



HAL
open science

Optique pour la Microélectronique : du capteur au traitement de l'image

Caroline Fossati

► **To cite this version:**

Caroline Fossati. Optique pour la Microélectronique : du capteur au traitement de l'image. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2008. tel-00384815

HAL Id: tel-00384815

<https://theses.hal.science/tel-00384815>

Submitted on 15 May 2009

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.

Optique pour la Microélectronique : du capteur au traitement de l'image

Présentée par

CAROLINE VEVE
épouse FOSSATI

Maître de Conférences
63° section du CNU



Soutenue le : 26 Novembre 2008

JURY :

Joseph SAILLARD	Pr.	Université de Nantes	Président
Frédéric GAFFIOT	Pr.	Ecole Centrale Lyon	Rapporteur
Eric MOREAU	Pr.	Université Sud Toulon-Var	Rapporteur
Jean Pierre SESSAREGO	D.R.	CNRS / LMA	Rapporteur
Salah BOURENNANE	Pr.	Ecole Centrale Marseille	Directeur
Didier MARQUIS	Pr	Directeur. Ecole Centrale Marseille	Examinateur

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce document, sont avant tout un travail d'équipe, et dans mon cas le travail de plusieurs équipes... Je tiens donc à remercier toutes les personnes avec qui j'ai eu le plaisir d'échanger, de travailler, d'avancer et d'évoluer...

Mais avant tout je veux exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des membres du jury.

Merci à **Joseph SAILLARD**, Professeur à l'Université de Nantes pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et de présider ce jury.

Merci à **Didier MARQUIS**, Professeur, Directeur de L'Ecole Centrale Marseille pour avoir accepté de juger mon travail d'Enseignant -Chercheur.

Et enfin, et surtout, merci aux trois rapporteurs pour avoir accepté de se pencher sur des travaux qui de par leur transversalité pouvaient par certains points leur paraître bien éloignés de leur domaine de prédilection...

Merci donc à **Frédéric GAFFIOT**, Professeur à L'Ecole Centrale Lyon pour son regard avisé sur la partie optoélectronique de ce travail,

à **Eric MOREAU**, Professeur à l'Université du Sud Toulon Var (ISITV), pour son expertise sur la partie traitement du signal et des images

et enfin à **Jean Pierre SESSAREGO**, Directeur de Recherche CNRS au LMA, pour le plaisir qu'il m'a fait en rapportant sur mes activités de recherche grâce à son expérience dans le domaine de la propagation des ondes et traitement du signal associé.

Je tiens à remercier *Claude AMRA* pour m'avoir accueillie dans son laboratoire (LOSCM) en 1998 et m'avoir par là même permis de bénéficier de la dynamique de la création en 2000 de **l'INSTITUT FRESNEL** dirigé aujourd'hui par *Hugues GIOVANNINI*, que je remercie ici pour sa confiance et son soutien dans mes choix d'orientations.

Merci à *Mireille COMMANDRE* responsable de l'équipe Milieux Aléatoires et Photonique de Puissance (**MAP2**) pour m'avoir « mis le pied à l'étrillé » dans les débuts de ma carrière de MCF. Nous avons partagé nos sujets de recherche et d'enseignement, et c'est sans doute une des raisons qui nous a permis de faire émerger dans l'équipe la thématique « Optique pour la Microélectronique » dans laquelle elle n'a pas hésité à m'encourager et à me laisser prendre beaucoup d'autonomie.

Merci à *Salah BOURENNANE*, responsable du Groupe Signaux Multidimensionnels (**GSM**), pour avoir saisi l'intérêt de l'élargissement de cette thématique aux notions abordées par son équipe, pour m'avoir fait confiance dans cette voie, et avoir su m'amener à faire le lien entre nos différentes thématiques pour ouvrir des perspectives nouvelles. Je tiens à le remercier surtout pour son dynamisme, sa motivation et son enthousiasme dans ces discussions scientifiques, dont il a le secret, et pour lesquelles il sait toujours trouver du temps Elles sont de celles d'où l'on ressort toujours avec l'impression d'être un peu plus intelligent... et avec des centaines de projets dans la tête....Il a su me faire partager sa passion pour notre métier aussi dans le cadre de notre collaboration au sein du **Département Recherche de l'ECM**, et je lui suis très reconnaissante de m'avoir donné cette chance.

Je tiens à remercier à ses cotés, *l'ensemble des membres de l'équipe GSM*, permanents et doctorants, pour leur aide bien sur, mais aussi pour leur ouverture d'esprit et leur sympathie.

Et toutes *les collègues du Département Recherche de l'ECM*, avec qui le travail au quotidien est un plaisir.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets, si je n'y associais pas mes « petits bonheurs » : *Rémi, Estelle, Fanny et leur Papa*. Ce n'est pas facile d'avoir une Maman qui part tôt et qui rentre tard, toujours avec un ordinateur sous le bras.... Leur tolérance, leur affection et leur joie de vivre sont pour moi un soutien quotidien...

SOMMAIRE

A- CURRICULUM VITAE	6
ETAT CIVIL :	7
CURSUS UNIVERSITAIRE :	7
DEROULEMENT DE CARRIERE :	7
AFFECTATION ACTUELLE :	8
RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES ET ACTIVITES COLLECTIVES :	8
B- ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT	9
ENSEIGNEMENTS	10
<i>Aix Marseille III (1993-97 : MES + ½ ATER + Vacations)</i>	10
<i>ENSPM (1998-2004 : ATER + MCF)</i>	10
<i>EGIM / ECM depuis 2003-04 (MCF)</i>	10
RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES ACTUELLES	11
BILAN GLOBAL	11
C- ACTIVITÉS DE RECHERCHE	12
INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
PARTIE I : TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION OPTIQUES DE MATÉRIAUX.....	18
I-1- MICROSCOPIE INFRAROUGE À BALAYAGE.....	19
I-1-1- INTRODUCTION	19
I-1-2- MISE EN PLACE DE LA PLATEFORME DE MESURES	19
I-1-3 RESULTATS DE L'ETUDE	20
ANNEXE 1 : PRINCIPALES PUBLICATIONS SUR LA MICROSCOPIE IR À BALAYAGE.....	22
I-2- MICROSCOPIE PHOTO THERMIQUE.....	23
I-2-1 INTRODUCTION, CONTEXTE :	23
I-2-2 MISE EN PLACE D'UN MICROSCOPE PHOTOTHERMIQUE :	24
I-2-3 INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX :	26
ANNEXE 2 : PRINCIPALES PUBLICATIONS SUR LA MICROSCOPIE PHOTOTHERMIQUE	30
PARTIE II : OPTIQUE POUR LA MICROÉLECTRONIQUE	31
II-1- SIMULATION ET CARACTÉRISATION OPTIQUE D'IMAGEURS CMOS.....	32
II-1-1 INTRODUCTION : CAPTEURS D'IMAGE POUR LA TELEPHONIE MOBILE.....	32
II-1-2 METHODOLOGIE DE MODELISATION PAR TRACE DE RAYONS.....	33
II-1-3 APPLICATION A L'ETUDE ET AU PERFECTIONNEMENT DES STRUCTURES EXISTANTES : OPTIMISATION DE LA FOCALISATION ET DE LA COLLECTE DES PHOTONS SUR DES PIXELS DE 4µM.....	36
<i>a) Influence de la forme des microlentilles.....</i>	<i>37</i>
<i>b) Influence de la position et de la répartition des microlentilles</i>	<i>39</i>
<i>c) Etude des filtres colorés et Infrarouge</i>	<i>43</i>

II-1-4 NOUVEAUX PROBLEMES SOULEVES PAR LA DIMINUTION DE TAILLE DES PIXELS : PASSAGE A UNE TECHNOLOGIE 3 μ M.....	43
a) <i>Influence des lignes de métaux</i>	43
b) <i>Influence de la hauteur d'empilement</i>	44
II-1-5 CARACTERISATION ELECTRO-OPTIQUE DES COMPOSANTS.....	45
II-1-6 LIMITES DE CETTE MODELISATION : IMPORTANCE DE LA DIFFRACTION AVEC LA REDUCTION DE TAILLE DES PIXELS.....	47
II-1-7 MODELISATION PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS : PRISE EN COMPTE DE LA DIFFRACTION, RECHERCHE DE SOLUTIONS NOUVELLES POUR LE FILTRAGE COLORE	48
a) <i>introduction, situation du problème</i>	48
b) <i>Elaboration et validation numérique de notre modèle théorique 2D</i>	49
c) <i>Application au cas des capteurs CMOS, validation expérimentale</i>	52
d) <i>Modélisation 3D et perspectives</i>	53
ANNEXE 3 : PRINCIPALES PUBLICATIONS SUR LES CAPTEURS D'IMAGE CMOS.....	55
II-2- MASQUES AVANCÉS.....	56
II-2-1 INTRODUCTION : LES ENJEUX DE LA PHOTOLITHOGRAPHIE ET LES OPC	56
II-2-2 PREMIERES ETUDES SUR LE SUJET	57
II-2-3 DES METHODES A SOUS ESPACES (TRAITEMENT D'ANTENNE) A LA MODELISATION TENSORIELLE :	62
a) <i>Etude des méthodes de traitement d'antenne</i>	63
b) <i>Rapprochement avec la photolithographie optique</i>	64
II-2-4- ADAPTATION DU TRAITEMENT DU SIGNAL TENSORIEL A LA SIMULATION DE MODELES OPC	64
ANNEXE 4 : PRINCIPALES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LES MASQUES AVANCÉS	70
PARTIE III : CONCLUSIONS ET PROJET DE RECHERCHE	71
CONCLUSIONS	72
BILAN GLOBAL :	75
PROJETS DE RECHERCHE	76
D- PRODUCTION, COLLABORATIONS ET RAYONNEMENT SCIENTIFIQUES.....	80
PUBLICATIONS.....	81
<i>Revues Internationales avec comité de lecture</i>	81
<i>Actes de conférences internationales avec comité de lecture</i>	81
<i>Conférence invitée</i>	82
<i>Autres conférences nationales et internationales</i>	82
<i>Brevet</i>	83
<i>Articles soumis à des Revues Internationales à Comité de Lecture</i> :	83
ENCADREMENTS.....	83
<i>Thèses co-encadrées</i> :	83
<i>Autres types d'encadrement</i> :	84
COLLABORATIONS, ACADEMIQUES, INDUSTRIELLES ET CONTRATS.....	85
ANIMATION ET RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE.....	85

A- CURRICULUM VITAE

Etat civil :

Nom : **VEVE** Epouse **FOSSATI**
Prénoms : **Caroline**, Dominique, Andrée

Date et lieu de naissance : le 29/04/1969 à Carpentras (84)
Nationalité : Française
Situation de famille : Mariée, 3 enfants nés en 01/2000, 10/2002 et 11/2006

Adresse : « La Cardelino » 1282 route de Vedène 84700 Sorgues
tel. : 04.90.39.82.54 / 06.15.25.81.32

Cursus Universitaire :

- DEUG et **Licence de Physique** Aix- Marseille III (P. Cézanne) 06/1991
- **Maîtrise de Physique** Aix- Marseille III (P. Cézanne) 06/1992
- **DEA Sciences des Matériaux** Aix- Marseille III (P. Cézanne) 07/1993
- **Doctorat** de l'Université d'Aix- Marseille III (P. Cézanne) 11/1996

Spécialité : **Sciences des Matériaux**

Directeur de Thèse : **S. Martinuzzi** – laboratoire Défauts dans les Semi-conducteurs et leurs Oxydes : **DSO** (→TECSEN en 2000→IM2NP en 2008)

Titre « *Détection et caractérisation électrique de précipités dans le silicium par des techniques non destructives : FTIR, MIRB, LBIC ...* »

Obtenu avec la mention **Très Honorable** le 15/11/1996

Devant la commission d'examen :

- | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| ▪ M. BORGHESI Alessandro | Professeur (Univ. Di Pavia - Italia) | Rapporteur |
| ▪ M ^{me} GALL-BORUT Pascale | Maître de conférence (Montpellier II) | Rapporteur |
| ▪ M. MARTINUZZI Santo | Professeur (Aix-Marseille III) | |
| ▪ M. PICHAUD Bernard | Professeur (Aix-Marseille III) | Président du Jury |
| ▪ M. VANHELLEMONT Jan | Professeur (IMEC Leuven - Belgium) | Rapporteur |

Déroulement de carrière :

- **½ ATER** à **Aix- Marseille III** (P. Cézanne) de septembre 1996 à septembre 1997

Service Electronique et Physique Appliquée

Laboratoire : “ Défauts dans les Semi-conducteurs et les Oxydes ” (**DSO**)

- **Ingénieur de recherche** en CDD de septembre 1997 à décembre 1997 au labo. **DSO**

Caractérisation de silicium mono cristallin pour application solaire (contrat européen SICOCELL)

- **ATER** à l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille (**ENSPM**) de septembre 1998 à septembre 1999

Enseignement en Microelectronique

Recherche au “ Laboratoire d'Optique des Surfaces et des Couches Minces ” : **LOSCM** (→Institut Fresnel en 2000) sur la thématique : *Etude des techniques photo thermiques : adaptabilité à la caractérisation de matériaux pour la microélectronique*

- Recrutée comme **Maître de Conférences** à l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille (**ENSPM**) en septembre 1999 titularisée en septembre 2000
- Affectée à l'Ecole Généraliste d'Ingénieurs de Marseille (**EGIM**, regroupement de 4 écoles d'ingénieurs du site) lors de sa création en 2004, devenue depuis l' **Ecole Centrale de Marseille**

Affectation actuelle :

Ecole Centrale de Marseille

- **Directrice des Etudes Doctorales** depuis sept. 2005
- **Responsable de la filière de formation 3A « Recherche & Développement »** depuis sept 2006
- Membre du groupe thématique d'enseignement **Physique Appliquée** (Semi-conducteurs, EEA, Traitement du Signal, Optique et Electromagnétisme)

Institut Fresnel (UMR CNRS 6133)

Membre des équipes **MAP2** (Milieux Aléatoires et Photonique de Puissance)
et **GSM** (Groupe Signaux Multidimensionnels)

Responsable de la thématique « optique pour la microélectronique »

Responsabilités administratives et activités collectives :

- **Membre de la CPE** (Commission Paritaire d'Etablissement) de l'Ecole Centrale Marseille depuis avril 2005
- **Membre élu du CA** (Conseil d'administration) de l'Ecole Centrale Marseille depuis novembre 2008
- **Représentante de l'ECM au pôle de compétitivité mondial SCS** (Solutions Communicantes Sécurisées)
- **Membre du Conseil d'Administration d'ARCSIS** (Association pour la Recherche sur les Composants et Systèmes Intégrés Sécurisés) au titre de l'ECM.
- **Membre du Conseil d'Administration (CA) et du Conseil Pédagogique (CP) du Mastère spécialisé TPM** : Technologie et Management de la Production en Microélectronique (co-accréditation ECM-ENSMSE-STU par la CGE)
- **Membre du Conseil de l'Ecole Doctorale 352** : Physique et Sciences de la Matière
- **Membre élu de la commission de spécialistes** section 63 du CNU de l'Université d'Aix Marseille III (2001-03)
- **Membre extérieur d'un comité de sélection** pour la campagne de recrutement MCF 2008 de l'Université P. Cézanne

B- ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Mon expérience en enseignement porte sur la **physique appliquée** de manière générale, et plus particulièrement ***électronique, microélectronique*** et leurs ***applications*** essentiellement dans le domaine des ***capteurs et du Traitement du Signal associé***.

Je l'ai acquise dans le cadre de mes fonctions successives de Monitrice de l'Enseignement supérieur, ATER et Maître de Conférences, exercées de 1993 à ce jour dans trois établissements marseillais.

Enseignements

Aix Marseille III (1993-97 : MES + ½ATER + Vacations)

Durant ma thèse (1993-96) j'ai pu suivre la formation CIES de Monitrice de l'Enseignement Supérieur. A ce titre, puis dans le cadre d'un demi poste d'ATER (96-97), j'ai enseigné en TD et en TP aux niveaux DEUG, Licence et Maîtrise à l'université Aix-Marseille III (volume horaire total ~300h eq.TD).

- **Physique appliquée :**
- **Electronique Numérique :**
- **Electronique Analogique :**

Je suis aussi intervenue à l'IUT « **Mesures Physiques** » de Marseille St Jérôme en **formation continue** (30h TP salle blanche en 2003-04 et 2004-05) et en **Licence Professionnelle Ingénierie Micro-Opto-Electronique** (8h cours en 2005-06) pour laquelle j'ai participé aux réunions pédagogiques d'élaboration des programmes dans le cadre du soutien affiché de l'EGIM (ECM) à la mise en place de cette formation.

ENSPM (1998-2004 : ATER + MCF)

Lors de mon recrutement à l'ENSPM comme ATER (1998-99) puis Maître de Conférences (1999) et dans le cadre d'une réforme des enseignements mise en place à l'école à cette période, j'ai participé à la restructuration du pôle d'enseignement « physique des semi-conducteurs » et j'ai rapidement pris des responsabilités dans ce pôle, comme celle de la salle de Travaux Pratiques. Je l'ai redimensionnée et adaptée notamment pour la mise en place de 24h de « Projet Maquette » : utilisant le logiciel de simulation de composants (SILVACO) pour faire découvrir aux élèves des applications diverses : (mise en place de la salle machines, gestion de l'interface avec le CNFM, rédaction des sujets).

- **Matériaux semi-conducteurs et jonction PN 1A** : mise en place de 16h de cours (rédaction du polycopié associé), 12h de TD et 12h de TP
- **Physique des composants MOS 2A** : 12h de TD par élève
- **Option Microélectronique 3A** : 32h TP « réalisation de composants MOS en salle Blanche » à l'AIME de Toulouse.

EGIM / ECM depuis 2003-04 (MCF)

En octobre 2003, la création de l'**EGIM** (fusion de l'ENSPM, l'ENSSPICAM, l'ESM2 et l'ESIM) a nécessité un lourd travail de ré-adaptation des orientations et programmes pour répondre aux besoins d'une formation d'ingénieur généraliste de grande qualité ancrée sur le monde de l'entreprise et de la recherche. Notre objectif s'est concrétisé en septembre 2006 par l'obtention du label « **Ecole Centrale** ».

Je me suis impliquée dans cette mutation et l'évolution de notre école au niveau de la *mise en place de nouveaux enseignements et des supports associés* (polycopiés, présentations vidéo, utilisation de la plate-forme d'enseignement à distance Claroline) dans les tronc communs et options de 1° et 2° année, et le parcours de 3° année « Microélectronique et Systèmes Avancés ». (en moyenne 200h eq TD/an), ainsi qu'en prenant certaines responsabilités pédagogiques, et administratives.

Responsabilités Pédagogiques Actuelles

- ✓ **Responsable de la filière 1^{er} métier « Recherche et Développement »** depuis juin 2006

Ce type de filière en 3A de l'ECM vise à permettre à nos ingénieurs généralistes de découvrir les missions de base d'un métier, construire leur projet professionnel, et accélérer leur employabilité dans le domaine de la R&D en l'occurrence. Notre but est de les préparer aux métiers de la recherche et du développement en leur présentant l'organisation (organismes publics/privés et entreprises, industries...), les outils et méthodes..., à travers des cours/conférences et un projet en laboratoire.

- ↳ Mise en place (2007-08) de 110h de formation : définition des objectifs et programmes
 - ↳ Animation de l'équipe pédagogique (10 intervenants) et organisation des contacts avec les laboratoires
 - ↳ Gestion d'interventions de professionnels de la recherche (académiques et industriels)
 - ↳ Organisation des projets d'élèves sur l'ensemble des laboratoires adossés à l'ECM. Accueil des différents groupes dans notre équipe de recherche pour leur présenter comment s'organise la recherche (gestion de projets, contrats, valorisation...) dans le domaine des capteurs et du traitement du signal.
- ✓ **Cours de tronc commun 1A** Physique des semi-conducteurs et applications, (12h C, 6h TD et 8h TP)
 - ✓ **Modules d'options** (24hC) liés aux technologies de la micro et nano électronique et applications (capteurs intégrés) et techniques numériques
 - ✓ **Modules de 3A** du parcours « Microélectronique et systèmes avancés » (26hC-30hTP) débouchant sur les applications de la microélectronique et les systèmes de communication et sécurité.
 - ✓ **Projets transverse de 2A** (projets de 180h pour un groupe de 4-6 élèves en réponse à une demande d'entreprise, sous la responsabilité d'un tuteur école) relevant des domaines de l'optique, de la microélectronique et du TSI appliqué au médical et à la sécurité.
- ✓ **Collaboration avec l'Ecole Centrale Lyon :**
 - Mise en place d'une **semaine d'échange** de cours sur la formation microélectronique 3A (technologie /conception) en 2005-2006
 - Projet de cours communs pour un **master : Avionique / Génie Electrique Embarqué** en lien avec l'Ecole Centrale de Pékin.
 - ✓ **Correspondante** de l'ECM depuis mai 2003, au **Mastère** spécialisé (CGE) **TMPM** «Technologie et Management de la Production en Microélectronique », co-délivré par l'ECM, ENSM-SE (CMP) et ST University.
 - ↳ Mise en place de 12h de cours et support associés (en anglais)
 - ↳ Participation au Conseil des Etudes, aux jurys de recrutement ainsi que de soutenance de stage et délivrance de diplôme

Bilan Global

- **200 à 220h d'enseignement par an : cours, TD, TP, Projets en 1A, 2A, 3A et MS**
- **Thèmes : Microélectronique, Microsystèmes et Nanotechnologies, Traitement du Signal et des Images pour le médical et la sécurité**
- **Participation au montage d'un parcours de 3A (400h): «Microélectronique et systèmes avancés»**
- **Montage et responsabilité d'une filière métier de 3A (110h) «Recherche et Développement»**
- **Nombreuses collaborations avec d'autres établissements (IUT, ENSM-SE, ECL...)**

C- ACTIVITES DE RECHERCHE

INTRODUCTION GENERALE

La microélectronique n'est pas un métier établi et stabilisé : le nombre de transistors par unité de surface quadruple tous les trois ans, et le coût des circuits est divisé par deux tous les 18 mois environ ; cette vitesse d'évolution est connue sous le nom de «loi de Moore» dont s'inspirent tous les acteurs du secteur pour planifier des années à l'avance leurs investissements et leurs programmes de recherche¹.

En effet pour tenir ce rythme, il faut sans cesse tout remettre en cause : les matériaux utilisés pour les circuits, les connexions, les isolants ; les architectures des circuits ; les machines et les méthodes de production... Un des indicateurs le plus significatif de cette course à la performance est la finesse de gravure (exprimée initialement en microns, on ne parle plus que de nanomètre depuis le début des années 2000)².

J'ai toujours été attirée par ce secteur, fascinée par son rythme d'innovation qui n'a pas de précédent dans l'histoire des technologies. En quelques décennies, les circuits intégrés ou «puce » ont conquis la plupart de nos objets quotidiens : téléphones mobiles, appareils photo numériques, baladeurs, micro-ordinateurs, consoles de jeux, cartes bancaires, automobiles...

Aujourd'hui, dans la logique de son évolution, la microélectronique va interférer de plus en plus avec le monde des micro et nano systèmes : accéléromètres pour airbags, vêtements communicants, gélules caméras permettant d'introduire dans l'organisme un micro-comescope, biopuces pour les analyses biologiques, laboratoire d'analyse sur puce...

Ces dispositifs associeront des capteurs et des puces, indispensables au traitement des données recueillies. Leur fabrication fera nécessairement appel à un croisement de cultures et de métiers, et de nombreux défis passionnants seront à relever.

Ce document vise à retracer la façon dont j'ai pu, au cours de mon parcours professionnel, m'intéresser à l'évolution de ce domaine, et trouver des moyens de m'y impliquer.

Tout d'abord en choisissant de partager mes connaissances et ma passion pour ce secteur dans le cadre de ma fonction d'enseignante.

En effet, depuis ma nomination en tant que Maître de Conférences en 1999 à l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille (une des écoles fondatrices de l' Ecole Centrale Marseille) je me suis investie dans la mise en place d'enseignements, aussi bien théoriques que pratiques, dans les secteurs de la microélectronique, la physique des matériaux semi-conducteurs, la technologie microélectronique, les microsystèmes et les nanotechnologies, ainsi que l'encadrement de projets transverses en électronique et traitement du signal (TS) et de l'image, en particulier l'utilisation d'imageurs CMOS et d'algorithmes de TS pour l'imagerie médicale.

Mais surtout, en choisissant d'orienter mes sujets de recherche de manière à aborder plusieurs aspects de la physique appliquée en gardant toujours la microélectronique en toile de fond et en m'intéressant de manière plus ou moins directe à quelques uns des points clef de la miniaturisation, comme :

- La qualité des matériaux
- La finesse de gravure

¹ Hartmann J « L'évolution de la microélectronique : aux frontières du possible pour améliorer encore et toujours les performances des circuits intégrés » Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE) 9 – Octobre 1999

² E. Sicard and S. Delmas-Bendhia « Introduction à la microélectronique sub-micronique » j3ea 1, (2002)

- **Les microsystèmes** appelés à intégrer des fonctions électroniques, optiques, traitement de l'information....

Cette motivation m'a permis, quelques années seulement après mon arrivée à l'Institut Fresnel, de prendre la responsabilité au sein de mon équipe de recherche (équipe MAP2) de la thématique intitulée « Optique pour la Microélectronique » qui intègre les concept de traitement su signal.

- ✓ Mes premiers travaux de recherche (1994-2003) ont porté sur la **qualité des matériaux** et plus particulièrement le développement de techniques de **caractérisation** permettant de révéler et d'étudier des **défauts submicroniques**. En effet, dans de nombreux domaines ceux-ci sont supposés avoir un rôle précurseur dans la création des défauts plus étendus et dommageables pour les composants réalisés (aussi bien en optique qu'en microélectronique)

La première partie de ce document intitulée « **Techniques de caractérisation optique de matériaux** » présente ces recherches en deux volets, qui correspondent au développement de deux techniques de caractérisation :

- un Microscope Infrarouge à Balayage
- un Microscope Photo thermique

Du point de vue fondamental, l'optique est une méthode très efficace et non destructive de caractérisation de nano-objets car elle présente l'avantage d'être sans contacts.

- Parmi les énergies renouvelables en pleine expansion, on pense tout naturellement au photovoltaïque³. Les cellules solaires au silicium, pour des raisons de coût de fabrication sont le plus souvent faites avec du silicium poly cristallin de qualité moindre que le monocristallin utilisé pour la microélectronique, de par sa plus grande concentration en défauts ponctuels ou étendus et en oxygène, c'est une des raisons qui font que le rendement de ces cellules plafonne autour de 15%. L'indispensable amélioration des matériaux utilisés passe par la bonne connaissance de l'influence des différents types de défauts que l'on peut y rencontrer. C'est cette problématique qui a motivé la réalisation, pendant ma thèse, d'un **Microscope Infrarouge à Balayage** pour venir, grâce à son aspect non destructif, compléter les techniques existantes et permettre de détecter des micro défauts liés à la présence d'oxygène dans le Silicium et leur évolution au cours de différents traitements thermiques et de contaminations métalliques. Nous avons couplé ces mesures à celles faites par des techniques de caractérisation électrique pour évaluer à quel point la précipitation d'oxygène et la contamination métallique contribuent à la chute de la durée de vie des porteurs minoritaires, et sont donc responsables du faible rendement des composants.
- Une forte recherche est actuellement menée sur le développement de composants optiques à haute tenue au flux pour les lasers de puissance (comme le Projet Laser Mégajoule en France ou le NIF aux US). La compréhension des phénomènes physiques intervenant dans les processus d'endommagement laser passe par l'utilisation d'une métrologie précise et reproductible. Il faut notamment être en mesure de caractériser la réponse des matériaux (silice amorphe ou cristaux) à une irradiation laser intense et de déterminer là aussi quels sont les nano-sites absorbants précurseurs de l'endommagement⁴. C'est dans ce contexte que j'ai travaillé (1999-2003) sur la mise en place d'un **Microscope Photothermique** et co-encadré une thèse sur ce sujet à l'Institut Fresnel, pour caractériser les nano défauts absorbants dans les composants optiques destinés à avoir une haute tenue au flux. Différents choix techniques ont été faits pour ce banc, nous permettant par couplage

³ Jean-Claude Muller « Développement de l'énergie photovoltaïque au 21 ème siècle » 7803-7117-8/01/2001

IEEE

⁴ Bertrand Bertussi, Jean-Yves Natoli, Annelise During, Mireille Commandré, Laurent Gallais, Jean-Luc Rullier, Hervé Bercegol, Philippe Bouchut, « Correlation between laserinduced-damage and nano-sized absorbing defects » Optical System Design 2003, Saint Etienne, 30 septembre 2003

avec un banc d'endommagement laser, de faire in situ le lien entre l'absorption et la diffusion de nano défauts à plusieurs longueurs d'onde, et leur rôle dans l'endommagement.

- ✓ Dans d'autres travaux de recherche, j'ai continué à m'intéresser aux possibilités de m'appuyer sur les différents savoir-faire acquis tout au long de mon parcours : matériaux, microélectronique et optique pour développer des **sujets de recherche transverses**, pouvant établir une synergie entre elles.

La seconde partie de ce document intitulée « **Optique pour la microélectronique** », aborde deux des nombreux thèmes dans lesquels ces secteurs sont amenés à interagir.

- Les **microsystèmes à cœur optique** qui se développent de plus en plus pour des applications concernant aussi bien les télécommunications optiques, les communications quantiques, la médecine, la biologie, les capteurs, les systèmes micro-opto-électro-mécaniques (MOEMS)... , me sont apparus comme une bonne application de cette transversalité.

En particulier, à l'heure de l'imagerie numérique, les dispositifs capteurs d'images sont de plus en plus présents dans les multiples facettes de l'activité humaine ; on les trouve à travers la vie quotidienne dans les photocopieurs, les FAX, les scanners, les lecteurs de codes barres, les systèmes de surveillance et portiers vidéo, dans les loisirs à travers les appareils photo numériques et les caméscopes. Mais ils sont aussi présents dans les équipements d'imagerie médicale ainsi que dans l'industrie où les systèmes de vision sont massivement utilisés, notamment pour le tri et le contrôle de la production.

Les capteurs d'image, sont donc bien en lien avec les thématiques que j'ai abordées au préalable. On y retrouve en effet des problèmes de cheminement de la lumière qui doit s'adapter à la technologie utilisée en terme de matériaux et d'électronique de commande.

En étudiant les différentes technologies dans le domaine, il apparaît très vite qu'à l'heure actuelle la technologie des capteurs d'images CCD bénéficie d'une maturité sans égale, qui lui permet d'accéder à des niveaux de performances électro-optiques extraordinaires, mais au prix d'une spécialisation du procédé qui contraint fortement les conditions de mise en oeuvre des produits, et limite l'ouverture vers des applications nouvelles.

Les capteurs d'image en technologie CMOS, possèdent de réels avantages architecturaux, qui associés à une technologie très évolutive, facilitent le développement d'applications dans des conditions nouvelles de miniaturisation et de consommation. L'ouverture de marchés à fort volume a entraîné l'intérêt pour les capteurs d'images de nouveaux acteurs du monde du semi-conducteur, qui amènent rapidement les performances de ces capteurs au niveau de celles des CCD de gamme moyenne, et commencent à s'implanter dans des domaines où les CCD régnaient en maîtres. De nombreux fournisseurs de vision ajoutent désormais à leur offre des capteurs CMOS et en vantent les mérites : coût, compacité, faible consommation, adressage individuel des pixels....

Il reste cependant deux limitations majeures à la qualité d'images fournies par ce type de capteurs : le bruit (plus élevé que dans les CCD) et le peu de sensibilité à faible luminosité.

De nombreuses études ont été menées pour améliorer ces points faibles sur le plan de l'électronique^{5 6 7 8} en revanche, le créneau de l'amélioration de la partie optique restait plus ouvert dans les années 2000^{9 10}.

⁵ Y. Degerli, P.Magnan and al "Analysis and reduction of signal readout temporal noise in CMOS image sensors for low-light level", IEEE Transactions on Electron devices, Vol.47,n°5,May 2000

⁶ U. Seger, et al. "Development of an Image Sensor with Enhanced Dynamic Range in Standard Cmos Technology", Proc. Of Second Prometheus Workshop, Vol.II, Institut for Microelectronics Stuttgart, p.371, Germany, 1989.

⁷ S. K. Mendis, S. E. Kemeny, R. C. Gee, B. Pain, Q. Kim, and E. R. Fossum, "Progress in CMOS active pixel image sensors," Proc. SPIE, Charge-Coupled Dev. and Solid State Opt. Sensors IV, vol. 2172, pp. 19-29, 1994.

Afin de contribuer à lever ces verrous de la technologie CMOS, j'ai orienté depuis 2001 mes travaux de recherche vers l'amélioration du point de vue optique, de la sensibilité et du rendement quantique (QE) de ces capteurs. En effet, il est très vite apparu évident pour les industriels du secteur que les problèmes de qualité d'image ne sont pas uniquement liés à l'aspect électronique, mais aussi à la difficulté de cheminement de la lumière au sein même de l'imageur tout particulièrement dans le cadre de la diminution de taille des pixels imposée par la demande du marché. C'est dans ce cadre que nous avons bénéficié du soutien, par le financement de thèses et de contrats, d'un des grands industriels du secteur : ST Microelectronics.

Dans cette optique, nous avons proposé dans un premier temps des outils de simulation et caractérisation pour améliorer la focalisation de la lumière à l'intérieur du pixel jusqu'aux surfaces photosensibles, dans le respect des règles de technologie en cours.

Ces études ont été menées parallèlement à une recherche amont prévoyant la suite de l'évolution de la miniaturisation des composants et du pixel en particulier. Il faut trouver d'autres solutions en particulier pour le filtrage et la focalisation en réponse aux problèmes de diffraction qui deviennent prépondérants à ce stade. Pour cela, nous nous sommes tournés vers l'optique diffractive qui nous a permis, après avoir modélisé le système de manière rigoureuse, de proposer récemment des méthodes de filtrage colorimétrique (nanoréseaux de diffraction) originales dans ce type d'applications.

