

Habilitation à Diriger des Recherches

présentée devant

l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

et

l'Université Claude Bernard Lyon I

soutenue publiquement le 18 nov. 2019

par

Fabien MANDORLO

De la photonique au photovoltaïque à base de Silicium "augmenté"

Spécialité :

Électronique, Électrotechnique, Automatique (EEA)

Composition du jury :

<i>Rapporteurs :</i>	M ^{me} KAMINSKI-CACHOPO Anne	Professeure, Grenoble INP, Grenoble
	M. DURAND Olivier	Professeur, INSA de Rennes, Rennes
	M. JOURLIN Yves	Professeur, Université Jean Monnet, Saint-Etienne
<i>Examineurs :</i>	M. LEMITI Mustapha	Professeur, INSA de Lyon, Villeurbanne
	M. MIEYEVILLE Fabien	Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne
	M. OROBTCHOUK Régis	Maître de Conférences HDR, INSA de Lyon, Villeurbanne

"C'est fou, ce truc ! Avec seulement vingt-six lettres, on peut écrire tout ça ?"

(Lanfeust Odyssey volume 6, Arleston et Tarquin)



Remerciements

Il m'a fallu attendre la fin de ma formation d'ingénieur pour réaliser combien la compréhension des choses pouvait m'intéresser. Cependant, l'expérience venant petit à petit, je commencerai ces remerciements par quelques paroles d'un collègue :

"La recherche, c'est une école de la frustration"

(B. Masenelli)

Et c'est tellement vrai. Combien de fois nos expériences n'ont-elles pas "fonctionné" après avoir cru comprendre quelque chose ? Combien de fois quelques points isolés sur une courbe expérimentale nous ont poussés à aller plus loin ? C'est ce questionnement régulier, la remise en cause de ce qu'on pense acquis qui constitue pour moi le leitmotiv du métier de chercheur. Avec les années, j'ai pu réaliser que les meilleurs moments passés avec mes collègues étaient ceux où l'on gribouillait sur un tableau, à coup de schémas, renforcés par des équations, des modèles. Je ne remercierai jamais assez les collègues avec qui j'ai pu partager ce genre d'expérience, mais aussi et surtout les doctorants avec qui se prête ce genre d'exercice. Bien sûr, il y a eu ceux que j'ai pu co-encadrer, et quelques autres qui sont passés me voir, et c'est avec plaisir que nous avons tenté de comprendre quelque chose, ou que j'ai tenté de partager ma menue expérience avec eux. C'est avec le recul que je réalise combien les doctorants sont les moteurs dans nos laboratoires. Ce sont eux, en se consacrant totalement à leur sujet de thèse, qui permettent de vraiment avancer. Et finalement, les "anciens" ne sont là que pour les guider un peu, leur éviter quelques faux pas. Mais leur principale force est de ne pas subir le formatage de leurs expériences : comme j'aime à le dire ce sont des "cerveaux tout neufs", sans pré-requis, prêts à explorer des pistes qu'un homme d'expérience aurait peut-être mises de côté à tort. Évidemment, dans certains cas, nous pouvons leur expliquer que certaines pistes risquent d'être une perte de temps, mais en tant qu'encadrant, il me semble aussi important de ne pas trop les "brider", même s'ils ont des objectifs clairs.

En ce sens, et c'est un avis très personnel, je déplore la tendance actuelle du fonctionnement de nos laboratoires : je regrette amèrement le fonctionnement quasi exclusif par "projets" qui ne laisse pas beaucoup de manœuvre pour explorer des pistes qu'on est obligé de mettre de côté, faute de financement. À force de trop vouloir "mesurer" la performance et d'exiger "l'excellence", j'ai bien peur que nous ne soyons en train de tuer l'imagination que peuvent avoir les chercheurs. L'histoire a montré que bien des résultats scientifiques ont été obtenus "parce qu'on avait envie de voir ce que ça donnait". Moi-même, et je l'évoque dans ce manuscrit, je l'ai vécu en concevant un micro-LASER dont les performances ont dépassé mes attentes. Mais il a fallu 3 ans après la thèse pour convenablement expliquer pourquoi ce qui avait été au départ un essai à l'arrache était en fait bien plus performant que la solution que j'avais développée (et brevetée) pendant 3 ans de thèse ! Heureusement, ce prototype ne nécessitait pas d'étapes supplémentaires pour être fabriqué... ce qui a permis de le tester. Combien d'autres expériences n'ont jamais été réalisées faute de moyens ? Certains diront que si on a une idée on peut alors chercher à la financer. Mais pour être financé, il faut quand même montrer que "ça marche" (ou presque) auparavant, qu'il y a potentiellement (presque toujours en fait) des débouchés industriels. N'y a-t-il pas comme un serpent qui se mord la queue ? Par conséquent, comment montrer que quelque chose fonctionne quand la moindre démonstration nécessite l'élaboration d'échantillons ? Et puis, une fois que "ça marche", y a-t-il vraiment de la recherche à faire, ou s'agit-il d'optimisation et d'ingénierie ? Et si on a une idée, comment faire si on a du mal à imaginer les débouchés industriels, parce que c'est juste comprendre de la physique du monde qui nous entoure et que potentiellement, plus tard, viendront les applications. La prise de risque (financière) doit être mesurée, mais ne l'est-elle pas trop désormais ? Quelle énergie perdue dans la rédaction de projets quand seulement 10-15 % sont financés ou lorsqu'on propose 3,4,5 variantes d'un même projet en deux ans pour enfin pouvoir financer UNE idée ? La compétition est très rude et frustrante car elle ne dépend pas toujours de choix scientifiques. À un collègue qui s'étonnait du peu de réaction (boycott pour la session à venir ?) face à un appel à projets pour lequel aucun retour n'a été fait pour expliquer les motivations de refus des candidatures, j'ai répondu "Mets un bon morceau de viande devant une meute de loups affamés, et crois-moi, ils vont tous tenter de le manger et aucun ne cherchera à rester à l'écart". Je crois qu'on nous affame. Et je doute que cela soit aussi une image positive pour nos partenaires industriels à qui il faut expliquer (très souvent) que nous n'étions pas suffisamment convaincants. Cessons cette stupide course à "l'excellence" et qu'on nous laisse davantage nous consacrer à ce qu'on sait faire : explorer, comprendre, analyser, partager ! Ce n'est que mon avis, mais c'est aussi une autre facette de la recherche, moins agréable... frustrante. Mais vous l'aurez compris, c'est le côté passionnel qui l'emporte, grâce à ces hommes et ces femmes que j'ai pu croiser pendant ces années. Certains sont chercheurs, d'autres techniciens ou personnels administratifs, mais tous ont leur importance. Concernant l'enseignement, je serai nettement moins bavard : bien

sûr, je constate que le niveau des acquis baisse et qu'il nous faut nous adapter. Mais quel plaisir de voir à quel point certains ressortent grandis à la fin de leur formation.

Aussi, puisqu'il s'agit des remerciements, je tiens à remercier tout d'abord celui qui m'a montré la voie, mon ancien tuteur de thèse : Pedro ! Sans toi, je n'aurais jamais mis les pieds dans la recherche. Tu m'as fait aimer cette expérience. Maintenant, j'essaie de me montrer à la hauteur et j'espère que mes doctorants sauront m'apprécier comme moi je t'apprécie. En second lieu, je pense à l'équipe *Photovoltaïque* qui m'a accueilli en 2011 : bien qu'ayant toujours eu beaucoup d'affinité avec l'électronique du silicium, c'était quand même un changement de cap pour ma part. Il m'a fallu un peu de temps pour m'y sentir à l'aise et aujourd'hui encore je me sens bien petit à côté d'un Mustapha dont l'expérience impose le respect. Alain, Erwann, Danièle, vous aussi, vous savez m'étonner et vous m'apprenez un tas de choses. Forcément, il y a aussi Mohamed, le "dernier venu". Cela fait quelques années que nous nous côtoyons, et c'est assez fructueux. Et puis, j'apprécie ce regard très "physicien" que tu apportes au photovoltaïque même si parfois, je dois avouer que je ne comprends pas tout, tant le point de vue est différent.

Et puis, il y a les doctorants que j'ai co-encadré : Félix, Romain, et maintenant Nelly. Merci à vous, car c'est grâce à vous que le côté passionnel de la recherche est vécu au quotidien. J'essaie de faire de mon mieux avec vous, de vous accompagner, vous guider, avec les compromis de l'enseignant-chercheur (les cours, les responsabilités administratives), mais vous avez souvent une priorité haute, souvent supérieure à celle de mes propres travaux de recherche. Il n'y a qu'avec toi Nelly que j'ai un peu moins été présent pendant quelques semaines, pour mieux me consacrer à ma rédaction (égoïstement ?). J'espère que tu ne t'en es pas trop aperçu, car j'essaie quand même de me montrer très réactif pour ne pas te pénaliser. Il y a aussi ceux que j'apprécie de croiser dans le "bureau des doctorants". Quelle ruche à idées ce bureau ! Quel centre de vie dans le laboratoire, même si parfois on y discute de choses qui n'ont parfaitement rien à voir avec les sciences, comme dans la salle café d'ailleurs ! Benoit : ta bonne humeur était vraiment appréciable. Toujours positif, toujours souriant. Et puis, serviable aussi : je n'oublie pas ce jour où tu m'as accompagné aux urgences alors que je n'étais pas du tout en forme. Nicolas, toi aussi, tu impressionnes, et pas seulement par ta taille : quelle curiosité de tous les instants ! Franchement, la photo en mode "Transformée de Fourier" m'a vraiment amusé. Et puis Rémi aussi : toi et ton imprimante 3D, voilà un terrain qui laisse beaucoup de place à l'imagination ! Et Corina, "maîtresse ALD", experte en couches (ultra) minces. J'en oublie les post-doctorants : vous aussi vous êtes des acteurs essentiels de la recherche, bien que présents sur de courtes périodes. Anatolii, Kristian, Stéphanie...

Dans le quotidien de la vie du laboratoire, les personnels qui nous accompagnent dans la recherche jouent un rôle décisif. Alors bien sûr j'ai une pensée particulière au personnel administratif, notamment Virginie, toujours arrangeante. Il y a aussi nos mécaniciens : Robert puis Daniel depuis quelques temps. À chaque fois qu'on vient vous voir, c'est pour vous demander des prototypes, des pièces qu'on imagine bien dans nos têtes de chercheur, mais pas toujours faciles à réaliser. Heureusement, vous avez de l'expérience, beaucoup de patience et la sagesse de nous pousser à simplifier nos demandes très hétéroclites : un jour un support pour un banc d'optique, le lendemain des pièces pour réaliser des manipulations sous des conditions particulières... Et puis, toujours réactifs. C'est génial ! Et Philippe. Alors toi, on ne peut pas t'oublier : maître en chirurgie électronique, expert en sauvetage d'appareils en panne, personnage haut en couleurs. Haut tout court aussi d'ailleurs, comme Nicolas. Je suis toujours admiratif de tes explications, de ton expérience. Enfin, tu n'es pas le seul que j'admire puisque c'est souvent le cas envers ceux qui savent faire des choses que je ne sais pas faire, et au labo, vous êtes nombreux ! Te voir faire est impressionnant : tu sais décortiquer un problème complexe et le corriger à la perfection. C'en est beau de te regarder à l'œuvre. Tes micro-prototypes sont toujours chouettes à regarder et très bien pensés. Total respect ! Ah oui, et toi aussi Benjamin : toujours volontaire, toujours agréable. Plus le temps passe, plus je t'apprécie, et à vrai dire, avec Marine, vous allez vraiment bien ensemble. Quelque part, je t'envie, veinard ! Et Lotfi... j'ai failli t'oublier alors qu'on se voit presque tous les jours, et que j'ai le plaisir de papoter avec toi de très nombreuses fois de journée après le boulot. J'apprécie ces moments-là, même si je ne comprends pas tout dans tes transformées de Fourier dans tous les sens. Enfin, j'exagère un peu, dans les grandes lignes ça va, mais je reste épaté par ce que tu peux tirer de "quelques" lentilles et pièces d'optique.

Hors du laboratoire, il y a aussi les proches, la famille. Je sais, le côté passionné de mon métier fait que parfois je vous néglige un peu. Beaucoup en fait. Vous êtes patients avec moi. Nathalie, tu es, hélas, la mieux placée pour avoir pu me côtoyer pendant le début de cette période d'écriture où tel un moine je vivais au fond de ma grotte d'appartement. Tu as été particulièrement patiente et je sais qu'il t'en a coûté. Merci à toi, même si nos chemins se sont séparés depuis car je sais que tu es une femme formidable. Louise, merci à toi aussi pour tes relectures de dernière minute. Merci à vous, parents, frère et belle-sœur pour me permettre de me changer les idées. Et puis, si les histoires de famille nous ont longuement séparés, je suis content d'avoir retrouvé un cousin, David ! C'est génial de t'entendre parler recettes avec passion, et puis, je me sens moins seul comme "enseignant" désormais ! Merci à vous, papa et maman. Merci à toi, mon frère, et Karine, chère belle sœur depuis si longtemps !

Merci aussi à tous ceux que j'aurai pu oublier. Après tout, si j'en suis là, c'est grâce à vous.

Table des matières

Épigraphe	3
Remerciements	5
Table des matières	9
Abréviations et notations	11
Introduction	13
De la photonique appliquée aux circuits numériques ...	13
... au photovoltaïque à base de silicium	15
Des contraintes différentes de la micro-électronique	15
Le marché du photovoltaïque dans le mix énergétique	15
Axes de recherche	16
1 De la photonique intégrée aux photodétecteurs en silicium	19
1.1 Contexte des travaux de thèse en photonique intégrée (2005-2009)	19
1.1.1 Les résonateurs à modes de galerie	19
1.1.2 Réduction de la densité spectrale de modes et géométrie des contacts	20
1.1.3 Travaux de modélisation autour du couplage et de la sélection de modes	21
1.1.4 État des lieux à l'issue de la soutenance de thèse (nov. 2009)	21
1.1.5 Encadrements	22
1.2 Prolongement des travaux de thèse (ATER - 2009-2010)	22
1.2.1 Objectifs et contexte de recherche	22
1.2.2 Moyens techniques mis en œuvre	22
1.2.3 Premiers résultats expérimentaux : LASERs fonctionnels	23
1.2.4 Microdisques et saut de mode contrôlé : structure en "raquette"	23
1.2.5 Améliorations des performances électro-optiques	24
1.2.6 Vers des microdisques asservis en longueur d'onde	25
1.2.6.1 Modèle théorique général	26
1.2.6.2 Saut de mode contrôlé sur des structures fortement couplées	27
1.2.7 Bilan technique et scientifique	28
1.3 APD Si-Ge pour les applications Telecom (post-doctorat - 2010-2011)	29
1.3.1 Contexte	29
1.3.2 Structure rectiligne avec couche flottante en forme de U	29
1.3.3 Structure courbe à fort confinement	31
1.3.4 Structure compacte épitaxiée	32
1.3.5 Éléments de filtrage et routage	33
1.3.6 Bilan technique et scientifique	33
1.4 Bilan des activités en photonique intégrée	33
2 Vers des cellules solaires en silicium "augmenté" ?	35
2.1 Introduction au photovoltaïque à base de silicium	35
2.1.1 Quelles pistes d'améliorations ?	35
2.1.2 Mes activités de recherche autour des cellules à base de silicium	36
2.2 Amélioration des performances des cellules à base de silicium	36
2.2.1 Améliorations des performances de cellules PERC	37
2.2.1.1 Contexte scientifique du projet OSEO FaSil	37
2.2.1.2 Objectif	37
2.2.1.3 Amélioration du comportement optique de la face arrière	37
2.2.1.4 Fabrication et conception	39
2.2.2 Cellules tandems planes à base de silicium et III-V-N	39
2.2.2.1 Contexte scientifique du projet ANR-Menhirs	39

2.2.2.2	Objectif	39
2.2.2.3	Dimensionnement de la sous-cellule en silicium	39
2.2.2.4	Fabrication et conception	40
2.2.3	Cellules Nanostructurées	41
2.2.3.1	Effets volumiques et surfaces dans les cellules minces	41
2.2.3.2	Contexte scientifique des projets NaThiSol et PhotoNVoltaics	42
2.2.3.3	Méthodologie de simulation	43
2.2.3.4	Impact de la structuration sur les performances électriques de cellules minces de type HIT	43
2.2.3.5	De la simulation "locale" aux performances "globales" d'une cellule solaire	45
2.2.4	Conclusion	47
2.3	Intégration dans notre vie quotidienne	47
2.3.1	Intégration visuelle et couleur	47
2.3.1.1	Contexte	47
2.3.1.2	Réflexion résolue en angle	48
2.3.1.3	Impact du traitement anti-reflet sur la couleur	49
2.3.2	Travaux en cours sur les couleurs de modules	50
2.3.3	Micro-Cellules intégrées pour les systèmes embarqués	50
2.3.3.1	Contexte	50
2.3.4	Le projet PULSALYS Tunnel	51
2.3.4.1	Le projet de thèse en cours	51
2.4	Activités en cours	52
2.5	Bilan des activités en photovoltaïque	52
3	Activités de formation et de recherche	55
3.1	Rayonnement scientifique	55
3.1.1	Responsabilités d'intérêt collectif au sein du laboratoire	55
3.1.2	Vulgarisation scientifique	56
3.1.3	Expertise	56
3.2	Encadrement et projets de recherche	56
3.2.1	Contribution à des projets de recherche	56
3.2.1.1	Participation à des contrats nationaux	57
3.2.1.2	Participation à des contrats européens	57
3.2.2	Encadrement de stagiaires et de doctorants	58
3.2.2.1	Récapitulatif des encadrements réalisés	58
3.2.2.2	Détail des PFEs (co-)encadrés	59
3.2.2.3	Détail des stages (co-)encadrés (hors PFE)	60
3.2.2.4	Détail des thèses soutenues	60
3.2.2.5	Encadrement de thèse en cours	61
3.3	Activités de formation	62
3.3.1	Le département Science et Génie des Matériaux (SGM) à l'INSA de Lyon	62
3.3.1.1	SGM, un département orienté vers la recherche	62
3.3.1.2	Responsabilités administratives au sein du département	62
3.3.2	Le master NanoScale Engineering (NSE)	63
3.3.3	Adéquation avec les activités de formation	63
3.4	Conclusion	63
	Conclusion et perspectives	65
4.1	Projets en cours : cellules tandems reportées sur Si	65
4.2	Projection à court terme	66
4.2.1	Évolution des bancs de caractérisation expérimentale	66
4.2.2	Applications photovoltaïques pour le bâtiment	66
4.3	Projection à moyen et long terme	66
4.3.1	Maîtrise de la couleur des modules et impact sur les rendements de conversion	66
4.3.2	Étude du comportement en conditions réelles de modules solaires	67
4.4	Projection à long terme	68
	Table des figures	72
	Liste des tableaux	73
	Production scientifique personnelle	75
	Références bibliographiques	79

Annexe A : simulation de cellules tandems à base de GaAsPN et de Si (2012)	85
Annexe B : Curriculum Vitae	87
Annexe C : investissement en formation supérieure	89
Récapitulatif des différents enseignements	89
Détail des enseignements	90
Techniques Numériques pour l'Ingénieur	90
Circuits électroniques - signaux systèmes	90
Guide à la Rédaction de Documents Techniques et Scientifiques	90
Matériaux - mesures - optoélectronique	90
Matériaux et composants semi-conducteurs - TCAD Simulation of Semiconductor devices	90
Caractérisation et simulation des semi-conducteurs et composants	91
Outils de simulation et communication par radio-fréquences	91
Annexe D : articles choisis	93
Controlled Multi-Wavelength Emission in Full CMOS Compatible Micro-Lasers for on Chip Interconnec- tions (2012)	93
Influence of patterning the TCO layer on the series resistance of thin film HIT solar cells (2017)	101
Temperature and color management of silicon solar cells for building integrated photovoltaic (2018)	109

Abréviations et notations

Acronymes

AM1.5G	<i>Air Mass 1.5 (spectre global)</i>
APD	<i>Avalanche Photo Diode</i>
ARC	<i>Anti-Reflective Coating</i>
ATER	<i>Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche</i>
BEPOS	<i>Bâtiments à Énergie passive ou POSitive</i>
BGN	<i>Band Gap Narrowing</i>
CIE	<i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CMP	<i>Chemical Mechanical Polishing</i>
DUV	<i>Deep Ultra Violet (pour la lithographie)</i>
DDR	<i>Double Data Rate : type de mémoire vive SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory)</i>
DDR PHY	<i>DDR PHYsical interface</i>
EQE	<i>External Quantum Efficiency</i>
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i>
ff	<i>Filling Fraction</i>
FSR	<i>Free Spectral Range</i>
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HIT	<i>Heterojunction with Intrinsic Thin layer</i>
IBC	<i>Interdigitated Back Contact</i>
III-V	<i>Référence aux éléments des colonnes 3 et 5 de la table de Mendeleïev</i>
IQE	<i>Internal Quantum Efficiency</i>
ITO	<i>Indium Tin Oxyde</i>
JT	<i>Jonction Tunnel</i>
KPFM	<i>Kelvin Probe Force Microscopy</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MEB	<i>Microscope Électronique à Balayage</i>
MMI	<i>Multi Mode Interferometer</i>
OLT	<i>Optical Line Termination</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
p-i-n	<i>Empilement constitué d'une couche intrinsèque (ou très faiblement dopée) en sandwich entre deux couches dopées p et n</i>
PERC	<i>Passivated Emitter and Rear Cell</i>
PERT	<i>Variante de la structure PERC avec une zone dopée en face arrière couvrant toute la surface de la cellule</i>
PEDR	<i>Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche</i>
PLU	<i>Plan Local d'Urbanisme</i>
PV-T	<i>(module) PhotoVoltaïque et Thermique pour de la cogénération d'énergie</i>
RCWA	<i>Rigorous Coupled-Wave Analysis</i>
RIE	<i>Reactive Ion Etching</i>
RT	<i>Règlementation Thermique</i>
SMT	<i>Simultaneous Multi Threading</i>
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i>
SOI	<i>Silicon On Insulator</i>
SRH	<i>Schokley-Read-Hall (recombinaisons)</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
SFP	<i>Small Form-factor Pluggable</i>

SWIR	Short-Wavelength InfraRed
TCO	<i>Thin Conductive Oxyde</i>
TE	<i>Transverse Electric</i>
TLM	<i>Transmission Line Measurement</i>
TM	<i>Transverse Magnetic</i>
UCS	<i>Uniform Chromaticity Scale</i>
VCSEL	<i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser</i>
VPE	<i>Vapor Phase Epitaxy</i>
WGM	<i>Whispering Gallery Mode</i>
WP	<i>White Point</i>

Anglicismes utilisés dans ce manuscrit

<i>Busbar</i>	Piste conductrice principale en face avant des cellules solaires
<i>Finger</i>	Ramification conductrice secondaire, plus étroite qu'un <i>busbar</i> auquel il est connecté
<i>Heater</i>	Micro-chaufferette exploitant l'effet Joule
<i>Process flow</i>	Description détaillée des étapes de fabrication (avec les tolérances et les zones de test)
<i>Ray Tracing</i>	Méthode optique de suivi de rayon
<i>Red-shift</i>	Décalage vers les grandes longueurs d'onde sous l'effet de la température
<i>Rib (waveguide)</i>	Guide optique obtenu par gravure partielle du matériau guidant autour du guide lui-même
<i>Slab</i>	Surface finie d'un matériau de très faible épaisseur
<i>Strip (waveguide)</i>	Guide optique obtenu par gravure totale du matériau guidant autour du guide lui-même
<i>Tab</i>	Portion de matériau formant une languette pour contacter un élément
<i>Taper</i>	Dispositif optique permettant de graduellement passer d'un guide à un autre de géométrie différente
<i>Tracking (system)</i>	Système d'asservissement en position angulaire pour un module solaire
<i>Wafer</i>	Plaquette servant de support mécanique aux circuits électroniques (souvent en silicium)
<i>Work Package</i>	Thématique de travail. Pour un projet de recherche, sous projet se focalisant sur un aspect particulier

Relations entre grandeurs scalaires

$A \approx B$	A est proche de B
$A \sim a$	A est de l'ordre de a
$A \gg B$	A est très supérieur à B
$A \ll B$	A est très inférieur à B
$A = a [B]$	A vaut a modulo B

Introduction

L'histoire de l'interaction entre la lumière et la matière franchit un cap décisif en 1839 quand [E. Becquerel](#) démontre pour la première fois un effet photovoltaïque. Cette interaction peut être utilisée en régime statique pour convertir l'énergie d'un flux lumineux permettant ainsi de développer les premiers modules solaires au milieu des années 1970. Cependant, il a fallu attendre l'invention du transistor en 1947 par [J. Bardeen](#), [W. Shockley](#) et [W. Brattain](#) pour révolutionner l'usage des semi-conducteurs et donc encourager la conversion entre photons et électrons pour utiliser la lumière comme vecteur d'information. L'invention du LASER à semi-conducteurs dans les années 1960 a permis de développer des réseaux de télécommunication à base de fibres optiques quelques années plus tard en utilisant les premiers détecteurs et émetteurs électro-optiques. Avec les progrès de la miniaturisation, ces liens optiques s'affichent comme une alternative performante aux communications électriques sur des distances de plus en plus courtes : depuis quelques années, on envisage même de recourir aux photons pour réaliser certaines connexions haute fréquence au sein même des processeurs.

Désormais, l'utilisation des semi-conducteurs pour contrôler la lumière, la détecter, l'émettre, la convertir ou l'utiliser comme vecteur de transport est une réalité industrielle avec des marchés aussi bien dans le domaine de l'énergie (photovoltaïque) que de la micro-électronique (capteurs intégrés, circuits numériques, télécommunication, photonique). Dans ces deux domaines, le silicium est un matériau très largement exploité de part son abondance sur terre et ses propriétés physiques particulièrement adaptées aux applications visées. Il sera le fil conducteur entre les différentes thématiques de recherche présentées dans ce manuscrit.

De la photonique appliquée aux circuits numériques ...

Depuis les débuts de la micro-électronique, l'augmentation de la densité d'intégration et de la fréquence d'utilisation ont été les deux pistes les plus efficaces pour augmenter les performances des circuits intégrés passant ainsi de 4.77 MHz pour le processeur [Intel® 8086](#) (1978, 29k transistors) à environ 4 GHz pour les Pentium 4 (2005, 125M transistors). Cette tendance a été possible grâce à l'amélioration continue des procédés de fabrication. En 2005, la dissipation thermique (130 W à travers quelques cm²) a brusquement freiné la tendance (fig. 1). Il a fallu attendre 2018 pour qu'[Intel®](#) commercialise enfin un processeur à 5 GHz (Core™ i7-8086K).

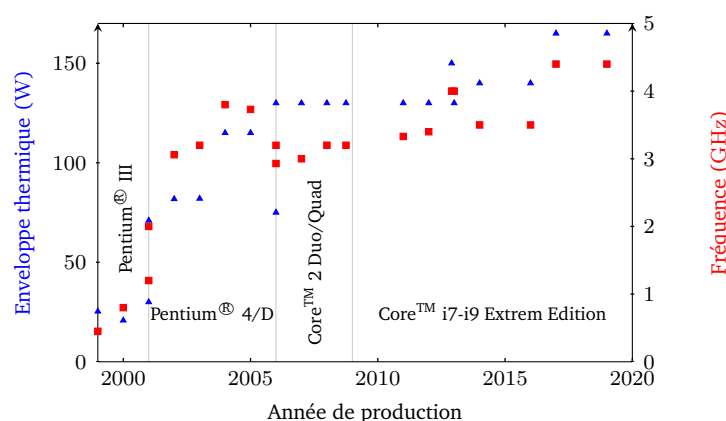


Fig. 1 – Évolution de la fréquence et de l'enveloppe thermique de processeurs x86 [Intel®](#) grand public de 1999 à 2019.

À partir de 2005, les "performances par watt" deviennent un critère essentiel en micro-électronique [60] et la principale piste envisagée pour améliorer cette métrique est la parallélisation. Les processeurs contiennent alors de plus en plus d'unités de calcul physiques (cœurs) ou logiques (SMT¹), puis les jeux d'instructions passent à 64 bits sur toutes les gammes de processeurs, aussi bien chez [Intel®](#) que [AMD](#). Comme dans le monde mobile, les fréquences et tensions d'alimentation deviennent dynamiques. Le nombre de cœurs explose avec des annonces allant jusqu'à 18 cœurs en 2017 [61], nécessitant des interconnexions à large bande passante et à faible consommation pour relier les différentes unités de calcul. Malheureusement, les liens électriques montraient déjà leurs limites en 2005 puisque leur dissipation par effet Joule pouvait représenter jusqu'à 30 % de la consommation

1. *Simultaneous Multi Threading* : forme de parallélisme pour exploiter au mieux les unités de calcul en leur permettant d'exécuter deux flux d'instructions simultanément.

énergétique totale d'un processeur alors que les communications à "longue distance" (\sim cm) n'étaient pas encore nécessaires. En 2018, nos processeurs peuvent avoir besoin de partager des données avec des cœurs distants d'environ un centimètre environ (fig. 2).

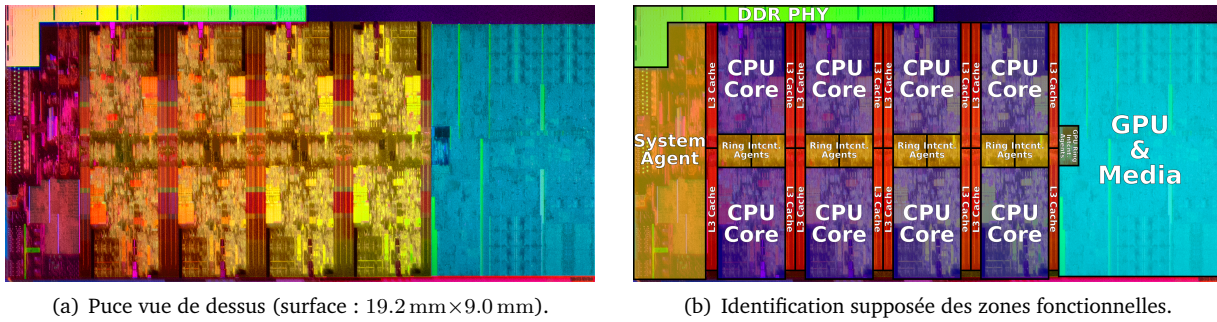


Fig. 2 – Vue de dessus du substrat pour la version 8 cœurs des processeurs de la série *Coffee Lake*, architecture core™ de 8^e génération de chez Intel® sortie en 2018 avec un procédé 14 nm [83].

Pour connecter ces différentes unités de calcul, les liens optiques peuvent s'avérer intéressants puisque la consommation d'une interconnexion devient presque indépendante de la distance. Au contraire, avec des transistors de plus en plus petits, partager des informations entre différentes unités de calcul devient vite coûteux en énergie, surtout lorsqu'il s'agit de communiquer à des distances correspondant à des millions de transistors plus loin. Si le silicium et le germanium constituent deux éléments particulièrement bien adaptés pour la manipulation [62]-[64], le transport [65], [66] et la détection [67], [68] de la lumière dans l'infrarouge autour de $1.55\ \mu\text{m}$, leur gap indirect empêche de les exploiter comme sources LASER, à moins de modifier fortement leur diagramme de bandes [69]. L'objectif premier de mes travaux de thèse a donc consisté à réaliser des microdisques LASER pompés électriquement à base de matériaux III-V reporté sur du silicium [70] par un procédé mis au point au CEA-Leti (fig. 3).

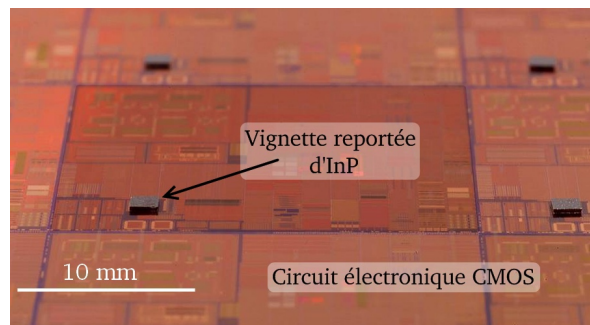


Fig. 3 – Collage de vignettes d'InP sur un wafer 200 mm (CEA-Leti).

Au moment de la soutenance de thèse, différentes architectures avaient été proposées, avec comme principal déficit de contrôler activement un mode LASER particulier. Certaines avaient été dimensionnées très rapidement, sans qu'un modèle théorique prédictif ne décrive leur fonctionnement. Au moment de la soutenance, aucun résultat expérimental n'était disponible, les démonstrateurs étant en cours de fabrication au CEA-Leti. Cependant, ces travaux de recherche, portés par le projet européen FP7-WaDiMOS (2008-2011) ont été marqués par une rude compétition avec Intel®.

Les premiers travaux de recherche en tant que docteur se sont inscrits dans la continuité puisque j'ai participé très activement à l'élaboration des démonstrateurs du projet FP7-WaDiMOS. Ainsi, j'ai réalisé les masques du premier lot d'échantillons de liens complets (sources, guides, routage, détection etc.), avec 12 niveaux de masquages. Quant au second jeu de masques, il a été réalisé par l'IMEC, puisqu'à ce moment là, j'étais sur le point de quitter le laboratoire, avec la fin de mon second contrat d'ATER. Si l'ITRS² détecte l'optique comme une alternative émergente aux pistes métalliques pour les interconnexions internes [71], on constate qu'en 2019 aucun processeur n'est doté d'un circuit optique interne. La principale difficulté réside dans la sensibilité thermique de l'indice optique du silicium ($\beta_{Si} \approx -3.7 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$) [72] : lorsque la sollicitation d'un processeur fluctue et que sa température passe localement de $30\ ^\circ\text{C}$ à $80\ ^\circ\text{C}$, cela décale la position des résonances des éléments de routage³. Ainsi, pour assurer la stabilité du routage des informations, il devient nécessaire de rendre les éléments de routage actifs [73], rendant l'ensemble bien plus complexe à piloter.

En 2011, les avancées en photonique permettaient déjà d'envisager des convertisseurs électro-optiques compacts en vue de fournir une connexion fibrée pour Internet jusqu'au domicile des clients. C'est dans ce contexte

2. *International Technology Roadmap for Semiconductors*. Groupe d'experts internationaux issus de l'industrie micro-électronique dont l'une des tâches consistait à dresser les feuilles de route des technologies utilisées dans les processeurs. En 2016, ce groupe de vient l'*International Roadmap for Devices and Systems (IRDS)*.

3. Un calcul rapide montre qu'une variation de $50\ ^\circ\text{C}$ modifie l'indice du silicium de 0.3% ce qui décale les résonances d'éléments de routage d'environ 4.5 nm.

que j'ai rejoint l'IEF pour un travail post-doctoral sur des photodiodes à avalanche en Si-Ge (ANR-Silver). Celles-ci devaient s'intégrer dans un dispositif hautement intégré (une seule puce) afin de remplacer le boîtier encore actuellement utilisé pour convertir les signaux optiques en signaux électriques, aussi bien pour la détection que l'émission de données. Mes activités de recherche se sont alors davantage orientées vers la simulation électro-optique de composants semi-conducteurs.

... au photovoltaïque à base de silicium

Des contraintes différentes de la micro-électronique

À l'instar des circuits numériques, le silicium est un matériau bien adapté à la conversion d'énergie solaire en énergie électrique. Son gap est proche de la gamme 1.15-1.38 eV théorique qui maximise le rendement de conversion pour une cellule mono-jonction [74]. Contrairement aux photodétecteurs, la polarisation électrique n'est pas imposée par un dispositif extérieur puisque les cellules solaires fonctionnent en régime "générateur" : de l'absence de tension de polarisation externe découle des contraintes électriques plus importantes sur une cellule solaire. En effet, la mobilité des porteurs de charge ne peut pas être accrue par un champ électrique artificiellement augmenté, alors que dans les deux cas il est important que chaque type de porteurs (trous et électrons) soit collecté sur l'électrode adéquat. La longueur de diffusion des électrons et des trous devient donc un critère extrêmement sensible puisqu'on ne dispose pas d'un levier externe pour compenser une distance de parcours importante. Cette propriété est aussi étroitement liée à la durée de vie des porteurs et donc aux défauts (volumiques et surfaciques) constituant autant de lieux recombinants.

Tout comme la micro-électronique, l'industrie solaire est aujourd'hui particulièrement mature avec des installations photovoltaïques de plus en plus nombreuses. La filière silicium domine très largement ce marché et couvre environ 90 % de l'énergie photovoltaïque mondiale [75].

Ces cellules sont déjà très performantes [76] et très proches de la limite théorique que l'on peut atteindre avec le silicium [74], [77] : ainsi les améliorations ne peuvent plus venir du matériau silicium intrinsèquement, mais de nouvelles fonctionnalités ou améliorations que l'on peut apporter en jouant sur la quantité de matériau ou en l'accompagnant d'autres éléments pour lui ajouter de nouvelles fonctionnalités. Pour ces évolutions, il est désormais important de considérer les contraintes environnementales (lieu d'installation, ensoleillement, cycle de vie), légales (règles d'urbanisme et de construction du bâti), techniques (performances), esthétiques (aspect social et perception) et économiques (coût sur le cycle de vie). Connaître les marchés visés est donc particulièrement important.

Le marché du photovoltaïque dans le mix énergétique

Le marché français de l'énergie électrique constitue une exception mondiale avec une forte contribution du nucléaire (Tab. 1). Second producteur mondial en nucléaire après les Etats-Unis, cette situation particulière en fait aussi un des plus grands exportateurs mondiaux d'électricité avec l'Allemagne et le Canada [84]. Cependant, la catastrophe de Fukushima en 2011 a fortement affecté le paysage mondial de la production électrique. Ainsi, l'Allemagne prévoit un abandon complet de la production nucléaire pour 2022 [85] tandis que le Japon n'exploite plus que 3 des 42 réacteurs construits [86].

En France, la pénétration du photovoltaïque dans le mix énergétique (2016) se situe à 1.7 % (6.4 % pour l'Allemagne, malgré une latitude moins favorable) [75] soit un niveau comparable aux bioénergies. Cependant, la loi relative à la transition énergétique [87] impose "de réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % à l'horizon 2025". D'après les données du tableau 1, cela implique de réduire en moyenne de 2.5 % par an la production nucléaire. Ce tableau montre que la production nucléaire est faiblement modulée par les saisons. L'hydraulique est principalement utilisé en début d'année (fonte des neiges des massifs montagneux), tandis que le charbon et le gaz servent d'ajustement, puisque faiblement sollicités en été et très fortement en hiver.

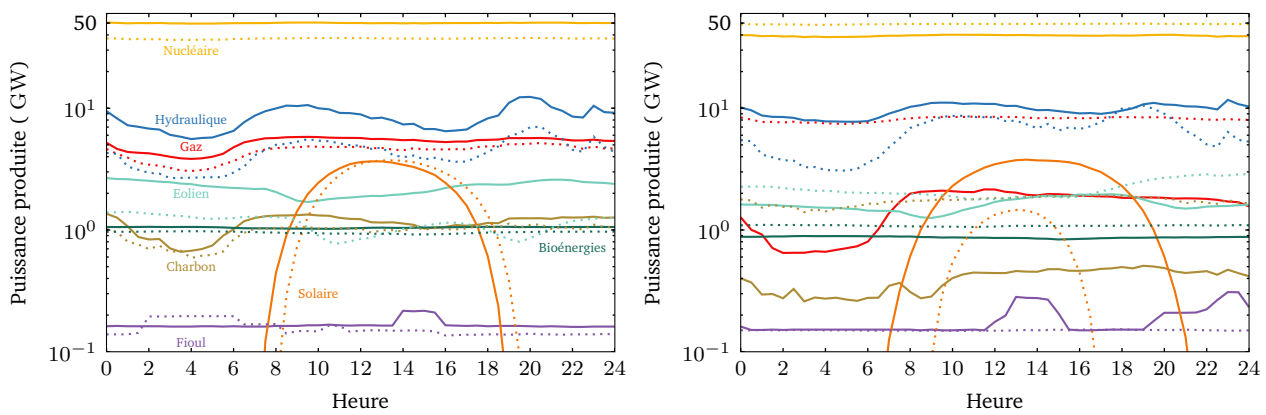
Date	Fioul	Charbon	Gaz	Nucléaire	Éolien	Solaire	Hydraulique	Bioénergies	Total
Equinoxe (20 mars)	4.0 (0.2 %)	27.0 (1.6 %)	125.1 (7.5 %)	1201.7 (72.2 %)	53.8 (3.2 %)	26.0 (1.6 %)	201.2 (12.1 %)	25.2 (1.5 %)	1663.9
Solstice (20 juin)	4.3 (0.3 %)	9.5 (0.7 %)	38.0 (2.9 %)	946.6 (71.5 %)	38.9 (2.9 %)	32.9 (2.5 %)	232.1 (17.5 %)	20.9 (1.6 %)	1323.2
Equinoxe (22 sept.)	3.7 (0.3 %)	23.0 (1.9 %)	106.2 (8.8 %)	895.2 (74.0 %)	26.9 (2.2 %)	26.7 (2.2 %)	104.9 (8.7 %)	22.9 (1.9 %)	1209.5
Solstice (21 déc.)	3.6 (0.2 %)	41.6 (2.5 %)	195.4 (11.8 %)	1178.1 (71.0 %)	52.1 (3.1 %)	7.3 (0.4 %)	154.5 (9.3 %)	26.0 (1.6 %)	1658.6

Tab. 1 – Exemples de production d'énergie journalière (GW h) en France pour l'année 2016, moyennées sur 7 jours pour limiter les aléas météorologiques (Sources des données : [88]).

La figure 4 représente la distribution des différentes sources d'énergie pour les mêmes dates que le tableau 1. On observe clairement la fluctuation de la production photovoltaïque⁴ et un creux de production globale entre

4. Le décalage de 1 h de l'équinoxe de septembre et du solstice d'été est dû au changement d'heure ayant eu lieu les 27 mars et 30 octobre.

2 h et 6 h du matin qui touche principalement les sources hydrauliques, à base de gaz ou de charbon. Cependant, on peut remarquer qu'en plus de produire moins longtemps en hiver, le pic de production photovoltaïque est significativement plus faible (7.3 GW h) que pour les 3 autres journées représentées (>26 GW h).



(a) Equinoxes : 20 mars (traits pleins) et 22 septembre (pointillés). (b) Solstices : 20 juin (traits pleins) et 21 décembre (pointillés).

Fig. 4 – Exemple de distributions journalières des différentes sources d'énergie en France pour l'année 2016 moyennées sur 7 jours pour limiter les aléas météorologiques (Sources des données : [88]).

Ces journées "types" montrent aussi que le nucléaire et le photovoltaïque disposent tous deux d'une production contraignante. En effet, on ne peut moduler leur production en fonction de la consommation : pour le nucléaire, cela s'est traduit par des incitations à consommer de l'énergie la nuit alors que l'être humain reste par nature un être diurne. Nous ne sommes donc pas étonnés en France de connaître des heures "creuses" la nuit qui visent particulièrement le chauffage d'eau sanitaire ou d'habitat, même si les rendements restent faibles [78]. Pour des raisons écologiques, ces solutions tendent à disparaître des nouvelles constructions, qui deviennent de mieux en mieux isolées et profitent d'alternatives bien plus efficaces. Très prochainement, la Réglementation Thermique 2020 (RT 2020) imposera que les Bâtiments soient à Énergie passive ou POSitive (BEPOS) : dans ce second cas, l'énergie photovoltaïque est une des rares solutions renouvelables à pouvoir être installée sur n'importe quel bâti du territoire.

La figure 4 soulève aussi la question des performances en conditions réelles. Si la distance terre-soleil et l'inclinaison du soleil modulent la production d'énergie à une position donnée, d'autres paramètres sont à prendre en compte : la température réelle d'un module est très éloignée des 25 °C des conditions standards STC⁵ où le vent peut modifier significativement les conditions de convection thermique. De même, la convection naturelle (ou forcée) peut être plus ou moins favorisée dans le bâti. La recherche peut donc tenter de répondre à cette problématique en développant des cellules et des modules moins sensibles à la température.

Si le photovoltaïque semble mieux adapté à l'activité humaine, il ne faut toutefois pas occulter l'intermittence de cette source d'énergie qui nécessite soit de recourir à d'autres sources de production, soit à des batteries selon les types d'installation. Si la Chine (26 %), le Japon (14 %), l'Allemagne (14 %) et les USA (13 %) représentent près des 3/4 de la production électrique solaire mondiale en 2016 [75], on distingue trois types d'installations :

1. les installations hors réseaux déconnectées de tout système de distribution à longue distance. En Afrique principalement, cette solution est potentiellement plus compétitive que l'utilisation de génératrices diesel dans les zones rurales [79] tant que le niveau de vie suffit pour les installer [80].
2. les installations connectées au réseau mais centralisées sous forme de fermes ou de centrales photovoltaïques. À l'échelle mondiale, c'est la solution qui produit le plus d'énergie [75]. Les installations hybrides hors réseaux tirant profit de différentes sources d'énergie limitent le besoin de batteries [81].
3. les installations connectées au réseau mais distribuées. Cette solution, davantage privilégiée que les fermes en Europe [75], permet de nettement réduire l'influence de la météo sur la production [82].

Dans la plupart des pays développés, ce sont surtout les deuxième et troisième types qui dominent de plus en plus le marché [75] car ils permettent d'exploiter le réseau d'alimentation déjà en place. De plus, ces solutions ne nécessitent que très peu d'unités de stockage d'énergie (batteries couplées à des onduleurs) puisqu'en l'absence de soleil les autres moyens de production connectés au réseau peuvent s'adapter à la demande.

Si la part du photovoltaïque continue d'augmenter, nous serons probablement contraints de changer de modèle économique. Peut-être verrons-nous des heures "creuses" en pleine journée ? Comme nous l'avons déjà réalisé avec le nucléaire, à défaut de pouvoir adapter la production à la consommation d'énergie, nous pouvons désormais compter sur l'intelligence électronique pour adapter la consommation au mieux. Cette intelligence peut permettre de déclencher certains équipements par programmation ou encore d'utiliser les batteries des voitures comme "tampons" énergétiques lors des pics de fin de journée, quitte à les recharger plus tard. Des tests sont déjà en cours au Japon [89].

L'installation du photovoltaïque dans notre quotidien implique différentes contraintes. Le chercheur intervient alors pour proposer des solutions innovantes et performantes.

5. Standard Test Conditions

Axes de recherche

Les travaux de recherche que j'ai mené concernent le silicium, utilisé comme matériau en micro-électronique ou pour la conversion d'énergie solaire. La première partie de ce manuscrit abordera les travaux de recherche réalisés suite à ma thèse de doctorat en photonique intégrée. Cette période d'un peu moins de 2 ans a été très riche en production scientifique puisqu'elle m'a permis de tirer profit de nombreux concepts esquissés pendant la thèse et généralisés par la suite. En guise de transition vers le photovoltaïque, cette première partie se terminera avec l'étude de photodiodes à avalanche en Si-Ge pour des applications Telecom.

La deuxième partie de ce manuscrit se concentrera sur mes activités en tant que maître de conférences à l'[INL](#) en photovoltaïque. Ici, mes compétences en simulation électro-optique et sur les technologies à base de silicium ont été d'abord mises à profit pour étudier des cellules amincies et pour compenser le manque de matériau par une meilleure gestion des photons à l'aide de cristaux photoniques. Cependant, pour aller au delà des performances du silicium seul, d'autres pistes seront explorées : notamment l'étude de cellules tandem (à nanofils, en couche plane...), de cellules intégrées et de la couleur. La ligne directrice restera le matériau silicium auquel on adjoint de nouvelles propriétés, qu'on améliore grâce à la structuration, à la combinaison avec d'autres matériaux etc.

Enfin, la dernière partie évoquera ma contribution à la formation de doctorants et d'ingénieur à l'[INSA de Lyon](#). Nous verrons qu'à travers les Projets de Fin d'Étude, la frontière entre les activités d'enseignement et de recherche est très étroite. Mes contributions auprès du département [SGM](#) ont été régulières depuis mon arrivée avec la mise en place de plusieurs nouveaux enseignements.

Chapitre 1

De la photonique intégrée aux photodétecteurs en silicium

DE part son gap indirect, il est extrêmement difficile de réaliser un LASER à base de silicium [69]. Ce matériau, qui sert de base à la micro-électronique, est pourtant un excellent conducteur de lumière dans l'infrarouge autour de $1.55\ \mu\text{m}$ [62]-[65]. Associé au germanium, il permet également d'obtenir des détecteurs performants [67], [68]. Afin d'intégrer des interconnexions optiques dans des puces à base de silicium, une stratégie consistant à coller des vignettes de semi-conducteurs III-V à gap direct sur du Si a été développée dans le projet européen FP6-PICMOS (2004-2007).

Mon travail en tant que doctorant puis en tant qu'ATER s'est inscrit dans la continuité de ce projet en optimisant l'injection électrique et les propriétés d'émission de micro-LASERs.

1.1 Contexte des travaux de thèse en photonique intégrée (2005-2009)

1.1.1 Les résonateurs à modes de galerie

Parmi les LASERs de forte compacité (quelques μm de rayon) exploitant des cavités aux facteurs de qualité extrêmes (plusieurs millions), les résonateurs à base de microdisques [90] sont des candidats particulièrement intéressants. Ils sont le siège de "modes de galerie" (notés WGM¹) dont le champ électromagnétique est localisé en bordure de résonateur (fig. 1.1). En optique géométrique, il s'agit de modes se propageant à l'intérieur d'un milieu de fort indice (disque, anneau, stade etc.) et se réfléchissant à chacune des interfaces extérieures. Lorsque le chemin optique sur un tour satisfait une condition de réflexion totale interne, il apparaît une résonance comme dans une cavité Fabry-Perot [91] entre deux miroirs. Ces modes (fig. 1.1) sont aisément identifiables :

- par leur polarisation TE ou TM selon la direction principale adoptée par le champ électrique.
- par leurs ordres radial, azimutal et vertical (l, m, n) qui correspondent au nombre de nœuds radialement, à la périodicité en bordure de résonateur, et au nombre de nœuds verticalement.

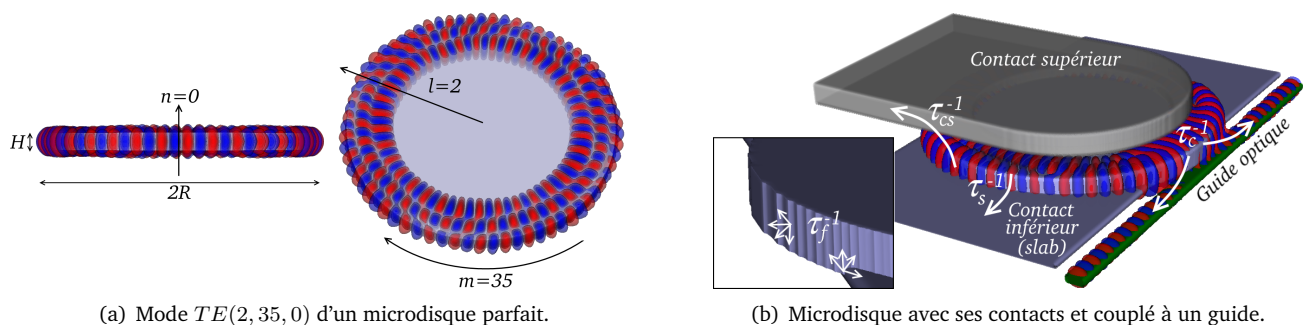


Fig. 1.1 – Exemples de modes de galerie.

