
Figure II.19 : a) Schéma de l'accès par la faisceau laser, b) Tourelle d'objectifs et carte de test avec une ouverture dans le PCB+boitier.

Pour atteindre le substrat au travers de l'usinage du boîtier et la fenêtre du socket ou le PCB comme illustré Figure II.19b, nous utilisons des objectifs du fabriquant MITUTOYO qui ont la particularité d'avoir une grande distance de travail. Ce matériel a permis d'effectuer l'analyse d'une chaîne d'inverseur avec une injection de charge au travers du substrat.

II.1.3.7. Mesure PULS Face arrière

La chaîne d'inverseur est composée de 20580 inverseurs. Une large ouverture du boîtier a été réalisée avec un amincissement de substrat à une épaisseur de 130µm.

La configuration de test PULS reste la même que pour les tests des chaînes précédents. Seul le matériel d'acquisition a été remplacé par un oscilloscope 20Gs/s. Avec l'utilisation d'une période d'échantillonnage de 50ps, on augmente la résolution temporelle de la technique PULS.



a) b)

Figure II.20 : a) zones sensibles à l'injections de charge par la face arrière du composant. b) transitoires prélevés dans chaque bloc d'inverseur lors d'une étude par la face avant [Vincent Pouget et al. 2009].

L'analyse par la face arrière donne accès à toute la chaîne contrairement à la face avant où les métallisations bloquent le faisceau. Les transitoires représentés Figure II.20b ont été obtenus par la face avant du circuit en bordure de chaîne pour différentes colonnes d'inverseurs. Les signatures transitoires observées avec une irradiation au travers du substrat sont quasi identiques à celles observés par irradiation par la face avant.

Les niveaux de gris de la Figure II.20a représentent les structures métalliques observées au LSM au travers du substrat et les couleurs les zones sensibles à l'irradiation laser picoseconde 1064nm avec une énergie par impulsion de 200pJ. Sur la cartographie Figure II.20a, nous avons une partie seulement des zones sensibles. Il n'a pas été possible d'effectuer plusieurs mesures car suite à l'irradiation d'une structure aux abords de la chaîne, un appel de courant invasif s'est produit. Il semblerait que ce point isolé des blocks d'inverseurs soit la réponse d'une structure beaucoup plus sensible au laser qui rend la visualisation de la sortie de la chaîne impossible.

Le seuil d'énergie laser dépend de l'éloignement de la structure collectrice. Ainsi, cela est fortement dépendant de la focalisation du faisceau dans le substrat. C'est pour cette raison que la focalisation doit être optimale avant d'appliquer une détermination du seuil d'énergie laser. Pour minimiser la probabilité de ce genre d'événements qui bloquent les analyses et avant de déterminer le seuil laser, il est nécessaire d'effectuer la mise au point sur les zones métalliques pour confiner le maximum d'énergie laser dans le canal du transistor.

Si l'on réajuste le focus, il faut tout d'abord fortement diminuer l'énergie laser. On risque ainsi de favoriser le déclenchement de mécanismes latchups avec une génération de charges plus localisées en profondeur dans le substrat. Ce type de mécanisme peut être invasif et rendre une partie du circuit non fonctionnelle.

Le déclenchement de latchup peut induire des courants de fuites qui créent des équilibres de potentiels dans les structures du circuit le rendant ainsi non opérationnel. Avec une irradiation ponctuelle autour du buffer de sortie de la chaîne, nous avons injecté des charges de façon continue. Cela peut en partie compenser les déséquilibres de potentiel et rétablir la propagation du signal en sortie.

Ce rétablissement n'est pas permanent car il nécessite la présence du faisceau laser. Ce test n'apporte pas d'informations sur les caractéristiques électriques mais a permis de valider la fonctionnalité de la chaîne de porte après l'analyse.

II.2. Conclusion :

Tout le travail présenté dans ce chapitre a servi dans un premier temps à valider la fonctionnalité du prototype du module laser picoseconde et à la mise en place de configurations de test pour les techniques d'analyse P-OBIC et PULS. Ces analyses ont permis la validation de l'interaction laser avec le circuit en comparaison avec des résultats obtenus précédemment avec une autre chaîne laser de la plateforme ATLAS.

Ces mesures ont déterminé un ordre de grandeur des seuils en énergie laser pour des analyses au travers du substrat et de valider la tenue au flux laser des éléments optiques utilisés dans le prototype.

La technique PULS et TRLS ont déjà fait leurs preuves dans des circuits de logique comminatoire et analogiques. Comme les circuits numériques séquentiels représentent la majeure partie des études des laboratoires d'analyses de défaillance, nous allons décrire dans le chapitre suivant comment mettre à profit l'utilisation d'une source laser impulsionnelle pour l'analyse de circuits numériques séquentiels.

Nous allons également voir une étude de déclenchement d'événements latchups avec des mesures de sensibilité en fonction de la profondeur de focalisation laser.

Chapitre III

Résultats expérimentaux obtenus avec le prototype IMS/ATLAS

Chapitre III : Résultats expérimentaux obtenus avec le prototype IMS/ATLAS

III.1. Introduction

Ce chapitre présente la mise en œuvre de techniques d'analyses par stimulation laser impulsionnelle utilisant l'équipement prototype du module laser picoseconde sur la plateforme ATLAS ainsi qu'une étude originale utilisant le processus TPA qui ne sera pas possible sur CIMPACA mais offre des perspectives à moyens termes quand la source femtoseconde sera disponible.

Dans le chapitre précédent, la fonctionnalité du prototype a été validée par les études de l'interaction des impulsions laser délivrées par module laser picoseconde sur des circuits élémentaires via la face avant et au travers du substrat. La localisation du dépôt d'énergie peut déclencher des mécanismes destructifs qui vont altérer le circuit voir le rendre non testable.

Nous avons travaillé autour du seuil minimum laser avec une gamme d'énergie la plus faible possible pour éviter d'altérer le ou les défaut(s) du circuit par un apport d'énergie lumineux trop important. Sachant que la source laser picoseconde utilisée émet des impulsions à 1064nm, en travaillant autour du seuil laser, l'effet thermique est négligé dans le substrat. Elle n'offre donc pas de possibilité de réaliser des analyses par effet thermique.

Ce chapitre est consacré à l'étude des potentialités en terme d'analyses de circuits CMOS numériques qui sont les principaux circuits analysés par les laboratoires d'analyse de défaillance partenaires de ce projet.

La première partie de ce chapitre décrit l'étude de la signature photoélectrique liée aux impulsions laser picoseconde dans des circuits composés de logique numérique séquentielle. Nous avons choisi d'étudier ce type de structure qui a un fonctionnement semblable aux structures de test embarquées dans les circuits numériques complexes.

Les structures des circuits étudiés sont faiblement intégrées pour faciliter l'identification des zones sensibles et limiter le risque d'éventuelles dégradations provoquées par le déclenchement de mécanismes tel que les Latchups.

La seconde partie de ce chapitre est consacrée à l'étude du déclenchement de mécanismes Latchups. Des mesures de profils de seuils de sensibilité ont été réalisées par le processus d'absorption linéaire (SPA). Les résultats ont été complétés avec l'utilisation d'une source laser de la plateforme ATLAS délivrant des impulsions de type femtoseconde. Les mesures du seuil laser en fonction de la profondeur de focalisation laser par absorption non linéaire (TPA) ont donnée une estimation de la profondeur du volume sensible SEL cohérente avec la littérature.

Le but des ces études a été de développer une méthodologie d'analyse transposable dans le milieu industriel. Celle-ci sera illustrée dans le chapitre suivant avec la mise en place du module laser picoseconde dans un équipement d'analyse industriel du laboratoire d'analyse de défaillance CIMPACA.

III.2. Etude de circuits numériques séquentiels par stimulation laser picoseconde

III.2.1. Objectif de l'étude

Le but de l'étude de la stimulation laser picoseconde est de répondre aux limitations rencontrées par les laboratoires d'analyse de défaillances durant l'utilisation de techniques d'analyses basées sur stimulation laser continue. La limitation actuelle des systèmes d'analyse par faisceau laser continu se pose principalement lors des études de structures numériques complexes très intégrées.

Les techniques d'analyse utilisant une stimulation laser continue sont limitées par la génération excessive de charges qui diffusent dans le substrat et perturbent les structures de test chargées d'adresser un noeud du circuit.

Pour illustrer les capacités en termes d'analyse de la stimulation laser picoseconde dans une circuiterie complexe, nous avons choisi d'étudier des structures séquentielles élémentaires. Ces structures vont servir à valider l'application de la stimulation laser picoseconde dans des structures du type "chaîne de scan" qui sont des structures séquentielles couramment utilisées pour multiplexer le test de différents noeuds du circuit.

Le principe d'une chaîne est de récupérer les informations par un chargement en série, ce système permet de couvrir un maximum de transistors avec l'utilisation d'un nombre de connexions électriques très réduit.

Les structures élémentaires analysées sont des registres à décalage car ce sont des circuits simples se rapprochant le plus du fonctionnement des « chaînes de scans ». L'étude de ces registres à décalage porte sur la caractérisation de la sensibilité de composants fonctionnels par stimulation laser picoseconde. Les configurations de tests sont inspirées de techniques utilisées pour l'étude des SEEs par stimulation laser (cf chapitre1) avec l'utilisation de matériels permettant de maîtriser précisément l'instant de l'injection laser.

Le premier cas d'étude a permis de mettre en place une configuration de test où la stimulation laser n'est pas synchronisée avec la stimulation électrique. Le deuxième cas d'étude utilise des configurations de test proches des techniques de stimulation laser PULS et TRLS. Ces configurations ont déjà été introduites dans les précédents chapitres et peuvent être facilement mises en place avec l'utilisation du module laser picoseconde pour la localisation de défauts.

III.3. Mise en place expérimentale

Cette première section va présenter des cas d'étude de la sensibilité du circuit à une stimulation laser en utilisant le processus d'absorption linéaire (SPA) avec une stimulation laser à la longueur d'onde de 1064nm et des impulsions de 30ps.

Le but de ces études est de mettre en place une méthodologie de test adaptée aux structures analysées présentes dans les laboratoires d'analyse de défaillance avec des configurations compatibles avec les outils qui y sont présents.

En règle générale, les programmes de test des circuits des laboratoires d'analyse de défaillance sont conçus pour fonctionner avec un testeur capable de piloter des centaines de signaux simultanément. Comme la mise en place expérimentale est souvent lourde, nous avons substitué le testeur électrique par un simple générateur de mots double voies permettant d'avoir une configuration de test similaire et suffisante pour tester nos registres à décalages.

III.3.1. Générateur de pattern

Le générateur de mots utilisé est le model Agilent 91110A, il dispose d'une entrée Trig-In qui déclenche la génération des patterns. La première voie du générateur est utilisée pour la génération du signal d'horloge, la deuxième pour la génération d'un créneau. Ce créneau composé d'un bit qui va se propager dans le registre durant les stimulations par laser. La longueur du mot numérique a été définie selon le nombre de bits du registre afin de vider entièrement le registre après stimulation laser.

III.4. Test de la sensibilité de registres à décalages.

III.4.1. Stimulation laser picoseconde en mode asynchrone.

III.4.1.1. Description de registre testé.

Le premier cas d'étude porte sur le circuit MC14557B qui est un registre à décalage programmable de 1 à 64 bits. Son boîtier a été ouvert par la face arrière pour une stimulation laser via le substrat.

Dans la configuration présentée, le module laser picoseconde émet en continue de façon asynchrone à la stimulation électrique du circuit. Dans ce mode de test dit "asynchrone" le générateur de pattern n'est pas synchronisé avec les impulsions laser. Seule l'observation des signatures électriques induites par laser sont effectuées de façon synchrone au pattern de test.

Dans une structure séquentielle, la probabilité de générer une erreur est plus faible que dans de la logique combinatoire. En effet, la probabilité de capture d'événements transitoires induits par stimulation laser est plus forte au moment des commutations. Dans le but d'augmenter la probabilité d'interaction laser, il est préférable d'avoir une fréquence d'irradiation laser plus haute que la fréquence de stimulation du circuit sous test.

III.4.2. Configuration expérimentale de test

Dans la configuration de test représentée Figure III-1, la source laser impulsionnelle émet un train d'impulsion en continu à 5Mhz. Le pattern de test est lui aussi déclenché en continu pendant qu'un oscilloscope observe la sortie du registre de façon synchrone au stimulus électrique.

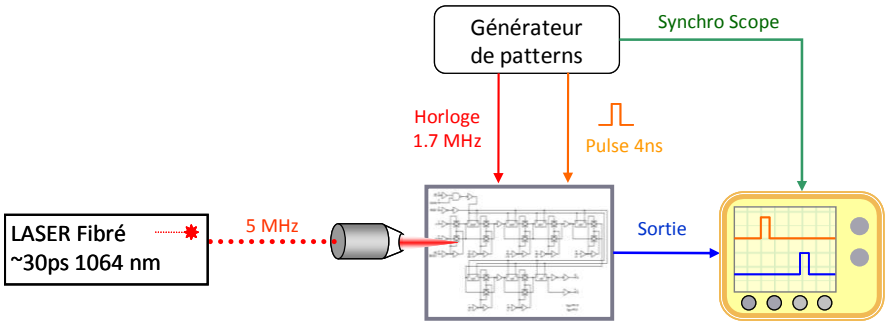


Figure III-1 : Configuration de test avec impulsion laser asynchrone au stimulus électrique.

Pendant le balayage du circuit par le faisceau laser, les acquisitions de l'oscilloscope sont asynchrones aux impulsions laser. On utilise le double trigger de l'oscilloscope pour détecter les signatures électriques de l'interaction avec le laser. Le premier trigger sert à la synchronisation de la fenêtre d'acquisition et le deuxième fournit un signal suivant une grandeur électrique choisie du signal de sortie. Si la grandeur mesurée est en dehors de l'intervalle défini, un signal va être généré sur la sortie Trig-Out de l'oscilloscope.

Par exemple, en définissant des conditions de déclenchement de l'oscilloscope sur la durée du créneau en sortie du registre, la récupération de ce signal de l'état de l'oscilloscope en fonction de la position laser, nous avons obtenu la cartographie représentée Figure III-2.

III.4.2.1. Résultats en mode asynchrone

Les zones en rouge de la cartographie Figure III-2 représentent les zones les plus sensibles à la stimulation laser qui ont un impact sur la durée du créneau en sortie.

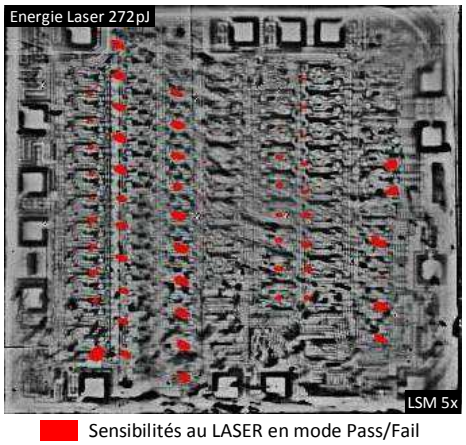


Figure III-2 : Cartographie de toute la puce des zones sensibles qui ont un impact sur la durée du créneau en sortie. Cartographie LSM superposée en niveaux de gris.

L'énergie laser utilisée pour obtenir cette cartographie est de 272pJ par impulsion. Cette énergie à été déterminée en augmentant progressivement l'énergie laser jusqu'à visualiser des signatures électriques visibles en sortie du circuit. Ce niveau d'énergie n'est pas représentatif du seuil laser minimum : avec l'utilisation de l'objectif 5x le spot laser n'est pas très confiné et la haute fréquence de répétition laser peut induire des effets cumulatifs.

La cartographie Figure III-2 est une mosaïque de plusieurs cartographies, car la taille du champ de vue du scanner optique avec l'objectif 5x ne permet pas d'analyser la puce entière. Les zones repérées sont les plus sensibles à la stimulation laser car nous sommes en mode asynchrone et la probabilité d'interaction ou de capture des événements n'est pas de 100%.

Ce type de configuration de test peut être utilisée en pré-localisation de défauts si le composant défaillant est sensible à un faible apport de charges. La configuration est simple à mettre en œuvre et permet de cartographier la totalité de la puce très rapidement.

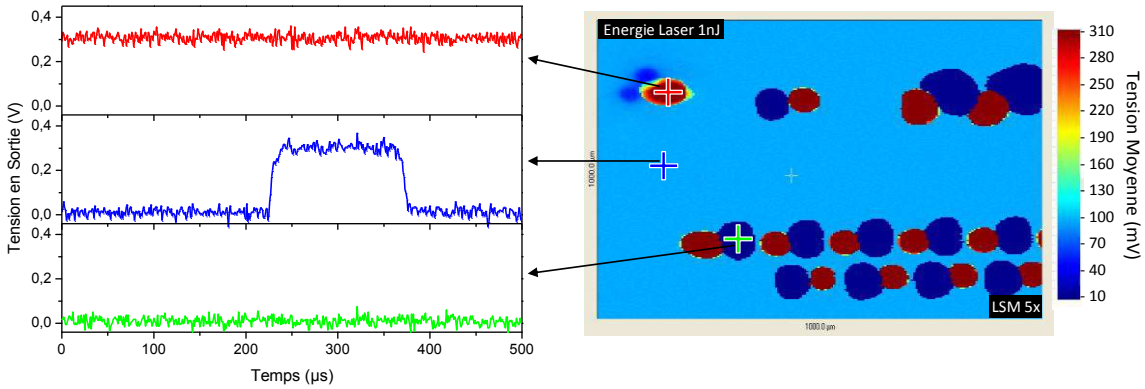
Pour des analyses plus précises, ce mode de cartographie est lent car il y a un temps de latence principalement dû au temps de calcul de l'oscilloscope auquel s'ajoute le temps de réarmement et de transfert de l'information entre les différents instruments de mesure.

III.4.2.2. Acquisition d'une matrice de données.

Afin de réduire les temps d'acquisition des données de l'oscilloscope, nous avons utilisé des cartes d'acquisitions semi-industrielles. La résolution temporelle de ces cartes est plus faible mais permet de réaliser des balayages beaucoup plus rapides. Ainsi, nous avons utilisé une énergie laser plus conséquente afin d'induire des signatures électriques observables par les cartes d'acquisitions qui sont moins sensibles que l'oscilloscope utilisé précédemment. Cette configuration a permis l'enregistrement de toutes les réponses électriques associées à chaque pixel irradié par laser sous forme d'une matrice de données.

La matrice est récupérée avec un seul balayage laser et permet l'étude de plusieurs paramètres électriques par simple post-traitement de la matrice de données.

Par exemple, la cartographie Figure III-3b représente la valeur moyenne du signal acquis par l'oscilloscope pour chaque pixel irradié. Les trois principales signatures électriques observées sont représentées Figure III-3a.



a) b)

Figure III-3 : a) signatures électriques typiques de l'interaction laser, b) cartographie de la tension moyenne de la fenêtre d'acquisition de l'oscilloscope.

L'amplitude du signal de sortie est faible car la sortie du registre n'est pas adaptée avec les 50 Ohms de l'entrée de la carte d'acquisition. Le signal bleu est le créneau attendu en sortie de registre sans perturbation laser. Il n'y a donc pas d'interaction laser visible en sortie du registre à décalage autour du pixel d'où a été extrait ce signal.

Les signatures électriques des autres pixels représentés Figure III-3a indiquent que nous sommes bien au dessus de l'énergie laser seuil car la signature s'étale sur plusieurs front d'horloge. Les niveaux de sorties constants sur toute la fenêtre d'acquisition peuvent être la conséquence d'une génération de charges importante dans une commande de la configuration de la longueur de registre qui aurait pour conséquence une désynchronisation du créneau attendu dans la fenêtre d'acquisition définie.

N'ayant pas de données précises de l'architecture interne de la circuiterie ni sa topologie, notre interprétation est rendue difficile. Nos analyses se sont donc focalisées sur l'étude de la sensibilité du circuit à la stimulation laser.

Pour la suite de cette étude, nous avons étudié plus en détail un motif de sensibilité situé en haut à droite de la cartographie Figure III-3b. Dans cette zone, le laser a un impact sur la largeur du pulse en sortie avec la durée du créneau qui semble proportionnel à l'énergie laser déposée.

La cartographie Figure III-4a est un zoom de la zone d'intérêt ROI ("Region Of Interest"). L'édition de la matrice de donnée nous permet de représenter la superposition de toutes les réponses électriques pour chaque pixel de la zone encadrée en rouge sur une seule et même base de temps. Cette représentation en dessous de la cartographie met en évidence l'influence du laser sur la durée d'impulsion en sortie. Pour une étude plus résolue de la zone sensible, nous avons effectué un zoom sur la zone encadrée en rouge avec un grossissement plus fort.

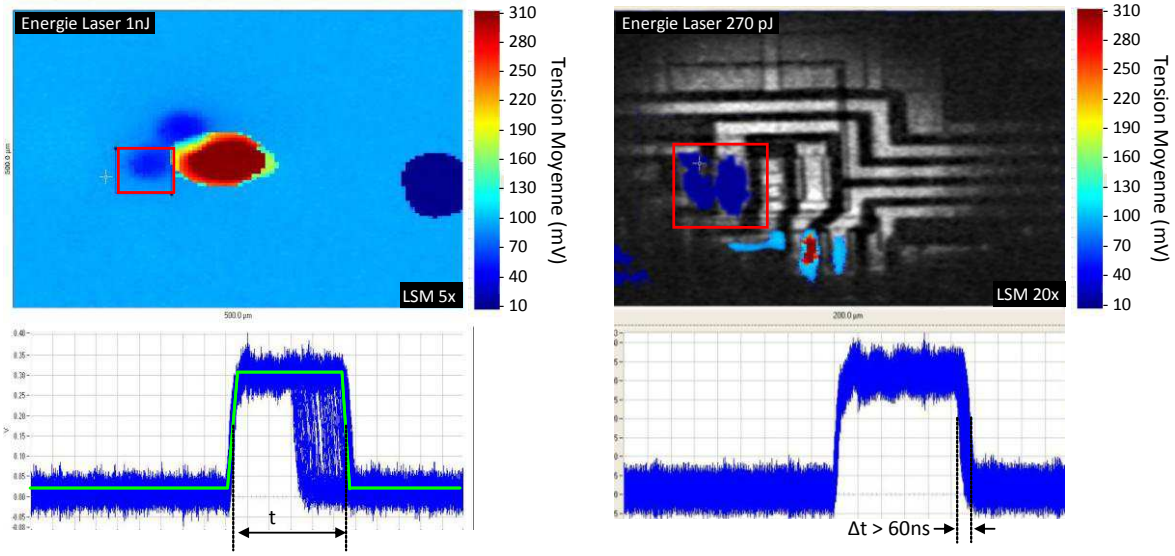


Figure III-4 : a) Cartographie de la tension moyenne mesurée et superposition des signatures électriques associées à la zone encadrée en rouge. b) zoom avec l'utilisation d'un objectif 20x avec une superposition de l'image LSM en niveaux de gris.

La cartographie Figure III-4b a été réalisée avec un objectif 20x. La taille du spot laser au point focal étant plus faible qu'avec le 5x, les zones sensibles sont mieux résolues et l'énergie et le seuil laser plus faibles.

Nous avons défini une ROI dans la zone encadrée en rouge Figure III-4b pour étudier plus précisément l'influence de l'énergie laser. L'impact sur la durée du créneau en sortie est bien plus faible car l'énergie laser a été fortement réduite.

III.4.2.3. Etude paramétrique de la sensibilité

Les cartographies représentées Figure III-5 ont été effectuées pour différentes énergies laser. Elles sont représentatives de la distribution spatiale de la collection de la structure. Plus il y a d'énergie laser plus la perturbation de la durée du créneau est importante.