- La recherche de cette miniaturisation perpétuelle s'est trouvée confrontée à un autre point où l'optique (la formation de l'image) est fondamentale dans la technologie de la microélectronique, c'est la **photolithographie**, déterminante dans la bonne qualité des composants réalisés. C'est ainsi que j'ai choisi de travailler sur ce thème. La photolithographie a en effet été le facteur clé pour réduire les tailles de motifs des circuits intégrés, c'est sa capacité à adapter jusqu'ici la **finesse de gravure** à la réduction de taille des composants qui a permis une croissance exponentielle de l'industrie du semiconducteur.

La principale problématique rencontrée reste celle de la diffraction de la lumière dès lors que la taille des dessins du masque est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde d'éclairage. C'est la raison pour laquelle on a souvent par le passé prédit la fin de la lithographie optique, mais cette technologie est et devrait rester pour les années à venir une des voies privilégiées.¹¹ En effet, à partir de la génération de composants CMOS ayant une finesse de gravure de 120 nm, nous sommes entrés dans un nouveau régime lithographique de plus en plus près de la résolution théorique ultime.¹² Dans ce contexte, des techniques visant à améliorer la résolution dénommée RET (Résolution Enhancement Techniques) ont été développées pour imprimer les formes correctement et réduire l'écart dans la résolution accessible. Les premières RET développées ont été des illuminations hors axe, des motifs diffractants sous résolus et des masques à décalage de phase. En outre, travailler proche de la résolution limite implique une plus grande distorsion entre le dessin du masque et l'image obtenue sur la plaquette de silicium. A cet effet, des corrections d'effets de proximité appelées **OPC** (Optical Proximity Corrections) ont été largement utilisées pour pré compenser sur le

⁸ C. Marques and P. Magnan, "Experimental characterization and simulation of quantum efficiency and optical crosstalk of CMOS photodiode APS," in Electronic Imaging 2002, Conf. 4669A –San Jose, CA, 2002.

⁹ X. Liu, P. Catrysse, and A. El Gamal, "QE reduction due to pixel vignetting in CMOS image sensors," Proc. SPIE, Electron. Imag. Conf., vol. 3965, 2000.

¹⁰ P. B. Catrysse and B. A. Wandell, "Optical efficiency of image sensor pixels," J. Opt. Soc. Amer. A, vol. 19, no. 8, pp. 1610–1620, 2002.

¹¹ Ronce Kurt, Optical lithography : a historical perspective Comptes rendus. Physique 2006, vol. 7, pp. 844-857

¹² Trouiller Yorick, "From 120 to 32 nm CMOS technology : development of OPC and RET to rescue optical lithography" Comptes rendus. Physique 2006, vol. 7, pp. 887-895

masque tous les effets non linéaires, la diffraction optique et les effets d'interférence, la résine et la gravure. Ces technologies OPC et RET sont fondamentalement liées : les techniques RET comme l'illumination hors axe génèrent plus de distorsion et justifient donc le besoin d'OPC plus importantes, et en même temps de nombreuses techniques RET (comme les Phase Shift Masks alternés et les motifs diffractants sous résolus) sont créés grâce aux outils informatiques mis en place en OPC. Depuis sa première utilisation industrielle pour le passage à la technologie 120 nm jusqu'aux perspectives en 32 nm l'OPC a vu bien des évolutions. Ceci inclut la généralisation à tous les niveaux lithographiques, le passage à la simulation au niveau du pixel, l'usage de la simulation et de la vérification de toute la puce, l'incorporation dans l'algorithme d'OPC des effets de fenêtre de procédé comme la latitude d'exposition ou la profondeur de champ, ainsi que l'approche par lithographie inverse. L'ensemble de ses sujets est souvent regroupé sous le nom de **masques avancés** pour la photolithographie optique.

Regarder de plus près cette problématique était pour moi l'occasion d'utiliser mes connaissances de la technologie microélectronique, des problèmes de diffraction optique, avec une ouverture vers le développement d'algorithmes de traitement d'images. J'ai donc choisi à partir de 2004 de développer cet axe, en collaboration avec l'équipe GSM de l'Institut Fresnel spécialisée dans l'analyse multidimensionnelle des signaux, toujours avec le soutien de ST Microelectronics. En effet, l'utilisation d'OPC sur les masques compte tenu des contraintes de coût de production, et en particulier de fabrication des masques ne peut être décorrélée des charges de calcul dans les étapes de simulation avant la mise en application. Cela nécessite une grande maîtrise des outils de modélisation actuels sur le marché, basés sur des méthodes d'algèbre linéaire ou dites « à sous espaces ». Ils demandent ainsi que les structures de test à évoluer et à se perfectionner en développant de plus grandes performances¹³. C'est sur cette partie là que nous proposons des solutions nouvelles, faisant appel à l'algèbre multilinéaire et au traitement tensoriel des données qui nous permettent actuellement de travailler à l'amélioration de la prise en compte de la totalité du phénomène physique (optique de Fourier) tout en ayant défini des critères nous permettant de garder un temps de calcul optimal pour la simulation de l'images aérienne des masques.

- ✓ Finalement, après avoir été amenée à utiliser des capteurs sur les bancs de caractérisation optique de micro défauts dans les **matériaux** (silicium entre autre...) que j'ai développés, je me suis attachée à l'étude des **capteurs d'image** en technologie CMOS, en travaillant en particulier sur l'adaptation de la partie **optique** de ces capteurs aux problèmes (diffraction réflexion....) posés par la perpétuelle diminution de taille des composants.

Je me suis aussi intéressée aux problèmes que cette *diminution de taille* soulève en terme de photolithographie optique, et j'ai été très vite amenée dans ce cadre à utiliser des outils développés dans le domaine du **traitement du signal et des images** pour améliorer les étapes de simulation d'image aérienne fondamentales pour les traitements OPC.

Cela me permet aujourd'hui de posséder un outil de plus pour développer mes recherches sur l'utilisation des micromodules à capteurs d'image CMOS ayant des fonctionnalités spécifiques adaptées aux applications dans des secteurs réservés jusque là aux capteurs CCD.

La troisième et dernière partie du document, après une synthèse sur les sujets traités tout au long de ma carrière, présentera les perspectives de mes activités de recherche essentiellement basées sur l'exploitation et le développement de méthodes nouvelles pour des applications que j'ai déjà initiées, à savoir la sécurité et le médical.

¹³ Thomas Roessler, Beate Frankowsky, Olivier Toublan "Improvement of empirical OPC Model Robustness using Full-Chip Aerial Image Analysis" Proceedings of SPIE Vol. 5256 23rd Annual BACUS Symposium on Photomask Technology, edited by Kurt R. Kimmel, Wolfgang Staud .

PARTIE I :

TECHNIQUES DE CARACTERISATION OPTIQUES DE MATERIAUX

Cette thématique en lien avec ma formation de base en physique des matériaux, se décline en deux parties :

- La Microscopie Infrarouge à Balayage (1993-1997)
- La Microscopie Photo thermique (1998-2003)

Dans les deux cas il s'est agi de mettre en place des techniques de caractérisation non destructives (techniques optiques) pour la détection, l'identification et la localisation de micro et/ou nano défauts pouvant être à l'origine de dysfonctionnements de composants microélectroniques dans un cas, de composants optiques dans l'autre.

I-1- MICROSCOPIE INFRAROUGE A BALAYAGE

I-1-1- Introduction

La présence dans le silicium de défauts ponctuels ou étendus, et d'impuretés susceptibles de s'introduire lors de la fabrication du matériau lui-même ou des composants, dégrade le plus souvent les propriétés électriques de ces derniers en donnant lieu à des niveaux profonds dans la bande interdite. Il est donc nécessaire de limiter leur présence ou de concevoir des traitements modifiant leurs propriétés. Pour cela, il faut être en mesure de les révéler et de les caractériser.

C'est l'objet de mes travaux de thèse intitulés " *Détection et caractérisation électrique de précipités dans le silicium par des techniques non destructrices (MIRB, FTIR, LBIC ...)* " Elle a été soutenue le 15 Novembre 1996 à l'université d'Aix-Marseille III.

Cette étude, menée au sein du laboratoire **Défauts dans les Semi-conducteurs et leurs Oxydes** (actuellement IM2NP) sous la direction du Pr Santo MARTINUZZI a tout particulièrement été consacrée aux propriétés et effets de l'oxygène seul ou combiné avec des impuretés métalliques ou des défauts cristallographiques dans du silicium de croissance Czochralski (Cz). Elle a été motivée par des études précédemment menées au laboratoire¹⁴, notamment à l'aide de l'appareillage LBIC (Light Beam Induced Current) qui permet d'obtenir des cartographies en photo courant et longueurs de diffusion de porteurs minoritaires, celles-ci ayant montré qu'il fallait envisager la présence de micro défauts (supposés être liés à la présence d'oxygène) à l'intérieur même des grains de poly-silicium utilisés par l'industrie photovoltaïque.

I-1-2- Mise en place de la plateforme de mesures

Une grande partie de mes travaux de thèse a donc porté sur l'étude de faisabilité, le dimensionnement et enfin la réalisation d'un Microscope Infrarouge à Balayage (MIRB).

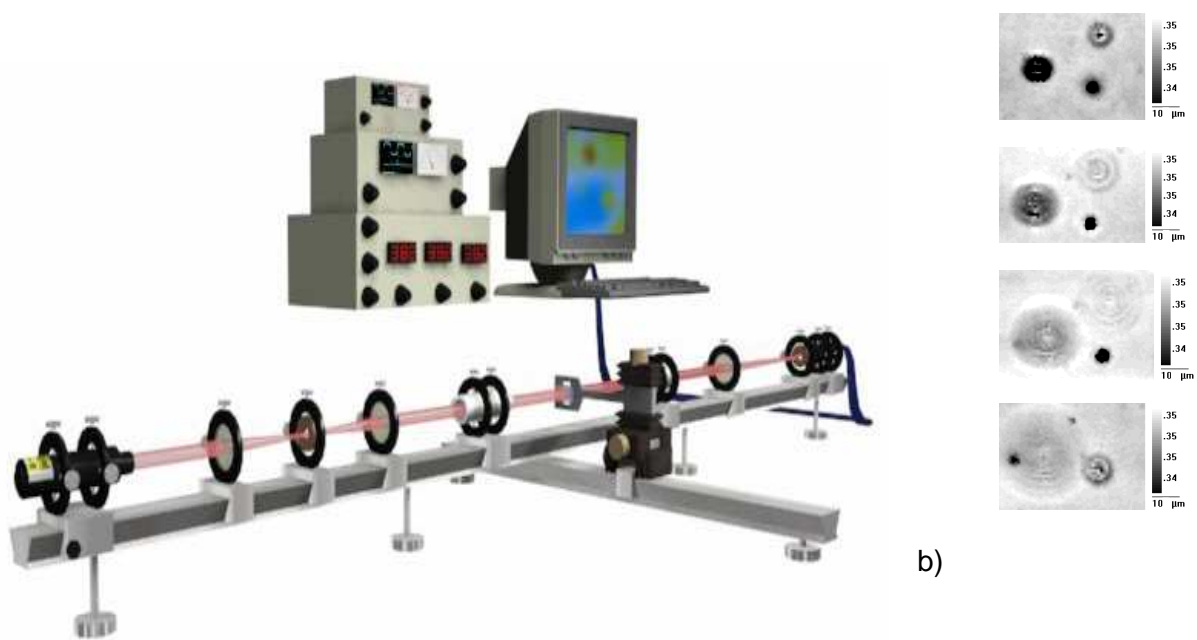
Cette technique optique non destructive¹⁵ est basée sur le fait que la matrice de Si transparente dans l'infrarouge se différenciera d'une inclusion diffractante par un changement de contraste sur l'image. Une source infrarouge (diode laser) est focalisée dans le silicium. Le champ électrique tridimensionnel obtenu sert de sonde spatialement délimitée qui entre en interaction avec l'interface Si/inclusion. Un balayage du matériau dans trois directions permet d'obtenir une cartographie 3D des défauts. La technique étant non destructive il est possible de suivre l'évolution d'un défaut après différents traitements (notamment thermiques) appliqués au même échantillon.

La figure 1 montre le schéma d'ensemble du montage que j'ai mis en place au laboratoire (a) et le principe de tomographie (b) auquel nous arrivons en focalisant à différentes profondeurs dans l'échantillon. Dans le cas présenté ici, une distance de 40µm sépare les images successives, où l'on voit bien se focaliser et se défocaliser trois inclusions situées à des profondeurs différentes dans l'échantillon.

L'objectif principal était d'utiliser l'appareillage mis en place pour la détection de précipités d'oxygène dans du Silicium Cz dont le type de croissance fait qu'il est très sensible à ce genre de défauts. Nous avons poussé l'étude jusqu'à la précipitation métallique et la décoration de défauts par les atomes de métal.

¹⁴ Martinuzzi S., Périchaud I., & Stemmer M. Solid State Phenomena **361**,37-38 (1994)

¹⁵ Booker GR, Laczick Z., & Kidd P., Semicond Sci. Technol **7** A110-A121 (1992)



a)

Figure 1 : Montage et exemple d'image en tomographie obtenue par le MIRB

Afin d'identifier au mieux les différents types de défauts possibles et leur influence Les mesures effectuées avec le MIRB ont été systématiquement couplées avec celles du LBIC et de techniques conventionnellement utilisées dans ce domaine comme la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) la microscopie électronique, la révélation de défauts par attaque chimique ou la mesure de longueur de diffusion effective (L_{eff}) des porteurs minoritaires. [28]

I-1-3 Résultats de l'étude

Différents traitements thermiques et/ou de contaminations métalliques ont été appliqués à différents échantillons.

Les résultats obtenus par l'utilisation de l'ensemble des techniques à disposition, dont le MIRB, ont mis en évidence les notions de rayon critique de nucléation des précipités d'oxygène, d'augmentation de la densité avec la durée du traitement avec toutefois apparition d'un phénomène de saturation à partir duquel la taille des précipités augmente, mais où leur nombre n'évolue plus. [1, 3,13,].

Nos mesures ont mis en évidence la formation de centres de nucléation et /ou précipitation même lors de traitements thermiques modérés s'accompagnant d'une chute de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires (L_{eff}), qu'il nous est difficile d'attribuer à la seule interface SiO_x/Si compte tenu de la quantité de défauts induits par la croissance des précipités (adaptation de volume et émission d'auto interstitiels), et du risque de contamination involontaire des échantillons pendant les traitements [24,26]. D'autre part, l'activité électrique de ces défauts (essentiellement des dislocations) détectée à température ambiante en LBIC ou EBIC nous permet de penser qu'ils sont décorés par des impuretés métalliques introduites involontairement. [2,25]

Nous avons donc procédé à des contaminations métalliques volontaires pour comprendre les interactions précipités d'oxygène/ métal. Nous avons alors observé au MIRB des formes caractéristiques de précipités (en étoile notamment pour le Cu) et nous avons vérifié le phénomène d'effet getter interne, puisque les atomes métalliques introduits ont tendance à décorer ou précipiter autour de défauts préexistants ou créés par la précipitation d'oxygène. [4,27] Une injection d'auto interstitiels par diffusion de phosphore est capable de dissoudre les précipites ; les impuretés qui décoraient l'interface SiO_x/Si se retrouvent en position interstitielle ou décoorent d'avantage les défauts étendus. Un effet getter externe annule donc en partie l'effet getter interne sans pour autant rendre au matériau ses propriétés électriques, endommagées principalement par les défauts

cristallographiques (décores ou non) créés autour des précipités d'oxygène et qui ne sont pas reconstruits lors de l'effet getter [5,29].

On peut effectivement considérer que la valeur de L_{eff} est composée d'une somme de contributions différentes, et l'analyse des résultats nous conduisant à négliger certains termes, on peut dire que la composante principale est celle liée à la présence de défauts étendus qui se forment autour des précipités.

$$\frac{1}{L_{\text{eff}}^2} = \frac{1}{L_{\text{matrice}}^2} + \frac{1}{L_{\text{SiOx/Si}}^2} + \frac{1}{L_{\text{défauts}}^2} \cong \frac{1}{L_{\text{défauts}}^2}$$

Dans le cadre de mes travaux de thèse, j'ai donc pu mettre au point un banc de caractérisation non destructif pour le silicium, et maîtriser un ensemble de techniques de caractérisation performantes pour l'étude de différents aspects de la précipitation.

J'ai eu l'occasion de poursuivre et développer cette étude dans le cadre de mon ½ poste d'ATER dans ce même laboratoire, en insistant plus sur les caractérisations électriques (DLTS). Le couplage caractérisation optique / caractérisation électrique de défauts ainsi mis en place a été notamment mis en application dans le cadre du contrat SICOCELL : collaboration de laboratoires Européens pour la caractérisation de différents types de silicium dans le cadre d'applications photovoltaïques (sur lequel j'ai travaillé pendant 4 mois de CDD).

Une autre technique de caractérisation non destructive est souvent utilisée pour l'étude des phénomènes de transport dans les matériaux semi-conducteurs, il s'agit de la microscopie photo thermique¹⁶. Cette technique optique permet aussi de visualiser des micros défauts absorbants dans différents types de matériaux, et de couches minces optiques¹⁷.

Il m'est donc apparu intéressant de voir comment les résultats donnés par ce type d'appareillage pouvaient être corrélés avec ceux établis pendant ma thèse.

L'ensemble des compétences que j'avais acquises en matière de caractérisation optique m'a permis de me rapprocher sans problème d'une des équipes utilisant cette technique sur Marseille : l'équipe MAP2 du LOSCM (devenu depuis Institut Fresnel).

¹⁶ B. C. Forget, I. Barbereau, D. Fournier, S. Tuli & A. B. Battcharya, "Electronic diffusivity measurement in silicon by photothermal microscopy", Appl. Phys. Lett. 69(8), 1107–1109 (1996).

¹⁷ L. Escoubas, A. Gatto, G. Albrand, P. Roche, and M. Commandré, "Solarization of Glass Substrates During Thin-Film Deposition," Appl. Opt. 37, 1883-1889 (1998)

ANNEXE 1 :

PRINCIPALES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LA MICROSCOPIE INFRAROUGE A BALAYAGE

A1-1 : référence [4]

C. Vève et S. Martinuzzi, "Non destructive techniques applied to the detection of oxygen or metallic precipitates in annealed Cz silicon" **Semiconductor Science and Technology** 11, 1804-1814 (1996)

A1-2 : référence [5]

C. Vève-Fossati et S. Martinuzzi, "Detection and characterisation of stacking faults by light beam induced current mapping and scanning infrared microscopy in silicon silicon wafers" **European Physical Journal of Applied Physics** 3, 123 (1998)

I-2- MICROSCOPIE PHOTO THERMIQUE

I-2-1 Introduction, contexte :

En octobre 1998, j'ai donc choisi d'intégrer l'équipe MAP2 du LOSCM (actuellement Institut Fresnel) qui utilisait depuis plusieurs années les techniques photo thermiques pour la caractérisation de couches minces optiques^{18 19}, notamment :

- mesure absolue de très faibles absorptions optiques
- étude des défauts par cartographie
- étude des propriétés thermiques

pensant que l'expérience acquise durant ma thèse pouvait être une valeur ajoutée en ce qui concerne l'application de ces techniques au domaine de la microélectronique, en particulier pour des mesures de doses d'implantation mais aussi pour la caractérisation de défauts et de longueur de diffusion de porteurs minoritaires dans les semi-conducteurs.

(Cette intégration a pu se faire dans le cadre de mon poste d'ATER à l'ENSPM)

En effet, les résultats de ma thèse ont confirmé la présence de micro défauts dans le silicium, dont l'influence peut être importante, mais dont la détection, la localisation, et l'identification restent difficiles. Il m'est donc apparu intéressant d'envisager l'utilisation d'une autre méthode permettant de détecter directement l'absorption des défauts, et d'étudier l'adaptabilité de l'appareillage de déflexion photo thermique présent au LOSCM, à l'étude des matériaux semi-conducteurs et de leurs défauts.

Les méthodes photo thermiques²⁰ consistent à créer, dans le matériau absorbant à étudier, un gradient de température, à l'aide d'un faisceau "pompe" modulé, et à mesurer cette variation par les modifications qu'elle induit sur un faisceau "sonde" de plus faible puissance. Plusieurs configurations sont possibles :

- "effet mirage" : Le gradient d'indice perpendiculaire à la surface de l'échantillon dévie le faisceau sonde qui se propage parallèlement à cette surface. C'est une mesure de déflexion photo thermique.
- "transmission" : Le faisceau sonde traverse l'échantillon, et on mesure encore la déflexion qui est ici due à la fois aux déformations de surface, et aux gradients d'indice dans l'air et dans l'échantillon (couche + substrat s'il s'agit de matériau en couche mince)
- "réflexion" : Le faisceau sonde est réfléchi par la surface de l'échantillon, et on peut mesurer soit la déflexion du faisceau réfléchi, soit la variation directe du facteur de réflexion.

Dans un premier temps, je me suis intéressée aux différents principes de fonctionnement de ces méthodes, à la théorie associée et aux applications potentielles.

Les configurations utilisées dans le domaine des semi-conducteurs sont assez éloignées de celle en place au laboratoire. La mise en équation est plus complexe, en raison de la difficulté à séparer les phénomènes de diffusion de l'onde thermique proprement dite de ceux des porteurs minoritaires induits par l'absorption bande à bande. L'application aux matériaux semi-conducteurs n'a donc pas été retenue comme une priorité dans l'équipe compte tenu des thématiques et collaborations en place à cette période.

¹⁸ Commandré M., Pelletier E., "Measurement of absorption losses in TiO₂ films by a collinear photothermal deflection technique" Appl. Opt., 29, 4276-4283, 1990

¹⁹ Commandré M., Roche P., "Characterization of absorption by photothermal deflexion", chapter Thin Films for Optical Systems. Marcel Dekker Inc. 1995.

²⁰ Lepoutre F.; Lefebvre J.; Lhermitte T.; Ainouch L.; Delpech P.; Forge P.; Hirsich S.; Joulaud J.L.; Photothermal microscopy, Revue générale de thermique 1996, vol. 35, n° 413 (73 p.) (14 ref.), pp. 344-354

C'est donc dans le cadre général de l'activité « Photonique de puissance » de l'équipe MAP2 (sous la responsabilité du Prof. Mireille Commandré), que j'ai pris part, à dater de mon recrutement en tant que Maître de Conférences, aux travaux concernant la métrologie des très faibles pertes par absorption, l'étude des défauts locaux et leur corrélation avec l'endommagement laser. (*Cette thématique concernait alors en moyenne dans l'équipe 3 permanents et 2 doctorants*)

En effet, des composants optiques de hautes performances sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles et grands projets de recherche. Les projets de fusion thermonucléaire contrôlée (Laser Mégajoule, NIF) requièrent des composants à faibles pertes par absorption optique, supportant des densités d'énergie d'irradiation très élevées. Ainsi, le développement des techniques de mesure d'absorption dans les composants optiques est souvent associé à la recherche sur l'endommagement laser^{21 22}. Plus que le niveau moyen de l'absorption, ses variations locales, associées à la présence de défauts dans le volume et à la surface du matériau peuvent induire des échauffements conduisant à l'initiation d'un endommagement irréversible par fusion ou fracture thermo élastique²³. Les défauts étant généralement, du fait de leur taille nanométrique, faiblement absorbants, leur détection non destructive nécessite l'emploi d'un dispositif de mesure de haute détectivité et de haute résolution spatiale.

I-2-2 Mise en place d'un microscope phothermique :

Pour être en mesure de détecter les micros défauts absorbants, il faut posséder un appareillage présentant une haute résolution. Il est possible d'augmenter la résolution spatiale latérale des mesures de déflexion photo thermique en focalisant le faisceau pompe. La technique peut alors être considérée comme une technique de microscopie, et permet de détecter et localiser des défauts absorbants de quelques dizaines de microns à quelques microns de diamètre. Elle donne de plus une information directe sur l'absorption et les phénomènes thermo physiques impliqués dans l'endommagement laser, ce que ne font pas les techniques classiques d'imagerie haute résolution (AFM, MEB, mesures de diffusion...).

Afin de pouvoir détecter les nano défauts absorbants dans les matériaux optiques et de mieux comprendre leur rôle dans l'initiation de l'endommagement laser, nous nous sommes donc proposé de mettre en œuvre au laboratoire un dispositif de microscopie photo thermique haute résolution. Cela coïncide avec le début de la thèse de A. During (sep 99) thèse CNRS-Region PACA avec le soutien de la société SESO (Aix en pc) et dans le cadre plus général d'une collaboration avec le CEA / CESTA et île de France.

Le dispositif développé a pour but de détecter de manière non destructive des défauts absorbants de taille sub-micronique, et en étant couplé à un dispositif de test d'endommagement, de contrôler in situ l'évolution de l'absorption des défauts avec l'irradiation laser.

Après une étude bibliographique sur les principales méthodes photo thermiques employées dans notre domaine d'application, les résultats des calculs (figure 2) et simulations numériques (forme de faisceau, modules de déflexion décalage entre faisceau pompe et sonde, influence de la fréquence de modulation ...) que nous avons effectués ont montré qu'il était possible d'obtenir une résolution spatiale latérale de l'ordre de 100nm en focalisant fortement le faisceau pompe.

²¹ Walker T.W., Guenther A.H., Nielsen P. "Pulsed laser induced damage to thin film optical coating theory." J. Quantum Electron, 17, 2053-65, 1981

²² Kozłowski M.R., Chow R. "The role of defects in laser damage of multilayer coatings" proc. SPIE 2114, 640-649, 1994

²³ Dijon J. , Poiroux T., Desrumaux C. " Nanoabsorbing centers : a key point in laser damage of thin films" proc. SPIE 2966, 315-325, 1997

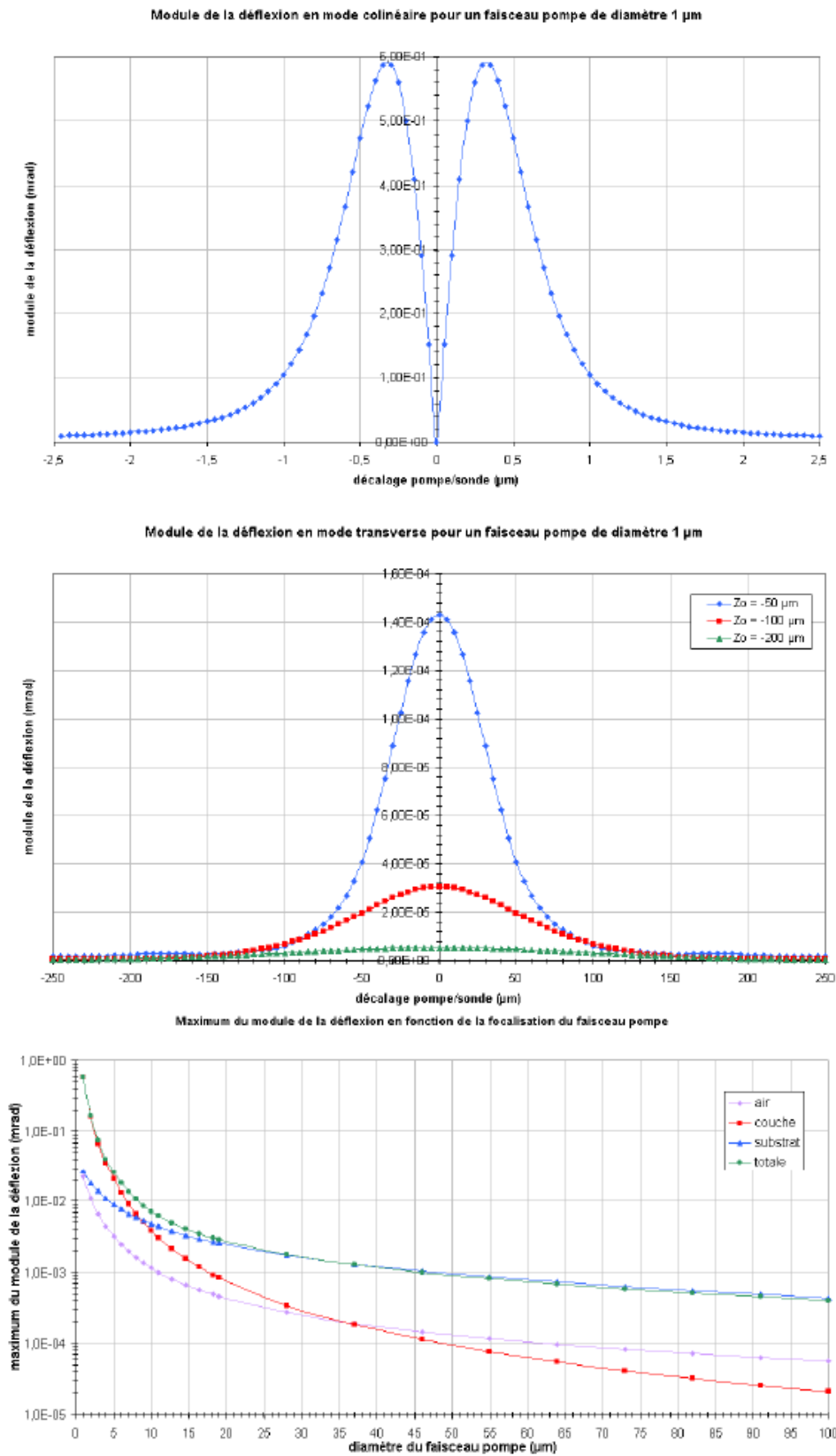


Figure 2 : Exemples de calculs montrant le module de la déflexion photo thermique en mode colinéaire et transverse pour un diamètre de faisceau pompe de $1 \mu\text{m}$ et l'évolution du max de la déflexion en fonction du diamètre du pompe

Nous avons ainsi déterminé la configuration expérimentale optimale réunissant toutes les conditions pour réaliser un dispositif d'imagerie haute résolution et la taille limite des défauts qu'il est alors possible de détecter en fonction de leur absorption [8, 31,34].

Pour cela, le faisceau pompe doit être fortement focalisé (diamètre de l'ordre de $1\mu\text{m}$) pour la résolution ; le faisceau sonde doit également être focalisé dans les mêmes ordres de grandeur pour conserver une haute sensibilité. Les déplacements relatifs de l'échantillon par rapport aux faisceaux nécessitent une précision d'au moins $0,1\mu\text{m}$ pour permettre un pas d'échantillonnage des cartographies suffisamment petit. Le déplacement des lasers doit se faire avec la même précision pour obtenir un maximum de signal. Sur la base de cette étude, nous avons donc réalisé au laboratoire un microscope photo thermique [15] Il a été par la suite, couplé à un dispositif de test d'endommagement laser à la même longueur d'onde.

Ce dispositif décrit dans la figure 3 est donc basé sur la déflexion photo thermique d'un faisceau sonde transmis (He-Ne). Le faisceau pompe continu de longueur d'onde $1,06\mu\text{m}$ (YAG continu) et le faisceau sonde sont colinéaires et focalisés à travers le même objectif. Plusieurs diamètres de focalisation sont disponibles sur le microscope, le diamètre du faisceau pompe sur la surface de l'échantillon peut atteindre jusqu'à $1\mu\text{m}$. Un soin particulier a été apporté à l'obtention d'une haute résolution spatiale latérale et à sa validation (moteurs pas à pas de résolution $0,1\mu\text{m}$).

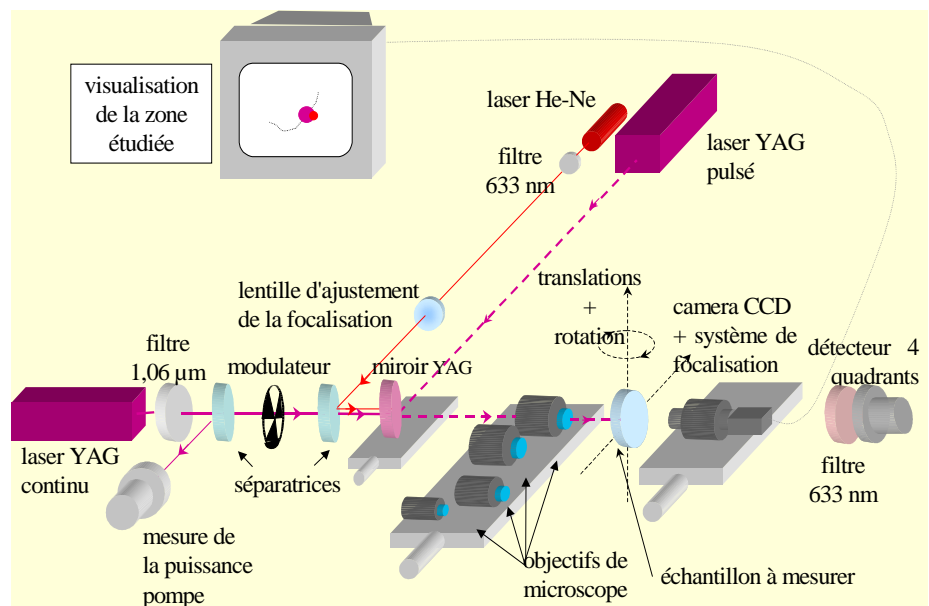


Figure 3 : dispositif expérimental final couplant la microscopie photo thermique au banc d'endommagement laser

Des échantillons présentant des défauts non isolés de $1\mu\text{m}$ de diamètre ont été spécialement fabriqués pour valider en terme de résolution et de précision de positionnement les performances du microscope. La procédure expérimentale a été optimisée pour minimiser la durée des acquisitions, nos calculs ayant montré la faible influence de la fréquence sur le signal photo thermique, nous avons pu travailler à fréquence de modulation élevée. Les tests d'endommagement laser ont été réalisés grâce à un laser YAG pulsé de longueur d'onde $1,06\mu\text{m}$ et de durée d'impulsion 7ns , et le positionnement du faisceau est contrôlé par une caméra CCD.

I-2-3 Interprétation des résultats expérimentaux :

A l'aide de ce dispositif, nous avons pu nous intéresser à l'étude de l'absorption et de la diffusion des défauts à plusieurs longueurs d'onde dans les gammes de l'Ultraviolet, du Visible et de l'Infra Rouge [6,32,33].

Nous avons mis en place un dispositif expérimental utilisé pour cartographier simultanément l'absorption et la diffusion [30]. Un outil de comparaison basé sur la corrélation des cartographies

d'absorption (notée A) et de diffusion (notée D) a été mis en place pour caractériser objectivement et quantitativement les similitudes entre deux cartographies. Nous avons défini cet outil de manière à prendre en compte non seulement le maximum de la fonction de corrélation mais également l'énergie de la fonction totale de corrélation. Ce qui nous permet d'avoir un outil plus sélectif vis-à-vis du bruit.