Les modes pour lesquels seul m varie sont théoriquement équidistants dans l'espace des fréquences, ce qui permet de les considérer sous forme de peigne $P_{l,n}$ caractérisé par la distance fréquentielle entre chaque mode, appelée *Free Spectral Range* (FSR) [92]. Pour des microdisques III-V de rayon R dans de la silice, ce FSR est plus étroit que la largeur spectrale d'émission du matériau à gain dès que $R > 2\ \mu\text{m}$: plusieurs modes d'un même peigne peuvent donc entrer en compétition. Cependant, les modes de $P_{0,0}$ présentent les pertes intrinsèques les plus faibles et le confinement en périphérie le plus fort : ce sont donc les meilleurs candidats pour réaliser un LASER. Afin de réduire le seuil LASER et contrôler sa longueur d'onde d'émission, il est donc nécessaire :

1. *Whispering Gallery Mode* : le terme anglais suggère davantage leur mise en évidence dans le domaine de l'acoustique dans la cathédrale St Paul à Londres par Lord Rayleigh (1842-1919) en 1878.

- de diminuer la densité spectrale de modes en préservant un fort facteur de qualité uniquement aux modes à faible valeur de l et n : idéalement, favoriser $P_{0,0}$.
- d'optimiser le couplage à des guides optiques pour sélectionner un mode particulier de $P_{0,0}$.

La première stratégie a été au cœur de mes travaux de thèse et a montré qu'on pouvait tirer profit de certains éléments perturbateurs (contacts) qui sont nécessaires pour un microdisque intégré pompé électriquement (fig. 1.1(b)). La seconde stratégie a été davantage développée dans le cadre du projet européen FP7-WaDiMOS lors des deux postes d'ATER et visait à mieux exploiter les seules pertes potentiellement utiles, à savoir celles induites par le couplage pour le mode sélectionné.

1.1.2 Réduction de la densité spectrale de modes et géométrie des contacts

Les microdisques présentés par la suite ont tous été fabriqués dans une couche épitaxiée sur InP (INL, équipe Hétéroépitaxie et Nanostructures) puis reportée par collage moléculaire sur un substrat de type SOI² préalablement travaillé pour contenir les guides pour le routage optique (CEA-Leti). Grâce à la plateforme NanoLyon, j'ai mis au point les différentes étapes à l'INL puis j'ai transféré mon expérience au CEA-Leti pour réaliser des composants avec une bien meilleure reproductibilité. Si, à l'INL, j'ai utilisé des contacts à base d'or et d'ITO³, cette technologie est incompatible avec la micro-électronique CMOS, l'or induisant des niveaux de défauts profonds dans le Si. Le CEA-Leti a donc mis au point des contacts à base de Ti/TiN non recuit pour ne pas détériorer les puits quantiques.

L'empilement, une fois reporté sur SOI et après retrait du substrat d'InP et d'une couche sacrificielle d'InGaAs (gravée chimiquement), correspond à la figure 1.2. La membrane de hauteur H est suffisamment mince pour limiter l'ordre vertical n à 0 ou 1. Cependant, la position centrale des puits quantiques garantit une excellente injection dans les peignes $P_{l,0}$ et une très mauvaise pour $P_{l,1}$ puisque placés sur un nœud.

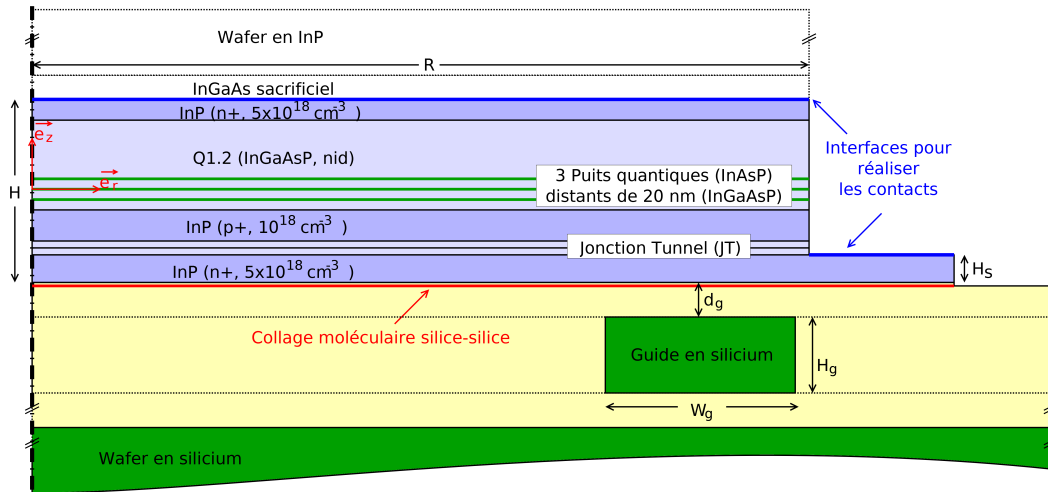
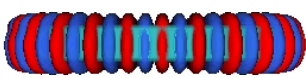
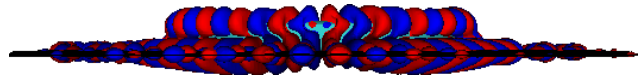


Fig. 1.2 – Vue à l'échelle de la structure à base d'InP la plus mince ($H \approx 0.5 \mu\text{m}$ et $R \approx 2.5 \mu\text{m}$).

L'ensemble forme une structure p-i-n avec une jonction tunnel pour le contact inférieur. Cette astuce technologique permet d'utiliser une seule étape de métallisation sur des couches d'InP dopées n^+ , évitant ainsi le contact p^+ généralement plus résistif. Le contact inférieur correspond à une couche dopée n^+ en InP (slab) dont l'épaisseur H_s (fig. 1.2) peut difficilement descendre en dessous de 80 nm pour des raisons électriques (résistivité). Au premier ordre, la présence de cet élément revient à considérer que le mode de galerie est moins confiné dans la direction radiale (fig. 1.3), avec une extension caractéristique W_{sp} et un taux de pertes τ_s^{-1} (fig. 1.1(b)).



(a) Microdisque de 500 nm de hauteur et $2.5 \mu\text{m}$ de rayon.



(b) Même résonateur avec un slab de 100 nm de haut.

Fig. 1.3 – Distribution de la composante principale de l'excitation magnétique pour un même mode de galerie.

Le contact supérieur comporte deux parties conductrices et donc absorbantes :

- le via (en rouge dans les inserts en fig. 1.4) directement en contact avec le résonateur. Il s'agit de trouver un compromis entre les pertes par absorption et l'efficacité de l'injection électrique.
- le tab⁴ (rose) qui relie le via au reste du circuit électrique et passe au dessus du résonateur.

Grâce à un modèle semi-analytique basé sur les équations de Maxwell et une méthode perturbative [93]-[97], on peut estimer le taux de pertes τ_{cs}^{-1} par absorption dans le contact supérieur (fig. 1.1(b)) en quelques ms au lieu de plusieurs jours en FDTD⁵ 3D. L'exemple en fig. 1.4 montre que pour une cavité de rayon $R = 2.5 \mu\text{m}$, avec

2. Silicon On Insulator : fine couche de Si monocristallin reporté sur un substrat de Si avec une couche tampon de silice thermique.

3. Indium Tin Oxyde.

4. Languette : portion étroite de matériau venant contacter un élément (ici la partie supérieure du microdisque).

5. Finite Difference Time Domain : méthode des différences finies dans le domaine temporel pour résoudre les équations de Maxwell.

un via de rayon $R_c = 1.8 \mu\text{m}$ distançant le *tab* du résonateur d'au moins $H_c = 250 \text{ nm}$, on peut favoriser le mode $TE(0, 25, 0)$ en lui affectant un taux de pertes 30 à 90 fois plus faible que pour les autres modes.

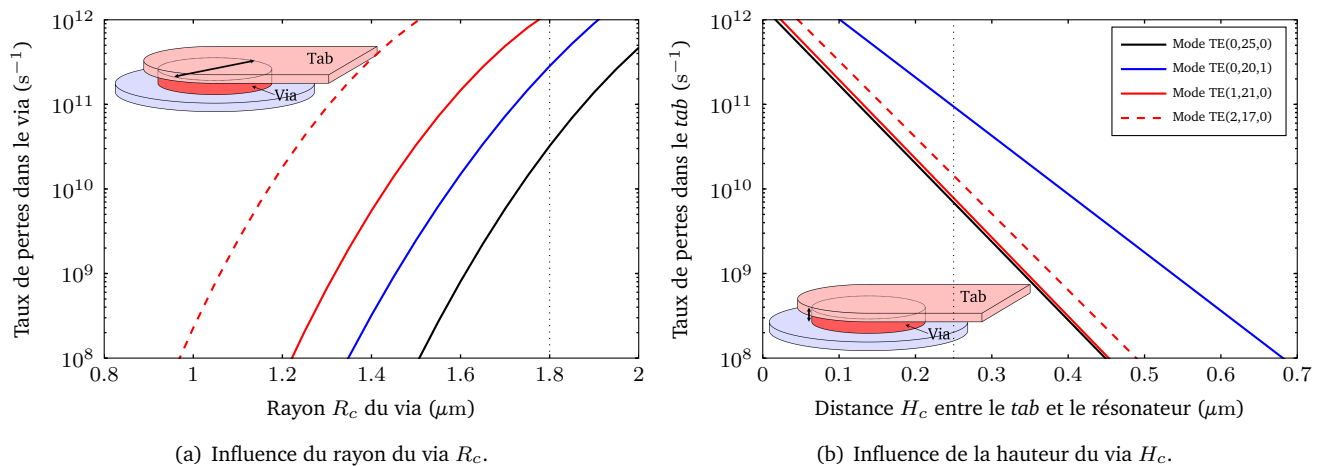


Fig. 1.4 – Évolution des pertes en fonction des principaux paramètres géométriques (modes proches de $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, résonateur en InP de $2.5 \mu\text{m}$ de rayon et 550 nm de hauteur encapsulé dans de la silice avec un contact en ITO).

La neutralisation de la partie centrale du résonateur par un matériau de bas indice permet à la fois de réduire la densité spectrale de modes (en limitant l'ordre radial l) [94], [98], tout en permettant le passage du contact supérieur au centre du résonateur (fig. 1.5). Il n'y a donc plus de pertes dans le *tab* et l'injection électrique est mieux adaptée à la géométrie du résonateur. L'absence de *tab* passant au dessus du mode de galerie permet de diminuer H_c et d'augmenter R_c à facteur de qualité identique, et confine le mode de galerie entre R_c et R .

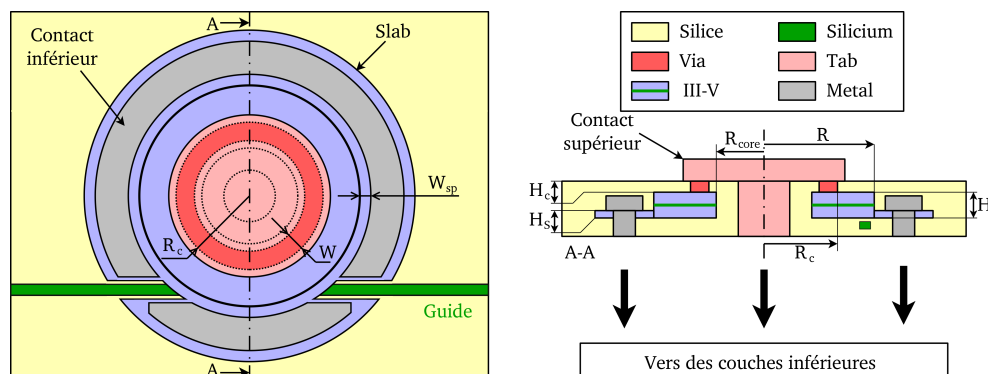


Fig. 1.5 – Description d'un disque creux avec ses contacts et un guide optique pour la collecte de la lumière. Les variables indiquées correspondent aux paramètres à optimiser [99], [100].

Cette configuration, qui suppose que les éléments optiques sont placés au dessus d'un circuit électronique, a fait l'objet d'un brevet [101] étendu à l'international [102].

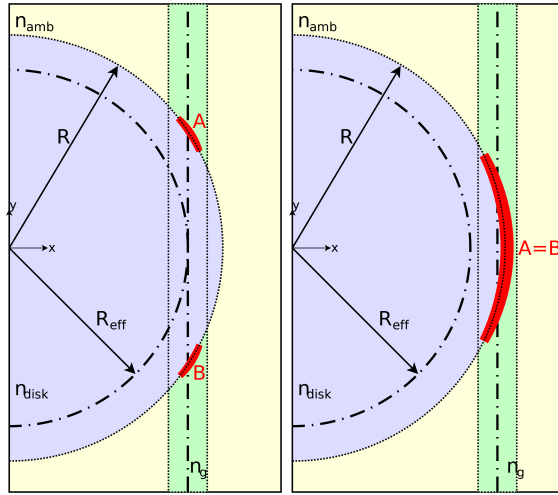
1.1.3 Travaux de modélisation autour du couplage et de la sélection de modes

Précédemment, des pertes non désirées ont été exploitées pour favoriser le peigne $P_{0,0}$. Malheureusement, la largeur spectrale d'émission des puits quantiques ne permet pas de sélectionner un seul mode de ce peigne, puisque cette dernière est largement supérieure au FSR pour des disques de quelques microns de rayon. Il est donc nécessaire de sélectionner un mode particulier en fonction de son ordre azimutal m .

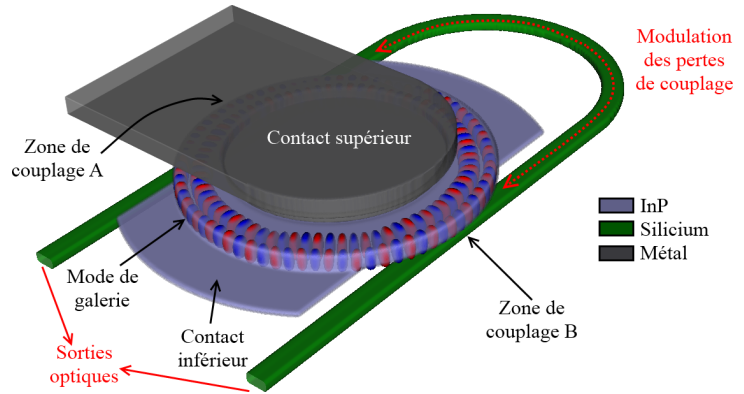
L'étude du couplage [99], [100] et la théorie des modes couplés ont révélé des phénomènes d'interférences entre deux zones principales d'interactions (en rouge sur fig. 1.6(a)) n'intervenant pas dans le cas du couplage latéral entre un résonateur et un guide. Nous avons démontré [13] qu'il est possible de faire apparaître un taux de couplage effectif $\tau_{c_{eff}}^{-1} = \tau_c^{-1} \cdot \cos(\Delta\phi_{AB})$, avec τ_c^{-1} le taux de couplage local en A ou en B. Ici, $\Delta\phi_{AB}$ est le déphasage entre les chemins optiques séparant les deux zones de couplage A et B en parcourant le résonateur ou le guide (fig. 1.6). Pour augmenter le chemin AB dans le guide, on peut placer ce dernier davantage vers l'extérieur (cas de droite de la figure 1.6(a)) et ainsi placer A et B sur un diamètre (fig. 1.6(b)). Ce déphasage $\Delta\phi_{AB}$ peut être utilisé pour sélectionner un mode particulier de $P_{0,0}$.

1.1.4 État des lieux à l'issue de la soutenance de thèse (nov. 2009)

Le manuscrit de thèse [70] évoquait la possibilité de contrôler $\Delta\phi_{AB}$ activement et indépendamment de la pompe pour permettre à un LASER d'émettre à différentes longueurs d'onde. Une variante de la géométrie de la fig. 1.6(b) a fait l'objet d'un brevet national [103] et international [104] avec le CEA-Leti, dans le cas particulier



(a) Représentation des zones de couplage (en rouge), en fonction de la position du guide.



(b) Micro LASER avec sélection de l'ordre azimutal (à l'échelle pour un résonateur de $4\mu\text{m}$ de rayon).

Fig. 1.6 – De l'étude du couplage "local" à une structure couplée en deux points distants.

où les deux sorties sont connectées à un coupleur 2 vers 1. Au moment de la soutenance, ces prototypes étaient donc en cours de fabrication au [CEA-Leti](#) qui, contrairement à l'[INL](#), disposait d'équipements de photolithographie UV dont la précision d'alignement permettait de placer correctement le via du contact supérieur.

1.1.5 Encadrements

Durant l'été 2008, j'ai encadré une stagiaire (M1) chargée des mesures électro-optiques des échantillons que j'avais fabriqués à l'[INL](#). L'objectif était de valider l'enchaînement des étapes de fabrication et montrer la possibilité d'utiliser l'ITO (compatible CMOS) pour contacter les microdisques.

Un second stagiaire (été 2009, M1) a caractérisé les échantillons dimensionnés en 2008 pour le projet [WaDiMOS](#) : ces structures (sans contrôle de $\Delta\phi_{AB}$) ont donné les premiers LASERS à base de microdisques compatibles CMOS à fonctionner en régime continu [24].

1.2 Prolongement des travaux de thèse (ATER - 2009-2010)

1.2.1 Objectifs et contexte de recherche

La seconde année d'ATER à l'[INL](#) a été particulièrement productive. Elle a permis d'approfondir des concepts de sélection active de mode LASER dans le peigne $P_{0,0}$, comme exposé théoriquement dans le manuscrit : pour des circuits optiques multiplexés en longueur d'onde, une même source LASER peut alors être configurée à la volée en fonction du (des) destinataire(s) des informations à transmettre.

Un autre aspect de l'ajustement de la longueur d'onde d'émission d'un mode sélectionné consiste à compenser les variations de température. En effet, dans un circuit numérique tel un processeur, la température locale peut varier de plusieurs dizaines de degrés en quelques ms, modifiant l'indice optique des différents matériaux [72] et donc les réponses des différents composants optiques, plus particulièrement les résonateurs. Il est alors indispensable que les LASERS et les éléments de routage soient accordés entre eux [105].

Ces deux points ont été étudiés et financés par le projet européen [FP7-WaDiMOS](#) dans lequel j'intervenais avec l'[IMEC](#) pour les LASERS, afin de fabriquer des circuits photoniques complets au [CEA-Leti](#).

1.2.2 Moyens techniques mis en œuvre

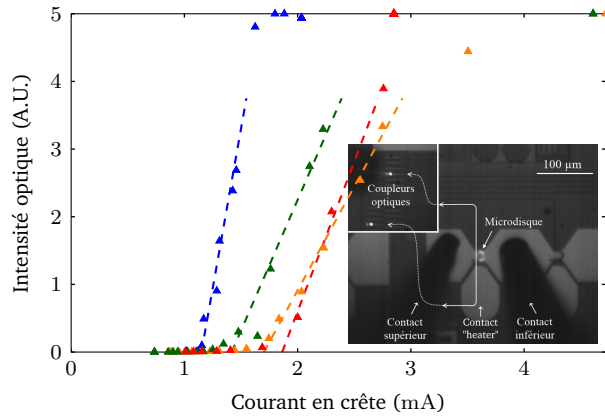
Pendant la thèse, les travaux de simulation ont été rythmés par les périodes de fabrication d'échantillons au [CEA-Leti](#). Avec le projet [FP7-WaDiMOS](#), j'ai mis à profit mes propres outils prédictifs de conception pour dimensionner rapidement les microdisques puis j'ai affiné leurs géométries par FDTD avec un cluster de calcul et des outils de post-traitement (Matlab, [Harminv](#), Origin etc).

Dans le cadre de ma thèse, je ne suis intervenu au [CEA-Leti](#) que dans la conception (dessin des masques) et le choix des étapes de fabrication. Cette expérience a été fructueusement utilisée pour réaliser des circuits photoniques complets dans le cadre de [WaDiMOS](#), incluant donc les éléments de routage, de détection et de test (pendant la fabrication elle-même ou lors des caractérisations finales). Ce travail de conception fut mené en très étroite collaboration avec l'[IMEC](#) et l'ensemble des composants fut fonctionnel malgré l'enchaînement d'une douzaine d'étapes photo-lithographiques. La seconde et dernière version de circuit photonique complet a été réalisée principalement par l'[IMEC](#) qui disposait d'un outil partiellement automatisé.

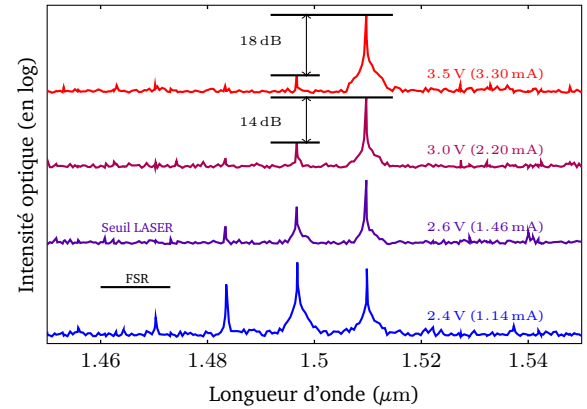
Les échantillons ont été caractérisés sur un banc développé pendant ma thèse. Ceux reçus durant la période post-doctorale furent les premiers LASERS produits sur une chaîne de fabrication CMOS.

1.2.3 Premiers résultats expérimentaux : LASERs fonctionnels

La réduction de la densité spectrale de modes par optimisation géométrique du contact supérieur et du résonateur "creux" a été expérimentalement démontrée, puisque sous le seuil LASER un seul peigne de modes est présent (fig. 1.7(b)) à savoir $P_{0,0}$. Ces sources, fabriquées au début du projet, ont montré une excellente robustesse fonctionnant en régime continu à température ambiante (fig. 1.7(a)). En régime pulsé (20 ns avec un taux de répétition de 1 MHz), leur longueur d'onde d'émission subit un *red-shift*⁶ maximal de 30 pm avec une pompe de 30 mW [21]. Les résonateurs les plus petits ($3.5 \mu\text{m}$ de rayon) ont atteint le régime LASER avec $950 \mu\text{A}$ et 1.75 V.



(a) Caractéristiques électriques pour différentes conditions de couplage (disques de $3.5 \mu\text{m}$ de rayon).



(b) Spectres pour un disque de $7.5 \mu\text{m}$ de rayon.

Fig. 1.7 – Quelques résultats expérimentaux ayant conduit au régime LASER (à pompe constante).

1.2.4 Microdisques et saut de mode contrôlé : structure en "raquette"

Sur le même lot d'échantillons, nous avons étudié le contrôle actif du déphasage $\Delta\phi_{AB}$ grâce à une troisième électrode permettant de contrôler un *heater*⁷ (insert dans fig. 1.7(a)). Ces structures (fig. 1.8) étaient loin d'être optimales [106] car le *heater*, placé le long du chemin optique A-B, est assez court : cela implique de fortement le chauffer pour obtenir un déphasage suffisant. Les zones de couplage sont peu étendues, limitant la valeur de τ_c^{-1} et bridant l'efficacité du dispositif. Par contre, tous les paramètres géométriques des contacts (R_{core} , R_c , H_c , W_{sp} etc.) avaient été optimisés selon les travaux réalisés pendant la thèse.

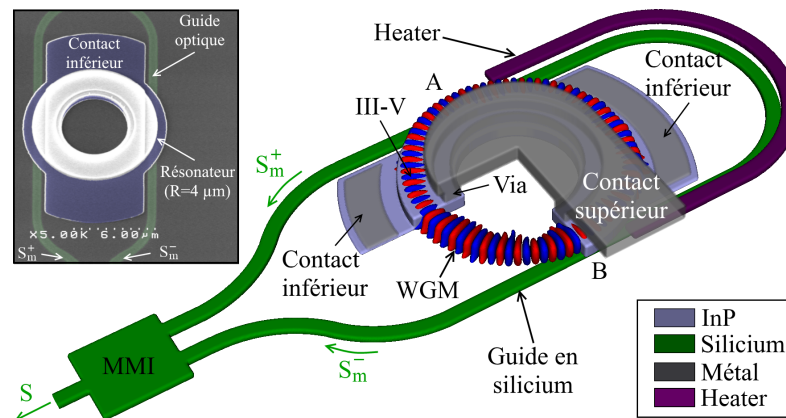


Fig. 1.8 – Structure caractérisée avec des guides Si en forme de raquette [106] (Image MEB en cours de fabrication en insert).

Nous avons pu sélectionner le mode LASER (λ_1 ou λ_2) en fonction de la puissance de chauffe du *heater* (fig. 1.9). Ainsi, entre 9.5 et 24.5 mW, c'est λ_1 qui permet le régime LASER et c'est λ_2 qui est actif au repos ou pour des puissances de chauffe plus importantes. Lorsque les pertes effectives sont équivalentes, les deux modes entrent en compétition, résultant en une émission bi mode particulièrement stable (fig. 1.9(b)) : un ajustement manuel à l'échelle de la seconde suffit à équilibrer la puissance émise. Ce comportement est compatible avec la simulation FDTD 2D [92]. Dans ce cas particulier, nous avons obtenu un seuil LASER plus faible (-12% en courant [10]) que pour chacun des modes λ_1 et λ_2 pris individuellement. Pour un mode stationnaire du peigne $P_{0,0}$, son ordre azimutal m implique $2 \cdot m$ nœuds où les photons générés ne contribuent pas à exciter les modes désirés : une partie du volume du matériau à gain n'est pas bien exploitée. Avec 2 modes stationnaires simultanés, il y a au plus 2 nœuds et donc une meilleure interaction entre le matériau à gain et les modes LASER.

6. Décalage vers le rouge de la longueur d'onde d'émission à cause de l'auto-échauffement.

7. Micro-chaufferette exploitant l'effet Joule.

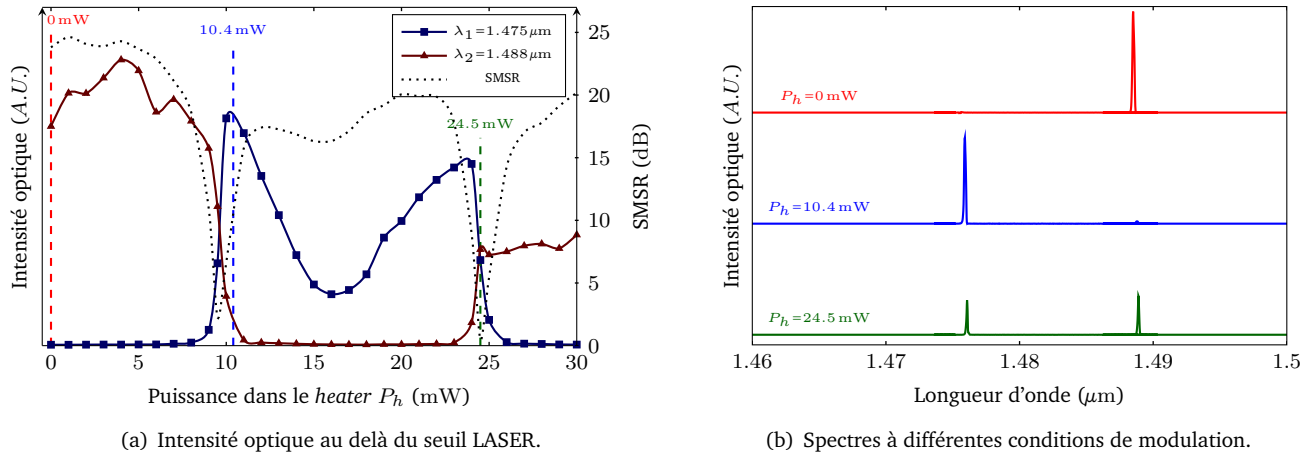


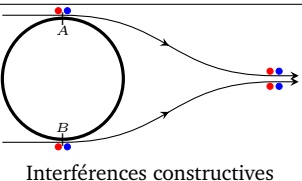
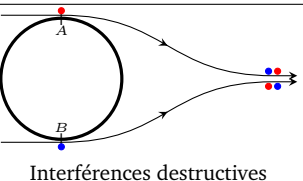
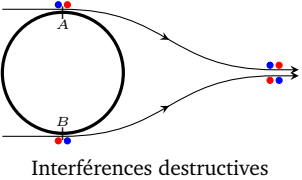
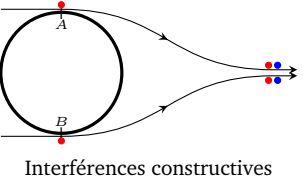
Fig. 1.9 – Mesures électro-optiques sur un microdisque de $7.5 \mu\text{m}$ de rayon avec un contrôle des pertes effectives de couplage par effet thermique (mesures en régime pulsé, avec des pulses de 20 ns tous les 1 μs).

La sélectivité d'un mode par rapport à l'autre est élevée, avec des SMSR⁸ de plus de 20 dB. L'influence thermique du *heater* est légèrement supérieure à celui de la pompe elle même⁹, puisque cette dernière induit un décalage vers le rouge de 8 pm mW^{-1} contre 16 pm mW^{-1} [10].

1.2.5 Améliorations des performances électro-optiques

Avec un délai de fabrication de 6 à 12 mois, il a fallu prendre en compte les résultats de modélisation du couplage alors même que les résultats expérimentaux de la précédente génération de microdisques (paragraphe précédent) n'étaient pas encore disponibles. Ainsi, différents échantillons ont été dimensionnés fin 2009 pour une fabrication durant l'année 2010.

Par rapport à la génération précédente, les améliorations portent sur la position du guide pour renforcer le couplage, ainsi que la forme de ce dernier sous le résonateur puisque les guides épousent localement la courbure du résonateur. Pour obtenir une unique sortie optique, nous avons eu recours à un coupleur 2 vers 1 de type MMI¹⁰. Hélas, selon la symétrie obtenue sur les zones de couplage *A* et *B*, on peut alors obtenir des interférences constructives (le signal sort du coupleur) ou destructives (aucun signal ne sort), comme illustré par le tableau 1.1.

Ordre azimutal m	Couplage antisymétrique	Couplage symétrique
Impair	 Interférences constructives	 Interférences destructives
Pair	 Interférences destructives	 Interférences constructives

Tab. 1.1 – Conditions d'interférences pour la lumière se propageant en direction d'un coupleur 2 vers 1 (les points rouges et bleus représentent les lobes positifs ou négatifs du mode considéré).

Pour favoriser (arbitrairement) un couplage symétrique, nous avons introduit un léger défaut dans le guide sur l'une des deux zones de couplage (insert de la fig. 1.10(a)), ce qui autorise uniquement les modes d'ordre azimutal m pair à sortir du MMI. La surface du contact inférieur a été maximisée pour une meilleure injection électrique. Pour améliorer le contrôle en longueur d'onde, la portion de guide entre les zones de couplage *A* et *B* a été rallongée, tout comme le *heater* qui en modifie l'indice optique. Des résonateurs en forme de stade (fig. 1.10) ont aussi été dimensionnés pour encore augmenter τ_c^{-1} et donc accroître l'efficacité de sélection d'un mode, grâce à des zones de couplage étendues. Pour renforcer davantage τ_c^{-1} , la distance entre les guides et les résonateurs a été réduite jusqu'à 55 nm selon les *wafers*¹¹ par un procédé de CMP¹² avant le collage du matériau actif.

À FSR identique, ces résonateurs en forme de stade présentent de nombreux avantages :

- les portions droites permettent de facilement dimensionner le couplage avec les guides.

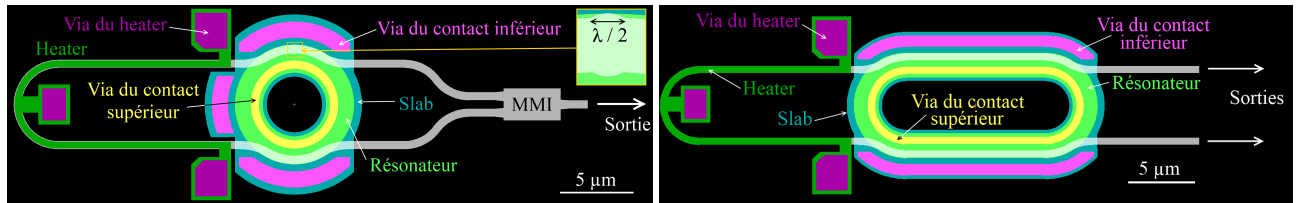
8. Side Mode Suppression Ratio : comparaison entre l'intensité du pic principal émis et celle du pic parasite le plus intense.

9. Attention : régime pulsé pour la pompe avec un rapport cyclique de 2 % et régime continu pour le *heater*.

10. MultiMode Interferometer : dispositif optique compact à interférences permettant de rediriger m entrées vers n sorties [107], [108].

11. Plaquette, jusqu'à 300 mm de diamètre pour le silicium dans l'industrie micro-électronique.

12. Chemical-Mechanical Planarization : procédé à la fois mécanique et chimique permettant de polir un substrat.



(a) Microdisque de $3.75\mu\text{m}$ de rayon avec un coupleur MMI.

(b) Stade de même rayon avec des portions droites de $10\mu\text{m}$.

Fig. 1.10 – GDS pour différents résonateurs dessinés fin 2009, exploitant un noyau de bas indice, des contacts optimisés, un couplage renforcé et un heater pour contrôler le mode LASER.

- la symétrie du mode dans les portions droites assure une meilleure robustesse aux erreurs d'alignement entre les guides et le résonateur.
- les contacts occupent une grande portion de périphérie, facilitant l'injection électrique.

Les échantillons sont parvenus à l'INL peu après mon départ (nov. 2010) pour l'Institut d'Électronique Fondamentale (IEF) et ont été caractérisés par L. Ferrier (post doc). Ils ont permis d'obtenir des LASERs avec un seuil correspondant à $780\mu\text{W}$ ($570\mu\text{A}$ et 1.36V sur la figure 1.11), avec un résonateur circulaire de rayon $3.75\mu\text{m}$ (fig. 1.10(a)). Ce record a validé l'un des objectifs du projet FP7-WaDiMOS, à savoir obtenir des sources avec un seuil inférieur à 1mW pour une tension entre 1 et 2V .

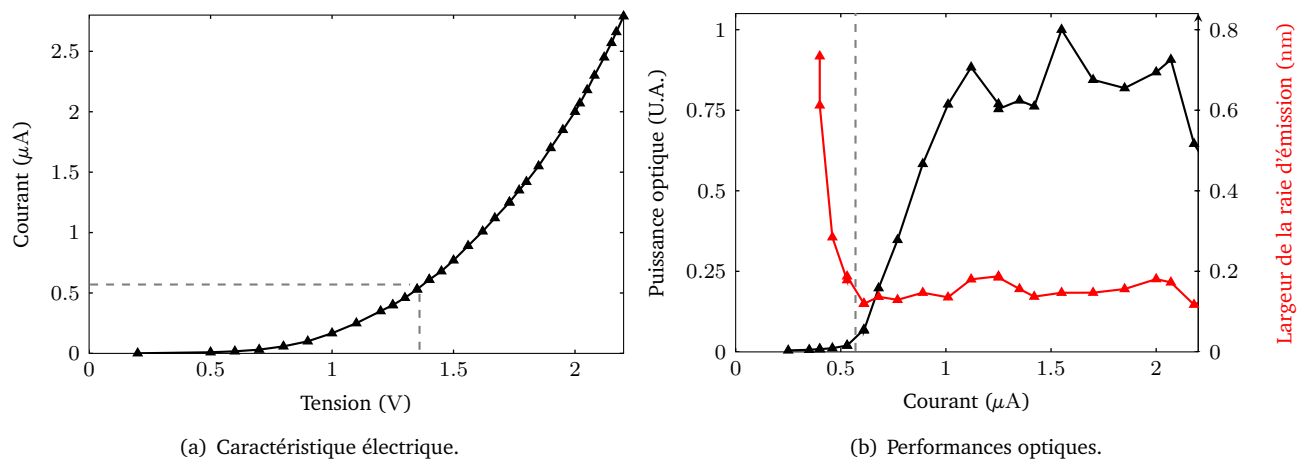


Fig. 1.11 – Performances d'un micro LASER pompé électriquement de rayon $3.75\mu\text{m}$ avec un seuil de $780\mu\text{W}$.

1.2.6 Vers des microdisques asservis en longueur d'onde

Des structures exploitant un miroir en cristal photonique et une unique zone de couplage ont été dimensionnées à la va-vite avec les structures en "raquette" puisque leurs étapes de fabrication étaient compatibles pour peu que les trous du miroir soient suffisamment gros pour être photolithographiés en DUV¹³ (fig. 1.12).

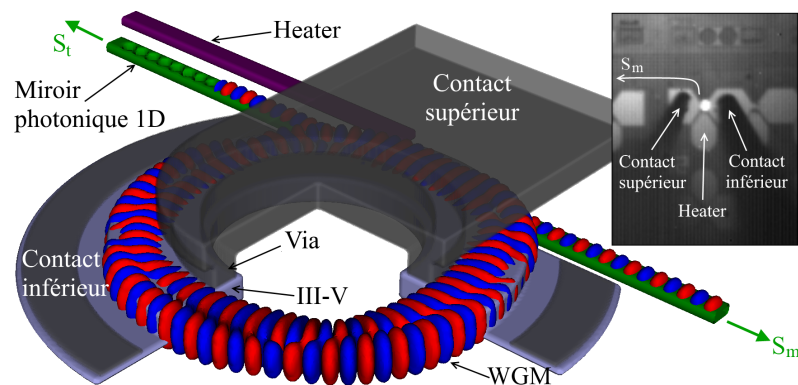


Fig. 1.12 – Représentation 3D d'une structure à unique zone de couplage et miroir photonique.

Cette architecture a cependant été écartée pour le second jeu d'échantillons du projet FP7-WaDiMOS (partie 1.2.5) puisque nous avons impérativement besoin de maîtriser le comportement des sources optiques, quitte à ce qu'elles ne soient pas les plus performantes possibles. En effet, faute de modèle théorique prédictif, le fonctionnement était alors insuffisamment maîtrisé. Pire, ces structures comportaient une erreur de conception

13. Deep Ultra Violet : longueurs d'ondes entre 193nm et 248nm .

qui ne permettait pas de profiter des avantages de cette alternative. Ce n'est qu'en 2011 (2 ans plus tard) que nous sommes parvenus à élaborer un modèle général pour décrire les deux types de structures [10].

1.2.6.1 Modèle théorique général

Le modèle général s'appuie sur une cavité (taux de pertes intrinsèques τ_0^{-1}) couplée en deux zones (A et B avec un même taux de couplage τ_c^{-1}) où une partie du signal issu d'un des points de couplage est réinjectée dans le résonateur ou transmise vers une sortie (fig. 1.13). Il est particulièrement adapté pour décrire les modes propagatifs des microdisques et, par extension, les modes stationnaires¹⁴, tout en généralisant les travaux présentés dans le manuscrit de thèse [70].

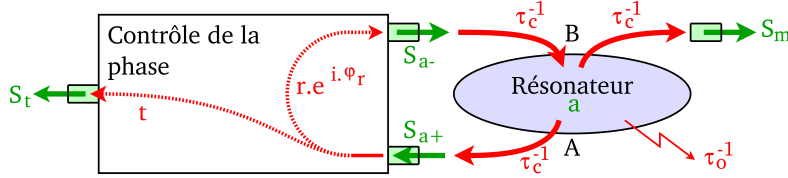


Fig. 1.13 – Modèle général de résonateur avec rétro-action, de pulsation intrinsèque ω_0 .

Le signal réinjecté peut être déphasé de ϕ_r dans le guide entre A et B et éventuellement être atténué d'un coefficient r . Optionnellement, une partie de ce signal peut aussi être transmise à une sortie notée S_t , tandis qu'en B, les interférences entre le signal s'étant propagé dans le guide et dans le résonateur lui-même permettent de générer un second signal S_m . Nous ferons l'hypothèse que les pertes dans les guides sont négligeables, et que le signal ponctionné en A est principalement réinjecté en B : $r^2 \ll t^2 \leq 1$.

Ainsi, les efficacités de couplage η_m et η_t des signaux de sortie S_m et S_t peuvent s'exprimer :

$$\eta_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + 2 \cdot r \cdot \cos(\Delta\phi_{AB}) + r^2}{x + 1 + r \cdot \cos(\Delta\phi_{AB})} \quad \text{et} \quad \eta_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2}{x + 1 + r \cdot \cos(\Delta\phi_{AB})} \quad (1.1)$$

avec $x = \tau_0^{-1} / \tau_c^{-1} \ll 1$. La pulsation ω et le taux effectif de couplage τ_{eff}^{-1} s'expriment comme suit :

$$\omega = \omega_0 - \frac{\tau_c^{-1}}{2} \cdot r \cdot \sin(\Delta\phi_{AB}) \quad \text{et} \quad \tau_{eff}^{-1} = \tau_c^{-1} \cdot (1 + r \cdot \cos(\Delta\phi_{AB})) \quad (1.2)$$

Ces équations montrent que le résonateur peut percevoir deux guides fortement couplés ($r=1$ et $\Delta\phi_{AB}=0$) ou quasi non couplés ($r=1$ et $\Delta\phi_{AB}=\pi$). En pratique, les courbures dans les guides, ou la ponction à travers S_t , garantissent que du signal se couple nécessairement dans les guides ($r < 1$). En modulant $\Delta\phi_{AB}$, on modifie donc les conditions de couplage. Pour y voir plus clair, on peut dresser le tableau de variations 1.2, en considérant un intervalle élémentaire de 2π pour le déphasage $\Delta\phi_{AB}$.

$\Delta\phi_{AB} [2\pi]$	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π
ω	ω_0	$\omega_0 - \frac{r}{2} \cdot \tau_c^{-1}$	ω_0	$\omega_0 + \frac{r}{2} \cdot \tau_c^{-1}$	ω_0
τ_{eff}^{-1}	$\sim 2\tau_c^{-1}$	τ_c^{-1}	$(1-r)\tau_c^{-1} + \tau_0^{-1}$	τ_c^{-1}	$\sim 2\tau_c^{-1}$
η_m	$\frac{1+r}{2}$	$\frac{1+r^2}{2}$	$\frac{1-r}{2}$	$\frac{1+r^2}{2}$	$\frac{1+r}{2}$
$\eta_t \cdot \frac{2}{t^2}$	$\frac{1}{1+r}$	1	$\frac{1}{1-r}$	1	$\frac{1}{1+r}$

Tab. 1.2 – Evolution des différents paramètres du modèle en fonction du déphasage dans le guide.

On peut relever les propriétés suivantes :

- plus le couplage local est fort ($x \ll 1$), plus la pulsation ω (et donc $\lambda = 2\pi \cdot c / \omega$) peut être ajustée sur une plage conséquente ($\pm r \cdot \tau_c^{-1}$) autour de la pulsation intrinsèque ω_0 du résonateur.
- plus le couplage effectif τ_{eff}^{-1} est faible, plus les pertes perçues par le résonateur se rapprochent des pertes intrinsèques. Ainsi, $\Delta\phi_{AB} = \pi [2\pi]$ est une condition favorable pour sélectionner un mode laser. Si $\Delta\phi_{AB} = 0 [2\pi]$, il sera extrêmement difficile de faire laser le mode considéré si le couplage local τ_c^{-1} est très fort.

14. Les modes stationnaires symétriques et antisymétriques sont des solutions des équations de Maxwell au même titre que les solutions propagatives : les unes sont en fait une combinaison linéaire des autres.

- le signal du résonateur est efficacement transmis à S_t lorsqu'on sélectionne un mode, tandis que le signal S_m est alors minimal. Plus r est proche de 1 et plus ce contraste est important.

Les microdisques couplés en deux zones (fig. 1.8) constituent un cas particulier pour lequel $t=0$ et $r \approx 1$ à cause des faibles pertes dans le guide entre A et B : on peut donc les représenter avec le schéma 1.14 (sans MMI).

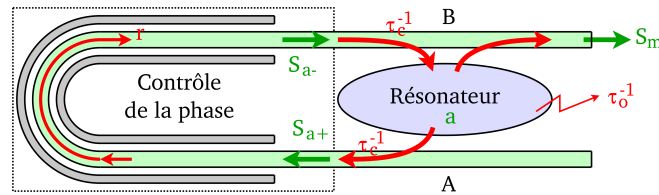


Fig. 1.14 – Modèle du résonateur asservi avec deux zones de couplage (structure en "raquette" sans le MMI).

1.2.6.2 Saut de mode contrôlé sur des structures fortement couplées

L'architecture à miroir photonique (fig. 1.12) est une variante du modèle général où les deux zones de couplage sont confondues (fig. 1.15). On peut aisément obtenir $r > 0.99$ pour favoriser un mode d'un autre avec un facteur > 100 selon le tableau 1.2. La difficulté concerne la prédiction de l'évolution de $\Delta\phi_{AB}$ puisque le miroir a été en fait dimensionné rapidement par simulation 1D alors que des simulations 3D auraient été nécessaires.

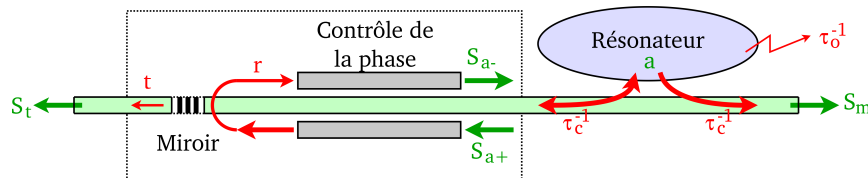


Fig. 1.15 – Modèle du résonateur asservi couplé en une zone avec miroir photonique.

Cette version du modèle général présente de nombreux avantages :

- l'un des signaux (S_m de préférence) peut servir à réaliser un asservissement en longueur d'onde pour s'assurer que le régime LASER est atteint à la longueur d'onde désirée grâce à un photodétecteur sélectif.
- les zones A et B étant confondues, les constantes de couplage respectives sont insensibles aux erreurs d'alignement entre les étapes de photolithographie.
- si $\eta_t \geq \eta_m$ (avec égalité en $\Delta\phi_{AB} = \pi [2\pi]$ si $r+t=1$), il peut être préférable d'utiliser la sortie S_t pour envoyer des signaux. En effet, ce port favorise le transport du mode LASER et défavorise les autres modes, évitant de parasiter le signal transmis au reste du circuit.

Malheureusement, ce composant a été dimensionné sans avoir réellement pu le modéliser : la sortie S_t , qu'on supposait négligeable (très faible transmission t), n'était pas connectée à des coupleurs optiques (fig. 1.16). Pour que la résolution lithographique du miroir soit compatible avec les équipements du CEA-Leti (lithographie UV 248 nm), les guides servant à la rétro-action ont été élargis à 900 nm de sorte que toutes les cotes du miroir soient supérieures à 250 nm, même dans la zone qui fait office de taper¹⁵. La partie gauche du miroir est biseautée pour que les signaux transmis soient diffractés dans l'échantillon. Le guide étant plus large sous le résonateur (même largeur que le miroir), nous l'avons volontairement courbé pour faciliter le couplage.

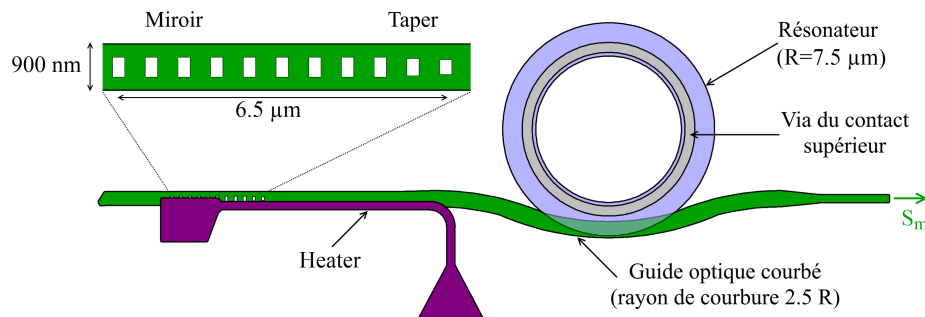


Fig. 1.16 – GDS partiel d'une des structures avec miroir photonique.

Pour le même microdisque que dans la partie 1.2.4 et le même contact supérieur, nous avons représenté l'intensité des 3 modes dominants en fonction de la puissance du heater (fig. 1.17). L'analyse de cette figure est tout à fait similaire à la figure 1.9, si ce n'est que la non linéarité du miroir permet même d'envisager une émission à 3 modes pour $P_h = 22.5 \text{ mW}$. La prédiction du mode d'émission est plus complexe, puisque le mode λ_2 , a priori mieux placé par rapport au matériau à gain, ne peut laser seul, et on passe d'un ordre azimutal m à $m-2$ pour $P_h = 6.5 \text{ mW}$ par exemple.

15. Dispositif optique permettant de graduellement passer d'une zone d'indice effectif à une autre en minimisant les réflexions parasites. Ici, il s'agit d'un gradient dans la taille des trous entre le guide et le miroir.

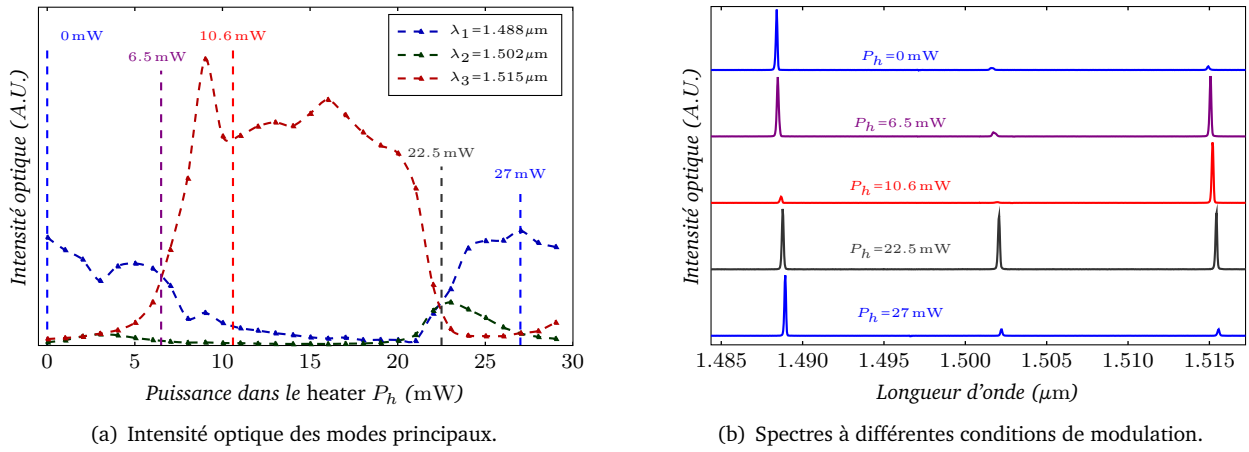


Fig. 1.17 – Mesures électro-optiques sur un microdisque identique à la fig. 1.9, mais avec une seule zone de couplage et un miroir photonique (mesures en régime pulsé avec un pompage constant au delà du seuil).

Ces structures ont montré une sensibilité au heater de l'ordre de 22 pm mW^{-1} semblable à celle des structures en "raquette". La meilleure injection électrique (une seule zone de couplage) et le couplage renforcé ont permis de réduire le seuil LASER de 3.9 mA à 2.9 mA . Cette valeur est inférieure au seuil du même microdisque non couplé ce qui démontre que la rétroaction diminue la compétition modale qui s'opère en dessous du seuil LASER.

1.2.7 Bilan technique et scientifique

Ce dernier contrat d'ATER m'a permis de rester concentré sur une même thématique pendant 5 ans. J'ai pu concevoir une source LASER dont on peut asservir la longueur d'onde d'émission par saut de mode. La modélisation a montré que l'on pouvait théoriquement corriger finement la longueur d'onde d'émission tant que le mode considéré reste sensiblement celui qui subit le moins de pertes. Par facilité, les démonstrateurs ont été réalisés avec une actuation thermique, induisant un échauffement du LASER qui masque en partie cette possibilité.