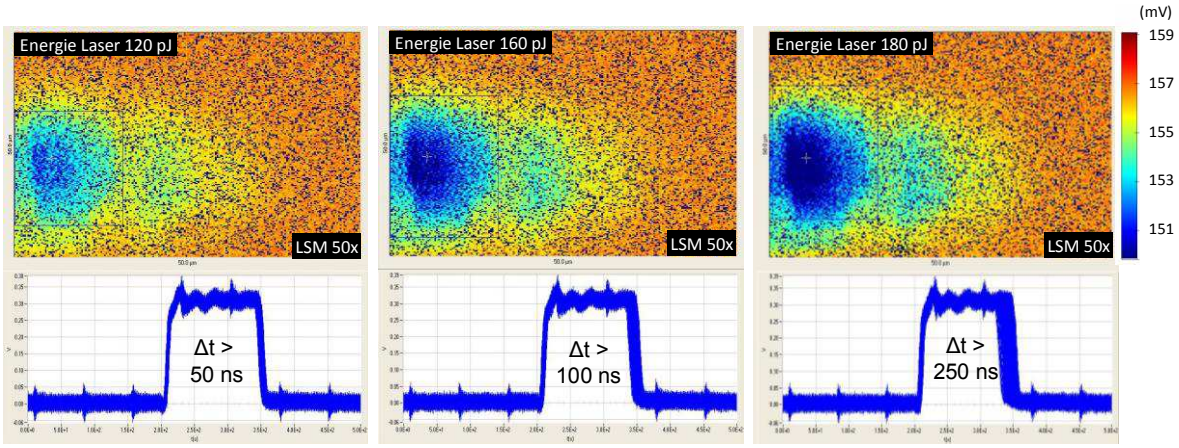
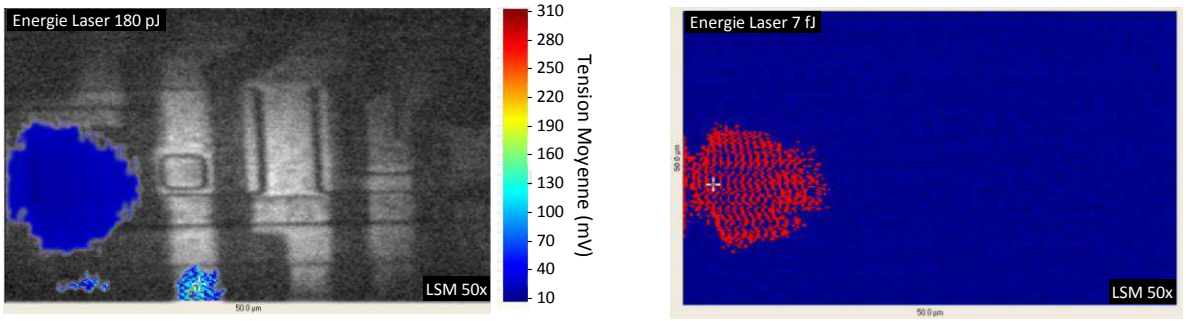


Figure III-5 : Evolution de la sensibilité en fonction de l'énergie laser déposée avec un objectif 50x.

La non uniformité des zones est la signature du mode asynchrone car la sensibilité à la stimulation laser est fortement liée à l'état de polarisation de la structure et donc à l'instant de capture de l'événement électrique.

Ces trois cartographies représentent l'évolution de la sensibilité en fonction de l'énergie laser déposée. Elles illustrent la possibilité de quantification de la sensibilité d'une structure en fonction de l'énergie laser avec une configuration de test asynchrone.

Il est aussi possible d'utiliser ce mode asynchrone pour déterminer un seuil d'énergie minimum de la zone. Pour cela, nous avons utilisé un objectif 100x pour les cartographies Figure III-6 et diminué l'énergie jusqu'à avoir la signature de la non uniformité de la zone sensible comme sur la cartographie Figure III-6b.



a) b)

Figure III-6 : a) Cartographie à faible énergie avec l'objectif 100x, b) autour du seuil laser avec oscilloscope haute résolution.

La cartographie Figure III-6a a été réalisée avec une énergie laser de 180pJ par impulsion. L'étude des signatures électriques nous indique qu'il y a encore de fortes interactions avec le circuit à ce niveau d'énergie (zones sur le bas de la cartographie). Comme la résolution temporelle de la carte d'acquisition ne permet pas de détecter les plus faibles variations temporelles, nous avons utilisé un oscilloscope avec un taux d'échantillonnage de 20Gs/s.

L'oscilloscope est utilisé en mode Pass/Fail avec comme condition de déclenchement la variation de la durée du pulse de sortie de +/- 2ns. Avec cette configuration de test, nous avons détecté des variations temporelles beaucoup plus faibles avec seulement 7fJ d'énergie laser et obtenu la cartographie Figure III-6b. Nous pouvons constater la signature du mode asynchrone de part l'irrégularité de la zone sensible qui montre que l'on travaille bien autour du seuil laser en fonction de l'état logique de la structure irradiée.

III.4.3. Conclusion

L'étude de sensibilité par stimulation laser asynchrone peut s'appliquer à tous types de structures actives transistors ou capacités ou simple jonction. L'avantage de ce mode test est l'indépendance de la stimulation laser avec la stimulation électrique du circuit. Pour des études plus fines du seuil laser, nous devons synchroniser la stimulation laser avec le stimulus électrique.

III.4.4. Stimulation laser picoseconde synchrone.

Cette section de ce chapitre porte sur l'étude de la sensibilité du composant en fonction de l'instant d'injection laser par rapport à une stimulation électrique. Nous allons décrire une configuration de test et une méthodologie pour définir une fenêtre temporelle d'injection pertinente à analyser.

Cette fenêtre temporelle sensible est appelée communément la fenêtre de temps critique dans la communauté chargée de l'étude des effets des radiations. L'étude de cette fenêtre temporelle permet de la quantifier très finement à tous les instants où le circuit est le plus vulnérable donc susceptible de faire des erreurs en présence de particules [Pouget 2004].

La mesure s'effectue avec une irradiation laser synchrone à la stimulation électrique donc requiert une maîtrise de la quantité d'énergie et l'instant de l'envoi de l'impulsion laser. Ce type de mesures va dépendre de l'efficacité de collection des charges induites par le laser et peut être utilisé comme critère de sensibilité pour l'étude de structures défaillantes.

Avec l'utilisation d'une grande quantité d'énergie laser, il est possible d'induire un transitoire capable de se propager dans une zone non adressable électriquement et qui pourra être capturé par des structures de test embarquées type "chaîne de scan".

Pour l'étude de la sensibilité, nous avons utilisé un registre disposant de sorties parallèles bufférisées servant à visualiser la propagation des signatures électriques induites par laser.

III.4.4.1. Description du registre à décalage 8bits

Le circuit fonctionne sur le même principe que les structures de test de type "chaîne de scan" embarquées dans les circuits. Ce type de structure est difficile à tester par stimulation laser continue car les buffers sont souvent perturbés par diffusion des charges induites par laser.

Notre circuit de test est un registre à décalage de 8bits, disposant de sorties parallèles bufférisées qui ont servi à la visualisation de la propagation du signal et à l'observation des signatures électriques induites par lasers. L'analyse de ce type d'architecture va permettre de valider la capture d'un événement induit par stimulation laser par une logique numérique séquentielle.

La différence majeure de la configuration de test avec le registre précédent est la synchronisation entre la stimulation électrique et l'impulsion laser. La configuration de test représentée Figure III-7 permet d'envoyer une seule impulsion par pixel de façon synchrone au pattern de test électrique.

III.4.4.2. Configuration expérimentale de test

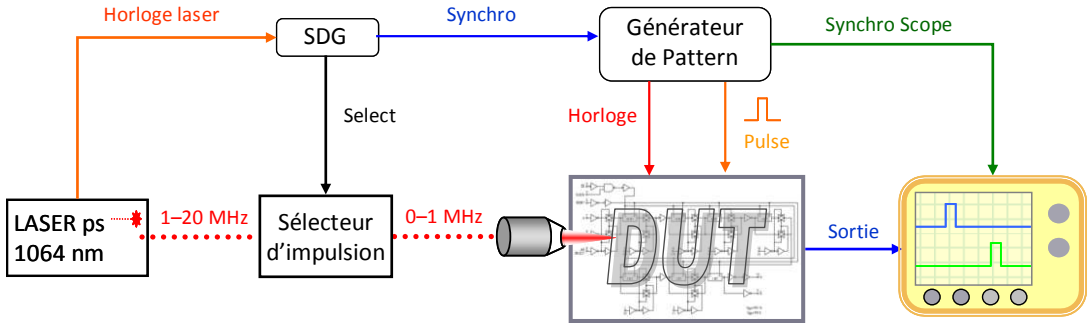
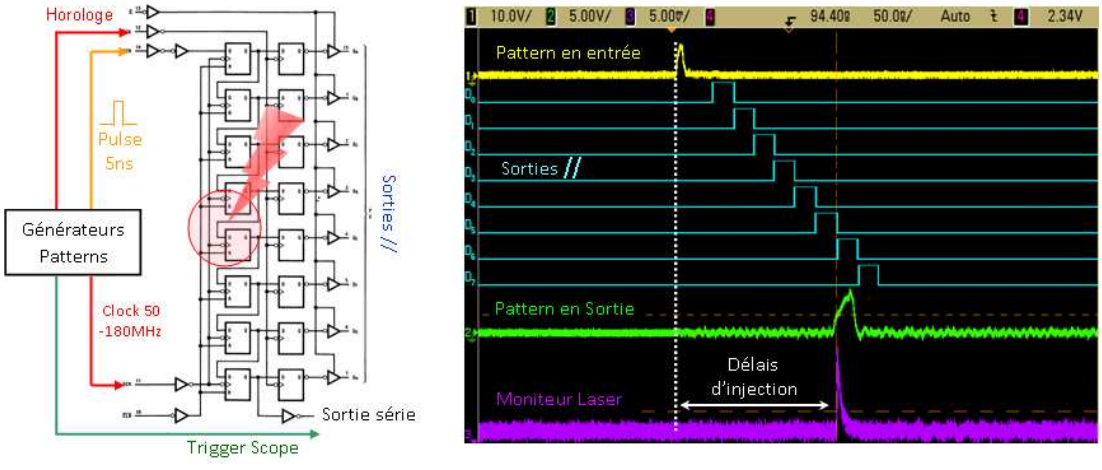


Figure III-7 : Schéma de principe de la configuration de test synchrone à la source laser

III.4.4.3. Synchronisation du test

L'horloge laser est utilisée comme référence temporelle pour la synchronisation des différents instruments de la chaîne de mesure. Le déclenchement de l'électronique s'effectue sur une première impulsion laser qui déclenche l'électronique chargée de la sélection de l'impulsion suivante. Cette même électronique déclenche à son tour la génération du pattern de test électrique. Comme dans le mode asynchrone décrit précédemment, un oscilloscope est chargé de l'acquisition de la réponse électrique en sortie du circuit de manière synchrone au pattern de test.

Nous avons utilisé l'horloge du registre pour déclencher les buffers des sorties parallèles afin de visualiser la propagation du créneau dans les bascules comme sur le chronogramme Figure III-8b.



a) b)

Figure III-8 : a) Structure du registre à décalage Latché, b) moniteur de l'arrivée de l'impulsion laser.

Le signal violet représenté Figure III-8b provient d'une photodiode placée en sortie du sélecteur d'impulsion. Cette photodiode permet la synchronisation de l'impulsion laser par rapport au pattern de test électrique.

Comme nous le savons, la sensibilité des structures change suivant l'état logique interne. Pour qu'une signature électrique soit visible sur les sorties du circuit, il faut que le transitoire généré par la stimulation laser soit capturé par celle-ci. Afin de définir la fenêtre d'injection laser où la probabilité d'interactions est la plus élevée, nous avons focalisé nos mesures autour des fronts de commutations.

Dans cette configuration, l'injection de charge est déclenchée de façon synchrone au pattern. Un balayage de l'impulsion laser par rapport au pattern de test électrique est nécessaire pour analyser la sensibilité du circuit. Afin de balayer la fenêtre la plus pertinente possible, nous avons utilisé un créneau de référence d'un seul bit.

Il est difficile de déterminer avec précision les délais induits dans les câbles de synchronisation. Ainsi, pour augmenter la probabilité d'interaction, nous avons désynchronisé le sélecteur d'impulsion de la source laser, ce qui provoque un faible balayage de l'impulsion laser par rapport au pattern de test pendant la cartographie.

Ce mode test est préconisé pour le repérage des zones sensibles. Une fois la cartographie effectuée, nous obtenons des zones sensibles non uniformes semblables à celle du mode asynchrone. Après avoir resynchronisé le sélecteur d'impulsion avec le laser, on pointe le faisceau laser sur une zone sensible de la ROI puis l'on ajuste le délai avant l'injection laser jusqu'à visualiser la perturbation électrique attendue dans la zone pointée par le faisceau laser. Avec cette technique, il est simple de définir des plages d'injection laser pertinentes.

III.4.4.4. Signatures électriques typiques

Pour balayer le pattern avec l'impulsion laser, le paramètre de synchronisation que l'on va faire varier est le délai entre le pattern de test électrique et l'impulsion laser nommée tl=N*ts avec *ts* le pas d'analyse.

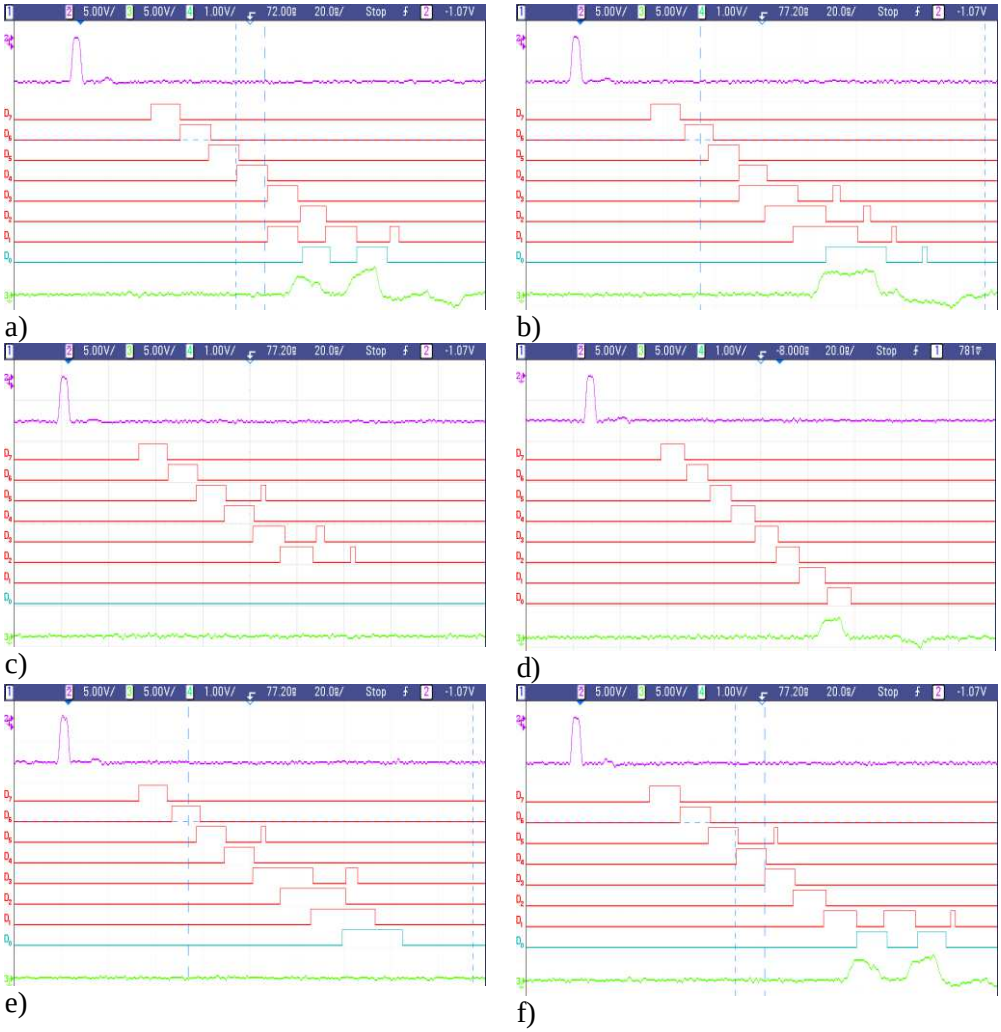


Figure III-9 : Signatures électriques suite à l'irradiation de différentes bascules du registre pour différents délais de synchronisation avec ts = $1/f_{clock}$: a) 7ème bascule 1×ts, b) 5ème bascule à 2×ts, c) 7ème bascule à 3×ts, d) 6ème bascule 3×ts, e) 5ème bascule à 4×ts et f) 6ème bascule 5×ts.

La Figure III-9 illustre les signatures électriques typiques résultant de stimulation pour une seule impulsion laser et différents instants d'injection dans différentes bascules du registre. Elles illustrent la maîtrise de l'instant d'injection laser et valident l'interaction laser picoseconde avec ce circuit avec la propagation de signature laser sur les sorties parallèles du registre.

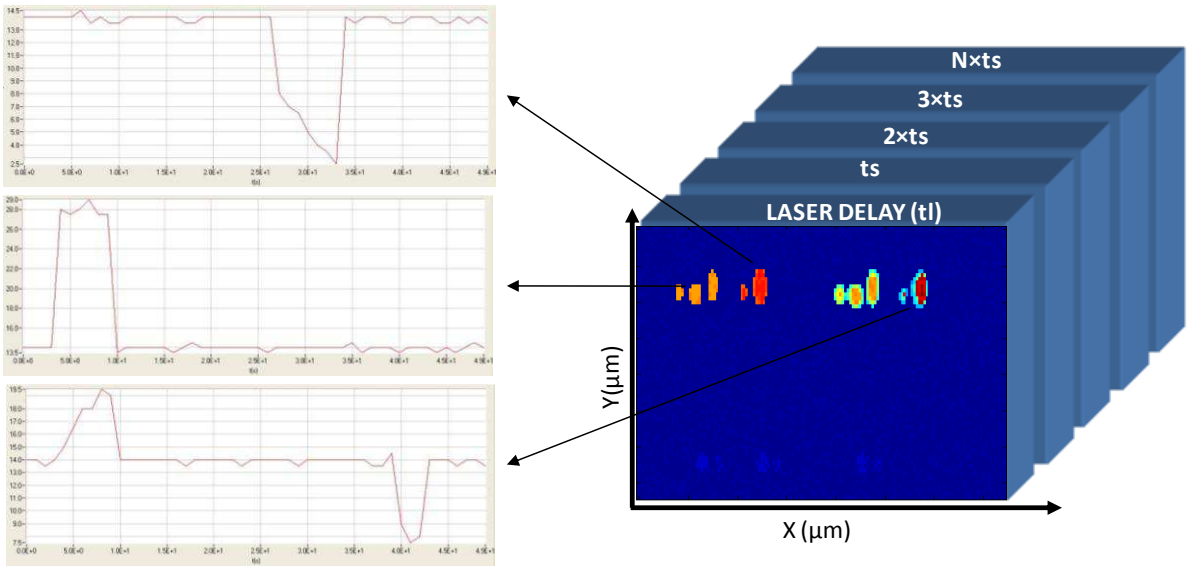
Cette technique peut servir à injecter des charges à un instant bien précis par rapport au pattern de test dans le but de générer un transitoire capable de se propager dans un circuit défaillant. Elle peut aussi servir à remonter à l'origine de la rupture de continuité du signal dans le cas de "hard-defects".

La gigue temporelle de synchronisation maximum est de ~+/- 25ps entre les impulsions lasers et le pattern de test. Elle provient du déclenchement du générateur de délais et du générateur de pattern. Il est possible de réduire cette gigue en synchronisant les horloges de références du générateur de pattern et du générateur de délais sur la source laser. Comme la durée des impulsions laser utilisées est de 30ps et la distribution du faisceau est gaussienne, les variations de sensibilité peuvent être considérées comme continues devant les 25ps de gigue si les pas d'analyse sont assez fins. Pour nos analyses, il n'y a pas d'intérêt de synchroniser les horloges de référence car la fréquence d'horloge du circuit du registre à décalage est basse.

Nous avons automatisé le changement de la synchronisation entre le laser et le générateur de délais pour effectuer des cartographies en fonction de l'instant d'injection laser. Cela nous a permis de constituer une matrice composée de la durée du pulse en sortie en fonction de l'instant d'injection laser.

En répétant les cartographies de la mesure de la durée du créneau en sortie avec $tl=N\times ts$ on obtient la matrice de données Figure III-10b.

III.4.4.5. Traitement de la matrice de données



a) b)

Figure III-10 : a) vecteurs prélevés dans la matrice qui représente la variation de la durée d'impulsion en sortie fonction (N*ts), b) matrice de données contenant la durée d'impulsion en sortie fonction (x,y,N(ts)).

Cette matrice de cartographies permet de tracer des vecteurs de sensibilité en fonction de l'instant d'injection laser tl pour un pixel donné. Trois vecteurs de la matrice on été tracés Figure III-10a. Ces vecteurs illustrent les différences de sensibilité en fonction de l'instant d'injection du faisceau laser et la position dans le circuit.

En théorie, l'évolution de la sensibilité en fonction de l'instant de l'envoi de l'impulsion laser doit être continue car la distribution du faisceau laser est gaussienne dans l'espace et la durée d'impulsion associée aux mécanismes de collection de charges sont de l'ordre de grandeur du pas d'analyse *ts*.

Pour une meilleure lisibilité, les points composant les vecteurs de sensibilité ont été reliés. Chaque point du vecteur représenté Figure III-10a est issu d'une cartographie 2D. Nous allons voir comment définir le nombre de cartographie N afin de se limiter à une plage d'instant d'injection laser pertinente.

III.4.4.6. Optimisation de la fenêtre d'injection laser

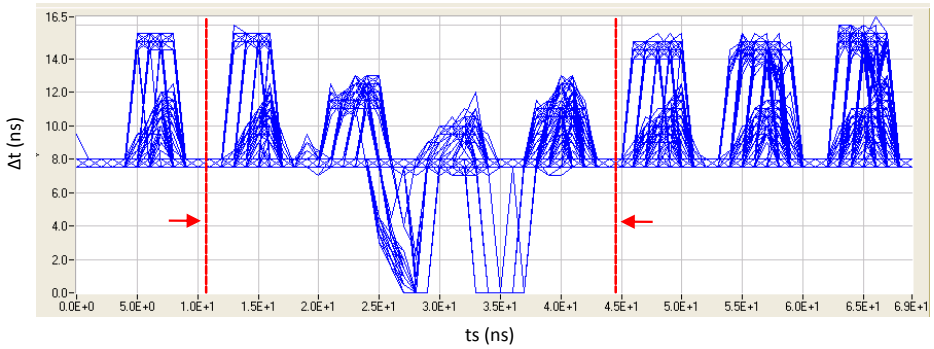


Figure III-11 : Superposition de tous les vecteurs de sensibilité de la matrice pour l'ajustement de la fenêtre d'analyse pertinente.

Pour identifier une plage d'intérêt sensible au pattern de test électrique, l'ensemble des vecteurs qui composent la matrice de données utilisée pour la cartographie Figure III-10b ont été représentés superposés Figure III-11.

La zone du circuit analysée couvre les trois dernières bascules et trois buffers de sortie du registre, donc nous allons réduire la fenêtre d'analyse temporelle de façon à envoyer une impulsion seulement quand le créneau du pattern de test est présent dans ces structures.

En dehors des bornes représentées en rouge, la sensibilité est redondante car le créneau n'est pas présent dans les bascules analysées. Pour un gain de temps d'analyse, seule la fenêtre en rouge Figure III-11 va être utilisée pour quantifier le sensibilité car elle est représentative de la sensibilité à la stimulation laser dans tous les états électriques internes de la structure balayée par le faisceau laser.

III.4.4.7. Etudes paramétriques

Nous avons représenté les cartographies de l'amplitude de la variation de la durée du créneau en sortie du registre en fonction de l'énergie laser Figure III-12 avec au dessous de chaque cartographie tous les vecteurs de la matrice superposés pour tous les pixels.

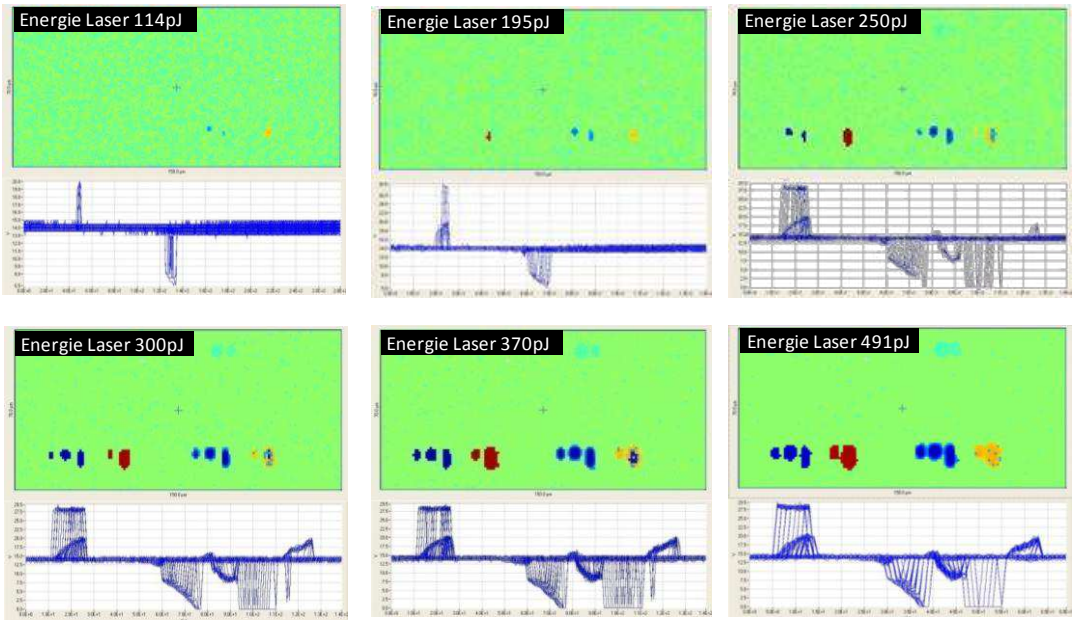


Figure III-12 : Illustration de l'évolution des sensibilités mesurées en fonction de l'énergie laser utilisée.