On le note $PCE(A,D)_{i_0,j_0}$ pour « Pic de Corrélation en Energie » ; en choisissant arbitrairement la cartographie A comme référence, il est donné par la relation :

$$PCE(A, D)_{i_0,j_0} = \frac{Max(|Cor(A, D)_{i,j}|^2)}{Ener(A, D)} / \frac{Max(|Cor(A, A)_{i,j}|^2)}{Ener(A, A)}$$

Où $Ener(A,D)$ est l'énergie de la fonction d'inter corrélation de A et de D donnée par :

$$Ener(A, D) = \sum_i \sum_j [\sum_k \sum_l A_{k,l} D_{k-i,l-j}]^2$$

Un exemple type de cette étude de corrélation entre cartographies d'absorption et de diffusion en fonction de la longueur d'onde est donné sur la figure 4 pour une couche mince de HfO_2 .

Les résultats obtenus pour différentes couches minces et substrat nu sont similaires :

Il y a très peu de corrélation quelle que soit la longueur d'onde entre les cartographie d'absorption et de diffusion

- la valeur moyenne de la diffusion ne varie pas significativement avec la longueur d'onde
- l'absorption décroît fortement quand la longueur d'onde augmente

La forte dépendance de l'absorption des défauts avec la longueur d'onde que nous avons montrée, met en évidence la nécessité de caractériser l'absorption des composants optiques à leur longueur d'onde d'utilisation. En particulier, cela a orienté nos choix expérimentaux pour le couplage avec le test d'endommagement laser : les mesures d'absorption et d'endommagement doivent être faites à la même longueur d'onde.

Le dispositif mis en place (figure 3) doit permettre l'étude in situ de la corrélation entre l'absorption et les nano-défauts présents dans le matériau, ainsi que la tenue au flux de ceux-ci.

Il a été utilisé l'étude non destructive de nano défauts absorbants sur des échantillons « modèle » constitués d'inclusions d'or de taille sub-micrométrique enrobées de silice [7,16,23]. Sur ces échantillons nous avons procédé à des mesures de microscopie photothermique avant et après tir à des densités d'énergie inférieures ou égales au seuil d'endommagement laser. Ces mesures ont été associées à une étude morphologique des défauts par microscopie optique et microscopie à force atomique (AFM)

Celle-ci permet de caractériser les endommagements et d'analyser la structure de surface après les tirs à basse fluence. Il ressort deux principaux résultats :

- les défauts localisés constitués par les billes d'or sont des précurseurs d'endommagement laser
- l'absorption de l'or diminue progressivement suite à des tirs à basse fluence, sans modification détectable de surface.

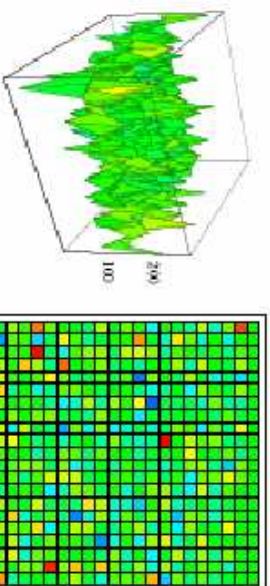
Ce phénomène peut être considéré comme un processus de « pré endommagement ».

$\lambda = 363 \text{ nm}$

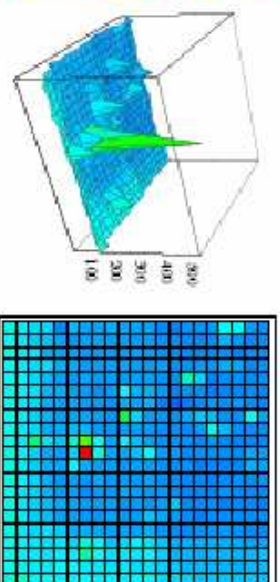
$\lambda = 514 \text{ nm}$

$\lambda = 1064 \text{ nm}$

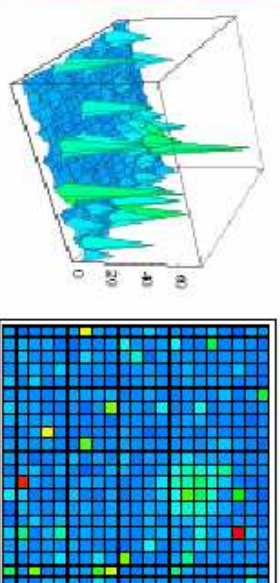
$A_{\text{moy}} = 132 \text{ ppm}$ $\sigma = 43 \text{ ppm}$



$A_{\text{moy}} = 102 \text{ ppm}$ $\sigma = 33 \text{ ppm}$



$A_{\text{moy}} = 6 \text{ ppm}$ $\sigma = 8 \text{ ppm}$



$\Downarrow \text{PCE}(0,0) = 0,04 \%$

$\Leftrightarrow \text{PCE}(1,2) = 0,08 \%$

$\Downarrow \text{PCE}(0,0) = 0,4 \%$

$\text{PCE}(1,2) = 82,1 \%$

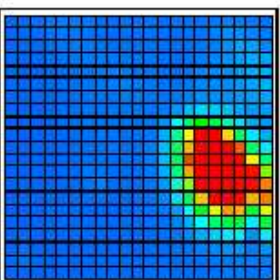
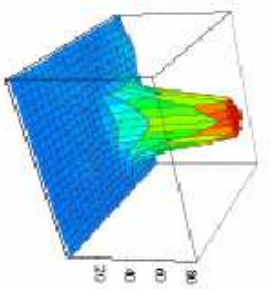
\Leftrightarrow

$\Leftrightarrow \text{PCE}(0,0) = 0,3 \%$

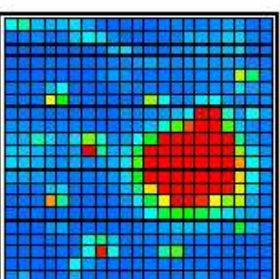
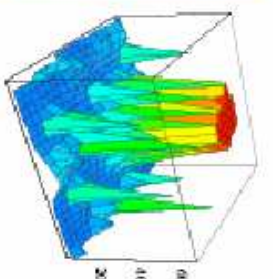
$\text{PCE}(0,0) = 86,2 \%$

\Leftrightarrow

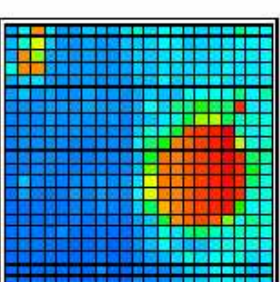
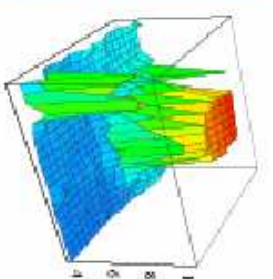
$\Downarrow \text{PCE}(0,0) = 2,1 \%$



$D_{\text{moy}} = 11,5 \text{ ppm}$ $\sigma = 21 \text{ ppm}$



$D_{\text{moy}} = 17 \text{ ppm}$ $\sigma = 18 \text{ ppm}$

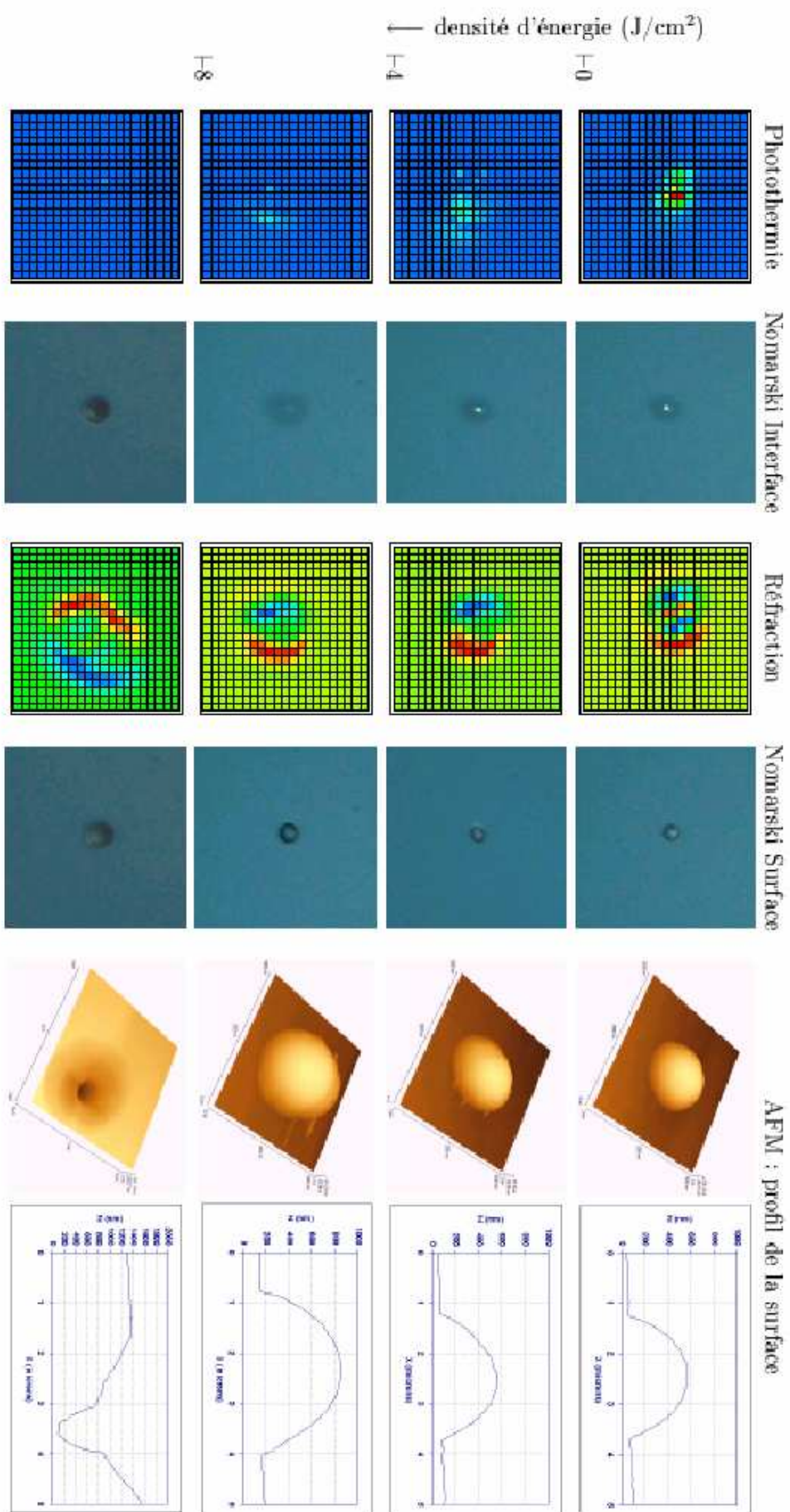


$D_{\text{moy}} = 5,6 \text{ ppm}$ $\sigma = 2 \text{ ppm}$

Figure 4 :

– Absorption et diffusion à 363 nm, 514 nm et 1064 nm d'une couche mince de HfO_2 ; conditions expérimentales : diamètre du faisceau pompe = pas d'échantillonnage = 25 μm , zone cartographiée = 500 μm x 500 μm

Figure 5 : - Résultats des mesures réalisées grâce à un microscope photothermique (photothermie et réfraction) et de l'étude morphologique réalisée grâce à un microscope Nomarski et à un AFM



ANNEXE 2 :

PRINCIPALES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LA MICROSCOPIE PHOTOTHERMIQUE

A2-1 : référence [6]

A. Durring, **C. Fossati**, M. Commandré, "Multi-wavelength imaging of defects in UV optical materials", **Applied Optics** 41, 3118-3126 (2002).

A2-2 : référence [8]

A. Durring, **C. Fossati**, M. Commandre, "Photothermal deflexion microscopy for imaging sub micronic defects in optical materials", **Optics Communication** 230, 279-286 (2004).

A2-3 : référence [4]

A. Durring, M. Commandre, **C. Fossati**, B. Bertussi, J. Y. natoli, J. L. Rullier, H. Bercegol, P. Bouchut, "Integrated photothermal microscope and laser damage test facility for in situ investigation of nano defect induced damage", **Opt. Express** 11, 2497-2501 (2003)

PARTIE II :

OPTIQUE POUR LA MICROELECTRONIQUE

A partir de 2001, j'ai initié, avec Mireille Commandré, la thématique « optique pour la microélectronique », au sein de l'équipe MAP2 de l'Institut Fresnel, puis établi par la suite une collaboration avec l'équipe GSM.

C'est cette thématique qui constitue l'originalité et l'apport majeur de mes recherches à l'équipe, c'est pourquoi j'assure aujourd'hui l'animation scientifique des deux axes

- ✓ Etude et modélisation optique de **capteurs d'image en technologie CMOS**
- ✓ **Masques avancés** pour la photolithographie optique

Elle fait l'objet d'une collaboration entre ST Microelectronics et l'Institut Fresnel qui se concrétise par la mutualisation de compétences, de moyens de calcul et de caractérisation et l'encadrement de thèses. Le financement est assuré par les collectivités territoriales (essentiellement CG13 et région PACA) sous forme d'un programme pluriannuel « Convention Rousset 2003-2008 » ayant impliqué progressivement d'autres équipes de l'Institut.

Sur les 4 dernières années, cette activité a mobilisé en moyenne dans l'équipe MAP2 : 2 permanents, 2 doctorants et 2 post doctorants ou ingénieurs en CDD par an.

La convention 2008-2011 dans laquelle nous restons impliqués est actuellement à l'étude

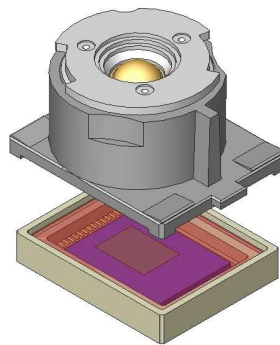
II-1- SIMULATION ET CARACTERISATION OPTIQUE D'IMAGEURS CMOS

II-1-1 Introduction : capteurs d'image pour la téléphonie mobile

Même si l'on retrouve des capteurs d'image dans beaucoup d'objets de la vie courante (figure 6), la téléphonie mobile représente à elle seule environ 60% du marché de l'imagerie numérique.



Figure 6 : objets avec capteurs CMOS



Elle nécessite des capteurs d'image (fig. 7) toujours plus performants, avec une résolution croissante, tout en restant à bas coût et de taille de plus en plus petite.

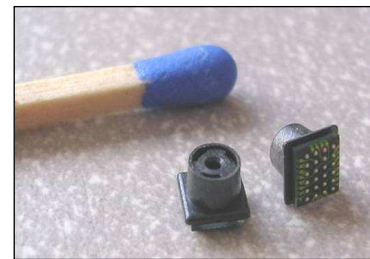


Figure 7 : Micromodule sur téléphone portable pour prise de vue

Les équipes de R&D de ce domaine sont donc confrontées aux problèmes physique et notamment optique de la miniaturisation, mais c'est en partie grâce aux avancées technologiques qu'elles ont pu effectuer que l'on voit de plus en plus ce type de capteurs être destiné à d'autres applications comme la biométrie et l'imagerie médicale pour le diagnostic rapide par exemple.

Les capteurs CMOS sont des capteurs matriciels permettant d'enregistrer la totalité du plan image sans avoir recours à un balayage. L'architecture de lecture est directement présente dans le pixel, cela permet de contrôler la trame de lecture par un adressage aléatoire et de plus l'évolution des technologies permet d'intégrer les fonctions électroniques éliminant le bruit à sa source. Rajoutant à cela un coût, et une consommation plus faible, les CMOS ont supplanté les CCD dans le secteur concerné.

Les matrices de pixels photosensibles des capteurs sont constituées de photodiodes qui vont convertir le flux lumineux en photo courant.

Ces dernières sont fabriquées au niveau du silicium, sous des couches de diélectriques et métaux dont la présence est liée à la technologie CMOS elle-même.

On place donc un réseau de microlentilles sur la partie supérieure des pixels avec pour but de focaliser la lumière à travers les couches d'oxyde au niveau de la photodiode (Figure. 8).

Le capteur est divisé en trois types de pixels sensibles à l'une des trois couleurs : rouge, vert, bleu, la restitution des couleurs par post traitement se fait à partir des trois coefficients de ces couleurs primaires. Un motif de Bayer est réalisé en plaçant immédiatement sous les microlentilles une mosaïque de filtres en résines colorées ayant chacun sa propre réponse spectrale. Chaque pixel renvoie donc un signal dont l'intensité dépend du spectre en transmission de son filtre : on obtient donc un des trois coef. R, V, B les deux manquants sont obtenus par interpolation (Figure 9).

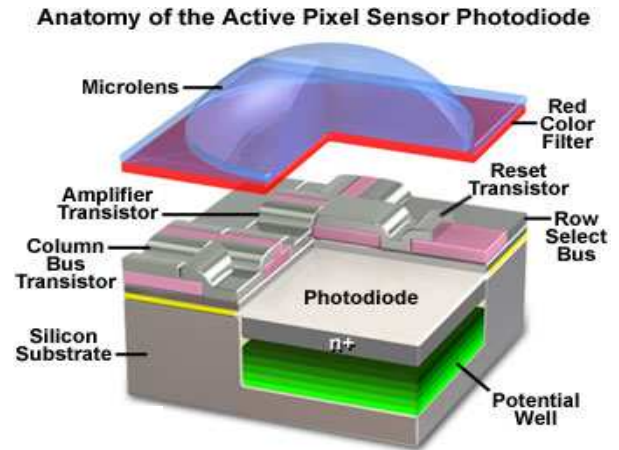


Figure 8 : Structure d'un pixel CMOS

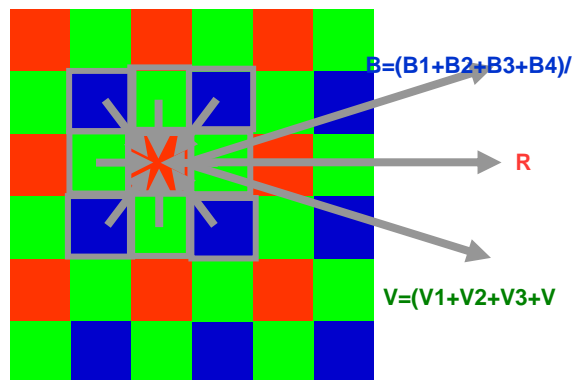


Figure 9 : Motif de Bayer pour un capteur couleur

Dans le cadre de la collaboration qui a pu être établie avec ST Microelectronics notre étude a concerné en premier lieu des capteur d'image couleur pour téléphone portable puisqu'il s'agissait des produits en développement sur les sites de Crolles et Rousset à cette période, et sur lesquels nous allons pouvoir baser la partie expérimentale et validation de notre étude.

Celle-ci a pour but d'étudier la partie optique du pixel, le couplage de la lumière puis son trajet dans l'empilement de couches jusqu'à son absorption dans le silicium et de simuler ainsi la réponse électrique du pixel à une excitation optique. On étudie en particulier l'influence de la structure physique et géométrique du pixel sur le comportement optique et électrique de celui-ci. Les problèmes optiques posés par la technologie CMOS sont principalement l'ombrage dû à la présence des lignes de métaux, et les conséquences de la réduction de taille des pixels : angle d'ouverture de la lentille objectif problèmes de vignettage), modification des hauteurs de couches diélectriques, diminution du facteur de remplissage, qui se traduit par la nécessité d'une optimisation du gain des microlentilles, réflexions et diffraction de la lumière (problèmes de diaphotie).

II-1-2 Méthodologie de modélisation par tracé de rayons

Après examens des différents outils de simulation optique proposés sur le marché, notre choix s'est porté sur ZEMAX, logiciel de simulation optique par tracé de rayon, qui peut fonctionner en mode séquentiel ou non séquentiel (cad avec ou sans prise en compte des réflexions au passage de dioptries successifs).

Une méthodologie de simulation basée sur l'utilisation de ZEMAX (pour le tracé de rayons) et Matlab (pour le traitement des données) à été mise en place dès le début de la thèse de Flavien

Hirigoyen. Cette méthodologie a été présentée à la conférence « Photonics Europe » (Strasbourg 2004)²⁴ Elle nous a permis (comme nous le montrerons au paragraphe II-1-3) de travailler sur **l'amélioration de la focalisation et l'optimisation de la collecte des photons en intervenant essentiellement sur la géométrie des couches liées aux micro lentilles**, dans le but premier d'optimiser la sensibilité des capteurs CMOS.

Un formalisme permettant d'importer la topologie exacte de pixels à partir des outils de CAO des concepteurs a été élaboré, et le travail en étroite collaboration avec les ingénieurs procédé a permis de mesurer puis insérer au niveau du simulateur l'ensemble des caractéristiques optiques des matériaux constituant le pixel. L'outil développé permet donc une simulation fidèle du pixel en 3D, avec la possibilité de collecter les impacts des rayons et leur énergie n'importe où dans le pixel. (Figure 10)

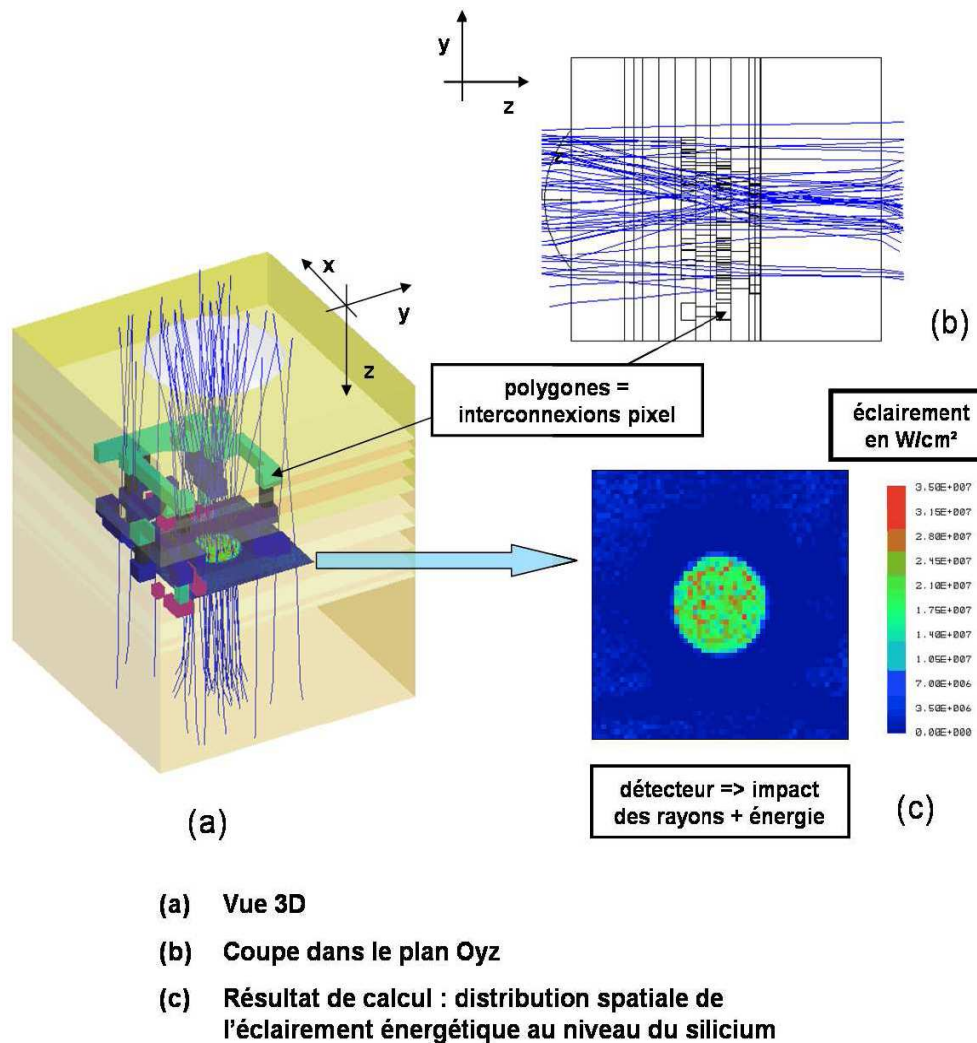


Figure 10 : exemple de modélisation d'un pixel avec ZEMAX en mode non séquentiel.

Afin de valider le simulateur, il fallait pouvoir comparer les mesures renvoyées par le banc aux données simulées. Or, la mesure correspond à la quantité de porteurs photo créés et collectés au sein de chaque pixel d'étude, puis convertie en tension par le transistor suiveur, la sensibilité en

²⁴ Jérôme Vaillant , Flavien Hirigoyen : « Optical simulation for CMOS imager microlens optimization » proc SPIE : Photonics Europe Strasbourg 2004

sortie étant en Volts ou en Ampères. N'ayant pas, dans ZEMAX, de modèle de couplage avec le silicium, mais uniquement les distributions spatiales énergétiques des rayons, si l'on veut comparer les résultats de simulations optiques avec les mesures, il est nécessaire de prendre en compte le taux de collections des porteurs créés par absorption des photons. Cette quantité de porteurs collectés a été approximée par un modèle en deux dimensions de trois surfaces photosensibles de référence, ayant chacune une densité de probabilité de création de porteurs constante symbolisée par des poids. Pour pouvoir remonter à ces poids, une méthode de réponse angulaire sous éclairage collimaté a été mise en place, elle consiste à balayer horizontalement et verticalement les surfaces photosensibles intra pixels par un spot de taille sub-micrométrique. Puis remonter aux poids en question en ajustant les résultats de simulations aux mesures associées par minimisation du critère des moindres carrés.

Pour simplifier la problématique nous avons choisi de raisonner en deux dimensions, c'est à dire que nous avons choisi de comptabiliser les photons de longueur d'onde $\lambda=532$ nm à 0,5 microns de profondeur dans le substrat, et de considérer que le flux « collecté par cette surface » est à l'origine du signal. Cette surface de collection est découpée en trois surfaces, ayant une densité de collection de porteurs photo créés constante pour s'approcher au mieux de la réalité :

Surface 1. surface dite « étendue » au-delà des zones de dopage de la photodiode. Son périmètre est situé à mi-distance des zones opaque des transistors MOS (dépôt de nitrure), et de la partie dopée transparente de la photodiode (surface 2). Ainsi nous considérerons que par diffusion, les porteurs photo générés dans cette surface ont une probabilité non nulle d'être captés par la photodiode.

Surface 2. : surface exacte de la photodiode. (toute la zone de dopage)

Surface 3. : partie centrale de la photodiode, plus fortement dopée que sa périphérie, et dont la densité de probabilité de collection de porteurs est différente.

En positionnant les détecteurs du simulateur optique par rapport aux architectures des pixels, et par rapport au dessin d'origine, on obtient les masques qui vont permettre d'extraire les surfaces photosensibles avec une résolution de 100 nm. On définit ensuite pour chaque surface son masque associé, constitué de 0 et de 1. On obtient alors la sensibilité correspondante, en effectuant le produit terme à terme du masque et de l'image complète, puis en sommant tous les éléments de la matrice obtenue. La sensibilité de chaque surface est stockée à la suite du cube de sensibilités généré par le post-traitement précédent permettant de créer les images des distributions spatiales du flux. Enfin elles sont archivées pour l'étape de corrélation des résultats de simulation avec les mesures qui permettra de déterminer les poids de ces surfaces équivalents aux densités de collection des porteurs.

La figure 11 illustre ces différentes étapes, du fichier de dessin GDS d'origine aux masques d'extraction des surfaces photosensibles de référence, en passant par le positionnement des détecteurs sous ZEMAX

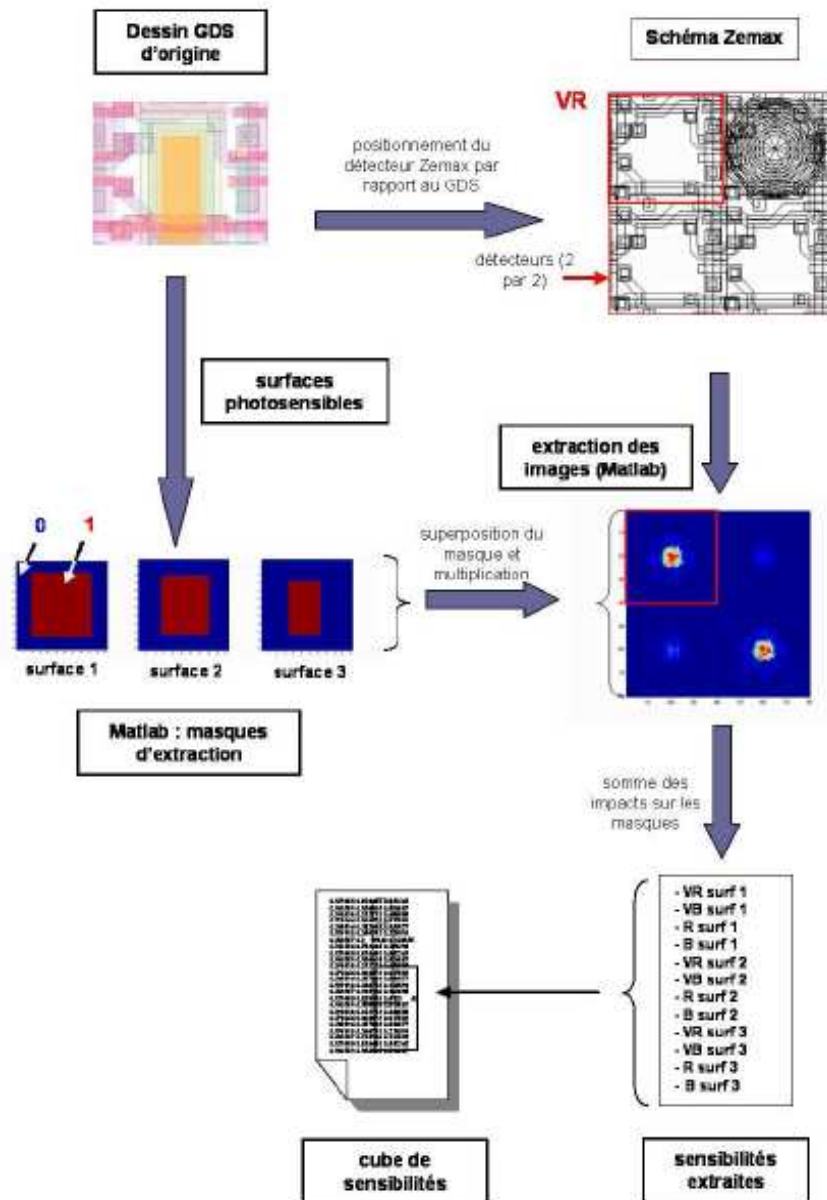


Figure 11 : différentes étapes, de notre modélisation, du fichier GDS d'origine aux masques d'extraction des surfaces photosensibles de référence, en passant par le positionnement des détecteurs sous ZEMAX

II-1-3 Application à l'étude et au perfectionnement des structures existantes : Optimisation de la focalisation et de la collecte des photons sur des pixels de $4\mu\text{m}$

Les premières études ont été faites sur des capteurs constitués de pixels de $4\mu\text{m}$, correspondant à la technologie en cours à cette époque et pour laquelle nous pouvons donc avoir des capteurs témoins permettant de valider nos modèles.

Dans cet objectif nous avons, simultanément à la mise en place du modèle précédemment décrit, dimensionné et mis en place des bancs de caractérisation électro-optiques permettant de valider sur les produits commercialisés par ST les résultats obtenus. Ces bancs de caractérisation sont présentés de manière détaillée au paragraphe II-1-5

Cet ensemble d'outils a été utilisé (travaux auxquels ont participé F. Hirigoyen thèse CIFRE à ST Crolles, S. Pilorget et O. Gagliano post doc sur la convention Rousset 2008) pour modéliser et étudier les pixels existants. Les recoupement des différentes performances simulées et des mesures ont permis de remonter à certaines dispersions et ainsi d'optimiser les procédés de fabrication notamment en matière de dépôt et d'épaisseur des filtres colorés et lignes métalliques, ainsi que la forme et la répartition des microlentilles. Cela a conduit à des améliorations de sensibilité et de rendu des couleurs. Les paragraphes suivants, présentent les points forts de cette étude qui nous ont permis de proposer des solutions plus adaptées.

a) Influence de la forme des microlentilles

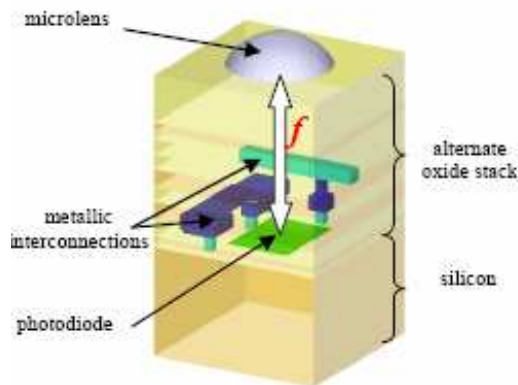


Figure 12 : différentes zones du système optique

Sur le plan optique, le système peut être représenté comme la succession de trois zones (Figure 12) :

- la microlentille,
- un milieu (le « stack »), avec des propriétés optiques définies et qui contient les interconnexions métalliques,
- une structure de collecte de la lumière (la photodiode) située au niveau du substrat de Silicium.

Pour collecter un maximum des photons arrivant sur l'imageur, il doit y avoir un minimum de place de perdue entre les microlentilles de chaque pixel, et la distance focale f de chacune doit correspondre au mieux à l'épaisseur du stack.

Nous avons comme objectif de déterminer au mieux les paramètres de la microlentille (épaisseur, rayon de courbure, forme de la base...) pour qu'un maximum de lumière puisse arriver focalisée sur la photodiode.

Les microlentilles utilisées sont issues d'un procédé technologique particulier qui allie une étape de photolithographie à un traitement thermique (fluage) sur une couche de résine polymère adaptée.

Il est donc difficile d'envisager qu'elles aient une forme hémisphérique parfaite, et c'est effectivement ce que montrent les images MEB (Figure 13) et AFM qui en ont été faites.