Les deux structures étudiées présentent des avantages et des inconvénients résumés dans le tableau 1.3. Toutes deux peuvent être modifiées pour obtenir une modulation rapide de $\Delta\phi_{AB}$ en adaptant les technologies issues des modulateurs. Par exemple, on peut exploiter la variation de l'indice optique induite par un changement de la concentration de porteurs libres dans le guide sous forme d'une jonction p-i-n [109], [110], d'une capacité MOS [63] ou encore une jonction p-n polarisée en inverse [64], [111]-[113]. Cela revient à utiliser des guides de type *rib* (gravure partielle du Si autour du guide) au lieu de guides *strip* (gravure de tout le Si en dehors du guide).

	Structure en "raquette"	Structure à cristal photonique
Sortie S_t	Non présente	Présente
Sortie S_m	Présente (mais modulée par le MMI)	Présente
Zone(s) de couplage	2 (fixer la symétrie pour prévoir le comportement du MMI)	1 seule
Injection électrique	Contact inférieur limité en surface	Contact inférieur optimal
Ordres azimutaux en émission multimode	m et $m + 1$ ou m_{min} et m_{max} [70]	Dépend du déphasage dans le miroir
Sensibilité technologique	Désalignement selon l'axe AB [70] (chap. 3.3)	Résolution du cristal photonique

Tab. 1.3 – Avantages et faiblesses des deux LASERS à émission thermiquement contrôlée. m_{min} et m_{max} correspondent aux ordres azimutaux minimum et maximum des modes dans la plage d'émission du matériau à gain.

Seule la seconde solution, avec ses deux sorties, permet un asservissement performant de la longueur d'onde d'émission (fig. 1.18). Dans le cas de la structure en raquette, l'asservissement est aussi envisageable lorsqu'on supprime le MMI : pour des modes stationnaires (et par symétrie) les deux portions de guide émettent le même signal. Dans ce cas, l'asservissement fait perdre 50 % du signal émis (beaucoup moins avec l'autre structure).

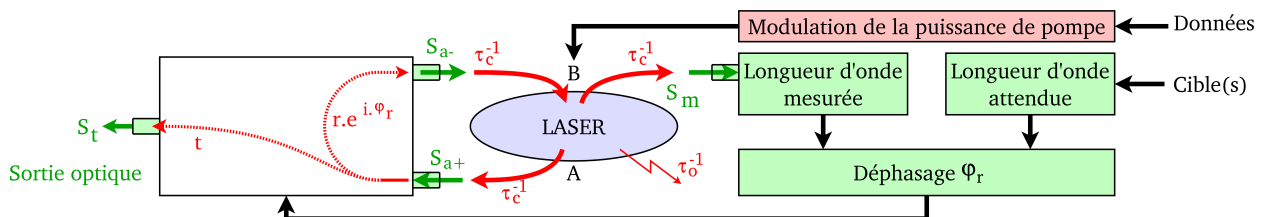


Fig. 1.18 – Version asservie du résonateur appliquée à l'émission LASER : les données peuvent moduler la puissance optique sur deux états, tandis que l'asservissement permet d'adresser les données aux cibles correspondantes.

1.3 APD Si-Ge pour les applications Telecom (post-doctorat - 2010-2011)

Après avoir étudié les sources optiques, j'ai rejoint en 2011 l'équipe d'E. Cassan et L. Vivien à l'[Institut d'Électronique Fondamentale \(IEF\)](#) pour travailler sur des photodiodes à avalanche (APD¹⁶) à base de Si et Ge. Il s'agissait cette fois de se concentrer sur les simulations électriques en plus des effets optiques.

1.3.1 Contexte

Les travaux de ce post-doctorat ont été supportés par le projet [ANR-Silver](#) en partenariat avec le [III-V Lab](#) (source LASER et caractérisation), le [CEA-Leti](#) (fabrication et intégration), l'[IEF](#) (modulateur et APD) et [Orange Labs](#) à Lannion (spécifications et validation système). L'objectif était d'intégrer à la fois un détecteur fonctionnant à une longueur d'onde de $1.57\ \mu\text{m}$ et une source LASER émettant à $1.27\ \mu\text{m}$. Ce démonstrateur visait le marché de l'internet fibré FTTH¹⁷ avec un débit descendant de $10\ \text{Gbit s}^{-1}$. Il s'agissait de tout intégrer dans un module de type SFP+¹⁸ (fig. 1.19), de sorte à remplacer et miniaturiser les modules ONT¹⁹ encore utilisés à ce jour.

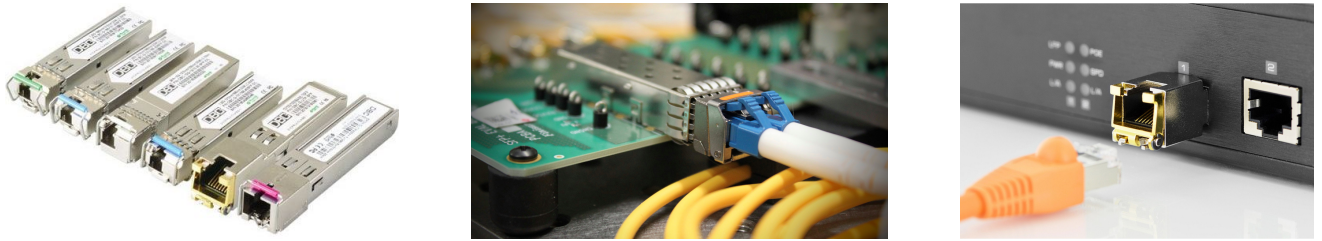


Fig. 1.19 – Modules SFP seuls (gauche) et en utilisation accueillant deux fibres optiques (au centre) ou une prise réseau (à droite).

Le circuit électro-optique, connecté à un OLT²⁰ via une unique fibre optique, nécessitait un multiplexeur et un coupleur optique fonctionnant aux deux longueurs d'onde d'utilisation (fig. 1.20).

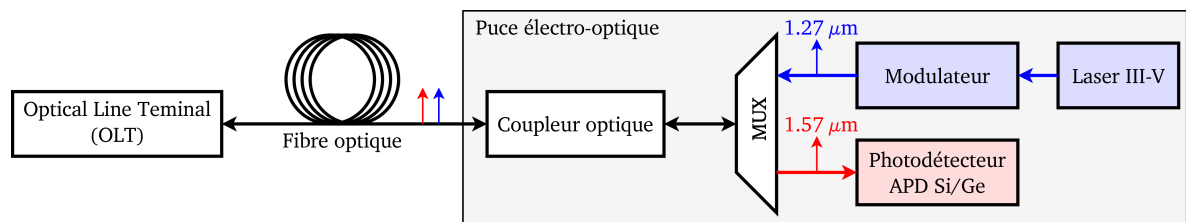


Fig. 1.20 – Organigramme du circuit optique qui a servi comme objectif pour le projet [ANR Silver](#).

Concernant l'APD, était attendu un gain de multiplication M de l'ordre de 10 pour un signal d'entrée P_0 de $1.6\ \mu\text{W}$ (-28 dBm) et une fréquence maximale de 10 GHz.

1.3.2 Structure rectiligne avec couche flottante en forme de U

Après avoir optimisé les différents dopages et l'épaisseur de la couche de multiplication en Si par simulation 1D, nous avons envisagé différentes architectures intégrables dont la première correspond à la figure 1.21.

Par abus, les couches très faiblement dopées à base de Ge (entre l'anode et la couche dopée p^+ en Si abusivement appelée "couche flottante", en bleu) ou de Si (entre la cathode et de l'autre côté de la couche flottante), seront considérées comme intrinsèques. Ces deux dopages doivent être minimisés pour favoriser le transport des charges dans le Ge et la multiplication des porteurs dans le Si, avec une faible probabilité de recombinaison dans les deux cas. En pratique, pour le Ge, on est limité par le niveau de dopage non intentionnel (épitaxie) et on préférera le fixer à une valeur très basse, mais contrôlée pour éviter la formation d'une jonction p - n non désirée. En partant d'un *wafer* SOI faiblement dopé p à $i_{Si} = 1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$, la fabrication s'appuie sur l'implantation ionique des deux zones dopées p^+ et n^+ , puis la gravure partielle du SOI dans la zone où l'on réalise une épitaxie localisée de Ge, dopée ultérieurement p^+ en surface pour réaliser l'anode.

Sur ce composant, idéalement, nous aurions pu envisager de doper le Ge plutôt "verticalement" au centre, mais cela génère beaucoup de recombinaisons Auger dans une zone à forte photogénération. Nous avons donc cherché à éloigner l'anode de la partie absorbant un maximum de signal, ce qui implique d'utiliser une faible épaisseur h_{Ge_p} . Pour que le champ électrique dans l'absorbeur en Ge (vert clair) puisse efficacement séparer les porteurs de charge, il est important d'éloigner latéralement cette anode de la couche flottante dopée p^+ dans le Si. Ainsi, le champ électrique dans l'absorbeur redirige les trous vers l'anode, tandis que les électrons sont repoussés vers le fond et les côtés. Ces électrons sont alors multipliés dans la couche de Si quasi-intrinsèque (gris) entre

16. Avalanche Photo Diode.

17. Fiber To The Home : connexion à internet via la fibre optique jusqu'au domicile du client.

18. Small Form-factor Pluggable : élément émetteur et/ou récepteur compact insérable à chaud utilisé pour les télécommunications, le '+' désigne un débit maximal de $10\ \text{Gbit s}^{-1}$ au lieu de $1\ \text{Gbit s}^{-1}$. Typiquement $8.5 \times 13.4 \times 56.5\ \text{mm}$.

19. Optical Network Terminal : boîtier installé chez le client pour transformer les signaux optiques en signaux électriques.

20. Optical Line Termination : équipement de terminaison optique connecté à un ou plusieurs réseaux de distribution.

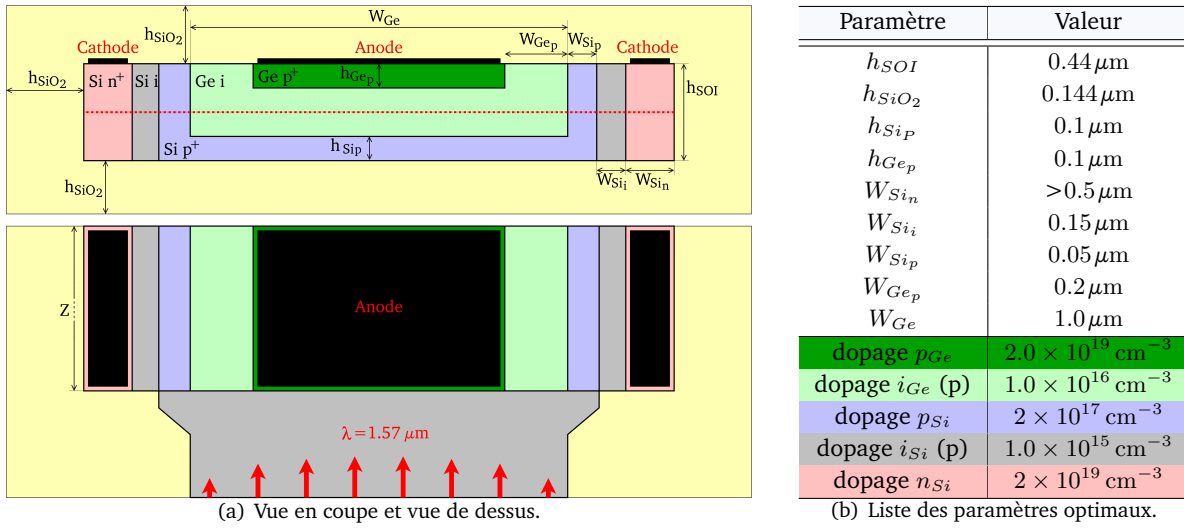


Fig. 1.21 – Structure simulée avec sa couche flottante en forme de U.

les zones dopées p⁺ (couche flottante) et n⁺ (cathode). Cette couche flottante doit être habilement optimisée : trop fortement dopée, le champ électrique dans le Ge devient faible, au détriment d'une plus grande différence de potentiel dans la jonction p-i-n en Si, et donc d'une multiplication par avalanche importante (et d'un risque de claquage plus élevé dans le Si). Trop faiblement dopée, la collecte des porteurs photogénérés se fait plus rapidement dans le Ge (au risque de le claquer), mais le gain d'avalanche M se dégrade.

La lumière se propageant avec une constante d'absorption effective α , on peut se contenter de simulations 2D de plans normaux à la direction de propagation en modulant par une constante la puissance incidente (fig. 1.22(a)). En sommant le courant généré par chaque tranche à potentiel fixe (loi des nœuds), on peut alors estimer les performances globales d'une photodiode de longueur Z . Après optimisation de la géométrie (W_{Ge} , W_{Ge_p} , h_{Ge_p} , W_{Si_p} , h_{Si_p} et W_{Si_i}) et des niveaux de dopage, nous avons pu obtenir les résultats de la figure 1.22 qui montre que la plage permettant de répondre au cahier des charges est très sensible au dopage de la couche flottante p_{Si} .

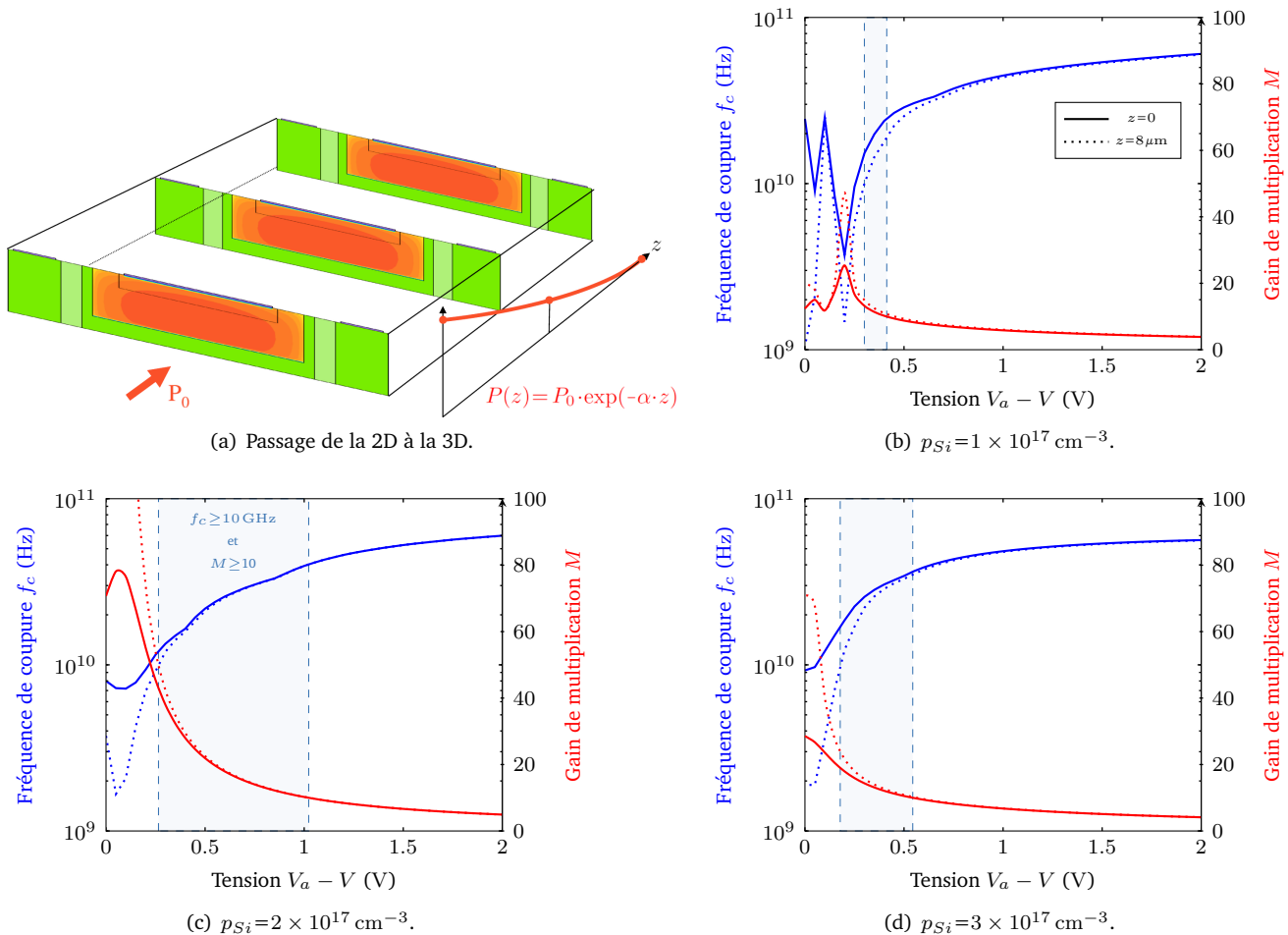


Fig. 1.22 – Gain et bande passante pour différents dopages p_{Si} de la couche flottante en $z=0$ (P_0) et $z=8 \mu\text{m}$ ($\approx 0.04 \cdot P_0$). V_a représente la tension d'avalanche (différente pour chaque dopage).

On peut noter que le plan dans lequel la photogénération est maximale ($z=0$) limite le gain M tandis que le plan le moins éclairé (ici en $z=8\mu\text{m}$) limite la fréquence de coupure f_c . Pour optimiser ce composant, on peut donc se contenter d'étudier uniquement le premier ($z=0$) et dernier plan ($z=Z$) de la photodiode pour garantir les performances de l'ensemble. Cependant, le grand intérêt des logiciels de simulation comme *Silvaco* réside dans l'analyse des grandeurs internes. Si les courbes de la figure 1.22 laissent penser qu'on pourrait utiliser un dopage p_{Si} de $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, on peut observer que le champ de claquage du Si ($\approx 0.3 \text{ MV cm}^{-1}$) est alors largement dépassé à la tension d'avalanche V_a (fig. 1.23). Jouer sur le dopage du silicium i_{Si} dans la zone de multiplication ne permet pas d'augmenter significativement ce champs de claquage [114]. De même, dans certaines zones du Ge, le champ de claquage est lui aussi dépassé, même en prenant en compte le dopage i_{Ge} [115]. Si abaisser le dopage p_{Si} permet de réduire le champ électrique dans le Si, il augmente celui dans le Ge. Nous sommes donc face à une situation où le composant risque de ne pas fonctionner.

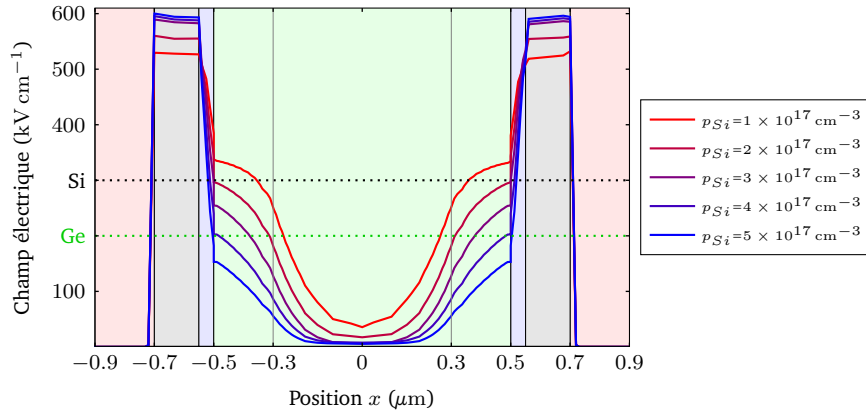


Fig. 1.23 – Champ électrique (coupe en rouge sur la fig. 1.21) à la tension d'avalanche V_a .

Enfin, on pourra relever que la valeur de W_{Si_p} n'est technologiquement pas acceptable. Si les simulations ont montré qu'augmenter ce paramètre tend à réduire le dopage p_{Si} , le composant résultant devient encore plus sensible à p_{Si} , le rendant impossible à fabriquer.

1.3.3 Structure courbe à fort confinement

Nous avons tenté d'améliorer la précédente structure en l'amincissant (220 nm) pour une meilleure répartition du dopage (implantation) dans le Si dans la direction verticale et en réduisant le parcours des porteurs dans l'absorbeur en Ge pour augmenter la bande passante. Enfin, nous avons cherché à mieux homogénéiser le taux de photogénération dans la zone active (fig. 1.24(a)) pour éviter qu'une zone peu absorbante ne vienne limiter les performances (cf. fig. 1.22). La figure 1.24(b) présente une vue de profil de la solution retenue.

(a) Simulation optique FDTD 3D de la structure.

(b) Géométrie de la section radiale de l'APD.

Fig. 1.24 – Géométrie de la photodiode courbée fabriquée par implantation.

Nous pouvons donc proposer :

- de courber la photodiode. La partie réelle de l'indice du Ge (4.3) étant supérieure à celle du Si (3.48), nous pouvons créer une sorte de mode de galerie qui se fait absorber au voisinage de l'interface Si/Ge sur une largeur caractéristique. Réduire celle-ci améliore la bande passante puisqu'on peut approcher l'anode en

Ge dopé p^+ de la périphérie du composant sans accroître les recombinaisons des porteurs photogénérés. Cela nous a conduit à un rayon R maximum de $4.95\mu\text{m}$ à l'interface Si/Ge.

- d'attaquer la photodiode des deux côtés à la fois (S_1 et S_2). En ajustant le rayon R pour avoir des interférences constructives entre les deux signaux absorbés, on s'assure d'un niveau de signal minimum dans toute la zone active²¹, et donc une meilleure bande passante d'après les résultats précédents.
- de repousser la zone dopée p^+ du Ge au centre du composant (et non plus en surface) à 300 nm de R , en dehors de la zone où la photogénération est importante.
- de réduire $h_{Si}=h_{SOI}-h_{Ge_p}$ tant que l'épitaxie en Ge est possible.

Cette structure a été dimensionnée et intégrée dans le premier jeu de masques du projet ANR-Silver. Toute la difficulté de fabrication du composant réside dans les interfaces latérales Si/Ge.

1.3.4 Structure compacte épitaxiée

Sur la structure précédente, l'in-homogénéité du dopage de la couche flottante dans l'épaisseur du substrat implique qu'une zone est particulièrement performante (par exemple au centre) : la multiplication ne se fait donc pas aussi efficacement sur toute la hauteur du composant, mais devient bien plus localisée. Profiter de l'épitaxie localisée de Si et de Ge permet de bien mieux maîtriser les épaisseurs et profils de dopage des couches actives (fig. 1.25), quitte à complexifier la prise de contact et à augmenter le nombre d'étapes. La tension de polarisation ($\sim |V_a|$) de l'APD devrait par contre diminuer.

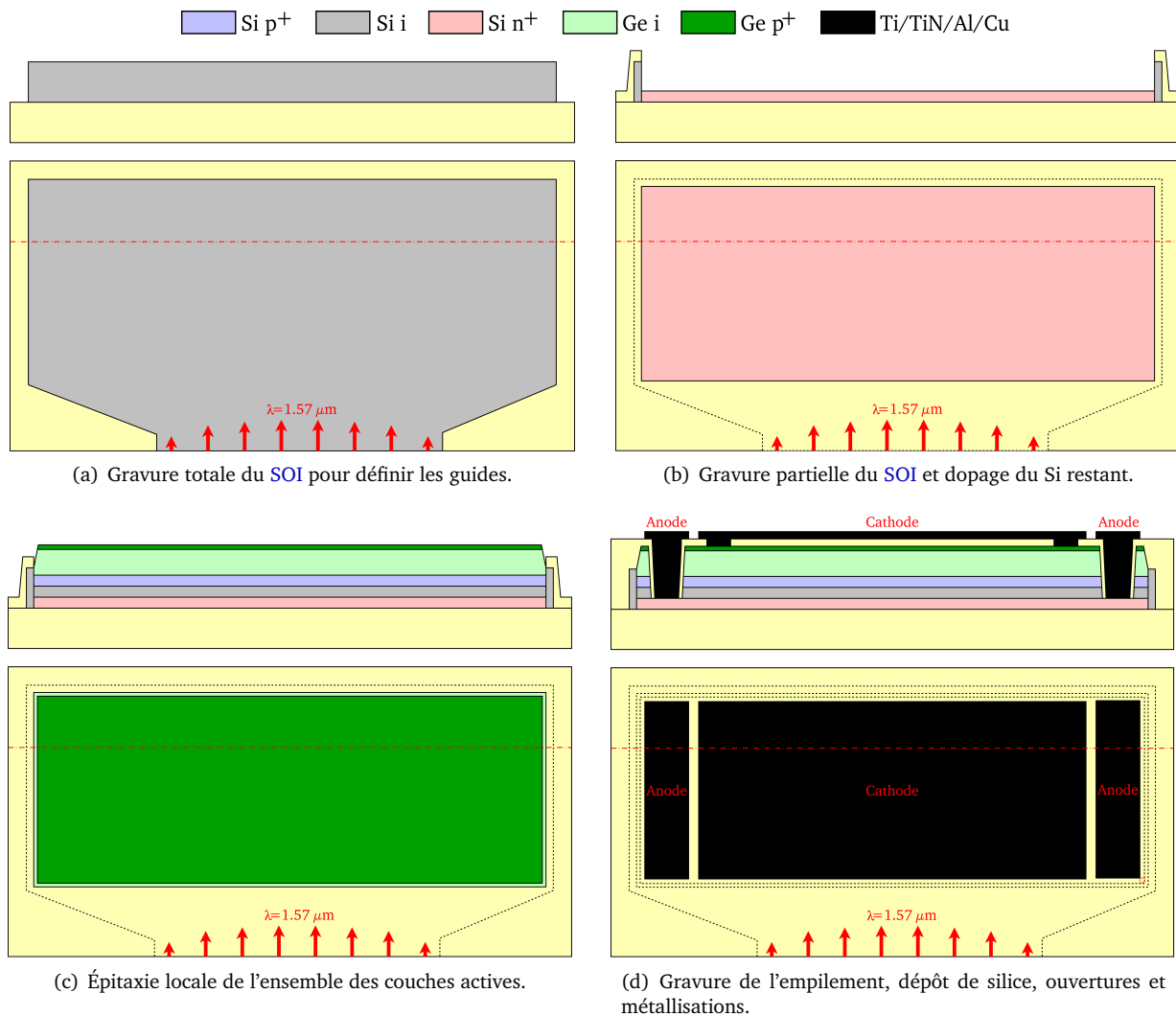


Fig. 1.25 – Principales étapes de fabrication de la photodiode rectiligne fabriquée par épitaxie.

Sur cette structure, il est crucial de maîtriser les gravures partielles de Si (étapes (b) et (d)) afin de bien prendre le contact de la cathode sur la couche de Si dopée n^+ . Plus particulièrement, la seconde gravure doit tenir compte à la fois de la quantité de Si conservée à l'étape (b) et de celle déposée lors de l'épitaxie (c). Enfin, la largeur et la longueur de l'APD sont ajustées par rapport au mode guidé attaquant la photodiode et à la quantité de signal qu'on souhaite absorber.

21. Cette condition, non étudiée pendant le post-doctorat, dépend aussi de la phase de S_1 et S_2 .

1.3.5 Éléments de filtrage et routage

Afin de pouvoir réaliser l'ensemble du circuit électro-optique, il est nécessaire de produire les masques en GDS qui servent à réaliser les 12 étapes de photolithographie nécessaires. Pendant ce post-doctorat, j'ai aussi dimensionné quelques éléments clés et dessiné l'ensemble des masques pour caractériser les deux types d'APD, avec des motifs de test pour chaque élément optique (MMI, filtres, *taper*²² adiabatique pour passer d'un guide *rib* - adapté à la présence de contacts - à un guide *strip*, TLM²³ pour les contacts électriques etc.).

Avec des portions de guide de suffisamment grande section pour devenir multimodes, on peut se retrouver avec différents modes se propageant à la même longueur d'onde mais avec différents indices effectifs, et donc avec une vitesse différente, ce qui entraînerait une mauvaise détection du signal sur la photodiode. Pour limiter ces effets, nous avons réduit au maximum le nombre de virages, et intercalé des filtres (section en fig. 1.26(a)) qui permettent, après optimisation de la distance d , d'obtenir une atténuation de 1.4×10^{-4} dB μm^{-1} seulement pour le mode d'intérêt et 0.16 dB μm^{-1} pour le mode d'ordre supérieur par absorption dans le métal.

Pour fabriquer tous les composants sur un même substrat, nous avons fait le choix d'amincir localement le SOI de 440 nm à 220 nm pour les photodiodes "courbes". Celles-ci nécessitent un MMI 1×2 en amont dont les deux sorties sont proches de quelques microns 1.26(b). Il est donc nécessaire de les éloigner pour atteindre la photodiode avec une distance de séparation de l'ordre de 10 μm au plus.

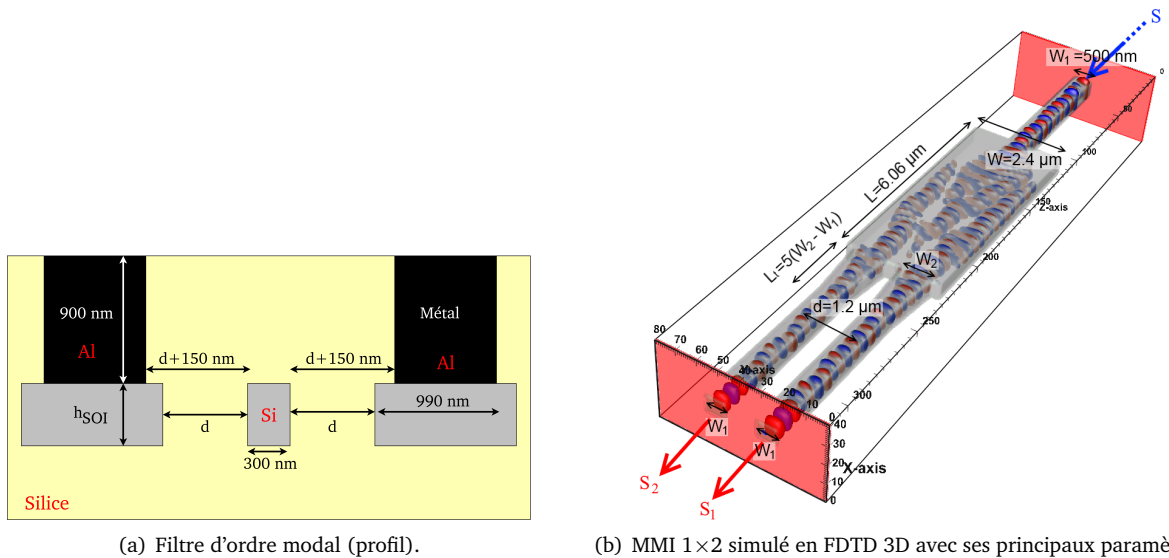


Fig. 1.26 – Éléments de routage : MMI et filtre.

1.3.6 Bilan technique et scientifique

Limités à 10 mois, ces travaux, supportés par l'ANR-Silver, ont surtout été portés par la simulation électro-optique de photodiode et par la conception des briques optiques nécessaires (MMI, filtres optiques etc.) pour la partie détection. À mon départ, j'ai donc fourni des fichiers GDS et un *process flow*²⁴ compatible avec les moyens technologiques du CEA-Leti (grâce à la poursuite de l'interaction directe avec J.M. Fedeli qui m'avait déjà co-encadré pendant la thèse).

1.4 Bilan des activités en photonique intégrée

La période post-doctorale a comporté deux années très productives en terme de conception en photonique intégrée. Ces activités de recherche se sont inscrites dans la continuité de mes activités antérieures, m'évitant une longue période d'étude bibliographique pour être opérationnel. Cela s'est traduit principalement par des travaux de conception et de simulation de composants électro-optiques à haute performance dans un domaine très compétitif à l'échelle mondiale (Intel® par exemple sur le projet FP7-WaDiMOS) et de nombreuses conférences internationales. Le savoir-faire acquis a permis de jouer un rôle important dans un projet d'envergure européenne pour lequel j'ai directement contribué à la rédaction de certains *work packages*²⁵. La seconde période post-doctorale m'a surtout permis d'aborder l'étude électro-optique alors qu'antérieurement seules les considérations optiques étaient prises en compte.

22. Éléments de transition capable de guider la lumière d'un guide vers un autre de géométrie différente.

23. *Transmission Line Measurement* : utilisation de plots métalliques régulièrement espacés pour remonter à la résistance de contact et à la résistivité de la couche contactée [116], [117].

24. Description détaillée des étapes de fabrication, incluant les masques, les tolérances d'alignement, l'arbre d'alignement, les motifs de tests en cours de fabrication (TLMs, mesures d'alignements, de profils).

25. Thématiques de travail.

Chapitre 2

Vers des cellules solaires en silicium "augmenté" ?

AYANT travaillé sur les photodiodes et la micro-électronique à base de silicium, il m'a paru tout à fait possible de réorienter mes recherches en photovoltaïque. En effet, il s'agit de travailler avec des outils (simulations électro-optiques) et des matériaux (Si, III-V) que je connaissais déjà, mais utilisés dans un contexte différent. Dans le cas particulier des cellules de dernière génération, les concepts en photonique permettent d'améliorer l'interaction entre les photons et le matériau actif : mes connaissances dans ce domaine pouvaient être mises à profit pour interagir efficacement avec l'équipe *Nanophotonique* de l'INL d'une part et l'équipe *Photovoltaïque* d'autre part que j'ai rejoint en 2011.

2.1 Introduction au photovoltaïque à base de silicium

Ce chapitre décrit les travaux de recherche auxquels j'ai contribué depuis mon arrivée dans l'équipe *Photovoltaïque* dirigée par M. Lemiti. Les thématiques abordées ont été soutenues par différents projets, lesquels ont toujours exploité le silicium et ses propriétés électro-optiques. Avec une pénétration du marché photovoltaïque de l'ordre de 90 % à l'échelle mondiale, ce matériau est actuellement le plus employé pour la production d'énergie électrique d'origine solaire [75]. La filière des cellules en silicium est particulièrement maîtrisée puisque le record mondial de 26.7 % est très proche de la limite de Shockley-Queisser pour du monocristal, à savoir 29.4 % [77]. Pour le silicium polycristallin, le record officiellement certifié en 2017 [76] atteint déjà 22.3 %, ce qui laisse actuellement un peu plus de marge pour améliorer ce matériau bien moins coûteux.

À mon arrivée à l'INL en 2011, ces performances dépassaient déjà respectivement 25.0 % (monocristallin) et 20.4 % (polycristallin) dans des conditions de mesure standard STC [118] : les perspectives d'amélioration des rendements de conversion paraissaient déjà limitées. Dans ce chapitre, nous allons donc nous concentrer sur des aspects davantage orientés sur la combinaison du silicium avec d'autres matériaux pour significativement dépasser les limitations intrinsèques de ce matériau. Nous poursuivrons avec les compromis envisageables lorsqu'on souhaite apporter de nouvelles fonctionnalités (couleur, déformation etc.).

Nous n'aborderons pas le cas particulier des cellules à concentration puisque celles-ci sont actuellement plus difficiles à intégrer dans le bâtiment et n'utilisent généralement pas de silicium.

2.1.1 Quelles pistes d'améliorations ?

Différentes pistes permettent d'améliorer les usages du Si en photovoltaïque :

1. **réduire le coût des cellules et des modules.** Cet argument a longtemps été utilisé pour justifier les cellules minces par la réduction de la quantité de Si à hautes performances [119] ou par l'exploitation de procédés à plus basse température [120]. Cependant, ce sont surtout les efforts portés par les équipementiers et fournisseurs de matière première (*wafer*) qui ont permis de significativement améliorer la rentabilité de la filière dans un climat de forte compétition avec la Chine [75].
2. **améliorer l'intégrabilité dans le paysage urbain.** Afin de construire des Bâtiments à Énergie passive ou POSitive (BEPOS)¹, il est nécessaire de produire soit de l'eau chaude, soit de l'électricité dans la majorité des situations. L'aspect des modules solaires doit donc évoluer pour offrir davantage de libertés architecturales sans trop altérer les performances. Ces améliorations concernent aussi bien l'apparence² (couleur(s), transparence) que la géométrie (courbure). La masse surfacique des modules photovoltaïques ($\sim 12\text{--}15 \text{ kg m}^{-2}$) est un paramètre important. Actuellement, il freine le remplacement des toitures des grandes surfaces ou hangars dont les charpentes sont généralement dimensionnées pour être recouvertes de tôle ondulée ($\sim 3\text{--}6 \text{ kg m}^{-2}$, fig. 2.1(a)). Développer des cellules avec une importante déformation élastique peut réduire les contraintes mécaniques des modules (rigidité) et donc leur masse et leur prix.

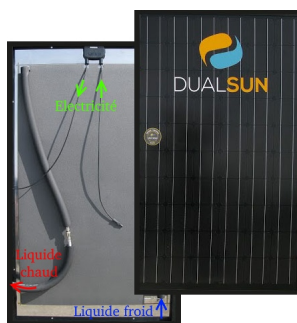
1. Comme l'imposera la Réglementation Thermique 2020 (RT 2020) en France.

2. En France, les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) réglementent aussi l'aspect esthétique des bâtiments à rénover ou à construire.

3. **améliorer les performances en conditions réelles.** La température de fonctionnement d'un panneau solaire (60 à 90 °C) résulte de l'équilibre entre les échanges convectifs (vent) et radiatifs (infrarouge) d'une part et la production de chaleur interne (thermalisation, effet Joule etc.) d'autre part [121]. Elle pénalise le rendement de conversion avec une chute pouvant atteindre $0.5\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ en échelle relative [122]. De plus, les panneaux sont rarement exposés en incidence normale ce qui nécessite de considérer le comportement optique quelle que soit la position de la source de lumière. Introduire de nouveaux concepts (structuration) et des nouveaux matériaux peut donc contribuer à mieux maîtriser les conditions de fonctionnement.
4. **améliorer significativement les performances.** Ajouter des matériaux actifs plus coûteux que le silicium permet d'atteindre des rendements de conversion inaccessibles pour le silicium seul (par exemple 35.9 % avec des cellules multi-jonctions [76] exploitant du Si cristallin, sans concentration).
5. **remplacer les batteries des appareils nomades.** Des micro-cellules photovoltaïques peuvent limiter le recours aux batteries, lesquelles nécessitent souvent des métaux disponibles en quantités limitées, potentiellement polluants voire toxiques (Ni, Li, Cd etc.), et qui ne peuvent alimenter un dispositif que pendant une durée limitée. Intégrer directement une cellule solaire sur le même substrat que des systèmes électroniques permettrait de gagner en compacité en ne nécessitant qu'un stockage d'appoint.
6. **co-générer de l'électricité et de l'énergie thermique (PV-T).** Il s'agit de tirer profit de l'échauffement de la cellule pour réchauffer un fluide et produire de l'eau chaude via un échangeur [156], [123] (fig. 2.1(b)).
7. **optimiser le refroidissement des modules et réguler la température dans le bâti** (fig. 2.1(c)). Dans le cas des habitats individuels, les flux de la Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) sont exploités pour faire circuler de l'air sous les panneaux et réduire leur température de fonctionnement, améliorant le rendement de conversion [124]. Cet air chaud peut éventuellement être dirigé vers les zones de vie.



(a) Entrepôt couvert de tôle ondulée.



(b) Panneau hybride PV-T (DualSun).



(c) Système aéro-photovoltaïque (Systovi).

Fig. 2.1 – Améliorations dans le photovoltaïque : d'importantes surfaces à adapter à la co-génération intégrée au bâtiment.

Les pistes 3 à 7 visent ainsi à "augmenter" les capacités offertes par le silicium seul en ajoutant différentes fonctionnalités à une cellule (ou module) "classique".

2.1.2 Mes activités de recherche autour des cellules à base de silicium

Mes activités de recherche ont concerné une partie des pistes évoquées ci-dessus et se sont concrétisées à travers différents projets dont les principaux résultats sont exposés par la suite :

- **OSEO-FaSil et KIC-InnoEnergy-PowCell** : travailler avec du Si de qualité métallurgique pour s'en servir de substrat et diminuer l'épaisseur de la couche active pour réduire les coûts (piste 1).
- **ANR-NaThiSol et FP7-PhotoNVoltaics** : réduire la quantité de matière active et augmenter l'absorption optique via une nanostructuration (pistes 1 et 3).
- **ANR-Menhirs** : démontrer que les dérivés d'InGaAsN (III-V-N) pouvaient s'épitaxier sur Si et ainsi former des cellules tandem (piste 4).
- **ANR-Hetonan** : concevoir une cellule tandem à base de nano-piliers de GaAsP sur Si (piste 4).
- **PULSALYS³-Tunnel** : concevoir une mini-cellule multi-jonctions en Si à haute tension de sortie (piste 5).

Sans financement direct et en collaboration avec le **Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHiL)**, j'ai commencé à explorer les aspects couleurs (piste 2) et le comportement optique en conditions réelles (piste 3).

2.2 Amélioration des performances des cellules à base de silicium

L'amélioration des performances peut se faire sous deux aspects différents au niveau de la cellule :

- **optiquement** : à travers une meilleure interaction entre le matériau actif et la lumière qu'on cherche à absorber dans ce dernier afin d'y générer un maximum de paires électrons (e)/trous (h).
- **électroniquement** : en dirigeant efficacement les charges vers leurs électrodes respectives grâce à un champ électrique interne à la cellule. Cela nécessite de maîtriser aussi bien les recombinaisons des porteurs dans le volume du matériau actif (absorbeur) que le voisinage des surfaces qui le délimitent.

3. SATT (Société d'Accélération du Transfert de Technologie) de la région Lyon / Saint-Etienne.

Ces deux aspects ont été conjointement étudiés dans les parties suivantes. Pour aller plus loin, on pourrait s'intéresser aux aspects thermiques (échanges convectifs et radiatifs) ou encore à l'émission des photons issus des recombinaisons radiatives, émission qui dégrade directement la tension de circuit ouvert V_{oc} [125].

2.2.1 Améliorations des performances de cellules PERC

Publications : [7], [16], [35], [36], [39], [42], [53], [54], [56], [55]

Co-encadrement : F. Gérenton (2013-2016)

Financement : OSEO FaSil (2011-2014)

2.2.1.1 Contexte scientifique du projet OSEO FaSil

Les cellules de type PERC⁴ [126] se caractérisent par une surface diélectrique en face arrière qui assure à la fois une passivation électrique élevée et une forte réflexion optique dans l'infrarouge pour augmenter la probabilité d'absorption des photons de grande longueur d'onde. Cette face arrière, souvent isolante, est localement ouverte par des vias afin de collecter les porteurs (fig. 2.2). Dans le projet FaSil, la partie active est obtenue par épitaxie pour garantir un matériau particulièrement performant et ce dernier est reporté sur un substrat bas coût à base de silicium fritté. L'élaboration de ce type de substrat et le collage via le métal de la face arrière constituent le cœur de métier de l'entreprise **S'tile** porteuse du projet dont l'objectif est de réduire les coûts en matière première. En contrepartie, il est essentiel de limiter la contamination de la partie active de la cellule solaire par ce type de substrat contenant de fortes quantités d'impuretés.

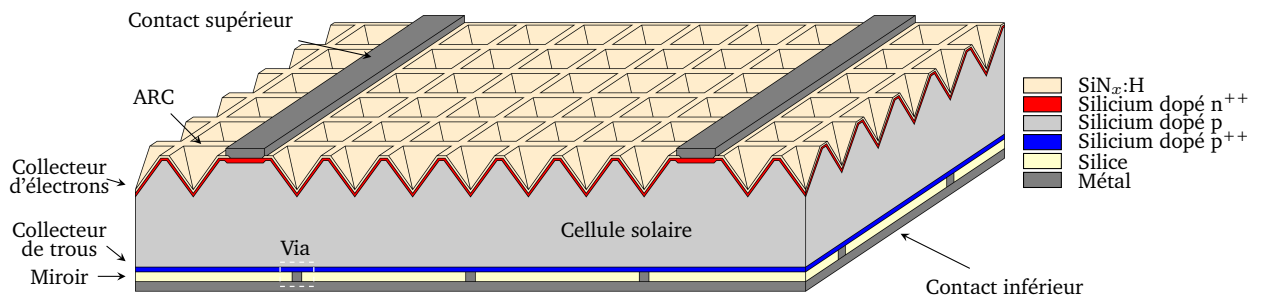


Fig. 2.2 – Cellule PERC dans une configuration de type PERT (collecteur arrière sur la totalité de la face arrière) avec une face avant structurée par des pyramides inversées périodiques.

La structuration en face avant, qui réduit considérablement les pertes optiques [8], [127], redirige les photons selon différentes directions dans le silicium actif. Pour un éclairage en incidence normale, les photons de grande longueur d'onde atteignent le miroir en face arrière à des angles autour de 42° et 59° principalement [128]. Ces angles varient avec la position du soleil. Une couche anti-reflet (ARC⁵) améliore la transmission optique vers le silicium. En conditions réelles (élévation et azimuth quelconques), le miroir en face arrière est donc attaqué par une large gamme d'angles⁶, ce qui implique de pouvoir maximiser le coefficient de réflexion R en fonction de l'angle d'incidence ϕ_0 sur ce dernier.

2.2.1.2 Objectif

Ce projet visait à améliorer les performances des cellules en optimisant principalement leur face arrière avec un miroir particulièrement réfléchissant. Électriquement, la position et la surface occupée par les vias des contacts devaient satisfaire un compromis entre la résistance série (grandes ouvertures, nombreuses et régulières) et la passivation de surface (minimisation de la surface totale des vias). Le procédé de fabrication de cette face arrière devait être peu coûteux et rapide pour répondre aux exigences d'une production à grande échelle.

2.2.1.3 Amélioration du comportement optique de la face arrière

Pour une onde plane provenant d'un milieu non absorbant (d'indice n_0) avec une incidence ϕ_0 , le formalisme des matrices de transfert [129] ou l'utilisation de méthodes récursives [130] permet de rapidement calculer les coefficients de réflexion R et T d'un empilement comportant N couches minces (fig. 2.3(a)). Dans le cas d'un miroir en face arrière d'une cellule PERC, l'étude du miroir seul impose de considérer que l'onde arrive d'un milieu absorbant⁷. Comme le montre la figure 2.3(b), cela peut conduire à obtenir $R \gg 1$ pour certains angles d'incidence (ici $\phi_0 = 31^\circ$, en utilisant IMD v4.4 [130] à titre illustratif). Pourtant, à 750 nm, l'indice n_{Si} du silicium a une partie imaginaire (9×10^{-3}) nettement plus faible que la partie réelle (3.73).

4. Passivated Emitter and Rear Cell.

5. Anti-Reflective Coating.

6. Grâce au verre de protection des modules et à l'EVA (éthylène-acétate de vinyle) – d'indice optique n_{EVA} proche de celui du verre – qui encapsule les cellules, la loi de Snell-Descartes montre que la course du soleil revient alors à éclairer la cellule dans une gamme de $\pm \arcsin(1/n_{EVA}) = \pm 42^\circ$ au lieu de $\pm 90^\circ$.

7. Par conséquent, on n'a plus une onde plane provenant de l'infini puisqu'elle serait nécessairement absorbée sur le trajet.

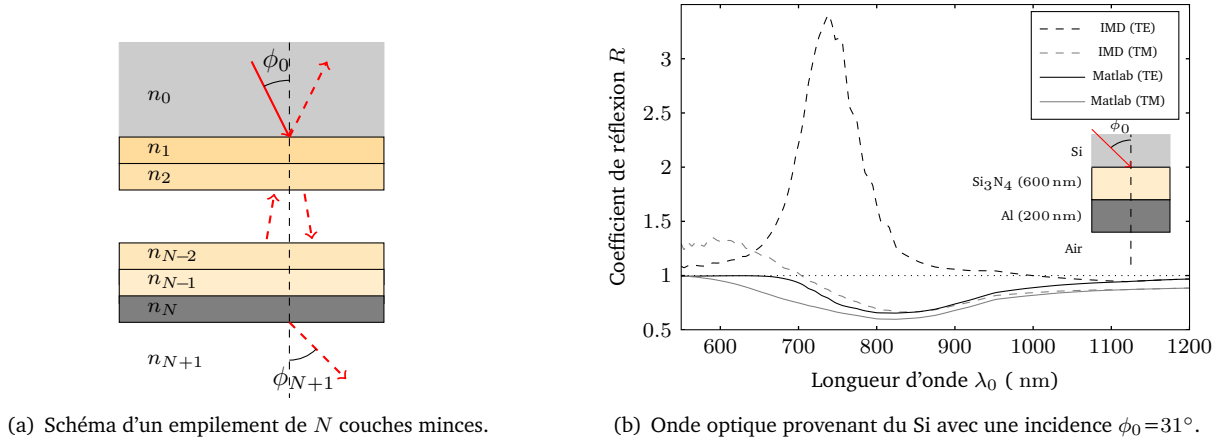


Fig. 2.3 – Exemple de structure multi-couches et résultats théoriques dans le cas d'un milieu ambiant absorbant.

L'origine du problème est l'angle d'incidence ϕ_0 considéré comme réel. Pour corriger les calculs, nous allons supposer qu'une onde peut traverser un empilement considéré⁸ (fig. 2.3(a)) et finit par se propager dans un milieu non absorbant, soit $T > 0$. L'équation de Snell-Descartes permet d'écrire :

$$\forall i \in [1, N], n_0 \cdot \sin(\phi_0) = n_i \cdot \sin(\phi_i) = n_{N+1} \cdot \sin(\phi_{N+1}) \quad (2.1)$$

Dans le cas $\phi_0 = 0$, tous les angles ϕ_i sont nuls. Sinon, avec notre hypothèse, $n_{N+1} \cdot \sin(\phi_{N+1})$ est réel, et donc $n_0 \cdot \sin(\phi_0)$ l'est nécessairement aussi, ce qui se traduit par :

$$\Im_m(n_0 \cdot \sin(\phi_0)) = 0 \Leftrightarrow n_0^r \cdot \cos(\phi_0^r) \cdot \sinh(\phi_0^i) + n_0^i \cdot \sin(\phi_0^r) \cdot \cosh(\phi_0^i) = 0 \quad (2.2)$$

où r et i désignent les parties réelles ou imaginaires des complexes considérés de sorte que $n_0 = n_0^r + i \cdot n_0^i$. Ainsi :

$$\phi_0^i = -\operatorname{arctanh}(n_0^i \cdot \tan(\phi_0^r) / n_0^r) \quad (2.3)$$

En imposant la partie réelle de l'angle incident ϕ_0^r , on peut donc aisément calculer la partie imaginaire correspondante : en intégrant cette correction (Matlab et C++) dans le formalisme des matrices de transfert, on retrouve $R \leq 1$ (fig. 2.3(b)). Une alternative souvent utilisée consiste à considérer que n_0 est réel (auquel cas ϕ_0 aussi) : on observe alors une surestimation (en général) de R qui atteint 7 % (polarisation TE) et 2 % (polarisation TM) pour la structure de notre exemple. Dans des cas particuliers, la différence peut dépasser les 20 %.

Dans son travail doctoral [131], F. Gérenton a développé un miroir à 3 couches assurant une excellente passivation (SiO_x et $\text{SiN}_x\text{:H}$ riche), une réflexion optique élevée (faible indice du SiO_x) tout en étant ablatable directement par un LASER à 355 nm (couches faiblement absorbantes dans l'UV), et évitant la formation de AlSi ($\text{SiN}_x\text{:H}$ standard) lors du recuit de contact. Les performances optiques de cet empilement (fig. 2.4) montrent l'existence d'un angle de Brewster (réflexion nulle pour la polarisation TM) autour de 30° : pour une structuration pyramidale en face avant, cet angle n'affecte pas le comportement en incidence normale.