A partir des cartographies représentées Figure III-12, il est possible de calculer la surface des zones sensibles à l'irradiation laser divisée par la surface balayée par le laser.

Nous obtenons un pourcentage de la surface sensible en fonction de l'énergie laser comme premier paramètre. Il est possible de faire de même avec la fenêtre temporelle balayée. On mesure la plage d'instant où il y a une interaction avec le circuit divisée par le temps de la fenêtre totale (N*ts) analysée en fonction de l'énergie laser.

L'étude de ces deux paramètres basés sur la mesure de la durée du créneau en sortie du registre a été réalisée pour différentes fréquences de fonctionnement et tensions de polarisation du circuit. Nous avons pris soin d'ajuster la plage d'analyse temporelle pour que l'analyse soit équivalente quelque soit la fréquence d'horloge du circuit.

III.4.4.8. Quantification de la sensibilité en fonction du temps

Les courbes Figure III-13 représentent le pourcentage de la plage analysée sensible au laser en fonction de la fréquence de fonctionnement d'horloge du circuit et de la tension de polarisation.

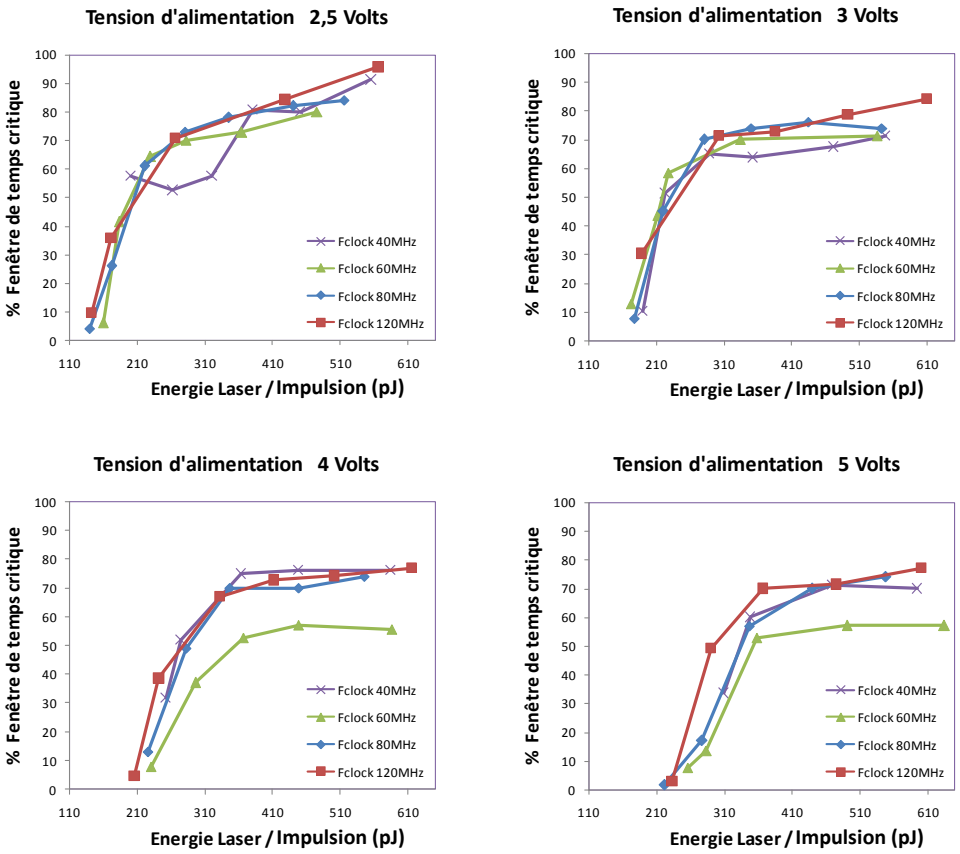


Figure III-13 : Quantification de la fenêtre de temps analysée sensible suivant l'énergie laser utilisée pour différentes tensions d'alimentation.

La tendance des courbes Figure III-13 montre la reproductibilité des mesures quelle que soit la fréquence de fonctionnement. Seules les courbes à 60 MHz pour 4 et 5V ne sont pas superposées aux autres courbes. Cela est dû à un mauvais ajustement de la fenêtre de plage d'analyse au moment du changement de la fréquence d'horloge, qui se traduit par l'apparition d'une tendance différente de l'évolution de la sensibilité. Si l'on observe les maximums de ces courbes, ils mettent en évidence une forte dépendance de la sensibilité du circuit en fonction de la tension d'alimentation.

III.4.4.9. Distribution de la sensibilité en fonction de la tension de polarisation

Les cartographies 2D des pixels sensibles à la stimulation laser en fonction de la tension d'alimentation (Figure III-14) montrent clairement l'impact de l'évolution de la taille des zones sensibles en fonction de la polarisation du circuit.

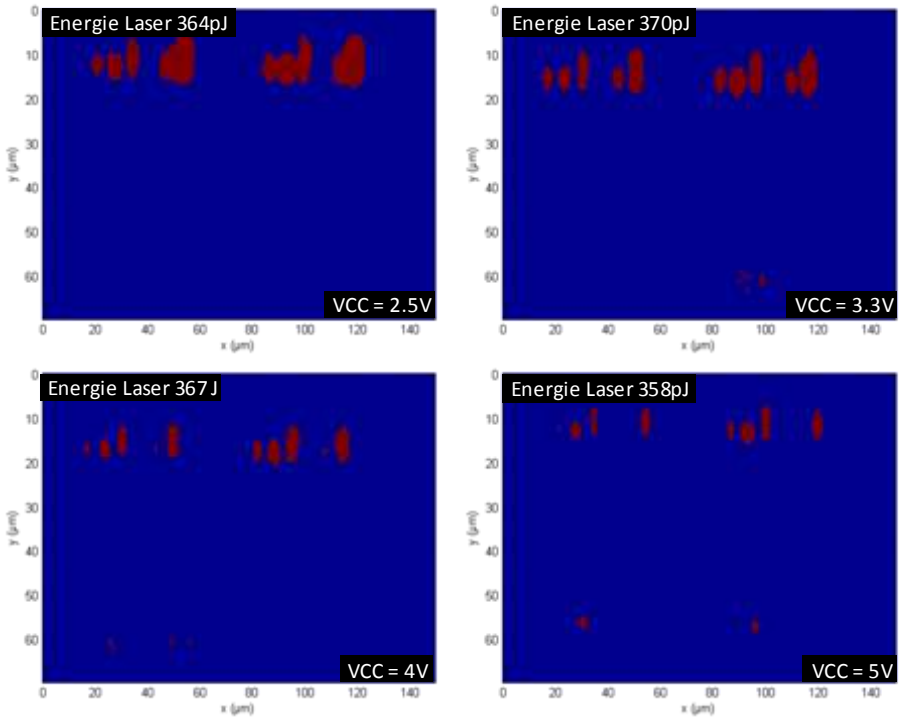


Figure III-14 : Illustration de l'évolution des zones sensibles suivant la tension de polarisation du circuit.

L'impact de la tension d'alimentation sur l'étendue des zones sensibles est un paramètre pouvant être quantifié pour l'analyse d'un circuit. En effet, plus la tension est basse plus les charges sont collectées par phénomène de diffusion donc loin de la zone de charge espace. La mesure du pourcentage de surface sensible en fonction de la tension d'alimentation pour différentes fréquences est représentée Figure III-15.

III.4.4.10. Quantification

L'influence de la tension d'alimentation est dominante, les courbes Figure III-15 confirment qu'à faible tension d'alimentation la taille des zones sensibles augmente.

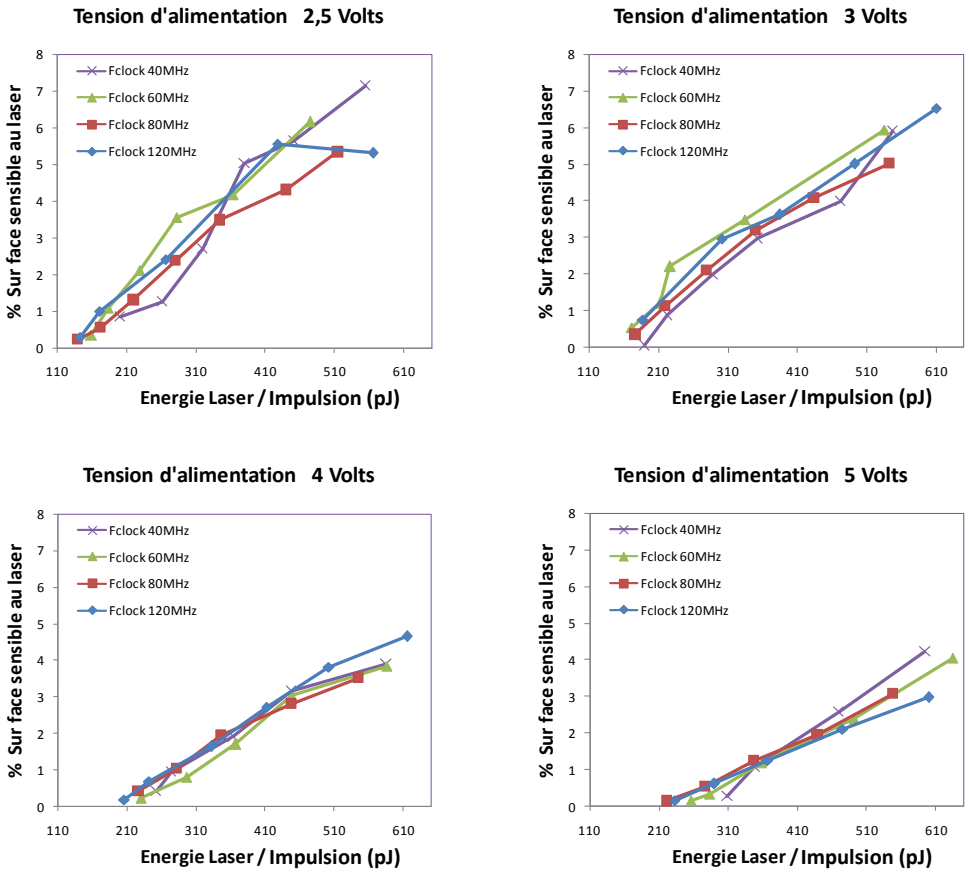


Figure III-15 : Evolution du rapport de surface sensible à l'irradiation laser en fonction de l'énergie laser pour différentes tensions et fréquences de fonctionnement.

Cette tendance peut être la signature d'une meilleure collection des charges par porteurs diffusés. La superposition des courbes témoigne encore de la reproductibilité de la mesure quelle que soit la fréquence d'utilisation du circuit.

Toutes ces mesures représentent un nombre considérable de cartographies car les points de chaque courbe représentent le balayage de la zone analysée. Même si notre matériel est très performant, nous n'avons pas pu réaliser les cartographies consécutivement.

Comme nous pouvons le constater, nous n'observons aucune signature de l'erreur du repositionnement du système mécanique du faisceau par rapport au circuit. Cette reproductibilité des mesures montre aussi la maîtrise de la quantité d'énergie déposée que procure l'utilisation d'une source laser impulsionnelle.

III.4.5. Conclusion

Tous ces paramètres analysables par stimulation laser picoseconde peuvent être mis à profit pour des analyses par comparaison de sensibilité entre un circuit fonctionnel et un circuit défaillant. La différence de sensibilité peut être étudiée avec des conditions de stimulation à la frontière du shmoo-fonctionnel d'un circuit défaillant par comparaison de l'évolution de la sensibilité. Il est possible d'identifier un changement de seuil de sensibilité sans effectuer d'interprétation de l'interaction laser circuit.

Ces techniques de caractérisations de sensibilité à la stimulation laser peuvent êtres mises à profit pour la localisation de défauts.

Les résultats d'analyses de ce registre à décalage peuvent servir à la détermination des conditions optimales d'utilisation. Plus la tension est élevée moins il y a de surface sensible. En effet, plus la zone de charge espace est réduite plus la collection est rapide. Cela se justifie par la diminution de la plage temporelle sensible à l'irradiation laser et l'augmentation du seuil laser avec l'augmentation de la tension de polarisation.

Cette approche est intéressante car chaque circuit a une réponse qui lui est propre suivant sa technologie, sa topologie et ses conditions d'utilisation. Avec ce type de mesures, il est possible d'envisager l'étude de mécanismes critiques afin de déterminer les conditions optimales dans un milieu agressif (particules énergétiques).

Les événements induits par l'injection de charges laser ne sont pas critiques dans ce circuit car il n'y pas eu de dégradations de ses performances suite aux analyses. En effet, les événements comme les Latchups pouvant induire un fort chemin de courant sont tout de même invasifs.

Ce phénomène de Latchup est étudié depuis de nombreuses années. Les mémoires en particulier sont victimes du verrouillage du mécanisme Latchup de part la composition des structures qui constitue les points mémoires. Les circuits sont conçus de façon à limiter le déclenchement de ce type d'événement mais le phénomène Latchup reste encore très présent dans les mémoires CMOS. Le déclenchement de SELs ("Single Event Latchup") se produit. Il n'est pas toujours destructif mais le circuit doit être dépolarisé pour déverrouiller le mécanisme.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous avons mis à profit l'aspect confocal du microscope optique pour cartographier la sensibilité d'un point mémoire de technologie CMOS et mesurer l'étendue en profondeur de la zone de collection dans le substrat car ce mécanisme de verrouillage à la particularité d'établir un chemin de courant en profondeur dans les couches actives du circuit.

L'étude de l'étendue en profondeur est intéressante car elle peut être utilisée pour faire l'analogie avec l'épaisseur du volume sensible utilisé pour les simulations de l'effet des radiations dans un circuit.

Le volume sensible SEL est le volume dans lequel est déposée la charge critique nécessaire au déclenchement d'événement Latchup. Nous ne pouvons pas faire l'analogie entre la charge déposée par laser avec celle d'une particule car la distribution du dépôt d'énergie est différente.

Nous allons voir au travers de l'étude suivante une estimation de l'épaisseur du volume sensible SEL avec l'utilisation d'impulsion laser ultracourtes.

III.5. Etude SEL par Stimulation laser dans une SRAM.

Au cours des études précédentes, nous avons constaté que le prototype du module laser impulsionnel picoseconde été capable de déclencher des événements tel que les SELs. Donc nous avons choisi un circuit particulièrement sensible au déclenchement du mécanisme SEL pour cette étude.

Le SEL (Single Event Latchup) est un mécanisme qui est particulièrement présent dans le plan mémoire et peut être dans certain cas destructif [McMorrow 2006]. Il se manifeste par une surconsommation de courant constante sur l'alimentation. L'étude de la sensibilité aux événements par voie optique peut être utile pour les laboratoires d'analyse chargés de la mesure de sensibilité circuit.

Cette étude propose une technique de microscopie confocale capable de résoudre la profondeur de sensibilité SEL par stimulation laser ultracourte. Deux types d'impulsions lasers on été utilisées. Pour la stimulation par absorption linéaire (SPA), l'oscillateur fibré a été utilisé dans les études précédentes avec une longueur d'onde centrée autour de 1064nm et une durée d'impulsion de 30ps. Pour la stimulation par absorption non linéaire (TPA), la chaîne laser femtoseconde de la plateforme ATLAS a été configurée à une longueur d'onde de 1300nm avec une durée d'impulsion de 150fs.

III.5.1. Rappel définition du SEL

L'interaction d'une particule avec un circuit provoque un dépôt de charges qui peut s'étendre sur plusieurs micromètres en profondeur dans le substrat et autour du point d'impact. Suivant l'énergie de la particule, le dépôt d'énergie s'étend plus ou moins en profondeur dans le circuit.

Le mécanisme SEL est un phénomène qui se produit dans les circuits de technologies CMOS. Il résulte de l'activation d'un thyristor parasite qui se manifeste tout particulièrement dans les mémoires [Ochoa 1979]. Depuis de nombreuses années, les règles de conception sont optimisées pour éviter l'activation de ce type de transistors parasite lié à la proximité des éléments composant les cellules et à la distribution des potentiels.

Une particularité du phénomène SEL est l'activation d'un chemin courant qui, une fois déclenché, va s'étendre en profondeur dans les couches épitaxiales et le substrat. Cette profondeur est fonction de la technologie, de la topologie du circuit et de la technique d'implantation du dopage. La technique BULK par implantation ionique des dopants crée des diffusions plus profondes que dans les technologies épitaxiées composées des dépôts de couches successives. Cette technologie "EPI" limite les courants de fuites dans le substrat et la sensibilité aux mécanismes Latchups [Terrill 1984].

L'événement SEL peut être invasif pour le circuit, donc des études par laser du déclenchement du mécanisme SEL dans les technologies CMOS sont toujours d'actualité [Fouillat 1996], [Llido 2011].

Pour les circuits destinés à être exposées aux particules très énergétiques, la mesure du seuil de sensibilité SEL est réalisée dans des accélérateurs de particules. Chaque accélérateur dispose d'un spectre de particules de différentes énergies permettant de déterminer la charge critique nécessaire aux déclenchement du SEL.

Chaque type de particule est associé à un LET (Linear Energy Transfert) qui est défini par la quantité d'énergie transmise au solide par unité de longueur (profondeur z). Tout comme sous accélérateur, il est possible de déterminer la charge critique nécessaire au déclenchement de ces événements par laser (notion de LET laser) [Pouget 2000]. L'étude de la sensibilité du circuit suivant l'énergie déposée par la particule permet de déterminer la charge critique exprimée en Mev/µm.

Le point critique des simulateurs est l'estimation du volume sensible dans lequel ils doivent appliquer la charge critique. Pour les simulations mathématiques chargées de prédire les taux d'événements SEL par jour, on applique cette charge critique dans le model RPP qui est aujourd'hui le plus utilisé [Pickel 1978].

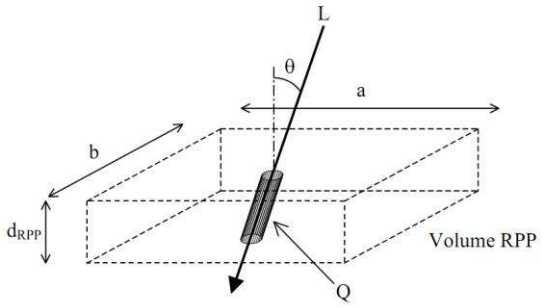


Figure III-16 : Géométrie du modèle RPP [Pouget 2001].

Le modèle RPP représenté Figure III-16 est un parallélépipède dont les dimensions sont définies par le volume sensible. Le paramètre le plus critique est la profondeur de ce volume qui est difficile à estimer avec les tests en accélérateur. Pour déterminer la profondeur de ce volume, il existe une technique basée sur l'inclinaison du faisceau d'ions [Ecoffet 1997]. Cette technique a fourni des approximations de la profondeur de sensibilité sur des structures isolées mais n'est pas applicable dans les technologies fortement intégrées.

Pour la compréhension de la suite de l'étude, le terme ds et les termes "profondeur sensible" doivent être compris comme une longueur caractéristique (le long de la direction orthogonale à la surface du substrat) de la distribution d'efficacité de collection de charge est continue. La section efficace est quand à elle est fonction des dimensions latérales du volume sensible en négligeant la largeur de trace de la particule.

III.6. Etude de la section efficace SEL

Un autre paramètre important pour les simulateurs de taux d'événements SEL est la section efficace qui représente la surface sensible du circuit. En accélérateur de particules, elle est déduite à partir du flux de particules et le nombre d'événements observés pendant l'irradiation.

Les données de la section efficace sont représentées sous forme d'une courbe représentant la mesure de la surface sensible du circuit ou d'un point mémoire en fonction de l'énergie des particules utilisées.

Nous allons voir dans la suite du document qu'il est possible de cartographier cette section efficace avec un faisceau laser au travers du cas d'étude d'une SRAM CMOS.

III.6.1. Mise en place du test.

III.6.1.1. Préparation de l'échantillon

Le circuit utilisé pour l'étude est la mémoire SRAM CY7C1069 CMOS, qui est réputée pour son extrême sensibilité aux SELs et aux SEUs ("Single Event Upset")[Darracq 2002]. La face arrière du boîtier a été enlevée pour permettre la stimulation laser par la face arrière au travers du substrat. Le polissage laisse apparaître le substrat de la puce avec une épaisseur moyenne de substrat de 200µm.

III.6.1.2. Mise en place expérimentale

La présence du déclanchement de SELs se manifeste par l'apparition d'une surconsommation de courant qui devient constante tant que la tension d'alimentation est maintenue.

Le courant nominal de la mémoire est compris entre 50 à 70mA pour une tension de polarisation nominale de 3,3V. À chaque impulsion laser envoyée on mesure le courant d'alimentation. Si le courant devient supérieur à 100mA, l'alimentation est automatiquement éteinte pour protéger le circuit.

III.6.1.3. Protocole de test SEL

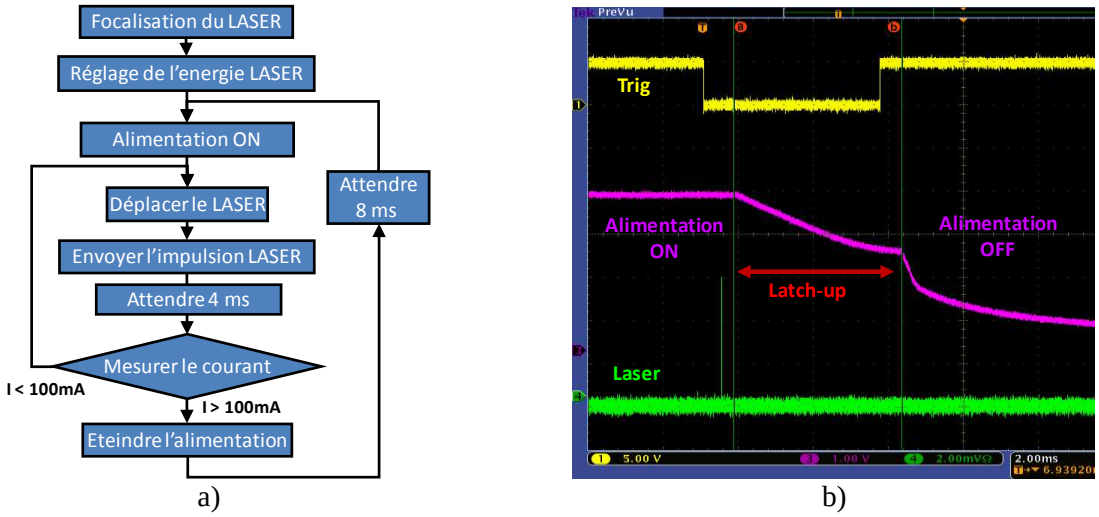


Figure III-17 : a) protocole de test SEL. b) Signatures électrique typique d'un SEL aux bornes d'alimentation du circuit.

Pour faciliter la visualisation de l'évolution du courant, une résistance de faible valeur a été mise en série sur l'alimentation. Cela permet de relever la chute de tension observée aux bornes du circuit suite à un déclenchement SEL (Figure III-17b). La chute de tension est la conséquence d'un courant de latchup. La dynamique de la chute de tension découle de la limitation en courant de l'alimentation associée à la décharge du circuit RC créée par les capacités de découplages.

Afin d'avoir une vue globale de sa sensibilité SEL, nous avons réalisé un balayage de toute la surface plan mémoire. Pour cela, nous avons utilisé un microscope confocal équipé d'un objectif 100x et de platines de translations sur lesquelles le circuit est fixé. La séquence de test qui a permis de réaliser la cartographie SEL représentée Figure III-18 est illustrée sur le graphe Figure III-17a.

III.6.1.4. Cartographie Laser SEL 2D

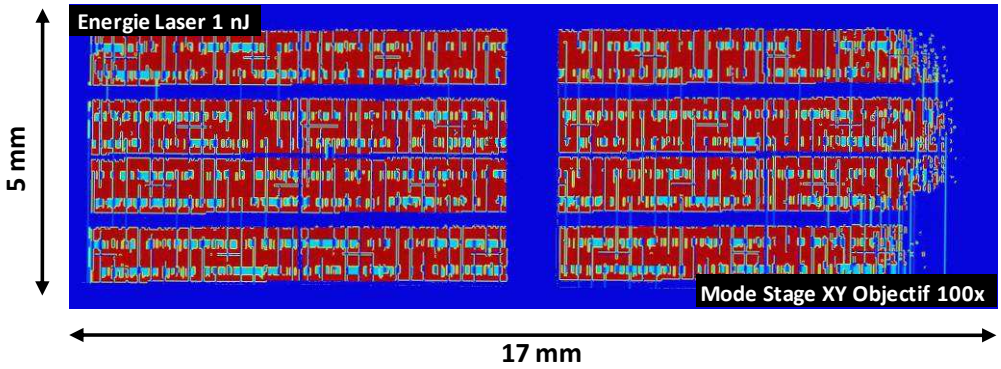


Figure III-18 : Cartographie SEL du circuit entier par déplacement du composant sous le faisceau laser.