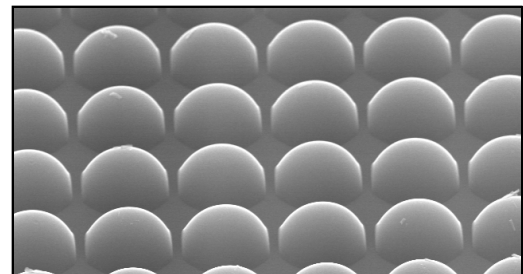


Figure 13 : image MEB des microlentille

Le process non optimisé conduit à une microlentille plutôt trop plate sur le dessus et aux bords trop abrupts.

Sachant qu'il est très difficile de modifier volontairement la forme de la microlentille de par son mode de fabrication, nous avons voulu dans un premier temps évaluer l'influence que pouvait avoir cette forme particulière et les pertes qu'elle pouvait engendrer en terme de focalisation et sensibilité.

Notre démarche a donc été la suivante (Figure 14) :

- modéliser dans ZEMAX la microlentille « réelle » en partant des mesures AFM réalisée sur les pixels pour bien voir si les résultats mesurés sur pixels réels sont prévisibles par notre modèle
- modéliser avec ZEMAX une microlentille « théoriquement idéale » qui donnera un point focal parfait sur la photodiode
- trouver le « meilleur compromis » tenant compte des contraintes technologiques de fabrication de la lentille d'une part, et de l'imageur lui-même avec sa partie électronique nécessitant entre autre la

présence de lignes métalliques dans l'empilement, et une taille de photodiode inférieure à celle du pixel total (place occupée par les transistors de commande)

La toute première étude menée sur la forme des microlentilles a été présentée à la conférence Optical Design & Engineering II Jena (Ge) en sept. 2005. [17] (donnée en annexe 3)

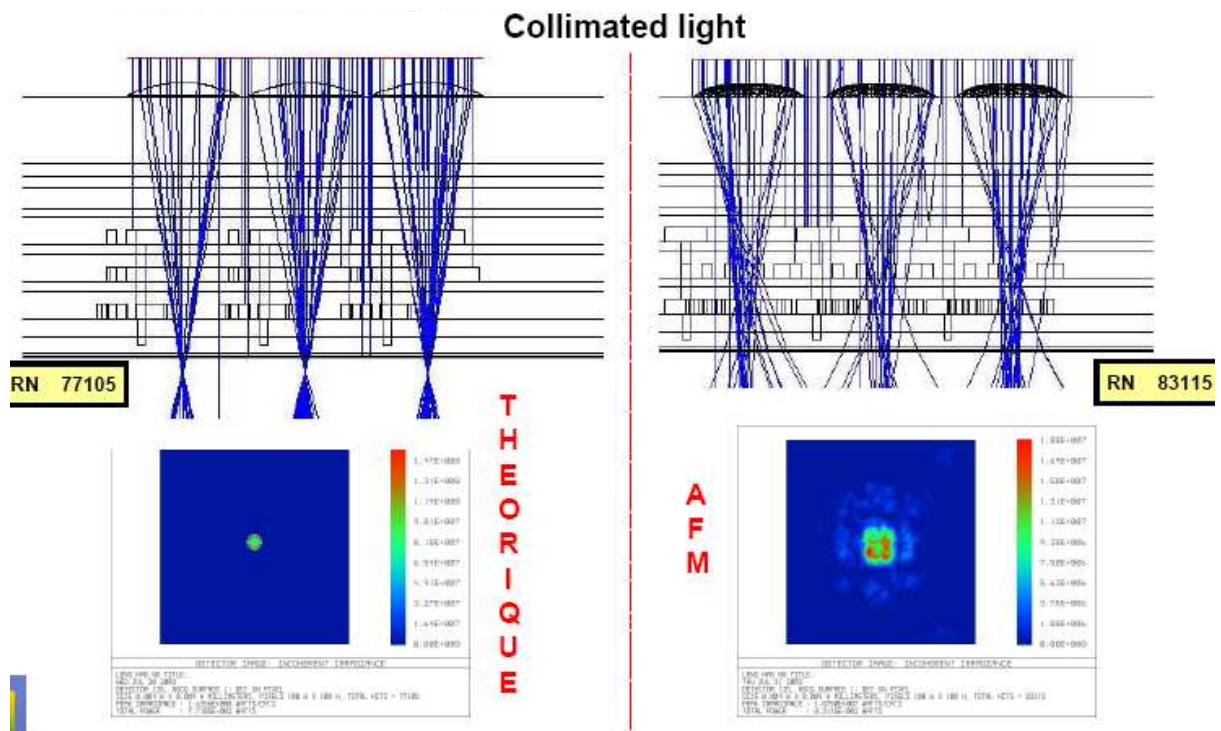
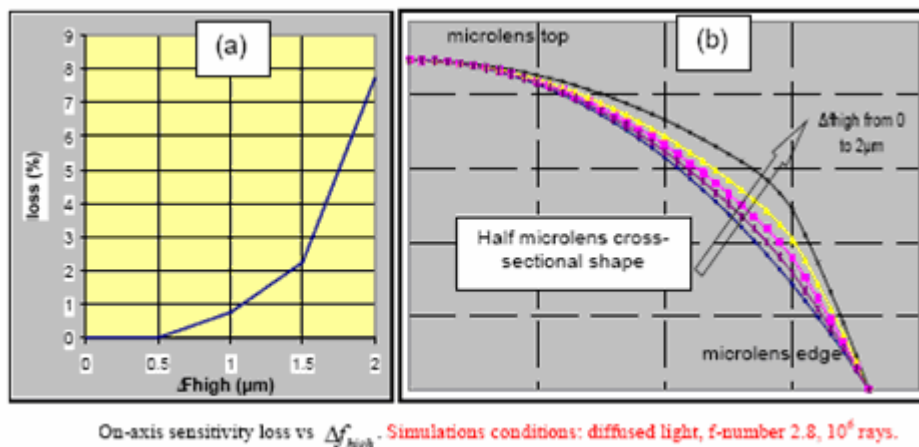


Figure 14 : focalisation par une lentille théorique et par celle suivant le profil relevé par AFM

Les principales conclusions que l'on en tire sont les suivantes :

* Si on veut maximiser les performances de l'imager en termes de sensibilité, il faut augmenter au maximum le nombre de photons collectés en concentrant le spot sur la photodiode et en minimisant sa taille. Pour cela il faut bien évidemment s'éloigner le moins possible d'une lentille sphérique (Figure 15)



On-axis sensitivity loss vs Δf_{high} . Simulations conditions: diffused light, f-number 2.8, 10^6 rays.

Figure 15 : perte de sensibilité (a) en fonction du décalage en profondeur du point focal Δf_{high} qui lui même dépend de la courbure de la lentille (b)

* La comparaison des bases circulaires, carrées et octogonales pour les microlentilles (en lien avec la notion de facteur de remplissage) montre, figure 16, que la lentille carrée, qui permettrait dans l'axe une plus grande collecte que la circulaire (moins de place perdue entre 2 lentilles) perd son efficacité dès que l'on considère la réponse angulaire du pixel

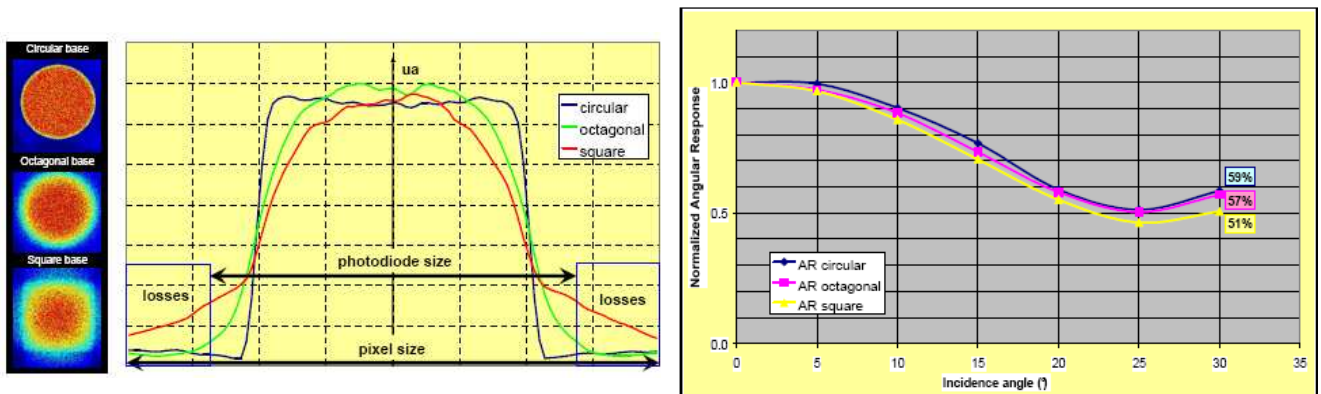


Figure 16 : focalisation et évolution de sensibilité en réponse angulaire pour différentes formes de la base de la lentille

Il ressort donc de notre étude que c'est la **lentille « sphérique » à base octogonale** qui apparaît comme le meilleur compromis dans nos conditions d'utilisation.

b) Influence de la position et de la répartition des microlentilles

positionnement matrice de microlentilles / matrice de photodiodes

Dans sa configuration finale, le capteur est éclairé au travers d'une lentille objectif (intégrée dans le micromodule) et chaque pixel n'est donc pas soumis aux mêmes conditions d'éclairage. Cette lentille - objectif, combinée au capteur format VGA donne des angles en diagonale de 22° par rapport au plan capteur, et la prise en compte des effets d'aberrations est nécessaire.

En effet, chaque microlentille n'étant pas éclairée sous le même angle que sa voisine, il est possible qu'une organisation initiale du réseau de microlentilles régulier et centré ne soit pas l'idéal. Nous avons donc envisagé des possibilités de **re-positionnement des microlentilles par rapport à la matrice**. Dans ce cadre, nous utilisons une mesure d'éclairage relatif qui consiste à effectuer le ratio des signaux des pixels des zones d'études avec les signaux des pixels centraux. Évidemment, plus l'éclairage relatif du capteur est proche de 1, et ce sur toute la matrice, et meilleure sera l'image délivrée par ce dernier.

L'optimisation du positionnement des microlentilles apporte un gain significatif de l'ordre de 15 à 28% en vertical à plus de 30% en diagonal. On a constaté de plus que ces gains relatifs étaient très bien corrélés entre les simulations et les mesures.

Cette amélioration radicale de l'éclairage relatif s'explique par le recentrage du spot, et donc la compensation du vignettage en repositionnant les microlentilles.

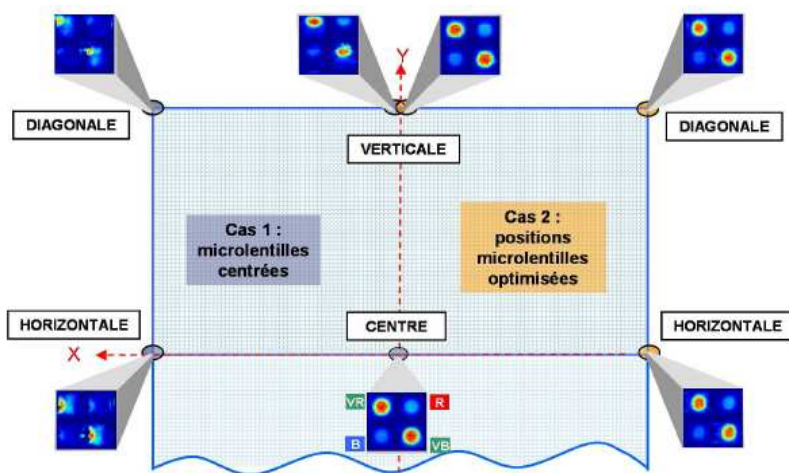


Figure 17 : Effet de recentrage du spot

La figure 17 illustre bien cette compensation : on peut y voir les images des spots (en simulation), au niveau du détecteur situé à 0,5 microns dans le substrat. Ce dernier, en configuration microlentilles centrées (quadrant de gauche), est rapidement décalé par rapport à la photodiode, provoquant une perte importante de sensibilité, tandis que sur la configuration microlentilles optimisées (quadrant de droite), le spot est recentré sur la photodiode et permet de rehausser le signal.

Amélioration du facteur de remplissage

Comme nous l'avons vu, pour optimiser la collecte des photons, il est important de diminuer la perte de rayons entre les microlentilles pour cela nous avons envisagé et étudié deux solutions possibles :

* **Réaliser une structure de matrice de microlentilles qui offre un facteur de remplissage supérieur à celui des matrices classiques**, et prévoir pour cela un procédé de fabrication dans lequel des microlentilles sont agencées côte à côte sans espacement entre les bords.

O Gagliano, B. Dunne (STM) et moi-même sommes co-auteurs d'un brevet [37] déposée en ce sens.

Il prévoit un process particulier faisant appel à deux étapes de lithographie : une première matrice de microlentilles comprend des microlentilles réalisées suivant un premier gabarit circulaire présentant un premier rayon, et une matrice comprenant des microlentilles d'un second type réalisées suivant un second gabarit circulaire présentant un second rayon inférieur au premier rayon, et les premier et second gabarits présentant ou non des zones de recouvrement comme l'illustrent les schémas ci contre . (Figure 18)

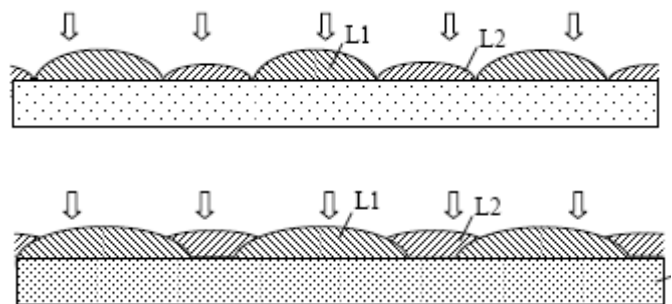


Figure 18 : autre répartition possible pour les lentilles

* **Placer au dessus des microlentilles actuelles, une couche diélectrique supplémentaire** connue sous le nom de « top coat » et qui viendrait combler l'espace entre elles (augmentant ainsi la surface de collecte des rayons à l'entrée du système) et pour laquelle il faut optimiser différents paramètres. Nous avons étudié cette possibilité et nous posant la question suivante : Quel type de couche utiliser (épaisseur, indice, ...) et quelle tolérance peut on avoir quand à sa conformité par rapport au réseau de microlentilles.

Dans un premier temps la présence de cette couche supplémentaire (Figure 19) a nécessité de re-optimiser les paramètres géométriques de l'ensemble de la structure microlentille + couche en raison des modifications que celle-ci implique sur la focalisation. Puis, après différentes mesures et simulations à l'aide des outils précédemment évoqués, en lumière collimatée pour évaluer l'influence des paramètres géométrique et en lumière diffuse pour estimer les variations de gain d'énergie, nous sommes arrivés à la conclusion suivante : On peut espérer un gain maximum d'environ 20% si pour une couche supplémentaire avec un indice similaire à celui de la couche des microlentilles et environ deux fois son épaisseur (paramètres en partie dictés par les contraintes technologiques), on est capable d'arriver à une conformité de l'ordre de 100% ...

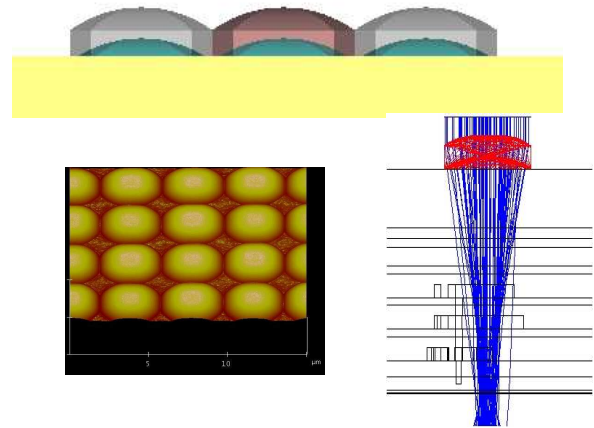


Figure 19 : Top coat : modélisation, tracé de rayons et image AFM

Effet d'une seconde lentille dans l'empilement

Nous avons aussi étudié un nouveau système de focalisation intégrant une deuxième lentille dans le « stack », comme le montre la figure 20 Celle-ci a pour but de focaliser plus près de la surface photosensible, la lumière incidente. Celle-ci ayant été défocalisée par la première lentille pour que l'éclairement de la seconde soit maximal. Cela doit permettre d'augmenter la sensibilité du pixel pour les grands angles d'incidence, et diminuer le problème de « cross talk » optique, supposés en partie responsable de l'effet de « color corner » observé sur les capteurs, et qui a motivé cette étude.

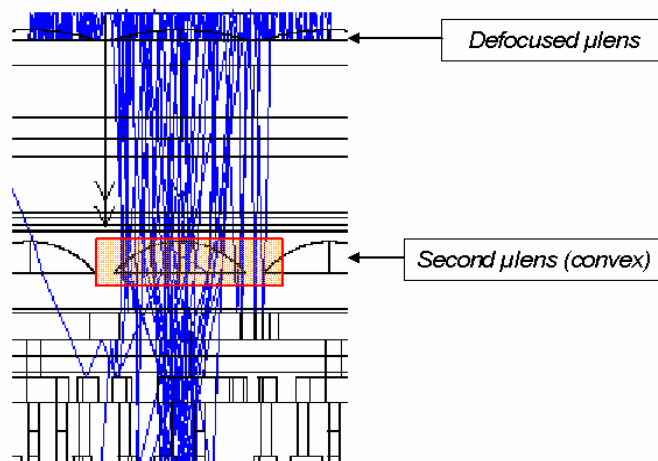


Figure 20 : structure incluant une deuxième lentille dans le stack

Le terme « color corner » qualifie des problèmes de rendu de couleur observés dans les angles de l'image fournie par certains capteurs CMOS, comme c'est le cas sur la figure 21 où l'image devrait être entièrement verte et où l'on voit des taches violacées dans les angles.

Cela peut s'expliquer par plusieurs origines : balance des blancs, dissymétrie de structure, recouvrement des filtres colorés (cf. paragraphe suivant) ...ou encore une combinaison de tous ces facteurs...



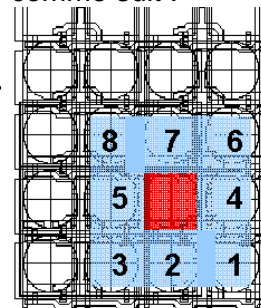
Figure 21 : exemple de « color corner »

Nous avons fait le choix de simuler des pixels où la lentille interne serait placée au dessus du second niveau de métal pour qu'un maximum de rayons puissent passer au travers de la fenêtre métallique. Ceci étant il reste plusieurs possibilités à envisager pour les caractéristiques de la lentille : rayon de courbure, épaisseur, indice de réfraction.

Pour caractériser le « cross talk » optique que nous pensons être un des premiers responsables de cet effet de « color corner », nous avons défini un critère S calculé comme suit :

$$S = \{ \text{Sum [Power (pixel(i))] / Power (Central pixel)} \}$$

(S important value = important crosstalk)



nous l'avons utilisé pour caractériser le « cross talk » dans différentes configurations de lentilles et pour les différentes couleurs de pixels.

Les résultats sont concluants, il est possible avec une lentille interne d'améliorer la sensibilité, d'avoir une meilleure uniformité de la réponse, et de diminuer le cross talk optique .

Un exemple de résultats est donné sur la figure 22 pour un pixel vert en lumière verte en fonction de l'angle d'incidence.

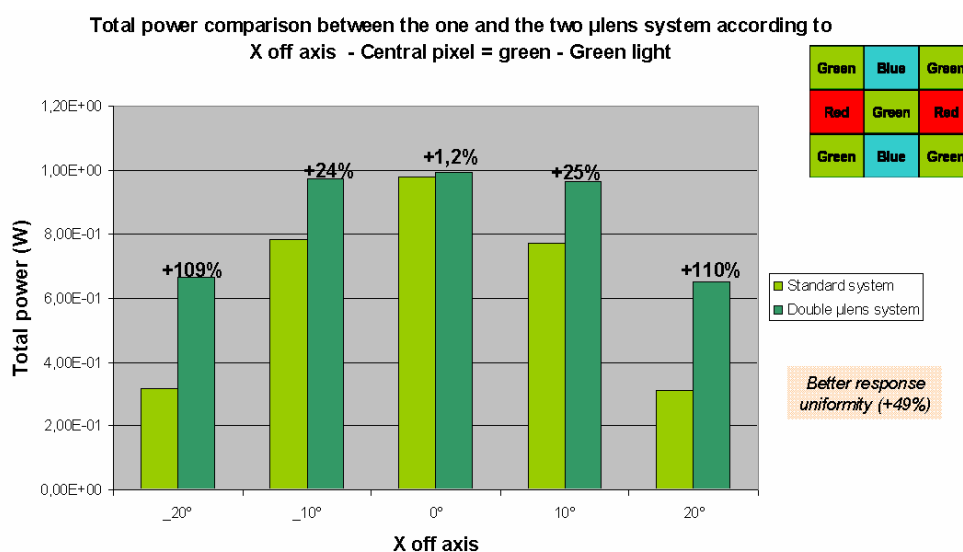


Figure 22 : comparaison de la puissance totale en fonction de l'angle

c) Etude des filtres colorés et Infrarouge

Toujours pour résoudre les problèmes liés au rendu des couleurs, et notamment les effets dits de « **Color Corner** » nous avons simulé, avec ZEMAX, et mesuré dans différentes configurations, les effets de chevauchement des filtres colorés (une chevauchement minimal du filtre vert sur les deux autres est indispensable pour éviter le délaminage des résines coloré), ainsi que l'influence du filtre infrarouge (IR) selon l'angle d'incidence ou d'ouverture de la source lumineuse.

Il est ressorti de cette étude que l'influence de l'overlap n'est pas déterminante, mais c'est le filtre IR qui joue un rôle important sur les variations de couleur : en raison de sa réponse spectrale qui ne prend pas en compte suffisamment de longueurs d'onde dans l'IR, des taches apparaissent dans les coins en lumière blanche diffuse.

Une variation de son épaisseur pourrait corriger cela au moins en partie.

II-1- 4 Nouveaux problèmes soulevés par la diminution de taille des pixels : passage à une technologie 3 μ m

a) Influence des lignes de métaux

Dès que l'on commence à **diminuer les dimensions des pixels** (nous sommes très rapidement passé à des pixels de 3 μ m), de nombreux paramètres, comme par exemple l'effet d'ombrage par les lignes de métaux, deviennent plus critiques notamment à cause des effets de réflexion, qui peuvent engendrer des pertes et des problèmes de cross talk optique comme le montre la figure 23 a). Les pixels sur lesquels nous avons travaillé ont de par leur technologie électronique une structure dissymétrique, il s'agit de pixels de type « 2T5 » c'est-à-dire 5 transistors pour 2 pixels qui ont donc un transistor en commun (le transistor de reset).

Comme le montre la figure 23 b) les pertes par réflexion au niveau des métaux 1 et 2 sont dissymétriques sur cette version déséquilibrée (plus importantes sur les lignes impaires que paires), et cette tendance s'aggrave avec l'augmentation de l'incidence du rayon principal. On constate aussi un écart des valeurs de l'absorption dans le polysilicium, consécutif à cet effet.

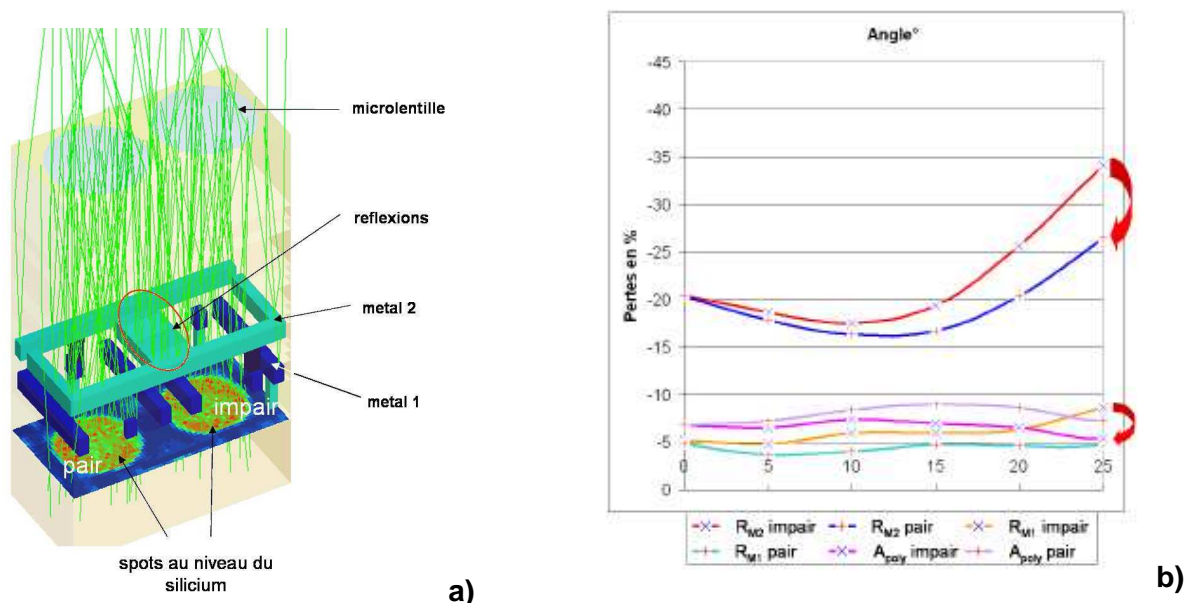


Figure 23 : pertes par réflexion sur les lignes de métaux pour les pixels déséquilibrés

À partir de nos simulations nous avons mis en évidence les effets bénéfiques d'un rééquilibrage de la structure métallique entre pixels pairs et impairs. Ce rééquilibrage permet de diminuer le défaut d'appariement optique. Comme on peut le voir sur la Figure 24

Le fait de rééquilibrer ces deux fenêtres métal permet d'annuler cette dissymétrie de réflexion, et rend aussi les pertes par absorption identiques au niveau du polysilicium .

Les performances comparées, pour les pixel avant et après rééquilibrage, en éclairage relatif et en défaut d'appariement optique (figure 25a) et 25b)) nous indiquent que le fait de rééquilibrer les fenêtres métal diminue fortement le défaut d'appariement optique, sans pour autant dégrader l'éclairage relatif

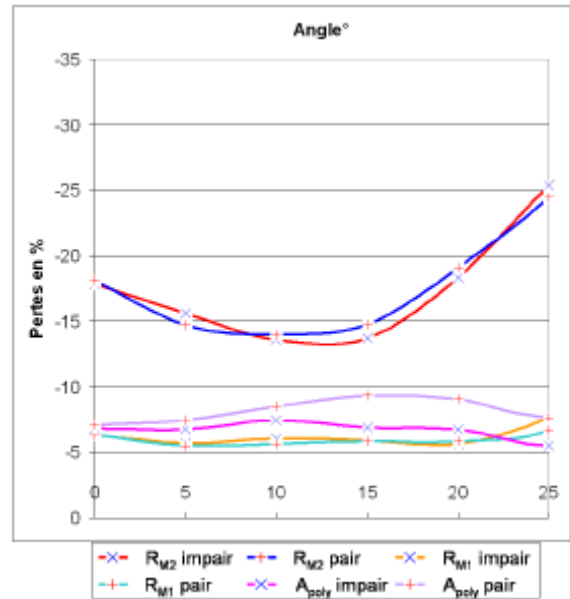
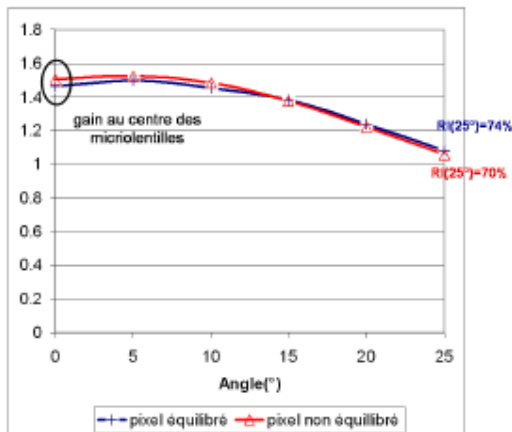
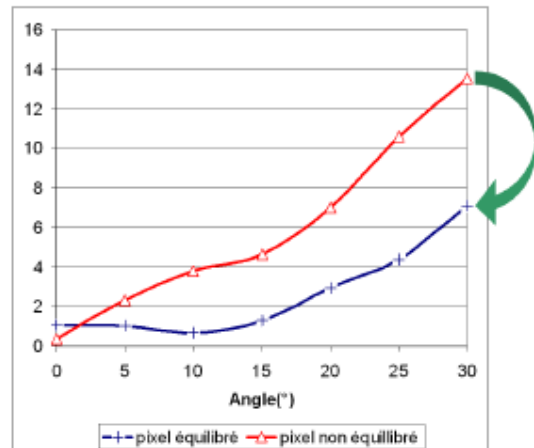


Figure 24 : pertes par réflexion sur les lignes de métaux pour les pixels rééquilibrés

Les technologies actuelles ont donc été revues avec les concepteurs pour prendre en compte ces corrections.



(a) Éclairage relatif



(b) Défaut d'appariement optique

Figure 25 : performances optiques des pixels déséquilibrés et rééquilibrés

b) Influence de la hauteur d'empilement

D'autre part, si en technologie $4\mu\text{m}$ avec la focalisation des lentilles optimisée nous obtenions une taille de spot permettant une collecte des photons sur toute la photodiode, en passant à la technologie $3\mu\text{m}$, le procédé de fabrication étant inchangé, la réduction de ses dimensions ne permet plus une collection potentielle à 100% : la photodiode est désormais plus petite que le spot, cela provoque une perte de photons sur les parties non photosensibles ce qui risque de conduire à une diminution du gain des microlentilles, et une perte de signal en absolu.

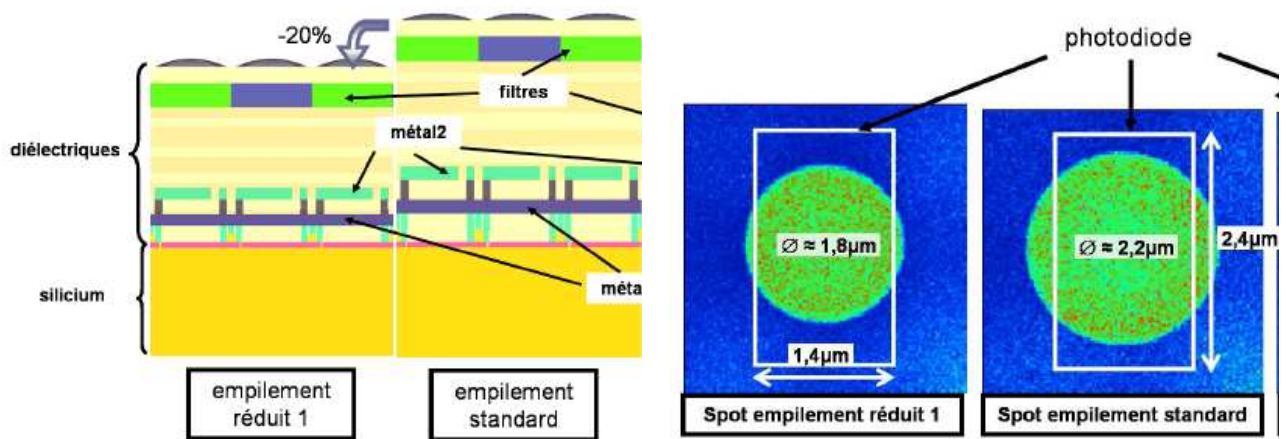


Figure 26 : effet de la diminution de l'empilement sur la taille du spot.

Nous avons alors proposé comme solution (Figure 26) de rapprocher les microlentilles de la surface de la photodiode afin de réduire la taille du spot. Si l'on considère au premier ordre une nouvelle hauteur d'empilement réduite de 25%, comme la nouvelle taille des pixels, alors le diamètre du spot est également réduit de 25%.

Les simulations de gain de microlentille ont ainsi pu montrer une amélioration substantielle de l'empilement réduit par rapport à l'empilement standard de près de 10%. Là aussi, cela a conduit à une modification du process en production.

Il est à noter que toutes ces simulations ont été corrélées par les mesures associées qui ont confirmé les tendances prévues, par contre les effets de la miniaturisation nous ont poussé à modifier certains paramètres de notre méthode de caractérisation. En effet, nous avons mis en évidence lors de cette étude que nous commençons à atteindre les limites « sensibles » de la diffraction. Ce phénomène n'est pas directement modélisable au niveau du tracé de rayon, mais on peut avoir une idée de ses effets de « dilatation » sur la densité énergétique du spot : pour un pixel situé au centre nous avons pu calculer dans le plan de Fourier la diffraction due à une pupille circulaire. En récupérant les images d'impacts au niveau du silicium, nous avons comparé les spots non diffractés, et diffractés, et démontré que cette « dilatation » avait des effets non négligeables. À tel point que nous avons dû modifier le type d'éclairage pour la caractérisation des surfaces photosensibles de référence : nous sommes passés en éclairage diffus pour que la différence de densité énergétique entre spots simulés et réels soit moins importante. La caractérisation des surfaces photosensibles étant moins précise, de par les dimensions du spot balayant ces surfaces, nous sommes passés à un modèle à deux surfaces : la surface « étendue » et la surface de la photodiode, les dimensions de la surface 3 étant négligeables en regard de la taille du spot diffus.

II-1-5 Caractérisation électro-optique des composants.

Comme évoqué précédemment, il est important de pouvoir orienter nos études par rapport à des besoins réels d'amélioration sur des produits existants, et de valider les résultats et solutions proposés sur ce même type de produits. Un des grands avantages de la collaboration établie avec ST Microelectronics et donc d'avoir ce lien direct avec la production des composants sur lesquels nous travaillons, et des éléments de test à disposition.

Nous avons donc décidé de mettre en place des bancs de caractérisation électro optique dans les locaux du CCR2 (laboratoire commun à ST M et à des laboratoires universitaires sur le site de Rousset). Plusieurs stagiaires (élèves ingénieurs ou d'IUT) ont participé à l'étude des besoins, au dimensionnement et la mise en place de ces bancs en collaboration avec les équipes de ST

Rousset et Crolles (qui en possédaient déjà un), afin de couvrir au mieux sur les deux sites l'ensemble des besoins de caractérisation dont nous pouvons être amenés à avoir besoin.