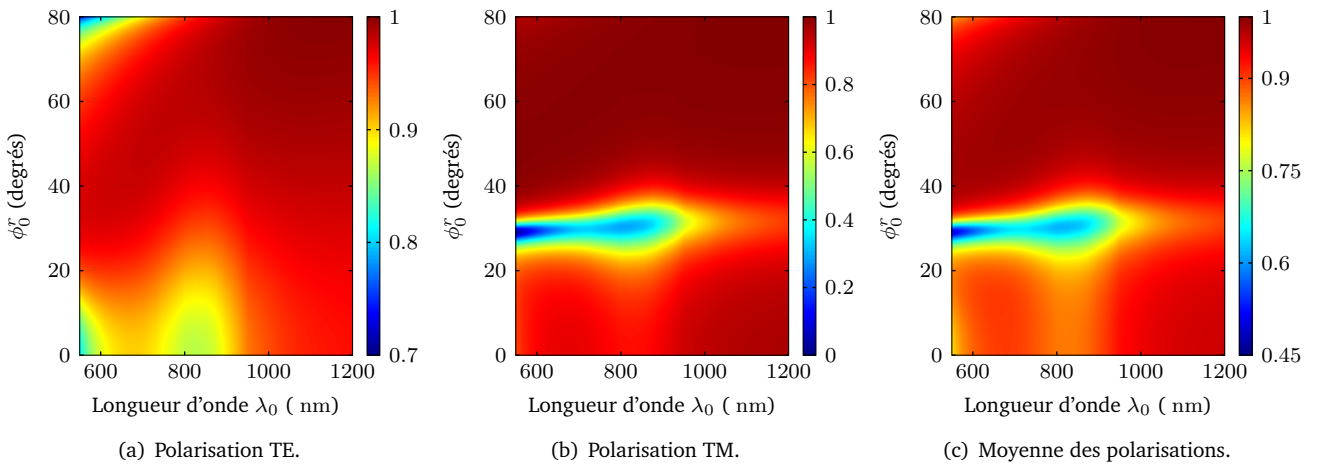


Fig. 2.4 – Performances optiques pour le miroir optimisé par F. Gérenton ([131], chap. 2), constitué d'un empilement Si - SiO_x (70 nm) - $\text{SiN}_x\text{:H}$ riche (10 nm) - $\text{SiN}_x\text{:H}$ standard (10 nm) - Al.

Pour un miroir ne nécessitant pas d'ablation LASER, nous avons démontré qu'on pouvait augmenter la réflexion moyenne de 93 % à 96 % sur la gamme 700-1200 nm [56].

8. Le cas $T=0$ est un cas limite : en effet, avec le formalisme des matrices de transfert, T n'est jamais rigoureusement nul.

2.2.1.4 Fabrication et conception

Si on s'attarde sur les différents records enregistrés par le NREL⁹, on peut remarquer que l'épaisseur des cellules a diminué avec le temps et se rapproche des $110\mu\text{m}$ théoriques optimaux [77]. Afin de profiter d'un dopage plus élevé de l'absorbeur (vers 10^{17} cm^{-3}) et des meilleures performances qui peuvent en découler, nous avons cherché à optimiser le comportement optique de la face avant pour des cellules relativement minces ($40\mu\text{m}$) qu'on cherchait à fabriquer par épitaxie et report sur un support mécanique et conducteur. Cette technologie a été au cœur des travaux de F. Gérenton [131], qui a ainsi profité du savoir-faire de l'INL pour :

- adapter le comportement optique des faces avant (cristal photonique) et arrière (cf. partie précédente) pour maximiser l'absorption des photons.
- optimiser la géométrie et la disposition (pavage carré, triangulaire...) des vias (fig. 2.2) afin d'obtenir une faible résistance série et minimiser les recombinaisons en face arrière.
- obtenir une technologie "bas coût" compatible avec les cellules PERC, exploitant la diffusion thermique pour le dopage en face avant, et un LASER pour ouvrir les vias de la face arrière.

Ma contribution à ce co-encadrement a principalement porté sur l'optique et la simulation électro-optique.

2.2.2 Cellules tandems planes à base de silicium et III-V-N

Publications : [9], [33], [31], [32], [38], [48], [51], [52], [58]

Financement : ANR-Menhirs (2011-2014)

2.2.2.1 Contexte scientifique du projet ANR-Menhirs

La condition optimale pour réaliser une cellule tandem consiste à utiliser une cellule supérieure avec un gap de 1.7 eV et une cellule inférieure de gap 1.1 eV, ce qui conduit à un rendement théorique maximal de 37 % pour le spectre AM1.5G [132], [133]. Le silicium est donc particulièrement adapté pour la cellule inférieure puisqu'il cumule les propriétés électro-optiques nécessaires tout en pouvant servir de support mécanique.

Dans le projet ANR-Menhirs, nous avons cherché à concevoir une cellule tandem à base de GaAsPN épitaxié sur Si par l'équipe de O. Durand (Lab. Foton). La condition d'accord de maille est obtenue en introduisant un faible pourcentage d'azote dans le GaAsP [133], [134] et en exploitant la direction (100) du silicium avec un offset de 4° ou 6° (préférable) vers (110). La figure 2.5(a) représente la structure complète de la cellule solaire que nous avons cherché à concevoir. Les collecteurs de trous et d'électrons de la cellule supérieure sont constitués de GaP (gap : 2.26 eV). Une jonction tunnel (JT) assure le passage des porteurs entre les deux sous-cellules connectées en série. À l'exception de l'ARC, les courbes de dispersion des différents matériaux sont indiquées dans la fig. 2.5(b), ce qui permet de calculer le taux de photogénération G_{ph} dans la structure.

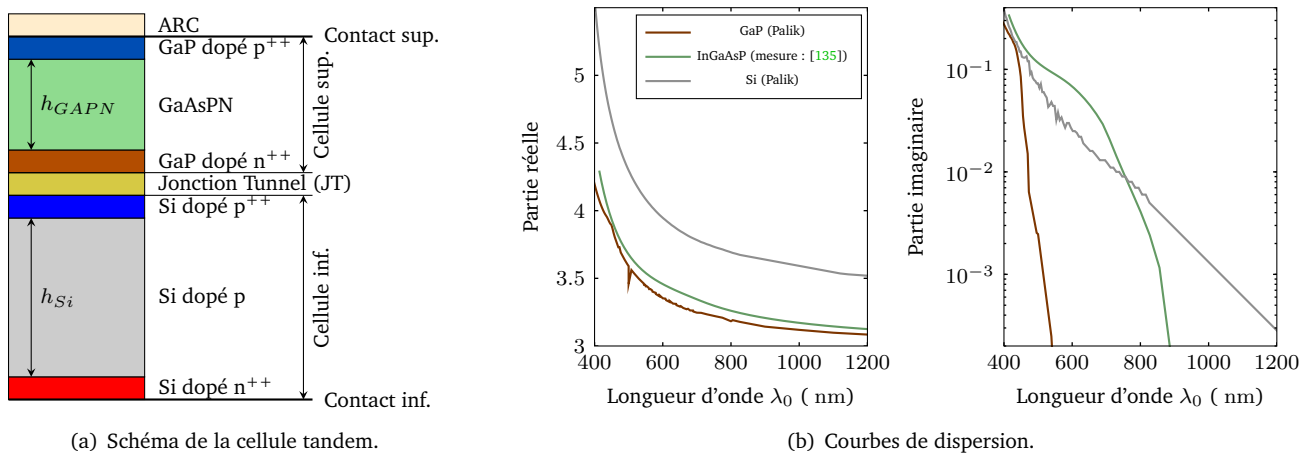


Fig. 2.5 – Description de la cellule solaire tandem étudiée dans le projet Menhirs.

2.2.2.2 Objectif

La mission de l'INL consistait à réaliser la cellule en Si par épitaxie, incluant au moins une partie (voire la totalité) de la JT. Dans ce contexte, nous avons recruté A. Lukianov puis K. Cieslak en post doctorat.

2.2.2.3 Dimensionnement de la sous-cellule en silicium

L'élaboration du matériau GaAsPN étant alors à ses balbutiements en 2011, nous avons émis l'hypothèse que la longueur de diffusion des porteurs de charge allait limiter l'épaisseur de cette couche (h_{GAPN}) et donc le photocourant maximal. Afin que la sous-cellule en Si ne pénalise pas l'ensemble de la structure, son épaisseur

9. <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>.

(h_{Si}) doit nécessairement être au delà d'une valeur seuil. La figure 2.6(a) représente l'estimation du rendement de conversion de la cellule tandem de la fig. 2.5(a) dans un cas réaliste pour la cellule en Si (prise en compte du BGN¹⁰, des recombinaisons SRH¹¹ etc.) [136]-[139] et dans un cas très favorable pour la cellule supérieure :

- pour laquelle la jonction tunnel n'est pas limitante.
- en considérant que les recombinaisons SRH dans le GaAsPN sont négligeables.
- où les différences d'affinité électronique (différence entre le niveau du vide et la bande de conduction E_c) entre GaP (dopé p ou n) et GaAsPN ne conduisent pas à des discontinuités de bandes pénalisantes¹².

Ces premières simulations conduisent nécessairement à une surestimation de h_{Si} ¹³. Pour chaque courbe de la figure 2.6(a), le changement de courbure correspond à l'équilibre entre les performances des deux sous-cellules : à gauche, c'est la cellule en Si qui bride les performances, à droite, la cellule supérieure. Ainsi, pour une épaisseur h_{GAPN} de 700 nm, seuls 30 μm de Si suffisent. Pour l'intervalle 0.5-1.0 μm de GaAsPN, une cinquantaine de microns de silicium devraient permettre d'équilibrer les deux sous-cellules¹⁴. On peut remarquer qu'il faut au moins 1 μm de GaAsPN pour que notre cellule tandem puisse dépasser les performances d'une cellule Si mono-jonction. Au delà, c'est l'équilibre entre le surcoût lié aux étapes de fabrication additionnelles et le gain en performances en résultant qui permettra de définir la rentabilité de cette solution.

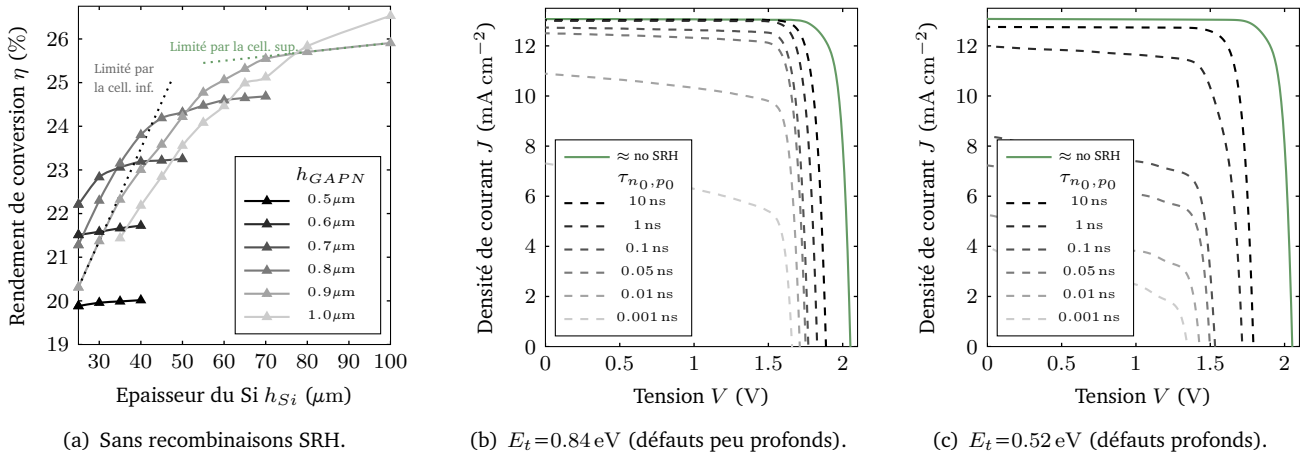


Fig. 2.6 – Impact de la géométrie et des recombinaisons SRH dans le GaAsPN. Pour (b) et (c), $h_{GAPN} = 0.7 \mu\text{m}$ et $h_{Si} = 30 \mu\text{m}$.

Dans un cas un peu plus réaliste pour la cellule supérieure (pour plus de détails, voir l'annexe 3), nous avons aussi étudié l'impact des recombinaisons SRH, qu'elles soient issues de :

- défauts peu profonds, avec un niveau énergétique caractéristique E_t tel que $E_c - E_t = 10$ meV (fig. 2.6(b)).
- défauts profonds, avec niveau énergétique davantage au centre du gap avec $E_c - E_t = 0.33$ eV (fig. 2.6(c)).

Naturellement, la tension de circuit ouvert (V_{oc}) décroît très sensiblement avec la diminution de la durée de vie $\tau_{n0,p0}$ des porteurs de charge. Une durée de vie de l'ordre de la nanoseconde ne devrait pas altérer la densité de courant de court-circuit (J_{sc}) pour des défauts peu profonds (b). Au contraire, les défauts profonds ont un effet nettement plus important (c) : il est donc crucial de veiller à limiter leur concentration d'autant qu'ils seraient induits par l'azote [141], [142] (nécessaire pour adapter le paramètre de maille), ou encore par des traces de carbone ou d'hydrogène [143]. Cependant, en contrôlant soigneusement la quantité d'hydrogène durant l'épithaxie, on peut "neutraliser" en partie les défauts induits par l'azote en créant des liaisons N-H [142].

2.2.2.4 Fabrication et conception

En plus des simulations, A. Lukianov a pris en main toute la partie expérimentale ensuite relayé par K. Cieslak :

- en réalisant des cellules complètes pour évaluer les performances de la cellule inférieure équivalente. Ainsi, nous avons obtenu un rendement de 13.2 % avec une densité de courant de court circuit $J_{sc} = 30.1 \text{ mA cm}^{-2}$ avec seulement 36 μm de silicium épithaxié, sans miroir en face arrière (fig. 2.7(a)). Ces performances permettent d'équilibrer toute cellule GaAsPN d'épaisseur $t_{GAPN} < 900$ nm pour laquelle J_{sc} serait alors inférieur à 15 mA cm^{-2} . Le rendement quantique externe (EQE¹⁵) montre une faible absorption dans les grandes longueurs d'onde, ce qui est normal pour une cellule située en surface d'un wafer de Si ne bénéficiant ni d'une épaisseur suffisante, ni d'un miroir arrière (fig. 2.7(b)).

10. *Band Gap Narrowing*. Réduction du gap d'un semi-conducteur en fonction du dopage appliqué, soit par déplacement de la bande de valence, soit de conduction, voire des deux à la fois.

11. Schokley-Read-Hall. Recombinaisons à deux porteurs (un trou et un électron) en présence d'un défaut dans le gap d'un matériau.

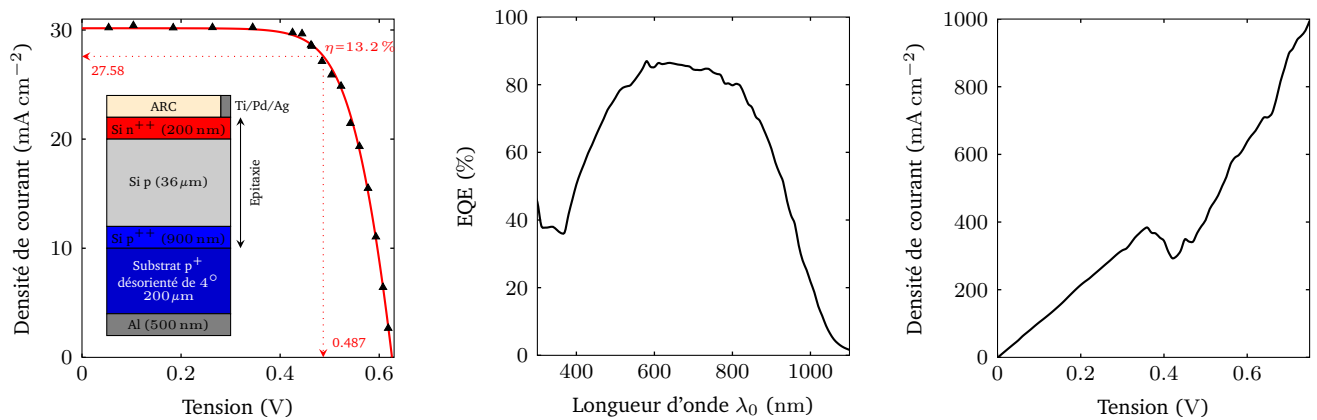
12. La position relative des bandes peut se mesurer par une sonde Kelvin. Cependant, vu qu'il s'agit d'observer la tranche d'un empilement épithaxié, il est nécessaire d'utiliser un KPFM (*Kelvin Probe Force Microscopy* [140]) auquel nous n'avons pas eu accès pendant le projet.

13. Une cellule "classique" mono-jonction en Si pouvait convenir, puisque son épaisseur conséquente implique de collecter convenablement les photons dans la partie rouge du spectre, condition recherchée pour une cellule tandem.

14. Pour une cellule inférieure avec une face arrière de type PERC (voir la partie précédente), on pourrait donc significativement réduire l'épaisseur de Si nécessaire à l'équilibrage des photocourants en utilisant un miroir performant.

15. *External Quantum Efficiency* : ratio du nombre de photons incidents avec le nombre de porteurs collectés à une longueur d'onde donnée.

- en maîtrisant le bâti d'épitaxie (VPE¹⁶), notamment l'exodiffusion du phosphore après réalisation de la couche n^{++} puis la diffusion *in situ* dans le bâti pour réaliser le dopage p^{++} par le bore¹⁷. Un exemple de JT non optimisée (très forte résistance série) est donné en fig. 2.7(c).
- en optimisant le nettoyage et la préparation de surface après l'épitaxie de la cellule inférieure et de la JT afin de faciliter la reprise d'épitaxie au laboratoire Foton. S'agissant de cycles d'oxydation (Piranha) et de gravure (HF) chimiques, une partie (5 à 10 nm) de la JT a été systématiquement sacrifiée.



(a) Caractéristique électrique d'une cellule épitaxiée - A. Lukianov.

(b) Rendement quantique externe mesuré sur la même cellule que (a) - A. Lukianov.

(c) Caractéristique électrique d'une JT entièrement réalisée par VPE - K. Cieslak.

Fig. 2.7 – Quelques résultats expérimentaux obtenus sur substrat (100) désorienté de 4° vers (110).

En plus du travail collaboratif impliquant les post-doctorants, ma contribution personnelle a porté sur les simulations et certaines caractérisations (figures de pôles par diffractométrie de rayon X notamment) réalisées en collaboration avec l'équipe *Hétéroépitaxie et Nanostructures* (J. Penuelas, G. Saint-Girons).

2.2.3 Cellules Nanostructurées

Publications : [5], [6], [8], [17], [15], [19], [20], [30], [34], [29], [40], [41], [43]-[45], [50], [56], [57]

Co-encadrement : R. Champory (2013-2016)

Financement : ANR-NaThiSol (2012-2015), FP7-PhotoNVoltaics (2012-2015)

2.2.3.1 Effets volumiques et surfaces dans les cellules minces

L'amincissement des cellules solaires, que ce soit pour leur autoriser une certaine déformation mécanique ou réduire la quantité de matière première, nécessite de grandement améliorer l'interaction lumière-matière. Plus particulièrement, il est important de soigner optiquement les interfaces de part et d'autre du matériau actif (absorbeur) afin de maximiser la probabilité d'absorption et donc de génération de paires électron-trou collectables. Une solution consiste à structurer la face avant pour améliorer la transmission optique, et la face arrière pour en améliorer la réflexion. Dans un second temps, ces porteurs doivent être efficacement redirigés vers les électrodes : si une plus faible épaisseur de matière à traverser améliore le transit dans le volume, l'augmentation des surfaces développées (structuration) tend à augmenter l'impact des recombinaisons de surface.

De façon très simplifiée, considérons un volume V de matériau éclairé par une surface S et dans lequel on photogénère G_s porteurs par unité de temps (fig. 2.8). Ces porteurs ont une durée de vie moyenne τ_v dans le volume de ce matériau avant de se recombiner, conduisant à une contribution du taux de recombinaison total R_s proportionnel à τ_v^{-1} . Avant d'atteindre les électrodes, les défauts de surface peuvent capter des porteurs et les recombiner avec une "rapidité" décrite par une vitesse de recombinaison S_{RV} .

Considérons que R_s est proportionnel au nombre de porteurs hors équilibre ΔN_s , ce qui est le cas lorsque le régime SRH domine. La densité de courant J que peut fournir ce volume de matériau vérifie donc :

$$J = \frac{1}{q} \cdot (G_s - R_s) \text{ et } R_s = \Delta N_s \cdot \left(\tau_v^{-1} + \left(\frac{h}{2 \cdot S_{RV}} + \frac{h^2}{c \cdot D} \right)^{-1} \right) \text{ avec } h = \frac{V}{S} \quad (2.4)$$

Lorsque les recombinaisons de surface sont très importantes ($S_{RV} \rightarrow +\infty$), les porteurs doivent traverser la cellule avant d'arriver sur la surface recombinante, ce qui explique la présence du coefficient de diffusion D [136] avec le préfacteur c dont la valeur dépend du profil de génération et des conditions de mesure¹⁸. Pour des cellules

16. *Vapor Phase Epitaxy* (Épitaxie en phase vapeur) : l'équipement disponible à l'INL permet de réaliser des dépôts à une vitesse autour de $1 \mu\text{m min}^{-1}$, ce qui est très rapide pour réaliser des JT de quelques dizaines de nm.

17. Cette JT ne correspond pas à celle de la structure de la fig. 2.5. Avec l'avancement du projet, il s'est avéré qu'il était préférable d'inverser la structure pour faciliter la reprise d'épitaxie de la diode supérieure. Les simulations présentées dans la partie précédente étaient antérieures.

18. $c = 12$ dans le cas d'un profil uniforme à régime statique ou vaut π^2 dans le cas d'une mesure en extinction de signal [136].

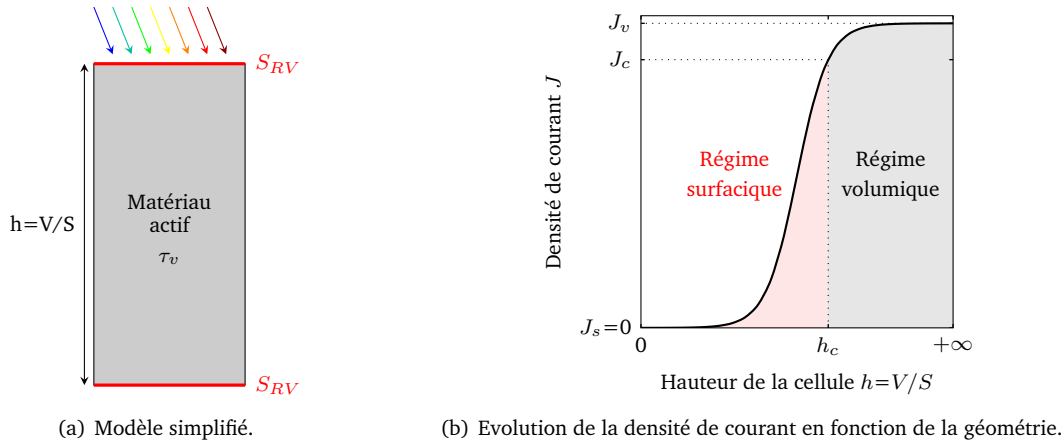


Fig. 2.8 – Illustration schématique de la compétition entre les effets surfaciques et volumiques.

performantes, on s'intéresse aux recombinaisons de surface les plus faibles possibles. Ainsi, nous négligerons le terme de diffusion puisqu'il intervient dans un régime de fonctionnement qui ne nous intéresse pas.

Réduire h modifie l'équilibre entre les recombinaisons volumiques et surfaciques (fig. 2.8(b)), lesquelles entrent en compétition pour une épaisseur critique $h_c = 2 \cdot S_{RV} \cdot \tau_v$ (correspondant à une densité de courant J_c). Lorsque $h \ll h_c$, les recombinaisons de surface peuvent neutraliser la majorité des porteurs photogénérés : la limite de la densité de courant J en régime surfacique est donc $J_s = 0$ (fig. 2.8(b)). Pour une cellule suffisamment épaisse ($h \gg h_c$), J est principalement limité par la durée de vie dans le volume : $J < J_v = \frac{1}{q} \cdot (G_s - \Delta N_s \cdot \tau_v^{-1})$.

Maximiser la densité de courant produite (et donc le rendement de conversion η) nécessite de fonctionner en régime volumique et maximiser τ_v . Pour que les pertes surfaciques soient faibles, il est donc nécessaire que l'épaisseur de notre cellule h vérifie $h \gg h_c$. En d'autres termes, réduire d'un facteur d'échelle k la hauteur d'une cellule, à matériau identique (τ_v) pour viser des performances similaires (ΔN_s inchangé), nécessite de réduire aussi d'un facteur k la vitesse de recombinaison de surface S_{RV} ¹⁹. Pour cette raison, la passivation de surface des cellules minces est nettement plus critique que pour des cellules classiques (typ. $165 \mu\text{m}$ pour la cellule IBC²⁰ qui présente le rendement record η de 26.3 % [145]).

L'impact électrique et optique de l'amincissement des cellules m'a poussé à contribuer aux projets [NaThiSol](#) et [PhotoNVoltaics](#) où l'épaisseur des cellules variait de 1 à $40 \mu\text{m}$, en fonction des procédés technologiques employés.

2.2.3.2 Contexte scientifique des projets [NaThiSol](#) et [PhotoNVoltaics](#)

Pour ces deux projets, les technologies disponibles à l'IMEC et au LPICM conduisaient à différentes épaisseurs de couche active :

- $h \sim 1 \mu\text{m}$ en s'appuyant sur la porosification du Si et son report sur un substrat hôte.
- $h \sim 1\text{-}10 \mu\text{m}$ en utilisant un dépôt par "PECVD-Si".
- $h \sim 40 \mu\text{m}$ en détachant des couches plus épaisses et directement manipulables. Cela évite l'utilisation d'un report pour la tenue mécanique et simplifie la réalisation des contacts.

L'un des objectifs consistait à compenser le faible volume de Si par différents types de structuration [8] :

- aléatoire par utilisation de lithographie colloïdale. Cette technique, compatible avec le Si polycristallin (fig. 2.9(a)), permet de structurer à différentes échelles (fig. 2.9(b)) [146]. En principe, la structuration obtenue n'est pas totalement aléatoire puisque la distance moyenne entre les motifs varie peu. Pour un substrat monocristallin, cela peut aussi conduire à des pyramides inversées aléatoires (fig. 2.9(e)).
- périodique en exploitant une gravure RIE²¹ suite à une lithographie holographie ou un procédé de nano-impression. Les motifs obtenus adoptent des formes cylindriques à hémisphériques en fonction de la compétition entre une gravure plutôt chimique ou mécanique (fig. 2.9(c)).
- périodique par des pyramides inversées (fig. 2.2 et 2.9(d)) en révélant chimiquement les plans (111) d'un substrat en Si orienté (100).

Pour une efficacité optimale, les simulations optiques menées par les différents partenaires ont montré que la période des motifs (ou la distance moyenne pour ceux n'étant pas périodiques) se situe dans la gamme 400–1000 nm. Dans le cas des pyramides inversées, l'optimum d'absorption dans les couches actives conduit à des facteurs de remplissage (ff ²²) proches de 1 et donc à des pyramides quasi jointives (fig. 2.9(d)), ce qui explique en partie le peu d'efficacité des pyramides inversées aléatoires (fig. 2.9(e)).

19. Pour des cellules tandem à base de nanofils ($\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ pour le projet [ANR-Hetonan](#)) sur Si, la surface à passiver pour la sous-cellule supérieure correspond approximativement aux parois latérales. Ainsi, pour un fil de hauteur $h = 1 \mu\text{m}$ et de rayon $r = 150 \text{ nm}$, le rapport V/S tend vers $r \cdot h / (2 \cdot h + r) \approx 70 \text{ nm}$ à comparer avec les quelques microns pour réaliser une cellule plane [144].

20. *Interdigitated Back Contact* : à contact arrière inter-digités. Architecture qui évite l'ombrage optique en face avant, mais complexifie la face arrière qui doit contenir à la fois l'anode et la cathode.

21. *Reactive Ion Etching* : gravure ionique réactive. Technique exploitant un plasma pour graver sélectivement des matériaux.

22. *Filling Fraction* : surface relative qui a été structurée.

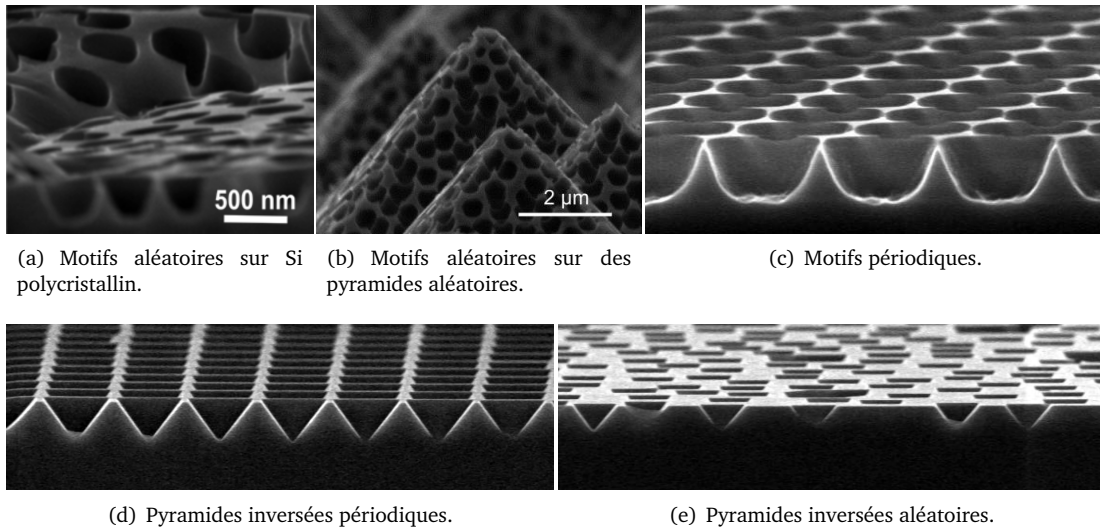


Fig. 2.9 – Motifs périodiques (lithographie holographique) ou aléatoires (lithographie colloïdale) obtenus sur Si poly(a) ou mono(b,c,d,e) cristallin (substrats orientés 100) par gravure RIE (a,b,c) ou chimique sélective (c,d).

2.2.3.3 Méthodologie de simulation

Afin d'optimiser le rendement de conversion η pour une épaisseur de Si donnée, nous avons cherché à nous rapprocher du schéma de principe de la figure 2.10.

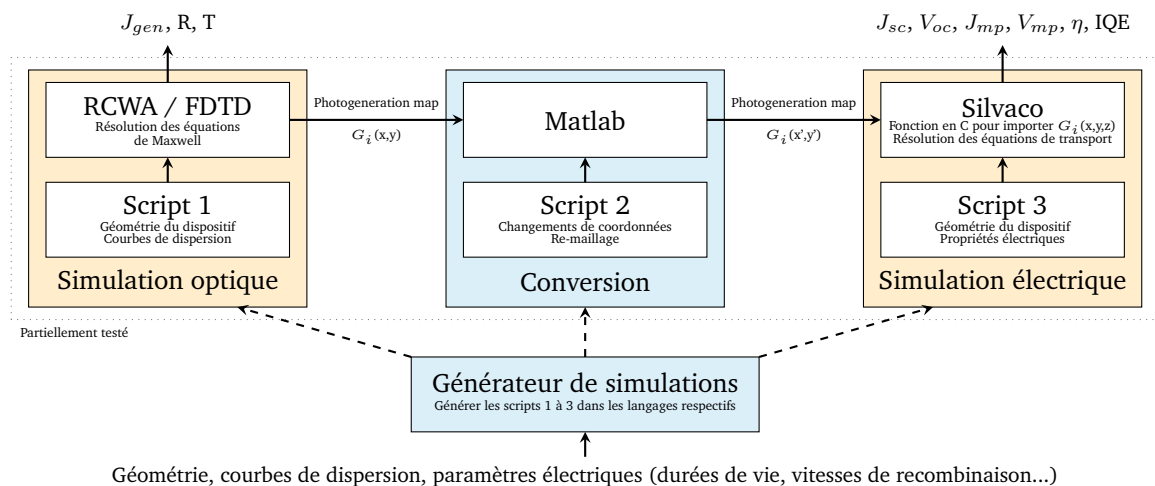


Fig. 2.10 – Description schématique du flot de simulation imaginé en fin de projet *PhotoNVoltaics* (délivrable 1.7) pour mener à bien les simulations électro-optiques prenant en compte la structuration à l'échelle photonique pour des cellules en Si.

La première étape consiste à maximiser le courant de photogénération J_{gen} qui correspond au nombre de porteurs photogénérés dans la couche active (absorbeur) uniquement puisque seuls ces derniers peuvent être collectés. Nous avons donc exclu ceux absorbés dans les électrodes ou encore dans les collecteurs de charges dans lesquels les recombinaisons sont très élevées. Pour cette optimisation, nous avons fait appel à des algorithmes génétiques puisqu'il était impossible d'envisager un balayage systématique de tous les paramètres (épaisseurs de toutes les couches, géométrie des motifs). Parallèlement, nous avons tenté de définir quelques "règles de conception" pour la partie électrique. Enfin, nous avons réalisé quelques simulations 2D pour illustrer le passage de la RCWA²³ ou de la FDTD vers *Silvaco* et donc obtenir les différents paramètres électro-optiques (courant de court circuit J_{sc} , tension de circuit ouvert V_{oc} , rendement η , rendement quantique interne IQE etc.).

Ma contribution a principalement porté sur les blocs "Conversion" et "Simulation électrique" (fig. 2.10). Certaines simulations ont été menées par le doctorant R. Champory, notamment autour de la rugosité de la structuration et son impact sur la qualité de la passivation.

2.2.3.4 Impact de la structuration sur les performances électriques de cellules minces de type HIT

Les cellules envisagées s'inspirent des HIT²⁴ pour le contact supérieur. Le contact inférieur pouvait lui aussi recourir à du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) ou oxydes conducteurs de faible indice optique (ZnO) pour

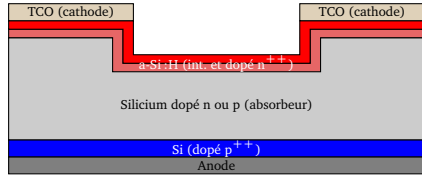
²³. *Rigorous Coupled-Wave Analysis* : méthode semi-analytique de résolution des équations de Maxwell dans l'espace de Fourier pour des dispositifs périodiques.

²⁴. *Heterojunction with Intrinsic Thin layer* : hétéro-jonction avec une fine couche de matériau intrinsèque. Dans notre cas, du Si amorphe dopé pour réaliser les contacts, avec une couche non dopée en contact avec l'absorbeur.

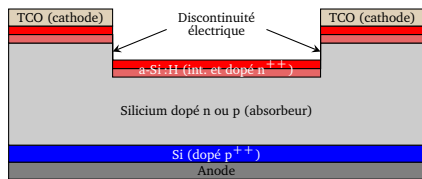
réaliser un second miroir photonique (fig. 2.13(a)). Les simulations optiques étant fort coûteuses en temps, j'ai donc mené plusieurs séries de simulations afin de faire ressortir des tendances de conception et déterminer les architectures les plus robustes et/ou les plus performantes.

Conformité du collecteur en face avant : robustesse et dopage de l'absorbeur

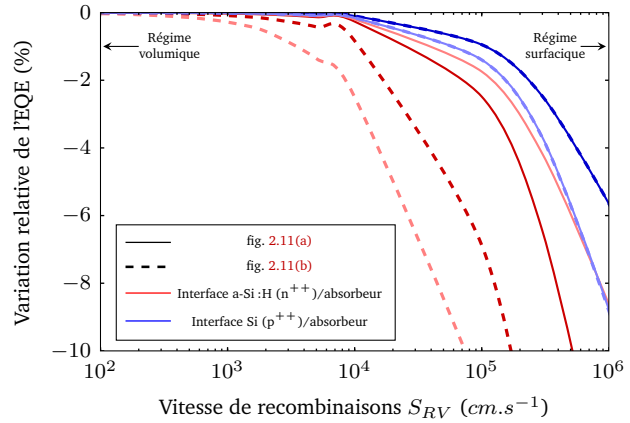
La figure 2.11 illustre l'impact de la discontinuité du collecteur d'électrons (a-Si dopé n^{++}) en comparant le cas d'un dépôt parfaitement conforme (fig. 2.11(a)) mais technologiquement impossible à obtenir, avec un dépôt non conforme (fig. 2.11(b)). Les courbes foncées de la figure 2.11(c) correspondent à un absorbeur de type n (jonction électrique en face arrière), tandis que les courbes plus claires correspondent à un absorbeur de type p (hétéro-jonction en face avant).



(a) Avec flancs continus (dépôt conforme).



(b) Avec flancs discontinus (dépôt non conforme).



(c) Impact sur le rendement de conversion électrique η .

Fig. 2.11 – Influence de la continuité électrique des flancs latéraux pour une structuration correspondant à un ff de 0.4 pour des trous de 100 nm de profondeur dans une couche de $1.1 \mu\text{m}$ de Si dont le collecteur de trous fait 100 nm, avec 20 nm de a-Si:H déposé en face avant. Le taux de photogénération G_i est ajusté pour obtenir un J_{gen} identique (même taux d'injection).

Malgré la faible épaisseur de la zone de discontinuité électrique (80 nm), les électrons ont tendance à se diriger vers le a-Si:H localisé au fond du trou. Pour atteindre l'électrode en TCO²⁵, ils doivent nécessairement tous transiter au voisinage des parois non couvertes de a-Si. Il en résulte une forte sensibilité aux recombinaisons de surface (courbes rouges en traitillés), principalement dans les coins inférieurs du motif de structuration. Au contraire, lorsque la continuité électrique est assurée (traits pleins), la passivation de ces mêmes flancs latéraux est nettement moins pénalisante. En face arrière (courbes bleues), la sensibilité aux recombinaisons de surface est indépendante de la géométrie de la face avant : le transport des trous (dont certains proviennent de la zone structurée) n'est pas affecté. Notre simulation met donc en évidence qu'il est préférable d'utiliser un absorbeur de type n. De plus, le dépôt d'a-Si:H n'étant pas très conforme, il est donc important que l'épaisseur de cette couche soit suffisante sur les côtés, ce qui revient à favoriser les profils correspondant à la fig. 2.9(c) ou des pyramides inversées (fig. 2.9(d) et 2.9(e)) plutôt que des trous cylindriques.

Pour des motifs gravés par RIE (importante rugosité de surface), R. Champory [147] a montré que des micro-défauts de passivation pouvaient fortement affecter le rendement de conversion même si la continuité électrique est assurée. Son analyse explique en bonne partie le meilleur comportement observé expérimentalement avec les pyramides inversées puisque les surfaces à passiver sont parfaitement planes (plans (111)).

Localisation de la jonction

Différentes simulations ont été menées pour trancher entre une jonction en face arrière (absorbeur de type n) ou une hétéro-jonction en face avant (absorbeur de type p). La figure 2.12 représente le champ électrique $||\vec{E}||$ pour différentes largeurs de trous.

Assez logiquement, lorsque la jonction est opposée à la surface structurée (a), le champ électrique n'est que peu affecté et sa distribution dans la zone structurée évolue peu. La collecte des porteurs minoritaires (trous) est donc relativement indépendante de la structuration et ces derniers sont dirigés directement vers la face arrière. Mieux, le champ électrique induit par l'interface a-Si:H/Si tend à les éloigner de la face avant, et donc des zones potentiellement recombinantes. Au contraire, avec une hétéro-jonction en face avant (b), la distribution du champ électrique obéit à différents régimes selon la largeur du trou. Dans le cas d'un trou pas trop large (cas de gauche), certains porteurs minoritaires (électrons) sont dirigés vers les coins inférieurs du motif de structuration plutôt que vers la surface supérieure de la cellule. Cette trajectoire tend à augmenter la sensibilité aux recombinaisons de surface. Dans le cas d'un trou très large (cas de droite), on observe sous le TCO, des zones avec très peu de champ électrique. Certains électrons sont d'abord redirigés vers les parois latérales du motif de structuration avant de rejoindre l'a-Si:H et le TCO, au lieu de directement se diriger vers la surface supérieure. Cette situation augmente considérablement l'impact des surfaces du motif de structuration.

Ainsi, à moins d'atteindre des dopages très élevés dans le collecteur de trous (c-Si avec $N_a > 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) et de garantir un bon niveau de passivation ($S_{RV} \ll 10^3 \text{ cm s}^{-1}$) exempte de défauts locaux, les simulations ont

25. Transparent Conductive Oxide : oxyde conducteur utilisé comme électrode faiblement absorbante.

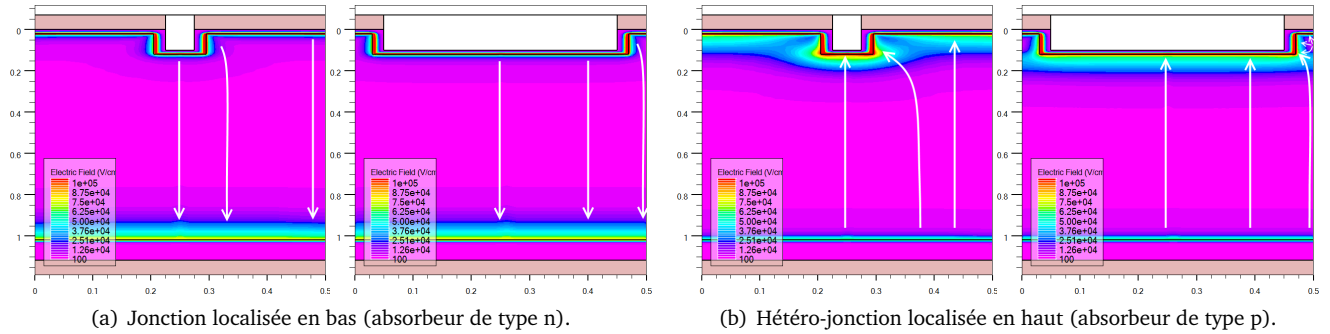


Fig. 2.12 – Distribution du champ électrique pour différentes largeurs de trous (même point de polarisation électrique). Les flèches blanches illustrent quelques trajectoires des porteurs minoritaires. Dimensions en μm .

montré que le rendement de conversion η à J_{gen} constant favorisait l'architecture avec une jonction en face arrière aussi bien pour les performances que pour la robustesse technologique.

Tableau des tendances comportementales

Les différentes simulations ont permis de compléter le tableau 2.1, qui décrit les différentes tendances observées. Celles-ci ont permis de déterminer certains enchaînements technologiques de fabrication. Par exemple, la structuration doit être réalisée avant de déposer le a-Si:H. Dans le cas contraire, même si on ajoute ultérieurement une étape de passivation, on obtient une architecture très sensible aux recombinaisons de surface.

	Hétéro-jonction en haut	Jonction en bas
Géométrie des contacts la plus robuste	Graver l'absorbeur, puis le couvrir par a-Si:H	
Contraintes sur le contact en a-Si:H	Continuité électrique sur les parois latérales	
Vitesse de recombinaisons de surface "acceptables"	$< 10^4 \text{ cm s}^{-1}$	
Niveau de dopage du côté structuré	$N_d > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
Niveau de dopage sur la face inférieure	le plus élevé possible	
	Très sensible	Peu sensible
Impact de la géométrie de la structuration	Influence de l'azimut	Négligeable
Optimisation de la cellule	Nécessairement 3D	2D suffisante
Propriétés électriques	V_{oc} plus élevé	J_{sc} plus élevé
Rendement de conversion η	Plus faible (sauf si optimisé)	Généralement plus élevé

Tab. 2.1 – Tendances observées par simulation et règles de conception pour un collecteur de trous de 100 nm d'épaisseur au plus.

Ce tableau met clairement en évidence l'intérêt d'éloigner la jonction de la surface structurée :

- la sensibilité des paramètres est bien plus limitée, conduisant à une solution davantage tolérante aux erreurs technologiques (dopages, dimensions géométriques).
- la simulation 2D peut suffire pour l'optimisation. En effet, la partie précédente a montré que selon le rapport entre le rayon du trou et la largeur de la zone simulée, on pouvait obtenir des régimes différents (champ électrique notamment) pour une hétéro-jonction en face avant. Hors, pour une structuration périodique sur deux axes, ce rapport varie selon l'azimut d'un facteur $\sqrt{2}$.

Cependant, pour des structures avec des flancs non verticaux (pyramides inversées par exemple), un moindre impact de la localisation de la jonction est attendu.

Simulation électro-optique complète

Afin de valider le schéma de simulation proposé en figure 2.10, nous avons converti des cartographies de simulation RCWA ou FDTD issues des simulations réalisées à l'INL (pyramides inversées périodiques) ou à l'Université de Namur (profils super gaussiens).

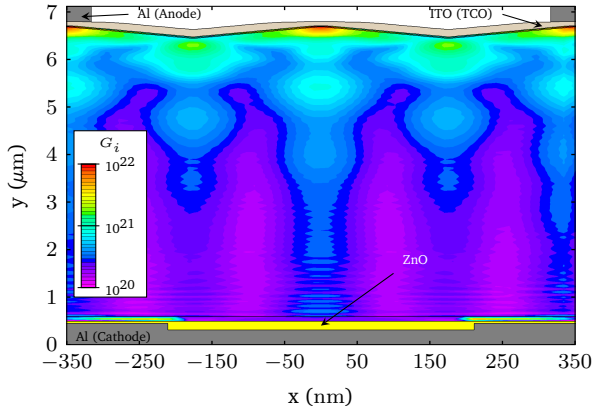
La figure 2.13 est un exemple de simulation réalisé avec des pyramides inversées avec un miroir en ZNO/Al structuré en face arrière à une période double de celle en face avant (trou cylindrique). L'optimum est obtenu avec une hétéro-jonction, grâce aux flancs à 54.7° des pyramides de la face avant, tandis que le type des dopages a été imposé par la présence du ZnO induisant un contact arrière de type n.

En comparant J_{gen} avec J_{sc} sur cette coupe 2D, on constate que 97.5 % des porteurs photogénérés sont collectés. D'après les analyses présentées plus haut, nous avons donc considéré que c'était aussi le cas en 3D ²⁶.

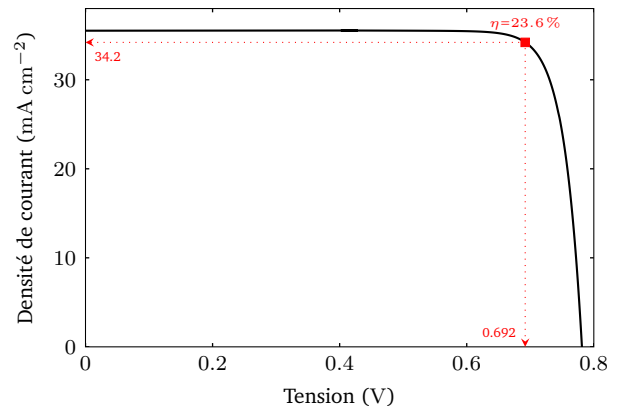
2.2.3.5 De la simulation "locale" aux performances "globales" d'une cellule solaire

Jusqu'à présent, nous n'avons évoqué que les performances locales d'une cellule solaire nanostructurée en ne simulant que quelques périodes spatiales élémentaires. Or, pour une cellule HIT comportant une électrode en face avant, le transport électrique des charges doit nécessairement se faire en direction d'électrodes métalliques pour leur conduction très nettement plus élevée que celle du a-Si:H ou du TCO. Ces pistes métalliques sont espacées de quelques mm, ce qui correspond à plusieurs milliers de périodes du cristal photonique (période de

26. L'import des données optiques en 3D s'est avéré complexe au point d'envisager de re-simuler optiquement les structures avec la FDTD interne à Silvaco.



(a) Structure simulée et photogénération dans c-Si et a-Si (G_i en $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$).



(b) Caractéristique électrique après optimisation des niveaux de dopage et épaisseur des couches dopées (S_{RV} faible).

Fig. 2.13 – Simulation électro-optique d'une tranche 2D d'une cellule solaire après optimisation du J_{gen} en 3D (36.3 mA cm^{-2}).

l'ordre du μm au plus) contrairement à ce que suggère la figure 2.13(a). Ce transport latéral à longue distance est principalement réalisé par le TCO qui est aussi un matériau absorbant.

Pour limiter l'absorption parasite dans le TCO, R. Champory [147] a proposé une architecture de cellule solaire alternative pour laquelle le TCO et la couche active sont tous deux structurés. D'après les simulations réalisées, une telle configuration est extrêmement sensible aux S_{RV} , mais les perspectives de passivation par Al_2O_3 déposé par ALD au laboratoire nous ont poussé à explorer cette piste. Ainsi, la suppression de matière dans le TCO tend à dégrader le transport latéral et augmenter une des composantes de la résistance série R_s . Nous avons déterminé que la dégradation de cette composante ne dépendait pas de l'orientation du cristal photonique par rapport aux directions des pistes métalliques, mais seulement du ff et de la forme de la structuration [5].

Pour une cellule Si homo jonction couverte de pyramides inversées, le collecteur en face avant doit nécessairement faire quelques centaines de nm pour être suffisamment conducteur et ne pas trop dégrader R_s (contrairement à ce que suggère la figure 2.2). S'il est fabriqué antérieurement à la structuration optique, deux situations sont possibles : soit il est plus haut que les pyramides elles-mêmes (fig. 2.14(a)), soit seule la partie supérieure de la zone structurée assure aussi la conduction latérale $J(x)$ vers les pistes métalliques (fig. 2.14(b)).

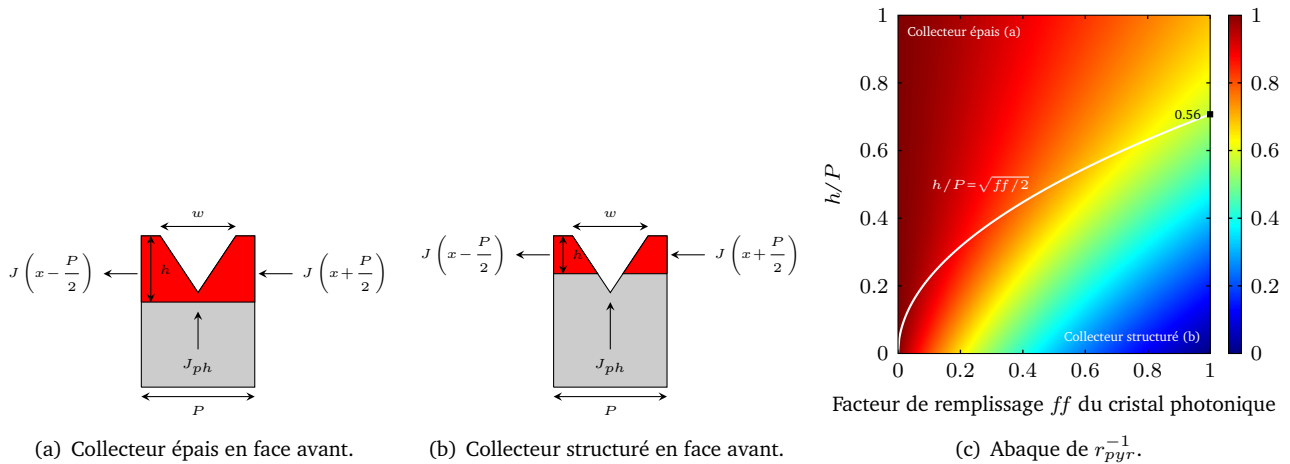


Fig. 2.14 – Dégradation du transport latéral dans le collecteur de charges en face avant. (a) et (b) ne représentent que la partie supérieure d'une cellule solaire selon un formalisme identique à [5], mais appliqué à des pyramides inversées.