La cartographie Figure III-18 laisse apparaître la matrice du plan mémoire. L'inhomogénéité de la cartographie observée du coté droit met en évidence une sensibilité en fonction de la profondeur de focalisation qui est principalement due au tilt du circuit par rapport au plan des platines de translation.

Pour augmenter l'extension du paramètre confocal lié à l'utilisation de l'objectif 100x, nous avons travaillé avec une énergie laser légèrement au dessus de l'énergie seuil, ce qui a permis d'effectuer des pas de 30µm pendant le balayage de la totalité de la puce.

Plusieurs heures d'acquisition ont été nécessaires pour obtenir cette cartographie car la vitesse de balayage est limitée par le temps des cycles de la mise en marche de l'alimentation.

En raison des problèmes de positionnement induits par le câblage qui contraint le déplacement du circuit, ce type de microscope ne permet pas de résoudre spatialement la sensibilité SEL d'un seul point mémoire. Pour s'affranchir de ces contraintes mécaniques, nous avons utilisé un microscope LSM du banc PROBER de la plateforme ATLAS. Sur ce banc de test le circuit reste fixe, un scanner optique déplace le faisceau via les objectifs de microscope MITUTOYO chargés de la focalisation du faisceau laser dans le substrat (cf chapitre2).

L'utilisation de ce microscope permet de réaliser des cartographies en quelques minutes avec une résolution sub-micronique. Le microscope LSM PROBER permet de superposer plusieurs faisceaux lasers au faisceau 1300nm continu servant à cartographier les interconnections par réflexion du laser du circuit au travers du substrat. Ce dernier sert de référence pour l'alignement des autres lasers car son injection a été optimisée afin d'obtenir le meilleur champ de vue au travers les objectifs.

Pour faire en sorte que la quantité d'énergie transmise par l'objectif reste suffisamment constante dans tout le champ de l'objectif, le champ de vue sera réduit en fonction de l'objectif utilisé. Les variations d'énergie liées au balayage de la pupille de l'objectif fait que l'on considère plus d'un tiers du champ de l'objectif comme non utilisable. Par exemple, pour imager des motifs de sensibilité SELs avec un objectif 100X, on limitera le champ à 20×20µm.

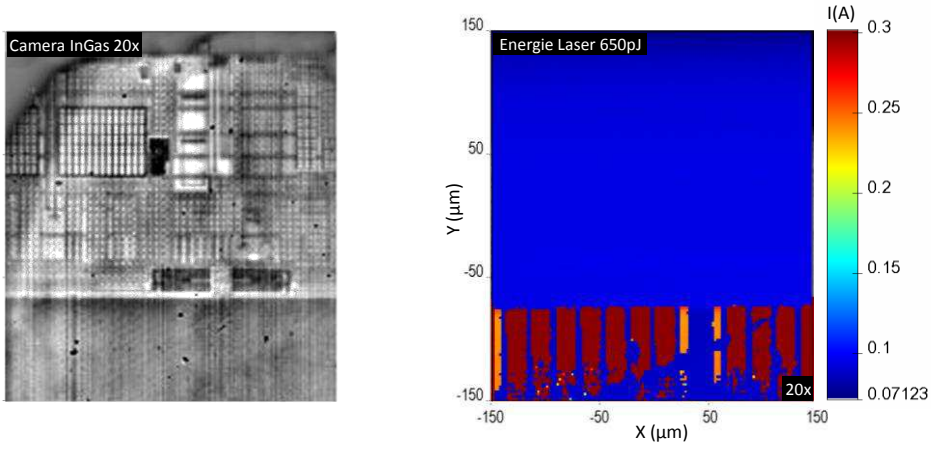
L'utilisation de différents objectifs va permettre d'étudier l'influence de taille du spot laser sur la résolution. Avec une taille de spot laser importante, les motifs de sensibilité ne seront pas représentatifs de la sensibilité d'un seul point mémoire. Toutefois le déclenchement de plusieurs événements simultanément peut induire des chemins de courant spécifiques.

La stabilisation du courant suite au verrouillage du mécanisme Latchup dépend du courant de Latchup mais aussi des capacités de découplage et de l'alimentation utilisée. En plus de la limitation en courant de l'alimentation, la résistance mise en série sur le chemin d'alimentation protège le circuit en cas de fort appel de courant.

Pour avoir une réponse transitoire la plus représentative, nous observons la chute de tension qui a lieu aux bornes d'alimentation du circuit lors d'un appel de courant. En observant cette variation de tension il est possible d'obtenir une image des chemins de courants établis car plus le courant sera fort plus la chute de tension sera importante.

III.6.2. Etude courrant SEL

Dans un premier temps, nous avons défini une zone de balayage placée en bordure du plan mémoire. L'image Figure III-19a a été obtenue avec une caméra InGas capable de récupérer la lumière infrarouge réfléchie au travers du substrat. La partie inférieure de la cartographie Figure III-19 est le bord du plan mémoire et la partie supérieure les circuits périphériques.



a) b)

Figure III-19 : a) Image obtenue avec la caméra InGas, b) Cartographie SEL en bordure du bord du plan mémoire avec objectif 20x.

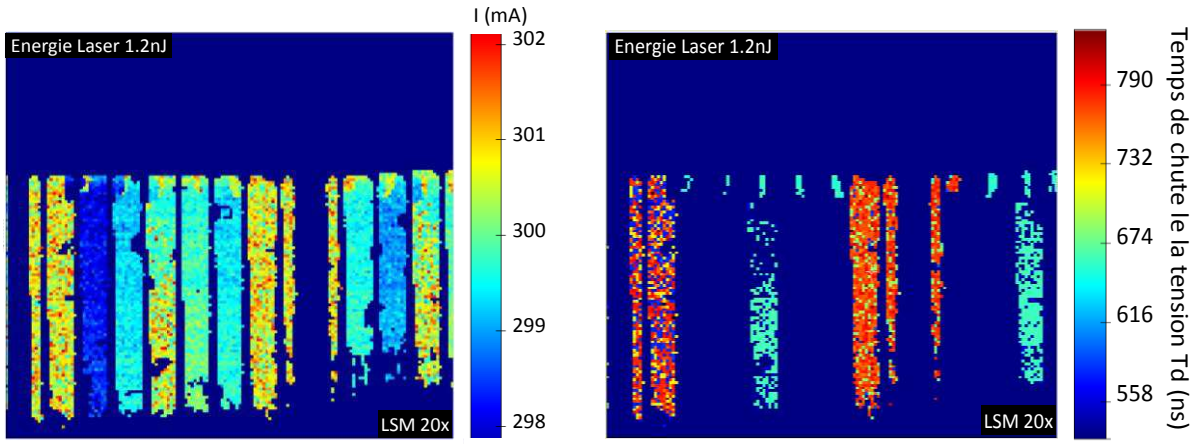
Les cartographies Figure III-19b ont été réalisées avec le faisceau laser 1064nm picoseconde et un objectif 20x. Avec l'utilisation d'un objectif 20x la taille du spot laser au point focal est bien supérieur aux quelques µm² d'un point mémoire donc plusieurs points sont irradiés simultanément et peuvent contribuer au courant Latchup. La cartographie SEL Figure III-19b, met en évidence l'absence de sensibilités aux événements SEL dans la circuiterie en périphérie pour cette gamme d'énergie laser.

Différents niveaux de courants ont été mesurés mais ils sont tous localisés dans le plan mémoire. Les bandes de couleurs de la cartographie Figure III-19b en périphérie des blocs du plan mémoire montrent qu'il y a un lien entre l'évolution du courant latchup et la topologie du circuit.

Si nous laissons le courant se stabiliser après SEL, les niveaux de courant atteignent une valeur proche de la limite de l'alimentation pour tous les pixels sensibles Figure III-20b.

Pour mieux observer l'évolution du courant tout en s'affranchissant le plus possible des artefacts de mesure liés à la configuration électrique, nous avons observé l'évolution de la tension aux bornes de l'alimentation de la mémoire en fonction du temps. Les courants résultant des événements déclenchés sont très rapides et influent sur la vitesse de chute de tension aux bornes du circuit. La dynamique de la chute de tension est complexe car elle dépend fortement de la configuration électrique de test.

La chute de tension apparaît aux bornes du circuit en synchronisme avec l'impulsion laser. L'amplitude varie suivant le niveau de courant de latchup. Nous avons défini une fenêtre temporelle de façon à faire l'acquisition du temps de descente de la chute de tension pour chacun des pixels et ainsi pouvoir étudier l'évolution de la chute de tension en fonction de la position laser.



a) b)

Figure III-20 : a) Cartographie des niveaux de courrant Latchup, b) cartographie de la vitesse de chute de la tension d'alimentation aux bornes du circuit.

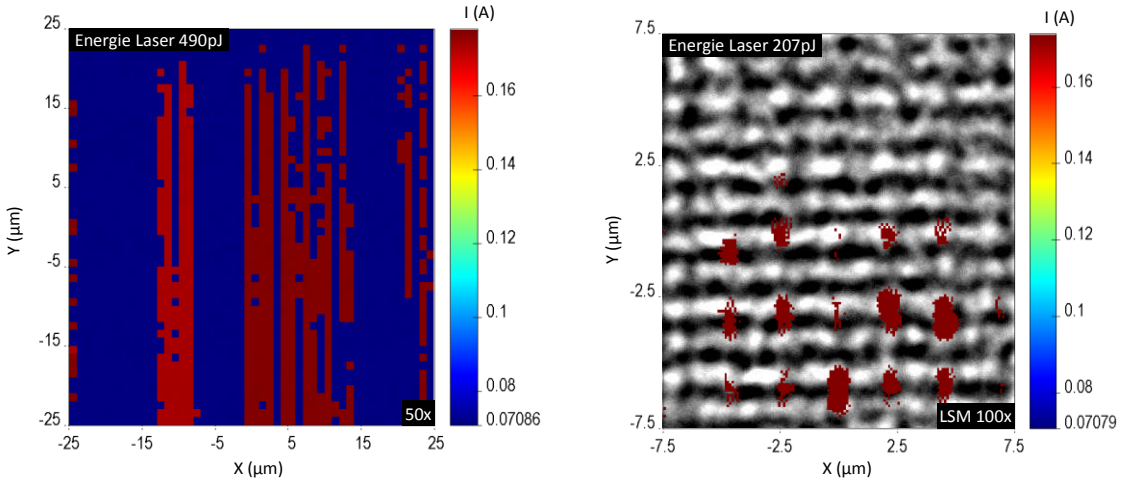
Nous avons réalisé une matrice de données contenant la mesure de la tension aux bornes d'alimentation du circuit de façon synchrone aux impulsions laser. Avec un traitement de données de la matrice, nous avons pu générer la cartographie Figure III-20b qui représente le temps de descente (10% à 90%) de la chute de potentiel aux bornes du circuit.

Suivant les blocs irradiés, la signature SEL ne se manifeste pas au même instant et la tension ne chute pas à la même vitesse. Nous avons cartographié les événements qui se manifestent le plus rapidement après l'irradiation laser car ce sont ceux qui correspondent aux zones les plus sensibles et aux plus forts appels de courant.

Toutes les bandes de sensibilité détectées précédemment n'apparaissent pas sur cette cartographie car elles ont été discriminées par la fenêtre d'acquisition choisie. Cette étude a faible grossissement optique peut être utile pour identifier la structure à l'origine de quelques points sensibles en périphérie du plan mémoire.

III.6.3. Cartographies à petite échelle en SPA et TPA

Nous avons utilisé des objectifs de microscope 50x et 100x car ils permettent d'obtenir une taille de spot laser plus petite et donc d'obtenir une meilleure résolution spatiale. Plus le confinement du spot laser est important, plus le seuil de déclenchement SEL est bas. Avec l'objectif 50x, un motif périodique lié à l'agencement de la matrice de cellules apparaît sur la cartographie Figure III-21a. Avec l'utilisation d'un objectif 50x, des lignes verticales apparaissent dans les colonnes cartographiées précédemment avec l'objectif 20x.



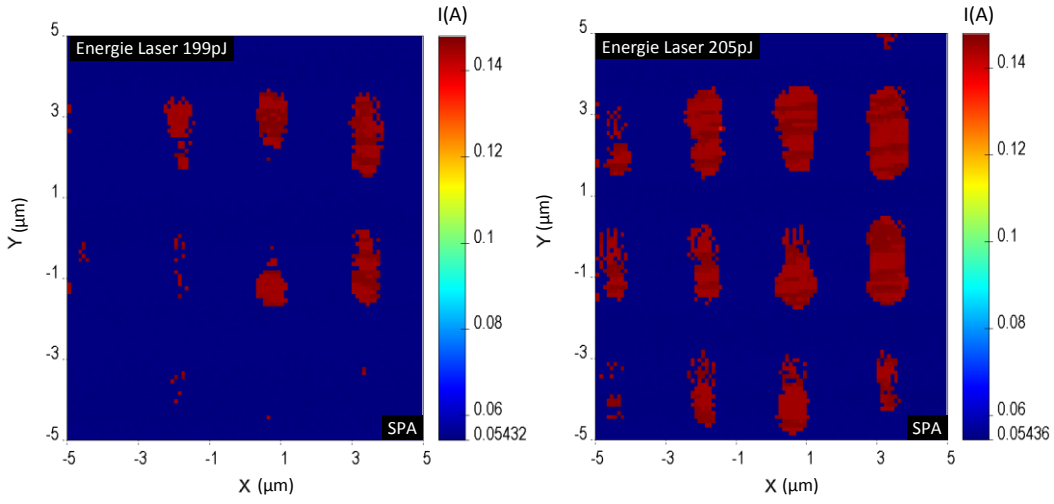
a) b)

Figure III-21 : a) Cartographie SEL du plan mémoire avec un objectif 50x, b) avec 100x en limite du plan mémoire.

Nous avons réalisé une cartographie SEL en limite du plan mémoire avec l'objectif 100x et une superposition de la cartographie LSM des interconnexions en niveau de gris (Figure III-21b).

Les zones sensibles qui apparaissent ne sont pas très bien définies, donc nous avons réalisé des cartographies autour du seuil de déclenchement SEL avec un champ plus réduit pour différentes énergies laser.

Le champ de vue des cartographies SELs a été limité pour minimiser les distorsions induites par le champ de vue du scanner LSM de l'objectif 100x. Nous avons utilisé des pas de 80nm pour le balayage afin d'obtenir les cartographies de la Figure III-22.



a) b)

Figure III-22 : Cartographie SEL au seuil laser.

Les cartographies représentées Figure III-22 ont été effectuées avec des énergies très proches du seuil. Celle réalisée avec une énergie de 199pJ laisse apparaître d'importantes différences de sensibilité. Avec 205pJ, les différentes zones sensibles sont plus homogènes mais non uniformes. Cela peut être dû à la signature d'un changement de seuil de sensibilité suivant l'état du point mémoire durant le balayage du faisceau laser.

La taille et la forme des zones sensibles SEL découlent de la taille du faisceau laser mais aussi de la contribution de plusieurs points mémoire. Pendant l'irradiation laser, le dépôt d'énergie peut changer l'état logique stocké dans un point mémoire voisin donc faire évoluer la sensibilité d'un bout à l'autre de la zone sensible.

Le transfert d'énergie linéaire (SPA) fait que la taille du spot laser ainsi que la profondeur de focalisation du faisceau sont des paramètres qui jouent un rôle important dans la contribution aux déclenchements d'événements SELs.

Pour accroître la résolution spatiale, nous avons utilisé des impulsions de 150fs à 1300nm autorisant l'absorption de deux photons simultanément.

Dans un premier temps, nous avons cartographié le plan mémoire avec le faisceau laser avant d'étudier le seuil laser en fonction de la profondeur de focalisation du faisceau.

III.6.3.1. Cartographie SEL TPA.

Toutes les mesures réalisées en TPA on été effectuées avec la chaîne laser femtoseconde de la plateforme ATLAS. Dans le mode de déclenchement externe de la chaîne laser femtoseconde, la variation de l'énergie en sortie est de 17%. Comme les variations de l'énergie moyenne sont plus rapides que la vitesse de réalisation du balayage d'un champ vue, nous avons dû utiliser le laser en mode continu à 1kHz qui réduit le bruit d'amplitude à 10%.

En TPA, les impulsions utilisées ont une durée de 150fs, et comme la propagation des photons dans le substrat régit de phénomènes non linéaires [Shao 2011], l'énergie doit être la même pour chaque pixel analysé. Pour cela, nous avons installé une photodiode non polarisée sur un prélèvement optique pour contrôler l'énergie de chaque impulsion. Un oscilloscope mesure de façon synchrone à l'oscillateur laser le signal transitoire photoélectrique. Les mesures de puissance sont réalisées par une intégration logicielle du signal de la photodiode. Les mesures sont réalisées à faible taux de répétition laser pour minimiser les effets cumulatifs.

Pour diminuer le taux de répétition laser, nous avons installé un obturateur de faisceau mécanique qui permet de sélectionner une impulsion laser à tout instant. L'obturateur est synchronisé sur le laser avec une commande d'ouverture définie de façon à laisser passer qu'une seule impulsion laser sans la tronquer.

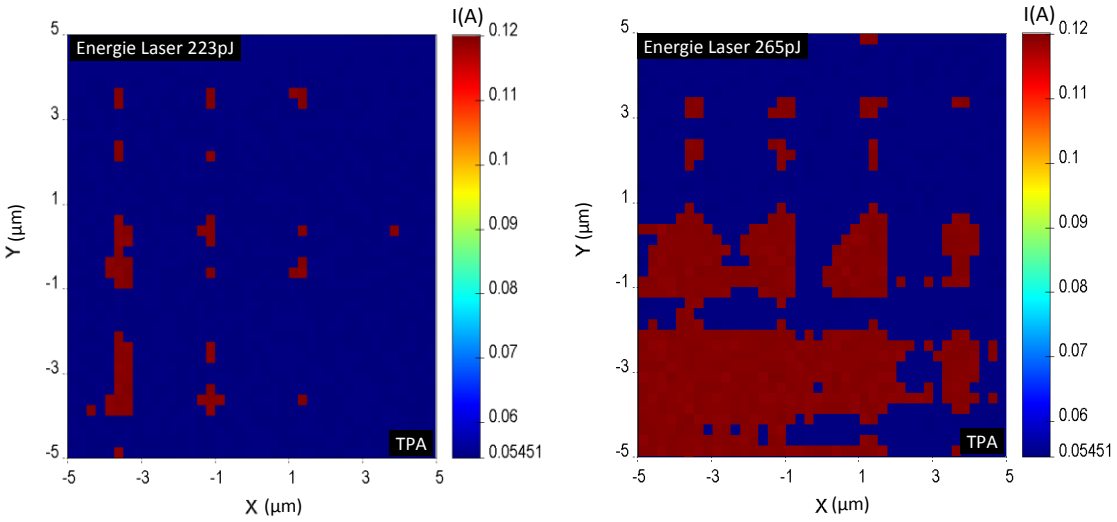
Avec un déclenchement à quelques hertz, les mesures sont plus espacées dans le temps donc sensibles aux variations lentes de la puissance moyenne du laser. Pour les expériences de détermination de seuil laser, il est possible d'utiliser les maximums des fluctuations. Durant une cartographie SEL, les fluctuations d'énergie laser se manifestent au travers de motifs irréguliers dessinés par le sens de balayage du faisceau laser.

Afin de pouvoir travailler autour du seuil tout en s'affranchissant des fluctuations de l'énergie, nous avons mis en place un contrôle de l'énergie pour chaque pixel analysé. Nous avons réalisé l'histogramme des mesures sur 2000 impulsions puis défini un intervalle dans la partie la plus dense afin que la mesure de puissance moyenne du laser soit la plus représentative possible de l'énergie des impulsions sélectionnées.

Pendant le balayage laser, si la mesure provenant de la photodiode est en dehors de la plage d'énergies définie, le pixel sera alors ré-analysé jusqu'à ce que l'événement SEL soit induit par une impulsion ayant la bonne énergie. La mesure de puissance moyenne du laser est effectuée sans l'obturateur afin d'intégrer toutes les fluctuations d'énergie sur une période similaire à une cartographie SEL.

La cartographie SEL TPA Figure III-23 a été réalisée dans la même zone que les cartographies SPA précédentes avec des énergies proches du seuil laser. Nous avons utilisé un pas de 200nm pour être le moins possible impacté par la stabilité du laser et les dérives mécaniques.

Sur la cartographie représentée Figure III-23a, certains points ne sont pas sensibles. Cela vient du fait que l'on observe des zones plus vastes en dehors du champ défini. Quant à la non uniformité des motifs de sensibilité de la cartographie effectuée avec 265pJ, elle peut être liée aux variations de la qualité de préparation de la surface arrière et les variations d'épaisseur. Une légère inclinaison de la puce par rapport au plan de focalisation idéal pourrait facilement produire de telles distorsions des cartographies.



a) b)

Figure III-23 : Cartographies SEL TPA.

En théorie, pour réaliser de l'absorption non linéaire TPA il est nécessaire d'utiliser une énergie plus conséquente qu'en SPA. En pratique, l'énergie est du même ordre de grandeur car à 1300nm le faisceau est faiblement absorbé par le substrat avant sa focalisation.

Ces cartographies TPA montrent une résolution beaucoup plus élevée car il est possible de distinguer deux points sensibles distincts presque pour chacune des zones révélées sur la cartographie SPA. Deux effets peuvent expliquer la différence de résolution.

La dépendance quadratique de la vitesse de génération de TPA et l'intensité optique nécessaire au TPA améliore la résolution d'un facteur qui est en partie compensée par la longueur d'onde de TPA.

Nous avons constaté que les niveaux de courant atteints en TPA sont moins élevés qu'en SPA donc le nombre ou type de structure contribuant aux mécanismes Latchup doivent êtres différents. Cela peut être justifié par la distribution du faisceau laser TPA plus confiné spatialement donc influe sur les lignes de potentiels.

III.6.4. Etude de la section efficace par laser

Ces cartographies SEL TPA et SPA nous ont permis d'estimer la section efficace SEL à saturation du circuit que nous avons comparée avec celles obtenues par test sous accélérateurs.

En SPA, la taille du faisceau efficace est directement liée à la taille du spot laser donc la mesure de la section efficace à saturation est directement impactée par la taille du faisceau. Entre les deux cartographies Figure III-22 il y a 6pJ de différence donc le phénomène de saturation apparaît rapidement avec recouvrement de deux cellules par zones sensibles. Le phénomène de recouvrement par la taille du spot laser est récurrent pendant les analyses laser de technologie fortement intégrées [Miller 2006].

Sur les cartographies SEL TPA représentées Figure III-23, la saturation différente car la surface de spot laser effectif laser est moindre. La mesure de la valeur de la section efficace à saturation d'un point mémoire se fait pour une énergie laser comprise entre le seuil minimum et le seuil saturation (quand la zone sensible recouvre plusieurs points mémoire). Par stimulation SPA, la saturation se manifeste à partir de 200pJ et 250pJ en TPA.

Pour obtenir la surface effective du circuit total, nous multiplions la mesure de la surface effective d'un point mémoire par le nombre de points mémoire.

En accélérateurs de particules, on irradie la totalité du circuit avec le faisceau de particules puis on divise le flux de particules par le nombre d'événements SEL détectés. Chaque accélérateur met à disposition un spectre d'énergies qui est directement lié à la nature des particules utilisées. Chaque type de particule est associé à un LET. En utilisant différents types de particules, il est possible d'obtenir la section efficace du composant en fonction du LET déposé par la particule.

Les mesures sont répétées avec différentes particules pour obtenir une courbe de section efficace en fonction du LET associé au type de particule [Burnell 2009].

Le Tableau III-1 récapitule les mesures de la section efficace à saturation pour les tests réalisés sous accélérateur de particules et par laser.

Tableau III-1 : Section efficace de saturation SEL (Ions Lourds, Protons, Laser).

	Ions Lourds	Protons	Laser SPA	Laser TPA
σ Sat (cm2)	0,374	0,12E-8	0,58	0,45

La section efficace mesurée avec des protons est très inférieure aux autres mesures car le LET de ces particules utilisées est très faible. Comme ces particules ne pénètrent qu'à très faible profondeur dans le substrat, elles contribuent très peu au déclenchement de SEL.

La mesure obtenue par stimulation laser SPA est bien supérieure car la taille de spot laser qui est du même ordre de grandeur que la section efficace d'un point mémoire. Avec la stimulation laser TPA, le spot laser efficace est plus petit donc la section à saturation est plus faible. C'est pour cette raison que les mesures proches du seuil laser se rapprochent les plus des mesures par ions lourds. La valeur mesurée reste supérieure car elle est impactée par la taille du spot laser effectif qui sera toujours plus grande que la dimension de la trace d'une particule.