Ces bancs ont été utilisés et optimisés au cours des phases successives de l'étude afin de caractériser différents effets (cross talk, color corner, chevauchement et épaisseur de filtre, décalage de µlens ...) et de déterminer l'efficacité des solutions proposées à partir des différentes simulations sous les logiciels Zemax, TCAD SENTAURUS ou COMSOL.

Sur ces bancs **plusieurs configurations sont possibles** : étude en lumière collimatée et diffuse, blanche ou monochromatique ; ils sont équipés de systèmes de caractérisation angulaire permettant de déterminer la réponse optique du capteur en fonction de l'angle d'incidence, et de l'angle d'ouverture de la source illuminant le capteur.

La configuration actuelle est la suivante :

* Sur le premier banc (Figure 27), on peut effectuer grâce au logiciel « PICACHU » (PICture Acquisition and Characterisation Unit), des mesures de facteurs de conversion (CVF, en V/e) et de sensibilité en lumière blanche (en V/Lux.s) ; le CVF obtenu sert à effectuer des mesures de sensibilité en lumière monochromatique bleue, verte, ou rouge (en V/(J/m²)). Ce banc dispose d'une lampe halogène 250 W, d'un obturateur, d'un filtre infrarouge, de plusieurs densités optiques, de filtres interférentiels rouge, vert et bleu placés dans une roue à filtre. En sortie de cette dernière, le faisceau incident percute une lame séparatrice qui transmet la moitié du flux vers la puce à tester, et l'autre moitié vers un photomètre. Ce banc dispose aussi d'un diffuseur pour pouvoir travailler avec un faisceau à l'infini, ainsi que d'un montage de collimation pour un faisceau collimaté.

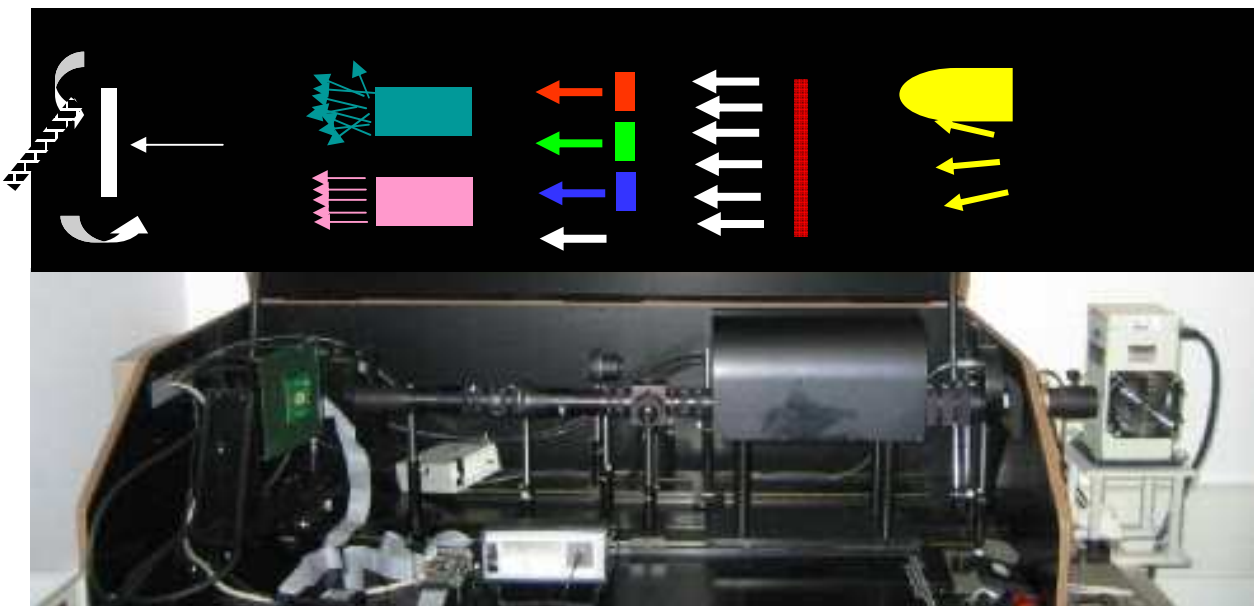


Figure 27 : premier banc optique (mesure de CVF et des sensibilités)

Grâce aux trois filtres interférentiels, on obtient quatre valeurs de sensibilité dans le bleu (une pour chaque photo site constituant un pixel), quatre dans le vert, et quatre dans le rouge, soit douze points au total.

* Le second banc (Figure 28), quant à lui dispose d'un monochromateur à la place des roues à filtres. On effectue donc sur ce banc des mesures de réponse spectrale moyenne (Average Spectral Response, ASR, en V/(J/m²)) sur tout le domaine du visible (380nm, 720nm). On superpose ensuite les courbes obtenues avec les points obtenus sur le banc précédent, afin de juger de la qualité de la mesure. On effectue également sur ce banc des mesures de rendement quantique (Quantum Efficiency, QE, en %) sur le même domaine de longueur d'onde.

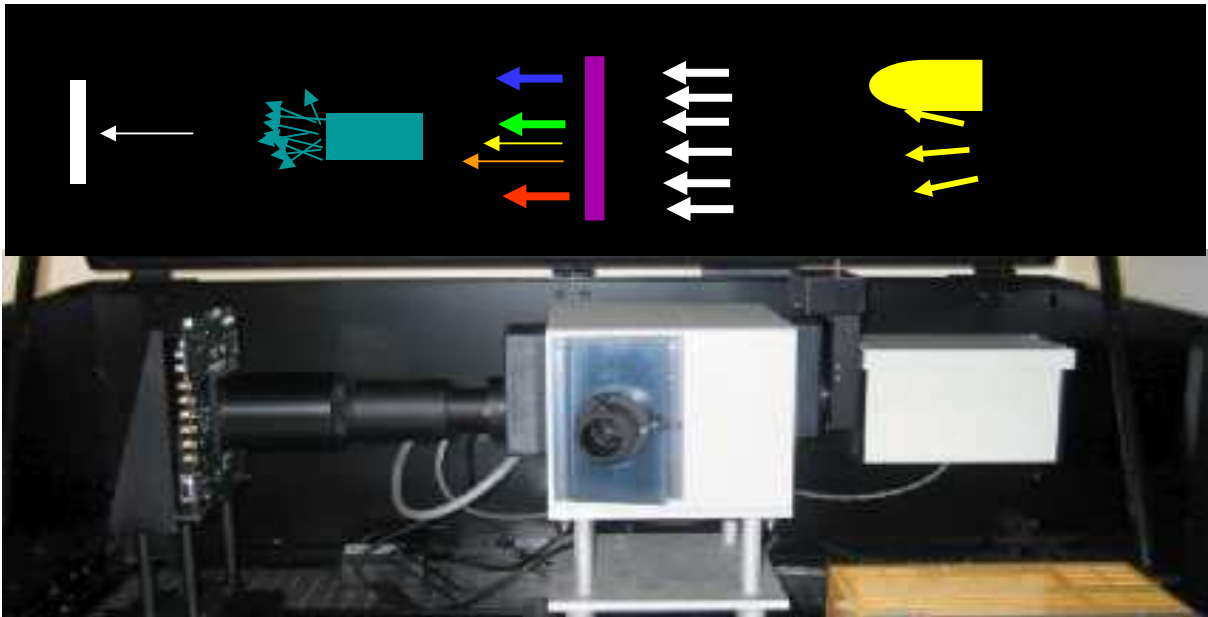


Figure 28 : Deuxième banc de caractérisation des structures test (mesure de QE)

L'utilisation de ces bancs de caractérisation nous a toujours permis de vérifier ou tester sur produit les hypothèses faites et les solutions proposées. Cela a fait une des grandes originalités de ce travail qui grâce à une forte collaboration industrielle, ne s'est jamais contenté d'en rester à des solutions théoriques, mais a toujours pris en compte leur faisabilité.

II-1-6 Limites de cette modélisation : importance de la diffraction avec la réduction de taille des pixels

Si notre modélisation par tracé de rayons nous a permis d'optimiser et le procédé de fabrication, et la conception des pixels, nous ne perdons pas de vue qu'elle possède des limites :

- notre modèle de surfaces photosensibles reste empirique, même s'il est basé sur l'expérience des spécialistes en conception, en technologie et en procédé. Afin de nous simplifier la problématique, nous avons abordé un point de vue en deux dimensions, et considéré trois surfaces photosensibles de référence. Cette modélisation suppose donc que les densités de probabilité de collection des porteurs sont constantes dans ces surfaces, ce qui n'est pas directement vérifié.
- comme nous l'avons montré ci-dessus, nous commençons des $3\mu\text{m}$ à sentir les effets de la diffraction. L'effet de réseau de la pixellisation se fait sentir, les phénomènes de diffraction de la lumière à l'intérieur des pixels deviennent prépondérants, la microlentille ne joue quasiment plus son rôle de focalisation.

Les limites de ce type de modélisation ne prenant pas en compte les effets de la diffraction, et les phénomènes de collecte de photons dans le silicium ont été mis en évidence dans les travaux effectués pendant le post-doc d'E. Etienne.

Nous avons établi un critère pour définir la taille au-delà de laquelle on ne pourrait plus négliger les effets de la diffraction. Nous avons pu établir, à l'aide de EMLAB module électromagnétique du logiciel SENTAURUS utilisé par ST pour la simulation des composants électroniques, sur des modèles simples (trous dans une couche d'Al sur substrat de Si : figure29)

qu'en deçà de 2 microns, les effets de la diffraction prenaient une importance considérable, qu'il faudrait sans doute envisager une autre alternative à la microlentille pour la focalisation de la lumière, et qu'en tout état de cause, une simple simulation par tracé de rayon ne pouvait plus suffire pour prendre en compte tous les paramètres, et continuer à optimiser la structure.

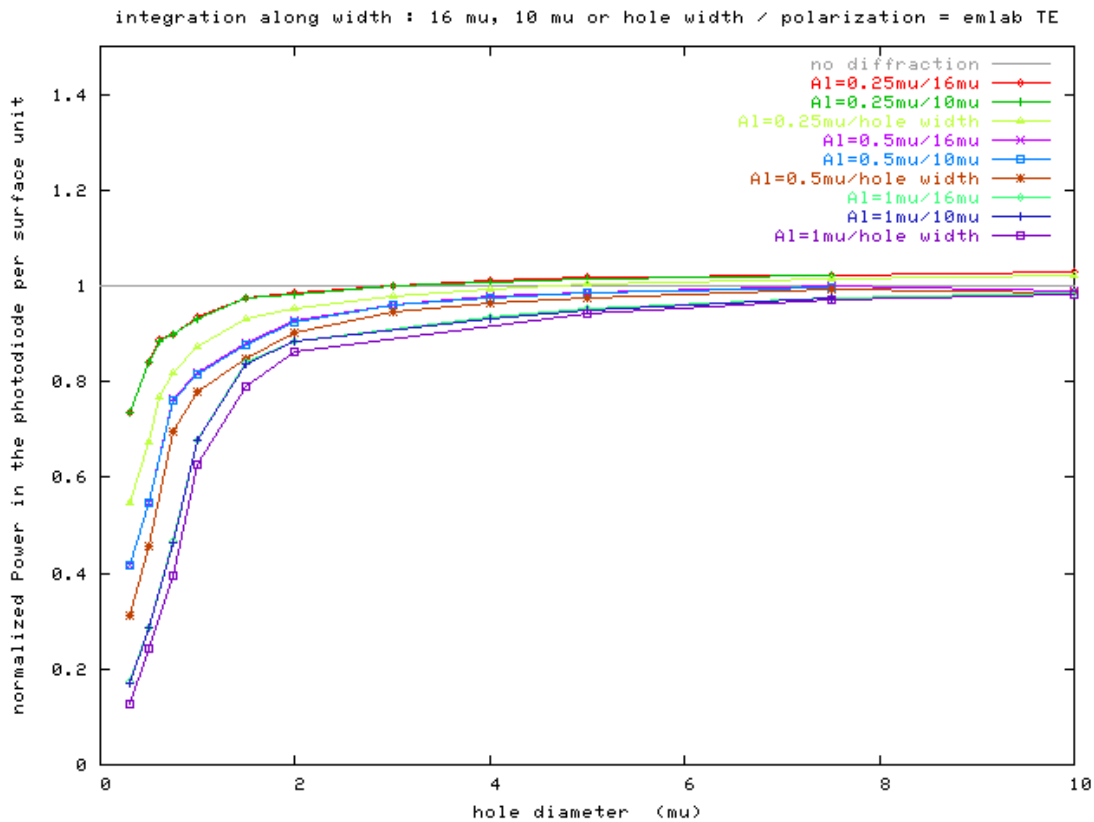


Figure 29 : puissance normalisée par unité de surface dans la photodiode en fonction de la taille du trou dans la couche d'Al. (polarisation TM, longueur d'onde 532 nm)

Une modélisation rigoureuse du système nécessite l'évaluation de la répartition du champ électrique dans l'ensemble de la structure par la résolution des équations de Maxwell afin de tenir compte du silicium, et de la densité de probabilité de collection de porteurs photo créés en fonction des zones de charges d'espace et de dopage, et de modéliser les effets de diffractions liés à la taille des motifs des pixels et à la longueur d'onde de l'excitation électromagnétique que représente le flux lumineux.

II-1-7 Modélisation par la méthode des éléments finis : prise en compte de la diffraction, recherche de solutions nouvelles pour le filtrage coloré

a) introduction, situation du problème

Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe précédent, il est impossible, pour des tailles inférieures à 2μm de continuer à optimiser les pixels en utilisant les lois de l'optique géométrique en raison du rôle prépondérant joué par la diffraction. Pourtant, les pixels réalisés devraient avoir des performances en résolution et sensibilité qui sont aussi bonnes si non meilleures que celles des pixels des technologies précédentes.

Il est donc indispensable de résoudre les équations de Maxwell pour modéliser correctement le cheminement de la lumière dans ce type de nano composant.

Sur le plan technique comme nous l'avons montré au paragraphe II-1-4-b), il faut toujours viser à avoir un stack le moins épais possible pour que la focalisation se fasse au mieux sur la photodiode.

L'idée qui conduit notre étude est d'utiliser le phénomène de diffraction pour remplacer les filtres colorés en résines dont l'épaisseur est imposée par le gabarit colorimétrique, par des réseaux de diffraction métalliques qui viendraient s'insérer dans un des niveaux de métal dédiés aux interconnexions dans le composant dont on ne peut par conséquent s'affranchir.

Ce sujet est tout à fait d'actualité, d'autres équipes de recherche y travaillent à l'échelle mondiale^{25 26 27 28}, mais sans être encore allé jusqu'à l'application. Son intérêt nous a permis d'obtenir le financement d'une thèse CIFRE que je co-encadre (Guillaume DEMESY) et qui a donc pour but de proposer des solutions innovantes pour les fonctions de transfert optique dans les pixels de très petite taille.

Le champ d'application des filtres diffractifs est large, et de nombreuses méthodes numériques ont été développées pour leur étude : méthodes différentielles²⁹, méthodes intégrales³⁰, FDTD^{31 32}, FEM^{33 34 35}...

Compte tenu des contraintes technologiques que nous nous attendons à avoir dans le cadre du process défini pour les composants, nous recherchons un modèle numérique le plus souple possible, afin de pouvoir l'adapter au mieux par la suite aux conditions réelles de fonctionnement. D'autre part, le logiciel utilisé doit pouvoir modéliser l'ensemble des aspects de la physique mis en jeu dans ce type de microsystème (électronique, optique voir même mécanique). Ces paramètres ont orienté notre choix vers COMSOL multiphysics et la méthode des éléments finis.

b) Elaboration et validation numérique de notre modèle théorique 2D

En collaboration avec André Nicolet et Frédéric Zolla de l'équipe CLARTE (Institut Fresnel) spécialisée dans ce domaine, nous avons donc dans un premier temps développé un modèle numérique de calcul des réseaux de diffraction entièrement basé sur la méthode des éléments finis et adapté, entre autres, aux structures multicouches [9].

²⁵ Catrysse, P. B. and Wandell, B. A., "Integrated color pixels in 0.18- μ m complementary metal oxide semiconductor technology," *J. Opt. Soc. Am. A* **20**, 2293–2306 (2003).

²⁶ Catrysse, P. B., Suh, W., and Fan, S., "One-mode model for patterned metal layers inside integrated color pixels," *Opt. Lett.* **29**, 974–976 (2004).

²⁷ Lee, H-S., Yoon, Y-T., Lee, S-S., Kim, S-H., Lee, K-D., "Color filter based on a subwavelength patterned metal grating," *Opt. Express* **15**, 15457–15463 (2007).

²⁸ Kanamori, Y., Shimono, M., and Hane, K., "Fabrication of transmission color filters using silicon subwavelength gratings on quartz substrates," *IEEE Phot. Tech. Lett.* **18**, 2126–2128 (2006).

²⁹ K. Watanabe, "Numerical integration schemes used on the differential theory for anisotropic gratings," *J. Opt. Soc. Am. A* **19**, 2245–2252 (2002).

³⁰ D. Maystre, "A new general integral theory for dielectric coated gratings," *J. Opt. Soc. Am.* **68**, 490–495 (1978).

³¹ K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propag.* **AP-14**, 302–307 (1966).

³² W. M. Saj, "FDTD simulations of 2D plasmon waveguide on silver nanorods in hexagonal lattice," *Opt. Express* **13**, 4818–4827 (2005).

³³ T. Delort and D. Maystre, "Finite-element method for gratings," *J. Opt. Soc. Am. A* **10**, 2592–2601 (1993).

³⁴ Y. Ohkawa, Y. Tsuji, and M. Koshiba, "Analysis of anisotropic dielectric grating diffraction using the finite element method," *J. Opt. Soc. Am. A* **13**, 1006–1012 (1996).

³⁵ Gang Bao, Zhiming Chen, and Haijun Wu, "Adaptive finite-element method for diffraction gratings," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 1106–1114 (2005).

La principale difficulté pour modéliser la diffraction d'une onde plane par un réseau vient du fait que l'on traite un problème infini alors que le domaine de calcul est borné. C'est pourquoi la majorité des techniques de calcul (FEM, FDTD) utilisent des PML (Perfectly Matched Layers)³⁶ pour limiter l'espace dans une direction et avoir des conditions pseudo périodiques dans les autres, mais reste le problème de la localisation de la source de l'onde plane. L'originalité de notre approche, présentée en détail dans la référence [9] (donnée en annexe 3), est qu'elle traite rigoureusement le problème de la localisation de la source dans l'élément diffractif lui-même.

Une des principales caractéristiques de notre modèle est que l'inconnue du problème est un champ diffracté "généralisé" qui satisfait les *Conditions d'Ondes Sortantes* (C.O.S.) ce qui permet d'utiliser les PML (*Perfectly Matched Layers*) pour réduire le domaine à mailler. Les matrices des systèmes linéaires conservent ainsi leur caractère creux et l'on peut utiliser les solveurs linéaires optimisés pour les éléments finis tels que UMFPACK. Ce champ diffracté peut prendre en compte explicitement une partie de la structure telle que la structure multicouche ce qui permet de réduire au minimum la région définie comme la région des sillons. Enfin, la quasi-périodicité de la solution est prise en compte par l'utilisation de conditions aux limites du type Floquet-Bloch.

Description du problème

Le type de structure que nous considérons peut être subdivisée en régions de la manière suivante (figure 30) :

- *Le superstrat* ($y > y_0$) qui est supposée homogène, isotrope et sans pertes ainsi qu'entièrement décrit par sa permittivité diélectrique relative ϵ^+ et sa perméabilité magnétique relative μ^+ . Le module du vecteur d'onde est noté :

$$k^+ := k_0 \sqrt{\epsilon^+ \mu^+}$$

- *L'empilement* ($y_0 < y < y_N$) qui est constitué d'un empilement de N couches homogènes et isotropes caractérisées par leur permittivités diélectriques relatives ϵ_n , leur perméabilité magnétique relative μ_n et leur épaisseur e_n .

- *La région des sillons* ($y_{g-1} < y < y_g$) qui est insérée dans la g -ième couche de l'empilement défini ci-dessus. Cette région est hétérogène et donc caractérisée par sa permittivité diélectrique relative $\epsilon_{g0}(x; y)$ et sa perméabilité magnétique relative $\mu_{g0}(x; y)$. La région des sillons est périodique le long de l'axe x et la période est notée d .

- *Le substrat* ($y < y_N$) qui est suppose homogène, isotrope et donc entièrement décrit par sa permittivité diélectrique relative ϵ_j et sa perméabilité magnétique relative μ_j .

Les permittivités mentionnées ci-dessus peuvent être à valeurs complexes. Le problème est invariant selon l'axe z .

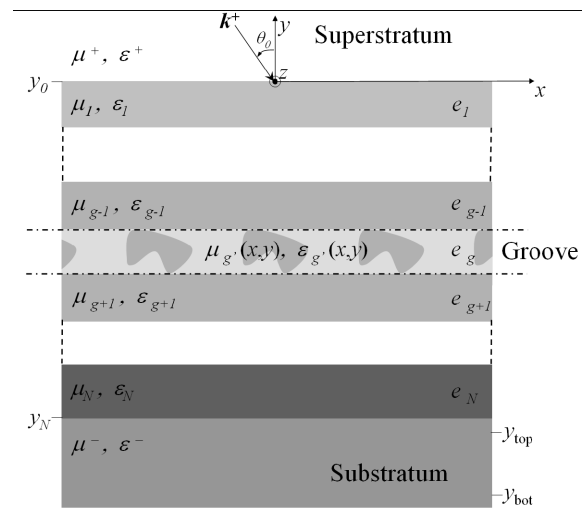


Figure 30 : Structure multicouche du réseau de diffraction

Cette structure est éclairée par une onde plane incidente de vecteur d'onde

$$\mathbf{k}^+ = \alpha \mathbf{x} + \beta^+ \mathbf{y} = k^+ (\sin \theta_0 \mathbf{x} - \cos \theta_0 \mathbf{y})$$

dont le champ électrique (cas champ Électrique Transverse, TE ou polarisation s) (resp. le champ magnétique (cas champ Magnétique Transverse, TM ou polarisation p)) est polarisé linéairement le long de l'axe z .

36

J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," J. Comput. Phys. **114**, 185–200 (1994). 20. G. Tayeb, "Contribution

Le problème de diffraction revient donc à trouver des solutions des équations de Maxwell dans le régime harmonique telles que le champ diffracté satisfasse des C.O.S. et que le champ total soit une fonction quasi-périodique selon la coordonnée x .

Comment ramener le problème de diffraction à un problème radiatif

Le problème de la diffraction dans le cas non conique revient à chercher le champ électrique (resp. magnétique) qui est polarisé le long de l'axe z , $\mathbf{E} = e(x; y) \mathbf{z}$ (resp. $\mathbf{H} = h(x; y) \mathbf{z}$). Les fonctions e et h sont donc les solutions d'équations aux dérivées partielles analogues :

$$\mathcal{L}_{\xi, \chi} := \operatorname{div}(\xi \nabla u) + k_0^2 \chi u = 0 \quad (1)$$

avec $u = e$, $\xi = \mu$, $\chi = \varepsilon$, dans le cas TE et $u = h$, $\xi = \varepsilon$, $\chi = \mu$, dans le cas TM.

De manière à pouvoir utiliser les PML pour réduire le domaine d'étude à mailler, nous formulons le problème en faisant apparaître un champ diffracté "généralisé" qui satisfait des conditions d'ondes sortantes et est rayonné par des sources équivalents localisées dans la région des sillons.

Pour ce faire, en plus des classiques champ total u , champ incident u_{inc} et champ diffracté u_d , nous sommes amenés à introduire les champs auxiliaires suivants :

- u_1 qui est le champ total obtenu en illuminant la structure multicouche simple (la région des sillons est considérée comme homogène) avec le champ incident. Ce champ u_1 peut être calculé de façon analytique.
- u_0 qui est égal au champ incident dans le superstrat et est nul ailleurs,
- $u_1^d := u_1 - u_0$ et qui satisfait par construction les COS,
- la fonction $u_2^d := u - u_1 = u^d - u_1^d$.

La présence de l'indice haut d indique que pour ce champ qui est la différence de deux champs diffractés, les C.O.S. sont garanties (ce qui est de première importance lorsque l'on veut utiliser les PML)³⁷.

Finalement,

u_2^d satisfait l'équation suivante :

$$\mathcal{L}_{\xi, \chi}(u_2^d) = -\mathcal{L}_{\xi, \chi}(u_1),$$

ou le membre de droite est une fonction scalaire qui peut être interprétée comme un *terme source* $\mathcal{S}_1(x, y)$ dont le support est entièrement contenu dans la région des sillons.

Notre modèle a été validé, cf ref [9], par comparaison des résultats numériques fournis avec ceux déjà obtenus par d'autres modèles développés par l'équipe CLARTE pour des matériaux bien connus (éléments diffractifs en aragonite) .

³⁷

Y. Ould Agha, F. Zolla, A. Nicolet, S. Guenneau, "On the use of PML for the computation of leaky modes : an application to gradient index MOF", *COMPEL*, vol. 27, no. 1, pp. 95-109, 2008.

c) Application au cas des capteurs CMOS, validation expérimentale

L'application de l'optique diffractive au filtrage couleur est un sujet très étudié, même indépendamment des capteurs CMOS^{38 39 40} mais les techniques développées sont difficilement applicables à la technologie en raison le plus souvent de l'incompatibilité des matériaux étudiés avec le process CMOS.

Nous avons commencé par adapter notre formulation originale en 2D [9] de la méthode des éléments finis (FEM) au cas de structures diffractives dans un multi couches, pour nous rapprocher de la configuration des pixels CMOS.

Mais surtout, un des grands avantages de notre étude, est que nous avons grâce à notre étroite collaboration avec ST Microelectronics pu réaliser des structures de test permettant une validation expérimentale de notre modèle. Tout cela est explicité dans la référence [18] donnée en annexe 3.

Nos structures de test sont de larges ($250 \times 350 \mu\text{m}^2$) photodiodes fabriquées selon le même process CMOS que les imageurs. Des lignes de cuivre ont été déposées au premier niveau d'interconnexions (Fig. 31b) pour former un réseau de pas sub-longueur d'onde en modifiant un seul niveau de masque. Pour empêcher la diffusion du cuivre dans la puce, ces lignes sont encadrées par une barrière de diffusion, un bicouche Ta/TaN, pour former finalement un motif diffractif complexe (Fig. 31c). Le reste de l'empilement est assimilable à un multicouche $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$.

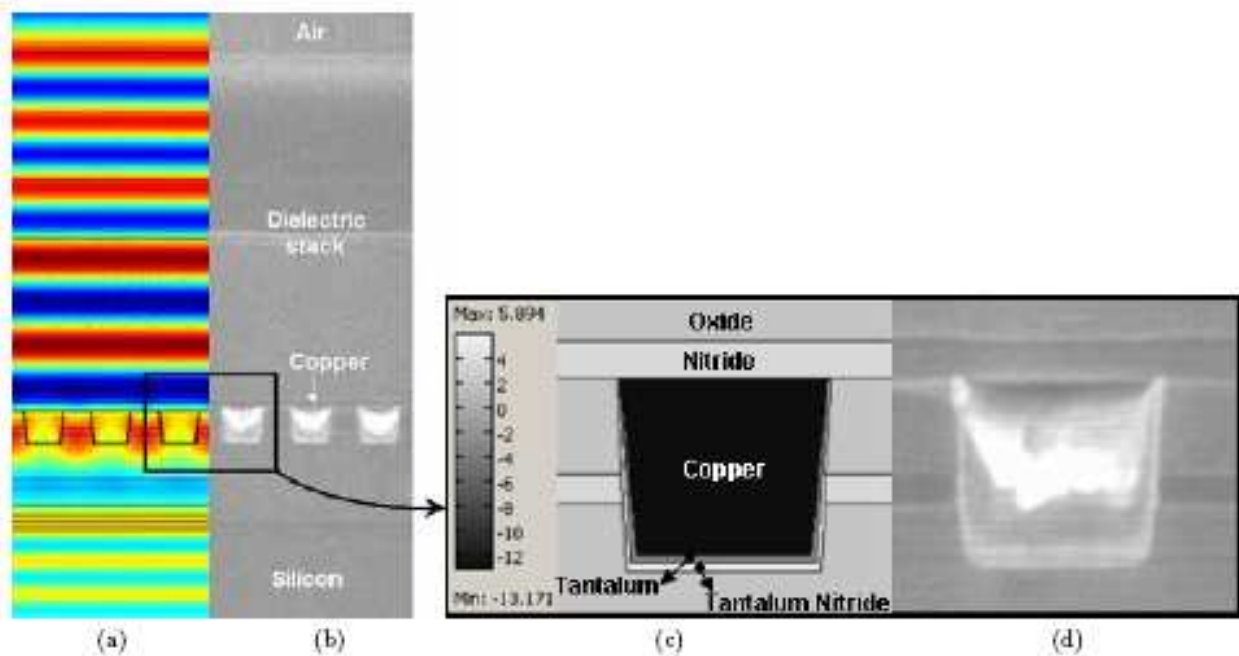


Figure 31 : Structures de Test : larges photodiodes avec réseau de cuivre

a) modélisation du champ sous COMSOL, b) Image SEM c) et d) détail d'un des éléments du réseau

38 Lee, H-S., Yoon, Y-T., Lee, S-S., Kim, S-H., Lee, K-D., "Color filter based on a subwavelength patterned metal grating," *Opt. Express* **15**, 15457–15463 (2007).

39 Degiron, A., Lezec, A., Barnes, H. J., and Ebbesen, W. L., "Effects of hole depth on enhanced light transmission through subwavelength hole arrays," *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4327–4329 (2002).

40 Barnes, W. L., Dereux, A., Ebbesen, T. W., "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature* **424**, 824–830 (2003).

Le rendement quantique (QE) de ces photodiodes, c'est-à-dire la fraction du flux de photons incident contribuant au photo courant en fonction de la longueur d'onde, a été mesurée sur nos bancs de caractérisation.

A partir du champ incident et du champ total calculé, on peut estimer simplement le rendement quantique comme le rapport entre la puissance optique absorbée dans la zone de charge d'espace de la diode et la puissance optique incidente sur la diode.

Ce mode de calcul du rendement quantique a été validé expérimentalement en utilisant comme référence de grandes photodiodes étant soumises au même process mais ne comportant pas de structure diffractive dans la couche de cuivre. On constate effectivement sur la Figure 32a) que le modèle est dans ce cas en très bon accord avec la mesure.

Pour les diodes comportant un réseau, Les niveaux de QE obtenus sont faibles, mais le modèle permet de les retrouver avec un bon accord dans les deux cas de polarisation (N.B. : seul le cas TM est donné sur la figure 32b))

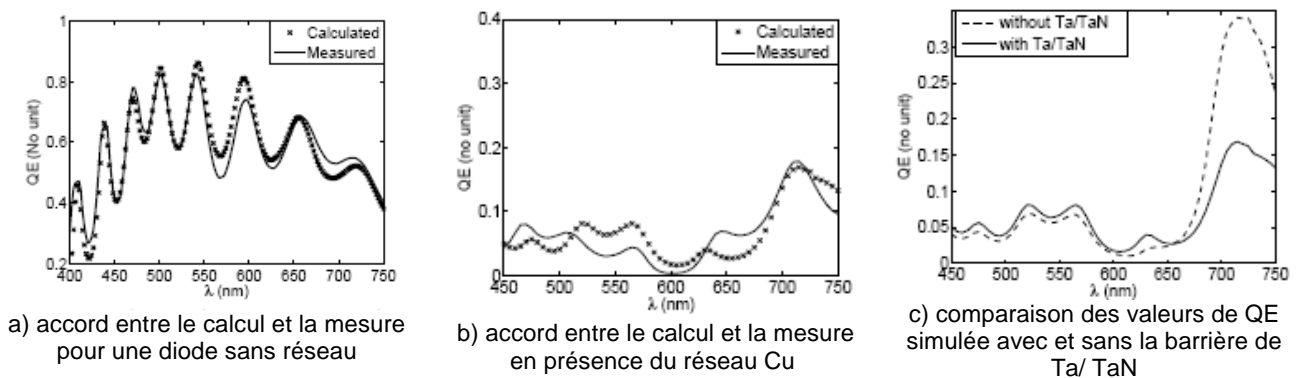


Figure 32 : validation expérimentale du modèle

Ces faibles niveaux de QE peuvent s'expliquer par la présence de la barrière de diffusion en Ta/TaN autour du cuivre dont la présence est imposée par le fait que nous avons voulu modifier le moins possible le process classique de fabrication des imageurs.

Le comportement absorbant de cette barrière gêne la qualité de transmission du filtre et les effets de surface intervenant dans ce type de filtrage sont perturbés par sa présence.

En effet on peut voir sur les simulations de la figure 32c) que le même réseau sans Ta/TaN aurait donné un bien meilleur QE

Le point important de cette étude est qu'il apparaît possible d'utiliser nos modèles de manière à retrouver des gabarits de filtres voulus, et proposer ensuite des adaptations de process en conséquence. Ce qui commence à être admis par nos partenaires industriels...

d) Modélisation 3D et perspectives

Les Premiers résultats ci-dessus, même s'ils ne donnent pas de valeurs satisfaisantes du QE (en raison de la présence de barrière de diffusion). Confirment bien la validité de notre modèle et laissent augurer que des solutions de filtrage de ce type pourront être envisagées.

Pour cela, nous travaillons actuellement à la mise en place d'un modèle 3D permettant d'évaluer des structures de réseaux plus complexes comme l'échiquier sur la figure 33 ci contre, ou toute autre forme de plots, pleins ou avec une structure coaxiale, ou bien des réseaux de trous. La validation numérique est en cours. La lourdeur en terme de temps de calcul a imposé l'investissement dans une ferme de calcul.