En reprenant le formalisme de [5], chaque motif élémentaire de la cellule solaire (période P) produit une densité de courant J_{ph} qui vient s'ajouter au transport latéral $J(x)$. Par rapport à une couche de hauteur h mais non structurée, on peut introduire un coefficient de dégradation r_{pyr} de la résistance série tel que :

$$r_{pyr}^{-1} = \frac{1}{h} \int_{z=0}^{z=h} r_{sq}^{-1}(ff(z)) \cdot dz < 1 \quad (2.5)$$

où r_{sq} est le coefficient de dégradation pour un trou carré traversant (expression approximée dans [5]).

Dans l'abaque 2.14(c), le rapport $h/P = \sqrt{ff/2}$ délimite la frontière pour laquelle la conduction se fait sur toute la hauteur du motif ou pas. On constate que dans le pire des cas, tant que les pyramides sont incluses dans le collecteur, la dégradation r_{sq} de la résistance série ne dépasse pas un facteur 1.8.

2.2.4 Conclusion

Dans cette partie, nous nous sommes exclusivement concentrés sur les performances de conversion de cellules solaires exploitant du silicium comme matériau actif. Les améliorations ont porté aussi bien sur les aspects optiques (miroir en face arrière, structuration photonique), électriques (cellules tandem, impact de la structuration optique sur les performances électriques), que techniques (passage des simulations locales à globales, couplage de logiciels optiques et électriques).

Dans la partie qui suit, nous allons cette fois explorer des solutions photovoltaïques où quelques concessions sur le rendement apporteront une grande souplesse d'utilisation.

2.3 Intégration dans notre vie quotidienne

Pour faciliter l'acceptation de l'énergie solaire, les performances des cellules standards peuvent être "augmentées" par des fonctionnalités esthétiques : la couleur et la forme (courbure principalement) des modules facilitent grandement l'intégration au bâtiment. Dans un tout autre domaine, la miniaturisation de cellules à haute tension de fonctionnement évite de recourir à un stockage d'énergie important par batterie. Dans cette partie, nous allons donc nous concentrer sur deux activités récentes :

- le comportement angulaire des cellules solaires (depuis 2014).
- la gestion de la couleur des cellules et modules solaires (depuis 2016).
- la conception de cellules miniatures à haute tension en Si pour les dispositifs embarqués (depuis 2017).

2.3.1 Intégration visuelle et couleur

Publications : [3], [27]

Co-encadrement : Projets de Fin d'Etudes (PFE) à l'INSA de Lyon depuis 2014

2.3.1.1 Contexte

En faisant l'hypothèse qu'un module solaire correspond à une surface peu diffusante, la couleur perçue d'un tel objet correspond à la superposition de deux sources lumineuses différentes (fig. 2.15) :

- le soleil (S) qui se réfléchit partiellement sur un module solaire (P) en l'attaquant avec un angle θ_s ²⁷ et induit une réflexion spéculaire éventuellement observée par l'observateur (O), mais pas nécessairement.
- le diffus, issu de l'environnement (végétation, nuages, bâtiments, albédo etc.) entourant l'observateur (O) qui vient éclairer l'objet éclairé (P) selon un continuum d'angles d'incidence.

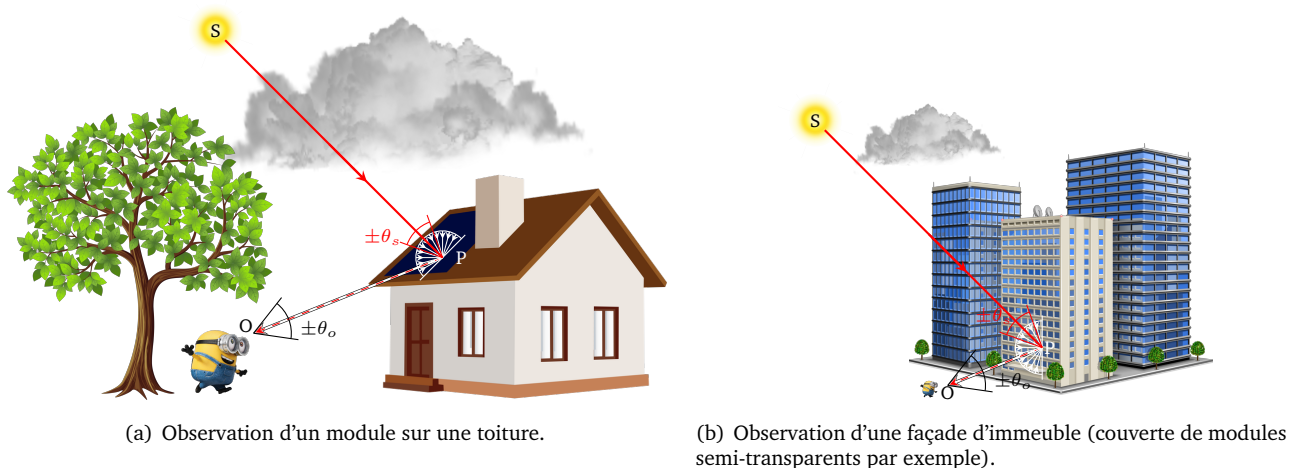


Fig. 2.15 – Conditions d'observation d'un module intégré dans le bâtiment. Les trajectoires rouges représentent les rayons directs (réflexion spéculaire) et les blancs ceux issus du diffus.

En fonction de la position de l'observateur (O), le signal direct entrera potentiellement dans son champ d'observation (θ_o) alors que le signal diffus sera systématiquement perçu. L'intégration au bâtiment induit des conditions très différentes :

- pour une toiture (fig. 2.15(a)), l'observateur (O) ne perçoit que ce qui est réfléchi loin de l'incidence normale sur le module (condition presque rasante). Le soleil se retrouve proche de l'incidence normale.
- pour un bâtiment en milieu urbain (fig. 2.15(b)), selon la hauteur du point observé (P), l'observateur perçoit des rayons réfléchis en incidence de quasi normale à quasi rasante. L'exposition des modules s'éloigne davantage de l'incidence normale.

27. En pratique, il est nécessaire d'introduire deux angles (l'élévation et l'azimut).

En fonction de l'installation future d'un module, on peut donc envisager différentes stratégies pour manipuler la réflexion du diffus et du soleil entre la face avant d'un module et la partie active de la cellule. Une condition forte pour maîtriser la couleur perçue consiste à ce que la couleur observée (ie, le spectre réfléchi) soit très peu dépendant de la position de l'observateur. Cette condition implique aussi que beaucoup de photons ne sont donc pas redirigés efficacement : ces photons sont donc doublement perdus à la fois pour l'esthétique, mais aussi pour le rendement de conversion électro-optique.

2.3.1.2 Réflexion résolue en angle

Initialement, je me suis intéressé à la réponse angulaire des cellules pour étudier leurs performances électro-optiques en fonction des conditions d'éclairement. En effet, accéder au rendement quantique interne nécessite de connaître à la fois la réflexion (grâce à une sphère intégrante) et la réponse spectrale (rapport entre le photocourant généré et la puissance optique incidente, en fonction de la longueur d'onde des photons). Pour ces deux types de mesures, nous avons besoin de maîtriser un même faisceau incident (angle d'incidence, longueur d'onde, polarisation etc.).

En introduisant directement l'échantillon à l'intérieur de la sphère, on peut quantifier expérimentalement les perturbations dues à la présence d'objets dans la sphère (support, axes de translation etc.). Ainsi, on peut prendre en compte leur impact dans le flux photonique de référence qui est ensuite comparé avec le signal mesuré ($R(\lambda) + T(\lambda)$) avec l'échantillon. À l'aide d'un déplacement vertical du support de l'échantillon (fig. 2.16), nous avons montré que l'on pouvait alors estimer la puissance incidente à la position L_0 (fig. 2.17 (a)). Cette estimation constitue la base du protocole de mesure.

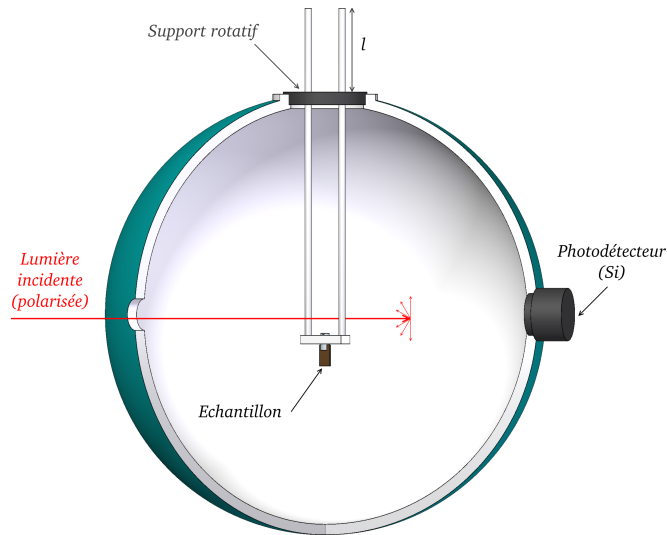
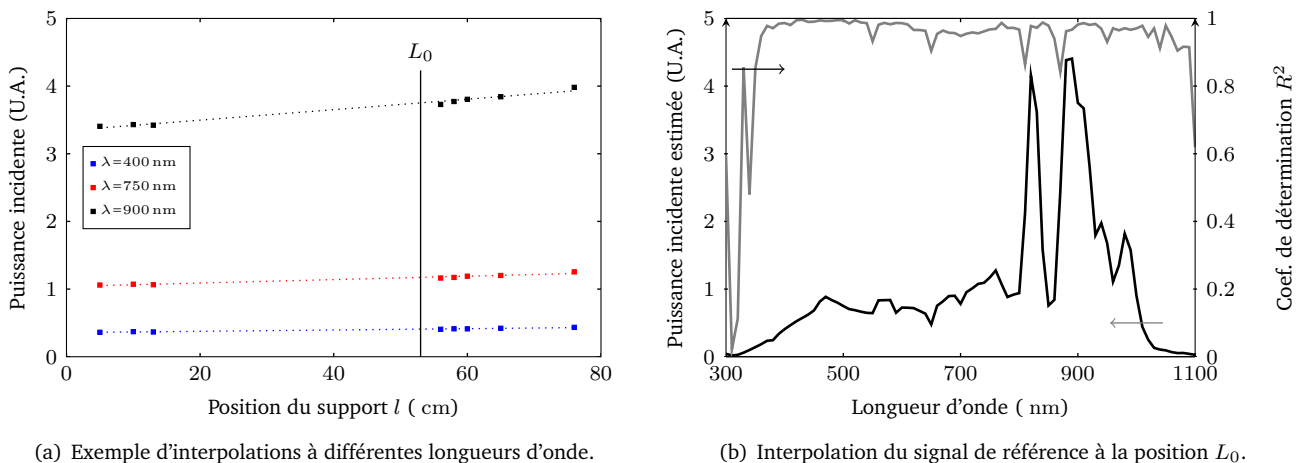


Fig. 2.16 – Schéma du montage de la sphère en incidence contrôlée : pour permettre de réaliser les mesures avec $l > l_0$, le faisceau incident doit passer entre les deux barres du support rotatif.

Après quelques améliorations matérielles en 2016 (polariseur à large gamme spectrale de 300 à 1100 nm), nous avons affiné la technique de mesure en mettant en évidence l'intérêt de l'étude de la corrélation en fonction de la longueur d'onde pour estimer la plage d'utilisation de notre protocole de mesure (courbe grise sur fig. 2.17(b)). On observe clairement une très bonne corrélation lorsque la lampe (Xénon) émet suffisamment de photons, et qu'on se trouve dans la plage d'utilisation du polariseur.



(a) Exemple d'interpolations à différentes longueurs d'onde.

(b) Interpolation du signal de référence à la position L_0 .

Fig. 2.17 – Estimation du signal de référence à la position L_0 de l'échantillon utilisée pour mesurer son absorption à une polarisation donnée (mesures par P. Tissier)

Ces mesures permettent de calculer les couleurs [3] pour peu que la transmission $T(\lambda)$ ne soit présente que pour les grandes longueurs d'ondes et que la couleur perçue ne soit pas trop sensible à la position de l'observateur.

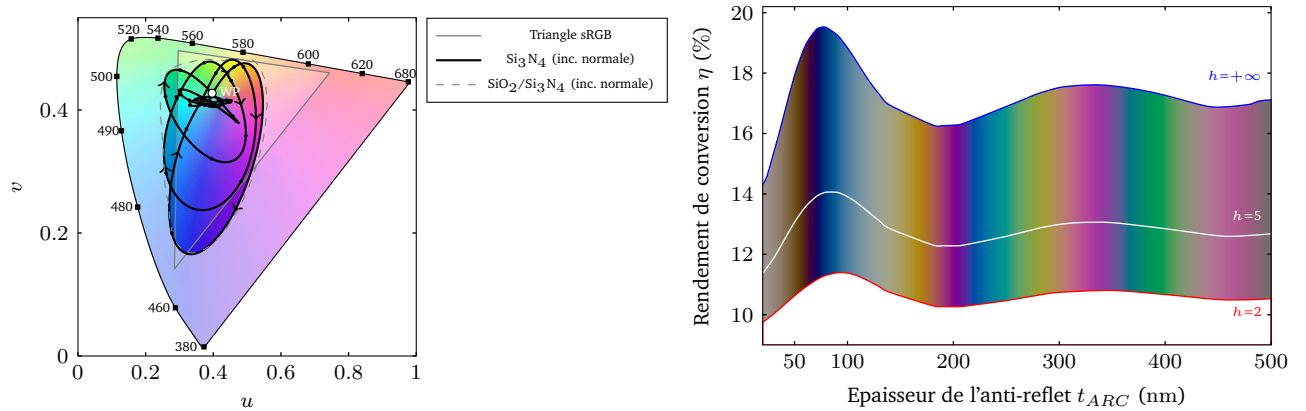
2.3.1.3 Impact du traitement anti-reflet sur la couleur

Nous avons démontré dans [3] que modifier l'épaisseur de l'anti-reflet de cellules planes permet d'obtenir des couleurs peu sensibles à l'angle d'observation et donc à l'équilibre entre lumière diffuse et réflexion spéculaire. Pour des conditions thermiques non idéales, le choix de la couleur impacte peu le rendement de conversion. Cependant, pour garantir des performances esthétiques, il est important de quantifier ces variations de couleurs (contenu chromatique et luminosité), ce qui nécessite de travailler dans des espaces colorimétriques normés qui ne sont pas toujours évidents à appréhender (espaces 3D) pour exposer l'impact physique d'une technologie.

Si le calcul de distance colorimétrique peut faire appel aux normes ΔE_{94} ou ΔE_{2000} (dérivant de la norme euclidienne de l'espace Lab en coordonnées cylindriques mais avec des pondérations différentes), il est bien plus aisé de représenter des résultats dans un espace borné contenant la chromaticité sur un plan et la luminosité Y (ou la clarté $L=f(Y, Y_{WP})$, première composante de l'espace Lab) sur une direction normale. Une seconde difficulté rencontrée est le choix d'un espace absolu et non pas relatif puisque la plupart des espaces standards utilisent des points blancs (WP) de référence (D65 pour Lab par exemple, soit un spectre proche d'un corps noir de 6504 K). Or, pour des mesures en conditions complexes (différents air-masse), s'appuyer sur ces points de référence perd tout son sens puisque les différentes normes ont été affinées pour les conditions d'éclairage bien précises correspondant à ces points blancs.

Finalement, nous avons retenu le diagramme UCS²⁸ de Judd [148] pour présenter nos futurs résultats et calculer des volumes et surfaces colorimétriques. Ce choix a été fait malgré une moindre exploitation que le diagramme proposé par MacAdam en 1937 [149] et retenu par le CIE²⁹ en 1960 (notamment pour des raisons de rapidité de calcul flottant). Dans ce diagramme et sous un éclairage AM1.5G, le point blanc WP qui correspond à une surface parfaitement réfléchissante ($R=1$) a pour coordonnées ($u=0.3966$, $v=0.4273$).

Dans le cas d'une cellule plane, la figure 2.18(a) représente l'espace chromatique des couleurs accessibles lorsqu'on fait varier l'épaisseur d'une couche anti-reflet d'indice optique optimal. Nous avons expliqué dans [3] pourquoi optimiser l'indice de l'anti-reflet pour le rendement de conversion η en incidence normale correspond aussi à l'indice optimum pour obtenir la plus grande plage de couleurs possibles.



(a) Diagramme de Judd : l'ensemble des couleurs accessibles en fonction de l'angle d'incidence est délimitée par la courbe en incidence normale. Les flèches indiquent t_{ARC} croissant de 0 à 500 nm.

(b) Rendement de conversion pour différentes conditions d'échange convectif ($h=2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ en absence de vent et $h=+\infty$ en STC).

Fig. 2.18 – Propriétés d'une cellule plane colorée par contrôle de l'anti-reflet.

Seulement 29.4 % de l'espace chromatique est accessible et une partie non négligeable se situe en dehors du triangle sRGB utilisé par les machines numériques (écran d'ordinateur, caméras, appareils photo). Les rouges saturés³⁰ ne sont pas accessibles. L'emploi d'un double anti-reflet (non optimisé) SiO_2/Si_3N_4 augmente la surface chromatique de 2.8 % au moins, principalement dans les directions verte et rouge.

Afin de prendre en compte la luminosité, la figure 2.18(b) restitue les couleurs calculées en incidence normale et projetées dans l'espace sRGB pour différentes conditions d'échange convectif. En dehors du bleu sombre correspondant à un anti-reflet classique, le choix de la couleur altère peu le rendement de production dans des conditions de fonctionnement difficile (absence de vent, soit $h=2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) ou de vent modéré ($h=2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$).

Pour ces premiers résultats, les conditions d'observation ne sont pas encore celles de la figure 2.17, mais notre publication [3] a été une des premières à considérer également la luminosité des couleurs obtenues (et non pas seulement la chromaticité). Le résumé présenté à Silicon PV en 2017 [27] présente quelques premiers résultats de simulation menées en collaboration avec K. MacIntosh (créateur du site www.pvlighthouse.com.au) concernant

28. Uniform Chromaticity Scale : diagramme chromatique uniforme.

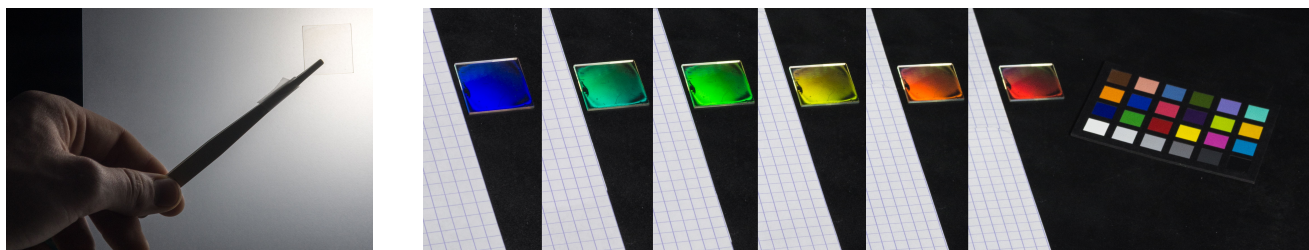
29. International Commission on Illumination : commission internationale de l'éclairage.

30. Les couleurs pures (contour du diagramme de Judd) sont aussi les couleurs dites saturées. L'axe qui passe par le WP et une couleur pure correspond à l'ensemble des couleurs de même teinte mais de saturation variable.

des cellules non planes en considérant des conditions d'observation bien plus réalistes. Des travaux sont en cours pour réaliser différentes démonstrations expérimentales, notamment pour des structures présentant des couleurs lumineuses sans trop diminuer le rendement de conversion.

2.3.2 Travaux en cours sur les couleurs de modules

En plus de modifier l'anti-reflet, il est aussi possible d'intervenir sur n'importe quelle couche entre la face avant d'un module et la cellule elle-même. Nous avons donc cherché à étudier l'impact d'une structuration photonique 2D sur le verre d'un module. Ces travaux ont été amorcés en sept. 2017 lors du PFE de A. Charlety-Meano et ont montré qu'on pouvait obtenir des structururations quasi transparentes en incidence normale (fig. 2.19(a)) mais colorées en observation oblique uniquement pour une gamme d'angles d'élévation bien précise (de 35° à 55° sur la fig. 2.19(b)). Ce comportement correspond à celui d'un réseau de diffraction avec des couleurs nettement plus saturées que dans le cas de la structuration de l'anti-reflet. Il s'agit donc d'une technique intéressante dans le cas d'une intégration en façade de bâtiment (fig. 2.15(b)).



(a) Observation en transmission.

(b) Observation à différents angles (même échantillon).

Fig. 2.19 – Photographies d'un cristal photonique gravé à la surface d'un échantillon en verre - A. Charlety-Meano

Un article décrivant le fonctionnement du cristal photonique, son dimensionnement et les résultats expérimentaux avec une couche structurée optimisée est en cours de rédaction avec M. Amara et R. Orobitchouk (équipe *Nanophotonique*). Cependant, des améliorations doivent encore être apportées concernant la gamme des angles d'observation (élévation), la stabilité des couleurs observées, leur saturation, et la réduction de leur sensibilité à l'azimut (ce qui devrait favoriser les cristaux photoniques à réseau triangulaire et non pas carré). Un brevet est à l'étude concernant ces substrats minces structurés.

2.3.3 Micro-Cellules intégrées pour les systèmes embarqués

Co-encadrement : N. Moulin (2017 - en cours)

Financement : PULSALYS Tunnel (2018 - 2019)

2.3.3.1 Contexte

Le développement de systèmes de récupération d'énergie adaptés aux applications embarquées et communicantes est un enjeu sociétal important avec le développement de l'internet des objets. Actuellement, la grande majorité des systèmes autonomes à très basse consommation s'appuie sur des batteries pour fournir l'énergie nécessaire à leur fonctionnement sur des durées plus ou moins longues (parfois quelques années). Selon l'intelligence des nœuds concernés (microcontrôleur, DSP, FPGA), l'alimentation peut nécessiter quelques V avec un courant de quelques dizaines à centaines de mA lors des opérations de calcul ou de communication [150].

Des cellules solaires de petite taille permettent de fournir l'énergie nécessaire, mais la tension d'utilisation ($\ll 0.75$ V), qui varie selon les conditions d'exposition, n'est pas bien adaptée pour une alimentation directe de composants électroniques, comme un micro-contrôleur et son électronique nécessitant au moins quelques volts. L'interconnexion de plusieurs cellules classiques n'est pas facilement réalisable sur un même substrat sans entraîner de très nombreuses étapes de fabrication. Nous avons donc cherché à développer une nouvelle architecture de cellules solaires multi-jonctions nécessitant très peu d'étapes de fabrication pour en réduire les coûts et permettant de délivrer une tension aussi élevée que nécessaire, de quelques volts par exemple. Ainsi, aucune électronique de rehaussement de tension n'est nécessaire, ce qui évite les pertes de conversion DC/DC et simplifie grandement l'intégration de cette source d'énergie (compacité, circuit simplifié). Pour encore gagner en compacité, nous proposons d'intégrer notre micro-cellule solaire directement au sein du circuit qu'elle doit alimenter. Pour cela, il faut nécessairement s'appuyer sur des procédés standards de fabrication en micro-électronique. Ainsi, les quelques mm de surface utile pour "l'intelligence" d'un objet peuvent se trouver directement sur le même substrat que la cellule d'alimentation.

Après avoir accusé deux refus en tant que porteur du projet auprès de la région Rhône Alpes et deux autres auprès de l'ANR (projet Jeune Chercheur), nous avons tout de même obtenu en 2017 une bourse ministérielle pour recruter une doctorante dont l'encadrement est assuré par M. Lemitte, M. Amara et moi-même, et un financement par la cellule de valorisation PULSALYS.

2.3.4 Le projet PULSALYS Tunnel

L'architecture de notre cellule (fig. 2.20) est constituée de plusieurs cellules élémentaires reliées par des JT. Cette disposition particulière est tout à fait innovante (et absente du [tableau du NREL](#)).

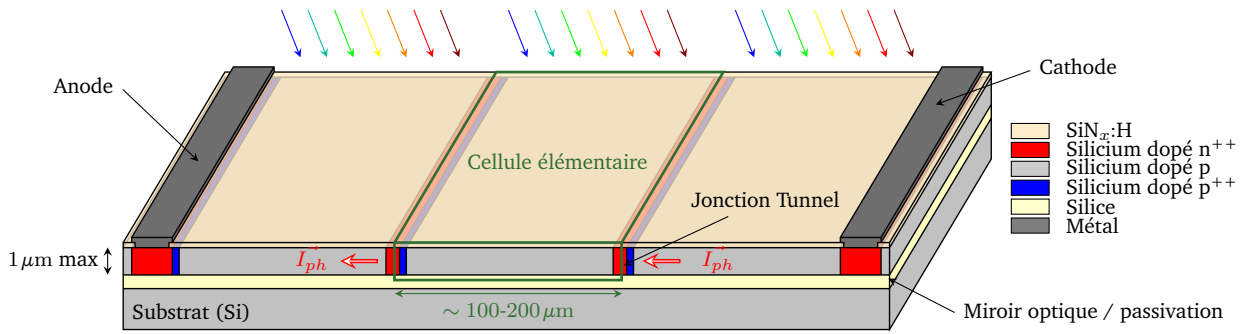


Fig. 2.20 – Exemple d'une cellule à multi-jonctions en Si uniquement constituée de 3 cellules élémentaires.

Par rapport aux cellules multi-jonctions traditionnelles où les jonctions se superposent les unes les autres dans la direction normale à la lumière [151], [152], cette solution permet de produire un photocourant I_{ph} identique dans chaque cellule élémentaire (entourée en vert), quel que soit le spectre solaire incident (et donc la position de la source lumineuse) : la condition dite de "current matching"³¹ est donc systématiquement satisfaite. Contrairement à la technologie Sliver [153] ou encore [154], [155], cette solution est beaucoup plus simple à fabriquer grâce à l'utilisation de l'implantation ionique. Cette dernière limite par contre la profondeur de la JT à environ $1\mu\text{m}$ au plus : cette contrainte forte bride nécessairement le rendement à quelques pourcents pour une structure plane comme pour la figure 2.20. Cependant, l'absence d'une couche dopée sur l'ensemble de la surface avant permet de collecter efficacement les photons de courte longueur d'onde alors qu'ils sont traditionnellement perdus pour toutes les autres architectures de cellules à base de Si (recombinaisons Auger). L'anode et la cathode sont toutes deux réalisées sur du Si de même type de dopage (fabrication en une seule étape) et aucun ombrage optique n'est présent entre ces électrodes. La résistance série ne dépend que des performances des JT et de seulement deux interfaces métal/semi-conducteur. L'oxyde du substrat SOI étant obtenu par oxydation thermique, ce dernier assure une bonne passivation en face arrière et peut servir de miroir (bien que son épaisseur ne soit pas nécessairement optimale). La face avant est recouverte d'un anti-reflet dont l'épaisseur doit être légèrement inférieure aux standards puisqu'il doit être davantage performant pour les courtes longueurs d'ondes. Finalement, la tension V_{oc} est ajustée par le nombre de cellules et le courant I_{sc} dépend de la largeur de ces dernières.

Le principal verrou réside dans la fabrication des JT : leur géométrie doit être parfaitement maîtrisée et régulière. Par simulation, nous avons démontré qu'on pouvait exploiter une astuce de fabrication qui a convaincu le PULSALYS de nous financer en 2018 pour réaliser une démonstration expérimentale et envisager un potentiel brevet.

2.3.4.1 Le projet de thèse en cours

Description

Ce projet de recherche doctorale vise à développer une cellule similaire à celle financée par le PULSALYS, mais avec un rendement de conversion électrique plus élevé, quitte à ajouter quelques étapes supplémentaires. La version la plus élaborée (Fig. 2.21) consiste à utiliser un substrat de SOI avec une couche active de Si de quelques μm . Afin d'améliorer l'interaction entre les photons et le Si, un cristal photonique (ici des pyramides inversées) a pour rôle de sensiblement augmenter le photocourant I_{ph} produit par chaque cellule élémentaire. L'expérience acquise durant la thèse de R. Champory pourra donc être mise ici à profit.

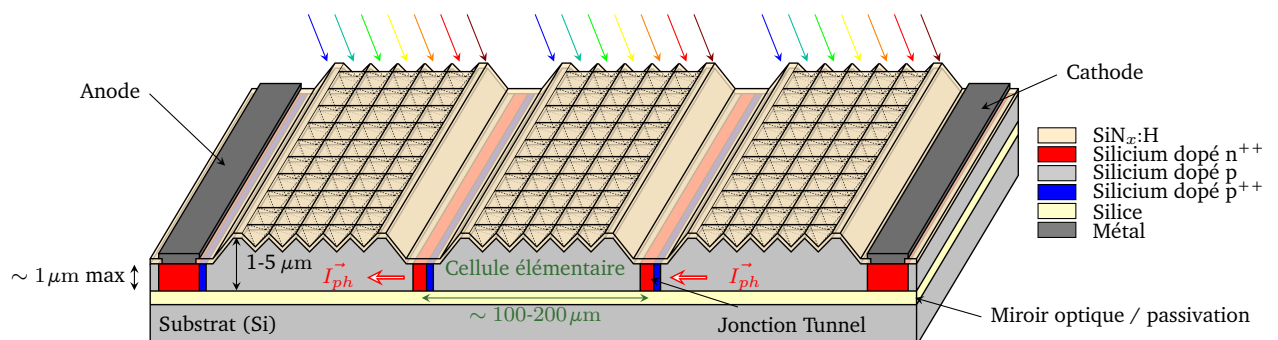


Fig. 2.21 – Version la plus aboutie de cellules multi-jonctions à base de Si localement aminci avec structuration photonique. Pour des raisons d'échelles, la taille des motifs ($<1\mu\text{m}$) n'est pas à l'échelle.

31. Équilibrage des courants des différentes sous-cellules en série pour éviter que la moins performante ne limite l'ensemble.

Afin de rester compatible avec les gammes d'énergies d'implantation des équipements standards, cette solution nécessite de localement amincir le Si pour y loger les JT, ce qui augmente la complexité de fabrication. Dans un premier temps, nous envisageons donc un démonstrateur pour lequel le Si est structuré mais avec une couche active compatible avec la hauteur des JT (sans amincissement local). Cette solution intermédiaire implique :

- l'étude du transport des charges : en effet, celles-ci transitent dans un volume dont une partie non négligeable est structurée sur une grande distance (typ. 100-200 μm) au regard de la structuration (typ. <1 μm).
- l'étude de la passivation de la face avant : en effet, les recombinaisons de surface interviennent sur tout le trajet des porteurs minoritaires et pas seulement au voisinage des collecteurs comme dans une structure traditionnelle (fig. 2.2). Pour une épaisseur donnée, il est attendu que leur impact soit équivalent à des recombinaisons volumiques dans les modèles classiques de cellule.

Le régime de fonctionnement de cette nouvelle architecture de cellule est sensiblement différent de celui des cellules classiques. Nous allons donc devoir réaliser différents modèles et les confronter à des outils de simulation, pour enfin les valider expérimentalement. Ces étapes sont essentielles pour dimensionner convenablement la largeur des cellules élémentaires (que nous avons indiqué à 100-200 μm sur nos schémas).

Avancement

Dans des études préliminaires pour simuler plusieurs cellules cascades, nous avons noté que les simulations (Silvaco) avaient du mal à converger (courant nul en certains intervalles de la caractéristique $I=f(V)$). Les premiers résultats de simulation des JT ont montré qu'il était extrêmement difficile d'obtenir une caractéristique électrique satisfaisante. La géométrie et le niveau de dopage sont importants³² pour convenablement implanter les JT puisqu'ils conditionnent la façon de fabriquer notre cellule.

À l'issue des 9 premiers mois, N. Moulin s'est donc efforcée de réactualiser les différents modèles de JT : dans un premier temps, elle a reproduit les résultats obtenus dans différents articles de référence. Elle a ensuite mis à jour certaines composantes de ces modèles [2], puisque les expressions et/ou les valeurs de certains paramètres ont été affinées avec le temps (impact de la température, valeur des masses effectives etc.) pour en faire ressortir un modèle dont le comportement est satisfaisant par comparaison avec des JT expérimentalement fabriquées dans le cadre du projet [Hetonan](#).

Parallèlement à ces travaux de simulation, nous avons déterminé un *process flow* complet pour différentes variantes de cellules cascades. À l'heure actuelle (juin 2019), N. Moulin a déjà réalisé des premiers échantillons permettant de mettre en évidence quelques difficultés technologiques. Un nouveau jeu de prototypes est en cours de fabrication sur la plateforme [NanoLyon](#) avec des étapes d'implantation réalisées au [CIME-Minatec](#).

2.4 Activités en cours

Financement : [ANR-Hetonan](#) (2015 - 2019)

Contexte

En fonction des conditions d'épithaxie, les matériaux semi-conducteurs III-V peuvent croître sous forme de nanofils. Dans le projet [Hetonan](#), l'objectif est de maîtriser la répartition des nanofils pour exalter un effet photonique et ainsi obtenir une cellule tandem III-V sur Si performante. Comme pour le projet [Menhirs](#), une jonction tunnel est nécessaire pour réaliser l'interface entre les deux sous-cellules.

Dans ce projet, les principaux défis sont de l'ordre technologique puisqu'il s'agit de faire croître de façon localisée des nanofils de type cœur-coquille, à travers une matrice de Silice (30 nm) perforée de trous de (50 nm) de diamètre, organisés en réseau carré de (450 nm) de période.

Contribution

Dans ce projet, je suis concerné par certains aspects de simulation électro-optique, notamment autour des nanofils AlGaAs à cœur de GaAs, avec une compétition entre le régime radial et le régime vertical de collecte des porteurs. Après une période de réflexion, un article devrait voir le jour concernant la compétition entre le régime radial et vertical dans les nanofils, en prenant en compte une géométrie réaliste de simulation. En effet, les simulations ont clairement montré qu'une bonne partie de la lumière était absorbée sur la partie supérieure des nanofils. Ainsi on ne peut se contenter d'un dimensionnement du régime radial (épaisseur et dopage des couches), même pour des structures cœur-coquille.

2.5 Bilan des activités en photovoltaïque

Les recherches menées en qualité de maître de conférences ont toutes porté sur le Si comme matériau de base. Cependant, contrairement à la période précédente où je menais la fabrication, la simulation et la caractérisation de mes structures, mes activités ont dû évoluer. Le développement et l'adaptation de procédés de fabrication sont extrêmement chronophages et nécessitent une pratique régulière³³. J'ai donc peu à peu mis de côté mes activités en salle blanche. Cependant, les compétences acquises permettent d'accompagner efficacement la recherche doctorale en évitant nombre d'erreurs dans la mise au point d'un enchaînement complet.

32. Des dopages tels que $N_a > N_v$ et $N_d > N_c$ constituent une condition nécessaire pour espérer obtenir un courant tunnel.

33. ... ce qui est peu compatible avec des enseignements exclusivement concentrés sur un seul semestre

A contrario, ma principale activité de recherche personnelle se concentre sur la simulation et la caractérisation. Ces deux aspects justifient l'accompagnement des éventuels doctorants et post-doctorants. Dans les deux cas, j'ai volontairement cherché à ne pas m'appuyer exclusivement sur eux pour l'ensemble des points que je souhaitais approfondir ou développer. En effet, dans certains cas, ces approfondissements peuvent s'avérer moins essentiels pour le sujet concerné, lequel est aussi limité dans le temps. Dans d'autres cas, il s'est agi de choix concertés pour avancer efficacement sur certaines problématiques. Enfin, j'ai aussi cherché à développer mes propres activités de recherche, entre formation d'élèves ingénieurs, responsabilités d'enseignement et rédaction de projets.

À court terme, différents articles sont en préparation selon les différentes pistes évoquées en début de chapitre :

- **améliorer les performances en conditions réelles** : ce premier article (rédaction avancée) propose de valider la procédure pour réaliser des mesures de réflexion résolues en angle et donc remonter à l'absorbance.
- **améliorer l'intégrabilité dans le paysage urbain** : un second article (rédaction très avancée [1]), en co-auteur avec H.S. Nguyen (équipe *Nanophotonique*), M. Amara (équipe *Photovoltaïque*) et R. Orobtschouk (équipe *Nanophotonique*), vise à expliquer quels sont les gabarits spectraux pour obtenir une couleur donnée (chromaticité et luminosité) en utilisant une surface structurée sur un substrat transparent. Une application avec un verre transparent en incidence normale, et coloré à un angle d'observation donné constitue la partie expérimentale. Le champ d'application dépasse le domaine du photovoltaïque.
- **améliorer l'intégrabilité dans le paysage urbain** : en collaboration avec M. Amara, un article traitant de l'impact de la nature de la structuration sur la couleur et les performances de cellules est en cours de préparation (échantillons en cours de réalisation).

Cependant, certains axes de recherche ne sont pas exclusifs au domaine photovoltaïque : les résultats de thèse de R. Champory nous ont poussé à étudier la structuration du Si (111) dont les applications en photonique pourraient s'avérer intéressantes. Un article en collaboration avec l'équipe *Nanophotonique* (R. Orobtschouk) est à l'étude.

Enfin, cette période de recherche m'a permis de m'investir dans 3 projets [ANR](#), 1 projet OSEO, 2 projets européens et un projet d'incubation (brevet à l'étude).

Chapitre 3

Activités de formation et de recherche

MA formation initiale concernait la conception des composants photoniques électro-optiques : pendant la thèse et les deux années d'ATER qui ont suivi, j'ai travaillé sur les micro-sources LASERs compatibles avec les procédés CMOS. Pendant le post doctorat qui a suivi, je me suis focalisé sur les micro-photodiodes à avalanche pour télécoms à base Si et de Ge.

En 2011, j'ai intégré l'équipe *Photovoltaïque* dirigée par le Pr. M. Lemitte à l'[Institut des Nanotechnologies de Lyon \(INL\)](#) en qualité de maître de conférences. Depuis, mes activités de recherche se concentrent essentiellement sur les cellules solaires minces comportant au moins une couche de Si mono-cristallin. Ces cellules font appel à la structuration de surface pour améliorer leurs rendements et nécessitent des optimisations électro-optiques, d'où une forte interaction avec l'équipe *Nanophotonique* du laboratoire.

3.1 Rayonnement scientifique

Mes activités de recherche débutées en 2005 ont été citées 392 fois, aboutissant à un *h-factor* de 9¹. J'ai rédigé deux brevets nationaux à la fin de ma thèse qui ont été étendus à l'échelle internationale et j'ai contribué à la révision de 11 articles ([IEEE PTL](#), [Optics Express](#), [IEEE JQE](#), [APL Photonics](#), [ACS Photonics](#), [MSSP](#)).

3.1.1 Responsabilités d'intérêt collectif au sein du laboratoire

Depuis mon arrivée, j'ai pris la responsabilité de deux techniques de mesures spectrales essentielles pour l'étude de cellules solaires, dans la gamme visible et proche IR (300 à 1600 nm) :

- mesure de réflectivité en sphère intégrante : il s'agit de mesurer la réflexion $R(\lambda)$ et la transmission $T(\lambda)$ optique de divers échantillons. L'objectif est de maximiser l'absorption qui vaut alors $1 - R(\lambda) - T(\lambda)$.
- mesure de la réponse spectrale de cellules solaires : en éclairant une cellule solaire à la longueur d'onde λ , on mesure le courant qu'elle produit $I(\lambda)$. En normalisant par rapport au flux photonique incident, on peut remonter au rendement quantique externe (EQE). Cette technique est particulièrement adaptée à la caractérisation résolue en angle de cristaux photoniques.

Ces deux bancs de mesures exploitent une lampe Xénon et un monochromateur (et ses filtres d'ordre) piloté par ordinateur. Avec quelques éléments d'optique et une fibre multimode à grand diamètre interne, on peut alors éclairer nos échantillons en incidence quasi normale.

Afin d'obtenir expérimentalement le comportement angulaire de cellules solaires, j'ai cherché à faire évoluer la partie commune de ces bancs, principalement en profitant des différents PFEs que j'ai encadrés. Ces manipulations nécessitent de contrôler la polarisation de l'onde optique incidente, entrant soit dans la sphère intégrante ou soit se dirigeant sur la cellule à caractériser. Une première évolution des éléments optiques a été réalisée pendant l'été 2016 et a permis de mettre en place un protocole de mesures en sphère intégrante avec une mise en œuvre astucieuse pour normaliser les différentes mesures avec le flux incident. Cette technique de mesure n'a pas encore été exploitée, ni publiée. Dans le cadre du PFE de P. Tissier en 2016-2017, nous avons conclu que la fibre multimode posait des difficultés pour contrôler la polarisation des différents signaux : avec l'aide de L. Berguiga, Ingénieur de Recherche spécialisé en optique, j'ai donc cherché à utiliser un montage dépourvu de fibre optique à base de lame de déphasage $\lambda/2$ sur la gamme 300 à 1100 nm pour un faisceau légèrement focalisé (incidence de 2° au plus). Le montage (fig. 3.1) et les premières mesures ont été réalisés avec la participation de G. Veste dans le cadre de son TIPE (classes préparatoires). Une fois la partie optique opérationnelle (contrôle de la polarisation), les échantillons utilisés pour la réponse spectrale nécessitent des supports rotatifs, lesquels sont en cours d'adaptation grâce au soutien technique de D. Vincent, mécanicien, et P. Girard, électronicien. Nous projetons d'exposer à la communauté cette technique de mesure à travers la rédaction d'un article scientifique.

Étant parfois sollicité par d'autres équipes, il m'arrive soit de réaliser des caractérisations avec les doctorants ou chercheurs concernés, soit de les former à l'utilisation de ces bancs. Par exemple, en collaboration avec l'équipe *Spectroscopie et Nanomatériaux*, nous sommes parvenus à caractériser des couches minces utilisées pour convertir

1. Selon [Google Scholar](#), au 9 septembre 2019.

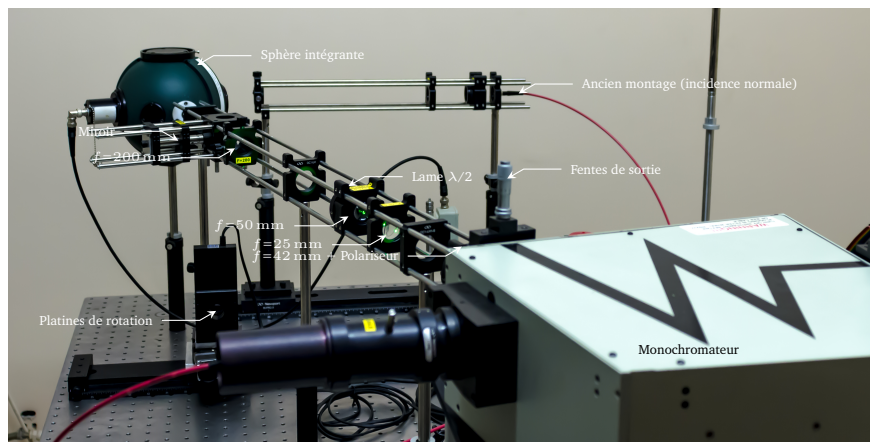


Fig. 3.1 – Montage en optique libre avec contrôle de la polarisation (collab. L. Berguiga (équipe Nanophotonique), mars 2018).

des photons ultra-violets dans des gammes plus adaptées aux cellules solaires [4]. Pour les collaborations avec l'équipe *Dispositifs Électroniques*, nous avons parfois dû faire évoluer certains éléments :

- dans le cadre des thèses de T. Chaves De Albuquerque et D. Issartel, nous avons pu caractériser des photodiodes SPADs en optimisant le niveau de bruit pour détecter des photocourants de l'ordre du fA.
- dans le cadre de la thèse de R. Raphaël, nous avons réalisé des mesures sur des jauges de contrainte en déformation exploitant l'émission par effet de champ grâce à une excitation dans le visible pour étudier le courant Fowler-Nordheim.

Le 12 décembre 2018, j'ai donc été invité à participer au jury de thèse de R. Raphaël [157].

3.1.2 Vulgarisation scientifique

À une échelle nationale, j'ai contribué à rendre davantage accessible la recherche académique pour le grand public. Cela s'est traduit par une participation :

- à l'émission **E=M6** diffusée le 8 septembre 2013, "[des maisons extraordinaires décryptées par la science](#)" au cours de laquelle les journalistes m'ont sollicité pour mon expertise en photovoltaïque.
- aux **Fêtes de la science** en 2015 et 2016 (Villeurbanne, Bibliothèque Marie Curie) à travers deux animations autour de la lumière ("transport d'information par fibre optique" et "énergie photovoltaïque"), devant des collégiens et lycéens durant 2 jours. Pour ces événements, en plus de supports "papier", je m'appuie sur des maquettes de TP de l'**INSA de Lyon** et différents démonstrateurs photovoltaïques afin d'illustrer les sciences dans notre quotidien.
- à l'encadrement de TIPE² de G. Veste, étudiant en Classes Préparatoires aux Grandes Écoles (CPGE).

L'un de mes objectifs, notamment auprès d'un jeune public, consiste à montrer que la recherche est un domaine captivant avec des impacts sociétaux considérables. En continuant de partager mon expérience et mon parcours avec des jeunes, j'espère éveiller en eux quelques vocations scientifiques.

3.1.3 Expertise

C'est en qualité d'expert que je joue différents rôles au sein de la communauté du photovoltaïque :

- de 2014 à 2017, j'ai été **Membre de l'OMNT** (Observatoire des Micro et Nano-Technologies, co-géré par le CNRS et le CEA). J'ai participé à l'élaboration du rapport annuel sur les technologies de cellules solaires à base de silicium (cellules III-V sur Si) et aux diverses réunions liées au fonctionnement de cet observatoire (2-3 jours par an). Chaque année, cela a conduit à la rédaction en commun d'un rapport sur les tendances et perspectives dans le domaine du photovoltaïque.
- j'ai participé en 2016 au recrutement d'un maître de conférences en photovoltaïque (poste MCF 1666 en 63^e section, Université Aix-Marseille), en qualité de **membre extérieur d'un comité de sélection** (COS).
- j'ai été **examinateur** d'un projet de recherche doctorale pour la région Grand Est en 2018.

3.2 Encadrement et projets de recherche

3.2.1 Contribution à des projets de recherche

En tant que post doctorant de 2008 à 2011, j'ai contribué à différents projets, puis, une fois enseignant chercheur, j'ai réalisé différents (co-)encadrements pour la plupart liés à des *Work Packages* (WP) de projets de recherche nationaux ou européens.

2. Travail d'Initiative Personnelle Encadré, obligatoire depuis 1997.

3.2.1.1 Participation à des contrats nationaux

Les projets nationaux auxquels j'ai participé sont les suivants :

- **PULSALYS-Tunnel** (2018-2019) : ce projet, financé par l'accélérateur d'innovations **PULSALYS** et porté par M. Amara (**INL**), vise à montrer l'intérêt de la nouvelle architecture de cellule solaire développée dans le cadre de la thèse de N. Moulin. Au moment de la rédaction de ce manuscrit, une étude de brevetabilité portant sur la technique de fabrication des JT est en cours.
- **ANR-Hetonan** (2015-2019) : Fabrication de cellules tandem à base de nanofils III-V épitaxiés sur Si 111. Partenaires : l'**INL** (coordinateur), le **C2N** (ex LPN), l'**IEF**/Université Paris Sud, l'**IMEP-LAHC**, **SILSEF**. Dans le cadre de ce projet, je me suis focalisé sur les aspects de conception, plus particulièrement sur les simulations électriques et la jonction tunnel à l'interface de la cellule supérieure (nanofils à jonction radiale) et du substrat (silicium) qui constitue la cellule inférieure.
- **OSEO FaSil** (2013-2016) : Fabrication de cellules photovoltaïques sur tranches de Silicium fritté. Partenaires : **S'tile** (coordinateur), l'**INL**, le **CEA-Ines**, FerroPem, Machines Dubuit, Cerlase et **Voltec Solar**. J'ai co-encadré le doctorant F. Gérenton principalement sur la partie simulation électro-optique des cellules qu'on vise à concevoir dans le cadre de ce projet (principalement, optimisation d'un miroir arrière, assurant la passivation, l'ablation laser, et faisant office de barrière aux contaminations par le substrat fritté). C'est dans ce contexte que j'ai co-encadré le post doctorant A. Lukianov.
- **ANR-NaThiSol** (2013-2016) : Nanophotonique pour cellules solaires en silicium cristallin en couche mince, Partenaires : l'**INL** (coordinateur), le **LPICM** (Palaiseau), le LPN (Marcoussis) et Chalmers. J'ai en charge les aspects électriques (collecte des porteurs photogénérés dans des cellules structurées) du WP "simulations électro-optiques". Dans le cadre de ce projet avait été recrutée S. Messadi (démission en 2013) qui fut ma première expérience en encadrement doctoral.
- **ANR-Menhirs** (2011-2015) : Intégration monolithique de cellules solaires III-V à haut rendement sur substrats de silicium. Partenaires : **Foton** (coordinateur), le **Cemes**, l'Irdep EDF R&D, **Heliotrop** et **Aalto** (Fi.). J'interviens sur la partie en silicium (fabrication/simulation) des cellules solaires tandem III-V sur Si qu'on vise à fabriquer. C'est dans ce contexte que j'ai participé à l'encadrement du post doctorant C. Cieslak.
- **ANR-SilVer** (2010-2013) : 10 Gb s^{-1} *SILicon based integrated optical transceiVER for local access networks*. Coordonné par le **III-V Lab** et en partenariat avec le **CEA-Leti**, l'**IEF** et Orange Labs, ce projet avait pour objectif de fabriquer une puce photonique pour traiter les signaux issus d'une connexion longue distance fibrée. Cette puce devait contenir à la fois une source LASER pour l'émission de données à $1.27\mu\text{m}$ de longueur d'onde et un photodétecteur pour leur réception sensible à $1.55\mu\text{m}$. Mon post-doctorat à l'**IEF** concernait la conception de photodiodes Si-Ge à avalanche.

En plus de ces contrats, je suis aussi intervenu pour de la prestation (simulations sous **Silvaco**) avec accord de non divulgation (de juillet 2018 à juin 2019).

3.2.1.2 Participation à des contrats européens

J'ai aussi contribué aux projets d'envergure européenne suivants :

- **KIC-InnoEnergy-PowCell** (2011-2014) : *New generation of silicon based solar cells based on sintered silicon substrates*. Ce projet industriel est porté par l'entreprise **S'tile** en partenariat avec le SDSIL (Sp.), le **SIMaP** (Fr.), le **CEA-Liten** (Fr.), le **CEA-Ines** (Fr.) et **KIT** (All.). Je suis intervenu dans le *work package* lié aux simulations électriques et à la conception de la zone de collage qui devait assurer un rôle de barrière aux impuretés du Si fritté.
- **FP7-PhotoNVoltaics** (2012-2015) : *Nanophotonics for ultra-thin crystalline silicon photovoltaics*. Porté par l'**IMEC** (Be.), les autres partenaires du projet dont : l'**INL** (Fr.), le **LPICM**, l'**Université de Namur** (Be.), Obducat (Su.), Chalmers (Su.) et Total SA (Fr.). Je suis intervenu pour de la simulation électro-optique et j'ai collaboré avec les chercheurs de l'**INL** et de l'**Université de Namur** pour réaliser les simulations nécessaires en important les données optiques issues de nos outils de simulation respectifs. Une partie du co-encadrement doctoral de R. Champory concerne les parties "passivations de cellules structurées" (WP2) et "simulations électriques" (WP1) où nous avons étudié l'influence de la structuration sur le rendement de conversion.
- **FP7-WaDiMOS** (2008-2011) : *Wavelength Division Multiplexed Photonic Layer on CMOS*. Ce projet, porté par l'**IMEC** (Be.) et en partenariat avec le **CEA-Leti** (Fr.), STMicroelectronics (It.), Mapper lithography (P. B.), l'**INL** (Fr.) et l'**Université de Trente** (It.), visait à mettre en place des interconnexions optiques intégrées dans un circuit électronique CMOS. La technologie utilisait le multiplexage en longueur d'onde autour de $1.55\mu\text{m}$ pour indexer plusieurs sources et destinataires avec un débit de 100 Tbit s^{-1} . L'un des principaux challenges auquel j'ai participé en tant qu'ATER consistait à concevoir des sources LASER pompées électriquement à base de substrats reportés d'InP et à adapter les procédés pour des équipements issus de la micro-électronique silicium.