En conclusion, les deux formes de stimulation lasers sont intéressantes car elles permettent d'étudier le déclenchement d'événements avec un dépôt de charge différents. Nous allons maintenant voir des mesures de la sensibilité SEL suivant la profondeur de focalisation laser en travaillant autour du seuil laser.

III.6.5. Etude profil Seuil SEL en fonction de la profondeur de focalisation.

L'étude de la sensibilité en fonction de la profondeur de focalisation du laser dans un circuit met à contribution l'aspect confocal du microscope. Nous avons sélectionné un point sensible et mesuré l'énergie d'impulsion seuil laser nécessaire pour déclencher un SEL tout en changeant la position de l'objectif du microscope. Cela a permis de réaliser des profils de seuil d'énergie en fonction de la profondeur de focalisation laser et ainsi de pouvoir étudier la sensibilité en profondeur dans le circuit.

Pour chaque seuil d'énergie, nous réalisons une cartographie 2D d'une cellule pour éviter les phénomènes d'hystérésis de sensibilité pouvant être liés à des effets thermiques induits par les courants SEL.

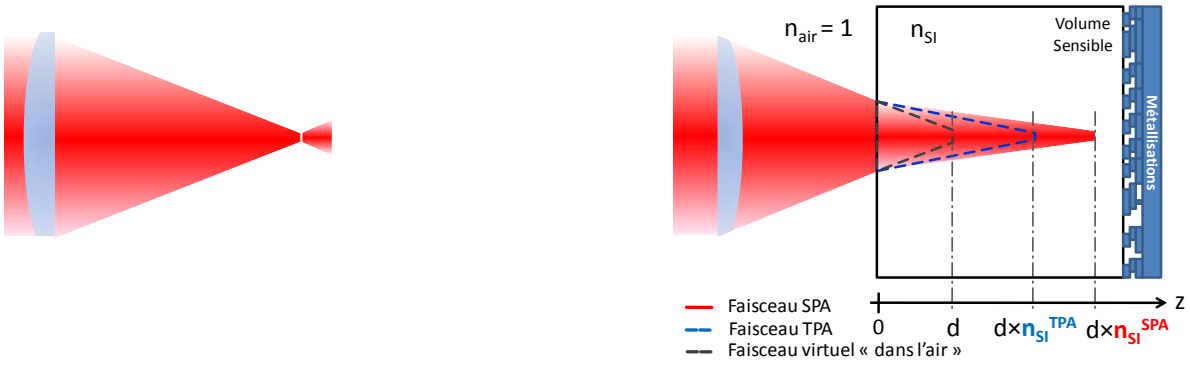


Figure III-24 : a) référence de focalisation sur la surface du substrat dans l'air, b) illustration de la profondeur de focalisation du faisceau SPA et TPA.

La référence de la focalisation est faite à la surface du substrat comme l'illustre la Figure III-24a, puis on avance progressivement la focalisation dans le substrat par un déplacement de l'objectif comme Figure III-24b.

Cependant, plusieurs facteurs expérimentaux peuvent sérieusement affecter la forme du faisceau laser dans la région focale. Le faisceau de la source laser qui balaye la pupille d'entrée de l'objectif de microscope peut être victime de distorsions pouvant être accentuées par des aberrations géométriques et chromatiques de l'objectif.

Par ailleurs, de nombreux phénomènes optiques doivent être pris en compte afin de modéliser avec précision la propagation d'impulsions femtosecondes à travers du substrat. Parmi ces effets, l'effet Kerr (indice de réfraction en fonction de l'intensité optique), l'auto-absorption, le changement de l'indice de réfraction induite par des porteurs libres, la dispersion chromatique, l'absorption du faisceau et l'auto-modulation de phase. Compte tenu des limites actuelles des modèles analytiques ou des éléments finis dans ce domaine, la caractérisation expérimentale reste à ce jour le seul moyen fiable d'estimer le profil axial du taux de génération induit par laser.

III.6.5.1. Caractérisation du faisceau TPA

L'utilisation d'un circuit spécifique intégré dans un véhicule d'essai CMOS nous a permis d'effectuer la caractérisation 3D du spot laser TPA en utilisant la technique classique du couteau [Shao 2011].

Nous définissons la longueur TPA du spot "efficace" L_{TPA} comme la mesure pleine largeur à mi-hauteur (FWHM). L'extension axiale de ce signal varie de 7 à 10µm pour les énergies de 1 à 3nJ. Des mesures à plus basses énergies n'ont pas été possibles avec ce circuit en raison d'une dégradation significative du rapport signal sur bruit.

Afin d'extrapoler les mesures pour les analyses au travers du substrat, il est nécessaire de les multiplier par le rapport des indices de réfraction. C'est une approche de premier ordre puisque ce calcul n'inclut pas l'un des effets de propagation non-linéaires mentionnés précédemment [Faraud 2011].

Cela donne une première estimation pour une configuration optique donnée qui est valable à faible énergie tant que les mécanismes de propagation non-linéaires sont négligeables. La question du niveau d'énergie nécessaire pour affirmer cette hypothèse est actuellement étudiée dans notre équipe grâce à des simulations par éléments finis, dans le cadre de la thèse de Mlle MORISSET.

Il est intéressant de noter que les augmentations FWHM en fonction de l'énergie signifient que la résolution axiale de la technique TPA diffère de la résolution latérale et dépend de l'énergie des impulsions [Shao 2011].

III.6.5.2. Profils de sensibilité SEL fonction de la focalisation.

Les variations observées dans la réponse du circuit lors du changement de la profondeur de focalisation régissent principalement des variations de la taille du spot dans la région active.

Les profils présentés dans la Figure III-25a sont des profils de la sensibilité SEL en fonction du déplacement de l'objectif par rapport à la surface du substrat.

Il y a une mise au point optimale pour laquelle le seuil est minime. Ces minimums ne sont pas tout à fait à la même position car l'indice de réfraction vu par les deux faisceaux laser est légèrement différent. Ceci peut être expliqué par la différence entre les longueurs d'onde SPA et TPA (respectivement 1064nm et 1300nm).

Nous devons prendre en compte le changement d'indice à l'interface air/substrat. En effet, l'indice de réfraction du silicium diminue légèrement avec la longueur d'onde dans cette région du spectre. Cela mène à un chemin plus court de focalisation du faisceau pour la longueur d'onde TPA, ce qui nécessite un déplacement plus long de la lentille pour atteindre la même profondeur de focalisation, comme illustré dans la Figure III-24 b.

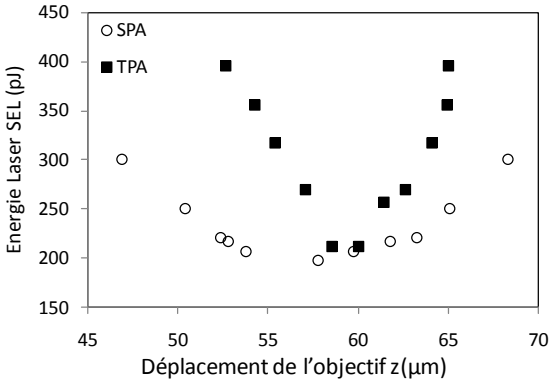


Figure III-25 : Profils seuils laser en fonction du déplacement de l'objectif par rapport à la surface du substrat en SPA et TPA.

Le seuil augmente au fur et à mesure que nous sortons de la mise au point optimale. Cela est dû au fait que l'énergie est répartie sur une plus grande surface dans la couche sensible lorsque le faisceau est défocalisé.

En TPA, le déclenchement est plus sensible qu'en SPA même si normalement autour de l'énergie seuil le cigare du faisceau TPA est plus court (moins profond). Le spot TPA effectif génère beaucoup moins de charges en dehors du plan focal que le faisceau SPA. En d'autres termes, le faisceau SPA génère plus de charges disponibles pour la diffusion vers les nœuds sensibles. Ceci pourrait expliquer les taches plus sensibles, surtout si nous faisons l'hypothèse que le volume sensible mesuré fait par exemple quelques micromètres de profondeur.

La forme du profil TPA de la Figure III-25 est semblable à celui présenté dans [Burnell 2009] pour d'autres mémoires.

Cependant, la conversion d'énergie en génération de charges doit être quadratique, donc il est plus pertinent de tracer la charge seuil basée sur les proportionnalités suivantes :

$$SPA : Q_{th} \propto \alpha \times E_{th} \qquad \text{Équation III-1}$$

$$TPA : Q_{th} \propto \beta \times E_{th}^2 \qquad \text{Équation III-2}$$

Avec l'utilisation de ces équations et les valeurs de l'indice de réfraction pour le SPA et le TPA, on obtient le tracé de la Figure III-26.

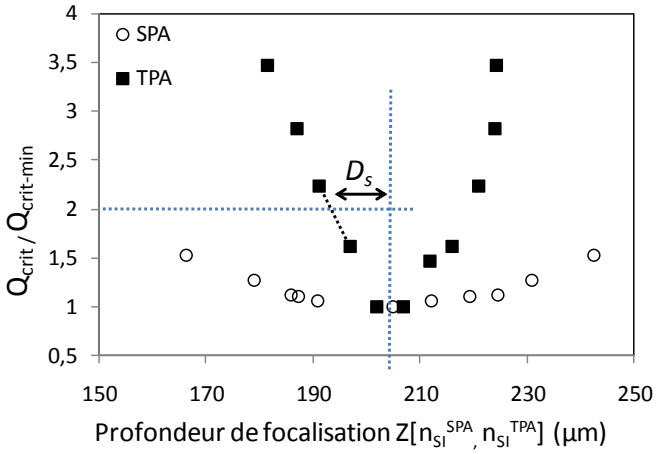


Figure III-26 : Seuil de charge critique normalisé en fonction de la profondeur réelle de la focalisation laser dans le substrat.

On peut remarquer que par rapport à la Figure III-25, le décalage horizontal entre les deux ensembles de données a disparu et que la conversion du second degré améliore encore la résolution de TPA à l'égard des données de SPA.

Une dissymétrie est visible sur les deux courbes de la Figure III-26, nous l'attribuons à la réflexion du faisceau sur les couches de métal. Cet effet devrait être moins efficace en TPA qu'en SPA, puisque le mécanisme TPA est beaucoup plus sensible aux distorsions de front d'onde du faisceau induit par la réflexion sur une interface irrégulière. Cependant, il contribue probablement à la génération de charge.

Sur la Figure III-26, la moitié gauche de l'axe correspond à un faisceau focalisé dans le substrat de silicium, tandis que la moitié droite correspond à une focalisation dans les couches de métallisation. Considérant l'échelle horizontale de la Figure III-26 et sachant que le circuit est un dispositif récent CMOS, on peut raisonnablement supposer que le seuil minimum de charge est obtenu lorsque le faisceau est focalisé dans les couches actives (diffusions). En effet, dans une telle technologie, il n'y a aucune raison d'avoir une couche sensible enterrée à une distance considérable de la surface.

Ainsi, on peut considérer que le minimum des courbes donne la position de la surface de silicium (face avant).

Le côté droit de la courbe de TPA a alors deux contributions : la moitié arrière du cigare efficace et les réflexions sur les couches de métal. A partir des considérations précédentes, on suppose que seule la partie gauche de la courbe TPA est pertinente et qu'elle représente la convolution de la partie avant du cigare effectif TPA avec la distribution de la collection de charge mentionnée dans l'introduction que nous essayons de caractériser.

III.6.5.3. Estimation de la profondeur du volume sensible

Sur la Figure III-26, nous avons défini la mesure de DS comme la profondeur à laquelle le seuil est deux fois la charge minimum. On obtient alors la valeur de ds par correspondance la profondeur sensible en soustrayant une approximation de premier ordre de la convolution avec le cigare de génération.

Nous avons les mesures de la longueur du cigare efficace L_{TPA} pour des énergies supérieures à 1nJ et nous avons vu que L_{TPA} diminue avec l'énergie [Shao 2011].

On peut alors définir un ds tel l'équation suivante:

$$ds = D_S - \frac{n_{Si}}{n_{SiO_2}} \frac{L_{TPA}}{2} \qquad \text{Équation III-3}$$

Depuis le profil de seuil SEL mesuré à faibles énergies allant de 200 à 400pJ, nous pouvons utiliser la valeur de L_{TPA} que nous avons mesurée pour les 1nJ (7µm) comme une borne supérieure, conduisant à une borne inférieure pour la valeur de D_s. De cette façon, à partir de nos mesures et notre calcul, nous obtenons ds > 3 µm.

L'examen d'une valeur inférieure pour L_{TPA} conduirait à une valeur supérieure de ds. Concernant DS, nous considérons une incertitude de mesure de ± 0,5µm liée aux erreurs de micro-positionnement et aux fluctuations de l'énergie laser.

L'effet de cette incertitude sur la valeur mesurée de ds est supérieure à 2µm. Compte tenu d'une modélisation précise de ces variations, il est possible d'obtenir une résolution axiale, avec une limite liée au paramètre confocal du faisceau (environ 12 microns de longueur d'onde 800nm). Des mesures différentielles utilisant plusieurs longueurs d'onde de mesure ont également fourni des résultats intéressants sur l'épaisseur du volume sensible avec des mesures de SET dans des circuits analogiques [Weulersse 2008].

Comme mentionné précédemment, la "profondeur sensible" ds doit être comprise comme un paramètre caractéristique le long de l'axe de la profondeur, comme une fonction de l'efficacité de collection charges 3D continue.

Le facteur 2 que nous avons utilisé pour définir DS est un choix arbitraire, mais semble cohérent avec la définition du FWHM de L_{TPA}.

III.6.6. Influence de la tension de polarisation sur profil SEL

L'analyse par faisceau laser permet de réaliser des études de l'influence de la tension d'alimentation sur le déclenchement du mécanisme SEL.

La tension d'alimentation est connue pour avoir un impact significatif sur le mécanisme de déclenchement Latchup, les valeurs plus élevées conduisant généralement à une plus grande sensibilité (i.e. LET seuil faible).

Les profils de seuil de déclenchement SEL en fonction de la position de la focalisation laser dans la zone de collection du composant pour différentes tensions de polarisation sont représentés Figure III-27.

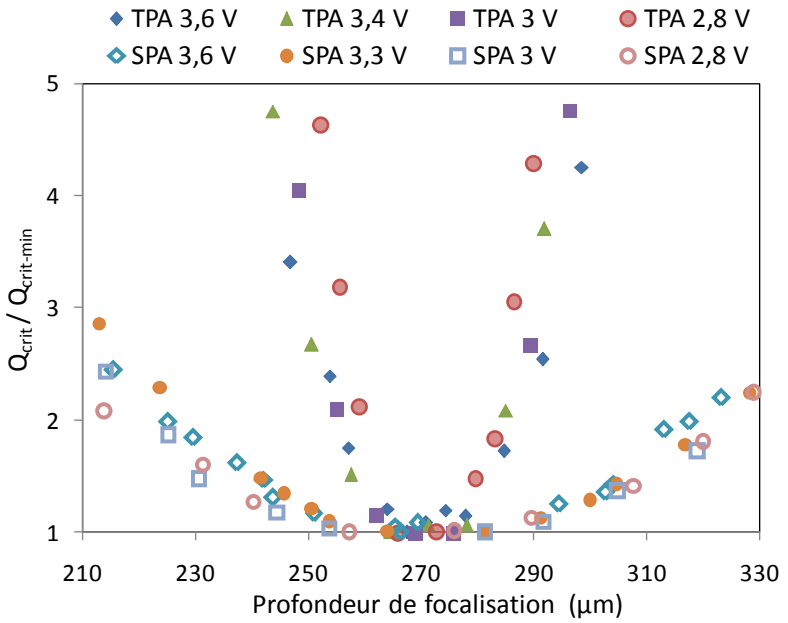


Figure III-27 : Profils de sensibilité SEL normalisés pour différentes tensions d'alimentation par stimulation SPA et TPA.

Nous avons répété la mesure profil SEL en fonction de la profondeur en utilisant la stimulation SPA et TPA pour plusieurs valeurs de la tension d'alimentation dans la limite des spécifications du circuit allant de 2,8 à 3,6Volts. Les profils présentés sur la Figure III-27 ont été obtenus avec la même méthode que décrite précédemment.

Les résultats normalisés montrent une tendance croissante en TPA indiquant que la profondeur sensible augmente avec la tension d'alimentation. Ceci est cohérent avec le comportement classique des appareils SEL CMOS sensibles qui montrent une baisse du LETseuil avec des valeurs de biais plus élevées. Puisqu'une plus petite quantité de charge rassemblée est exigée pour déclencher un SEL avec une tension d'alimentation plus élevée, cette quantité peut être rassemblée plus loin de la couche active par la diffusion.

III.7. Conclusion

Les résultats précédents ont démontrés la capacité d'analyse TPA pour aider à la détermination de la profondeur du volume sensible SEL. Des études plus approfondies sur d'autres circuits sont nécessaire pour confirmer la suffisance de la résolution axiale de la technique TPA pour les technologies actuelles utilisées dans les applications spatiales.

Ce type d'analyse ne semble pas possible avec une configuration TPA optique standard compte tenu de la résolution axiale que nous avons caractérisée et de l'épaisseur des couches de diffusion des technologies CMOS actuelles.

La résolution TPA axiale est compatible uniquement avec les mécanismes de collections qui présentent une taille significative en «profondeur» de la couche sensible, comme ceux des SELs dans les technologies CMOS, SEBs dans les MOSFET de puissance et SETs dans les circuits analogiques composés de transistors bipolaires.

Nous avons mesuré le profil de seuil SEL selon la profondeur de focalisation dans une mémoire SRAM en utilisant un faisceau laser. Après la caractérisation de la taille effective L_{TPA} et l'analyse détaillée des profils de seuil de SEL, nous avons estimé une limite inférieure de la profondeur SEL sensibles de $3 \pm 0.5\mu m$.

Si nous considérons que les valeurs mesurées de ds (3 µm) sont de 50% supérieures à la valeur de 2µm utilisée pour le calcul des taux, nous ne pouvons raisonnablement supposer qu'une méthode de calcul fondée sur une fonction d'efficacité grâce à notre valeur du paramètre ds conduirait à un taux SEL par jour plus élevé que la méthode classique utilisant 2 µm pour la profondeur sensible.

Les calculs du taux de SEL par jour de la SRAM ont été effectués en utilisant OMERE (TRAD) avec une valeur classique de 2µm pour la profondeur appliquée au model RPP.

Cela a conduit à une prédiction de 0,92 SEL/circuit/jour. Le taux mesuré en vol sur la base des données présentées dans une publication de 2007 [Bezerra 2007] est 1,09 SEL/circuit/jour. La différence entre les taux prédits et mesurés n'est pas significative compte tenu des marges de conception classique.

D'après les données TPA, nous pouvons dire que le taux de SEL serait plus élevé que 1.1 SEL/circuit /jour ce qui serait une estimation prudente du taux de SEL.

La résolution axiale technique peut être aussi mise à profit pour l'étude de régions actives de n'importe quel type de circuit sans déconvolution avec le cigare laser. Elle apporte une 3ème dimension aux techniques optiques déjà existantes.

Les impulsions de type picosecondes ont permis des cartographies de sensibilité par le déclenchement d'événements SEL. La possibilité de mettre plusieurs structures à contribution pour déclencher un événement peut servir aux techniques d'analyse laser comparative de sensibilité à l'irradiation laser entre deux circuits.

En perspectives de ces résultats l'étude peut être destinée à raffiner les modèles utilisés dans les simulateurs de taux d'événements ou à l'analyse de circuits défaillants. Avec ce banc d'analyse, il serait possible de cartographier précisément le volume sensible afin d'améliorer le modèle des simulateurs de taux d'événements SEL et obtenir des mesures plus conservatrices sur les circuits dédiés à l'aéronautique et aux applications spatiales.

L'obtention des mesures est aujourd'hui impossible avec le module laser picoseconde, il faudra attendre la version femtoseconde.

Nous allons voir dans le chapitre suivant l'intégration du module laser picoseconde dans l'équipement d'analyse industriel MERIDIAN-IV sur la plateforme CIMPACA. Ce chapitre est illustré par des cas d'études utilisant des instruments de tests industriels standard.

Chapitre IV

Intégration et application en environnement industriel.

Chapitre IV : Intégration et application en environnement industriel.

IV.1. Introduction :

Les sources laser impulsionnelles picosecondes étaient déjà présentes dans quelques équipements d'analyse industriels et servaient uniquement à sonder le circuit. L'aspect impulsionnel laser était utilisé pour des analyses laser sondage résolues en temps comme la technique PICA ou LVP (cf. Chapitre1). Ces techniques de type sonde utilisent des sources lasers de faibles énergies donc ces mêmes sources lasers ne permettaient pas de réaliser de la stimulation laser comme avec les sources impulsionnelles de la plateforme ATLAS.

Avec l'apparition de sources lasers fibrées compactes émettant à une longueur d'onde de 1064nm, comme celle présente dans le prototype développé dans le cadre du projet MADISON, il a été possible d'intégrer une source laser impulsionnelle fibrée dans un équipement industriel.

Dans ce chapitre, nous allons voir l'intégration d'une version plus aboutie du prototype du module laser picoseconde (décrit en détail chapitre2) dans l'outil d'analyse industriel MERIDIAN-IV. La présentation du module laser sera suivie par des analyses de circuits qui ont servi à la validation de l'interaction des impulsions laser avec des structures numériques CMOS embarquées sur un substrat Silicium.

La première expérimentation illustre la diffusion des charges induites par laser dans un circuit par stimulation laser continue. Pour illustrer l'inconvénient principal de l'utilisation du laser continu, nous avons réalisé une comparaison d'une signature OBIC entre la stimulation laser continue 1064nm et picoseconde.

La deuxième expérimentation porte sur la quantification d'un seuil laser par injection de charge dans une structure numérique spécialement développée dans le cadre du projet MADISON. Nous conclurons ce chapitre par un exemple de configuration de test permettant l'analyse de structures numériques complexes avec l'utilisation du testeur électrique industriel D10.

Nous allons tout d'abord commencer par présenter brièvement l'équipement industriel MERIDIAN-IV puis le module laser picoseconde.

IV.2. L'équipement MERIDIAN-IV

Le MERIDIAN-IV du constructeur DCG-Systems est un outil performant et très polyvalent permettant l'application de nombreuses techniques d'analyse par voie optique. Les techniques EMMI, OBIC, OBICRH, DLS et LVI peuvent être utilisées de manière complémentaire sur ce même équipement (cf. chapitre1).

L'équipement MERIDIAN-IV dispose de différentes caméras qui permettent de réaliser de l'imagerie statique dans le spectre optique visible et proche infrarouge. Le MERIDIAN est aussi doté d'un système d'imagerie LSM couplé à différentes sources lasers continues. Les performances du système LSM permettent le balayage local du circuit avec différentes sources lasers.



Descriptif des spécifications :

- Camera InGaAS pour la technique EMMI.
- Lentille SIL observation de technologie 45 nm.
- Table optique avec microscope inversé et scanner optique.
- Sources lasers continues 1340nm et 1064nm.
- Système de navigation synchronisée spatialement avec le layout.

Figure IV-1 : Equipement MERIDIAN-IV du constructeur CREDENCE DCG-Systems.

Cet équipement a été spécialement développé pour les tests industriels directement sur wafers. La colonne optique LSM est mobile, elle peut se déplacer suivant trois axes x,y et z permettant ainsi la navigation de la colonne LSM par rapport au wafer.

L'équipement dispose d'un plateau qui supporte le système de carte à pointes servant à polariser un circuit directement sur un wafer complet. Le support permet de déplacer le wafer dans le plan de la table optique pour analyser différents circuits sur un même wafer. Comme nos structures sont encapsulées dans des boîtiers, nous avons utilisé le plateau conçu pour supporter la carte à pointes et maintenir notre carte de test embarquant le socket.

L'équipement MERIDIAN est piloté par un logiciel qui permet le contrôle de tous les équipements précédemment détaillés. L'interface graphique est similaire au logiciel SCANWORKS de la plateforme ATLAS et permet de définir les paramètres de balayage laser. L'avantage de celui-ci est la connexion avec le logiciel de navigation dans le Layout qui permet d'effectuer un lien entre les coordonnées de navigation de la colonne optique LSM avec celles du logiciel de navigation dans le Layout du circuit. Cela facilite l'identification des structures pendant la navigation en cours d'analyse. Ce système permet d'identifier la zone à analyser ou de remonter à la structure analysée dans le Layout du circuit.

IV.2.1. Module laser picoseconde.

Le module laser picoseconde intégré dans l'équipement est une version plus aboutie du système optique prototype laser picoseconde sur la plateforme ATLAS. Ce module se compose d'une source laser impulsionnelle, d'un sélecteur d'impulsion et d'une électronique chargée de la synchronisation des différents éléments et de gérer l'interface graphique utilisateur.