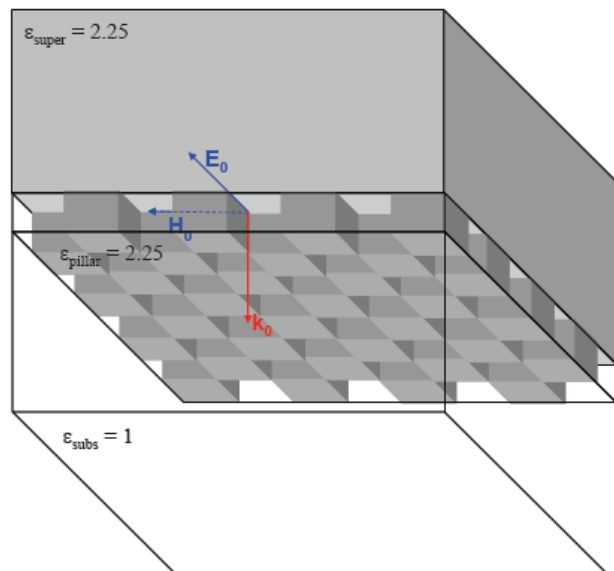


Figure 33 : modèle de réseau de type « échiquier »

L'utilisation d'autres métaux que le cuivre et surtout son utilisation sans la barrière de diffusion en Ta/TaN sont actuellement à l'étude. Nous avons réalisés (avec le support de l'équipe Opto- PV de l'IM2NP) des dépôts de d' Al, Au et Ag, qui serviront après gravure par FIB à tester d'autres types de réseaux.

ANNEXE 3 :

PRINCIPALES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LES CAPTEURS D'IMAGE EN TECHNOLOGIE CMOS

A3-1 : référence [17]

C. Fossati, O. Gagliano, M. Commandre, B. Dunne, "Microlens design for CMOS image sensor", **Proc. of SPIE** Vol.5962, 596229 (2005) Optical Design & Engineering II edit.by Laurent Mazuray, Rolf Wartmann

A3-2 : référence [9]

G. Demèsy, F. Zolla, A. Nicolet, M. Commandré, and **C. Fossati**, "The finite element method as applied to the diffraction by an anisotropic grating," **Opt. Express** 15, 18089-18102 (2007)

A3-3 : référence [18]

G. Demèsy, F. Zolla, A. Nicolet, M. Commandre, **C. Fossati**, O. Gagliano, B. Dunne, "The finite elements method as applied to calculation of quantum efficiency in optoelectronic imaging devices", **Proc. of SPIE** : Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices V San-Diego, 08/2008.

II-2- MASQUES AVANCES

II-2-1 Introduction : les enjeux de la photolithographie et les OPC

Le terme photolithographie désigne l'ensemble des opérations permettant de délimiter par insolation à travers un masque l'extension latérale des matériaux sur la surface d'un substrat semi-conducteur. Elle est basée sur l'empilement de couches à la surface d'une plaquette de silicium. Les motifs deviendront par la suite les différentes zones actives des composants électroniques (exemple : contact, drain...) ou les jonctions entre ces composants. Les techniques photolithographiques sont au coeur de l'industrie électronique, et les progrès réalisés dans ce domaine ont, depuis plusieurs dizaines d'années, permis la course à la miniaturisation des composants elles sont cruciales mais coûteuses et contribuent en majeure partie à la prospérité de l'industrie des semi-conducteurs

La photolithographie comporte trois étapes principales :

- L'étalement d'un film de résine photosensible (composés organiques dont la solubilité est affectée par un rayonnement) sur le substrat de silicium
- L'exposition à un rayonnement
- Le développement des motifs

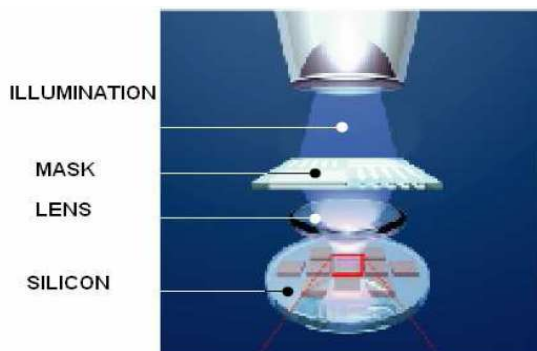


Figure 34 : dispositif d'insolation

Afin d'obtenir le motif souhaité sur le wafer, le procédé de photolithographie (figure 34) nécessite différentes étapes une fois la résine déposée.

Tout d'abord, lors de l'exposition du wafer (substrat+résine) au rayonnement lumineux, il se forme une **image aérienne** obtenue par projection de la lumière à travers le masque. Elle correspond à la répartition de l'intensité lumineuse à la sortie du système optique. La projection de l'image aérienne sur le wafer entraîne des modifications photochimiques de la résine photosensible. L'image obtenue est alors l'**image latente**.

Les effets de la réfraction à l'interface air/résine, de la réflexion à l'interface résine/substrat et de l'absorption subie lors de la propagation à travers la résine peuvent entraîner des différences considérables entre l'image aérienne et l'image latente. Aussi, des réactions physico-chimiques ayant lieu pendant l'insolation et pouvant entraîner des variations de propriétés de la résine rendent-elles compliquée l'obtention de l'image latente. Enfin, on effectue le développement de l'image latente sur la résine photosensible.

Bien que la microélectronique soit sans cesse en progrès, le procédé de photolithographie commence à limiter la réduction des dimensions. En effet, la longueur d'onde de la lumière utilisée pour l'insolation lors de ce procédé est du même ordre de grandeur que les dimensions critiques du circuit ; ainsi, cela crée des phénomènes de diffraction qui perturbent de façon non négligeable les motifs transférés sur le wafer.

Pour les technologies CMOS inférieures à $0.15\mu\text{m}$, en raison des phénomènes de diffraction présents à cette échelle, les motifs imprimés sur la plaquette de Silicium ne sont pas toujours fidèles à ceux du masque. Il faut donc optimiser les masques, et pour cela, les distorsions introduites par chaque élément de la chaîne d'illumination doivent être anticipées et compensées

afin d'assurer une parfaite fidélité entre les géométries finale, et initiale. Ces anticipations et compensations sont couvertes par la simulation des distorsions leurs corrections sont apportées au niveau du masque sous forme de ce que l'on appelle les "correction optique de proximité" (OPC, Optical Proximity Correction), ou de traitement des phases du rayonnement optique utilisé pour l'insolation de la résine photosensible (PSM, Phase Shift Mask).

La méthode « Model Based OPC » (figure 35) qui est le sujet de nos travaux est basée sur l'étude des effets de proximité susceptibles de modifier le dessin original et sur un procédé de simulation. Pour corriger les distorsions, on applique sur le masque les distorsions inverses et on simule le motif que l'on obtiendrait sur le wafer. On compare le layout obtenu avec celui souhaité et si l'erreur est trop importante, on modifie à nouveau le masque et on exécute à nouveau l'étape précédente jusqu'à obtenir un motif convenable sur le wafer.

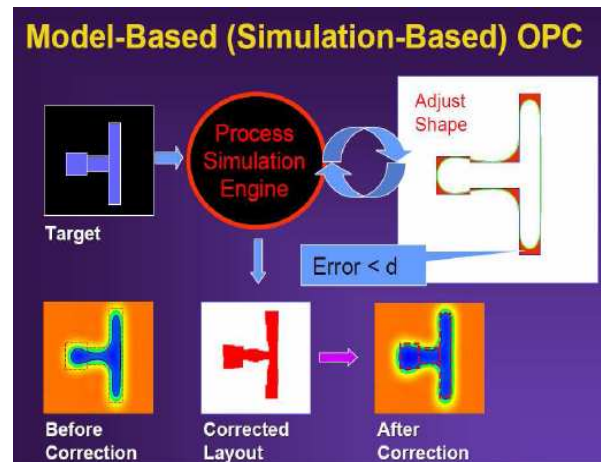


Figure 35 : model based OPC

Contrairement à la méthode « Rule Based OPC » qui applique systématiquement les mêmes règles de corrections aux mêmes endroits quel que soit l'environnement, la méthode « Model based » s'adapte au layout, mais elle comporte quelques inconvénients : les temps de calcul sont beaucoup plus importants pour cette méthode (boucle de simulation et de comparaison), et c'est une méthode difficile à mettre en place car elle nécessite de choisir un certain nombre de motifs de test.

Le traitement des OPC est un travail complexe et laborieux qui ne peut être décorrélé de la simulation. La maîtrise et l'analyse mathématique des algorithmes utilisés dans ces logiciels commerciaux est stratégique dans ce cadre. La compréhension des fonctions mathématiques composant le cœur du logiciel OPC, ouvre la voie à une optimisation conséquente du logiciel, notre objectif étant d'augmenter la fiabilité et la rapidité du traitement, voire même d'introduire une nouvelle modélisation du phénomène physique qui prendra en compte l'ensemble des paramètres pour traduire au plus près la réalité du problème considéré.

Ce sujet d'importance première pour l'industrie de la microélectronique a permis le financement de deux thèses CIFRE avec la société ST Microelectronics Rousset.

J'ai parallèlement suivi une thèse CIFRE avec ST Microelectronics Crolles et le LETI traitant d'un autre type de corrections : les masques à décalage de phase.

II-2-2 Premières études sur le sujet

Mes travaux de recherche sur ce sujet ont débuté en 2004

Le but de notre étude est d'obtenir une plate-forme de simulation complète et puissante. La modélisation est effectuée en priorité à partir des logiciels Calibre Work Bench[®] (simulation des masques pour optimisation de leur effet par une méthode semi empirique) et Solid CT[®] (simulation des étapes de photolithographie pour optimisation de l'impression des motifs sur la résine).

Dans un premier temps, pour uniformiser les outils de simulation, une interface a été créée entre SOLID-CT[®] et ISE-TCAD[®] (simulateur de comportements électriques de transistors) et présentée à la conférence « Bacus Photomask 2005 » [21].

L'objectif suivant était d'identifier clairement les principales étapes qui interviennent dans Calibre afin de voir s'il était possible d'en optimiser l'utilisation.

J'ai encadré dans le cadre de cette étude une thèse CIFRE et deux projets d'élèves ingénieurs en 3A. Nous avons analysé les différents paramètres utilisés par Calibre pour simuler l'intensité lumineuse reçue par la résine au travers du masque.

Le mode de calcul de l'image dite « aérienne » au travers du masque se base sur les travaux de N. Cobb⁴¹. Il part des équations de Hopkins^{42 43} qui donnent une formulation scalaire générale de l'image formée par un système optique partiellement cohérent. En fonctions des coefficients de transmission croisés du système optique : TCC

$$I(u, v) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 \sum_{i_1}^{I_1} \sum_{i_2}^{I_2} \sum_{i_3}^{I_3} \sum_{i_4}^{I_4} TCC(i_1, i_2, i_3, i_4) E(i_1, i_2) E^*(i_3, i_4) e^{i\{(i_1-i_3)u+(i_2-i_4)v\}} \quad (1)$$

where

$$TCC(i_1, i_2, i_3, i_4) = 2\pi \iint_{-\infty}^{+\infty} \Gamma(x, y) F(x + i_1, y + i_2) F^*(x + i_3, y + i_4) dx dy \quad (2)$$

Typically, $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I$ for non-astigmatic systems for symmetry reasons.

and

- $I(\cdot)$ intensity image at the image plane.
- $E(\cdot)$ object being imaged (mask).
- $\Gamma(\cdot)$ mutual intensity function, describing coherence properties of the illumination.
- $F(\cdot)$ coherent point spread function, describing properties of the projection system.

Les équations du modèle de Hopkins sont assez complexes et non linéaires, c'est pourquoi des approximations doivent être faites pour « linéariser » le système étudié, et rendre les temps de simulation acceptables.

On périodise le masque, et on le développe en série de Fourier. L'intensité périodisée ainsi obtenue, peut alors être considérée, non plus comme une somme cohérente de systèmes incohérents, mais comme une somme incohérente de systèmes cohérents. Cette approximation connue sous le nom de SOCS (Sum of Coherent Systems) a été proposée par Cobb. Les coefficients TCC (équation 1) sont identifiés par 4 indices sont déployés sous forme de matrice et décomposés (Singular Value Décomposition) en éléments singuliers (aussi appelés Kernels) sous la forme :

$$\mathbf{T} = \sum_{k=1}^K \lambda_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^H$$

Pour optimiser encore le temps de calcul, une troncature de la somme aux premiers kernels seulement est effectuée de manière « empirique ».

⁴¹ N.B. Cobb : these of University of California–Berkeley 1998

⁴² Hopkins, H., \The concept of partial coherence in optics," Proc. Royal Soc. Series A 208, 263{277 (1951).

⁴³ Hopkins, H., \On the di_raction theory of optical images," Proc. Royal Soc. Series A 217(1131), 408{432 (1952).

Après que l'utilisateur ait défini le modèle optique par l'ensemble de ses paramètres (longueur d'onde, ouverture numérique, le facteur de réduction, les propriétés de la résine...), il choisit de manière plutôt empirique le pas du maillage, le nombre de kernels à prendre en compte, la taille du diamètre optique.

Le logiciel approxime alors le modèle de Hopkins par des systèmes linéaires dont les sorties sont élevées au carré, pondérées et sommées. Ces systèmes linéaires correspondent à la convolution de la fonction masque par les différents kernels utilisés. Pour effectuer cette convolution rapidement, le logiciel Calibre utilise des tables de calcul appelées « lookup tables ».

L'ensemble des étapes intervenant dans le logiciel est schématisé sur la figure 36.

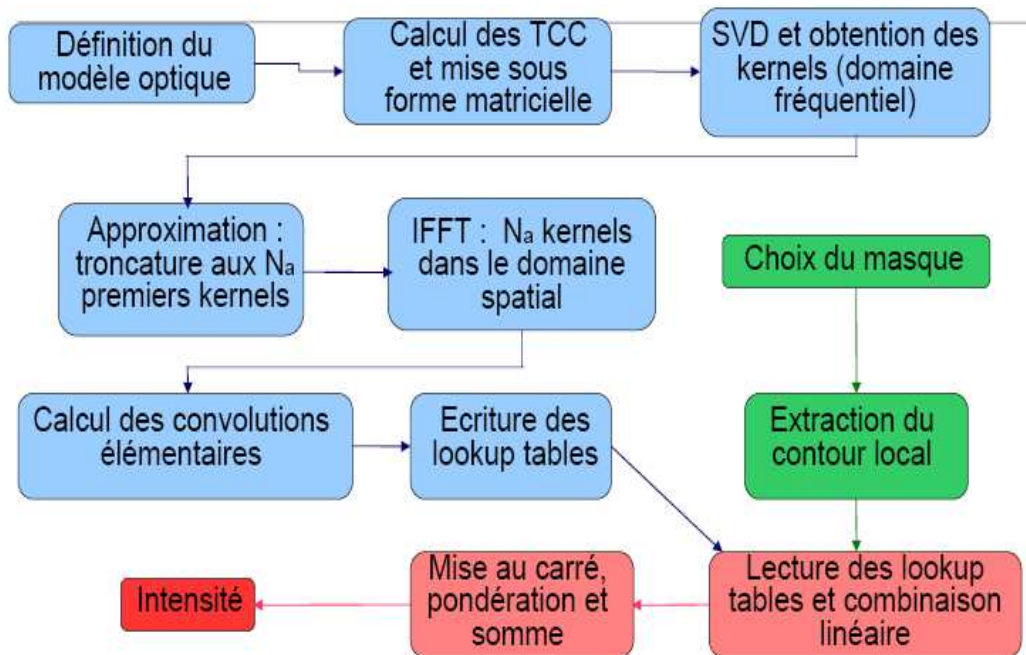


Figure 36 : principales étapes du logiciel.

Le masque peut être considéré comme un ensemble de polygones qui laissent plus ou moins passer la lumière. Ainsi, la fonction masque E est une fonction constante par zones, autrement dit une fonction indicatrice de l'union des zones couvertes de polygones.

Pour calculer la convolution en un point (x_0, y_0) de la fonction masque par un kernel, il suffit de connaître le masque localement, c'est-à-dire autour du point (x_0, y_0) . Ainsi, on extrait du masque un contour local qui, seul, sera utilisé pour le calcul de convolution (Figure 37). La dimension de la région de support peut être choisie arbitrairement par la fonction « optical diameter » du logiciel Calibre. La méthode de convolution utilisée repose sur le fait que l'aire d'un polygone peut être considérée comme la somme des aires des trapèzes créés par les points consécutifs du polygone. la convolution par le masque correspond à la somme des contributions de chaque côté du contour local qui génère un trapèze.

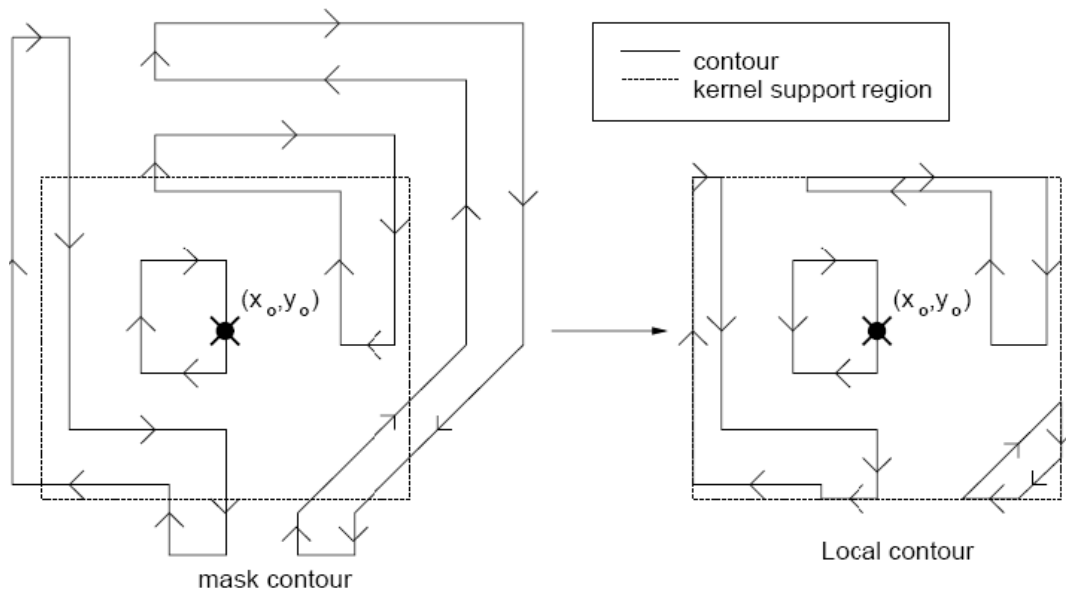


Figure 37 : Extraction du contour local du masque, définition du diamètre optique

Le **principe de la correction OPC** est le suivant :

Les corrections appliquées à une zone donnée du layout vont interférer sur les motifs voisins le logiciel doit donc procéder à un **réarrangement hiérarchique** pour déterminer les zones présentant le plus de risques de modifications dues aux effets de proximité. Pour cela, il évalue les effets de proximité de chaque motif puis les interactions entre les différentes corrections pouvant être apportées. Enfin, les niveaux de correction à appliquer pour l'ensemble des zones considérées sont déterminés précisément.

Afin de réaliser la correction, le dessin est découpé en éléments (étape de **fragmentation**) qui sont eux-mêmes fragmentés en plusieurs segments associés à un point de contrôle. La figure 38 donne un exemple de fragmentation.

L'optimisation de la correction apportée s'effectue en modifiant les segments.

Pour la simulation, seuls les effets de proximité relatifs à chaque point de contrôle sont considérés. Ainsi, en fonction de la valeur de la fragmentation et de la dimension critique au point de contrôle, les segments sont déplacés afin de minimiser au mieux ces effets. Le procédé est répété plusieurs fois jusqu'à obtenir la meilleure correction possible, c'est la **boucle de correction**.

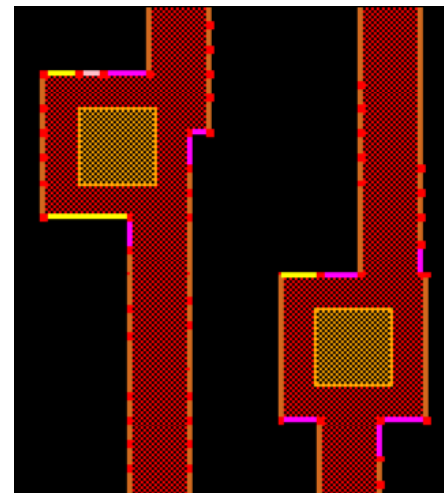


Figure 38 : exemple de fragmentation

Nous avons souhaité déterminer l'importance que peuvent avoir les choix qui sont faits de manière empirique dans Calibre sur la précision de la simulation d'un modèle OPC comme sur le temps de calcul nécessaire.

Influence du diamètre optique choisi :

Les simulations effectuées ont montré que l'on se rapprochera d'autant plus de la précision donnée par le modèle d'Hopkins complet en prenant un grand diamètre optique (figure 39). Mais cela se fait au détriment du temps de calcul.

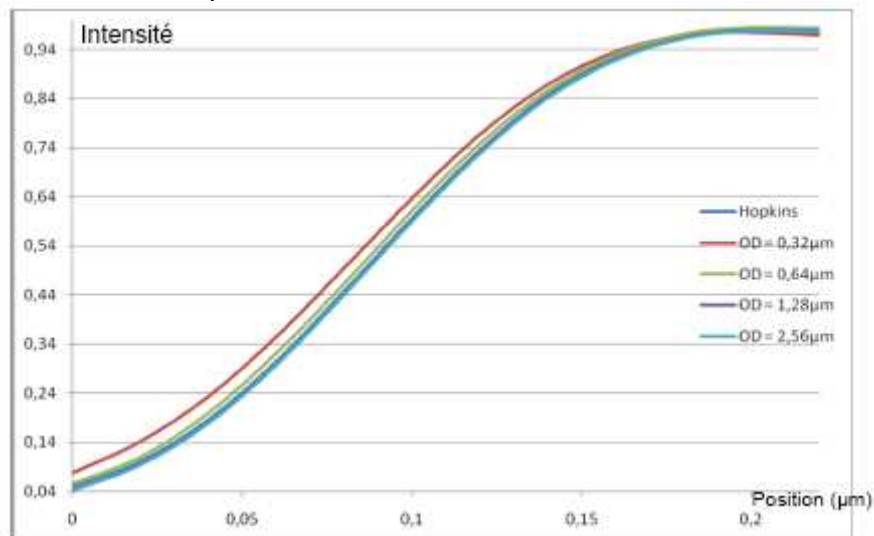


Figure 39 : Profil d'intensité en fonction de la taille du diamètre optique calculée dans le cas de 10 kernels retenus

Influence du nombre de kernels retenus :

On voit bien sur la figure 40 que plus le nombre de kernels est important, plus les résultats de la simulation sont précis. Mais le temps de calcul en sera d'autant plus augmenté.

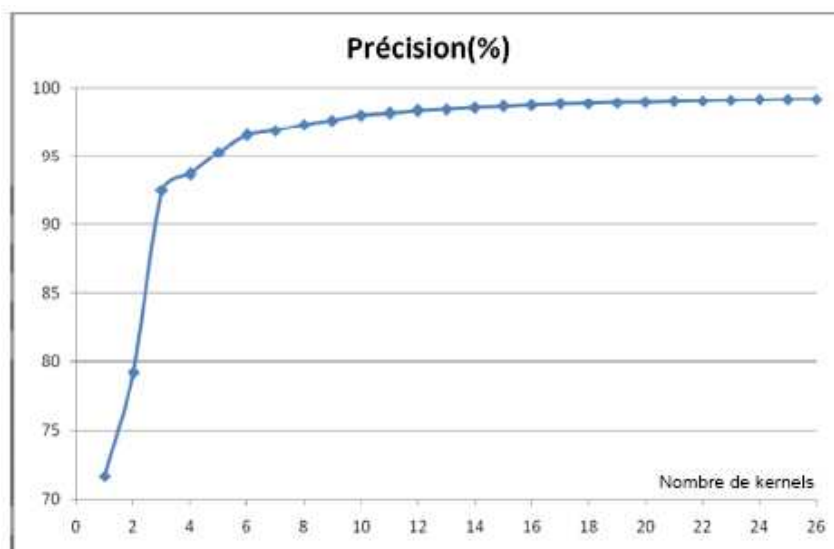
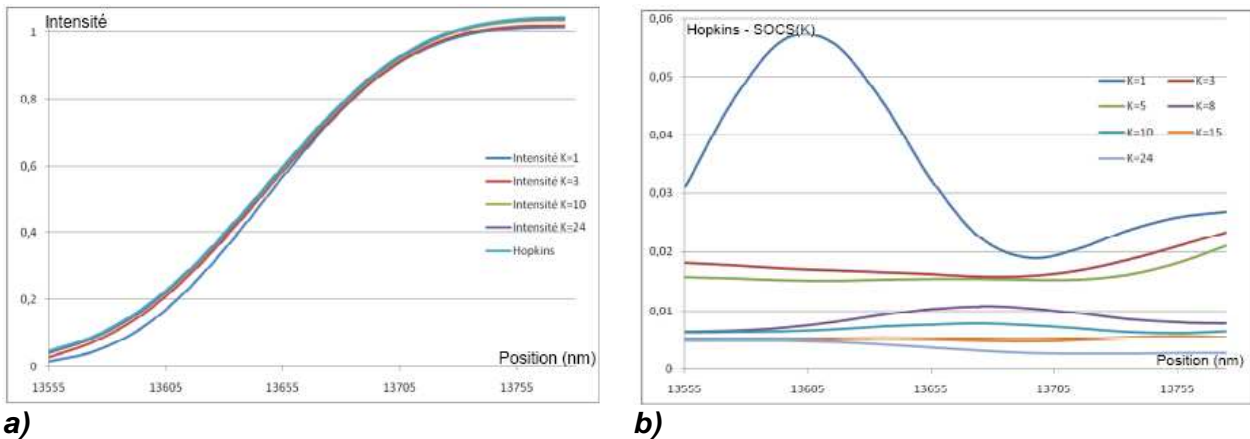


Figure 40 : Evaluation de la précision donnée par le logiciel en fonction du nombre de kernels retenus.

La figure 41a) quand à elle montre comment le fait d'augmenter le nombre de kernels pris en compte permet à l'approximation SOCS de se rapprocher de l'intensité calculée avec le modèle de Hopkins complet. La figure 41b) permet de visualiser plus précisément l'erreur en valeur absolue entre le modèle d'Hopkins et l'approximation SOCS pour un différents nombre de kernels. On constate que cette approximation conduit au pire à 6% d'erreur.



a)
b)
Figure 41 : Evaluation de l'erreur commise sur le calcul d'intensité lumineuse en utilisant l'approximation SOCS plutôt que le modèle d' Hopkins
a) calcul d'intensité pour différentes valeurs de K
b) erreur en valeur absolue

La qualité de l'image aérienne simulée est d'autant meilleure que le nombre de kernels est élevé, et il nous est donc apparu tout suite important de pouvoir maîtriser mieux l'étape qui les concerne dans la simulation des OPC, en matière de calcul, d'approximation et de choix de leur nombre, pour être en mesure d'augmenter la vitesse de calcul tout en étant sûr de bien maîtriser tous les paramètres physique et de ne pas perdre en précision.

Très rapidement l'objectif que nous nous étions fixé nous a conduit à faire appel à des techniques issues du traitement du signal, et je me suis donc rapprochée de l'équipe GSM (Groupe Signaux Multidimensionnel) de l'Institut Fresnel pour mettre en place une collaboration sur ce thème. En effet, cette équipe est la plus spécialisée de notre laboratoire dans les méthodes dites à sous espaces adaptées à la recherche en traitement d'antenne et en sismique essentiellement pour la séparation d'ondes et pour débruitage en traitement d'images. Comme évoqué plus haut, les premiers travaux publiés en modélisation et simulation de masques avancés par N. Cobb se basent d'une façon très empirique sur la troncature d'un tableau (matrice) contenant les valeurs des coefficients de transfert obtenus par discrétisation de la fonction de transfert du système optique. Cela nous a encouragé à chercher à étendre les méthodes du traitement d'antenne au problème de la photolithographie afin d'améliorer l'approximation.

II-2-3 Des méthodes à sous espaces (traitement d'antenne) à la modélisation tensorielle :

Mes activités de recherche sur les méthodes algébriques ont donc débuté en 2006 en collaboration avec l'équipe GSM, notamment dans le cadre de la thèse de Romuald Sabatier que je co-encadre avec S. Bourennane (responsable de cette équipe) où il s'agit de modéliser et d'optimiser la technique de correction par OPC des masques de photolithographie.

Afin d'appréhender les méthodes dites à sous espace ou algébriques, dans un premier temps mes travaux au sein de l'équipe GSM se sont limités à l'analyse matricielle, estimation de nombres de composantes dominantes, détermination de la dimension du sous espace signal et application à la localisation de sources. (travaux de J. Marot, Z. Saidi)

Il s'agit de travaux qui relèvent du domaine du traitement d'antenne, pour lesquels j'ai contribué au perfectionnement de méthodes connues et au développement de techniques nouvelles, au perfectionnement et la remise en cause des hypothèses classiques, sur lesquelles reposent les méthodes existantes [19].

Les différents travaux recherche que j'ai effectués avec l'équipe GSM ont été réalisés avec la chronologie suivante :

a) Etude des méthodes de traitement d'antenne

Les traitements des signaux à large bande de fréquence sont initialement réalisés par une simple sommation incohérente des résultats individuels à chaque fréquence. Cette méthode très naturelle présente plusieurs inconvénients [20] :

- 1) elle estime les paramètres pour chaque canal de fréquence traité, et par conséquent elle est lourde en calcul numérique,
- 2) les paramètres sont estimés séparément à chaque fréquence en négligeant le fait que ces signaux puissent être produits par les mêmes sources,
- 3) elle est sensible aux fluctuations du rapport signal sur bruit en fonction de la fréquence. En effet, si la répartition de l'énergie du signal émis varie en fonction de la fréquence et si de plus, les perturbations dues au milieu affectent les fréquences de façons différentes, les performances des méthodes d'estimation dépendent du rapport signal bruit. Par conséquent, les estimations des paramètres des signaux aux différentes fréquences d'analyse sont biaisées différemment et le problème de choix est entièrement posé.

En ce sens, la méthode de la sommation incohérente ne réalise pas un véritable traitement à large bande, intégrant au mieux les informations provenant des différentes fréquences disponibles pour effectuer les traitements.

Nos travaux en collaboration avec le CRAN à Nancy, consacrés à ce sujet, portent sur la recherche d'une réponse à la question essentielle posée par l'extension des méthodes de traitement du signal bande étroite au cas de signaux large bande. Peut-on estimer les paramètres des signaux à large bande à partir d'une fréquence unique résumant la totalité des informations provenant des différentes fréquences d'analyse ?

L'effort a été alors concentré sur la manière de fusionner toutes les informations disponibles dans la bande de fréquences utiles. Le concept de focalisation a été retenu, compte tenu des nombreux travaux antérieurs qui ont montré la supériorité de ces méthodes sur les méthodes incohérentes. Nous avons cherché à développer de nouvelles méthodes pour lever cette dépendance. Notre solution est présentée dans [20], en collaboration avec le laboratoire LMA de Marseille qui nous a fourni les données traitées. Le nouvel opérateur de focalisation proposé est une matrice unitaire permettant de conserver la propriété du bruit blanc après focalisation et n'exige aucune géométrie particulière de l'antenne contrairement aux autres opérateurs. Un tel opérateur unitaire se construit en tant que matrice de passage d'une base orthonormée, engendrée par les vecteurs propres de la matrice spectrale, du sous- espace signal à une fréquence de la bande d'analyse vers une base orthonormée du sous-espace signal à la fréquence de focalisation. Pour étudier les performances des différents opérateurs, nous avons traité des signaux réels enregistrés lors de deux campagnes de mesures.

D'un point de vue numérique, l'opérateur que nous avons proposé est assez coûteux. Dans nos récents travaux [10], nous avons proposé d'autres solutions avec les mêmes performances que les précédents opérateurs mais avec une réduction du temps de calcul ; ce qui facilite leur implémentation en temps réel.

Ma recherche liée à la réduction du temps de calcul a abouti, récemment, au développement de méthodes d'estimation sans décomposition en éléments propres. En effet, le calcul des éléments propres a été longtemps considéré comme prohibitif en raison de son coût de calcul élevé, il est de l'ordre de N^3 opérations pour une matrice $N \times N$. Dans [11], nous avons adapté l'algorithme point fixe, propogateur et factorisations LU et QR au calcul des vecteurs nécessaires pour décrire totalement le sous espace utile (signal). Nous avons montré que les performances des algorithmes sont identiques et nous avons un gain en temps de calcul qui est d'un facteur 100. si ce gain ne présente pas peut être une importance très significative en traitement d'antenne , il est primordial

dans l'application qui intéresse le domaine de la microélectronique, nous reviendrons sur ce point dans les paragraphes suivants.

b) Rapprochement avec la photolithographie optique

Après cette phase d'adaptation qui m'a essentiellement permis de maîtriser des outils algébriques dits matriciels, j'ai vu comment adapter très rapidement ces méthodes au problème de la lithographie.

En effet, les conclusions de nos différents travaux, le rapprochement de notre problématique avec les travaux menés dans l'équipe GSM sur les images hyper spectrales, signaux sismiques multi composantes, images médicales, imagerie couleur et les nombreuses conclusions faites sur l'intérêt de la modélisation tensorielle par rapport à une solution particulière « matricielle », nous permettent non seulement de clarifier et de justifier certaines méthodes et logiciels utilisés en microélectronique sans qu'il y ait eu une réelle explication ou démonstration scientifique permettant de choisir la solution optimale, mais aussi d'émettre quelques remarques quand aux principes utilisés dans Calibre :

1) Dans cette méthode, une discrétisation des équations de Hopkins a été réalisée moyennant une hypothèse de périodicité. Puis on représente sous forme matricielle l'ensemble des coefficients TCC (transfert cross coefficient) qui a priori dépendent de 4 paramètres (fonction de transfert entre la source et le wafer) donc caractérisés par 4 indices. Un modèle prenant en compte la totalité de l'information symbolisant parfaitement le système utilisé en pratique pour graver des formes quelconques serait donc un tableau à quatre dimensions (quatre indices) que la communauté du traitement du signal dénommé tenseur d'ordre 4. Il est donc clair que la solution existante n'est pas optimale dans les cas réels.

2) Un autre inconvénient est que la décomposition (SVD) en éléments singuliers de la matrice construite avec les coefficients TCC qui est de très grandes dimensions, conduit à des temps de calcul très importants, donc très contraignants dans la pratique.