3.2.2 Encadrement de stagiaires et de doctorants

Cette partie se limite aux étudiants que j'ai (co-)encadrés. Le cas des étudiants venant me solliciter pour des mesures expérimentales³ ne sera pas évoqué.

3.2.2.1 Récapitulatif des encadrements réalisés

Le Projet de Fin d'Étude (PFE) est un projet de formation par la recherche et l'innovation souvent proposé en partenariat avec des entreprises. Il sollicite les étudiants pendant environ 300 h réparties sur le premier semestre de la dernière année de leur cursus. Le tableau 3.1 liste les différents PFEs co-encadrés et détaillés par la suite.

Nom et période	Intitulé	Encadrants
A. Bécu 2019-2020	Simulations et mesures de performances de diodes à avalanche SPAD (Single Photon Avalanche Diode)	F. Calmon ¹ R. Orobitchouk ² F. Mandorlo
X. Zuo 2019-2020	Cartographie 2D de rendement quantique interne dans des nanofils III-V par simulation	F. Mandorlo A. Fave
J. Valette 2019-2020	Optimisation de la cellule inférieure en silicium d'une cellule tandem à contacts arrières interdigités	F. Mandorlo E. Fourmond
I. Duciel 2018-2019	Simulation de photocathode en matériaux III-V pour la détection dans le SWIR	F. Mandorlo (100 %)
R. Vermeersch 2018-2019	Efficacité de détection de diodes à avalanche SPAD (Single Photon Avalanche Diode) : mesures et simulations	F. Calmon ¹ (50 %) F. Mandorlo (50 %)
H. Mamodaly 2017-2018	Modélisation de jonctions tunnel en silicium pour applications photovoltaïques	M. Amara (50 %) F. Mandorlo (50 %)
A. Charlety-Meano 2017-2018	Conception et réalisation de filtres sélectifs en longueur d'onde pour le photovoltaïque	R. Orobitchouk ² (40 %) H. S. N'Guyen ² (40 %) F. Mandorlo (20 %)
P. Tissier 2016-2017	Caractérisation résolue en angle de couches micro-nanostructurées pour applications photovoltaïques	F. Mandorlo (100 %)
A. Faujour 2016-2017	Conception et caractérisation de diode à avalanche SPAD	F. Calmon ¹ (50 %) F. Mandorlo (50 %)
N. Brutel 2016-2017	Etude de l'impact de l'encapsulation sur les performances des modules photovoltaïques	M. Amara ³ (40 %) R. Couderc (50 %) F. Mandorlo (10 %)
A. Joulie 2015-2016	Caractérisation résolue en angle de couches micro-nanostructurées pour applications photovoltaïques	F. Mandorlo (100 %)
F. Diller 2014-2015	Caractérisation de couches structurées pour applications photovoltaïques	F. Mandorlo (50 %) A. Harouri ⁴ (50 %)
T. Kempf 2014-2015	Développement d'outils de conception de composants électroniques de puissance en SiC-4H semi-conducteur	N. Thierry-Jebali ⁵ (75 %) F. Mandorlo (25 %)
P. Pambo Tchibinda 2013-2014	Simulation électro-optique de cellules photovoltaïques en couche mince structurée	F. Mandorlo (100 %)
I. El Mejjad 2013-2014	Simulation optique et caractérisation en incidence oblique de structures optiques appliquées au photovoltaïque	D. Blanc Pélissier (50 %) F. Mandorlo (50 %)
L. Marion 2012-2013	Optimisation numérique de cellules photovoltaïques en couche mince structurée	F. Mandorlo (100 %)

Tab. 3.1 – PFE co-encadrés depuis 2012 (niveau M2), intensité de la couleur variant selon le taux d'encadrement. - [1] : équipe Dispositifs Électroniques - [2] : équipe Nanophotonique - [3] : CETHIL - [4] : plateforme NanoLyon - [5] : Lab. Ampère - Par défaut, équipe Photovoltaïque.

En dehors de ces PFEs (M2), j'ai aussi encadré quelques autres étudiants, comme résumé dans le tableau 3.2.

Nom et période	Intitulé	Encadrants	Niveau
L. Besse 03/2019-08/2019	Nanostructuration de matériau grande surface pour le Photovoltaïque	INL : C. Chevalier, F. Mandorlo, R. Orobitchouk Lab. Hubert Curien : N. Crespo-Monteiro, T. Kämpfe, F. Vocanson	M2
J. Elman 07/2013	Optimisation d'un miroir de Bragg pour des cellules photovoltaïques	F. Mandorlo	L3

Tab. 3.2 – Stagiaires encadrés depuis 2012 (hors PFE).

Parallèlement à mes propres activités de recherche, j'ai aussi commencé à co-encadrer des doctorants (tab. 3.3), dont 2 ont soutenu en décembre 2016. Comme on peut le remarquer sur ce tableau, S. Messadi a abandonné son doctorat : mon implication était faible puisqu'elle a principalement travaillé sur les aspects technologiques liés à la fabrication des cristaux photoniques avec les deux autres encadrants de l'ECL alors que je devais ultérieurement l'accompagner pour réaliser les simulations électro-optiques.

3. Par exemple, en 2019, des étudiants du premier cycle de l'INSA de Lyon m'ont contacté pour caractériser optiquement un appareil photo modifié et ses optiques. Ce dernier devait être placé sur un drone pour étudier l'état de santé de végétaux grâce à leur observation dans le proche infrarouge. En 2018, G. Veste, étudiant en CPGE, souhaitait réaliser des caractérisations autour du photovoltaïque pour son TIPE.

Nom et période	Intitulé	Encadrants
N. Moulin oct. 2017 - 20..	Cellules solaires à haute tension de fonctionnement à base de silicium ultra mince nanostructuré	M. Lemiti (33 %) M. Amara (33 %) F. Mandorlo (33 %)
F. Gérenton oct. 2013 - déc. 2016	Procédés innovants adaptés aux cellules photovoltaïques PERC en couches minces de silicium cristallin	M. Lemiti (50 %) F. Mandorlo (50 %)
R. Champory oct. 2013 - déc. 2016	Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructurées : conception électro-optique et développement technologique	A. Fave (30 %) F. Mandorlo (30 %) C. Seassal ¹ (20 %) E. Fourmond (20 %)
S. Messadi oct. 2012 - oct. 2013 (abandon après 1 an)	<i>Photonic Crystals assisted ultrathin film crystalline Silicon solar cells</i>	E. Drouard ¹ C. Seassal ¹ F. Mandorlo

Tab. 3.3 – Doctorants co-encadrés depuis 2012. [1] Équipe Nanophotonique.

3.2.2.2 Détail des PFEs (co-)encadrés

Les différents PFE encadrés ont été réalisés dans des contextes (partenaires éventuels) et thématiques variées (simulation, caractérisation, fabrication de démonstrateurs). Sont absents de ce paragraphe les PFEs encore en cours (2019-2020), leur contenu étant amené à évoluer.

Mesures résolues en angle en sphère intégrante

- I. El Mejjad s’est concentrée sur l’état de l’art et a commencé la mise au point d’une technique de mesure plus simple que ce qui est conventionnellement utilisé (utilisation de multiples signaux, alignements optiques complexes etc) [158].
- F. Diller a cherché à quantifier expérimentalement les perturbations dues à la présence d’objets dans la sphère (support, axes de translation etc.) afin de les prendre en compte dans le flux photonique de référence.
- A. Joulie a réalisé des mesures montrant l’intérêt de la technique de mesure (avec comparaison d’un échantillon de référence).
- P. Tissier a mis en évidence l’intérêt de la corrélation dans le protocole de mesure (fig. 2.17). Cela permet d’automatiser le post traitement des mesures. Expérimentalement, il a montré la nécessité de réaliser un montage en espace libre, sans fibre. Nous avons alors acheté une lame $\lambda/2$ à large gamme (300 à 1100 nm) pour simplifier le protocole de mesure pour les différentes polarisations. G. Veste, étudiant en CPGE (2018), a contribué au montage de la nouvelle version du banc optique, mais l’a principalement utilisée pour réaliser des réponses spectrales (montage optique commun).

Simulation (opto-)électrique

- L. Marion s’est concentrée sur l’impact de la structuration photonique sur les performances électriques de cellules solaires en Si de quelques microns d’épaisseurs. Elle a contribué à débayer le terrain concernant les travaux de simulation autour des projets ANR-NaThiSol et FP7-PhotoNVoltaics.
- P. Pambo Tchibinda s’est concentrée sur l’influence de la structuration sur le transport et l’efficacité de collecte des porteurs dans des cellules solaires de quelques microns d’épaisseurs.
- T. Kempf a étudié comment utiliser un modèle 2D local de transistors à base de SiC et le coupler à un circuit à base de résistances équivalentes pour remonter au comportement 3D d’une version interdigitée. Les résultats ont été publiés en conférence [37].
- H. Mamodaly s’est intéressé à la simulation de JT en Si. Principalement, il s’est agi de déterminer les différents modèles utilisés dans la littérature et de les comparer afin de sélectionner les mieux adaptés pour réaliser des simulations de cellules tandem ou multi-jonctions.
- I. Duciel s’est concentrée sur une photocathode à base d’InP servant à la vision nocturne. La simulation de ce genre de composant fait intervenir de très faibles niveaux de courant, avec une extraction des porteurs par effet de champ. Totalement simulé sous Silvaco, ce composant a fait le fruit d’une étude pour un partenaire industriel qui ne souhaite pas communiquer son identité (avec accord de non divulgation).

Caractérisation (opto-)électrique

- N. Brutel, en collaboration avec M. Amara (CETHIL), a cherché à mesurer l’ombrage effectif des pistes métalliques en face avant de cellules solaires. Ces résultats préliminaires ont permis de décorrélérer l’influence de la taille du spot de mesure pour remonter à une largeur effective plus faible que la largeur physique, à la fois pour les *busbars*⁴ et les *fingers*⁵.
- A. Faujour, en collaboration avec l’équipe *Dispositifs Électroniques*, a cherché à mesurer le rendement quantique externe (EQE) de photodiodes SPAD (Single Photon Avalanche Diode) de 50 μm de coté (fig. 3.2). Pour cela, nous avons détourné l’utilisation du banc réalisant les mesures pour des cellules solaires, notamment pour limiter le flux incident à 250 $\text{Hz} \mu\text{m}^{-2}$ au plus. Les résultats ont été comparés avec les mesures réalisées à ICube, mais sous différentes conditions d’éclairement [159] et de polarisation

4. Pistes conductrices principales en face avant des cellules solaires.

5. Ramifications conductrices secondaires, plus étroites et nombreuses que les *busbars* auxquels ils sont connectés.

électrique. En mars 2019, les mesures ont été significativement améliorées grâce à un capotage du banc et une meilleure utilisation de la chaîne de mesure, sous l'impulsion du doctorant D. Issartel.

- A. Charlety-Meano, en collaboration avec l'équipe *Nanophotonique* a travaillé aussi bien sur les aspects conception, fabrication et caractérisation d'échantillons de verre recouverts d'un cristal photonique pour en maîtriser la couleur perçue, tout en assurant une très bonne transmission optique (fig. 2.19).
- R. Vermeersch a poursuivi les travaux de caractérisation de SPAD en incidence normale et en illumination diffuse via la sphère intégrante. L'objectif est de calibrer convenablement notre technique de mesure pour ce genre de composants, pour de futures caractérisations.

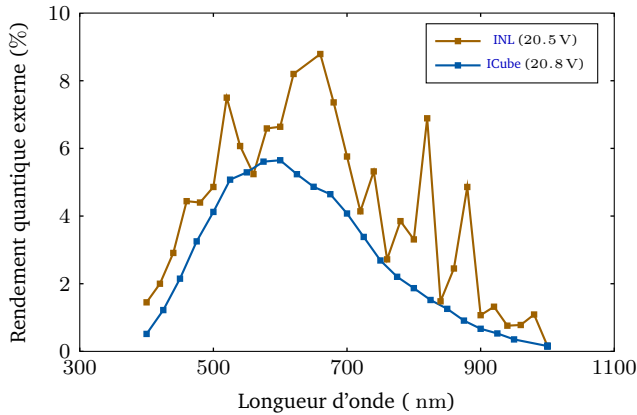


Fig. 3.2 – EQE mesuré en incidence normale à l'INL et comparé avec des mesures réalisées à ICube en sphère intégrante (incidence diffuse), pour différentes tensions de polarisation des SPAD (2018).

3.2.2.3 Détail des stages (co-)encadrés (hors PFE)

Les deux autres stages encadrés en dehors des PFEs ont pris des formats très différents, notamment à cause de leur durée et du niveau des étudiants.

Simulation optique

- J. Elman, étudiante en première année au département SGM, souhaitait avoir une expérience dans la recherche alors qu'elle n'était encore qu'en première année (L3). En 2013, j'observais des incohérences de calcul pour dimensionner des miroirs en face arrière pour des cellules de type PERC (voir partie 2.2.1.3). En effet, lorsque la face avant est structurée par des pyramides, la lumière atteignant la face arrière n'arrive pas du tout en incidence normale, encore moins lorsque la position de la source lumineuse varie. Ce stage de 1 mois avait donc pour objectif d'analyser le problème en utilisant IMD v4.4 [130]. Suite à ce stage, j'ai entrepris de coder mes propres routines en Matlab et en C/C++.

Nanostructuration et couleurs

- L. Besse se focalise depuis mars 2019 sur la structuration de substrats en verre à l'aide de cristaux photoniques 2D en vue d'obtenir des empilements très peu réfléchissants (idéalement $R < 1\%$), non absorbants avec quelques résonances optiques judicieusement placées pour réfléchir quelques photons dans le visible et ainsi obtenir une surface colorée. Une telle structure correspond tout à fait au besoin des applications photovoltaïques puisqu'on cherche à transmettre tous les photons, à l'exception des rares qu'on exclut pour gérer la couleur d'un module. L'absence de pigments et de pertes optiques permet de limiter l'impact sur le rendement de conversion. Ce stage est essentiellement technologique et s'appuie sur les moyens de la plateforme NanoLyon avec le développement de supports "maîtres" obtenus par lithographie holographique. Ces supports seront utilisés au Lab. Hubert Curien pour réaliser des démonstrateurs par nano-impression. Une partie du stage consiste aussi à dimensionner les objets photoniques et à confronter leurs performances expérimentales aux simulations.

3.2.2.4 Détail des thèses soutenues

Nom :	F. Gérenton
Soutenance :	16 décembre 2016
Titre :	Procédés innovants adaptés aux cellules photovoltaïques PERC en couches minces de silicium cristallin
Ecole doctorale :	Électronique, Électrotechnique, Automatique (EEA)
Spécialité :	Electronique, Micro et Nano-électronique, Optique et Laser
Membres du jury :	A. Bsiesy, M. Lemiti, F. Mandorlo, O. Palais, S. Parola, A. Straboni, Y. Veschetti

En 2013, j'ai entamé le co-encadrement de F. Gérenton, sur des cellules à base de Si aminci reportés sur un substrat de Si fritté produit par l'entreprise S'tile.

Résumé : Le coût de fabrication des modules photovoltaïques est un point critique pour implanter l'énergie solaire dans le mix énergétique. L'un des moyens d'abaisser ce coût est la réduction de l'épaisseur de silicium

utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Il est techniquement possible de produire des cellules photovoltaïques en silicium cristallin d'une épaisseur de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur seulement, bien que cela représente un défi à la fois pour le procédé de fabrication de telles cellules et pour leur optimisation. Celle-ci est différente des cellules d'épaisseur conventionnelle notamment par le besoin d'un piégeage optique et d'une passivation de surface de haut niveau. Cet aspect sera étudié au travers de deux structures : un réflecteur en face arrière de la cellule, et un procédé de texturisation innovant pour limiter la gravure du silicium de la cellule, déjà mince. Enfin, l'implantation du réflecteur dans des cellules photovoltaïques sera traitée.

L'optimisation du réflecteur considéré pour des cellules minces en silicium cristallin a montré de très bonnes propriétés réfléchissantes et de passivation de surface, ainsi qu'une compatibilité avec l'ensemble des étapes du procédé de fabrication. Ensuite, la texturisation avancée développée dans ce travail a montré un gain potentiel important en photogénération pour des cellules de faible épaisseur. La caractérisation de ces structures a montré des performances optiques et électriques comparables à l'état-de-l'art. Enfin, la fabrication de cellules photovoltaïques d'épaisseur standard utilisant le procédé développé pour les cellules minces a montré le gain du réflecteur développé pour la face arrière par rapport à une structure classique de cellule. De plus, la réalisation de ces cellules avec le procédé destiné aux cellules minces a permis d'établir que les étapes non-standard du procédé sont compatibles avec l'obtention de cellules photovoltaïques performantes.

Publications :

- Journaux internationaux avec comité de lecture : [7], [16]
- Conférences internationales : [35], [39], [42]
- Conférences nationales : [49], [53]-[55]

Situation actuelle : Post-doctorant au [CEA-Ines](#)

<i>Nom :</i>	R. Champory
<i>Soutenance :</i>	13 décembre 2016
<i>Titre :</i>	Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructurées : conception électro-optique et développement technologique
<i>Ecole doctorale :</i>	Électronique, Électrotechnique, Automatique (EEA)
<i>Spécialité :</i>	Physique
<i>Jury :</i>	C. Gourgon, A. Slaoui, A. Kaminski-Cachopo, O. Deparis, C. Seassal, A. Fave, F. Mandorlo, E. Fourmond

La même année, R. Champory a commencé sa thèse de doctorat. Initialement, il n'était pas prévu que je fasse partie de ses encadrants, mais son sujet de recherche l'a poussé à se rapprocher de moi pour mes compétences en simulations électro-optiques. Finalement, après concertation en fin de première année avec ses autres encadrants, et au regard de mon investissement conséquent, j'ai été inclus comme co-encadrant de ses travaux.

Résumé : Les cellules photovoltaïques en couches minces de silicium cristallin sont des candidates prometteuses pour les développements futurs de l'industrie photovoltaïque, au regard des réductions de coûts attendues et des applications dans les modules souples. Pour devenir compétitive, la filière des couches minces de silicium monocristallin doit se différencier des filières classiques. Elle est donc généralement basée sur l'épitaixie de couches de haute qualité puis sur le transfert vers un support mécanique pour terminer la fabrication de la cellule et réutiliser le premier substrat de croissance. Le but de cette thèse est de trouver les associations technologiques qui permettent de réaliser des cellules photovoltaïques en couches minces et ultra-minces de silicium monocristallin à haut-rendement. Les travaux présentés s'articulent selon deux axes principaux : le développement et la maîtrise de procédés technologiques pour la fabrication de cellules solaires en couches minces et l'optimisation des architectures de cellules minces haut-rendement.

Dans ce cadre de travail, les développements des techniques de fabrication ont d'abord concerné la mise au point de procédés de transfert de couches minces : une technologie basse température de soudage laser et un soudage par recuit rapide haute température. Afin d'augmenter le rendement de conversion, nous avons développé des structurations de surface utilisant les concepts de la nanophotonique pour améliorer le pouvoir absorbant des couches minces. Avec une lithographie interférentielle à 266 nm et des gravures sèches par RIE et humides par TMAH, nous pouvons réaliser des cristaux photoniques performants sur des couches épitaxiées de silicium. Finalement, nous avons pu concevoir des architectures optimisées de cellules solaires minces à homo-jonction de silicium et à hétéro-jonction silicium amorphe / silicium cristallin plus performantes électriquement, grâce aux outils de simulation électro-optique. Notre approche théorique nous a aussi conduits à expliciter les phénomènes électriques propres aux couches minces, et à démontrer tout le potentiel des cellules photovoltaïques minces en silicium monocristallin.

Publications :

- Journaux internationaux avec comité de lecture : [5], [17]
- Conférences internationales : [30], [29], [40], [41]

Situation actuelle : Ingénieur optique chez [Safran Electronics & Defense](#)

3.2.2.5 Encadrement de thèse en cours

<i>Nom :</i>	N. Moulin
<i>Début de thèse :</i>	1 ^{er} octobre 2017
<i>Titre :</i>	Cellules solaires à haute tension de fonctionnement à base de silicium ultra mince nanostructuré
<i>Ecole doctorale :</i>	Électronique, Électrotechnique, Automatique (EEA)

Description du sujet : La filière à base de silicium domine actuellement le marché photovoltaïque grâce à des cellules au coût de fabrication compétitif. Cependant, leur faible tension de sortie (typ. de 0.5 à 0.75 V) est difficilement exploitable directement pour alimenter un dispositif électro(n)ique. La tension utile d'une cellule solaire est augmentée par différentes méthodes : soit en utilisant des cellules multi-jonctions empilées les unes sur les autres [151], [152], soit en découpant et ré-assemblant des portions de cellules solaires pour les mettre en série [153]-[155]. Dans le premier cas, les cellules élémentaires sont optimisées pour une incidence et un spectre donné, tandis que dans le second cas, la complexité technologique rend le procédé très coûteux.

Dans le cadre de ce travail de thèse, il s'agit d'étudier une approche originale pour fabriquer une cellule solaire à multi-jonctions latérales, non exploitée à l'heure actuelle, et uniquement à base de silicium. Cette architecture permet de disposer d'une tension utile élevée, sans ombrage optique, sans exploiter de matériaux coûteux, sans étape de découpe et de collage. Afin d'optimiser convenablement la nanostructuration, nous prendrons en compte les aspects thermiques (température de fonctionnement, échange radiatif dans l'infrarouge).

L'élaboration s'appuie sur l'implantation ionique d'un substrat de type **SOI**, ce qui évite les interfaces de collage, comme dans [153] ou [154], et réduit drastiquement le nombre d'étapes de fabrication. Le dopage p de la couche active (jusque $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) de ce substrat est aussi compatible avec la fabrication de circuits électroniques sur le même support. Cette source d'énergie photovoltaïque peut donc aussi bien s'intégrer au sein d'une même puce, ou bien être déportée à côté. Les applications visées concernent les objets ou microsystèmes nécessitant une source d'énergie embarquée pour garantir leur autonomie (capteurs intelligents etc). Pour compenser en partie la faible épaisseur de matériau actif, nous proposons de structurer à l'échelle sub-micronique la face avant de la cellule, et d'optimiser son comportement optique, électrique et thermique.

Publications :

- Journaux internationaux avec comité de lecture : [2]
- Conférences nationales : [47]
- Conférences internationales : [26]

3.3 Activités de formation

Cette partie présente les enseignements et les responsabilités prises depuis mon arrivée à l'**INL** et à l'**INSA de Lyon** dans le département **Science et Génie des Matériaux (SGM)**, après avoir participé à la formation d'ingénieurs à l'**École Centrale de Lyon (ECL)** comme vacataire puis comme ATER à plein temps pendant 2 ans.

3.3.1 Le département **Science et Génie des Matériaux (SGM)** à l'**INSA de Lyon**

3.3.1.1 **SGM**, un département orienté vers la recherche

Après deux ans de formation généraliste, le département **SGM** vise à former environ 85 ingénieurs par an dont les compétences couvrent à la fois la conception et la fabrication de produits développés dans les industries de haute technologie. Les domaines d'application couvrent aussi bien les semi-conducteurs, les métaux, les alliages, les polymères que les composites et les céramiques. La mise en œuvre de ces matériaux s'étend jusqu'à la conception de composants pour la micro et la nanotechnologie.

La dernière année apporte à chaque élève ingénieur la possibilité de se spécialiser selon trois profils :

- Matériaux de Structure et Durabilité (MSD), qui a pour objectif d'aborder les relations entre le comportement d'une structure et les performances des matériaux.
- Polymères et Procédés de Fabrication (PPF), qui se concentre sur les diverses utilisations des polymères et les techniques permettant de les mettre en œuvre.
- semi-conducteurs, Composants et Micro-nanotechnologies (SCM), qui se focalise sur les dispositifs intégrés mêlant optique, micro-électronique et mécanique.

Durant leur formation, les étudiants bénéficient de la proximité de trois laboratoires partenaires parmi lesquels figure l'**INL**. Ainsi, les futurs ingénieurs réalisent des projets (collectifs, de fin d'étude) en étroite collaboration avec des chercheurs de ces trois structures. Ce département est déjà compatible avec le label *parcours recherche* qui doit permettre à tout étudiant qui le souhaite de pouvoir identifier un parcours (choix des options) lui permettant de poursuivre sa formation en recherche. En pratique, c'est l'ensemble de la formation qui profite d'un tel balisage, ce qui conduit 1 étudiant sur 5 à poursuivre en doctorat (20.2 % en 2015 contre 8.4 % en moyenne sur l'**INSA de Lyon** la même année).

En tant qu'enseignant, j'interviens donc dans le tronc commun du département, aussi bien en électronique qu'en informatique, et dans l'option SCM.

3.3.1.2 Responsabilités administratives au sein du département

En 2014, j'ai pris la responsabilité des Projets de Fin d'Étude (PFE) en filière SCM, puis, deux ans plus tard, celle de l'ensemble des PFEs des trois filières. Je me charge donc de gérer les différentes affectations des projets (pour la filière SCM), les différents plannings de soutenances, en m'appuyant sur les deux responsables de filière (PPF et MSD).

En 2015, j'ai été élu membre du conseil de département pour un mandat de 4 ans comme représentant des enseignants-chercheurs. Cela me permet d'être actif dans les décisions régissant le fonctionnement du département (vote des budgets, évolution de la formation etc).

Mes compétences en informatique m'ont permis de devenir référent numérique du département SGM depuis 2016. Mon rôle consiste à me placer comme intermédiaire technique entre les besoins des différents personnels et la Direction des Systèmes d'Information (DSI) qui gère l'ensemble du parc informatique de l'INSA de Lyon.

3.3.2 Le master NanoScale Engineering (NSE)

Porté par l'INSA de Lyon, l'ECL et l'UCBL, le master NSE a pour objectif de garantir une formation pluridisciplinaire à vocation internationale dans les domaines des nanosciences et nanotechnologies. Ce master, créé en 2009, est aussi proposé aux étudiants de l'option SCM pour obtenir un double diplôme. Avec 50 % d'étudiants étrangers, les enseignements sont réalisés en anglais.

Pour ce master, j'encadre des TP de simulation de conception de composants à base de semi-conducteurs.

3.3.3 Adéquation avec les activités de formation

Les enseignements réalisés au sein du département SGM sont pour certains étroitement liés aux activités de recherche. En effet, les travaux pratiques s'appuient sur des outils couramment utilisés en recherche :

- le passage de ISE TCAD à Silvaco en 2018 (TPs *Matériaux et composants semi-conducteurs*) a principalement été motivé par les PFE : d'une part, cela permet aux étudiants de 5^e année d'être immédiatement opérationnels ; d'autre part, c'est une façon pour les enseignants de rentabiliser la maîtrise de l'outil.
- l'utilisation de Cadence en 5^e année (TPs *Caractérisation et simulation des semi-conducteurs et composants*) permet de simuler des circuits à l'aide de composants discrets et/ou de manipuler des fichiers GDS manuellement, ce qui est courant dans la recherche dès que l'on conçoit son propre dispositif (qui ne dispose donc pas de librairie générique).

Pour ces TP, dont l'un des objectifs consiste à prendre en main l'outil de simulation, il est même arrivé que des doctorants du laboratoire demandent à les suivre en même temps que les étudiants de l'INSA de Lyon.

Les autres enseignements réalisés en TDs (*Circuits électroniques - signaux systèmes*), TP (*Matériaux - mesures - optoélectronique*) ou en cours (*Outils de simulation et communication par radio-fréquences*) sont étroitement liés à la physique et aux semi-conducteurs.

Enfin, avec mon collègue J. Morthomas, nous avons mis en place un ensemble de TDs s'appuyant sur Matlab (*Techniques Numériques pour l'Ingénieur*) où nous utilisons cet outil logiciel pour résoudre des problèmes de physique et manipuler des données. Jusque 2017, la licence utilisée à l'INSA de Lyon ne couvrait que les enseignements : avec le passage à une licence de type "campus", les étudiants y ont aussi eu accès sur leurs machines, ainsi que l'ensemble des personnels de laboratoire. Cette facilité d'accès a grandement contribué à ce que Matlab soit fréquemment utilisé en projets collectifs, et surtout en PFE.

D'avantage de détails concernant les activités de formation sont donnés dans l'annexe *Investissement en formation supérieure*.

3.4 Conclusion

Depuis l'arrivée à l'INL, j'ai eu l'opportunité de co-encadrer deux doctorants ayant déjà soutenu, tandis qu'un troisième est en dernière année et que j'ai été membre invité au jury d'une quatrième thèse. J'ai aussi (co-)encadré 13 étudiants en PFE (niv. M2) et deux stagiaires. L'arrivée dans le département SGM a impliqué aussi quelques responsabilités (représentant des enseignants au département, référent informatique, responsable des PFEs). Au sein de l'INL, différentes opportunités se sont présentées pour collaborer avec d'autres équipes du laboratoire (*Nanophotonique* et *Dispositifs Électroniques*) : il a ainsi fallu former les utilisateurs récurrents et/ou adapter certains équipements de caractérisations.

À travers la vulgarisation scientifique (*émission E=M6*, fêtes de la science), j'espère éveiller l'intérêt du jeune public à la recherche et aux sciences. Enfin, c'est en qualité d'expert que j'ai participé à un comité de sélection d'un enseignant chercheur, à la relecture de 11 articles pour différents journaux, et à l'observatoire spécialisé dans le photovoltaïque de l'OMNT.

Dans l'ensemble, ces activités d'encadrement m'ont incité à renouveler une demande de PEDR en 2019.

Conclusion et perspectives

LES thématiques de recherche abordées ces dernières années ont été fortement dépendantes du succès des projets proposés à la région, à l'ANR ou auprès de l'Europe. Les faibles taux de réussite (parfois moins de 15 %) à ces candidatures rendent difficile la projection de ses activités de chercheur, tout comme ils ne garantissent pas d'être porteur d'au moins un projet en permanence. Ceci étant, cette partie propose un ensemble de pistes que je souhaite explorer.

À très court terme, mes projets de recherche s'inscrivent dans la poursuite des activités de simulation et de caractérisation des projets de mon équipe, ainsi que dans le développement de thématiques plus personnelles.

4.1 Projets en cours : cellules tandems reportées sur Si

Dans la continuité du projet [ANR-Hetonan](#), je souhaite prolonger les efforts autour des cellules tandems à nanofils III-V concernant les aspects suivants :

- expérimentalement, j'envisage de pouvoir étudier le comportement angulaire de la cellule supérieure. La principale difficulté réside dans la taille de ces cellules (quelques mm) découlant de la lithographie électronique utilisée pour les fabriquer. C'est donc le banc de caractérisation optique que je souhaite mettre à profit pour étudier expérimentalement le comportement angulaire de ce genre de cellules, et donc analyser leur capacité à absorber la lumière.
- par simulation, j'ai prévu un projet de fin d'étude (PFE) en collaboration avec A. Fave (porteur du projet) afin de pouvoir étudier la compétition entre le régime radial et vertical des nanofils que nous fabriquons. En effet, lors de la croissance épitaxiale, le nanofil pousse en hauteur ou s'élargit en fonction des régimes de dépôt. Cependant, l'absorption génère des porteurs de charges de façon inhomogène dans l'absorbeur. L'idée est ici de présenter une sorte de cartographie spatiale de probabilité de collecte afin de mieux comprendre les limitations électriques induites par la géométrie des nanofils. C'est un prolongement 2D des travaux de simulation déjà réalisés dans le cadre de [Hetonan](#), mais uniquement en 1D et non publiés (fig. 4.1(c)). Ces simulations montraient déjà un comportement différent entre les régimes radiaux et verticaux selon qu'on considère une couche externe ou interne de la jonction p-i-n (forte chute pour la couche dopée n en régime vertical sur la fig. 4.1(c)).

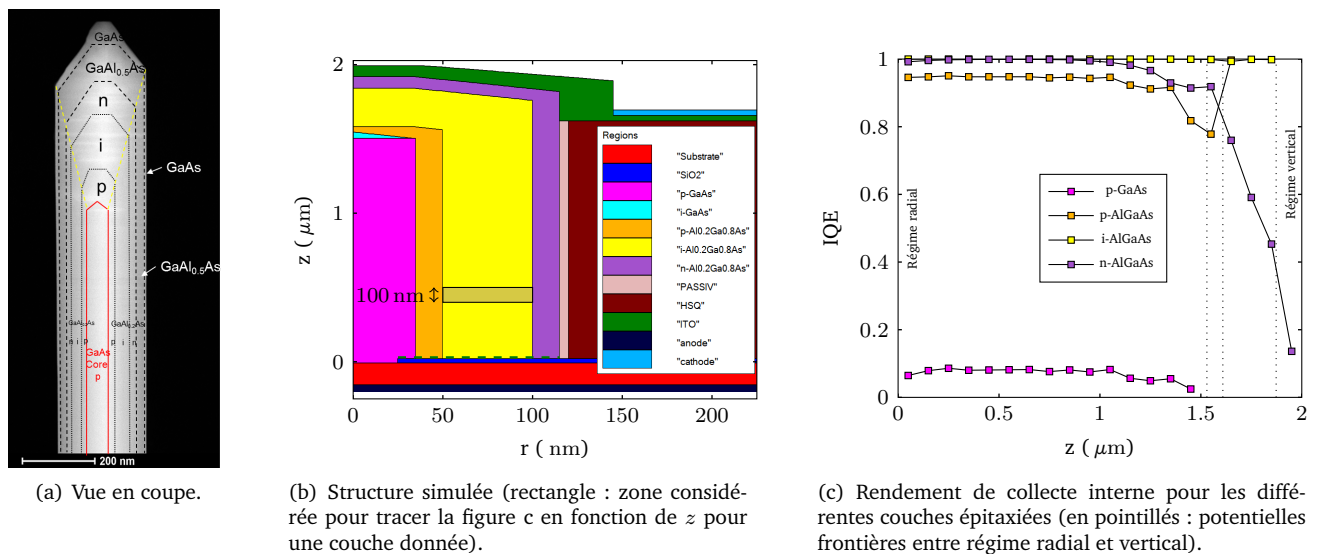


Fig. 4.1 – Nanofils III-V à cœur de GaAs avec une structure p-i-n épitaxiée en AlGaAs.

Avec le projet [TheSis](#), débuté en novembre 2018 et porté par le [GeePS](#), je vais contribuer à explorer par simulation l'optimisation électrique de la sous-cellule inférieure de cellules à trois terminaux [160]. Un PFE est aussi prévu à la rentrée, en collaboration avec E. Fourmond.

En fonction des résultats, des publications pourront être envisagées.

4.2 Projection à court terme

4.2.1 Évolution des bancs de caractérisation expérimentale

Après avoir participé jusqu'à 5 projets de front, ces dernières années ont surtout été marquées par l'exploration de nouveaux axes, notamment autour du comportement optique en condition réelle de cellules solaires. Cela nécessite donc de pouvoir réaliser des figures de rendement en fonction de l'élévation, de l'azimut et de la polarisation. Ces mesures expérimentales présentent aussi l'avantage d'accéder à des informations difficiles à simuler, notamment pour les structururations périodiques photoniques qui s'appuient sur des effets de diffraction. En effet, la condition de Bloch (condition de périodicité sur les frontières du motif élémentaire) n'est pas évidente à satisfaire quels que soient les angles d'incidence et les longueurs d'ondes. Certaines méthodes numériques (RCWA par exemple, au contraire de la FDTD), permettent désormais de palier ces difficultés mais plusieurs heures supplémentaires sont souvent nécessaires pour une condition d'incidence donnée. Au contraire, l'expérimentation apporte de nombreuses informations en un temps raisonnable.

À très court terme, il s'agit donc d'automatiser le balayage angulaire et spectral de cellules pour en extraire leur EQE et leur IQE en améliorant le banc optique actuellement en place. Comme évoqué dans la partie précédente, nous maîtrisons désormais les conditions d'exposition des échantillons (polarisation, incidence, puissance). Un travail de programmation sera nécessaire pour synchroniser les mesures spectrales avec les déplacements des doubles platines de rotation. S'agissant d'un prototype, différents supports mécaniques doivent être fabriqués pour assurer un bon maintien quelle que soit la position des cellules (même en position quasi verticale). Le système de maintien est d'autant plus complexe pour les cellules de type IBC pour lesquelles les contacts sont tous deux localisés en face arrière, ou pour les cellules à 3 terminaux développées dans le cadre du projet [ANR-TheSis](#).

Dès lors, pour une position terrestre donnée, nous serons à même de prendre en compte l'évolution des spectres directs et diffus pour estimer au mieux le rendement annuel d'une cellule solaire.

4.2.2 Applications photovoltaïques pour le bâtiment

Un autre aspect de mes travaux récents [1], [49] se concentre sur les spectres réfléchis et transmis desquels découle la couleur perçue des cellules. Ces propriétés optiques visent à améliorer l'intégration au bâti, quitte à faire quelques concessions sur les rendements. Parmi les stratégies que je souhaite explorer, la structuration photonique du verre d'encapsulation coté cellule semble offrir d'intéressantes opportunités car il serait protégé des intempéries, et permettrait de conserver des cellules standards. Les calculs de simulation déjà réalisés lors des PFEs montrent que les résonances étroites des cristaux photoniques devraient malgré tout produire des couleurs dont la luminosité est acceptable. Suite à l'absence de financement d'un projet [ANR](#) l'an passé, je souhaite améliorer la proposition de mon projet et le soumettre de nouveau en 2019.

Si le travail sur l'épaisseur des cellules a permis de réduire les coûts de fabrication tout en améliorant les performances, il a été montré que réduire l'épaisseur des cellules en dessous de $40\text{ }\mu\text{m}$ commençait à sérieusement limiter le rendement [161]. Pour ces cellules dont l'épaisseur dépasse quelques microns, les projets [ANR-NaThiSol](#) et [FP7-PhotoNVoltaics](#) nous ont déjà permis d'explorer et d'évaluer les différentes solutions de structuration et de passivation à appliquer. Malheureusement, pour obtenir des cellules réellement déformables à base de silicium monocristallin, il faudrait recourir à des épaisseurs moindres. À l'heure actuelle, la ductilité ne fait donc pas partie de mes priorités contrairement à l'impact de la structuration sur le transport des charges.

4.3 Projection à moyen et long terme

À plus long terme, la rédaction de cette HDR m'a permis de faire ressortir deux thématiques, découlant des interactions avec M. Amara. La première concerne les aspects électro-optiques exclusivement, avec une réflexion sur l'intégration du photovoltaïque en milieu urbain. La seconde porte sur les conditions réelles de fonctionnement principalement d'un point de vue optique (visible et IR) mais sans se restreindre uniquement au domaine d'absorption du silicium.

4.3.1 Maîtrise de la couleur des modules et impact sur les rendements de conversion

Le contexte national (RT 2020) qui impose au nouveau bâti de produire sa propre énergie devrait grandement pousser le marché du photovoltaïque. En effet, l'énergie solaire est la seule disponible sur l'ensemble du territoire, alors que l'énergie géothermique n'est que localement accessible. Ainsi, de nombreux bâtiments devraient recourir aux panneaux solaires pour respecter les réglementations, que ce soit en toiture ou en façade, voire les deux [162].

Respecter ces nouvelles normes peut s'envisager selon différentes stratégies en fonction de la hauteur H et de la surface occupée S des bâtiments. Pour simplifier les choses, considérons un bâtiment de forme cylindrique, de rayon R . Sur sa toiture, des panneaux solaires peuvent produire une densité de puissance moyenne P_{sup} . Nous allons aussi supposer que les façades produisent en moyenne une densité de puissance P_{lat} . En considérant que la consommation énergétique est proportionnelle au nombre d'humains qu'il abrite et donc au volume intérieur du bâtiment, chacun consomme une quantité d'énergie volumique C_{Human} . Le bilan est alors le suivant :

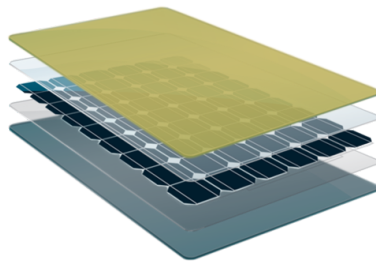
- Production d'énergie possible : $S \cdot P_{sup} + 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} \cdot H \cdot P_{lat}$.
- Consommation d'énergie : $H \cdot S \cdot C_{Human}$.

Avec nos hypothèses, un bâtiment sera qualifié de BEPOS si, en moyenne par rapport au temps, nous avons :

$$C_{Human} < \frac{1}{H} \cdot P_{sup} + \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot S} \cdot P_{lat} \quad (4.1)$$

Cette simple relation montre très logiquement que la production en toiture limite la hauteur des bâtiments si elle seule est utilisée (premier terme). Autrement dit, un bâtiment dont seule la toiture est couverte ne pourra dépasser quelques étages, mais avec une occupation surfacique potentiellement importante. Ici, la couleur importe peu à l'exception de zones géographiques avec un PLU qui impose une couleur bien précise. Réciproquement, la production en façade limite la surface occupée par les bâtiments (second terme) : un bâtiment équipé en façade sera plus élancé. Cependant, une forte densité de tels bâtis posera problème, les uns produisant de l'ombre aux autres selon la position du soleil. Exposés à la vue, le rendu des modules (forme, couleur(s)) est une composante importante. Dans un cas comme dans l'autre, la densité de population maximale risque d'être limitée à des niveaux inférieurs à ce qu'on sait bâtir actuellement.

Dans [3], nous avons évoqué l'impact limité du choix de la couleur sur le rendement de conversion d'une cellule solaire lorsque les conditions thermiques ne lui sont pas favorables. Nous avons alors obtenu des couleurs (fig. 2.18) principalement dans le bleu, en bonne partie à cause des particularités de la courbe de dispersion du Silicium. Cependant, pour des raisons de rendement, il est difficilement concevable de se restreindre à des cellules à surface plane. Une stratégie plus efficace a priori consiste à gérer la couleur du module par une structuration située entre le matériau qui assure la protection mécanique (bien souvent du verre) et la cellule elle-même. Structurer la face interne du verre est une piste déjà retenue par certains industriels (fig. 4.2). Cependant, l'offre est limitée en couleurs (gris, bleu, bleu-vert, bronze et laiton pour les modules *Kromaticx*TM). La (faible) saturation et la gamme de couleurs couramment observées suggèrent l'utilisation de couches minces dont on contrôle l'épaisseur.



(a) Module utilisant des cellules standards.



(b) Intégration de modules colorés sur une façade.

Fig. 4.2 – Modules *Kromaticx*TM de *SwissInso* colorés sans pigments.

Des travaux récents [163] semblent indiquer qu'il est possible de trouver des nanostructurations 2D dont le comportement est indépendant de l'angle d'incidence. Optiquement, les résonances de ces structures sont contrôlées à travers la période des motifs élémentaires, et non pas l'épaisseur d'une couche déposée comme évoquée dans [3]. La reproductibilité des couleurs pourrait donc être améliorée. En effet, si on observe attentivement la figure 4.2(b), on remarque des variations de couleur d'un module à l'autre avec des ΔE importants. Cependant, de telles solutions présentent plusieurs modes dans le spectre visible et pour l'instant un seul présente une indépendance angulaire. Exploiter la structuration photonique 2D pour disposer d'un large panel de couleurs en limitant l'impact sur le rendement de conversion fait donc partie des pistes que je souhaite étudier. En ce sens, j'ai participé en septembre 2018 à une journée atelier sur l'interaction lumière-matière à l'UCBL pour envisager un rapprochement avec le *Lab. Hubert Curien* (Saint-Etienne) qui dispose d'un savoir-faire sur la nanostructuration sur de grandes surfaces. Cela s'est déjà traduit par un stage de 6 mois (L. Besse) pour explorer en priorité les aspects technologiques.

4.3.2 Étude du comportement en conditions réelles de modules solaires

Dans la partie 2.2.1.3, j'ai évoqué une correction afin de calculer convenablement la réflexion à une interface lorsqu'on s'intéresse à une propagation issue d'un milieu absorbant. Cette correction, qui nécessite encore d'être validée¹, est une étape nécessaire pour réaliser un outil de *Ray Tracing*² 3D hybride (interférences localement

1. La validation expérimentale n'est pas évidente car la lumière provient systématiquement d'un milieu non absorbant et doit traverser plusieurs interfaces avant d'atteindre celle qui nous intéresse. En simulation, là aussi, des précautions sont nécessaires.

2. Suivi de rayon. Méthode optique où l'on définit un faisceau par son point de départ, l'énergie qu'il porte et une direction de propagation portée par son vecteur d'onde. À chaque interface rencontrée, on calcule les coefficients de réflexion et transmission et on détermine les directions des rayons réfléchis et transmis qui deviennent de nouveaux rayons à "suivre". Entre chaque interface, l'absorption réduit l'énergie portée par le rayon. Les critères d'arrêt portent généralement sur le seuil d'énergie portée par le rayon pour qu'on puisse considérer que la majorité de l'énergie portée est absorbée ou est sortie de l'espace simulé. La phase du signal propagé n'est généralement pas prise en compte.

prises en compte) sensible à la polarisation. Dans cette perspective, et afin d'obtenir un code performant, j'ai déjà écrit en C++ les classes suivantes sous forme de *templates*³, et pour des objets en coordonnées 3D :

- *Optics_1D* pour calculer les coefficients R et T d'un empilement en fonction d'une onde incidente polarisée.
- *Optics_spectrum* qui comporte différents outils pour faciliter l'étude d'empilements 1D parallèles utilisant *Optics1D*. Cette classe a été utilisée notamment dans [3], dont la figure 13 a été calculée avec 4000 points par axe et une résolution de 1 nm dans le spectre visible : les 1.5×10^{10} appels à cette classe n'ont nécessité que quelques minutes de calcul sur un seul processeur (6C/12T).
- *intersec_surface* pour calculer la réflexion d'une onde décrite en 3D (vecteur d'onde \vec{k} et champ électrique \vec{E}) sur différents objets (plan infini, structure périodique etc.)
- *Color_CIE_1931* pour fournir les fonctions nécessaires au calcul de couleurs sous différents formats (sRGB, adobeRGB, Judd etc.) à partir d'un spectre en puissance lumineuse (LED) ou en réflexion et/ou transmission accompagné du spectre d'illumination de référence.

Ces classes peuvent s'utiliser avec *openmp* pour paralléliser les calculs sur des machines contemporaines. À titre d'illustration, la figure 4.3 décrit certaines interfaces optiques que l'on peut créer grâce à la classe *intersec_surface*. Certaines ($T=1$ par exemple) peuvent servir de critère de fin pour la propagation d'un rayon.

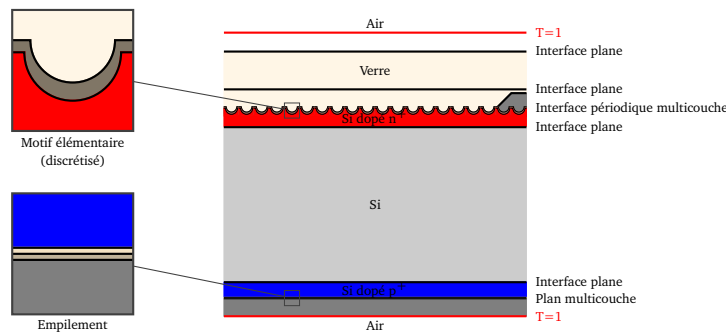


Fig. 4.3 – Exemple de différents types d'interfaces pour étudier une cellule ou un module solaire en 3D.

Le principal avantage de ces outils consiste à coupler le *Ray Tracing* à une échelle macroscopique, tout en considérant des effets d'interférences localement (échelle nanométrique) à travers des empilements de multicouches aux interfaces entre 2 diélectriques. Ces développements s'inscrivent dans la continuité de la collaboration menée avec M. Amara depuis deux ans. Ce dernier a déjà développé un moteur de calcul électro-thermo-optique 1D [164]. Il serait alors possible de profiter d'un outil multiphysique (optique, thermique et électrique) pour la prédiction du comportement de modules solaires en conditions réalistes prenant éventuellement en compte l'environnement des cellules et modules.

4.4 Projection à long terme

Le rendement convenable du silicium, et sa forte abondance sur terre en font un candidat sérieux pour la production d'énergie de masse avec un coût de production réduit. C'est aussi un matériau déjà utilisé en micro-électronique qui bénéficie donc d'un savoir-faire technologique important. Mieux, c'est aussi un matériau commun pour envisager d'hybrider de l'électronique avec du photovoltaïque de sorte que l'un utilise l'énergie produite par le second élément : on peut donc envisager des applications extrêmement diverses.

Pour aller au delà des limitations intrinsèques du silicium, la solution des cellules tandems (plus généralement multi-jonctions) permet de tirer profit de ce matériau déjà performant et maîtrisé. Cependant, pour des applications de masse, cela soulève de nouveaux défis technologiques :

- **électrique** : l'interface électrique entre les différentes sous-cellules doit assurer le passage des porteurs de charges. Cet aspect n'est pas forcément le plus critique puisque le silicium permet de fabriquer des jonctions tunnel performantes ramenant ainsi un contact de type p à un contact de type n (et vice versa). On peut donc relativement adapter cette sous-cellule aux impératifs de l'autre sous-cellule, qu'elle soit en matériau semi-conducteur, en matériau organique ou autre.
- **optique** : pour des applications sans système de *tracking*⁴, il est essentiel d'équilibrer le courant produit par chaque sous-cellule. Pour des cellules à deux terminaux, c'est une problématique importante. On pourrait donc imaginer demain introduire une couche "intelligente" entre les deux sous-cellules pour adapter le spectre réfléchi et transmis. Cette "intelligence" pourrait exploiter des couches structurées avec des matériaux actifs.
- **technologique** : l'ajout de nouveaux matériaux induit de nouvelles contraintes de fabrication : certaines étapes critiques pour le silicium (recuit pour les contacts par exemple) ne sont pas forcément compatibles avec les matériaux actuellement en cours d'étude. Si les pérovskites permettent déjà d'atteindre 25.2 % de rendement de conversion en cellule tandem sur Si [165], elles souffrent souvent de leur manque de stabilité dans le temps [166], ou du recours à certains matériaux forts polluants (comme le Pb [165], [167], [168]).

3. Selon le besoin, on peut donc utiliser ces classes avec une précision 32 (*float*), 64 (*double*) ou 80 (*long double*) bits.

4. Système asservissant la position du panneau pour suivre le soleil dans sa course quotidienne.

Avec les nanofils III–V sur Si (projet [Hetonan](#)), l'une des difficultés réside dans la passivation du pied du nanofil (traitillé vert foncé sur la figure [4.1\(b\)](#)).

Ces différentes pistes s'intègrent dans les projets que l'équipe *Photovoltaïque* de l'[INL](#) souhaite développer dans les années à venir, notamment l'amélioration des performances des cellules solaires en exploitant des cellules tandem à base de silicium.