Comme la colonne optique du MERIDIAN présente une forte atténuation optique par rapport au microscope LSM de la plateforme ATLAS, l'oscillateur laser embarqué dispose d'une puissance moyenne de plus de 6Watts.

Pour des raisons d'alignement optique facilitant l'intégration, le module a été inséré sur le chemin optique de la source laser 1064nm continue de l'équipement MERIDIAN. Le module intègre un commutateur optique intégré permettant de basculer de la source laser continue 1064nm vers le module picoseconde via une simple clef en façade de l'équipement.

Le module comporte une deuxième clef servant à l'activation de la source laser impulsionnelle qui est connectée en série au système de gestion de coupure laser "interlock" du MERIDIAN.

Le pilotage de ce module laser picoseconde se fait via deux interfaces graphiques. L'une sert à la gestion de l'oscillateur laser et permet de choisir la fréquence du train d'impulsions ainsi que le gain de l'amplificateur laser, l'autre est dédiée à la commande du sélecteur d'impulsion et de l'atténuateur optique de précision. Grâce à ces interfaces, il est simple de configurer le mode de déclenchement du sélecteur d'impulsion et de configurer l'énergie laser désirée. Les différents modes de sélection du sélecteur d'impulsion sont récapitulés dans le Tableau IV-1.

Tableau IV-1 : Différents modes du sélecteur d'impulsion.

"Trig_In"	Délivre une impulsion à chaque front présent sur l'entrée "TrigIn".
"Gate_In"	Laisse passer un train d'impulsions pendant la durée de la fenêtre sur l'entrée "GateIn"
"Internal_Clock"	Prélève une impulsion à la fréquence désirée. Cela permet de travailler avec un taux de répétitions bien inférieur à celle de l'oscillateur laser principal qui est > 1MHz.
"Continus"	Le sélecteur laisse passer toutes les impulsions laser délivrées par l'oscillateur laser (1, 5, 10 ou 20MHz).

L'option « SynchronizeTrigIn » permet de synchroniser le sélecteur d'impulsion sur la source laser.

IV.3. Matériel

Pour des raisons d'encombrement et de facilité de maintenance, le module dispose d'une baie individuelle qui lui est dédiée. Illustrée Figure IV-2, elle embarque l'oscillateur laser, le sélecteur d'impulsion ainsi qu'un module de gestion de la distribution en énergie qui est relié au système de coupure d'urgence de l'équipement MERIDIAN.



Figure IV-2 : Baie contenant le module laser picoseconde.

Des entrées et sorties permettent de communiquer avec d'autres instruments comme le contrôle du balayage du faisceau laser du MERIDIAN ou un testeur électrique.

IV.3.1. Intégration du module :

Une fibre optique de plusieurs mètres a été insérée entre le module laser et le MERIDIAN par une connexion temporaire avant la connexion définitive. Cette connexion induit une perte de puissance en sortie du système. Pour compenser cette perte nous avons augmenté le gain de la source laser. L'augmentation du gain laser a pour effet d'augmenter l'énergie crête dans les fibres optiques et induit un décalage d'une partie du spectre optique hors de la bande d'absorption du silicium effet Raman (c.f chaptire2). Cette composante de l'impulsion laser va contribuer à la diminution de l'énergie disponible en sortie du système donc à une réduction de l'efficacité d'interaction laser photoélectrique.

IV.4. Mise en œuvre du module laser picoseconde

L'objectif de l'intégration du module laser picoseconde dans l'équipement MERIDAN-IV a été de développer un outil performant permettant d'utiliser de nouvelles méthodologies de test. Nous allons maintenant voir différentes configurations de test mises en place suite à l'installation du module picoseconde dans le MERIDIAN.

IV.4.1. Structures de tests.

Des structures de test ont été spécialement conçues, elles sont le fruit de la collaboration entre les différents partenaires industriels (fondeurs) et les laboratoires de recherche (test électrique) du projet MADISON. Ces sont des structures élémentaires simples à adresser électriquement avec une topologie volontairement éclatée pour faciliter la localisation de l'interaction laser.

L'énergie étant limitée en sortie de microscope, seules les structures les plus sensibles ont pu être analysées. Nous avons commencé par l'analyse de la structure "PULSE_CAPTURE" qui est théoriquement la plus sensible à la stimulation laser picoseconde car elle a été développée pour la capture d'évènements transitoires.

IV.4.1.1. Test de « PULSE CAPTURE ».

La structure de test nommée « PULSE CAPTURE » est organisée par blocs fonctionnels pour faciliter la corrélation entre les positions laser et le bloc analysé. Elle se compose de bascules qui sont chargées de la capture des transitoires positifs et négatifs induits par laser. L'avantage de cette structure est la mémorisation de la détection d'un événement jusqu'au réarmement de ses bascules.

IV.4.1.2. Mise en place de l'échantillon.

Pour minimiser la perte de transmission optique à l'interface air/substrat, il faut que la surface du substrat soit normale à l'axe de la colonne optique donc nous nous sommes servis du plateau qui normalement supporte les cartes à pointes pour maintenir l'échantillon. L'avantage de l'utilisation de ce plateau est sa motorisation qui permet d'optimiser l'inclinaison du circuit par rapport à l'axe optique de la colonne optique.

Comme sur la plateforme ATLAS, la colonne optique LSM dispose d'un détecteur de puissance qui mesure la puissance laser optique réfléchie sur ou dans le circuit. Le signal réfléchi permet d'ajuster la focalisation du faisceau laser et d'effectuer des déplacements relatifs par rapport à la surface du substrat. Pour l'ajustement de la focalisation dans les métaux au travers du substrat, on utilisera la source laser 1300nm continue et pour la mise au point sur les zones actives de type poly-silicium la source laser 1064nm continue.

Il est possible d'obtenir un signal réfléchi avec la source laser 1064nm picoseconde à condition de travailler à fréquence de répétition élevée pour que le capteur puisse intégrer les impulsions picosecondes.

IV.4.1.3. Analyse au travers du substrat (Face arrière).

La puce embarquant le circuit a été assemblée dans un boîtier QFP144 qui a été aminci à une épaisseur de substrat d'envions 180µm.

Pour optimiser la position de focalisation du laser dans le substrat, nous avons réduit le pas de déplacement de l'objectif en z à 0,1µm. La profondeur de focalisation optimum correspond au contraste maximum pendant une cartographie. Afin de pourvoir observer l'évolution de l'indicateur de la valeur maximum du signal réfléchi en fonction de la position de focalisation, le contraste automatique du système d'imagerie LSM a été désactivé.

L'équipement MERIDIAN dispose d'un système de navigation de la colonne optique par rapport au plateau qui permet le changement d'objectif sans perdre la focalisation.

IV.4.1.4. Configuration de test.

Les tensions de polarisation nominales sont 3,3V pour les entrées et les sorties du circuit et 1,2V pour le cœur. Des ampèremètres mesurent les courants d'alimentation en continu pendant les tests pour vérifier que le laser ne provoque pas d'événement qui pourrait engendrer des surconsommations.

Dans un premier temps, nous avons utilisé un oscilloscope pour visualiser les signatures électriques liées à l'interaction laser.

IV.4.1.5. Stimulation laser 1064nm

L'utilisation d'une longueur d'onde 1064nm est idéale pour la stimulation photoélectrique au travers de substrats en Silicium car l'énergie des photons est inférieure au bande gap du Silicium. Cela limite l'expansion du faisceau dans les zones actives et crée des non-linéarités d'absorption autour des zones de dopage. L'absorption par porteurs libres dépend de la température qui joue ainsi un rôle important dans le processus d'absorption.

La résolution de techniques d'analyse par stimulation laser par faisceau continu 1064nm est souvent plus limitée par la diffusion des charges. Pour illustrer ce phénomène très présent lors de la stimulation laser au travers du substrat, nous avons réalisé des cartographies de courant avec un amplificateur de courant du MERIDIAN qui donne la valeur du courant du cœur de la puce en fonction de la position laser.

Nous avons constaté l'apparition d'un courant OBIC important avec la présence du laser 1064nm continu. Ce courant visible sur l'alimentation du cœur de la puce est proportionnel à la puissance laser. Avec une faible puissance laser, ce courant n'influe pas sur le fonctionnement du circuit mais le niveau est de 10 à 100 fois plus grand que la consommation nominale du circuit.

Dans un premier temps, nous avons cartographié ce courant avec la technique de mesure OBIC classique puis comparé le niveau de courant transitoire pouvant être induit avec le laser picoseconde.

IV.4.1.6. Etude du signal OBIC

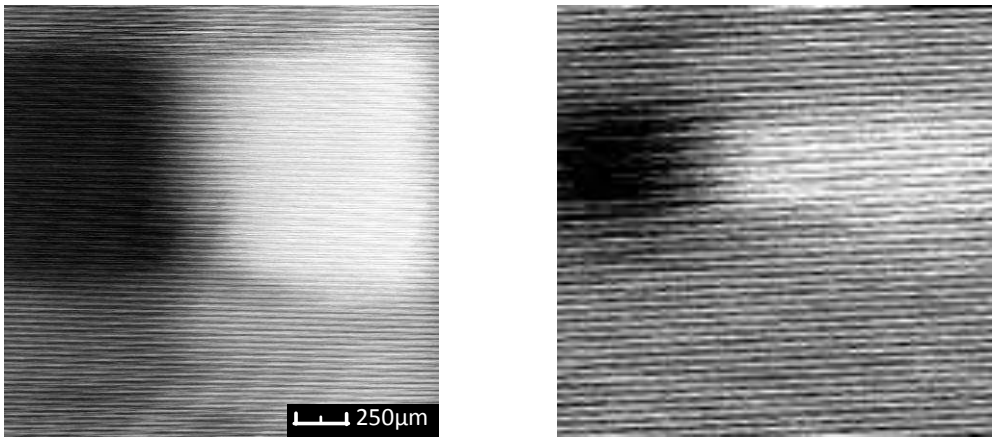
Le balayage été effectué en bordure de la puce pour mettre en évidence la collection liée à l'absorption linéaire par la structure polarisée dans la puce.

L'utilisation de l'objectif 1x permet de relever une cartographie de la totalité du circuit. Avec une vitesse de balayage laser de 27µs par pixel, les variations de courant sont assez rapides et d'intensité suffisante pour être visualisées au travers de la bande passante du système de mesure de courant. La limitation de la bande passante de mesure vient principalement de l'amplificateur de courant du MERIDIAN qui comporte un filtre passe bande ainsi que des cartes de test sur lesquelles de nombreuses capacités de découplages sont présentes. La bande passante de l'amplificateur de courant KBOX (du MERIDIAN) n'est pas suffisante pour réaliser une cartographie OBIC transitoire avec la source laser picoseconde. Pour réaliser des mesures de courants transitoires, il est préférable d'avoir une synchronisation avec la source laser comme sur la plateforme ATLAS.

Nous avons utilisé l'oscillateur laser picoseconde à sa fréquence de répétition maximale (20MHz) avec le sélecteur d'impulsion en mode continu afin de produire un effet cumulatif. Grâce à un oscilloscope synchronisé sur la source laser, nous avons visualisé les variations de courants transitoires. Nous avons augmenté l'énergie laser jusqu'à avoir une modulation présente sur l'alimentation avec un niveau de courant suffisant pour être visualisé par l'amplificateur de courant de la KBOX et pouvoir réaliser une cartographie avec le laser picoseconde.

Le filtre passe bande de la KBOX est configuré avec la fréquence de coupure la plus basse (30Hz) et la fréquence de coupure la plus élevée à (2kHz). Le laser picoseconde a été configuré à un taux de répétition de 20MHz et à une atténuation optique de 5dB.

Avec l'utilisation de la source laser continue émettant à 1064nm et le balayage du circuit embarqué dans la puce, nous avons obtenu la cartographie OBIC Figure IV-3a.



a) b)

Figure IV-3 : Cartographies OBIC à 1064nm : a) obtenue avec la source laser continue et une puissance de 5mW, b) avec la source laser picoseconde à 20MHz et une puissance de 9mW.

Pour comparer la distribution de la sensibilité avec un courant OBIC et le laser picoseconde, nous avons utilisé l'oscillateur laser à sa fréquence maximale soit 20MHz. Nous avons vu apparaître une augmentation du courant moyen au cœur de la puce, avec une puissance de 9mW.

Nous pouvons clairement constater la différence de l'étendue de sensibilité sur la cartographie OBIC Figure IV-3b, qui est plus localisée que sur la cartographie représentée Figure IV-3a obtenue avec le laser continu à 5mW. Si l'on regarde l'amplitude des courants transitoires induits par les impulsions picosecondes, elle est 5 fois plus élevée que le courant moyen mesuré. Pour obtenir les mêmes niveaux de courants avec l'utilisation de la source laser continue, il faut une puissance de 30mW.

Avec une puissance de 30mW, il devient impossible de réaliser une cartographie OBIC car la génération excessive de charges induit un courant constant de plusieurs dizaines de microampères dans le cœur de la puce. Ce courant perturbe ainsi son bon fonctionnement pendant le balayage créant des surconsommations aléatoires du circuit.

Ces mesures montrent que la collection des charges induites par le faisceau laser picoseconde est plus localisée qu'avec le laser continu car le dépôt d'énergie transitoire limite les phénomènes de diffusion.

La deuxième étape a été de caractériser la stimulation laser piscoseconde avec une structure de test numérique élémentaire avec l'équipement MERIDIAN.

IV.5. Etude du seuil de déclenchement laser

Dans un premier temps, nous avons cherché à obtenir un changement d'état en sortie de la structure résultant d'une interaction avec le laser 1064nm picoseconde avec un balayage de toute la structure. Les objectifs 20x et 100x ont permis de se focaliser uniquement sur la structure nommée "PULSE_CAPTURE".

IV.5.1. Repérage des zones sensibles au laser.

Le repérage de la zone la plus sensible a été effectué avec le sélecteur d'impulsion en mode continu pour laisser passer toutes les impulsions délivrées par l'oscillateur principal laser du module laser picoseconde et avoir la plus grande probabilité d'interaction.

La fréquence de l'oscillateur laser est configurée à 20MHz avec un gain d'amplification de (Q=650). Le gain de l'amplificateur a été optimisé pour avoir le maximum d'énergie en sortie du système compris dans le spectre optique de la bande d'absorption du Silicium. Nous utiliserons l'atténuateur optique placé en sortie du sélecteur d'impulsion pour maîtriser l'énergie déposée.

La visualisation du changement d'état en sortie de la structure se fait directement avec un oscilloscope connecté aux sorties des bascules. Après un balayage de la structure avec une atténuation de 10dB et un niveau électrique bas sur l'entrée de l'inverseur principal de PULSE CAPTURE, on provoque le déclenchement de la bascule chargée de la détection des transitoires de tensions positifs.

Pour pouvoir quantifier le seuil de sensibilité, il faut tout d'abord localiser précisément la zone sensible. Nous avons commencé par cartographier la sensibilité en fonction de l'état de polarisation de l'inverseur principal. Pour cela, nous avons utilisé l'entrée DLS du MERIDIAN permettant d'enregistrer la position du laser au moment où les bascules capturent un événement électrique.

IV.5.2. Cartographie de la sensibilité

Pour réaliser une cartographie, il a fallu mettre en place une boucle de test prenant en charge la mesure de l'état des bascules suivant la position laser et leur réarmement pour chaque pixel analysé. Dans la configuration illustrée Figure IV-4 , un oscilloscope observe l'état des sorties de bascules.

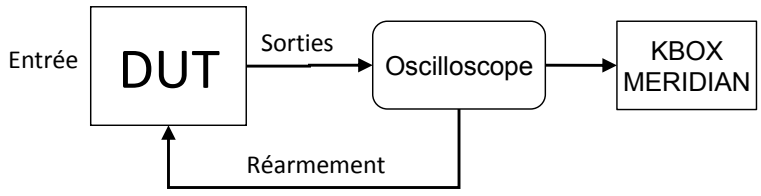
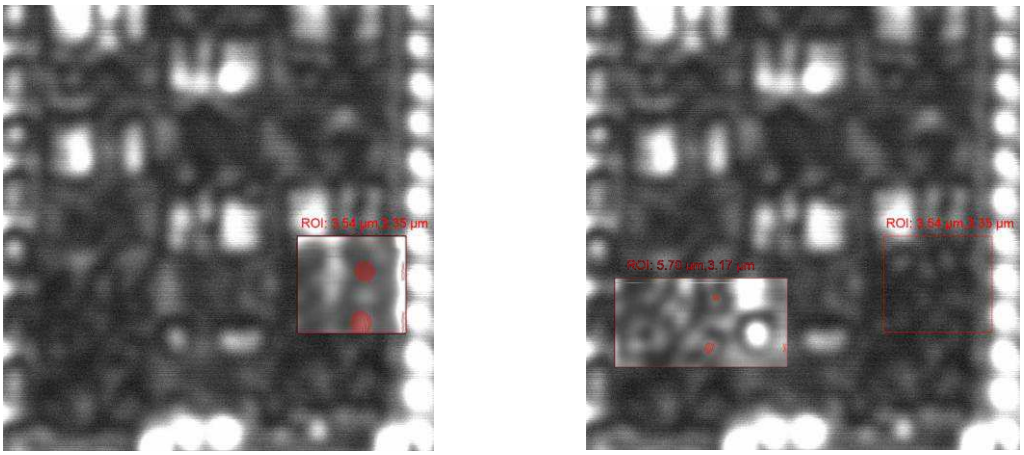


Figure IV-4 : Configuration de test asynchrone aux impulsions laser servant à réaliser une cartographie avec le MERIDIAN.

L'oscilloscope est utilisé comme un testeur électrique, il est chargé de délivrer un signal suivant l'état des sorties des bascules. Cela est rendu possible avec l'utilisation de masques sur les niveaux électriques. Dès que l'oscilloscope détecte un changement de niveau en sortie des bascules, il envoie une impulsion sur l'entrée DLS de la KBOX (l'interface d'acquisition du MERIDIAN) permettant l'acquisition d'un signal PASS/FAIL de façon synchrone au déplacement du laser.

Dans cette configuration, si il y a un changement d'état en sortie des bascules, l'oscilloscope délivre un front sur l'entrée pass/fail de la KBOX et l'entrée de réarmement des bascules. Durant la cartographie en mode DLS, le MERIDIAN enregistre la présence d'une impulsion électrique sur l'entrée DLS pour chaque pixel balayé par le faisceau laser. La vitesse de balayage laser est définie à 13ms/pixel pour que le réarmement de l'oscilloscope et des bascules ait lieu pour chaque pixel analysé.

Avec l'utilisation de la source laser picoseconde à un taux de répétition de 20MHz et une atténuation optique de 5dB, nous avons obtenu les cartographies représentées Figure IV-5.



a) b)

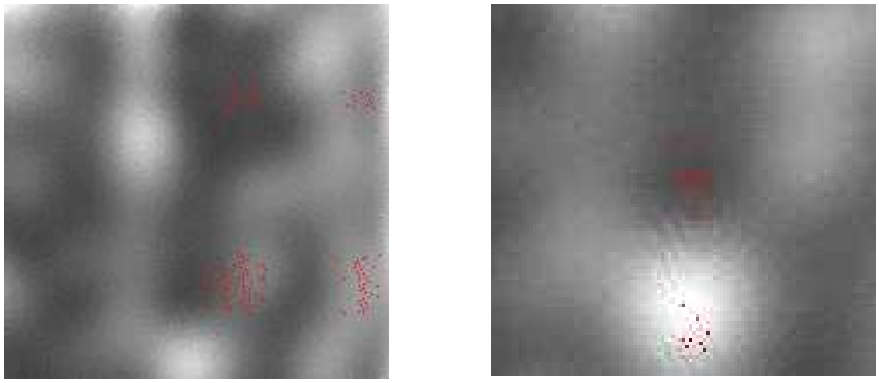
Figure IV-5 : Cartographies obtenues avec l'objectif 100X, a) avec un niveau bas sur Vin, b) avec un niveau haut sur Vin.

Le logiciel du MERIDIAN permet la superposition de la cartographie du signal réfléchi avec l'état du niveau de l'entrée DLS. Les cartographies Figure IV-5 ont été obtenues en deux temps. Les mesures en niveaux de gris sont des mesures de réflexion du laser dans la structure avec la source laser 1064nm continue. Pendant le balayage avec le faisceau continu, aucune interaction n'a eu lieu même avec l'utilisation de l'énergie laser maximum disponible. Avec une puissance laser de 200mW, seule une augmentation de plusieurs dizaines de microampères du courant cœur de la puce a été constatée.

Les pixels rouges représentent la détection d'un changement de niveau sur l'une ou les deux sorties des bascules suite au second balayage avec le faisceau laser picoseconde.

La cartographie Figure IV-5a a été obtenue avec un niveau bas en entrée de PULSE_CAPTURE et un balayage défini sur la bascule de détection de fronts positifs. Quant à la cartographie b, elle a été obtenue avec un niveau haut sur l'entrée de l'inverseur principal et un balayage de bascule de détection de front négatif. Pour tester la reproductibilité des mesures, nous avons analysé un deuxième circuit embarqué sur une deuxième puce.

Les zones sensibles de la cartographie représentée Figure IV-6a sont quasi identiques que à celles sur la puce numéro 1. Mais elles sont de dimensions plus petites avec la même énergie laser.



a) b)

Figure IV-6 : a) Cartographie de bascule de détection des fronts positifs Vddcoeur = 1.2V, b) de la bascule chargée de la détection des fronts négatifs avec Vddcoeur = 0.9V.

Cette différence de dimension vient de la quantité d'énergie laser transmise au circuit. Elle doit être légèrement plus faible car la puce n'a pas tout a fait la même épaisseur ni la même qualité de surface.

Dans l'autre bascule, le seuil laser est légèrement plus haut. Nous avons donc été obligés de réduire le taux de répétions laser à 10MHz pour obtenir plus d'énergie laser par impulsion. Nous avons constaté qu'avec une réduction de la tension de polarisation du cœur de la puce, le seuil laser était plus bas.

Nous avons réalisé une cartographie de la zone sensible correspondant à la bascule chargée de la détection des transitoires négatifs avec une tension de polarisation du cœur de la puce de 0,9V. Les zones cartographiées représentées Figure IV-5b sont légèrement différentes des zones cartographiées sur la puce 1 avec une tension de polarisation de 1,2V. Ces différences de sensibilités peuvent être justifiées par la mise à contribution de structures différentes suivant la tension de polarisation.

Une fois les zones sensibles identifiées, la deuxième étape a été l'étude du seuil laser en fonction de la fréquence de répétition laser pour différentes tensions de polarisation du circuit.

IV.5.3. Étude du seuil laser en fonction de la fréquence d'irradiation laser

La zone d'intérêt choisie pour les mesures de seuil laser est celle de la bascule ayant le seuil le plus bas (celle chargée de la détection des fronts positifs). Les mesures de seuil ont été effectuées pour différentes tensions de polarisation du cœur de la puce de 0,8V à 1,2V et avec des taux de répétition laser compris de 100Hz à 20MHz.

Pour réduire le taux de répétions laser, nous avons utilisé le sélecteur d'impulsion car si l'on change la fréquence d'oscillateur laser, le spectre optique d'impulsion laser sera légèrement différent suivant la fréquence de répétition.

Pour diminuer le taux de répétions laser, le secteur d'impulsion a été configuré en mode "InternalClock" pour les taux de répétitions de 100Hz à 500kHz et en mode "Continu" pour les mesures effectuées à 20MHz.

Enfin, pour obtenir un maximum de puissance en sortie de la colonne optique, nous avons commencé par utiliser l'objectif 20x qui a une meilleure transmission que l'objectif 100x.

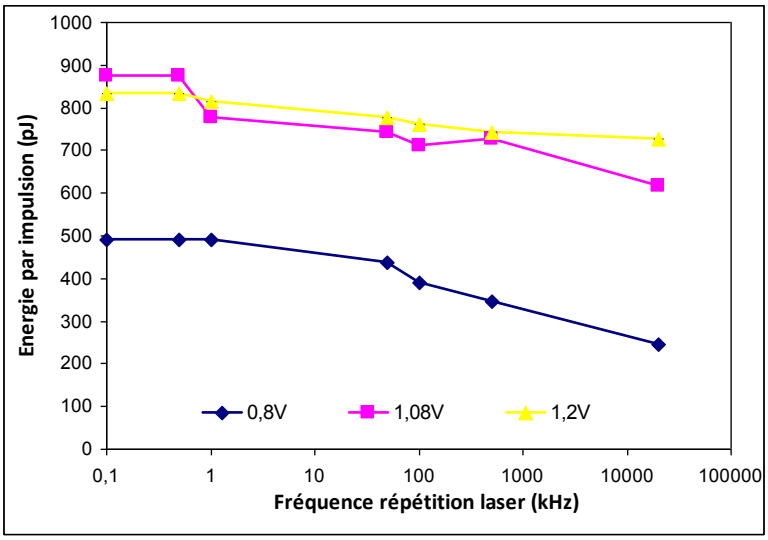


Figure IV-7 : Seuil laser nécessaire à la commutation d'une bascule en fonction du taux de répétition laser pour différentes tensions de polarisation du cœur du circuit avec l'objectif 20x.