3) La détermination du nombre de kernels à utiliser se fait de façon empirique

Depuis cette année des collaborations sont établies avec les fournisseurs de logiciels de simulations et les utilisateurs afin que puissent être mis en application nos récents travaux qui démontrent que certaines solutions obtenues d'une façon empirique sont des cas particuliers d'une famille de solutions possibles et surtout que certains paramètres qui sont choisis par tâtonnement sont aujourd'hui clairement modélisés et donc extraits directement des données en définissant des critères d'optimisation sans que l'utilisateur soit amené à faire de nombreux essais qui sont très coûteux en temps de calcul et en matériels mobilisés.

Ainsi depuis avril 2007 j'ai travaillé essentiellement sur le rapprochement du traitement du signal tensoriel [11] au problème de la simulation et modélisation basées sur la troncature à un ordre déterminé par avance (ordre de grandeur 10) pour la gravure des masques avancés.

II-2- 4- Adaptation du traitement du signal tensoriel à la simulation de modèles OPC

Avant d'aborder la thématique concernant la photolithographie en microélectronique en utilisant des modèles tensoriels. Je rappelle ci-dessous quelques notions de base qui m'ont permis d'adapter les algorithmes de simulations « tensorielles » développés au cours de ces dernières années au sein de l'équipe GSM

Un **tenseur** peut être défini comme un tableau à plusieurs entrées, c'est-à-dire la généralisation des matrices : tout élément d'une matrice est repéré par deux indices (i,j) , dans le cas d'un tenseur, chaque élément du tenseur est repéré par plusieurs indices $(i,j,k,l, etc...)$.

Chaque dimension du tenseur est appelée « n -mode » en référence au n ième indice du tenseur

Comme exemples les plus courants de **signaux multidimensionnels et multicomposantes**, nous pouvons citer : les images en couleurs qui sont modélisés par des tenseurs d'ordre 3 (Figure 42), dans lequel un mode du tenseur (i.e. une direction du tableau) est associé aux lignes, un mode aux colonnes et un mode au canal de couleur (Rouge, Vert, Bleu).

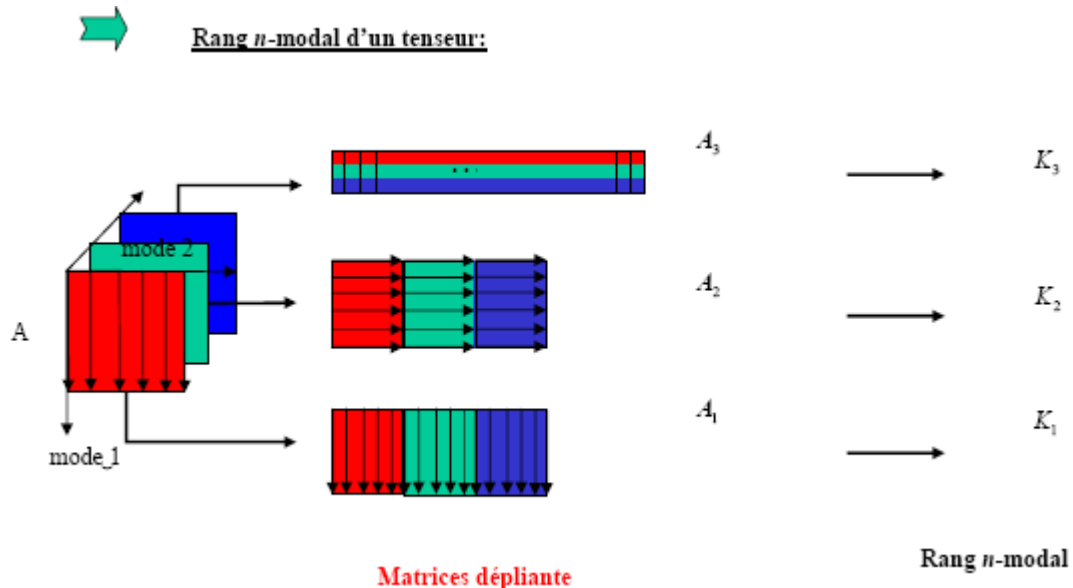


Figure 42 : Décomposition n-modale d'un tenseur d'ordre 3

Le modèle de TUCKER3^{44 45} a été initialement élaboré pour effectuer une décomposition en valeurs singulières sur tous les modes du tenseur indépendamment les uns des autres. Cette décomposition est désignée sous le terme HOSVD⁴⁶ (High Order Singular Value Décomposition). La troncature de la HOSVD revient à ne conserver que les K_n premiers vecteurs singuliers associés aux K_n valeurs singulières de la matrice dépliantes selon le mode n . Mais, ce modèle est aussi à l'origine de la solution d'approximation en rang- (K_1, \dots, K_N) inférieur d'un tenseur d'ordre N , notée LRTA- (K_1, \dots, K_N) ⁴⁷. La détermination de l'approximation LRTA- (K_1, \dots, K_N) est un problème d'optimisation non-linéaire qui nécessite un processus numérique des moindres carrés alternatifs (ALS) pour être résolu.

Sans rentrer dans les détails de l'algorithme précisé dans [22] donnée en annexe 4, pour déterminer le projecteur n -modal, l'idée principale qu'il faut retenir est que :

- le tenseur est déployé suivant chaque mode (comme dans la figure 42),
- la Décomposition en éléments singuliers de la matrice dépliantes A_n dans le mode n est effectuée,
- le projecteur n -modal est obtenu à partir des K_n vecteurs singuliers associés aux K_n valeurs singulières dominantes de la matrice A_n .

⁴⁴ L. TUCKER, The extension of factor analysis to three-dimensional matrices, (pp. 109–127), Holt, Rinehart and Winston, NY, 1964.

⁴⁵ L. TUCKER, Some mathematical notes on three-mode factor analysis, Psychometrika, vol. 31, pp. 279–311, 1966.

⁴⁶ L. DE LATHAUWER, B. DE MOOR et J. VANDEWALLE, A multilinear singular value decomposition, SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, vol. 21, pp. 1253–1278, Avril 2000.

⁴⁷ L. DE LATHAUWER, B. DE MOOR et J. VANDEWALLE, On the best rank- (r_1, \dots, r_N) approximation of higher-order tensors, SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, vol. 21, pp. 1324–42, Avril 2000.

Dans l'algorithme proposé par Cobb, les coefficients TCC (qui en toute rigueur devraient être représentés par un tableau à 4 dimensions ou tenseur d'ordre 4) sont déployés selon le mode 1 puis traités par des méthodes matricielles, au risque d'une perte d'information (figure 43)

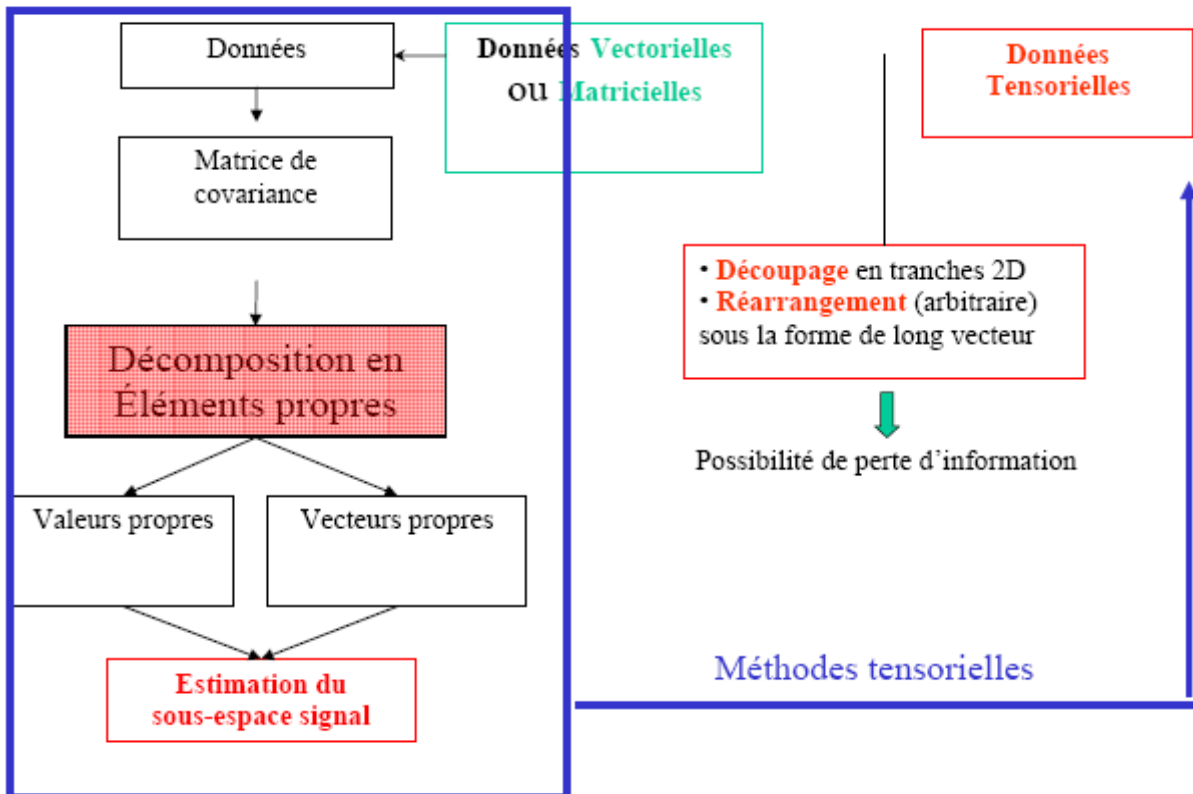


Figure 43 : Principe de l'Algorithme proposé par N.Cobb (th. De doct. Berkeley 1998) Actuellement utilisé dans les principaux logiciels industriels de simulation d'OPC.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, c'est au niveau du calcul et du choix des kernels que nous pouvons apporter une amélioration aux méthodes actuelles.

Le déploiement sous forme d'une matrice du tableau des coefficients TCC à 4 dimensions entraîne forcément une perte d'information sur les données physiques réelles du problème, le choix du nombre de kernels à prendre en compte est empirique, et la méthode utilisée pour les calculer (SVD) est très consommatrice de temps de calcul.

Nous proposons donc dans les références [12] et [22] (données en annexe 4), d'adopter une modélisation tensorielle des coefficients de transmission croisée du système optique (TCC) pour traiter toutes les données dans leur ensemble.

L'estimation des kernels est alors réalisée, à partir de coefficients TCC regroupés dans un tenseur d'ordre 4, par l'algorithme HOSVD (Higher Order Singular Value Décomposition), ce qui permet de considérer le problème physique dans sa globalité et de tenir compte des inter-corrélations ou complémentarités qui peuvent exister entre les différents coefficients. On n'effectue non plus une approximation de type : approximation d'une matrice au rang inférieur, mais le tenseur TCC d'ordre 4 est approximé par l'algorithme LRTA (Lower Rank Tensor Approximation)

L'approximation par la LRTA, va a priori nécessiter un temps de calcul plus important, En effet, la dimension des tenseurs est de l'ordre de 500, et de plus l'algorithme LRTA nécessite la détermination ou le choix du rang de chaque mode. Nous avons donc commencé par la recherche de solutions permettant de répondre à ces deux contraintes.

Pour l'estimation du rang, nous avons étendu les critères de détection ou d'estimation du rang de chaque mode connus en traitement d'antenne au problème d'estimation du nombre de kernels pour garantir une troncature acceptable. Les résultats obtenus sur de nombreuses simulations se sont révélés très encourageants (Figure 44).

Les deux critères proposés : AIC et MDL convergent immédiatement vers la valeur optimale du nombre de kernels à prendre en compte ce qui permet d'éviter la perte de temps de l'algorithme actuel qui consiste à tester toutes les valeurs possibles jusqu'à atteindre un seuil d'erreur fixé. Cette détermination est basée sur la minimisation d'une fonction liée aux valeurs singulières l'objectif théorique étant de ne conserver que les vecteurs singuliers associés aux valeurs singulières dominantes.

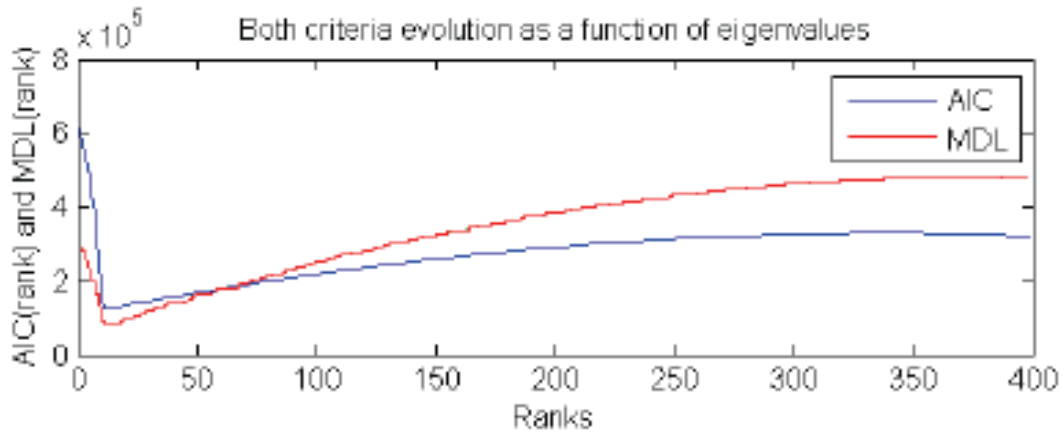


Figure 44 : Estimation du rang n-modal par AIC et MDL

Pour le problème lié à la modélisation des données sous forme d'un tenseur, qui vient du fait que le temps calcul des éléments singuliers par la méthode HOSVD multiplie au moins par 4 le temps de calcul nécessaire à la SVD dans la configuration actuelle des logiciels, nous avons d'adopter l'algorithme « point fixe » pour se limiter uniquement au calcul des vecteurs utiles.

Les résultats présentés dans la figure 45 montrent bien que cela permet un important gain en temps de calcul (figure 45-a) de l'ordre d'un facteur 100, sans pour autant perdre en précision (figure 45-b)). Ces résultats ont été obtenus à partir de données bidimensionnelles. Nous avons fait ce choix pour éviter d'éventuelles erreurs dues à une mauvaise estimation des rangs n-modaux, et pour pouvoir identifier facilement les améliorations que l'algorithme « point fixe » permet en terme de temps de calcul et évaluer la qualité d'estimation des vecteurs singuliers nécessaires.

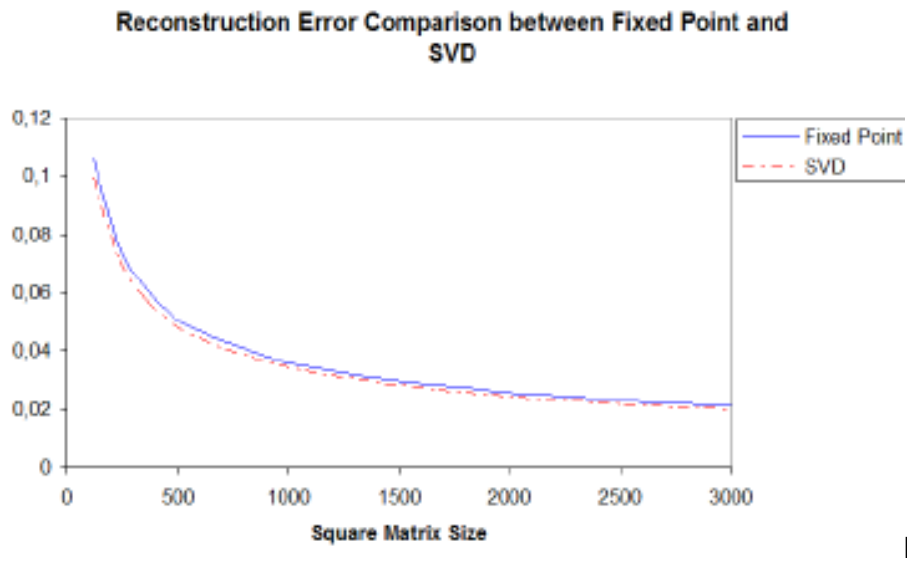
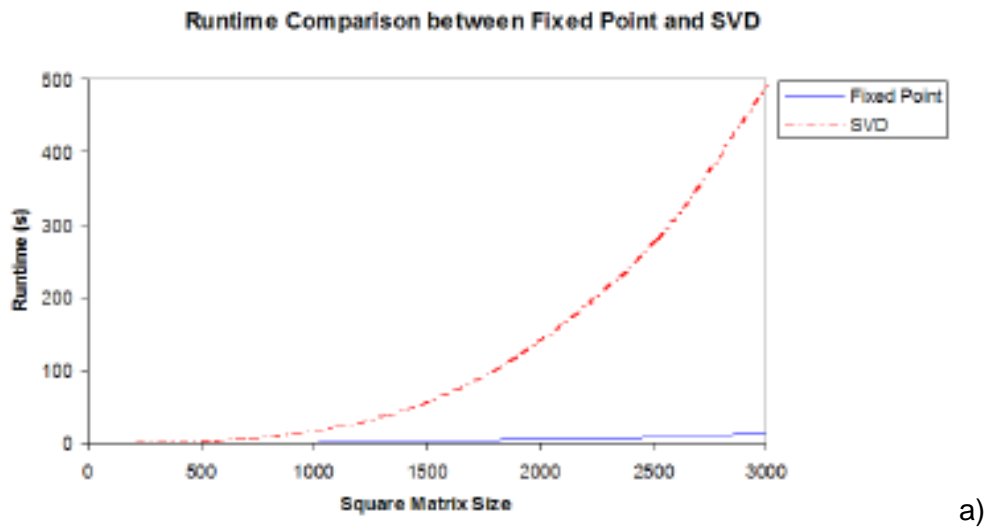


Figure 45 : Comparaison des temps de calcul (a) et erreur de troncature (b) entre Point fixe et SVD

La Figure 46, présente les résultats comparatifs des erreurs de troncature en utilisant les deux méthodes d'approximation d'un tenseur d'ordre 4 de taille variant de 10 à 450. Dans l'algorithme LRTA, nous avons remplacé la SVD par l'algorithme point fixe. On constate bien que l'erreur d'approximation avec les mêmes rangs est plus faible avec la méthode que nous proposons

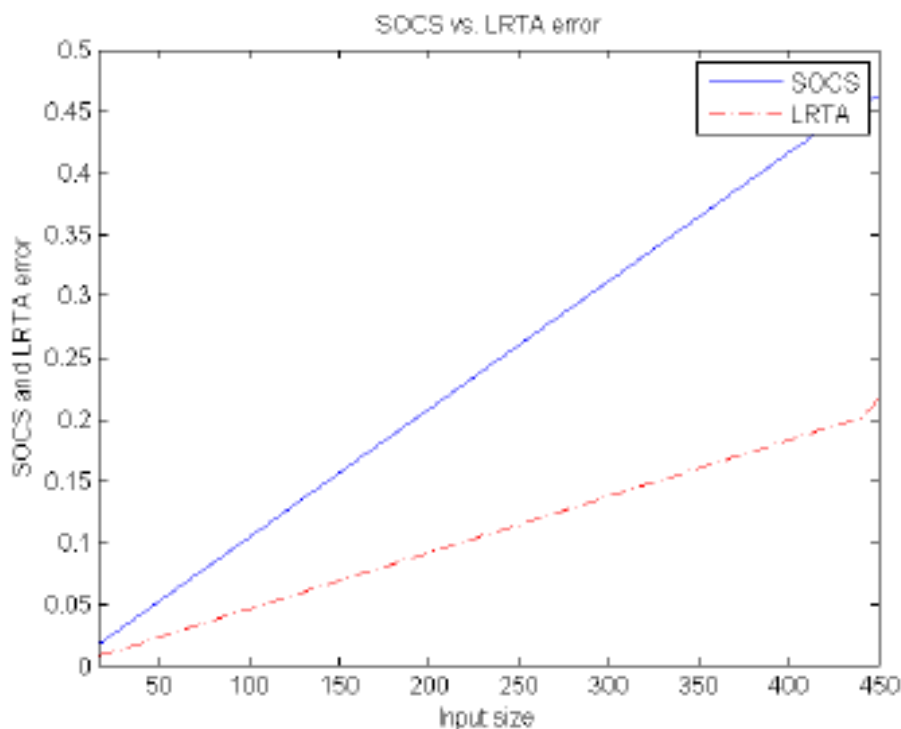


Figure 44 : Erreur d'approximation par l'algorithme classique et par la LRTA

Nous avons comparé la méthode par la méthode algébrique développée par N. Cobb, qui constitue la référence actuelle dans le domaine des logiciels d'OPC à celle que nous proposons utilisant le modèle de décomposition de Tucker ou l'algorithme LRTA et en y intégrant l'algorithme du point fixe et l'estimation du nombre optimal de kernels par mode. Les différents résultats obtenus ont montré une fois de plus l'intérêt déjà prouvé (traitement d'images, imagerie hyperspectrale, sismique, télécoms,...) d'une modélisation des données multidimensionnelles par un tenseur, et du développement des algorithmes de traitement du signal ou d'antenne basés sur de l'algèbre multilinéaire.

D'autres améliorations peuvent être envisagées en faisant appel à d'autres décompositions, en particulier PARAFAC déjà utilisée en télécoms et en TS pour le débruitage. Cette décomposition pourrait nous permettre de considérer une nouvelle discrétisation des équations de Hopkins à l'origine de l'obtention des valeurs du tableau à 4 dimensions que nous avons dénommé par analogie au traitement du signal : tenseur d'ordre 4.

Cette nouvelle décomposition intégrera les principaux résultats obtenus en TS^{48 49 50 51}

⁴⁸ N. Sidiropoulos, G. Giannakis and R. Bro, "Blind PARAFAC receivers for DS-CDMA systems", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 48, no. 3, pp. 810–823, 2000.

⁴⁹ J. Ten Berge and N. Sidiropoulos, "On the uniqueness in CANDECOMP/PARAFAC", Psychometrika, vol. 67, pp. 399–409, 2002.

⁵⁰ S. Rhioui, « Nouvelles approches pour la séparation de sources », Thèse de doctorat, Université Toulon-Var, Toulon, France, 2007

⁵¹ Castella, M.; Rhioui, S.; Moreau, E.; Pesquet, J.-C. "Quadratic Higher Order Criteria for Iterative Blind Separation of a MIMO Convolutional Mixture of Sources", IEEE Transactions on Signal Processing Vol. 55, Issue 1, pp.218 – 232, 2007

ANNEXE 4 :

PRINCIPALES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LES MASQUES AVANCES

A4-1 : référence [12]

R. Sabatier, **C. Fossati**, S. Bourennane and A. Di Giacomo "Fast approximation of Transfer Cross Coefficients for OPC", **Optics Express**, Vol. 16 Issue 19, 15249-53 (2008)

A4-2 : référence [22]

R. Sabatier, **C. Fossati**, S. Bourennane and A. Di Giacomo "An efficient method for TCC approximation in Model based OPC" **Proc. of SPIE : Photomask Technologie** Monterey USA oct. 2008

A4-3 : référence [10]

S. Bourennane, **C. Fossati**, J. Marot, "About noneigenvector source localization methods", **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing** Volume 2008 (2008), Article ID 480835, 13 pages doi:10.1155/2008/480835

A4-4 : référence [11]

J. Marot, **C. Fossati** & S. Bourennane , "About advances in tensor data denoising methods" , **EURASIP Journal on advances in Signal Processing**. Volume 2008 (2008), Article ID 235357, 12 pages doi:10.1155/2008/235357

PARTIE III :

CONCLUSIONS ET PROJET DE RECHERCHE

Mon objectif pour l'avenir est de ***continuer à développer l'activité que j'ai mise en place dans les domaines de l'optique et du traitement du signal appliqués à la microélectronique, et d'établir une synergie entre les différents thèmes.*** En Particulier en abordant l'étude de nouveaux types de capteurs, pour de nouvelles applications dans les domaines de la sécurité et de la santé, telle que l'imagerie médicale hyper spectrale par exemple.

Conclusions

Je présenterai dans cette conclusion une synthèse des travaux de recherche que j'ai pu mener tout au long de ma carrière, en collaboration avec les membres de différentes équipes de recherche (DSO – Tecsen / MAP2 et GSM – Institut Fresnel), de nombreux doctorants co-encadrés (Annelise DURING, Flavien HIRIGOYEN, Emilien ROBERT, Marie-Sophie COSTES, Guillaume DEMESY, Romuald SABATIER), post doctorants (Olivier GAGLIANO, Emilien ETIENNE) et ingénieurs stagiaires, sans oublier le soutien concret d'industriels intéressés par ces travaux (Photowatt, ST Microelectronics, Mentor Graphics, Shaktiware....).

La contribution de chacun a été fondamentale pour chaque étude faite, et solution proposée.

Caractérisation optique de composants

Pour répondre à un besoin du secteur photovoltaïque de localisation et caractérisation de défauts dans le silicium poly cristallin utilisé pour la fabrication de photopiles terrestres, j'ai développé pendant ma thèse (dans l'équipe DSO) un **Microscope Infrarouge à Balayage**.

L'originalité de cette technique réside en deux points :

- Elle permet de faire une tomographie du matériau étudié, donc de localiser précisément en 3D un défaut observé (résolution de l'ordre du micromètre)
- Elle est non destructive (sonde optique), sans contact et repositionnable, ce qui permet de suivre l'évolution d'un défaut détecté au cours de différents traitements appliqués au matériau (thermique, contamination, passivation...) similaires à ceux que l'on peut retrouver dans le process de fabrication des composants.

L'analyse conjointe des résultats fournis par cet appareillage, et de ceux fournis par des techniques conventionnelles (FTIR : Transformée de Fourier Infrarouge, LBIC : Light Beam Induced Current, DLTS : Deep Level Transient Spectroscopy) a permis de mettre en évidence la présence de sites de nucléation pour la précipitation d'oxygène, et le rôle prépondérant des défauts étendus associés dans la détérioration des propriétés électriques du matériau [4]. La présence d'oxygène dans le matériau n'est donc pas le point critique en lui-même, mais il faut bien maîtriser la position des sites de nucléation et la façon dont les différentes étapes de process peuvent activer cette précipitation et/ou conduire à une contamination métallique des dislocations associées.

Ce type de microscope très utile pour le poly silicium qui par essence contient beaucoup de défauts et d'oxygène, présente aussi un intérêt pour un monocristal, a priori plus pur, dès lors que la taille des composants réalisés devient de plus en plus réduite et que le moindre défaut étendu peut endommager l'un d'entre eux.

A mon arrivée à l'Institut Fresnel, le savoir faire acquis en matière de banc de caractérisation optique de micro défauts m'a permis d'étudier et de réaliser un **microscope photo thermique** de haute précision pour la caractérisation de défauts absorbants ou diffusants de taille sub-micronique dans les couches minces optiques.

Ces travaux développés pendant la thèse d'Annelise During [8], se situaient dans le cadre plus large des études de l'équipe MAP2 en terme d'endommagement laser des composants optiques appelés à avoir une forte tenue au flux (collaboration avec le CEA –Laser Megajoule). L'idée étant de faire le lien entre le caractère absorbant des défauts et leur rôle comme précurseurs de l'endommagement laser, nous avons étendu cette technique à un appareillage original et performant qui par couplage avec un banc d'endommagement laser, permet à la fois d'établir des cartographies précises (résolution spatiale latérale de l'ordre de 100nm) d'absorption et de diffusion à plusieurs longueurs d'onde [6], mais aussi de suivre in situ l'évolution des nano-défauts identifiés comme centres précurseurs.

Les capacités de cet appareillage ont été validées sur des échantillons test contenant des défauts submicroniques identifiés dont nous avons disposé dans le cadre de collaboration avec le CEA/DAM et LETI [7]. Il a déjà permis de confirmer la forte dépendance de l'absorption avec la longueur d'onde, et le phénomène de pré endommagement laser.

Optique pour la microélectronique

Depuis mon arrivée à l'institut Fresnel, je me suis aussi intéressée à des sujets pluridisciplinaires s'appuyant sur mes compétences en optique et en microélectronique.

Les **capteurs d'image** sont présents dans un nombre croissant d'objets de la vie courante. Dans ce domaine, la technologie CMOS concurrence de plus en plus les capteurs CCD grâce à ses avantages de coût, d'adressage et d'adaptabilité à des applications précises, mais elle présente encore deux points faibles majeurs : un bruit plus élevé, et une moins bonne sensibilité sous faible éclairage.

De nombreuses recherches visent déjà à améliorer les performances de ces capteurs en considérant les aspects électroniques. C'est sur les aspects optiques du capteur que j'ai choisi d'orienter mes recherches pour augmenter cette sensibilité.

Pour résoudre les problèmes de qualité d'image rencontrés dans les micromodules d'appareil photo des téléphones mobiles, nous avons étudié le problème du cheminement optique de la lumière dans l'empilement de couches diélectriques et métalliques d'un pixel en fonction de la géométrie de ce dernier et de ses conditions d'éclairage (centre ou bord de la matrice).

Pour les pixels de « grande taille » (3-4 μm) nous avons mis en place (travaux auxquels ont participé Flavien Hirigoyen, Olivier Gagliano) une méthodologie de modélisation par tracé de rayons (ZEMAX), et des bancs de caractérisation électro-optiques. Leur utilisation pour l'étude de l'influence de différents paramètres (simulations validées par des mesures sur produit) tels que : la répartition et la forme des microlentilles, l'épaisseur d'empilement, le design des lignes de métaux...nous a permis de proposer des solutions concrètes permettant d'optimiser les pixels existants et certaines sont déjà adoptées en production par nos partenaires industriels.

Conscients qu'à cette échelle une modélisation rigoureuse du système optique ne peut pas se limiter au du tracé de rayons mais devrait prendre en compte le comportement du champ électromagnétique dans la totalité de la structure, nous nous sommes attachés à montrer dans quelle mesure cette première approximation pouvait être valable, et à définir un critère au delà duquel le changement de système de modélisation serait indispensable. Les travaux de post doc d'Emilien Etienne ont montré que pour des tailles de pixel inférieures à 2 μm , les effets de la diffraction dans le pixel, l'influence de la structure en réseau des pixels deviennent prépondérants, la microlentille ne joue quasiment plus son rôle de focalisation, et de nouvelles solutions doivent donc être envisagées, d'où notre orientation vers l'utilisation d'une autre méthode de modélisation, résolvant les équations de Maxwell.

Au cours de la thèse de Guillaume Demesy, nous avons donc développé sous COMSOL une nouvelle formulation de la méthode des éléments finis [9]. Elle a été validée sur le plan numérique par confrontation avec des résultats obtenus par d'autres méthodes dans la littérature. Elle permet d'étudier le comportement du champ lumineux dans différents types de réseaux anisotropes déposés sur des substrats isotropes sans aucune contrainte sur la géométrie de la forme diffractante, et peut donc très facilement être adaptée au cas des imageurs [18]. On trouve dans la littérature de nombreux exemples théoriques de filtrage coloré par réseau de diffraction, sans pour autant qu'ils aient été appliqués au cas réels des imageurs (incompatibilité avec le process). Nous avons donc choisi d'étudier le comportement du pixel dans le cas où le filtrage coloré actuel est remplacé par un réseau diffractant embarqué dans une des lignes d'interconnexion métallique. Les résultats prévus par nos simulations sont là aussi en accord avec les mesures faites sur les premières structures de test réalisées pour nous par ST Microelectronics.

Nous avons donc proposé des solutions d'optique diffractive qui à terme vont permettre aux capteurs CMOS d'évoluer en taille sans perdre leur qualité d'image, voire même en l'améliorant.

Dans cette dynamique, je me suis intéressée à la **photolithographie optique** qui doit elle aussi s'adapter à la diminution de taille des composants donc à l'évolution de la finesse de gravure.

Une des réponses apportées par l'industrie est l'utilisation de corrections optiques de proximité (OPC) sur les masques pour permettre d'anticiper les déformations de l'image, au niveau du Si. Ces déformations sont dues au phénomène de diffraction de la lumière par les dessins du masque dès lors que leur taille devient du même ordre de grandeur que la longueur d'onde d'éclairement. Compte tenu de l'enjeu économique que cela représente, la définition du choix d'un modèle de correction par une boucle OPC passe par de nombreuses et importantes étapes de simulation avant d'être mise en application. Ma première démarche a été de bien maîtriser le principe des méthodes existantes dans les logiciels d'OPC actuels, pour appréhender à quel niveau des améliorations peuvent être apportées. Cette étude a débuté dans le cadre de la thèse de Marie Sophie Costes [21].

La méthode actuellement utilisée par la majorité des grands industriels du secteur est celle développée par Mentor Graphics à partir des travaux de thèse de N. Cobb (Berkeley 1998). Elle se base sur des techniques d'algèbre linéaire dites « à sous espace » pour ramener le problème d'optique complet décrit par les équations d'Hopkins par discrétisation à un modèle matriciel, ce qui permet d'appliquer les méthodes d'approximation de matrice conduisant à un temps de calcul acceptable. J'ai donc fait très rapidement le lien avec les travaux menés sur ces méthodes appliquées par exemple au traitement d'antenne par les chercheurs de l'équipe GSM de l'institut Fresnel. Après avoir étudié avec eux le principe et les applications de ces méthodes, ainsi que les avantages présentés par d'autres méthodes d'algèbre multilinéaire et la modélisation tensorielle du signal, nous avons pensé pouvoir adapter ces techniques au problème de la lithographie optique, et nous avons décidé de développer cette thématique sur laquelle nous co-encadrons la thèse CIFRE de Romuald Sabatier financée par ST-Microelectronics.

Dans un premier temps, nous avons mis en évidence les étapes de l'algorithme susceptibles d'être améliorées :

- Estimation empirique du nombre de vecteurs propres (dimensions du sous espace)
- Modélisation matricielle des valeurs des coefficients de transfert croisés (TCC) du système optique, obtenues par discrétisation des équations d'Hopkins. Ce serait plutôt par construction d'un tableau à 4 dimensions (tenseur d'ordre 4)
- Temps de calcul important

En choisissant une modélisation tensorielle des coefficients TCC, nous sommes sûrs de bien prendre en compte tous les paramètres physiques du problème et leurs éventuelles interactions. Pour remédier à la charge de calcul inhérente à cette modélisation, nous avons proposé des critères de décomposition en éléments propres et de sélection des principaux kernels (vecteurs propres) avec comme résultat une erreur plus faible sur l'approximation des TCC et des temps de calcul améliorés jusqu'à un facteur 100.