Table des figures

Introduction

1	Évolution de la fréquence et de l'enveloppe thermique de processeurs x86 Intel® grand public de 1999 à 2019.	13
2	Vue de dessus du substrat pour la version 8 cœurs des processeurs de la série Coffee Lake.	14
3	Collage de vignettes d'InP sur un wafer 200 mm (CEA-Leti).	14
4	Exemple de distributions journalières des différentes sources d'énergie en France pour l'année 2016.	16

De la photonique intégrée aux photodétecteurs en silicium

1.1	Exemples de modes de galerie.	19
1.2	Vue à l'échelle de la structure à base d'InP la plus mince.	20
1.3	Distribution de la composante principale de l'excitation magnétique pour un même mode de galerie.	20
1.4	Évolution des pertes en fonction des principaux paramètres géométriques.	21
1.5	Description d'un disque creux avec ses contacts et un guide optique pour la collecte de la lumière.	21
1.6	De l'étude du couplage "local" à une structure couplée en deux points distants.	22
1.7	Quelques résultats expérimentaux ayant conduit au régime LASER.	23
1.8	Structure caractérisée avec des guides Si en forme de raquette.	23
1.9	Mesures électro-optiques sur un microdisque de $7.5\mu\text{m}$ de rayon avec un contrôle des pertes effectives de couplage par effet thermique.	24
1.10	GDS pour différents résonateurs dessinés fin 2009.	25
1.11	Performances d'un micro LASER pompé électriquement de rayon $3.75\mu\text{m}$ avec un seuil de $0.78\mu\text{W}$.	25
1.12	Représentation 3D d'une structure à unique zone de couplage et miroir photonique.	25
1.13	Modèle général de résonateur avec rétro-action.	26
1.14	Modèle du résonateur asservi avec deux zones de couplage (structure en "raquette" sans le MMI).	27
1.15	Modèle du résonateur asservi couplé en une zone avec miroir photonique.	27
1.16	GDS partiel d'une des structures avec miroir photonique.	27
1.17	Mesures électro-optiques sur un microdisque avec une seule zone de couplage et un miroir photonique.	28
1.18	Version asservie du résonateur appliquée à l'émission LASER.	28
1.19	Modules SFP seuls et en utilisation accueillant deux fibres optiques ou une prise réseau.	29
1.20	Organigramme du circuit optique qui a servi comme objectif pour le projet ANR Silver.	29
1.21	Structure simulée avec sa couche flottante en forme de U.	30
1.22	Gain et bande passante pour différents dopages de la couche flottante.	30
1.23	Champ électrique à la tension d'avalanche pour différents dopages de la couche flottante.	31
1.24	Géométrie de la photodiode courbée fabriquée par implantation.	31
1.25	Principales étapes de fabrication de la photodiode rectiligne fabriquée par épitaxie.	32
1.26	Éléments de routage : MMI et filtre.	33

Vers des cellules solaires en silicium "augmenté" ?

2.1	Améliorations dans le photovoltaïque : d'importantes surfaces à adapter à la co-génération intégrée au bâtiment.	36
2.2	Cellule PERT avec une face avant structurée par des pyramides inversées périodiques.	37
2.3	Exemple de structure multi-couches et résultats théoriques dans le cas d'un milieu ambiant absorbant.	38
2.4	Performances optiques pour le miroir optimisé par F. Gérenton.	38
2.5	Description de la cellule solaire tandem étudiée dans le projet Menhirs.	39
2.6	Impact de la géométrie et des recombinaisons SRH dans le GaAsPN. Pour (b) et (c), $h_{GAPN}=0.7\mu\text{m}$ et $h_{Si}=30\mu\text{m}$.	40
2.7	Quelques résultats expérimentaux obtenus sur substrat (100) désorienté de 4° vers (110).	41
2.8	Illustration schématique de la compétition entre les effets surfaciques et volumiques.	42
2.9	Motifs périodiques ou aléatoires obtenus sur Si poly ou mono cristallin par gravure RIE ou chimique sélective.	43
2.10	Description schématique du flot de simulation imaginé en fin de projet PhotoNVoltaics.	43
2.11	Influence de la continuité électrique des flancs latéraux	44
2.12	Distribution du champ électrique pour différentes largeurs de trous	45
2.13	Simulation électro-optique d'une tranche 2D d'une cellule solaire après optimisation du J_{gen} en 3D.	46
2.14	Dégradation du transport latéral dans le collecteur de charges en face avant.	46
2.15	Conditions d'observation d'un module intégré dans le bâtiment	47
2.16	Schéma du montage de la sphère en incidence contrôlée	48
2.17	Estimation du signal de référence à la position de l'échantillon utilisée pour mesurer son absorption.	48
2.18	Propriétés d'une cellule plane colorée par contrôle de l'anti-reflet.	49
2.19	Photographies d'un cristal photonique gravé à la surface d'un échantillon en verre.	50

2.20 Exemple d'une cellule à multi-jonctions en Si uniquement constituée de 3 cellules élémentaires.	51
2.21 Version la plus aboutie de cellules multi-jonctions à base de Si localement aminci avec structuration photonique	51

Activités de formation et de recherche 55

3.1 Montage en optique libre avec contrôle de la polarisation.	56
3.2 EQE mesuré en incidence normale à l'INL et comparé avec des mesures réalisées à l'ICube en sphère intégrante.	60

Conclusion et perspectives 65

4.1 Nanofils III-V à cœur de GaAs avec une structure p-i-n épitaxiée en AlGaAs.	65
4.2 Modules Kromaticx™ de SwissInso colorés sans pigments.	67
4.3 Exemple de différents types d'interfaces pour étudier une cellule ou un module solaire en 3D.	68

Annexe C 89

A1 Répartition des heures effectives réalisées en cours, TPs et TDs.	89
--	----

Liste des tableaux

Introduction	13
1 Exemples de production d'énergie journalière en France pour l'année 2016.	15
De la photonique intégrée aux photodétecteurs en silicium	19
1.1 Conditions d'interférences pour la lumière se propageant en direction d'un coupleur 2 vers 1.	24
1.2 Evolution des différents paramètres du modèle en fonction du déphasage dans le guide.	26
1.3 Avantages et faiblesses des deux LASERs à émission thermiquement contrôlée.	28
Vers des cellules solaires en silicium "augmenté" ?	35
2.1 Tendances observées par simulation et règles de conception	45
Activités de formation et de recherche	55
3.1 PFE co-encadrés depuis 2012 (niveau M2).	58
3.2 Stagiaires encadrés depuis 2012 (hors PFE).	58
3.3 Doctorants co-encadrés depuis 2012.	59
Annexe B	85
A1 Paramètres utilisés pour simuler une cellule tandem de façon prédictive quant aux propriétés de l'absorbeur GaAsPN.	85
Annexe C	89
A2 Répartition des formations assurées depuis mon arrivée à l'INSA de Lyon.	89

Production scientifique personnelle

La liste suivante ne précise que la production scientifique postérieure à la soutenance de thèse (nov. 2009).

Revue internationale

- [1] F. MANDORLO, M. AMARA, M. LEMITI, H. NGUYEN, A. CHARLETY-MEANO et R. OROBTCHOUK, « Color management of semi transparent nano patterned surfaces », (*soumission à venir*), 2019.
- [2] N. MOULIN, M. AMARA, F. MANDORLO et M. LEMITI, « Tunnel junction I(V) characteristics: Review and a new model for p-n homojunctions », *Journal of Applied Physics*, t. 126, n° 3, p. 033 105, 2019.
- [3] M. AMARA, F. MANDORLO, R. COUDERC, F. GÉRENTON et M. LEMITI, « Temperature and color management of silicon solar cells for building integrated photovoltaic », *EPJ Photovoltaics*, t. 9, p. 1, 2018.
- [4] K. ZNAJDEK, N. SZCZECINSKA, M. SIBINSKI, P. CZARNECKI, G. WIOSNA-SALYGA, A. APOSTOLUK, F. MANDORLO, S. ROGOWSKI et Z. LISIK, « Energy converting layers for thin-film flexible photovoltaic structures », *Open Physics*, t. 16, n° 1, p. 820-825, 2018.
- [5] R. CHAMPORY, F. MANDORLO, C. SEASSAL et A. FAVE, « Influence of patterning the TCO layer on the series resistance of thin film HIT solar cells », *EPJ Photovoltaics*, t. 8, p. 80 101, 2017.
- [6] W. CHEN, R. CARIOU, M. FOLDYNA, V. DEPAUW, C. TROMPOUKIS, E. DROUARD, L. LALOUAT, A. HAROURI, J. LIU, A. FAVE et al., « Nanophotonics-based low-temperature PECVD epitaxial crystalline silicon solar cells », *Journal of Physics D : Applied Physics*, t. 49, n° 12, p. 125 603, 2016.
- [7] F. GÉRENTON, F. MANDORLO, E. FOURMOND, M. LE COZ, D. BLANC-PÉLISSIER et M. LEMITI, « Laser ablation compatible substoichiometric SiO_x/SiN_y passivating rear side mirror for passivated emitter and rear thin-film crystalline silicon solar cells », *Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum, Surfaces, and Films*, t. 34, n° 5, p. 051 201, 2016.
- [8] C. TROMPOUKIS, I. ABDO, R. CARIOU, I. COSME, W. CHEN, O. DEPARIS, A. DMITRIEV, E. DROUARD, M. FOLDYNA, E. GARCIA-CAUREL, I. GORDON, B. HEIDARI, A. HERMAN, L. LALOUAT, K. LEE, J. LIU, K. LODEWIJKS, F. MANDORLO et al., « Photonic nanostructures for advanced light trapping in thin crystalline silicon solar cells », *physica status solidi (a)*, t. 212, n° 1, p. 140-155, 2015.
- [9] O. DURAND, S. ALMOSNI, Y. PING WANG, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, C. ROBERT, C. LEVALLOIS, L. PEDESSEAU, A. ROLLAND, J. EVEN et al., « Monolithic integration of diluted-nitride III-VN compounds on silicon substrates: toward the III-V/Si concentrated photovoltaics », *Energy Harvesting and Systems*, t. 1, n° 3-4, p. 147-156, 2014.
- [10] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, N. OLIVIER, L. FERRIER, R. OROBTCHOUK, X. LETARTRE, J. FÉDÉLI et P. VIKTOROVITCH, « Controlled Multi-Wavelength Emission in Full CMOS Compatible Micro-Lasers for on Chip Interconnections », *Journal of Lightwave Technology*, t. 30, n° 19, p. 3073-3080, 2012.
- [11] T. SPUESENS, F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, P. REGRENY, N. OLIVIER, J. FÉDÉLI et D. VAN THOURHOUT, « Compact integration of optical sources and detectors on SOI for optical interconnects fabricated in a 200 mm CMOS pilot line », *Journal of Lightwave Technology*, t. 30, n° 11, p. 1764-1770, 2012.
- [12] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, J. FÉDÉLI, H. M. SOHRAB et R. OROBTCHOUK, « Mode density reduction and coupling in microdisk LASERS processed on a 200-mm CMOS pilot line », *IEEE Photonics Technology Letters*, t. 23, n° 17, p. 1183-1185, 2011.
- [13] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE, R. OROBTCHOUK et P. VIKTOROVITCH, « Compact modulated and tunable microdisk laser using vertical coupling and a feedback loop », *Optics express*, t. 18, n° 19, p. 19 612-16 925, 2010.
- [14] D. VAN THOURHOUT, T. SPUESENS, S. SELVARAJA, L. LIU, G. R.KENS, R. KUMAR, G. MORTHIER, P. ROJO-ROMEO, F. MANDORLO, P. REGRENY et al., « Nanophotonic devices for optical interconnect », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, t. 16, n° 5, p. 1363-1375, 2010.

Articles de conférence internationale

- [15] V. DEPAUW, C. TROMPOUKIS, O. EL DAIF, L. LALOUAT, H. DING, J. LIU, A. HAROURI, R. OROBTCHOUK, F. MANDORLO, A. FAVE et al., « When nanophotonics meet thin crystalline-silicon photovoltaics », *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference-EUPVSEC*, 2015.
- [16] F. GÉRENTON, F. MANDORLO, J. BRETTE et M. LEMITI, « Pattern of Partial Rear Contacts for Silicon Solar Cells », *Energy Procedia*, t. 77, p. 677-686, 2015.
- [17] C. SEASSAL, H. DING, R. CHAMPORY, L. LALOUAT, E. DROUARD, G. GOMARD, R. PERETTI, F. MANDORLO, R. OROBTCHOUK, A. FAVE et al., « Light trapping in advanced solar cells: photonic crystals and disordered structures », *Photonics for Energy*, Optical Society of America, 2015, PW2D-4.

- [18] V. DEPAUW, I. ABDO, R. BOUKHICHA, R. CARIU, W. CHEN, I. BOLANOS, O. DEPARIS, H. DING, A. DMITRIEV, E. DROUARD, O. EL DAIF, A. FAVE, M. FOLDYNA, E. GARCIA-CAUREL, B. HEIDARI, A. HERMAN, L. LALOUAT, K. LEE, J. LIU, K. LODIEWIJS, F. MANDORLO et al., « [Nanophotonics for ultrathin crystalline silicon photovoltaics: When photons \(actually\) meet electrons](#) », *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2014.
- [19] C. SEASSAL, L. LALOUAT, H. DING, E. DROUARD, G. GOMARD, R. PERETTI, T. DESCHAMP, F. MANDORLO, R. OROBTCHOUK et A. FAVE, « [Absorption in photonic crystals: from order to disorder](#) », *Active Photonic Materials VI*, International Society for Optics and Photonics, t. 9162, 2014, p. 916 217.
- [20] F. MANDORLO, R. PERETTI, L. LALOUAT, G. GOMARD, L. MARION, X. MENG, A. FAVE, C. SEASSAL et E. DROUARD, « [Electro-Optical Optimization of c-Si Thin Solar Cells Patterned by Photonic Crystals](#) », *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2013, p. 2634-2637.
- [21] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, L. FERRIER, J. FÉDÉLI et N. OLIVIER, « [Full CMOS compatible III-V Microdisk tunable CW lasers for on chip optical interconnects](#) », *Access Spaces (ISAS)*, *1st International Symposium on*, IEEE, 2011, p. 299-303.
- [22] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, L. FERRIER, N. OLIVIER, R. OROBTCHOUK, J. FÉDÉLI et X. LETARTRE, « [CMOS CW tunable III-V microdisk LASERS for optical interconnects in integrated circuits](#) », *Group IV Photonics (GFP)*, *8th IEEE International Conference on*, IEEE, 2011, p. 178-180.
- [23] F. MANDORLO, C. SCIANCALEPORE, I. O'CONNOR, P. ROJO-ROMEO, C. SEASSAL, P. VIKTOROVITCH, X. LETARTRE, B. BEN BAKIR, D. BORDEL, N. OLIVIER et J. FÉDÉLI, « [Heterogeneous integration of III-V lasers on silicon for photonic/electronic convergence](#) », *Winter Topicals (WTM)*, IEEE, 2011, p. 149-150.
- [24] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE, J. FÉDÉLI, R. OROBTCHOUK, L. GRENOUILLET, P. REGRENY, P. VIKTOROVITCH et H. SOHRAB, « [Electrical and optical properties of III-V microdisk based LASERS fabricated on a CMOS pilot line](#) », *Group IV Photonics (GFP)*, *7th IEEE International Conference on*, IEEE, 2010, p. 25-27.
- [25] L. LIU, T. SPUESENS, D. VAN THOURHOUT, G. MORTHER, L. GRENOUILLET, N. OLIVIER, J. FÉDÉLI, P. ROJO-ROMEO, P. REGRENY, F. MANDORLO et al., « [200 mm wafer scale III-V/SOI technology for all-optical network-on-chip and signal processing](#) », *Group IV Photonics (GFP)*, *7th IEEE International Conference on*, IEEE, 2010, p. 7-9.

Conférences internationales

- [26] N. MOULIN, M. AMARA, F. MANDORLO et M. LEMITI, « [High voltage solar cells based on nanostructured ultra-thin Silicon](#) », *EuPVSEC*, 2019.
- [27] K. MCINTOSH, M. AMARA, F. MANDORLO, M. ABBOTT et B. SUDBURY, « [Advanced simulation of a PV module's color](#) », *Silicon PV*, 2018.
- [28] C. SEASSAL, L. LALOUAT, H. DING, R. CHAMPORY, N. HOANG, T. DESCHAMPS, A. HAROURI, H. NGUYEN, R. OROBTCHOUK, A. FAVE, F. MANDORLO et al., « [Photonic crystals and related nanostructures for the control of light trapping and emission](#) », *1st Transpyrenean Encounter on Advanced Materials*, 2017.
- [29] R. CHAMPORY, F. MANDORLO, L. LALOUAT, A. HAROURI, P. ROCA I CABARROCAS, R. OROBTCHOUK, A. FAVE, E. FOURMOND et C. SEASSAL, « [Reduction of parasitic absorption in ITO for ultra-thin film c-Si solar cell](#) », *Silicon PV*, 2016.
- [30] R. CHAMPORY, F. MANDORLO, R. OROBTCHOUK, E. DROUARD, E. FOURMOND et C. SEASSAL, « [Micro-patterned \(111\) silicon for thin film solar cells](#) », *EuPVSEC*, 2016.
- [31] M. DA SILVA, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, C. LEVALLOIS, A. ROLLAND, J. EVEN, L. PEDESSEAU, Y. WANG, A. LE CORRE, S. BOYER-RICHARD, P. RALE, L. LOMBEZ, J. GUILLEMOLES, F. MANDORLO et al., « [GaAsPN Single and Tandem Solar Cells on Silicon](#) », *19th International Conference on Molecular-Beam Epitaxy (IC-MBE)*, 2016.
- [32] M. DA SILVA, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, C. LEVALLOIS, A. ROLLAND, J. EVEN, L. PEDESSEAU, Y. WANG, S. WANG, A. LE CORRE, S. BOYER-RICHARD, P. RALE, J. GUILLEMOLES, F. MANDORLO et al., « [First stage results on III-V/Si tandem cells using GaAsPN dilute-nitride](#) », *European Materials Research Society (EMRS)*, 2016.
- [33] O. DURAND, M. DA SILVA, Y. WANG, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, C. LEVALLOIS, A. ROLLAND, J. EVEN, L. PEDESSEAU, S. BOYER-RICHARD, P. RALE, J. GUILLEMOLES, S. ALMOSNY, F. MANDORLO et al., « [Advanced concepts of photovoltaics based on III-V compounds](#) », *16th International Conference of Physical Chemistry (ROMPHYSICHEM-16)*, 2016.
- [34] A. FAVE, L. LALOUAT, A. HAROURI, R. CHAMPORY, J. LIU, R. OROBTCHOUK, H. DING, E. DROUARD, F. MANDORLO et C. SEASSAL, « [Design, fabrication and characterization of ultra-thin film c-Si solar cells with efficient light trapping](#) », *European Materials Research Society (EMRS)*, 2016.
- [35] F. GÉRENTON, E. FOURMOND, F. MANDORLO et M. LEMITI, « [Laser ablation of sub-stoichiometric silicon oxide for rear side of PERC thin Si solar cells](#) », *EuPVSEC*, 2016.
- [36] F. GÉRENTON, F. MANDORLO, J. BRETTE et M. LEMITI, « [Polycrystalline silicon localised rear contacts in a PERL-type silicon solar cell](#) », *European Materials Research Society (EMRS)*, 2016.
- [37] N. THIERRY-JEBALI, T. KEMPF et F. MANDORLO, « [Comparison of 2.5D and 3D Simulation Methods for Limiting Electrode Debiasing of 4H-SiC Interdigitated Devices](#) », *Materials Science Forum*, Trans Tech Publ, t. 858, 2016, p. 757-760.
- [38] O. DURAND, S. ALMOSNI, M. DA SILVA, P. RALE, A. LE CORRE, C. CORNET, C. LEVALLOIS, A. ROLLAND, J. EVEN, L. PEDESSEAU, F. MANDORLO et al., « [Towards the III-V/Si CPV on Si substrates](#) », *European Materials Research Society (EMRS)*, 2015.
- [39] F. GÉRENTON, F. MANDORLO, M. LE COZ, K. CIESLAK et M. LEMITI, « [Fabrication of Thin-Film Crystalline Silicon Solar Cells Reported on Sintered Silicon](#) », *The 4th ACEEES International Education Forum on Environment and Energy Science*, Hawaii (USA), déc. 2015.
- [40] R. CHAMPORY, F. MANDORLO, A. FAVE et C. SEASSAL, « [The Electrical Challenges of a Patterned TCO for HIT Solar Cell](#) », *3rd ACEEES*, 2014.
- [41] A. FAVE, L. LALOUAT, X. MENG, G. GOMARD, C. TROMPOUKIS, O. EL DAIF, V. DEPAUW, E. DROUARD, F. MANDORLO et C. SEASSAL, « [Design, fabrication and characterization of thin film monocrystalline-silicon solar cells with efficient light trapping](#) », *6th IEEE International Nanoelectronics Conference-INEC*, 2014.

- [42] F. GÉRENTON, F. **MANDORLO** et M. LEMITI, « Polycrystalline silicon localised rear contacts in a PERL type silicon solar cell », *Materials for renewable energy (Erice)*, 2014.
- [43] S. MESSADI, H. DING, G. GOMARD, R. PERETTI, L. LALOUAT, X. MENG, F. **MANDORLO**, C. SEASSAL et E. DROUARD, « Advanced design rules for Nanophotonic thin film solar cells », *Photovoltaic technical conference-thin film & advanced silicon solutions*, 2013, p. D3-1.
- [44] R. PERETTI, T. DESCHAMPS, G. GOMARD, X. MENG, L. LALOUAT, F. **MANDORLO**, A. FAVE, E. DROUARD et C. SEASSAL, « Nanophotonics in photovoltaic cells for solar or indoor light trapping », *META'13, the 4th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, 2013.
- [45] C. SEASSAL, L. LALOUAT, T. DESCHAMP, R. PERETTI, H. DING, G. GOMARD, X. MENG, E. DROUARD, A. FAVE, F. **MANDORLO**, R. OROBTCHOUK et E. FOURMOND, « Photonic crystals : key nanostructures for light trapping and advanced solar cells », *6th Mediterranean Conference on Nano-Photonics MediNano-6 Lyon*, 2013.

Conférences nationales

- [46] F. **MANDORLO**, M. AMARA, H. NGUYEN, A. CHARLETY-MEANO et R. OROBTCHOUK, « Modules solaires colorés au niveau du verre d'encapsulation via des cristaux photoniques », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2018.
- [47] N. MOULIN, M. AMARA, F. **MANDORLO** et M. LEMITI, « New analytical model to simulate a p-n tunnel junction », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2018.
- [48] M. DA SILVA, S. BOYER-RICHARD, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, C. LEVALLOIS, A. ROLLAND, J. EVEN, L. PEDESSEAU, A. LE CORRE, S. LOUALICHE, L. LOMBEZ, J. GUILLEMOLES, F. **MANDORLO** et al., « Towards III-V on silicon solar cells », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2017.
- [49] M. AMARA, F. **MANDORLO**, R. COUDERC, F. GÉRENTON et M. LEMITI, « Température et couleurs des cellules solaires en silicium », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2016.
- [50] L. LALOUAT, H. DING, N. VU HOANG, H. NGUYEN, R. OROBTCHOUK, A. FAVE, F. **MANDORLO**, C. SEASSAL et E. DROUARD, « Lumière lente et rapide dans les cellules solaires en couches minces : vers des règles de design », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2016.
- [51] M. DA SILVA, S. ALMOSNI, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, C. LEVALLOIS, A. ROLLAND, J. EVEN, L. PEDESSEAU, S. WANG, A. LE CORRE, S. LOUALICHE, P. RALE, L. LOMBEZ, J. GUILLEMOLES, F. **MANDORLO**, M. LEMITI et O. DURAND, « Vers les cellules solaires à haut rendement à base de composés III-V sur substrats bas-couts de silicium », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2015.
- [52] O. DURAND, S. ALMOSNI, M. DA SILVA, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, C. LEVALLOIS, A. ROLLAND, J. EVEN, L. PEDESSEAU, S. LOUALICHE, P. RALE, L. LOMBEZ, J. GUILLEMOLES, F. **MANDORLO** et M. LEMITI, « Toward the III-V/Si high efficiency tandem solar cell », *Congrès de la Société Chimique de France*, 2015.
- [53] F. GÉRENTON, F. **MANDORLO**, M. LE COZ, K. CIESLAK, A. FAVE et M. LEMITI, « Etude d'un empilement $\text{SiO}_x/\text{SiN}_y$ pour la passivation et la réflectivité de la face arrière des cellules en couches minces de silicium cristallin », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2015.
- [54] F. GÉRENTON, F. **MANDORLO**, J. BRETTE et M. LEMITI, « Motifs géométriques de contacts localisés en face arrière pour cellules solaires en silicium », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2014.
- [55] F. GÉRENTON, F. **MANDORLO**, M. LEMITI et J. BRETTE, « Contacts arrière localisés en silicium polycristallin dans une architecture de cellule silicium de type PERL », *Journées Nationales sur l'Energie Solaire (JNES)*, 2014.
- [56] F. **MANDORLO**, « Influence de surfaces structurées sur les performances de cellules en couche mince de silicium cristallin », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2014.
- [57] E. DROUARD, G. GOMARD, X. MENG, R. PERETTI, A. FAVE, F. **MANDORLO**, R. OROBTCHOUK et C. SEASSAL, « Structures nanophotoniques diélectriques pour cellules en couche ultra mince et haut rendement », *Journées nationales du photovoltaïque (JNPV)*, 2012.
- [58] O. DURAND, S. ALMOSNI, C. ROBERT, T. NGUYEN THANH, Y. PING WANG, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, C. LEVALLOIS, L. PEDESSEAU, J. EVEN, J. JANCU, N. BERTRU, A. LE CORRE, A. BONDI, F. **MANDORLO**, M. LEMITI, P. RALE, L. LOMBEZ, J. GUILLEMOLES, E. TEA, S. LARIBI, A. PONCHET, J. STODOLNA, P. BELLAVOINE, P. LAFERRIERE, N. BOUDET et F. TUOMISTO, « Monolithic integration of diluted-nitride III-VN compounds on silicon substrates : toward the III-V/Si concentrated photovoltaics », 2012.

Séminaires

- [59] F. **MANDORLO**, « Design et réalisation de sources LASERs III-V reportées sur Silicium compatibles CMOS », Institut d'Électronique du Sud (IES), Montpellier, mai 2010.

Références bibliographiques

Cette liste contient aussi des références auxquelles j'ai contribué antérieurement à la soutenance de thèse.

Introduction

Articles et publications

- [60] P. S. OTELLINI, « Intel CEO Outlines New Platform Directions », Intel Developer Forum, 2005. adresse : <http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/20050823corp.htm>.
- [61] B. GREGORY, « New Intel Core X-Series Processors : Scale, Accessibility and Performance Go Extreme », Computex, 2018. adresse : <https://newsroom.intel.com/editorials/new-intel-core-x-series-processors-scale-accessibility-and-performance-go-extreme/>.
- [62] T. FUKAZAWA, F. OHNO et T. BABA, « Very compact arrayed-waveguide-grating demultiplexer using Si photonic wire waveguides », *Japanese journal of applied physics*, t. 43, n° 5B, p. L673, 2004.
- [63] L. LIAO, D. SAMARA-RUBIO, M. MORSE, A. LIU, D. HODGE, D. RUBIN, U. KEIL et T. FRANCK, « High speed silicon Mach-Zehnder modulator », *Optics express*, t. 13, n° 8, p. 3129-3135, 2005.
- [64] D. MARRIS-MORINI, L. VIVIEN, J. FÉDÉLI, E. CASSAN, P. LYAN et S. LAVAL, « Low loss and high speed silicon optical modulator based on a lateral carrier depletion structure », *Optics express*, t. 16, n° 1, p. 334-339, 2008.
- [65] A. KAZMIERCZAK, W. BOGAERTS, D. VAN THOURHOUT, E. DROUARD, P. ROJO-ROMEO, D. GIANNONE et F. GAFFIOT, « Analysis of silicon on insulator (SOI) optical microring add-drop filter based on waveguide intersections », *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008, p. 69960D-1.
- [66] G. FAN, R. OROBTCHOUK, B. HAN, Y. LI et H. LI, « 8 x 8 wavelength router of optical network on chip », *Opt. Express*, t. 25, n° 20, p. 23 677-23 683, oct. 2017. DOI : [10.1364/OE.25.023677](https://doi.org/10.1364/OE.25.023677). adresse : <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-25-20-23677>.
- [67] L. VIVIEN, D. MARRIS-MORINI, J. MANGENY, P. CROZAT, E. CASSAN, S. LAVAL, J. FÉDÉLI, J. DAMLENCOURT et Y. LECUNFF, « 42 GHz waveguide germanium-on-silicon vertical PIN photodetector », *Group IV Photonics, 2008 5th IEEE International Conference on*, IEEE, 2008, p. 185-187.
- [68] M. RESHOTKO, B. BLOCK, B. JIN et P. CHANG, « Waveguide coupled Ge-on-oxide photodetectors for integrated optical links », *Group IV Photonics, 2008 5th IEEE International Conference on*, IEEE, 2008, p. 182-184.
- [69] J. LIU, X. SUN, L. KIMERLING et J. MICHEL, « Optical gain from the direct gap transition of Ge-on-Si at room temperature », *2009 6th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, IEEE, 2009, p. 262-264.
- [70] F. MANDORLO, « Etude et réalisation de liens optiques hétérogènes à base de semiconducteurs III-V reportés du Silicium », thèse de doct., Ecole Centrale de Lyon, 2009.
- [71] INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS (ITRS), « Edition Interconnect », 2009.
- [72] J. MCCAULEY, V. DONNELLY, M. VERNON et I. TAHA, « Temperature dependence of the near-infrared refractive index of silicon, gallium arsenide, and indium phosphide », *Physical Review B*, t. 49, n° 11, p. 7408, 1994.
- [73] X. XING et Y. WANG, « Optimal Design of Tunable Optical Add-Drop Multiplexer in Silicon-on-Insulator », *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, t. 216, 2011, p. 654-660.
- [74] S. RÜHLE, « Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells », *Solar Energy*, t. 130, p. 139-147, 2016.
- [75] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) - PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (PVPS), « Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2016 », *T1-32*, 2017.
- [76] M. GREEN, Y. HISHIKAWA, W. WARTA, E. DUNLOP, D. LEVI, J. HOHL-EBINGER et A. HO-BAILLIE, « Solar cell efficiency tables (version 51) », *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, t. 26, n° 1, p. 3-12, DOI : [10.1002/pip.2978](https://doi.org/10.1002/pip.2978).
- [77] A. RICHTER, M. HERMLE et S. GLUNZ, « Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells », *IEEE Journal of Photovoltaics*, t. 3, n° 4, p. 1184-1191, 2013.
- [78] J. MAGUIRE, X. FANG et E. WILSON, « Comparison of advanced residential water heating technologies in the United States », National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), rapp. tech., 2013.
- [79] S. SZABO, K. BÓDIS, T. HULD et M. MONER-GIRONA, « Energy solutions in rural Africa : mapping electrification costs of distributed solar and diesel generation versus grid extension », *Environmental Research Letters*, t. 6, n° 3, p. 034 002, 2011.
- [80] S. BAURZHAN et G. JENKINS, « Off-grid solar PV : Is it an affordable or appropriate solution for rural electrification in Sub-Saharan African countries ? », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 60, p. 1405-1418, 2016.
- [81] R. SEN et S. C. BHATTACHARYYA, « Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India : An application of HOMER », *Renewable Energy*, t. 62, p. 388-398, 2014.

- [82] E. WIEMKEN, H. BEYER, W. HEYDENREICH et K. KIEFER, « Power characteristics of PV ensembles : experiences from the combined power production of 100 grid connected PV systems distributed over the area of Germany », *Solar energy*, t. 70, n° 6, p. 513-518, 2001.

Sites internet

- [83] WIKICHIP.ORG. (2018). Coffee Lake - Microarchitectures - Intel. (Accessed : 2019-07-17), adresse : https://en.wikichip.org/wiki/intel/microarchitectures/coffee_lake.
- [84] CIA— THE WORLD FACTBOOK. (2017). Electricity. (Accessed : 2018-04-07), adresse : <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2234rank.html>.
- [85] LEMONDE. (jan. 2017). En Allemagne, le charbon n'a pas remplacé le nucléaire. (Accessed : 2018-04-08), adresse : http://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2017/01/22/en-allemande-le-charbon-n-a-pas-remplace-le-nucleaire_5066912_4355770.html.
- [86] —, (mar. 2017). Au Japon, la justice autorise le redémarrage de deux réacteurs nucléaires. (Accessed : 2018-04-07), adresse : http://www.lemonde.fr/planete/article/2017/03/28/au-japon-la-justice-autorise-le-redemarrage-de-deux-reacteurs-nucleaires_5102033_3244.html.
- [87] LEGIFRANCE. (août 2015). LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1). (Accessed : 2018-04-08), adresse : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2015/8/17/2015-992/jo/texte>.
- [88] RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ (RTE) – ÉCO2MIX : CONSOMMATION, PRODUCTION ET CONTENU CO₂ DE L'ÉLECTRICITÉ FRANÇAISE. (Accessed : 2018-04-07). Historique annuel définitif 2016, adresse : <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-telechargement>.
- [89] N. SHUBATA. ()

Chapitre 1 : De la photonique intégrée aux photodétecteurs en silicium

Articles et publications

- [62] T. FUKAZAWA, F. OHNO et T. BABA, « Very compact arrayed-waveguide-grating demultiplexer using Si photonic wire waveguides », *Japanese journal of applied physics*, t. 43, n° 5B, p. L673, 2004.
- [63] L. LIAO, D. SAMARA-RUBIO, M. MORSE, A. LIU, D. HODGE, D. RUBIN, U. KEIL et T. FRANCK, « High speed silicon Mach-Zehnder modulator », *Optics express*, t. 13, n° 8, p. 3129-3135, 2005.
- [64] D. MARRIS-MORINI, L. VIVIEN, J. FÉDÉLI, E. CASSAN, P. LYAN et S. LAVAL, « Low loss and high speed silicon optical modulator based on a lateral carrier depletion structure », *Optics express*, t. 16, n° 1, p. 334-339, 2008.
- [65] A. KAZMIERCZAK, W. BOGAERTS, D. VAN THOURHOUT, E. DROUARD, P. ROJO-ROMEO, D. GIANNONE et F. GAFFIOT, « Analysis of silicon on insulator (SOI) optical microring add-drop filter based on waveguide intersections », *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008, p. 69960D-1.
- [67] L. VIVIEN, D. MARRIS-MORINI, J. MANGENEY, P. CROZAT, E. CASSAN, S. LAVAL, J. FÉDÉLI, J. DAMLENCOURT et Y. LECUNFF, « 42 GHz waveguide germanium-on-silicon vertical PIN photodetector », *Group IV Photonics, 2008 5th IEEE International Conference on*, IEEE, 2008, p. 185-187.
- [68] M. RESHOTKO, B. BLOCK, B. JIN et P. CHANG, « Waveguide coupled Ge-on-oxide photodetectors for integrated optical links », *Group IV Photonics, 2008 5th IEEE International Conference on*, IEEE, 2008, p. 182-184.
- [69] J. LIU, X. SUN, L. KIMERLING et J. MICHEL, « Optical gain from the direct gap transition of Ge-on-Si at room temperature », *2009 6th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, IEEE, 2009, p. 262-264.
- [70] F. MANDORLO, « Etude et réalisation de liens optiques hétérogènes à base de semi-conducteurs III-V reportés du Silicium », thèse de doct., Ecole Centrale de Lyon, 2009.
- [72] J. MCCAULLEY, V. DONNELLY, M. VERNON et I. TAHA, « Temperature dependence of the near-infrared refractive index of silicon, gallium arsenide, and indium phosphide », *Physical Review B*, t. 49, n° 11, p. 7408, 1994.
- [90] M. SOLTANI, S. YEGNANARAYANAN et A. ADIBI, « Ultra-high Q planar silicon microdisk resonators for chip-scale silicon photonics », *Optics express*, t. 15, n° 8, p. 4694-4704, 2007.
- [91] B. SALEH et M. TEICH, *Fundamentals of Photonics*, 2^e éd. Wiley Interscience, 2007.
- [92] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE, J. FÉDÉLI et P. VIKTOROVITCH, « Mode selection in a microdisk laser coupled to a passive cavity for optical interconnections », *Lasers and Electro-Optics and Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS)*, IEEE, 2009, p. 1-2.
- [93] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE, J. FÉDÉLI, P. REGRENY, P. GROSSE et P. VIKTOROVITCH, « Integrated microdisk based lasers for electro-optical applications in CMOS compliance », *Photonics Europe*, International Society for Optics et Photonics, 2008, p. 699 616-699 616.
- [94] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE, P. REGRENY, P. VIKTOROVITCH, J. FÉDÉLI et P. GROSSE, « Contacting InP based micro disk lasers on 200 mm Si wafers », *20th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*, 2008, p. 1-4.
- [95] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE, J. FÉDÉLI et P. VIKTOROVITCH, « Improving contact design for micro-disc based lasers in integrated circuits », *Group IV Photonics, 5th IEEE International Conference on*, IEEE, 2008, p. 67-69.
- [96] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE et P. VIKTOROVITCH, « A simple perturbative analysis for fast design of an electrically pumped micro-disk laser », *Optics Express*, t. 17, n° 1, p. 70-79, 2009.
- [97] P. ROJO-ROMEO, L. FERRIER, F. MANDORLO, X. LETARTRE, P. VIKTOROVITCH et J. FÉDÉLI, « Heterogeneous integration of III-V on Silicon based microlaser sources for photonic integrated circuit applications », *Transparent Optical Networks, ICTON'09. 11th International Conference on*, IEEE, 2009, p. 1-4.

- [98] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE, J. FÉDÉLI, P. REGRENY, P. GROSSE et P. VIKTOROVITCH, « InP based and electrically driven lasers fabricated with CMOS technologies », *Photonics Europe*, 2008.
- [99] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, J. FÉDÉLI et X. LETARTRE, « Réalisation de micro-lasers pompés électriquement, à base d'InP reporté sur substrat silicium en 200 mm », *Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG)*, 2007.
- [100] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, J. FÉDÉLI, X. LETARTRE, P. GROSSE et P. REGRENY, « Fabrication of InP micro-lasers on 200 mm wafers », *Group IV Photonics*, 4th IEEE International Conference on, IEEE, 2007, p. 1-3.
- [101] J. FÉDÉLI, F. MANDORLO et P. ROJO-ROMEO, « Système à microdisque à modes de galerie pour sources optiques pompées électriquement », 2009.
- [102] —, « Microdisc system with gallery modes for electrically pumped optical sources », 2009.
- [103] F. MANDORLO, J. FÉDÉLI, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE et C. SEASSAL, « Dispositif à coupleur sélectif en longueur d'onde pour collection de la lumière émise par une source laser », 2009.
- [104] —, « Device with wavelength-selective coupler for collecting the light emitted by a LASER source », 2009.
- [105] V. M. PASSARO et F. DE LEONARDIS, « Recent advances in modelling and simulation of silicon photonic devices », *Modelling and Simulation*, InTech, 2008.
- [106] F. MANDORLO, P. ROJO-ROMEO, X. LETARTRE, J. FÉDÉLI et P. VIKTOROVITCH, « Improvement of threshold and mode selectivity of a microdisk laser by engineering its coupling to an external passive cavity », *Group IV Photonics*, 6th IEEE International Conference on, IEEE, 2009, p. 205-207.
- [107] M. BLAHUT et A. OPILSKI, « Multimode interference structures-new way of passive elements technology for photonics », *Optoelectronics Review*, n° 3, p. 293-300, 2001.
- [108] P. BESSE, M. BACHMANN, H. MELCHIOR, L. SOLDANO et M. SMIT, « Optical bandwidth and fabrication tolerances of multimode interference couplers », *Journal of Lightwave Technology*, t. 12, n° 6, p. 1004-1009, 1994.
- [109] D. ZHENG, B. SMITH, J. DONG et M. ASGHARI, « On the effective carrier lifetime of a silicon p-i-n diode optical modulator », *Semiconductor Science and Technology*, t. 23, n° 6, p. 064006, 2008.
- [110] Q. XU, S. MANIPATRUNI, B. SCHMIDT, J. SHAKYA et M. LIPSON, « 12.5 Gbit/s carrier-injection-based silicon micro-ring silicon modulators », *Optics express*, t. 15, n° 2, p. 430-436, 2007.
- [111] F. GARDES, G. REED, N. EMERSON et C. PNG, « A sub-micron depletion-type photonic modulator in silicon on insulator », *Optics Express*, t. 13, n° 22, p. 8845-8854, 2005.
- [112] A. LIU, L. LIAO, . RUBIN, H. NGUYEN, B. CIFTCIOGLU, Y. CHETRIT, N. IZHAKY et M. PANICCIA, « High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide », *Optics Express*, t. 15, n° 2, p. 660-668, 2007.
- [113] D. PEREZ-GALACHO, C. BAUDOT, S. HIRTZLIN T. andMessaoudène, N. VULLIET, P. CROZAT, F. BOEUF, L. VIVIEN et D. MARRIS-MORINI, « Low voltage 25 Gbps silicon Mach-Zehnder modulator in the O-band », *Optics Express*, t. 25, n° 10, p. 11 217-11 222, 2017.
- [114] S. SZE et K. NG, *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons, 2006.
- [115] A. KYUREGYAN et S. YURKOV, « Room-temperature avalanche breakdown voltages of p-n# 3 junctions made of Si, Ge, SiC, GaAs, GaP, and InP », *Soviet Physics-Semiconductors(English Translation)*, t. 23, n° 10, p. 1126-31, 1989.
- [116] G. REEVES, « Specific contact resistance using a circular transmission line model », *Solid-State Electronics*, t. 23, n° 5, p. 487-490, 1980.
- [117] G. REEVES et H. HARRISON, « Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements », *IEEE Electron device letters*, t. 3, n° 5, p. 111-113, 1982.

Chapitre 2 : Vers des cellules solaires en silicium "augmenté" ?

Articles et publications

- [75] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) - PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (PVPS), « Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2016 », T1-32, 2017.
- [76] M. GREEN, Y. HISHIKAWA, W. WARTA, E. DUNLOP, D. LEVI, J. HOHL-EBINGER et A. HO-BAILLIE, « Solar cell efficiency tables (version 51) », *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, t. 26, n° 1, p. 3-12, DOI : [10.1002/pip.2978](https://doi.org/10.1002/pip.2978).
- [77] A. RICHTER, M. HERMLE et S. GLUNZ, « Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells », *IEEE Journal of Photovoltaics*, t. 3, n° 4, p. 1184-1191, 2013.
- [118] M. A. GREEN, K. EMERY, Y. HISHIKAWA et W. WARTA, « Solar cell efficiency tables (version 36) », *Progress in photovoltaics : research and applications*, t. 18, n° 5, p. 346-352, 2010.
- [119] A. ABERLE, « Thin-film solar cells », *Thin solid films*, t. 517, n° 17, p. 4706-4710, 2009.
- [120] A. SHAH, H. SCHADE, M. VANECEK, J. MEIER, E. VALLAT-SAUVAIN, N. WYRSCH, U. KROLL, C. DROZ et J. BAILAT, « Thin-film silicon solar cell technology », *Progress in photovoltaics : Research and applications*, t. 12, n° 2-3, p. 113-142, 2004.
- [121] R. COUDERC, M. AMARA et M. LEMITI, « In-Depth Analysis of Heat Generation in Silicon Solar Cells », *IEEE Journal of Photovoltaics*, t. 6, n° 5, p. 1123-1131, 2016.
- [122] E. SKOPLAKI et J. PALYVOS, « On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations », *Solar energy*, t. 83, n° 5, p. 614-624, 2009.
- [123] S. YILMAZ, H. R. OZCALIK, E. KILIC et M. AKSU, « Energy Supply In A Building Via A Photovoltaic-Thermal Power System », *International Journal of Scientific & Technology Research*, t. 4, n° 4, p. 299-303, 2015.
- [124] R. KUMAR et M. ROSEN, « A critical review of photovoltaic-thermal solar collectors for air heating », *Applied Energy*, t. 88, n° 11, p. 3603-3614, 2011.
- [125] L. HIRST et N. EKINS-DAUKES, « Fundamental losses in solar cells », *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, t. 19, n° 3, p. 286-293, 2011.
- [126] A. BLAKERS, A. WANG, A. MILNE, J. ZHAO et M. GREEN, « 22.8% efficient silicon solar cell », *Applied Physics Letters*, t. 55, n° 13, p. 1363-1365, 1989.

- [127] E. VAZSONYI, K. DE CLERCQ, R. EINHAUS, E. VAN KERSCHAUER, K. SAID, J. POORTMANS, J. SZLUFCHIK et J. NIJS, « Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells », *Solar energy materials and solar cells*, t. 57, n° 2, p. 179-188, 1999.
- [128] D. KRAY, M. HERMLE et S. W. GLUNZ, « Theory and experiments on the back side reflectance of silicon wafer solar cells », *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, t. 16, n° 1, p. 1-15, 2008.
- [129] M. TROPAREVSKY, A. SABAU, A. LUPINI et Z. ZHANG, « Transfer-matrix formalism for the calculation of optical response in multilayer systems : from coherent to incoherent interference », *Optics express*, t. 18, n° 24, p. 24 715-24 721, 2010.
- [130] D. WINDT, « IMD–Software for modeling the optical properties of multilayer films », *Computers in physics*, t. 12, n° 4, p. 360-370, 1998.
- [131] F. GÉRENTON, « Procédés innovants adaptés aux cellules photovoltaïques PERC en couches minces de silicium cristallin », thèse de doct., Université de Lyon, 2016.
- [132] S. KURTZ, P. FAINE et J. OLSON, « Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter », *Journal of Applied Physics*, t. 68, n° 4, p. 1890-1895, 1990.
- [133] J. GEISZ et D. FRIEDMAN, « III–N–V semiconductors for solar photovoltaic applications », *Semiconductor Science and Technology*, t. 17, n° 8, p. 769, 2002.
- [134] S. ALMOSNI, C. ROBERT, T. NGUYEN THANH, C. CORNET, A. LÉTOUBLON, T. QUINCI, C. LEVALLOIS, M. PERRIN, J. KUYALIL, L. PEDESSEAU et al., « Evaluation of InGaPN and GaAsPN materials lattice-matched to Si for multi-junction solar cells », *Journal of applied physics*, t. 113, n° 12, p. 123 509, 2013.
- [135] A. ROLLAND, L. PEDESSEAU, J. EVEN, S. ALMOSNI, C. ROBERT, C. CORNET, J. JANCU, J. BENHLAL, O. DURAND, A. LE CORRE et al., « Design of a lattice-matched III–V–N/Si photovoltaic tandem cell monolithically integrated on silicon substrate », *Optical and Quantum Electronics*, t. 46, n° 10, p. 1397-1403, 2014.
- [136] A. CUEVAS et D. MACDONALD, « Measuring and interpreting the lifetime of silicon wafers », *Solar Energy*, t. 76, n° 1-3, p. 255-262, 2004.
- [137] M. TYAGI et R. VAN OVERSTRAETEN, « Minority carrier recombination in heavily-doped silicon », *Solid-State Electronics*, t. 26, n° 6, p. 577-597, 1983.
- [138] J. del ALAMO et R. SWANSON, « Modelling of minority-carrier transport in heavily doped silicon emitters », *Solid-State Electronics*, t. 30, n° 11, p. 1127-1136, 1987.
- [139] Y. SCHIELE, S. WILKING, F. BOOK, T. WIEDENMANN et G. HAHN, « Record efficiency of PhosTop solar cells from n-type Cz UMG silicon wafers », *Energy Procedia*, t. 38, p. 459-466, 2013.
- [140] M. NONNENMACHER, M. O'BOYLE et H. WICKRAMASINGHE, « Kelvin probe force microscopy », *Applied physics letters*, t. 58, n° 25, p. 2921-2923, 1991.
- [141] B. BOUZAZI, H. SUZUKI, N. KOJIMA, Y. OHSHITA et M. YAMAGUCHI, « Double carriers pulse DLTS for the characterization of electron–hole recombination process in GaAsN grown by chemical beam epitaxy », *Physica B : Condensed Matter*, t. 406, n° 5, p. 1070-1075, 2011.
- [142] B. BOUZAZI, N. KOJIMA, Y. OHSHITA et M. YAMAGUCHI, « Effect of electron and proton irradiation on recombination centers in GaAsN grown by chemical beam epitaxy », *Current Applied Physics*, t. 13, n° 7, p. 1269-1274, 2013.
- [143] J. GEISZ, R. REEDY, B. KEYES et W. METZGER, « Unintentional carbon and hydrogen incorporation in GaNP grown by metal-organic chemical vapor deposition », *Journal of crystal growth*, t. 259, n° 3, p. 223-231, 2003.
- [144] G. VIRSHUP, C. FORD et J. WERTHEN, « A 19% efficient AlGaAs solar cell with graded band gap », *Applied physics letters*, t. 47, n° 12, p. 1319-1321, 1985.
- [145] K. YOSHIKAWA, H. KAWASAKI, W. YOSHIDA, T. IRIE, K. KONISHI, K. NAKANO, T. UTO, D. ADACHI, M. KANEMATSU, H. UZU et al., « Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% », *Nature Energy*, t. 2, p. 17 032, 2017.
- [146] I. MASSIOT, C. TROMPOUKIS, K. LODEWIJKS, V. DEPAUW et A. DMITRIEV, « Highly conformal fabrication of nanopatterns on non-planar surfaces », *Nanoscale*, t. 8, n° 22, p. 11 461-11 466, 2016.
- [147] R. CHAMPORY, « Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructurées : conception électro-optique et développement technologique », thèse de doct., Université de Lyon, 2016.
- [148] L. JONES, « Quantitative data and methods for colorimetry », *Jour. Opt. Soc. Amer.*, t. 34, p. 633-688, 1944.
- [149] D. L. MACADAM, « Projective transformations of ICI color specifications », *JOSA*, t. 27, n° 8, p. 294-299, 1937.
- [150] F. KARRAY, M. JMAL, A. GARCIA-ORTIZ, M. ABID et A. OBEID, « A comprehensive survey on wireless sensor node hardware platforms », *Computer Networks*, t. 144, p. 89-110, 2018.
- [151] J. MAILOA, C. BAILIE, E. JOHLIN, E. HOKE, A. AKEY, W. NGUYEN, M. MCGEHEE et T. BUONASSISI, « A 2-terminal perovskite/silicon multijunction solar cell enabled by a silicon tunnel junction », *Applied Physics Letters*, t. 106, n° 12, p. 121 105, 2015.
- [152] A. YOSHIDA, T. AGUI, N. KATSUYA, K. MURASAWA, H. JUSO, K. SASAKI et T. TAKAMOTO, « Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction solar cells for concentrator application », *21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21)*, 2011.
- [153] K. WEBER, A. BLAKERS, P. DEENAPANRAY, V. EVERETT, E. FRANKLIN et al., « Sliver solar cells », *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, 2005, p. 991-994.
- [154] R. POZNER, G. SEGEV, R. SARFATY, A. KRIBUS et Y. ROSENWAKS, « Vertical junction Si cells for concentrating photovoltaics », *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, t. 20, n° 2, p. 197-208, 2012.
- [155] B. SATER et N. SATER, « High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities », *Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*, IEEE, 2002, p. 1019-1022.

Sites internet

- [156] DUALSUN. (2010). Le panneau solaire hybride 2 en 1 : photovoltaïque et thermique. (Accessed : 2018-04-09), adresse : <https://dualsun.fr/produit/panneau-solaire-photovoltaïque-thermique/>.