Les mesures de seuil représentées Figure IV-7 montrent une tendance à la baisse du seuil laser avec un taux de répétition laser élevé. Cette signature de l'aspect cumulatif vient de l'excédent de charges générées entre deux impulsions.

Les seuils mesurés avec une tension de polarisation de 1,08V et 1,2V sont quasiment identiques, seules les mesures avec une tension de polarisation de 0,8V se distinguent avec un seuil beaucoup plus bas.

Les mesures de seuil laser représentées Figure IV-8 on été obtenues avec l'objectif 100x. La résolution axiale de cet objectif permet une meilleure maîtrise du positionnement de la focalisation du spot laser dans le substrat.

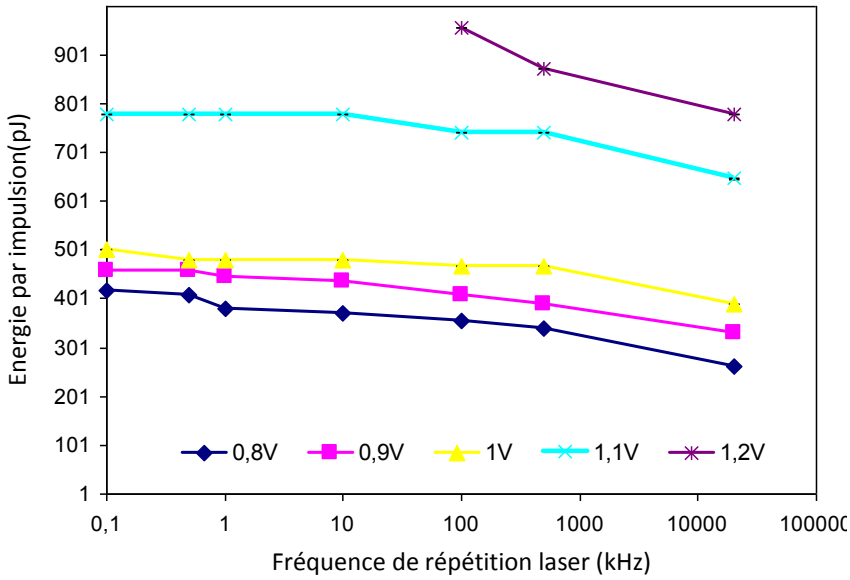


Figure IV-8 : Seuil laser nécessaire à la commutation de la bascule en fonction du taux de répétition laser avec l'objectif 100x pour différentes tensions de polarisation du cœur du circuit.

Les mesures effectuées avec une fréquence de répétition laser en dessous de 100kHz et une tension de polarisation de 1,2V non pas pu être réalisées car il n'y avait pas assez d'énergie disponible en sortie du système. On peut noter que l'effet cumulatif est présent pour les mesures effectuées avec des fréquences de répétition laser supérieures à 100kHz.

IV.5.4. Conclusion

Ces premiers résultats montrent la capacité d'induire des événements électriques impossibles à réaliser avec un faisceau laser continu. Le seuil laser a pu être quantifié en fonction des conditions de polarisation et de la fréquence d'irradiation laser. Avec la puissance limitée par la connexion temporaire du module, seules les structures associées aux bascules de détection de transitoire ont réagies à la stimulation laser.

IV.5.5. Corrélation avec les simulations électriques

En parallèle de ces expérimentations, des simulations de l'interaction laser sur les structures ont été développées au cours du projet MADISON par le laboratoire à l'IM2NP (13). Le modèle utilisé est le même que celui utilisé par Mr DOUIN [Douin 2008]. Il est inspiré des modèles plus complexes utilisés pour faire l'analogie entre l'interaction laser et celle d'un ion incident dans un circuit [Leroy 2006].

Les différents modèles prennent en considération deux principaux paramètres qui sont le taux de génération de charges par laser et les mécanismes de collection associés.

Les constantes de temps de génération des charges et celle des mécanismes de collection des charges générées par laser dépendent essentiellement de la mobilité des porteurs, elle même dépendante de la température et du champ électrique [Douin 2006].

L'effet de "funneling", qui est une distorsion des lignes de champ induite par une forte densité de porteurs et très présent pendant l'interaction avec une particule. Les lasers de types femtoseconde sont plus adéquats pour reproduire le phénomène, en particulier avec l'absorption deux photons qui nécessite une forte densité d'énergie.

En régime picoseconde le phénomène de « funnelling » est négligeable, en particulier à faible énergie laser. Le modèle le plus courant pour simuler l'effet laser est constitué d'une simple source de courant transitoire court-circuitant le drain et le substrat du transistor irradié.

Pour ajuster les paramètres du modèle, il est possible de réaliser une corrélation entre les résultats expérimentaux et les simulations électriques. Si l'on applique le modèle aux transistors d'une simple chaîne d'inverseur, on peut ajuster les paramètres des sources de courant jusqu'à générer des transitoires de tension se propageant dans la chaîne, similaires à ceux obtenus sous irradiation laser (cf. chapitre2).

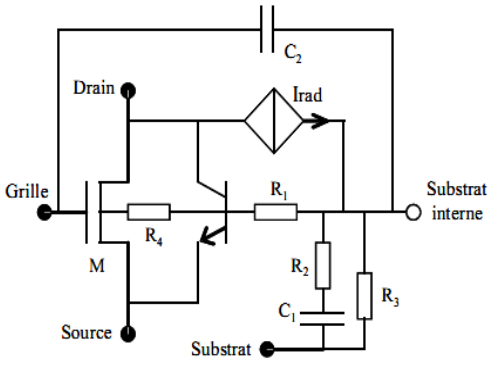


Figure IV-9 : Schéma électrique du model SPICE d'un MOSFET irradié[Pouget et al. 1999].

Pour cela, il faut reproduire l'effet sur une structure de test et cartographier la sensibilité des transistors qui la composent par irradiation laser pour obtenir des signaux transitoires caractéristiques. Expérimentalement, il n'est pas simple de reproduire les transitoires dans des structures fortement intégrées car la topologie fait qu'elle absorbe les événements transitoires induits par laser [Perdu 2005] [Douin 2005].

Une technique plus rapide et plus simple permet de définir un modèle approximatif rapide pour simuler l'effet du laser pulsé dans une architecture numérique complexe. Pour simuler l'effet du courant induit par le laser nous utilisons des sources de courant transitoires.

Pour les structures complexes, nous pouvons ajouter une source de courant dans un nœud du circuit pour remonter aux signatures électriques identifiées par laser.

La forme de la source de courant prend en considération les charges créées lors de la propagation du faisceau dans le substrat [Douin 2005].

Pour simuler l'injection de charges par laser picoseconde dans une structure, nous utilisons une source de courant qui se compose d'une source continue qui simule l'effet cumulatif et la diffusion des porteurs et d'une source de courant transitoire qui simule l'aspect transitoire du dépôt d'énergie laser.

Si l'on veut améliorer la précision du modèle, il faut arriver à générer des transitoires du même type que ceux obtenus avec le laser picoseconde [Leroy 2006], [Douin 2006]. La bande passante de mesure des transitoires peut être limitée en aval par des structures du type multiplexeur ou pads actifs.

Il n'est pas simple d'établir une relation entre le taux de génération et les courants induits par laser. En effet, il est d'une part difficile de quantifier l'énergie laser déposée dans le circuit et d'autre part de prendre en compte la distribution du faisceau laser dans les structures.

IV.5.6. Conclusion

Un partenaire rattaché au laboratoire IMP2NP a obtenu des niveaux de courant caractéristiques capables de donner naissance à des signatures électriques similaires avec une simulation focalisée dans les zones sensibles identifiées par laser. Le laser picoseconde a apporté une localisation rapide des zones sensibles et a limité le volume de simulation électrique.

Cette méthodologie d'analyse a montré que cette configuration de test pouvait être mise en œuvre avec l'étude d'une signature électrique quelconque et peut servir à valider le durcissement d'un design.

Les tests précédents ont servi à déterminer les conditions optimales d'utilisation de la source picoseconde dans le MERIDIAN pour avoir la meilleure interaction possible avec le circuit.

IV.6. Mise en œuvre de stimulation laser dynamique

Le dernier cas d'étude a servi à la mise en place d'une configuration de test utilisant le testeur électrique D10 pour une stimulation électrique dynamique. Le circuit analysé est un microcontrôleur défaillant.

IV.6.1. Configuration de test dynamique

Dans cette section, nous allons voir le repérage du défaut avec la technique EMMI puis la mise en place de la configuration dynamique de test afin de vérifier la méthodologie d'analyse pour tenter de localiser un défaut non localisable par stimulation laser continue.

La technique DLS ("Dynamic Laser Stimulation") est une stimulation laser continue couplée à une stimulation électrique dynamique. Dans un premier temps la configuration est dite asynchrone car il n'y a pas de connexion entre le testeur électrique et le contrôle du scanner optique.

Pour illustrer cette configuration de test, notre cas d'étude a été un microcontrôleur de technologie 150nm défaillant. Un lot d'échantillons défaillants suite à un défaut dans le processus de fabrication a été mis à ma disposition.

La mise en œuvre de la configuration de test utilise le testeur industriel D10 du constructeur CREDENCE et le module laser picoseconde intégré dans le MERIDIAN.

IV.6.2. Mise en place de la configuration de test DLS

Le circuit a été assemblé dans un boitier SBGA 256 puis son substrat aminci à une épaisseur d'environ 150µm afin de pouvoir effectuer l'analyse au travers du substrat.

Ce circuit embarque des "chaînes de scan" qui sont chargées de couvrir un maximum de transistors pendant le test électrique du circuit. Nous avions à notre disposition le programme de test électrique qui est effectué en sortie de production. Suite à son exécution, l'une des chaînes revoie de mauvaises informations. Avec une analyse des vecteurs retournés par les chaînes, un nœud qui connecte plusieurs structures ensembles a été identifié comme illustré Figure IV-10.

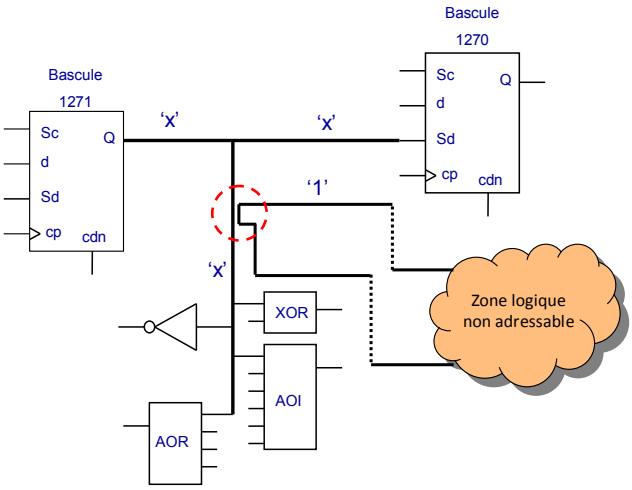
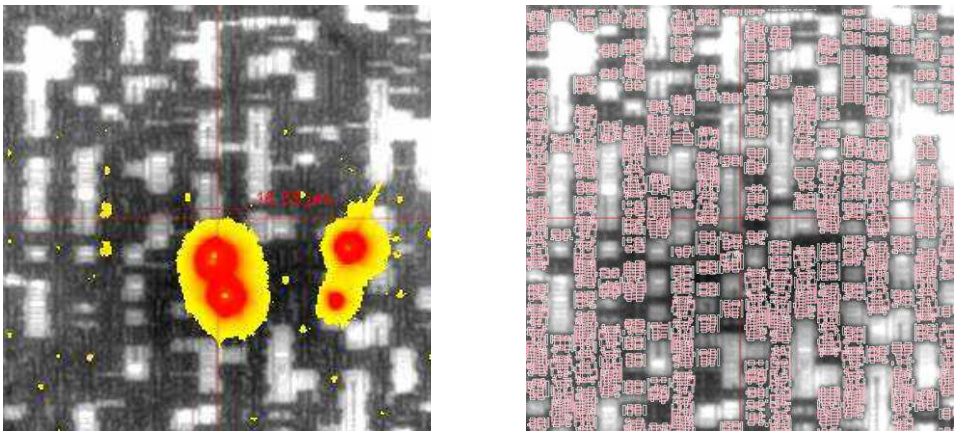


Figure IV-10 : Lien crée par le défaut dans le microcontrôleur.

Avec un système de nano-probing, une tension de 0.7V a été mesurée au noeud. Le défaut serait d'une dizaine d'Ω et établit un lien entre une circuiterie accessible par une chaîne de scan et une zone logique non adressable par le test électrique.

Avec la technique EMMI, des sites d'émission sont mis en évidence et correspondent aux structures connectées au défaut.



a) b)

Figure IV-11 : Sur l'image a) image effectuée avec la caméra InGas, b) l'alignement des zones de dopage et du poly-silicium.

Les zones en couleurs sur l'image EMMI Figure IV-11a représentent les sites d'émission mesurés avec la caméra InGas sur une intégration de 120 secondes. Les niveaux de gris représentent l'image obtenue avec une illumination infrarouge au travers du substrat.

La connexion corrélative avec le layout permet d'effectuer l'alignement du champ de vue du microscope avec les zones actives du circuit (polysilicium) comme illustrée Figure IV-11b. Les zones d'émission détectées sont bien celles identifiées durant les analyses précédentes. Elles correspondent aux structures de la chaîne de scan reliées à un niveau haut par le défaut résistif.

Le circuit a déjà été analysé avec des techniques utilisant des sources laser continues. Le défaut n'a pas été détecté par stimulation thermique laser ni par stimulation photoélectrique laser par faisceau continu car la résistance du défaut est très faible.

Nous avons mis en place une configuration de test similaire à celle utilisant le laser continue 1064nm utilisant la stimulation laser photoélectrique pour perturbe la circuiterie non défaillante autour du défaut.

IV.6.3. Configuration de test DLS

Le but de cette dernière section est de montrer la configuration expérimentale à mettre en place pour la cartographie d'une zone sensible à la stimulation laser via une chaîne de scan dans un produit défaillant avec l'utilisation du module laser picoseconde.

La stimulation électrique du circuit est effectuée par le testeur D10. Il pilote les chaînes de scan à une cadence de 20MHz. Pendant le balayage laser, le testeur va boucler sur le test d'une chaîne qui retourne un mauvais pattern. Dans un premier temps, nous avons mis en place une configuration asynchrone entre le testeur électrique, la source laser et le microscope comme illustré Figure IV-12.

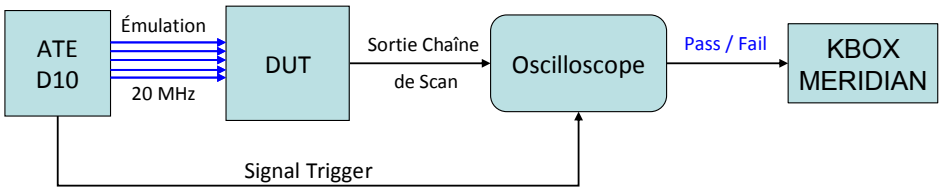


Figure IV-12 : Configuration de test avec laser asynchrone

Comme dans la configuration du test utilisée pour l'analyse de "PULSE CAPTURE", l'oscilloscope est chargé de délivrer un signal au changement du pattern en sortie de chaîne. Nous avons utilisé une sortie du testeur pour générer un trigger en phase avec le mauvais bit du signal en sortie de la chaîne, ici le vecteur 1272. Ce trigger sert à la synchronisation de la fenêtre d'acquisition de l'oscilloscope.

IV.6.4. Stimulation laser photoélectrique

Avec l'utilisation du laser 1064nm continu, la probabilité d'interaction avec le circuit est élevée. Un pixel semble plus sensible que les autres mais n'est pas concerné par le défaut physique. La cartographie représentée Figure IV-13 a été réalisée en mode DLS, avec une puissance laser de 30mW et une vitesse de balayage laser maximum. Quel que soit le sens de balayage laser, l'irradiation d'un pixel déclenche un fort appel de courant qui induit le disfonctionnement du circuit et donc de la chaîne de scan.

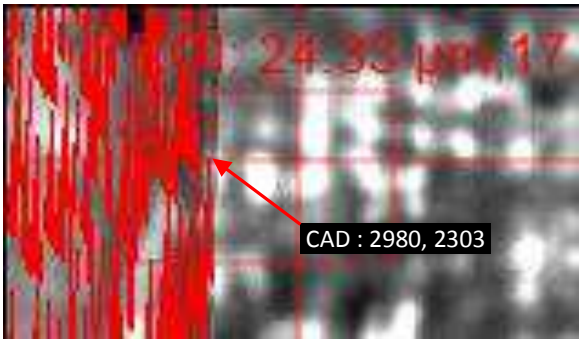


Figure IV-13 : Cartographie DLS avec l'utilisation de la source laser 1064nm continue.

Avec une stimulation laser continue à 1064nm, le seuil laser déclenchement de ce fort appel correspondrait à une structure fortement collectrice qui aurait un seuil plus bas que celui de l'apparition d'un événement électrique dans la circuiterie reliée au défaut.

IV.6.5. Stimulation laser 1064nm picoseconde.

Pour avoir la plus grande probabilité d'interaction avec le circuit, nous avons utilisé la source laser picoseconde avec un taux de répétition élevé et le sélecteur d'impulsion en mode "Continu". Nous avons limité le balayage aux structures impactées par le défaut résistif et celles testées par la chaîne de scan. Dans un premier temps, aucune signature n'a été observée avec les taux de répétition laser de 10 et 20MHz et l'objectif 100X ou 20X.

Comme le défaut résistif a déjà été identifié, nous savons qu'il relie la chaîne de scan à une circuiterie logique non adressable électriquement par le test électrique.

La deuxième stratégie a été de réduire le taux de répétition laser pour obtenir plus d'énergie laser par impulsion afin de visualiser un changement d'état du niveau logique dans la circuiterie logique reliée au défaut. Après l'irradiation nous avons constaté une évolution de l'état du pattern en sortie de chaîne avec une fréquence de répétition de la source laser de 5 MHz et 3dB d'atténuation optique avec un objectif 20X soit une énergie de 435pJ par impulsion. Nous avons réussi à provoquer un changement du signal retourné par la chaîne de scan avec la génération d'un événement qui a fait basculer l'état du circuit relié à la chaîne de scan par le défaut.

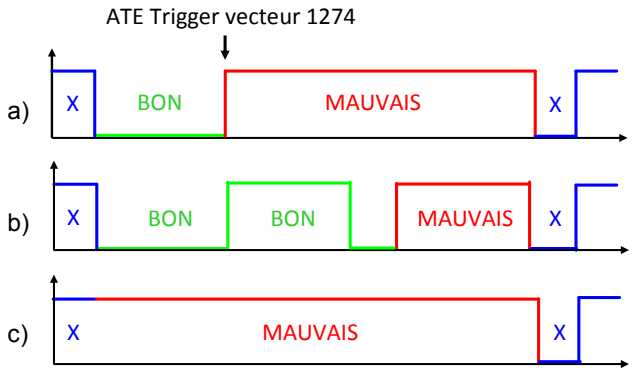


Figure IV-14 : Patterns obtenus en sortie de chaine :a) sans laser, b) après irradiation de la zone logique et c) après irradiation de la chaîne de scan.

Le vecteur a, Figure IV-14 est le signal en sortie de chaîne de scan avant balayage laser ; le deuxième b a été obtenu suite au balayage de la logique reliée au défaut. L'hypothèse la plus simple est que le balayage laser ait engendré un collage à 0 de la logique connectée au nœud par le défaut résistif rendant valide une partie du vecteur de test.

L'évolution du signal n'a pas été observée transitoirement, le collage de la logique est constant et un redémarrage complet du test électrique est nécessaire pour revenir dans l'état initial test.

La probabilité de créer un niveau transitoire au bon instant pour qu'il soit capturé par la chaîne de scan est faible avec cette configuration de test. Si on focalise le balayage laser sur une bascule de la chaîne de scan, nous obtenons le veteur c qui correspond à un disfonctionnement total de la chaîne de scan.

Une deuxième configuration a été mise en place pour augmenter la probabilité de capture de l'interaction laser avec une synchronisation entre le test et le déplacement du faisceau laser. Cela a permis d'observer les changements d'état sans dépolarisation du circuit et réaliser une cartographie de sensibilité.

IV.7. Optimisation de la boucle de test

Dans la configuration précédente, nous utilisions un déplacement continu du faisceau laser. Comme la chaîne est longue et les zones sensibles de petites tailles, la probabilité d'interaction laser pendant le balayage est faible. Pour augmenter la probabilité de capture d'un événement induit dans la logique par la chaîne de scan, un signal externe va contrôler le déplacement du scanner LSM pour pouvoir effectuer plusieurs fois les tests électriques pour chaque pixel.

Un GBF, déclenché par un trigger provenant du testeur électrique, va servir à cadencer le balayage des pixels analysés. La fréquence du GBF appliquée sur l'entrée appelée « PixelTrig » va contrôler le déplacement du faisceau dans le microscope LSM du MERIDIAN comme illustré Figure IV-15.

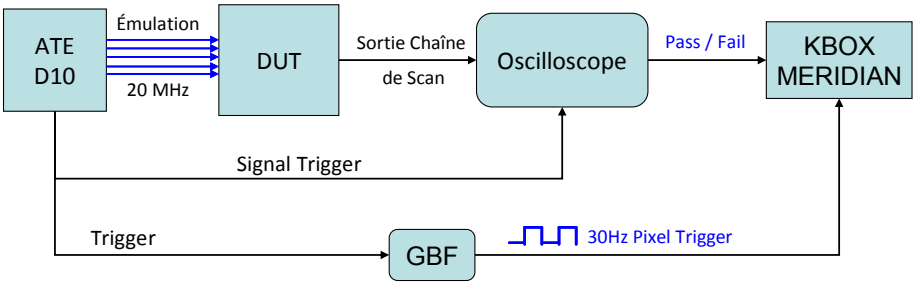


Figure IV-15 : Configuration de test avec le contrôle du déplacement du faisceau laser.

Des signatures collages à 1 ou à 0 ont été observées en sortie de la chaîne de scan suite à une stimulation laser avec une fréquence de répétition de 5MHz, 0dB d'atténuation soit une énergie de 1,3nJ par impulsion.

Comme la chaîne de scan est cadencée par une horloge, la probabilité de capture d'un événement transitoire induit dans la logique par la chaîne de scan est faible. De plus, les bascules de la chaîne de scan sont bloquées à 1 par le défaut résistif. Pour augmenter la probabilité d'interaction, nous avons dû augmenter l'énergie laser mais cela provoque un événement qui paralyse le fonctionnement du circuit.

Avec ce circuit, il est impossible de réaliser une cartographie car pendant la présence d'un niveau haut ou un niveau bas constant en sortie de la chaîne, le circuit devient complètement non fonctionnel et nécessite une dépolarisation.

Le disfonctionnement total de la chaîne de scan a été validé avec une mesure EMMI, avec une disparition des zones d'émissions initialement mesurées.

IV.7.1. Conclusions

La mise en place de test de structure numérique avec un testeur illustre l'aboutissement de l'intégration du module laser picoseconde dans l'équipement d'analyse industriel «MERIDIAN-IV » au sein du laboratoire d'analyse de défaillance CIMPACA à Rousset (13) dans le cadre du projet MADISON.

Les structures mises à disposition par les différents partenaires industriels, ont permis de mettre en œuvre des configurations de test. Les quelques mesures effectuées ont servi de support pour expliquer le fonctionnement du module laser picoseconde auprès des futurs utilisateurs sur place.

Pour le premier cas d'étude, des simulations électriques ont été effectuées et ont validé la sensibilité des circuits dans les zones repérées avec le faisceau laser impulsionnel.

Pour le deuxième cas d'étude, même si la chaîne de scan est cadencée à 20MHz, la probabilité d'interaction reste faible car le pattern de test électrique est long. L'augmentation de l'énergie laser a mené à la mise au disfonctionnement de deux échantillons pendant les stimulations par laser continu.

Dans le cadre de l'étude de ce circuit, il serait possible d'utiliser le laser 1064nm picoseconde pour réaliser une injection de charges en synchronisme avec le stimulus. Cela n'a pas été mis en œuvre car il y a peu d'intérêt sur ce circuit. En effet, le défaut est déjà localisé et de nature résistive et les techniques de thermographie ou d'émission de lumière sont encore très performantes pour des mesures de l'état de polarisation de transistors de cette dimension.

Ce cas d'étude a permis de mettre en place une configuration de test qui peut être appliquée à n'importe quel circuit avec l'utilisation d'un ATE tel que le D10 couplé au MERIDIAN-IV.