Les premiers résultats sont très prometteurs et encourageants. Leur publication [12, 22], a initié de nouveaux contacts, notamment avec Mentor Graphics qui pourrait envisager l'intégration de nos techniques dans leur système.

Bilan Global :

**6 thèses co-encadrés / 36 publications dont 12 RICL / 1 brevet
Implication dans 6 contrats de recherche dont 3 pluriannuels (total >2 000 k€)**

Microscopie Infrarouge à Balayage

	Type/ Collaborateurs	Nom / thème	Montant	Période
Contrats :	Prgr. Européen JOULE / Instituto de Energia Solar (Madrid) Pr Luque	Proj. SICOCELLS Caractérisation de Si pour le potovoltaïque	/	1996
Publications :	Type	Nombre	Période	
	RICL	5	1995 -1998	
	Proceeding / Conf.	8	1994-1997	

Microscopie Photothermique

	Type/ Collaborateurs	Nom / thème	Montant	Période
Contrats :	CEA Valrho	Projet SILVA : vieillessement composants optiques	/	1999-2000
	CEA CESTA	Corrélation défaut locaux endom. laser	30 000 €	2001
Thèses co-encadrées :	Type	Taux	Période	
	CNRS -Région	50%	Sept. 1999 – Dec. 2002	
Publications :	Type	Nombre	Période	
	RICL	3	2002-2004	
	Proceeding / Conf.	8	2000-2003	

Imageurs CMOS

	Type/ Collaborateurs	Nom / thème	Montant	Période
Contrats :	Convention STSI	Modélisation et carac. optique de capteurs couleur CMOS	60 000 €	2001
			220 254 €	2002
	Convention : CG des BDR CR PACA ST Microelectronics	Convention cadre «Rousset 2008» Capteurs d'images CMOS : optimisation du traitement optique	314 000€	2003-2004
			79 000€	2004-2005
			145 000€	2006-2007
			168 800 €	2007-2008
			90 000 €	2008-2009
Thèses co-encadrées :	Type	Taux	Période	
	CIFRE / ST Crolles	50%	Sept. 2002 – Nov. 2005	
	CIFRE / ST Rousset	50%	Mars 2006 - - -	
Publications :	Type	Nombre	Période	
	RICL	1	2007	
	Proceeding / Conf.	3	2004 -2008	
	Brevet	1	2005	

Masques Avancés

	Type/ Collaborateurs	Nom / thème	Montant	Période
Contrats :	Convention : CG des BDR CR PACA ST Microelectronics	Convention cadre «Rousset2008» Mise en œuvre de techniques OPC	55 000€	2003-2004
			305 000€	2004-2005
			340 000€	2006-2007
			251 200€	2007-2008
			50 000€	2008-2009
Thèses co-encadrées :	Type	Taux	Période	
	CIFRE / ST Crolles	30%	Sept. 2002 – Nov. 2005	
	CIFRE / ST Rousset	50%	Mars 2004- mars 2006	
	CIFRE / ST Rousset	50%	Mars 2007 - - -	
Publications :	Type	Nombre	Période	
	RICL	3	2007-2008	
	Proceeding / Conf.	4	2005-2008	

Le secteur de la microélectronique est un secteur clef en pleine mutation. Il contribue à générer 10% du PIB mondial. Cela provient notamment du fait que la microélectronique s'est répandue dans tous les secteurs d'activité et qu'elle constitue un vecteur déterminant de l'innovation. C'est un secteur dans lequel se dessinent de nombreuses perspectives scientifiques prometteuses malgré les défis technologiques à relever. Depuis 2003 avec le passage à la technologie 90nm on est arrivé dans la poursuite de la miniaturisation au « More than Moore » en basculant dans la nanoélectronique et dans la systématisation de l'intégration de plusieurs fonctions sur une même puce.

L'ajout de fonctions non digitales (radio fréquence, composants de haute tension, éclairage, batteries....) joue un rôle décisif dans la diffusion de *la microélectronique qui devrait contribuer à surmonter des grands défis sociaux*⁵² comme :

- en terme de **santé** par exemple, le coût du vieillissement de la population. L'utilisation de technologies nouvelles telles que les micro capteurs (une unité de captage des grandeurs physiques qui les transforme en grandeurs numériques, une unité de traitement informatique et de stockage de données et un module de transmission sans fil (wireless)) peut permettre la prévention précoce des maladies par l'utilisation de méthodes de diagnostic et de traitement rapides, maniables et peu invasives (dermatologie, endoscopie..)
- en terme de renforcement de la **sécurité** des biens et des personnes. Que ce soit pour le contrôle d'identité où la surveillance, jamais les techniques de biométrie n'ont connu un essor tel qu'à l'heure actuelle⁵³ . Les puces électroniques réalisées à cet effet stockent les données et utilisent des algorithmes de traitement et de cryptage de l'information et de plus en plus efficaces. On les retrouve de la cantine scolaire à la carte de paiement, en passant par le passeport biométrique ou les puces RFID.
- en terme de consommation d'**énergie**. Une importante recherche est effectuée sur les batteries, les modes d'éclairage et les composants faible consommation. La consommation est effectivement actuellement une contrainte critique des applications de traitement du signal et de l'image (TSI) dans les systèmes embarqués (systèmes de sécurité, implants médicaux...)

Ce secteur est au final responsable de 90% des innovations réalisées sur des marchés aussi porteurs que l'automobile, la logistique, l'énergie, la santé...

Mes projets s'inscrivent donc dans le contexte de ces domaines en plein essor.

✓ Dans les perspectives immédiates, nous envisageons de développer davantage la simulation basée sur la modélisation multidimensionnelle ou tensorielle pour optimiser les corrections OPC et permettre à la photolithographie optique de s'adapter encore mieux à la réduction de taille des composants.

Au-delà même de l'amélioration des méthodes de simulation actuelles nous envisageons une modélisation plus globale qui cherchera à déterminer la solution ou corrections OPC de tous les contours du masque. Ceci sera d'autant indispensable que les masques seraient amenés à être de plus en plus de tailles très faibles (conséquence de l'ultra-miniaturisation). Pour cela Nous pensons ouvrir de nouvelles pistes considérant l'ensemble des niveaux (influence d'un niveau de correction sur le suivant) et l'ensemble du masque. Chaque élément de correction a forcément une influence sur l'élément voisin à plus ou moins courte distance (nous avons constaté dans ce sens

⁵² Claude Saunier, Assemblée Nationale, Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Rapport juin 2008

⁵³ Philippe Testard- Vaillant , le journal du CNRS, octobre 2008

l'importance du choix du diamètre optique dans les logiciels de simulation actuels). A ce jour, les corrections sont apportées à l'image aérienne secteur par secteur (diamètre optique) pour chaque segment local en utilisant des fonctions masque prises contour par contour. Il faut envisager d'étudier le problème d'une façon globale, en considérant la totalité de l'image. Une telle simulation « dense » permettrait d'obtenir une meilleure projection du masque sur le wafer quelle que soit la taille du composant et un gain de temps de calcul.

✓ D'autre part, comme évoqué dans ce document, la diminution de taille des pixels dans les capteurs d'image en technologies CMOS va entraîner un effet de plus en plus important de la diffraction de la lumière à l'intérieur du pixel. Nous avons montré qu'une réduction de la hauteur d'empilement peut dans un premier temps permettre de conserver une focalisation correcte sur les surfaces photosensible, et les premiers filtres diffractifs en 2D, intégrés dans les lignes d'interconnexions métalliques que nous avons proposées (permettant ainsi de supprimer dans l'empilement l'épaisseur des couches de résines colorées) ont donné des résultats prometteurs et encourageants. L'évolution de notre modèle nous permettra de prendre en compte l'effet de pixellisation dans la matrice des capteurs. Son utilisation pour la simulation de différentes formes de filtres en 3D (échiquier, plots cylindriques, coaxiaux, réseaux de trous...) nous permettra aussi de proposer des filtres avec des gabarits plus précis et donc une meilleure restitution des couleurs. Il s'agit là d'un réel changement de technologie du point de vue de la fabrication de ces composants, la gravure métal devra de plus s'adapter à la finesse des réseaux diffractifs proposés. Le développement de cet outil de simulation devrait aussi permettre d'envisager d'autres possibilités concernant le filtrage infrarouge, et d'autres alternatives à la microlentille, comme du guidage d'onde par exemple au travers des interconnexions verticales du circuit intégré.

Les nombreuses perspectives restantes justifient la poursuite de ces travaux, et nous font prévoir le recrutement d'un nouveau thésard, bourse CIFRE, sur cette thématique pour la rentrée 2009.

✓ Une collaboration très forte avec ST Microelectronics a été établie au niveau des capteurs d'image CMOS, à la fois sur l'amélioration du capteur lui-même, mais aussi sur son utilisation dans des microsystèmes complets et autonomes notamment pour des applications médicales d'aide au diagnostic en particulier dans le domaine de la dermatologie.

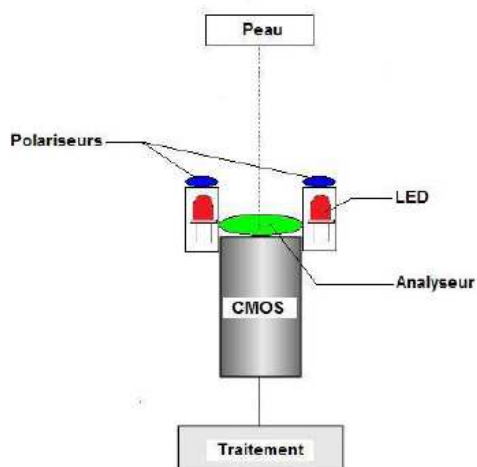
Le cancer de la peau est le plus fréquent de tous les cancers. A lui seul, le mélanome touche chaque année 5000 personnes et son incidence croît de 10% par an. De la précocité de la détection de la maladie dépend irrévocablement la santé du patient : un diagnostic trop tardif peut conduire à une issue fatale. Afin de réduire le nombre de personnes développant la maladie et de diminuer la gravité des affections au niveau des patients déjà atteints, le milieu médical se tourne de plus en plus vers la prévention destinée au grand public.

C'est dans cette dynamique que nous nous sommes intéressés au développement d'un détecteur de cancer de la peau à usage grand public, simple, et d'utilisation rapide.

Il existe (ci contre), un premier modèle sur le marché fourni par le groupe américain 3GEN, mais son usage n'est pas généralisé à tous les dermatologues et encore moins au grand public.

Le but que nous visons est un appareillage d'utilisation très simple, autonome, très bas coût et de la taille d'un stylo.





Ce projet est doré et déjà engagé avec ST Microelectronics et des médecins du CHU de Nice. Une génération de capteurs CMOS a été optimisée par ST pour cette problématique, des algorithmes de traitement d'image ont été adaptés et optimisés pour cette application.

Nous avons mis en place un prototype (schéma ci contre) , visant dans un premier temps à trouver une solution optimale d'éclairage (LED en anneau et polarisation croisée) pour le processus d'acquisition d'image, non immergé, et qui ne doit pas dépendre de l'orientation de l'appareillage.

Dans les années à venir, nous envisageons d'incorporer nos résultats de recherche à la fois dans le domaine de l'optique et celui du traitement d'images pour réaliser un détecteur ayant des performances optimales, avec une taille et une consommation les plus réduites possibles. L'objectif est double : contribuer à l'amélioration de la partie acquisition pour obtenir des images de meilleure qualité et approfondir l'aspect aide au diagnostic assisté par ordinateur, en testant des méthodes de traitement d'image et des techniques de reconnaissance de forme dans le but de rendre ce système plus opérationnel, en vue d'une évaluation clinique avec le contrôle d'un médecin.

Nous avons établi sur ces thématiques des contacts pour collaborations futures avec le Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) Erlangen (Ge) tout particulièrement les départements « Electronic Imaging » et « Image Processing & medical technology » (Pr Robert Couronne)

✓ Toujours dans le domaine médical un autre projet est d'introduire de l'acquisition hyper spectrale pour des données médicales concernant la rétine. Il est à noter que ce type d'imagerie est très souvent utilisé dans le cadre des applications militaires pour des objectifs de reconnaissance de cibles mais aussi pour des applications de cartographie d'images satellitaires. L'hyperspectral biomédical en est à ces débuts⁵⁴, et nous recensons quelques applications pour la dermatologie et la reconnaissance d'espèce végétales pour la botanique. Il est bien entendu important, à notre connaissance, de signaler qu'il n'existe aucun système d'acquisition des images du fond de l'œil capable de fournir une information spectrale de la rétine aussi riche qu'une caméra hyperspectrale. Ce projet se fera en collaboration avec la société ATERSIM, et l'hôpital la Timone (Marseille). De nombreux travaux ont été déjà initiés par l'équipe GSM de l'Institut Fresnel avec le CHU de la Timone sur l'imagerie médicale concernant la rétine utilisant des techniques classiques. Notre objectif est bien entendu d'adapter la modélisation tensorielle à ce type de données. Cette orientation découle du fait que les algorithmes basés sur la modélisation tensorielle ont donné d'excellents résultats sur l'imagerie hyperspectrale classique. Il s'agit bien entendu de séquences d'images couleur donc nous sommes en présence d'un tenseur d'ordre 4 (2 dimensions pour le spatial, une dimension spectrale et une dimension temporelle). Dans un premier temps, compte tenu de la quantité de données à traiter, certainement en temps réel, il faudrait développer de

54

Carasco O. ; Gomez R. ; Chainani A.; Roper W. ; "Hyperspectral imaging applied to medical diagnoses and food safety eo-spatial and temporal image and data exploitation". Conference N°3, Orlando FL , ETATS-UNIS (21/04/2003) 2003 , vol. 5097, pp. 215-221

méthodes spécifiques à ce type de données notamment pour réduire (ou comprimer) la taille des données en ne conservant que les données les plus utiles et de bonne qualité. Dans un second temps, ces informations privilégiées nécessiteront une représentation tensorielle et les méthodes de traitement à développer seront essentiellement basées sur de l'algèbre multilinéaire.

Il faudra aussi étendre les opérateurs de traitement d'images au cas des tenseurs de données, développer des méthodes de segmentation tensorielles en utilisant l'information à segmenter dans sa globalité. Les différentes images spectrales de la rétine ne doivent pas être dissociées pour être segmentées puis recombinaées mais il faudra développer des algorithmes de segmentation en tenant compte de la corrélation ou de la complémentarité des différentes bandes spectrales en ne fractionnant pas l'information mais en la traitant dans sa globalité.

Ces projets s'inscrivent parfaitement dans le cadre de la politique scientifique des équipes GSM et MAP2 et plus globalement de l'Institut Fresnel. D'une façon générale les différents résultats qui seront obtenus dans ces axes feront partie de leur contribution au développement du Centre Européen de l'Imagerie Médicale (CERIMED) : centre pluridisciplinaire destiné au développement et à la validation de nouvelles techniques d'imagerie médicale qui ouvrira ses portes très prochainement à Marseille (hôpital de la Timone).

Cela s'inscrit dans la continuité de l'expertise acquise par l'équipe dans le domaine de l'imagerie médicale (travaux de M. Adel, M. Rasigni, S. Bourennane) et dans cette perspective, je co-encadre depuis septembre 2008, la thèse de Haiping Jiang avec S. Bourennane sur l'imagerie hyper spectrale appliquée au médical (coopération du groupe des Ecoles Centrales avec les universités Chinoises).

Je suis aussi impliquée fortement dans le projet SKIPACAGE regroupant de nombreux industriels (Shaktiware, Skidata, ONE RF, Cisco...) et l'équipe GSM pour développer des systèmes de sécurité et de prédiction pour faire face aux évolutions climatiques afin d'améliorer les stations de Ski. Notre contribution portera sur les imageurs ou capteurs et/ou caméras à disposer tout au long des pistes skiables et de développer des algorithmes d'estimation des différents paramètres pertinents pour l'aide à la décision. Sur ce thème je co-encadre, depuis octobre 2008, avec S. Bourennane un groupe d'élèves ingénieurs de l'Ecole Centrale Marseille et une thèse devrait démarrer sur cette thématique courant 2009.

**D- PRODUCTION, COLLABORATIONS ET RAYONNEMENT
SCIENTIFIQUES**

Publications

Revue Internationale avec comité de lecture

1. **C. Vève**, N. Gay, M. Stemmer et S. Martinuzzi, "Detection and characterisation of precipitates in annealed Cz silicon wafers" **Journal de Physique III France** 5, 1353-1363 (1995)
2. M. Stemmer, **C. Vève**, N. Gay, et S. Martinuzzi, "Precipitates recognition and recombination strength in annealed Cz silicon wafers." **Material Science and Technology** 11, 703-706 (1995)
3. **C. Vève**, M. Stemmer et S. Martinuzzi, "Oxygen precipitates in Cz silicon wafers detected by SIRM and FTIR spectroscopy." **Material Science and Engineering B** 36, 200-203 (1996)
4. **C. Vève** et S. Martinuzzi, "Non destructive techniques applied to the detection of oxygen or metallic precipitates in annealed Cz silicon" **Semiconductor Science and Technology** 11, 1804-1814 (1996)
5. **C. Vève-Fossati** et S. Martinuzzi, "Detection and characterisation of stacking faults by light beam induced current mapping and scanning infrared microscopy in silicon wafers" **European Physical Journal of Applied Physics** 3, 123 (1998)
6. A. Durring, **C. Fossati**, M. Commandré, "Multi-wavelength imaging of defects in UV optical materials", **Applied Optics** 41, 3118-3126 (2002).
7. A. Durring, M. Commandré, **C. Fossati**, B. Bertussi, J. Y. Natoli, J. L. Rullier, H. Bercegol, P. Bouchut, "Integrated photothermal microscope and laser damage test facility for in situ investigation of nano defect induced damage" **Opt. Express** 11, 2497-2501 (2003)
8. A. Durring, **C. Fossati**, M. Commandré, "Photothermal deflexion microscopy for imaging sub micronic defects in optical materials" **Optics Communication** 230, 279-286 (2004).
9. G. Demèsy, F. Zolla, A. Nicolet, M. Commandré, and **C. Fossati**, "The finite element method as applied to the diffraction by an anisotropic grating," **Opt. Express** 15, 18089-18102 (2007)
10. S. Bourennane, **C. Fossati**, J. Marot, "About noneigenvector source localization methods" **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing** Volume 2008 (2008), Article ID 480835, 13 pages doi:10.1155/2008/480835
11. J. Marot, **C. Fossati** & S. Bourennane, " Overview on advances in tensor data denoising methods" accepté dans **EURASIP Journal on advances in Signal Processing**. Volume 2008 (2008), Article ID 235357, 12 pages doi:10.1155/2008/235357
12. R. Sabatier, **C. Fossati**, S. Bourennane and A. Di Giacomo "Faster Approximation of Transfer Cross Coefficients for OPC" **Optics Express**, Vol. 16 Issue 19, 15249-53 (2008)

Actes de conférences internationales avec comité de lecture

13. M. Stemmer, **C. Vève** et S. Martinuzzi. "Scanning Infrared Microscope applied to oxygen precipitates containing silicon wafers": **12th European Photovoltaic Solar Energy Conference** (Amsterdam 1994) ed. par Stephens & associates vol II p. 1794-1796
14. **C. Vève**, N. Gay, J. Gervais et S. Martinuzzi. "Recognition and characterization of precipitates in annealed Cz and FZ silicon by SIRM and LBIC.": **DRIPS** (Denver 1995) Inst. Phys. Conf. Ser. N°149 (1996) IOP Publishing Ltd p. 225-230
15. A. Durring, **C. Fossati**, M. Commandré, "Development of a photothermal microscope for multiscale study of defects", **Annual Symposium on optical materials for high power lasers**, Boulder (Colorado) 2001 published in Laser-induced Damage in Optical Materials : 2001, G.J. Exarhos, A. H. Guenther, M. R. Kozlowski, K.L. Lewis Editors, **SPIE** 4679, 400-410, (2002).
16. A. Durring, M. Commandré, **C. Fossati**, J.Y. Natoli, J.L. Rullier, H. Bercegol, P. Bouchut, "Photothermal microscopy for in-situ study of laser damage induced by gold inclusions", **Annual Symposium on optical materials for high power lasers**, Boulder (Colorado) 2002

- published in Laser-induced Damage in Optical Materials : 2002, G.J. Exarhos, A. H. Guenther, M. R. Kozlowski, K.L. Lewis Editors, **SPIE** 4932 (2003).
17. **C. Fossati**, O. Gagliano, M. Commandre, B. Dunne "Microlens design for CMOS image sensor" Proc of SPIE Vol.5962, 596229 (2005) **Optical Design & Engineering II** edit.by Laurent Mazuray, Rolf Wartmann
 18. G. Demèsy, F. Zolla, A. Nicolet, M. Commandre, **C. Fossati**, O. Gagliano, B. Dunne "Modeling of diffractive spectral filtering applied to CMOS image sensors" **SPIE : Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices V** San-Diego, 08/2008.
 19. J. Marot, C. Fossati, S. Bourennane "Fast subspace-based source localization methods" **IEEE-Sensor array multichannel signal processing workshop**, Darmstadt Germany, 07/2008
 20. Z. Mehel-Saidi, S. Bourennane, **C. Fossati** "Buried object localization using direct algorithm" **IEEE-Sensor array multichannel signal processing workshop**, Darmstadt Germany, 07/2008
 21. M.S. Costes, G. Braun, X. Cuinet, **C. Fossati**, J.L.Liotard, M. Commandre : "Interface creation to build a powerful photolithography simulation platform" **25th BACUS symposium on Photomask technology** , Monterey (Californie) 10/2005 proceeding **SPIE** Vol. 5992-191
 22. R. Sabatier, **C. Fossati**, S. Bourennane and A. Di Giacomo "An efficient method for TCC approximation in Model based OPC" **SPIE Photomask Technologie** Monterey USA oct. 2008

Conférence invitée

23. M. Commandré, **C. Fossati**, J. Y. Natoli, C. Amra : "Photothermal analysis of sub-micrometric scale defects in laser damage studies" **Optical Systems Design**, St Etienne (France) 09/2003

Autres conférences nationales et internationales

24. **C. Veve**, M. Stemmer, N. Gay, S. Martinuzzi "Révélation et caractérisation de précipités dans du Si Cz" **Défauts Etendus dans les Semi-conducteurs (DES)**, Marseille Juin 1994
25. **C. Vève**, N. Gay, M. Stemmer et S. Martinuzzi "Precipitates recognition and recombination strength in annealed Cz silicon wafers." **1st International Conference on Material for Microelectronics** Barcelone Oct. 1994
26. **C. Vève**, M. Stemmer et S. Martinuzzi "Oxygen precipitates in Cz silicon wafers detected by SIRM and FTIR spectroscopy." **E.M.R.S. 1995 Spring Meeting**, Strasbourg Mai 1995
27. **C. Veve** "Oxygen & Copper precipitates in Cz Silicon wafers detected by SIRM, FTIR spectroscopy, and LBIC mapping" **Physique en Herbe 95** Nice Juillet 1995
28. **C. Veve** S. Martinuzzi "Précipités d'oxygène dans Si Cz observés par MIRB et FTIR" **Congrès Général de la Société Française de Physique**, Marseille Sept. 1995
29. **C. Veve** , S Martinuzzi "Détection et caractérisation de défauts étendus dans du silicium Cz par MIRB et LBIC" **Défauts Etendus dans les Semi-conducteurs (DES)**, Poitier sept.1997
30. M. Commandré, A. Gatto, A. During, **C. Fossati** "Correlation between absorption and scattering imaging in optical materials" **Annual Symposium on optical materials for high power lasers**, Boulder (Colorado) 2000
31. During, **C. Fossati**, M. Commandré "Développement d'un microscope photothermique pour l'étude multi-échelle de l'absorption", **OPTIX** Marseille 2001
32. **Fossati**, A. During, M. Commandré "Cartographies de défauts absorbants et diffusants à plusieurs longueurs d'onde. Etude des corrélations", **OPTIX** Marseille 2001

33. DURING, **C. FOSSATI**, A. Gatto, M. Commandré "Optical Interference Coatings", Banff (Canada) Juillet 2001 "Multi-wavelength imaging of defects in uv optical materials" **O.S.A. Topical Meeting**
34. A. DURING, **C. FOSSATI**, M. Commandré "Photothermal deflection for microscopy and detection of submicron-sized defects" **CLEO/QELS**, Californie. 05/2002
35. JL Jaffard, C.FOSSATI, O. Gagliano « Modélisation optique d'imageurs CMOS » Journée micro systèmes à cœur optique (popsud) Marseille (France) 02/2004
36. Guillaume Demesy, Frederic Zolla, André Nicolet, Mireille Commandre, Caroline Fossati, Stephane Ricq, Olivier Gagliano, Brendan Dunne « Une méthode des éléments finis pour les réseaux de diffraction : application aux dispositifs microélectroniques d'imagerie. NUMELEC 2008, Liège (Be) dec. 2008

Brevet

37. V/Réf. : 04-RO-227 N/Réf. : 100321 FR N° de dépos : 05 12137
Déposé le : 30/11/2005 Au nom de : STMICROELECTRONICS ROUSSET SAS / Université Paul Cézanne
Titre : *Imageur CMOS comprenant une matrice de microlentilles ayant un taux de remplissage élevé / CMOS imager comprising a microlens array with a high fill rate*
Inventeurs : DUNNE Brendan / **FOSSATI Caroline** / GAGLIANO Olivier

Articles soumis à des Revues Internationales à Comité de Lecture :

38. R. Sabatier, **C. Fossati**, S. Bourennane and A. Di Giacomo "Optimal approximation of transfer cross coefficients for system transmission on multilinear algebra tools" soumis à **JM3**
39. G. Demèsy, F. Zolla, A. Nicolet, M. Commandre, **C. Fossati**, O. Gagliano, B. Dunne "The Finite Element Method as applied to the calculation of the Quantum Efficiency in optoelectronic imaging devices," soumis à Optical Engineering (OE).

Encadrements

Bénéficiaire d'une **Prime d'Encadrement Doctoral** et de **Recherche (PEDR)** en oct. 2003, et octobre 2008

Thèses co-encadrées :

En cours :

Romuald SABATIER : « *Etude des interactions entre les masques traités par algorithmes RET, les conditions de photolithographie, et la réponse des géométries sur la plaquette pour des technologies inférieures à 0,13µm* »

Début : mars 2007, Contrat CIFRE –ST Microelectronics

Encadrement 50%, Publications : 1 article revue int. [12], 1 conf. Int. [22], 1 article soumis [38].

Guillaume DEMESY : « *Développement de fonctions de transfert optique innovantes pour les imageurs CMOS* »

Début : Mars 2006, Contrat CIFRE –ST Microelectronics

Encadrement 50%, Publications : 1 article revue int. [9], 1 conf. Int. [18], 1 article soumis [39].

Terminées :

Marie Sophie COSTES : « *Masques avancés* »

Début : Avril 2004, Contrat CIFRE –ST Microelectronics interrompu en avril 2006 suite à une offre d'emploi accepté par la doctorante

Encadrement 50%, Publications : 1 conf. Int. [21],
Dernière situation connue : ingénieur ATMEL Rousset

Flavien HIRIGOYEN : « *Optimisation de la collection des photons pour les capteurs d'images CMOS* »

Soutenue : Novembre 2005, Confidentielle.
Encadrement 50%, Contrat CIFRE –ST Microelectronics-Crolles
Dernière situation connue : ingénieur. ST-Microelectronics Crolles

Emilien ROBERT : « *Photolithographie pour la micro-électronique du futur : recherche et évaluation de nouveaux types de masques, simulation et optimisation de la stratégie d'insolation associée* »

Soutenue : Juillet 2006,
Encadrement 30%, Contrat CIFRE –ST Microelectronics
Dernière situation connue : ingénieur Airbus

Annelise DURING : « *Microscopie photothermique et endommagement laser* »

Soutenue : Décembre 2002,
Encadrement 50%, Financement CNRS-Région ,
Publications : 3 articles revue int. [6,7,8], 2 proceedings [15,16] , 5 conf. [30-34] ,
Dernière situation connue : Chercheur CEA

Autres types d'encadrement :

Sonia PILORGET : CDD sur convention « Rousset 2008 » de février 2005 à janvier 2006 : « étude des problèmes de « color corner » »

Dernière situation connue : ingénieur ST Microelectronics Crolles

Emilien ETIENNE : post-doc de février 2004 à mai 2006 sur convention « Rousset 2008 » : « étude comparative de différents outils de simulation »

Dernière situation connue : IR CNRS

Olivier GAGLIANO :

- post-doc à de septembre 2003 à février 2004 sur la thématique « Métrologie par perte d'absorption »

- sur convention « Rousset 2008 » de février 2004 à janvier 2005 : « simulation par tracé de rayons des imageurs CMOS, et mise en place d'un banc de caractérisation »

Dernière situation connue : ingénieur ST Microelectronics Rousset

Projets d'élèves (ingénieurs ou techniciens) sur la thématique « Optique pour la microélectronique » :

- G. Crémonèse ENSPM promo 2003,
- A. Auffret INSA Rennes 2004,
- C. Leroux ENSPM promo 2005,
- M. Collonge, A. Fleury, R. Sabatier ECM promo 2006,
- L. Tenchine ECM promo 2007,
- J.P. Bardines IUT MP Marseille promo 2007,
- F. Languier et M. Benoît ECM promo 2008

Collaborations, académiques, industrielles et contrats

- ✓ **1996-97 : Contrat SICOCELLS** (programme European Joule) « *caractérisation de silicium photovoltaïque* » collaboration avec l'Instituto de Energia Solar (Madrid)
- ✓ **1999-2001 : collaboration avec le CEA** sur la métrologie par pertes d'absorption
 - ↳ **Contrats avec le CEA VALRHO -SILVA-** 1999 et 2000 « *Contamination et vieillissement de composants optiques* »
 - ↳ **Contrat avec le CEA CESTA** 2001 « *Etude de la corrélation défauts locaux absorbants et endommagement laser* »
- ✓ **2001-2008** : Initiation et suivi de la **collaboration entre ST Microélectronics et l'Institut Fresnel** en 2001 sur l'étude de la partie optique des imageurs CMOS, étendue par la suite à d'autres thématiques impliquant d'autres équipes de l'Institut (GSM, MOSAIC, CLARTE).
 - ↳ Gestion des **Contrats STSI 2001 et 2002** « modélisations optiques d'imageurs CMOS » budget total : **280k€**
 - ↳ **Contrat « Rousset 2003-2008 »** financement CG13 et région PACA sous forme d'un programme pluriannuel.
Responsabilité scientifique et administrative des volets :
 - « Post-traitement optique d'imageurs CMOS » budget total : **700k€**
 - « Masques avancés » budget total : **1045k€**

Cette activité se concrétise par la mutualisation de compétences, de moyens de calcul et de caractérisation et l'encadrement de thèses. Les premiers résultats obtenus ont permis un dépôt de **brevet**, et le financement de 3 thèses CIFRE
- ✓ **Collaborations internationales** :
 - Université d'Erlangen et le Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) (Pr Couronne et Seitzer)
 - Université USTHB d'Alger (Pr Azzoune et Pr Belouchrani)
 - Université de Stanford : Wireless Sensor Networks Laboratory (Pr Aghajan)

Animation et Rayonnement Scientifique

- ✓ **Responsable**, depuis 2003, de la **thématique** de recherche « **Optique pour la Microélectronique** », collaboration des équipes MAP2 et GSM de l'Institut Fresnel, avec le soutien de ST Microelectronics et la région PACA.
- ✓ **Animation** au sein de l'équipe GSM de la thématique « **Traitement du Signal pour les applications Microélectronique** » avec le Pr Bourennane
- ✓ **Directrice des études doctorales de l'Ecole Centrale Marseille** depuis septembre 2005
 - ↳ Animation du service des études doctorales (1dir. et 2 admin.) mis en place par l'ECM pour le soutien des élèves et des intervenants en masters. (informations générales, emplois du temps, dossiers de bourse...)
 - ↳ Gestion des dossiers de co-habilitation avec les Universités du site d'Aix Marseille pour 6 masters recherche. Suivi des inscriptions, conventions de stages et jury
 - ↳ Interface entre les formations 3A ECM et les masters recherche pour mener à bien la mise en place de cours communs et l'organisation des emplois du temps.

- ↪ Représentation de l'ECM (établissement associé) aux conseils de 5 Ecoles Doctorales (ED184 Math info. / ED352 Phys. et sc. de la matière / ED353 Sc. pour l'ingénieur / ED251 Sc. de l'environnement / ED250 Sc. chimiques)
- ↪ Gestion pédagogique et administrative de 2 masters spécialisés (co-accréditation CGE) :
 - **TMPM** : «Technologie et Management de la Production en Microélectronique », co-délivré par l'ECM , ENSM-SE (CMP) et ST Université.
 - **MIQE** : « Management de l'Innovation et Qualité de l'Environnement », co-délivré par l'ECM et Euromed
- ↪ Organisation des évènements scientifiques (colloques, visites de labo...) dans le cadre du **Groupe des Ecoles Centrales**
 - **Soutien à l'organisation du CRIEC** : Colloque Recherche de l'Intergroupe des Ecoles Centrales qui regroupe tous les ans dans une des écoles du groupe, les doctorants des laboratoires rattachés aux 5 Ecoles Centrales
Colloque organisé à Marseille en Mai 2007, environ 100 participants sur 3 jours
 - **Organisation des journées recherche de l'ECM** :
Journée annuelle de présentation des laboratoires rattachés à l'ECM aux élèves
Journées d'échange international pour les chercheurs et enseignants chercheurs .
- ✓ **Relecture d'articles** pour les conférences « European Conference on Signal Processing : EUSIPCO-2008 » et « Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems : ACIVS 2008 »
- ✓ Participation au **GDR ISIS-Stic-santé**, journée thématique : « Imagerie du tenseur: avancées et nouveaux traitements » 9 dec. 2008
- ✓ **Jurys de thèse** :
 - Annelise DURING Univ. P. Cézanne - Institut Fresnel Marseille 05/12/02
 - Flavien HIRIGOYEN Univ. P. Cézanne- Institut Fresne - ST Crolles Marseille 22/11/05
 - Emilien ROBERT INPG - Institut Fresnel - ST Crolles Grenoble 09/07/06
 - Yannick CAULIER these en co-tutelle Franco-Allemande
Univ. P. Cézanne -Institut Fresnel /Erlangen Nürnberg Universität-
Fraunhofer Institut Erlangen 16/06/08