Conclusion

Aujourd'hui, le module laser picoseconde a été intégré dans l'outil d'analyse MERIDIAN IV sur la plateforme industrielle de CIMPACA. Tous les travaux présentés dans ce mémoire ont servi à la validation du fonctionnement des éléments optiques que le module intègre. Ces validations étaient essentielles, pour obtenir impulsions de type picoseconde à l'issue de son intégration dans l'équipement industriel. L'oscillateur laser émet des photons à une longueur d'onde 1064nm, ce qui permet une stimulation laser au travers du substrat avec une génération de charges se limitant autour des zones fortement dopées dans les couches actives du circuit.

La faible durée d'irradiation laser permet l'injection de charges sur une durée très courte et donc l'activation de régimes de photo-courants spécifiques susceptibles de révéler des défauts non accessibles par une stimulation laser par faisceau continu.

L'énergie disponible en sortie du microscope permet l'utilisation de la stimulation laser au travers d'un substrat aminci à quelques centaines de micromètres d'épaisseur. Le contrôle du dépôt d'énergie très précis procuré par ce module laser autorise la stimulation laser par effet photoélectrique de zones actives dans des circuits VLSIs.

La possibilité de caractérisation d'un circuit en fonctionnement nominale ou avec une stimulation électrique dynamique est possible de part les nombreuses possibilités de synchronisation du module laser picoseconde.

Des nombreuses configurations de test ont été mises en place au cours de cette thèse et illustrent le panel de test possible avec cet outil pour l'analyse de défaillance.

Les méthodologies d'analyse utilisées avec la stimulation photoélectrique par faisceau continu sont compatibles avec l'utilisation du module laser picoseconde. L'aspect impulsionnel va permettre d'aller plus loin en terme d'analyse paramétrique avec les techniques de stimulation laser classiques décrites dans le premier chapitre et répond en partie aux problématiques limitant l'application des techniques d'analyses par stimulation laser par faisceau continu dans les circuits VLSIs.

Tous ces tests valident l'intégration du module laser pulsé dans un outil industriel. Ce module augmente le panel d'outils disponibles sur l'équipement MERIDIAN-IV en apportant un aspect temporel à la stimulation laser. Il est désormais possible de réaliser de fortes injections de charges résolues en temps en synchronisme avec la stimulation électrique.

Les potentialités d'analyses ont été décrites lors de la mise en place du prototype du module laser picoseconde sur la plateforme ATLAS. De nombreuses techniques laser utilisant des sources laser impulsionnelles existent, en particulier pour simuler l'ionisation d'un circuit par une particule. Ces techniques sont basées sur la perturbation du bon fonctionnement du circuit. Les performances de ce module laser permettent d'effectuer des mesures de sensibilité au laser qui peuvent servir à la pré-qualification de la vulnérabilité des circuits face à un milieu agressif et ainsi diminuer les délais des tests dédiés à la mise au point des circuits.

Lors de la mise en place des configurations de test pour les études présentées dans ce mémoire, nous avons constaté que les instruments de mesure présents dans les laboratoires d'analyse de défaillance ne sont pas toujours les mieux adaptés aux analyses de régime transitoire contrairement à ceux de la plateforme ATLAS.

Ces travaux ont montré une augmentation de la résolution latérale avec l'utilisation du processus d'absorption TPA. Etant donné que les futurs circuits seront toujours plus denses, le développement d'un nouvel outil industriel équipé d'une source laser femtoseconde semble indispensable dans les années à venir.

Annexes

Annexe 1

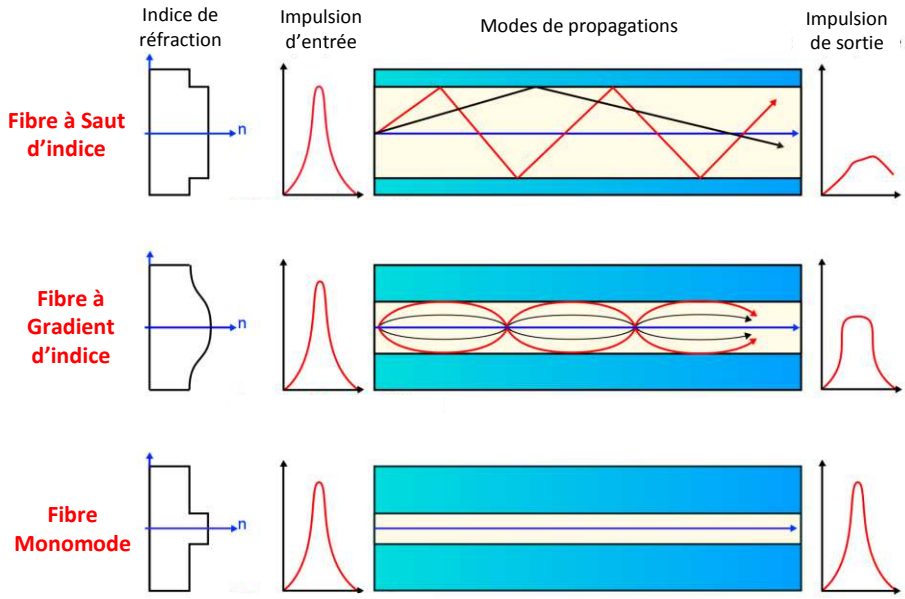
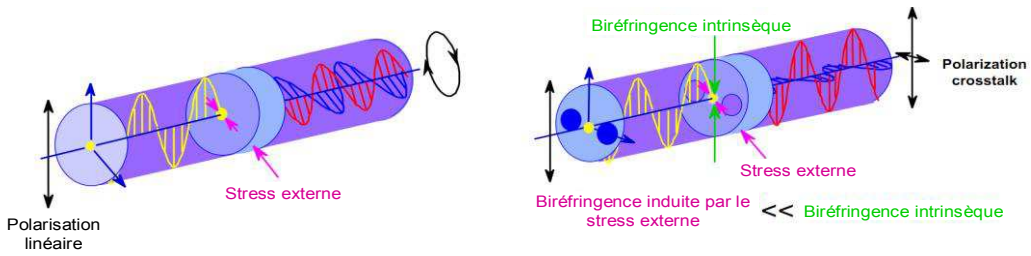


Figure V.1 : Propagation d'une impulsion lumineuse suivant la taille du cœur et le type de fibre optique.

Dans une fibre monomode, les réflexions cœur-gaines sont minimisées, ce qui réduit considérablement les pertes. En revanche, les impulsions ne sont jamais monochromatiques donc toutes les longueurs d'onde ne vont pas se propager à la même vitesse, provoquant un étalement temporel de l'impulsion.

Ce phénomène nommé "dispersion chromatique" peut être compensé en utilisant des fibres à dispersion négative ou des fibres optiques monomodes à cristal photonique. Ces fibres utilisent des propriétés non linéaires de la matière pour limiter ou compenser la dispersion. Cette technologie a été mise au point pour limiter les pertes dans les transmissions longue distance comme les connexions transatlantiques.

Le fort confinement de la lumière dans les fibres monomodes rend les interactions de la lumière avec la gaine importantes. Cela a un effet sur la polarisation lorsque la fibre est sous contraintes. Lorsque une contrainte est appliquée sur la fibre, un effet de biréfringence apparaît. Cela est en partie dû aux défauts de symétrie du cœur ajoutés aux courbures de la fibre. Dans ces conditions, la fibre devient anisotrope pour l'onde lumineuse, ce qui signifie que l'indice vu par la lumière n'est pas le même suivant l'axe de polarisation. Cet effet de biréfringence est accentué si la fibre subie de fortes contraintes mécaniques ou thermiques provoquant un changement d'état de polarisation de la lumière comme illustré Figure V.2a.



a) b)

Figure V.2 : Influence d'un stress sur la Polarisation dans une fibre : a) Fibre monomode à cœur standard b) Fibres monomodes a maintient de polarisation (PANDA).

Les fibres optiques à maintien de polarisation disposent soit d'un cœur de forme elliptique soit de barreaux de contraintes. Les barreaux sont disposés de part et d'autre le long du cœur et ont pour effet d'accentuer l'effet de biréfringence dans un axe comme illustré Figure V.3.

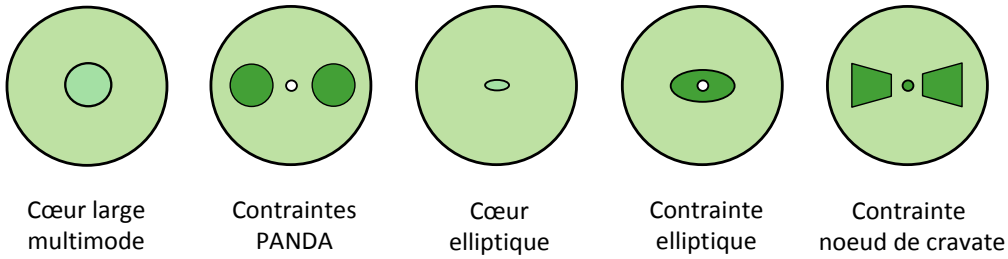


Figure V.3 : Géométrie des différents profils de contraintes autour du cœur de la fibre optique.

La fibre optique illustrée Figure V.2b est une fibre appelée PANDA de par la géométrie de ses barreaux de contrainte. La différence d'indice autour du cœur selon l'axe de polarisation permet le maintient de la polarisation dans cet axe. Cette technologie réduit considérablement l'influence des contraintes dues aux courbures de la fibre et par conséquent stabilise la polarisation en sortie du système.

Annexe 2

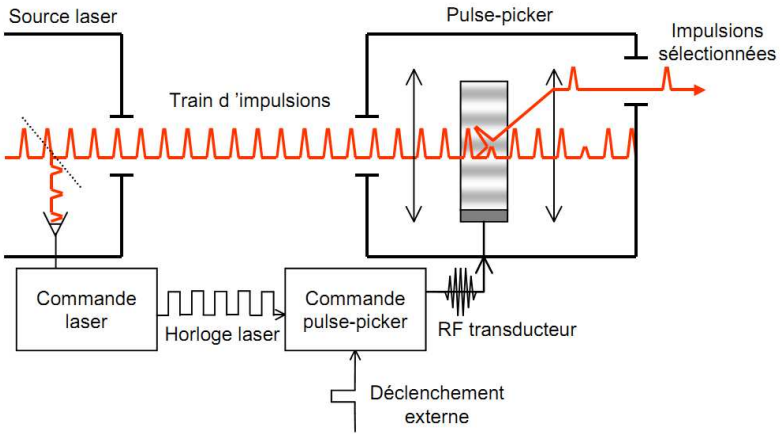


Figure V.4 : Principe du sélecteur d'impulsion [Vincent Pouget 2000]

La Figure V.4 illustre la configuration du sélecteur d'impulsion en sortie de la chaîne laser picoseconde présent sur la plateforme ATLAS. Des circuits de synchronisation ont été développés au cours de la thèse Mr DOUIN [Douin 2007a] afin de réduire la gigue temporelle de déclenchement du laser. Ce travail a mis en évidence l'impact du jitter de synchronisation sur la résolution des techniques d'analyse résolues en temps.

Avec des sources laser ayant des taux de répétition au delà de 50MHz, la synchronisation entre la source laser et le contrôleur doit être optimale. Différents mode de synchronisation sont possibles afin de réduire le bruit d'amplitude dû à la synchronisation.

Pour obtenir le meilleur contraste, l'utilisation de contrôleurs de courant analogiques puissants est requis. Pour les contrôleurs les plus puissants, le temps de réponse est assez long et pas toujours très efficace en mode mono-coup.

Références

[Andriamonje 2005], Pouget, V. et al., 2005. Scanning laser ultrasonics experiments for in situ nondestructive analysis of integrated circuits. *Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on*, 5(3), pp.564 – 571.

[Bardonnie 2005], 2005. The Effectiveness of OBIRCH Based Fault Isolation for Sub-90nm CMOS Technologies.

[Beauchene 2002], Lewis, D. et al., 2002. Backside SC-OBIC using a pulsed NIR-laser and its application to fault location. In *Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2002. IPFA 2002. Proceedings of the 9th International Symposium on the*. Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2002. IPFA 2002. Proceedings of the 9th International Symposium on the. IEEE, pp. 193– 195.

[Beauchene 2003], Lewis, D. et al., 2003. ESD defect localisation using photovoltaic laser stimulation techniques: optimization and interpretation. In *Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2003. IPFA 2003. Proceedings of the 10th International Symposium on the*. pp. 179 – 182.

[F. Beaudoin 2001], Imbert, G. et al., 2001. Current leakage fault localization using backside OBIRCH. In *Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2001. IPFA 2001. Proceedings of the 2001 8th International Symposium on the*. Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2001. IPFA 2001. Proceedings of the 2001 8th International Symposium on the. pp. 121 –125.

[Bergner 1992], Hempel, K. et al., 1992. Application of the time-resolved optical-beam-induced current method to the investigation of n-metal-oxide-semiconductor inverters. *Journal of Applied Physics*, 71, p.3010.

[Bezerra 2007], Lorfevre, E. et al., 2007. CARMEN/MEX test board for the study of radiation effects on electronic components aboard JASON-2 and SAC-D satellites. In *9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2007. RADECS 2007*. 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2007. RADECS 2007. IEEE, pp. 1–6.

[Boit 2008], 2008. Scale, function and materials: debug and diagnosis in electronic device technology roadmap. In IEEE, pp. 1–6.

[Buchner 2002], McMorrow, D. et al., 2002. Single-event transient (SET) characterization of an LM119 voltage comparator: an approach to SET model validation using a pulsed laser. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 49(3), pp.1502– 1508.

[Burnell 2009], Chugg, A.M. et al., 2009. Laser SEL sensitivity mapping of SRAM cells. In *2009 European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*. 2009 European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). IEEE, pp. 324–328.

[Cole Jr. 1999], Tangyunyong, P. et al., 1999. TIVA and SEI developments for enhanced front and backside interconnection failure analysis. *Microelectronics Reliability*, 39(6–7), pp.991–996.

[Darracq 2002], Lapuyade, H. et al., 2002. Backside SEU laser testing for commercial off-the-shelf SRAMs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 49(6), pp.2977– 2983.

[Deyine 2009], Sanchez, K. et al., 2009. Full Dynamic Laser simulation set up. In *Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2009. IPFA 2009. 16th IEEE International Symposium on the*. pp. 213 –217.

[Douin 2008], 2008. Contribution a la modélisation et au développement de Techniques de test et d'analyse dynamiques de circuits Intégrés par faisceau laser pulsé.

[Douin 2005], Pouget, V. et al., 2005. Electrical modeling for laser testing with different pulse durations. In IEEE, pp. 9–13.

[Douin 2006], Pouget, V. et al., 2006. Influence of Laser Pulse Duration in Single Event Upset Testing. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 53(4), pp.1799 –1805.

[Douin 2007a], Pouget, V. et al., 2007. Jitter Improvement of Time-Resolved Photoelectric Laser Stimulation for Dynamic Imaging of Integrated Circuits. In *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE, pp. 1–5.

[Douin 2007b], Pouget, V. et al., 2007. Picosecond Timing Analysis in Integrated Circuits with Pulsed Laser Stimulation. In *Reliability physics symposium, 2007. proceedings. 45th annual. ieee international*. Reliability physics symposium, 2007. proceedings. 45th annual. ieee international. IEEE, pp. 520–525.

[Ecoffet 1997], Duzellier, S., 1997. Estimation of latch-up sensitive thickness and critical energy using large inclination heavy ion beams. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44(6), pp.2378–2385.

[Ee-Leong Lim 2011], Alam, S.-U. et al., 2011. Highly efficient, high power, inband-pumped Erbium/Ytterbium-codoped fiber laser. In *2011 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). IEEE, pp. 1–2.

[Essely 2006], Guitard, N. et al., 2006. Optimizing pulsed OBIC technique for ESD defect localization. In *Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2006. 13th International Symposium on the*. pp. 270 –275.

[Faraud 2011], Pouget, V. et al., 2011. Investigation on the SEL Sensitive Depth of an SRAM Using Linear and Two-Photon Absorption Laser Testing. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, PP(99), pp.1–1.

[Firiti 2005], Beaudoin, Félix et al., 2005. Impact of semiconductors material on IR stimulation signal. In *Proceedings of the European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF)*. Arcachon, France, pp. 1465–1470.

[Fouillat 1996], Lapuyade, H. et al., 1996. Numerical modelling of mechanisms involved in latchup triggering by a laser beam. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 43(3), pp.944 –951.

[Giowacki 2005], Boit, C., 2005. Characterization of thermoelectric devices in ICs as stimulated by a scanning laser beam. In *Reliability Physics Symposium, 2005. Proceedings. 43rd Annual. 2005 IEEE International*. pp. 450 – 457.

[Greason 1989], Kucerovsky, Z. et al., 1989. Latent failures due to ESD in CMOS integrated circuits. In *Industry Applications Society Annual Meeting, 1989., Conference Record of the 1989 IEEE*. pp. 1927 –1933 vol.2.

[Heinrich 1992], Pakdaman, N. et al., 1992. Picosecond backside optical detection of internal signals in flip-chip mounted silicon VLSI circuits. *Microelectronic Engineering*, 16(1–4), pp.313–324.

[Hsieh 1981], Murley, P.C. et al., 1981. A field-funneling effect on the collection of alpha-particle-generated carriers in silicon devices. *IEEE Electron Device Letters*, 2(4), pp.103–105.

[Koyama 1995], Mashiko, Y. et al., 1995. New non-bias optical beam induced current (NB-OBIC) technique for evaluation of Al interconnects. In *Reliability Physics Symposium, 1995. 33rd Annual Proceedings., IEEE International*. Reliability Physics Symposium, 1995. 33rd Annual Proceedings., IEEE International. IEEE, pp. 228–233.

[Leroy 2006], Piestrak, S.J. et al., 2006. Characterizing laser-induced pulses in ICs: methodology and results. In *On-Line Testing Symposium, 2006. IOLTS 2006. 12th IEEE International*. p. 6 pp.

[Lewis 2001], Pouget, V. et al., 2001. Backside laser testing of ICs for SET sensitivity evaluation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 48(6), pp.2193–2201.

[Llido 2011], Gomez, J. et al., 2011. Photoelectric Laser Stimulation applied to Latch-Up phenomenon and localization of parasitic transistors in an industrial failure analysis laboratory. *Microelectronics Reliability*, 51(9–11), pp.1658–1661.

[Machouat 2008], Haller, G. et al., 2008. Scan-based ATPG diagnostic and optical techniques combination: A new approach to improve accuracy of defect isolation in functional logic failure. In IEEE, pp. 1–5.

[Mandelbaum 2003], Bolshtyansky, 2003. Raman amplifier model in single-mode optical fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(12), pp.1704–1706.

[McMorrow 2006], Buchner, S. et al., 2006. Laser-Induced Latchup Screening and Mitigation in CMOS Devices. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 53(4), pp.1819 –1824.

[Miller 2006], Buard, N. et al., 2006. Laser Mapping of SRAM Sensitive Cells: A Way to Obtain Input Parameters for DASIE Calculation Code. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(4), pp.1863–1870.

[Musseau 1991], Leray, J.L. et al., 1991. Charge collection mechanisms in MOS/SOI transistors irradiated by energetic heavy ions. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 38(6), pp.1226–1233.

[Ochoa 1979], Dawes, W. et al., 1979. Latch-Up Control in CMOS Integrated Circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 26(6), pp.5065–5068.

[Paniccia 1998], Eiles, T. et al., 1998. Novel optical probing technique for flip chip packaged microprocessors. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Test Conference*. Washington, DC, USA, pp. 740–747.

[Perdu 2005], Desplats, R. et al., 2005. Identification of some key parameters for photoelectric laser stimulation of IC: an experimental approach. In *Physical and*

Failure Analysis of Integrated Circuits, 2005. IPFA 2005. Proceedings of the 12th International Symposium on the. Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2005. IPFA 2005. Proceedings of the 12th International Symposium on the. IEEE, pp. 21– 26.

[Pickel 1978], Blandford, J.T., 1978. Cosmic Ray Induced in MOS Memory Cells. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 25(6), pp.1166–1171.

[Pouget 2000], 2000. Simulation Expérimentale par Impulsions Laser Ultracourtes des Effets des Radiations Ionisantes sur les Circuits Intègres.

[Pouget 2004], Lewis, D. et al., 2004. Time-resolved scanning of integrated circuits with a pulsed laser: application to transient fault injection in an ADC. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53(4), pp.1227– 1231.

[Ramsay 2007], Serrels, K.A. et al., 2007. Nanometric three-dimensional sub-surface imaging of a silicon flip-chip. In IEEE, pp. 1–2.

[Sanchez 2005], Deplats, R. et al., 2005. Delay variation mapping induced by dynamic laser stimulation. In *Reliability Physics Symposium, 2005. Proceedings. 43rd Annual. 2005 IEEE International*. Reliability Physics Symposium, 2005. Proceedings. 43rd Annual. 2005 IEEE International. IEEE, pp. 305– 311.

[Sanchez 2007], Perdu, P. et al., 2007. Phase Variation Mapping, a Dynamic Laser Stimulation Technique with Picosecond Timing Resolution. In *Reliability physics symposium, 2007. proceedings. 45th annual. ieee international*. pp. 534 –541.

[Scholz 2009], Kerst, U. et al., 2009. A Versatile Design of Solid Immersion Lenses in Bulk Silicon Using Focused Ion Beam Techniques. In ISTFA.

[Shao 2011], Morisset, A. et al., 2011. 3D knife-edge characterization of two-photon absorption volume in silicon for integrated circuit testing. *Optics Express*, 19(23), p.22594.

[Smith 1972], 1972. Optical Power Handling Capacity of Low Loss Optical Fibers as Determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering. *Applied Optics*, 11, p.2489.

[Terrill 1984], Byrne, P.F. et al., 1984. A new method for preventing CMOS latch-up. In *Electron Devices Meeting, 1984 International*. Electron Devices Meeting, 1984 International. IEEE, pp. 406– 409.

[Vallett 2007], 2007. Why Waste Time on Roadmaps When We Don't Have Cars? *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 7, pp.5–10.

[Weulersse 2008], Bezerra, F. et al., 2008. Probing SET Sensitive Volumes in Linear Devices Using Focused Laser Beam at Different Wavelengths. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55(4), pp.2007–2012.

Contribution Scientifique

E. Faraud, V. Pouget, K. Shao, C. Larue, F. Darracq, D. Lewis, A. Samaras, F. Bezerra, E. Lorfevre, and R. Ecoffet. "Investigation on the SEL Sensitive Depth of an SRAM Using Linear and Two-Photon Absorption Laser Testing", NSREC 2011, Nuclear Science, IEEE TNS, 58(6), pp.2637 –2643.

V. Pouget, E. Faraud, K. Shao, S. Jonathas, and D. Lewis. "Picosecond Single-Photon and Femtosecond Two-Photon Pulsed Laser Stimulation". ISTFA 2009, International Symposium for Testing and Failure Analysis.

K. Shao, A. Morisset, V. Pouget, E. Faraud, C. Larue, D. Lewis, and D. McMorrow. "3D knife-edge characterization of two-photon absorption volume in silicon for integrated circuit testing." Optics Express 19 (23) 2011.

K. Shao, V. Pouget, E. Faraud, C. Larue, and D. Lewis. "Comparison of classical and two-photon photoelectric laser stimulation capabilities for failure analysis." In Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), 2011 18th IEEE International Symposium on the failure analysis.

Résumé

Les techniques de localisation de défauts basées sur la stimulation laser restent aujourd'hui les techniques parmi les plus avancées qui existent. Elles permettent la stimulation thermique ou photoélectrique de façon très localisée sans contact physique.

Les travaux dans ce mémoire sont consacrés au développement et à l'application de techniques d'analyse par faisceau laser impulsionnelles destinées à l'analyse des circuits intégrés.

Le développement matériel et les investigations de méthodologies d'analyse ont été portés par la motivation du projet MADISON (Méthodes d'Analyse de Défaillances Innovantes par Stimulation Optique dyNamique), qui a pour but d'augmenter le taux de succès des analyses des circuits complexes VLSI par stimulation laser.

L'utilisation de systèmes optiques très performants comprenant des sources laser impulsionnelles fibrées nous a permis d'explorer les capacités en termes d'analyse par stimulation laser photoélectrique impulsionelle. Une étude originale de l'étude du phénomène Latchup a montré une augmentation de la résolution latérale avec l'utilisation du processus d'absorption non linéaire.

Summary

The fault location based on laser stimulation are now among the most advanced available techniques. They allow thermal or photoelectric stimulation localized without physical contact.

This Ph.D works was devoted to the development and application of techniques using pulsed laser for integrated circuits' analyses.

Material development and investigation of analysis methodologies have been held by the motivation of the MADISON project (Methods of Analysis of Failures by Innovative Dynamic Optical Stimulation), which aims to increase the success rate analysis of complex circuits VLSI by laser stimulation.

We used high-performance optical systems including fibered pulsed laser sources to explore the capabilities in terms of analysis by photoelectric laser stimulation. An original study of the Latchup phenomenon showed an improving lateral resolution by using nonlinear absorption process.