Chapitre 3 : Activités de formation et de recherche

Articles et publications

- [130] D. WINDT, « IMD–Software for modeling the optical properties of multilayer films », *Computers in physics*, t. 12, n° 4, p. 360-370, 1998.
- [151] J. MAILLOA, C. BAILIE, E. JOHLIN, E. HOKE, A. AKEY, W. NGUYEN, M. MCGEHEE et T. BUONASSISI, « A 2-terminal perovskite/silicon multijunction solar cell enabled by a silicon tunnel junction », *Applied Physics Letters*, t. 106, n° 12, p. 121 105, 2015.
- [152] A. YOSHIDA, T. AGUI, N. KATSUYA, K. MURASAWA, H. JUSO, K. SASAKI et T. TAKAMOTO, « Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction solar cells for concentrator application », *21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21)*, 2011.
- [153] K. WEBER, A. BLAKERS, P. DEENAPANRAY, V. EVERETT, E. FRANKLIN et al., « Sliver solar cells », *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, 2005, p. 991-994.
- [154] R. POZNER, G. SEGEV, R. SARFATY, A. KRIBUS et Y. ROSENWAKS, « Vertical junction Si cells for concentrating photovoltaics », *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, t. 20, n° 2, p. 197-208, 2012.
- [155] B. SATER et N. SATER, « High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities », *Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*, IEEE, 2002, p. 1019-1022.
- [157] R. RAFAEL, « Etude des propriétés piézorésistives des jonctions tunnel MIM pour la réalisation de jauges de contraintes », thèse de doct., Université de Lyon, 2018.
- [158] A. ASTM, « E903-96 : Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres », *Annual Book of ASTM Standards*, t. 12, 1996.
- [159] M. VIGNETTI, « Development of a 3D Silicon Coincidence Avalanche Detector for Charged Particle Tracking », thèse de doct., Université de Lyon, mar. 2017.

Conclusion et perspectives

Articles et publications

- [160] T. NAGASHIMA, K. OKUMURA, K. MURATA et Y. KIMURA, « Three-terminal tandem solar cells with a back-contact type bottom cell », *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000 (Cat. No. 00CH37036)*, IEEE, 2000, p. 1193-1196.
- [161] P. KOWALCZEWSKI et L. ANDREANI, « Towards the efficiency limits of silicon solar cells : How thin is too thin? », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, t. 143, p. 260-268, 2015.
- [162] N. JOLISSAINT, R. HANBALI, J.-C. HADORN et A. SCHÜLER, « Colored solar façades for buildings », *Energy Procedia*, t. 122, p. 175-180, 2017.
- [163] C. XU, G. WANG, Z. HANG, J. LUO, C. CHAN et Y. LAI, « Design of full-k-space flat bands in photonic crystals beyond the tight-binding picture », *Scientific reports*, t. 5, p. 18 181, 2015.
- [164] R. COUDERC, M. AMARA et M. LEMITI, « A new tool to predict thermal and electrical behavior of silicon solar cells », 2015.
- [165] F. SAHLI, J. WERNER, B. A. KAMINO, M. BRÄUNINGER, R. MONNARD, B. PAVIET-SALOMON, L. BARRAUD, L. DING, J. DIAZ-LEON, D. SACCHETTO et al., « Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency », *Nature materials*, t. 17, n° 9, p. 820, 2018.
- [166] S. MALI, J. PATIL, H. ARANDIYAN, R. LUQUE et C. HONG, « Stability of Unstable Perovskites : Recent Strategies for Making Stable Perovskite Solar Cells », *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, t. 8, n° 6, Q111-Q117, 2019.
- [167] P. DOCAMPO, J. BALL, M. DARWICH, G. EPERON et H. SNAITH, « Efficient organometal trihalide perovskite planar-heterojunction solar cells on flexible polymer substrates », *Nature communications*, t. 4, p. 2761, 2013.
- [168] M. LIU, M. JOHNSTON et H. SNAITH, « Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition », *Nature*, t. 501, n° 7467, p. 395, 2013.

Annexe A : simulation de cellules tandems à base de GaAsPN et de Si (2012)

Articles et publications

- [135] A. ROLLAND, L. PEDESSEAU, J. EVEN, S. ALMOSNI, C. ROBERT, C. CORNET, J. JANCU, J. BENHLAL, O. DURAND, A. LE CORRE et al., « Design of a lattice-matched III-V-N/Si photovoltaic tandem cell monolithically integrated on silicon substrate », *Optical and Quantum Electronics*, t. 46, n° 10, p. 1397-1403, 2014.
- [136] A. CUEVAS et D. MACDONALD, « Measuring and interpreting the lifetime of silicon wafers », *Solar Energy*, t. 76, n° 1-3, p. 255-262, 2004.
- [137] M. TYAGI et R. VAN OVERSTRAETEN, « Minority carrier recombination in heavily-doped silicon », *Solid-State Electronics*, t. 26, n° 6, p. 577-597, 1983.
- [138] J. del ALAMO et R. SWANSON, « Modelling of minority-carrier transport in heavily doped silicon emitters », *Solid-State Electronics*, t. 30, n° 11, p. 1127-1136, 1987.
- [139] Y. SCHIELE, S. WILKING, F. BOOK, T. WIEDENMANN et G. HAHN, « Record efficiency of PhosTop solar cells from n-type Cz UMG silicon wafers », *Energy Procedia*, t. 38, p. 459-466, 2013.

- [141] B. BOUZAZI, H. SUZUKI, N. KOJIMA, Y. OHSHITA et M. YAMAGUCHI, « Double carriers pulse DLTS for the characterization of electron-hole recombination process in GaAsN grown by chemical beam epitaxy », *Physica B : Condensed Matter*, t. 406, n° 5, p. 1070-1075, 2011.
- [142] B. BOUZAZI, N. KOJIMA, Y. OHSHITA et M. YAMAGUCHI, « Effect of electron and proton irradiation on recombination centers in GaAsN grown by chemical beam epitaxy », *Current Applied Physics*, t. 13, n° 7, p. 1269-1274, 2013.
- [143] J. GEISZ, R. REEDY, B. KEYES et W. METZGER, « Unintentional carbon and hydrogen incorporation in GaNP grown by metal-organic chemical vapor deposition », *Journal of crystal growth*, t. 259, n° 3, p. 223-231, 2003.
- [169] W. SHOCKLEY et W. READ JR, « Statistics of the recombinations of holes and electrons », *Physical review*, t. 87, n° 5, p. 835, 1952.
- [170] B. BOUZAZI, H. SUZUKI, N. KIJIMA, Y. OHSHITA et M. YAMAGUCHI, « Investigation of lattice defects in GaAsN grown by chemical beam epitaxy using deep level transient spectroscopy », *Solar Cells-New Aspects and Solutions*, InTech, 2011.
- [171] I. BUYANOVA, W. CHEN et C. TU, « Recombination processes in N-containing III-V ternary alloys », *Solid-State Electronics*, t. 47, n° 3, p. 467-475, 2003.

Annexe A : simulation de cellules tandems à base de GaAsPN et de Si (2012)

Le tableau A1 indique les paramètres utilisés dans la partie 2.2.2. Le miroir en face arrière n'est pas optiquement optimisé puisqu'en pratique le contact arrière devait être constitué du substrat (fortement dopé) sur lequel on réalisait l'épitaxie de l'empilement complet avec une couche d'argent. Les paramètres du Si sont représentatifs de cellules de type n monocristallines à émetteur et BSF fortement dopés [136]-[139].

	Matériau	Épaisseur (μm)	Dopage (cm^{-3})	Durée de vie (s)	Mobilité ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Conc. des défauts $N_{SRH_{n/p}}$ (cm^{-3})	Niv. d'énergie** des défauts E_t (eV)	Gap E_g (eV)	Indice optique $n + i \cdot k$
	SiNx	0.07	-	-	-	-	-	-	2.0
	Contact sup.	0	-	-	-	-	-	-	1.0
Cellule sup.	p-GaP	0.2	10^{19}	D	D	D	-	D	D
	n-GaAsPN	0.5 à 1.0	10^{17}	10^{-5*} 10^{-12} à 10^{-8}	350 (e, h)	0^* 10^{19}	$E_g/2^*$ 0.52 ou 0.84	1.7	Fig.2.5
	n-GaP	0.2	10^{19}	D	D	D	-	D	D
JT	Jonction Tunnel (Si)	0.11	$10^{20} (n^{++})$ $10^{20} (p^{++})$	10^{-4}	D	D	-	D	D
Cell. inf.	p-Si	0.3	10^{18}	10^{-4}	D	D	D	D	D
	n-Si	15 à 100	10^{17}	10^{-4}	D	D	D	D	D
	n-Si	0.3	10^{19}	10^{-4}	D	D	D	D	D
	Contact inf.	0	-	-	-	-	-	-	1.0

* : Valeur par défaut pour un cas idéal ** : Évalué depuis le centre du gap E_g D : Valeur par défaut dans les bases de données de Silvaco 2013
 Tab. A1 – Paramètres utilisés pour simuler une cellule tandem de façon prédictive quant aux propriétés de l'absorbeur GaAsPN.
 Pour Si et GaP, les recombinaisons Auger et SRH ont systématiquement été prises en compte.

Le modèle utilisé pour calculer les recombinaisons SRH dans le GaAsPN dérive de celui défini par Shockley et Read [169] :

$$R_{SRH} = \frac{p \cdot n - n_{ie}^2}{\tau_p \cdot \left(n + n_{ie} \cdot e^{\frac{E_t}{k_b T}} \right) + \tau_n \cdot \left(p + n_{ie} \cdot e^{\frac{-E_t}{k_b T}} \right)} \quad (2)$$

où n et p représentent les concentrations locales en électrons et en trous, n_{ie} est la concentration intrinsèque des électrons, E_t est l'énergie caractéristique du défaut considéré (depuis le centre du gap). Les durées de vie τ_n et τ_p font intervenir les durées de vie intrinsèques τ_{n0} , τ_{p0} , et les concentrations volumiques de défauts N_{SRH_p} , N_{SRH_n} et N_{Total} (ensemble des défauts) :

$$\tau_p = \frac{\tau_{p0}}{1 + \frac{N_{Total}}{N_{SRH_n}}} \quad \text{et} \quad \tau_n = \frac{\tau_{n0}}{1 + \frac{N_{Total}}{N_{SRH_p}}} \quad (3)$$

Pour des raisons de simplicité, nous avons simulé une JT en Si uniquement alors qu'une solution hybride GaP/Si pouvait être envisagé [135]. Avec les niveaux de dopage utilisés, la barrière de la jonction mesure environ 4 nm. Pour simplifier la structure, les contacts sont supposés parfaitement conducteurs et ohmiques. L'épaisseur de la couche anti-reflet a été rapidement optimisée pour $h_{GAPN}=800 \text{ nm}$ et $h_{Si}=45 \mu\text{m}$, mais pas le choix du matériau. L'indice optique de l'ARC (2.0) est proche de celui du SiNx :H traditionnellement utilisé pour les cellules en Si mais sa stoechiométrie devrait être légèrement adaptée.

En fonction de la technique d'épitaxie des matériaux III-V-N, les recombinaisons semblent directement induites par la présence d'azote [141], [142], de carbone ou d'hydrogène [143]. Dans ce cas, la concentration de défauts varie entre $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ avec des niveaux d'énergie sous la bande de conduction E_c de l'ordre de 0.05 eV (défaut peu profond) à 0.33 eV (défaut profond) [142], [143], [170]. Nous avons donc utilisé ces valeurs (en 2014) pour réaliser les simulations avec GaAsPN (tab. A1), en espérant bien évidemment que la réalité ne soit pas trop éloignée.

Typiquement, les durées de vie ne dépassent pas quelques nanosecondes pour les matériaux III-V-N avec 4 à 6 % [141], [143], [171], d'où l'intervalle étudié de 1 ps à 10 ns (tab. A1).

Annexe B : Curriculum Vitae

MANDORLO Fabien

Né le 12 février 1982, à Issoire (63)

Fabien.Mandorlo@INSA-Lyon.fr

<http://fabien.mandorlo.fr>

Maître de conférence à l'INSA de Lyon

Docteur ingénieur de l'École Centrale de Lyon (ECL)

Coordonnées professionnelles

<i>Établissement</i>	Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL) - UMR CNRS 5270 ECL-INSA-UCBL INSA de Lyon - Bâtiment Blaise Pascal 7, avenue Jean Capelle, 69621 VILLEURBANNE cedex - FRANCE
<i>Téléphone</i>	+33 (0)4 72 43 74 77

Formation et diplômes

2011	Maître de conférences à l'INSA de Lyon , équipe <i>Photovoltaïque</i>	
Nov. 2009	Diplôme de Docteur de l'École Centrale de Lyon (ECL)	
2005	Diplôme d'ingénieur de l'École Centrale de Lyon (ECL) Master 2 de recherche "Dispositifs de l'Électronique Intégrée"	mention bien
2000	Bac Scientifique , options "Maths." et "Technologies industrielles"	mention bien

Expériences de recherche

2011-201x	Conception et fabrication de cellules photovoltaïques de troisième génération - Optimisation de cellules à base de Si structuré et reporté - Fabrication de cellules tandem à base de III-V sur Si	
2010-2011	Post doctorant Conception de photodiodes à avalanche intégrées Si/Ge - Principaux collaborateurs : Orange Lab, III-V Lab , CEA-Leti	IEF , Orsay
2009-2010	Attaché de Recherche et d'Enseignement à plein temps Conception de microLASERS compatibles CMOS - Principaux collaborateurs : IMEC , CEA-Leti , INL , STmicroelectronics - Conception du 1 ^{er} microdisque compatible CMOS	INL , Lyon FP7-WaDiMOS
2005 - 2009	Thèse de doctorat : "Étude et réalisation de liens optiques hétérogènes à base de semi-conducteurs III-V reportés sur Silicium" Laboratoires de recherche : - Institut des Nanotechnologies de Lyon - Laboratoire d'Électronique et de Technologies de l'Information	Bourse BDI CEA/CNRS puis ATER INL , Lyon CEA-Leti , Grenoble
2005	Projet scientifique en "Électronique des Systèmes de Communication" - Étude de la localisation de boîtes quantiques dans des cristaux photoniques 2D	INL , Lyon

2002-2006	Transfert d'énergie sans fil par ondes E-M à 2.45 GHz - Projet d'étude (PE) à l'ECL, prolongé en projet industriel (PI)	Lab. Ampère, Lyon
-----------	---	-------------------

Compétences et valorisation

Thématiques de recherche	Conception de composants électro-optiques - Conception de cellules solaires de 3 ^e génération - Intégration hétérogène III-V et silicium - Fabrication et caractérisation de composants électro-optiques
Techniques Scientifiques	Outils de simulation, analyse numérique et de conception : - Simulation : FDTD (Fullwave, Tessa), électronique (Cadence/pSpice, Silvaco) - Analyse scientifique : Matlab + Simulink, Maple Techniques de salle blanche pour la micro-électronique : - Dépôts d'oxydes et métaux (évaporation, pulvérisation) - Lithographie (UV, E-Beam) - Gravure sèche (RIE) et humide Caractérisation électrique et optique : - Photoluminescence, électroluminescence, ellipsométrie, TLM, mesures électro-optiques pulsées
Informatique	Langages de programmation : - Orientés "objet" : C/C++, Java, TestPoint - Systèmes numériques (PICs, μ -contrôleurs, FPGA) : ASM, C/C++, VHDL - Autres langages : PHP, HTML, CSS, \LaTeX , Grafcet

Expériences en enseignement et en encadrement

2011-201x	Formation d'élèves ingénieurs à l'INSA de Lyon - Filière Science et Génie des Matériaux (SGM) Cours, TP et TDs de 3 ^e à 5 ^e année - Techniques Numériques pour l'ingénieur en SGM TDs de 3 ^e année - NanoScale Engineering (NSE) TP en M1
2008-2010	Formation d'élèves ingénieurs à l'École Centrale de Lyon (ECL) : 2×192 h, ATER - Architecture de circuits et systèmes intégrés Cours et TP de 3 ^e année - Conception de micro-sources LASERS TD de 3 ^e année - Électronique analogique et numérique TP et TDs de 1 ^{re} et 2 ^e année - Traitement du signal TP et TDs de 1 ^{re} année
2005-2008	Formation d'élèves ingénieurs à l'École Centrale de Lyon (ECL) 140 h, vacataire - Électronique analogique et numérique TP et TDs de 1 ^{re} et 2 ^e année

Loisirs et centres d'intérêt

Sports	Badminton, natation, VTT, randonnée, musculation
Loisirs	Bricolage, lecture (BD), cinéma, photo (Reflex numérique)
Informatique	Webmestre de www.PC-Optimise.com (tuning, tests de matériel et utilisation de logiciels)



Annexe C : investissement en formation supérieure

Récapitulatif des différents enseignements

Le tableau A2 détaille les différentes formations assurées depuis l'obtention du poste de maître de conférences en 2011 à l'INSA de Lyon.

Intitulé	Année (Semestre)	Volume horaire		
		TP	TD	Cours
Département Science et Génie des Matériaux (SGM) - INSA de Lyon				
- Techniques Numériques pour l'Ingénieur	3 ^e (S1)	-	18 à 28	-
- Circuits électroniques - signaux systèmes	3 ^e (S1)	-	10 à 30	-
- Guide à la Rédaction de Documents Techniques et Scientifiques (≥2013)	3 ^e (S1)	-	-	2 à 6
- Matériaux - mesures - optoélectronique	3 ^e (S1)	36 à 60	-	-
- Mesures & Capteurs (2014 et 2015)	3 ^e (S2)	-	2 à 12	-
- Matériaux et composants semi-conducteurs	4 ^e (S1)	40 à 52	-	-
- Projet collectif (2012)	4 ^e (S2)	-	3.5	-
- Outils de simulation et communication par radio-fréquences	5 ^e (S1)	-	-	10
- Caractérisation et simulation des semi-conducteurs et composants		32 à 48	-	-
- Projet de fin d'étude (PFE) (≥2012)		-	16 à 24	-
Département Génie Mécanique (GM) - INSA de Lyon				
- Guide à la Rédaction de Documents Techniques et Scientifiques (2015-2017)	4 ^e (S2)	-	-	2
Master NanoScale Engineering (NSE) - UCBL				
- TCAD Simulation of Semiconductor devices (≤2015)	4 ^e (S2)	16 à 32	-	-
- TCAD Simulation of Semiconductor devices (≥2017)	5 ^e (S1)	16 à 32	-	-

Tab. A2 – Répartition des formations assurées depuis mon arrivée à l'INSA de Lyon (3^e, 4^e et 5^e années correspondent à L3, M1 et M2 respectivement).

La plupart des formations assurées en SGM se concentrent au premier semestre (S1). J'interviens chaque année dans le master NSE, à l'année de transition 2016 près, puisque les TP sont passés de M1 à M2. En 2013, j'ai mis en place une formation de 2h intitulée *Guide à la Rédaction de Documents Techniques et Scientifiques* qui a intéressé des enseignants du département de la filière GM.

La figure A1 représente l'évolution des différents enseignements en fonction du temps.

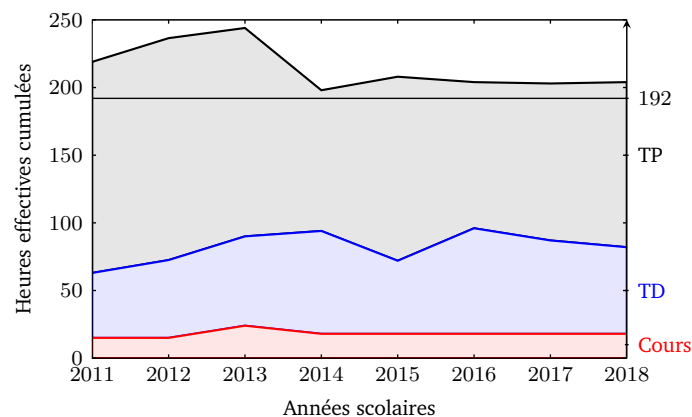


Fig. A1 – Répartition des heures effectives réalisées en cours, TP et TDs.

En 2014, j'ai proposé de nouvelles permutations dans les TP que j'encadre en 5^e année afin de réduire le temps de présence enseignant, sans altérer la formation des étudiants. De même, j'ai introduit des TP en autonomie en 4^e année (*Matériaux et composants semi-conducteurs*). Dans l'ensemble, ces deux changements m'ont permis de

réduire la voilure des enseignements au profit de la recherche malgré l'augmentation générale du nombre de TDs et de cours que j'assume.

Détail des enseignements

En *Projet collectif* (Étude technique et bibliographique par groupe de 6 étudiants sur un semestre), je n'ai porté que la casquette d'évaluateur ponctuellement. Pour cette raison, cet enseignement n'est pas détaillé dans ce manuscrit. De même, en TDs de *Mesures & Capteurs*, je ne suis intervenu que pour dépanner des collègues à la volée. Les autres modules, dont j'ai été responsable ou que j'ai fait évoluer, sont décrits ci-après.

<i>Intitulé :</i>	Techniques Numériques pour l'Ingénieur
<i>Niveau :</i>	3 ^e année (BAC+3)
<i>Implication :</i>	Co-responsable : mise en place de nouveaux TDs et des évaluations

À mon arrivée en [SGM](#), ce module a été totalement refondu suite au départ en retraite de l'ancien responsable. Avec mon collègue J. Morthomas, nous avons alors remplacé les cours théoriques de C/C++ par un ensemble de cours-TD Matlab et Excel VBA, davantage adaptés aux besoins de futurs ingénieurs. Afin d'améliorer l'attractivité de l'outil informatique, une dizaine de sujets illustrant différents points étudiés dans la filière [SGM](#) ont été élaborés :

- résolution numérique d'équations différentielles discontinues à travers le mouvement brownien de particules de polystyrène.
- résolution d'équations différentielles couplées via l'étude mécanique du pendule de Foucault.
- mise en place des matrices de Jones pour illustrer le fonctionnement d'un ellipsomètre.
- utilisation des transformées de Fourier appliquées à des images obtenues par microscopie à effet tunnel pour étudier un réseau cristallin.
- interpolation de données pour extraire la température de transition d'un acier sous contrainte.
- ...

Depuis 2016, j'ai proposé d'inclure une initiation à Matlab Simulink pour en faciliter l'utilisation dans d'autres modules d'enseignement.

<i>Intitulé :</i>	Circuits électroniques - signaux systèmes
<i>Niveau :</i>	3 ^e année (BAC+3)
<i>Implication :</i>	Intervenant et mise en place de nouveaux TDs

Ce module a pour objectif de transmettre les bases de l'électronique permettant de mettre en œuvre l'acquisition d'un signal. Après quelques rappels d'électronique (lois de Kirchhoff, impédances complexes), nous abordons l'étude de systèmes linéaires, l'amplification, les fonctions de transfert analogique et l'acquisition numérique.

En 2016, j'ai proposé de mettre en place 2 nouveaux TDs utilisant Matlab Simulink. L'objectif était de permettre aux étudiants de réaliser une étude moins académique, et davantage orientée vers l'utilisation d'outils de dimensionnement comme le ferait un ingénieur. Ainsi, nous avons pu analyser en profondeur une chaîne d'acquisition complète, puis observer l'influence des étapes de conversion analogique/numérique. Enfin, j'ai formé mon collègue enseignant à l'utilisation de cet outil.

<i>Intitulé :</i>	Guide à la Rédaction de Documents Techniques et Scientifiques
<i>Niveau :</i>	3 ^e année (BAC+3)
<i>Implication :</i>	Responsable du cours

En tant qu'encadrant de PFE, j'ai pu remarquer un certain nombre de lacunes dans les comptes-rendus et mémoires remis par les étudiants. J'ai donc proposé au département ce nouveau module pour clairement préciser les attentes (règles typographiques, utilisation des références etc) et apporter aux étudiants différentes solutions techniques (méthodologie, utilisation des styles sous Libre Office, MS Office) et logicielles avec une rapide introduction de \LaTeX et des bibliothèques numériques pour gérer leurs références bibliographiques. Différentes manipulations "en live" servent d'illustration.

Afin que les étudiants soignent leurs différents rendus, une partie de leur évaluation se fait désormais aussi sur la forme et la rigueur de leurs documents textuels (mémoires) et graphiques (présentations orales).

<i>Intitulé :</i>	Matériaux - mesures - optoélectronique
<i>Niveau :</i>	3 ^e année (BAC+3)
<i>Implication :</i>	Intervenant et évolution des sujets de TP

Avec deux collègues, nous organisons 3 des 11 TP de ce cycle. Pendant ces 6 années, deux des TP ont disparu (*Techniques du vide*, *Microscopie tunnel*) pour laisser place à un nouveau TP basé sur l'AFM. Les deux autres TP illustrent une technique de dépôt de couche mince par pulvérisation cathodique (incluant la caractérisation électrique et optique de cette dernière) et la caractérisation (gain photonique) d'un photomultiplicateur utilisé ultérieurement dans leur cycle de formation.

À nous trois, nous assurons la maintenance des équipements et l'évolution des sujets de TP.

<i>Intitulé :</i>	Matériaux et composants semi-conducteurs - TCAD Simulation of Semiconductor devices
<i>Niveau :</i>	4 ^e année (BAC+4)
<i>Implication :</i>	Co-responsable des 9 TP et responsable des 3 TP de simulation (élaboration des sujets)

Dans ce module de 9 TP, je suis responsable des 3 TP de simulation dont l'objectif est d'étudier l'impact d'un procédé de fabrication sur les performances électro-optiques d'un photodétecteur, d'un transistor bipolaire et d'un transistor MOS. Ces TP ont été intégralement revus à mon arrivée en 2011 (ISE TCAD) et sont en partie communs avec le master [NSE](#).

Pour assurer l'ensemble des séances, je suis accompagné, selon les années, de 2 à 3 intervenants que je forme à l'utilisation de la suite logicielle (ISE TCAD). Pour les étudiants de l'[INSA de Lyon](#), j'ai mis en place des séances de travail en autonomie à la fois pour la prise en main du logiciel et pour la dernière des 3 séances de TP qui est évaluée oralement en fin de semestre.

En 2018-2019, les licences de ISE TCAD ayant expiré, j'ai mis en place 3 nouveaux TP sous [Silvaco](#) (via le CNFM) pour exploiter ce logiciel que j'utilisais davantage en recherche. Les deux premiers TP sont restés très proches, mais le troisième est désormais orienté vers la simulation d'une jonction tunnel pour les étudiants [INSA de Lyon](#) tandis qu'un nouveau TP sur le transistor MOS a été développé pour les étudiants du master [NSE](#) et pour les étudiants au second semestre (j'ai fourni le TP "clef en main" à mes collègues).

<i>Intitulé :</i>	Caractérisation et simulation des semi-conducteurs et composants
<i>Niveau :</i>	5 ^e année (BAC+5)
<i>Implication :</i>	Responsable des TP de simulation (élaboration des sujets)

Dans ce module de TP propre à la filière SCM, je suis responsable de 2 TP de 8h qui ont pour but de faire la jonction entre les composants et les systèmes électroniques grâce à des simulations de type pSpice (sous Cadence). En plus des étudiants de l'[INSA de Lyon](#), il m'est arrivé d'accueillir ponctuellement quelques doctorants désireux d'apprendre à utiliser cette suite logicielle.

<i>Intitulé :</i>	Outils de simulation et communication par radio-fréquences
<i>Niveau :</i>	5 ^e année (BAC+5)
<i>Implication :</i>	Responsable du cours

Ce cours optionnel, dont je suis le responsable, a pour but de sensibiliser les étudiants aux différents outils utilisés pour simuler des systèmes plus ou moins complexes, du composant thermo-mécano-opto-électrique au système complet. Une partie de ce cours, qui se concentre sur la conception de composants radiofréquences, est assuré par un collègue (J. Verdier). Les TP *Caractérisation et simulation des semi-conducteurs et composants* illustrent parfaitement ce cours.

Annexe D : articles choisis

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 30, NO. 19, OCTOBER 1, 2012

3073

Controlled Multi-Wavelength Emission in Full CMOS Compatible Micro-Lasers for on Chip Interconnections

Fabien Mandorlo, Pedro Rojo Romeo, Nicolas Olivier, Lydie Ferrier, Régis Orobitchouk, Xavier Letartre, Jean Marc Fedeli, and Pierre Viktorovitch

Abstract—We report on a system to control the emitted wavelength of a laser independently from its pump conditions. To illustrate the concept, it is applied to III-V microdisk lasers fabricated on a CMOS pilot line for application to multicolored optical interconnections. Two different control systems are experimentally studied. The first one requires two coupling areas between the resonator and its coupled waveguide while the second solution is based on a photonic crystal mirror and a single coupling area. In both cases, the independent tuning of their emission from the pump conditions is demonstrated with a very high compacity. A controlled multimode emission in microdisk lasers is obtained for the first time.

Index Terms—CMOS, heterogeneous integration, laser, microdisk, mode hopping, multimode emission, on-chip optical interconnections, photonic crystal, wavelength control.

INTRODUCTION

ON-CHIP interconnections are becoming a bottleneck to continue down scaling the transistor size in integrated circuits [1]. As low loss waveguides and fast photodetectors at 1.55 μm wavelength are compatible with CMOS fabrication [2], [3], the use of optical links is a suitable solution if fast and low power lasers are available [4]. To maximize the amount of transferred data per occupied surface, wavelength division multiplexing (WDM) and wavelength sensitive routing devices can be exploited. One approach consists in cascading and modulating the right number of single light sources [5].

In this article, we focus on a versatile laser with a controlled lasing wavelength. The first part of this paper presents the theoretical concept of the device. Then, two derived solutions based on microdisk cavities and fabricated on a CMOS pilot line are experimentally studied. Mode hopping operation with

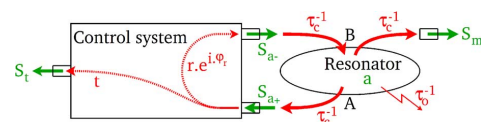


Fig. 1. Schematic drawing of the device.

a frequency spacing corresponding to the Free Spectral Range (FSR) is demonstrated. For specific conditions, a controlled multimode emission is achieved.

I. THEORETICAL CONCEPT AND MODE SELECTION

A. Description of the Model

In [6], we theoretically demonstrated that controlling the optical path of a silicon waveguide coupled to a microdisk cavity at two different points can be used to modulate the quality factor of the resonant modes of the whole device. In the following lines, we will restrict our theoretical study to micro-resonators supporting propagative resonant modes, like microdisks, but we will focus on a more generic system and model its behavior. A schematic drawing of the device and its two coupling areas (A and B) is given in Fig. 1.

In this structure, the control system collects light from the resonant cavity (at point A in Fig. 1) and splits this signal into an output (S_t) and an attenuated phase shifted signal that is re-injected in the resonator itself (B). The coupling area B also aims at transferring light from the resonator to a second output (S_m). The coupling rate τ_c^{-1} and the intrinsic loss rate will be linked to quality factors $Q_c = \omega_0 \cdot \tau_c$ and $Q_0 = \omega_0 \cdot \tau_0$.

Assuming that the phase shift in the control system depends on the wavelength, we will demonstrate that wavelength selection occurs thanks to the monitoring of the signal that is sent back to the laser (S_{a-}). It is relevant to notice that with such a configuration, the intensity of the emitted light and its spectrum are set by two independent systems namely the pump and the signal sent to the control system.

B. Theoretical Analysis and Coupling Loss Rate Modulation

According to Fig. 1, the control system can be described with the following equations:

$$S_{a-} = r \cdot e^{i\phi_r} \cdot S_{a+} \quad \text{and} \quad S_t = t \cdot S_{a+} \quad (1)$$

where $1 - r^2 - t^2$ represents losses in the control system. To get a strong interaction between the control system and the resonator, r must be close to 1.

Manuscript received May 02, 2012; revised July 10, 2012; accepted July 11, 2012. Date of publication July 24, 2012; date of current version September 19, 2012. This work was supported by the European Project FP7-ICT STREP WADIMOS.

F. Mandorlo and O. Orobitchouk are with the University of Lyon, Lyon Institute of Nanotechnology (INL) UMR CNRS 5270, INSA de Lyon, Villeurbanne F-69621, France.

P. R. Romeo, X. Letartre, and P. Viktorovitch are with the University of Lyon, Lyon Institute of Nanotechnology (INL) UMR CNRS 5270, Ecole Centrale de Lyon, Ecully, F-69134 France.

N. Olivier and J.-M. Fedeli are with the CEA, LETI, Minatec, 38054 Grenoble Cedex 9, France.

L. Ferrier is with the Laboratory of Physics of Nanostructures, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne, Switzerland.

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/JLT.2012.2209863

Using the Coupled Mode Theory [7], the equation for the evolution of the resonator amplitude a is given by

$$i \cdot \omega \cdot a = \left(i \cdot \omega_0 - \frac{\tau_0^{-1}}{2} - \frac{\tau_c^{-1}}{2} \right) \cdot a + \left(\frac{\tau_c^{-1}}{2} \right)^{1/2} \cdot S_{a-}. \quad (2)$$

By power conservation, the outgoing waves are linked to the ingoing one (S_{a-}) and the amplitude a in the cavity:

$$\begin{cases} S_{a+} = - \left(\frac{\tau_c^{-1}}{2} \right)^{1/2} \cdot a \cdot e^{-i \cdot \phi_{AB}} \\ S_m = S_{a-} - \left(\frac{\tau_c^{-1}}{2} \right)^{1/2} \cdot a \end{cases} \quad (3)$$

Here, ϕ_{AB} represents the phase shift in the resonator itself between the coupling areas A and B.

Introducing $\Delta\phi$ as being the phase difference between the optical paths in the control system ϕ_m and in the resonator ϕ_{AB} , the nontrivial solution of all these equations leads to

$$\begin{cases} \Re_e(\omega) = \omega_0 - \frac{\tau_c^{-1}}{2} \cdot r \cdot \sin(\Delta\phi) \\ \tau_{\text{tot}}^{-1} = 2 \cdot \Im_m(\omega) = \tau_0^{-1} + \tau_{c, \text{eff}}^{-1} \\ \tau_{c, \text{eff}}^{-1} = \tau_c^{-1} \cdot (1 + r \cdot \cos(\Delta\phi)) \\ Q = \frac{\Re_e(\omega)}{\tau_0^{-1} + \tau_{c, \text{eff}}^{-1}} \approx \frac{\omega_0}{\tau_0^{-1} + \tau_{c, \text{eff}}^{-1}} \end{cases} \quad (4)$$

where $\tau_{c, \text{eff}}^{-1}$ is the effective coupling loss rate of the device and τ_{tot}^{-1} is the total loss rate, including the intrinsic one. In this equation set, Q is the quality factor of the whole device.

Using the expression of $|S_m/a|^2$ and $|S_t/a|^2$, it is possible to estimate the coupling efficiency for each output ($\eta_{m,t}$):

$$\begin{cases} \eta_m = \tau_{\text{tot}} \cdot \left| \frac{S_m}{a} \right|^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + 2 \cdot r \cdot \cos(\Delta\phi) + r^2}{x + 1 + r \cdot \cos(\Delta\phi)} \\ \eta_t = \tau_{\text{tot}} \cdot \left| \frac{S_t}{a} \right|^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2}{x + 1 + r \cdot \cos(\Delta\phi)} \end{cases} \quad (5)$$

with $x = \tau_0^{-1}/\tau_c^{-1}$. Without losses in the control system ($t^2 + r^2 \approx 1$) and $x \ll 1$, η_t is equal to $1 - \eta_m$.

Table I represents the variation of the main variables as a function of $\Delta\phi$ for $x \ll 1$: such a condition leads to consider that the intrinsic loss rate is extremely small compared to the coupling one ($\tau_0^{-1} \ll \tau_c^{-1}$). First, the quality factor of the whole system strongly depends on this phase shift and a maximum value can be achieved. Therefore, if the resonator is used as a laser cavity, stimulated emission will preferentially select modes for which $\Delta\phi$ is close to π . It is worth noticing that this particular condition corresponds to a maximum coupling efficiency η_t obtained for the transmitted signal S_t and if losses in the control system are negligible with r close to 1, this efficiency tends to 1. On the contrary, if $\Delta\phi$ is far from π , the effective coupling loss rate $\tau_{c, \text{eff}}^{-1}$ limits the quality factor to very low values depending on the local coupling strength (related to τ_c^{-1}).

To conclude, the control system acts as a powerful way to funnel the stimulated emission in a selected mode of a multi-mode resonator, since it decreases the number of modes with a low loss level. The modulation of the effective coupling loss rate $\tau_{c, \text{eff}}^{-1}$, helps in reducing the lasing threshold of a selected ($\Delta\phi = \pi$) mode and this property is even more pronounced as r increases.

TABLE I
EVOLUTION OF THE RESONANT FREQUENCY, THE EFFECTIVE COUPLING RATE $\tau_{c, \text{eff}}^{-1}$, AND THE COUPLING EFFICIENCIES η_t AND η_m OF SIGNALS S_t AND S_m .
 r IS ASSUMED TO BE CLOSE TO 1 AND $\tau_0^{-1} \ll \tau_c^{-1}$

$\Delta\phi$	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π
$\Re_e(\omega)$	$\omega_0 \rightarrow \omega_0 - \frac{r}{2} \cdot \tau_c^{-1} \rightarrow \omega_0$	$\omega_0 \rightarrow \omega_0 - \frac{r}{2} \cdot \tau_c^{-1} \rightarrow \omega_0$	$\omega_0 \rightarrow \omega_0 + \frac{r}{2} \cdot \tau_c^{-1} \rightarrow \omega_0$	$\omega_0 \rightarrow \omega_0 + \frac{r}{2} \cdot \tau_c^{-1} \rightarrow \omega_0$	$\omega_0 \rightarrow \omega_0 + \frac{r}{2} \cdot \tau_c^{-1} \rightarrow \omega_0$
$\tau_{c, \text{eff}}^{-1}$	$\sim 2\tau_c^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow (1-r)\tau_c^{-1} + \tau_0^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow \sim 2\tau_c^{-1}$	$\sim 2\tau_c^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow (1-r)\tau_c^{-1} + \tau_0^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow \sim 2\tau_c^{-1}$	$\sim 2\tau_c^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow (1-r)\tau_c^{-1} + \tau_0^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow \sim 2\tau_c^{-1}$	$\sim 2\tau_c^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow (1-r)\tau_c^{-1} + \tau_0^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow \sim 2\tau_c^{-1}$	$\sim 2\tau_c^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow (1-r)\tau_c^{-1} + \tau_0^{-1} \rightarrow \tau_c^{-1} \rightarrow \sim 2\tau_c^{-1}$
η_m	$\frac{1+r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1-r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1+r}{2}$	$\frac{1+r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1-r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1+r}{2}$	$\frac{1+r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1-r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1+r}{2}$	$\frac{1+r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1-r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1+r}{2}$	$\frac{1+r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1-r}{2} \rightarrow \frac{1+r^2}{2} \rightarrow \frac{1+r}{2}$
$\eta_t \cdot \frac{2}{t^2}$	$\frac{1}{1+r} \rightarrow 1 \rightarrow 1-r \rightarrow 1 \rightarrow \frac{1}{1+r}$	$\frac{1}{1+r} \rightarrow 1 \rightarrow 1-r \rightarrow 1 \rightarrow \frac{1}{1+r}$	$\frac{1}{1+r} \rightarrow 1 \rightarrow 1-r \rightarrow 1 \rightarrow \frac{1}{1+r}$	$\frac{1}{1+r} \rightarrow 1 \rightarrow 1-r \rightarrow 1 \rightarrow \frac{1}{1+r}$	$\frac{1}{1+r} \rightarrow 1 \rightarrow 1-r \rightarrow 1 \rightarrow \frac{1}{1+r}$

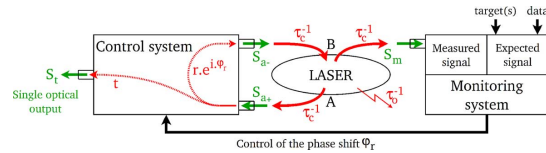


Fig. 2. Example of an automatically controlled system using S_m to monitor the laser and adapt the value of ϕ_r , and transmit data to different targets.

C. Design Rules and Perspectives

To get an efficient device, the transferred power to the outputs must be the main loss source, even if the quality factor is maximum for $\Delta\phi = \pi$. This condition is achieved if the effective coupling losses are dominating, leading to $(1-r) \cdot \tau_c^{-1} \gg \tau_0^{-1}$. Then, parameters from both the resonator and the control system must satisfy the following property:

$$\tau_c^{-1} \gg (1-r) \cdot \tau_c^{-1} \gg \tau_0^{-1}. \quad (6)$$

With such a condition and r not too close to 1, the control of the optical path in the control system can be used to select a particular wavelength of the resonator. For the selected mode ($\Delta\phi = \pi$), the intensity of S_m is significantly lower than for S_t , but this later can be used to automatically monitor the whole system as illustrated in Fig. 2.

Here, optical characteristics of S_m (wavelength(s), optical power) can be measured using optical filters like ring resonators and photodiodes [8]. This information can be used to electrically control the phase shift ϕ_r , and emit datas to the selected target(s) in a WDM optical circuit. According to our study, the emission of this controlled laser can be selected and fulfills both a very low loss rate and a very high coupling efficiency for its single optical output S_t .

The following sections focus on two different versions of the device corresponding to Fig. 1, using microdisk resonators fabricated on a CMOS pilot line with a thermal control of the phase shifts. Only the second solution is compatible with the structure presented in Fig. 2 since $t \neq 0$.

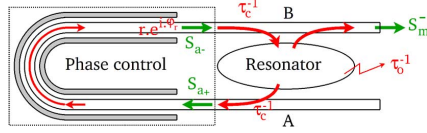


Fig. 3. Schematic of the device based on a single waveguide coupled at two different points. Grey elements represent the system to control the phase ϕ_r in the waveguide and S_m^- is equivalent to S_m for a clockwise mode.

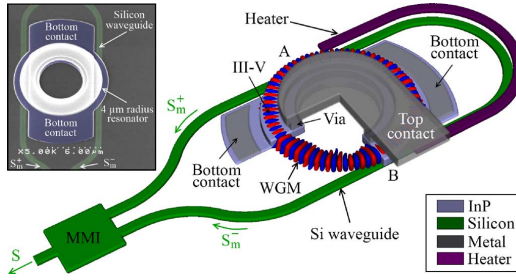


Fig. 4. Sliced 3-D drawing of an integrated coupled microdisk using a heater to control the optical path between the two coupling points. Both clockwise (S_m^-) and anti-clockwise (S_m^+) modes can be collected thanks to a MMI coupler. Inset is a SEM view of a device under fabrication.

II. MICRODISKS COUPLED AT TWO DIFFERENT AREAS

Here, we will focus on a derived version of the previously depicted structure as illustrated in Fig. 3.

In this particular structure:

- there is no output signal S_t , leading to consider $t = 0$;
- the coupling areas are diametrically opposed: $\phi_{AB} = m \cdot \pi$ where m is the azimuthal order of a whispering gallery mode (WGM);
- r is extremely close to 1 since losses in Si bent waveguides are very low for curvature radius higher than few micrometers (experimentally around 6×10^{-2} dB [9]).

An integrated version of the electrically pumped device based on a microdisk with a radius below $10 \mu\text{m}$ is represented in Fig. 4. Gain in the resonator is provided by three quantum wells (QWs) in the intrinsic region of a III-V material based PIN diode (blue). The resonator is vertically coupled at two different areas to silicon waveguides (green) and the top and bottom contacts (gray) correspond to the pump. An electrical heater (purple) is used to phase shift the signal in the silicon waveguide that is sent back to the microdisk laser.

For such a resonator, the intrinsic quality factor $Q_0 = \omega_0 \cdot \tau_0$ is limited to few tens of thousands due to fabrication (sidewall roughness, inclined edges...) and a poor radial optical confinement due to the electrical contacts compared with a perfect microdisk. To control the phase shift in the control system, a heater is located in the neighborhood of the Si waveguide. Here, the same equations rule both the clockwise and anti-clockwise degenerated modes of the microdisk due to the symmetry of the whole structure. Consequently, we will assume that two output signals may exist depending on the propagation direction: S_m^- for the clockwise mode and S_m^+ for the anti-clockwise one (Fig. 4).

TABLE II
TYPE OF INTERFERENCES IN THE MMI COUPLER DEPENDING ON THE SYMMETRY AT THE COUPLING AREAS AND THE AZIMUTHAL ORDER FOR A SELECTED STATIONARY MODE AND A SYMMETRIC DEVICE

Azimuthal order m	Symmetry at the coupling points	
	Even	Odd
Even	Constructive	Destructive
Odd	Destructive	Constructive

A. Influence of the 2×1 MMI at the Outputs

A stationary solution of the Maxwell equations corresponds to a balanced power into S_m^+ and S_m^- . It has already been demonstrated that the coupling loss rate depends on the symmetry of the field at the coupling area [10]: this implies that one of the 2 stationary solutions (even or odd) has a lower coupling loss rate, leading to a stationary lasing mode.

In our device, a 2×1 MMI connects the two ends of the Si waveguide to collect light in a single waveguide (S), leading to interferences depending on the phase difference between S_m^+ and S_m^- . These interferences (summarized in Table II) are related to the symmetry of the electromagnetic field at the coupling points with the resonator and to the parity of the azimuthal order m of the selected WGM.

The presence of the MMI may lead to a local maximum or minimum measured optical power when $\Delta\phi$ is close to π for a selected mode, depending on the azimuthal order parity. In case of destructive interferences, the pump power of the laser must compensate the additional losses in the coupler itself to obtain the same optical power in the output S . It also participates in increasing the optical noise level if used in an optical circuit. Therefore, an efficient design should favor modes with constructive interferences.

B. Fabrication Steps on a CMOS Pilot Line

Waveguides and grating couplers for light collection are fabricated on CMOS pilot line by processing a 200 mm SOI wafer with a 220 nm thick silicon layer.

In order to limit the lasing regime to the most confined WGMs, the size of the top contact via is optimized to ensure extremely high absorption losses for modes with a radial order different from 0 [11]. As the electromagnetic field is mainly located between the top via and the edge of the resonator, carriers recombination in the center of the device mainly participates in increasing the lasing threshold and uselessly heating the device. For this reason, the III-V inner part of the microdisk is etched and replaced by silica. III-V dies with three compressive strained QWs were bonded onto a 200 mm SOI wafer containing Si waveguides and grating couplers for light collection and measurements. The separating distance between waveguides and the III-V material is 100 nm. The thickness of the InP membranes is 500 nm which restricts the vertical order of WGMs to 0 and 1: to avoid electrical injection in unwanted modes, QWs are centered in the III-V stack. Consequently, only modes with no vertical and radial orders may reach the lasing regime. More details on the design and experimental results for microdisk with exactly the same process flow, the same III-V stack and no control system are given in [12].

In the frequency domain, these modes are separated by a constant spacing (FSR) that is proportional to the inverse of the radius R of the cavity. To ensure that more than three modes are located in the emission range of the QWs (≈ 75 nm around $1.52 \mu\text{m}$ wavelength), we decided to choose $R = 7.5 \mu\text{m}$, leading to a via radius of $4.65 \mu\text{m}$ and a silica core of $3.8 \mu\text{m}$.

The shape of the resonator and the height of the bottom contact were obtained by a partial reactive ion etching (RIE) of the III-V material. The remaining doped layer is removed by a second RIE step based on a CH_4/H_2 mixture and to limit unwanted optical interactions, this absorbing layer is removed above the optical waveguides. Then, buried metallic heaters are fabricated. After a CMP and silica aperture, a single deposition of a CMOS metal stack (Ti/TiN/AlCu) [13] was necessary for all the electrical contacts thanks to a reverse biased p + /n+ tunnel junction for the P electrode of the laser.

C. Phase Shift in the Control System

This article does not aim at proving the high speed optical index modulation in the waveguide, but a control system based on carrier depletion [3] or carrier injection [14] in silicon waveguides can be adapted to our device since all the control system would be fabricated before the III-V material bonding for the laser itself. Here, we only want to demonstrate that the lasing mode can be selected by a system that is independently controlled from the pumping power. An easy to fabricate solution consists in using a heater.

In order to express the variation of $\Delta\phi$ as a function of the temperature T of the silicon waveguide, we will consider that the relative thermal sensitivity of the waveguide (effective index n_{eff}) is the same as in silicon (optical index n_{Si}):

$$\frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \approx \frac{1}{n_{\text{Si}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{Si}}}{\partial T} = \beta(T) \quad (7)$$

where

$$\beta(T) \approx 4.99 \times 10^{-5} + 8.33 \times 10^{-7} \cdot (T - 273.15) \quad (8)$$

from the expression given in [15]. Under this assumption, the temperature sensitivity of $\Delta\phi$ induced by each waveguiding element of length L_i and effective index $n_{\text{eff},i}$ is estimated by

$$\frac{\partial}{\partial T}(\Delta\phi) \approx \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \beta(T) \cdot \sum_i L_i \cdot n_{\text{eff},i} \quad (9)$$

Devices were designed so that a 2π -phase shift is obtained when the local temperature is varied from room temperature to around 300°C . Consequently, we should be able to study more than one period on the phase shift $\Delta\phi$ (4) before damaging the heater.

D. Experimental Demonstration of Mode Hopping

Electrically pump laser emission measurements were made at room temperature with 20 ns wide pulses under a repetition rate of 1 MHz.

Fig. 5 shows the intensity of the two main WGMs (labeled λ_1 and λ_2) as a function of the electrical power P_h injected into the heater. Amplitude of the pump is set to 4.7 V. Without heating power ($P_h = 0$), the dominating mode corresponds to wavelength $\lambda_2 = 1.488 \mu\text{m}$. Then, around $P_h = 10$ mW, its

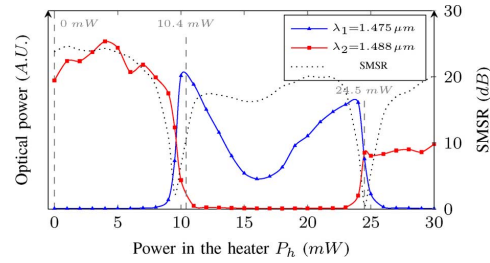


Fig. 5. Optical intensity for the two lasing modes (4.7 V pump pulses with a 2% duty cycle) depending on the heating power to control $\Delta\phi$.

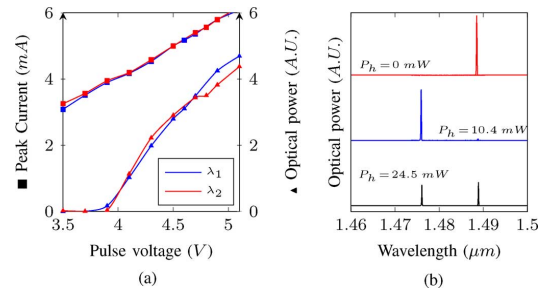


Fig. 6. Electro-optical characteristics and optical spectrum for the same device as in Fig. 5. (a) Electro-optical characteristics of modes λ_2 and λ_1 for 0 and 10.4 mW heating power, respectively. (b) Optical spectrum for different heating conditions (4.7 V pulses).

coupling loss rate competes with that of mode $\lambda_1 = 1.475 \mu\text{m}$, and a higher heating power leads to change the wavelength of the dominating mode from λ_2 to λ_1 , with a hop that corresponds to the theoretical FSR. At $P_h \approx 24.5$ mW, competition occurs once again since the effective coupling loss rate of mode λ_2 is decreasing, and the lasing wavelength comes back to mode λ_2 .

When a WGM is selected, a Side Mode Suppression Ratio (SMSR) higher than 20 dB is available for this particular pump voltage (4.7 V), as observed in Fig. 5.

As the frequency spacing between modes λ_1 and λ_2 corresponds to the FSR, the parity of their azimuthal number differs. From Table II, this property leads to different kind of interferences in the MMI coupler. For this reason, when mode λ_1 is dominating, a minimum value of the collected optical intensity is obtained around $P_h \sim 16$ mW while a maximum signal is reached at $P_h \sim 4.5$ mW for mode λ_2 .

E. Lasing Properties and Dual Mode Emission

The electro-optical characteristics of the device for two different values of the heating power are given in Fig. 6. Lasing thresholds and electrical properties are exactly the same at wavelengths λ_1 and λ_2 [Fig. 6(a)] even with different heating powers.

Optical spectra are given in 6(b) for the same pump level (4.7 V) as in Fig. 5. The spectrum at 24.5 mW [Fig. 6(b)] is also investigated since it corresponds to a particular condition on the coupling loss rates for which the 2 lasing modes are in competition (crossing point in Fig. 5). Dual mode emission is observed with a balanced intensity corresponding to half the

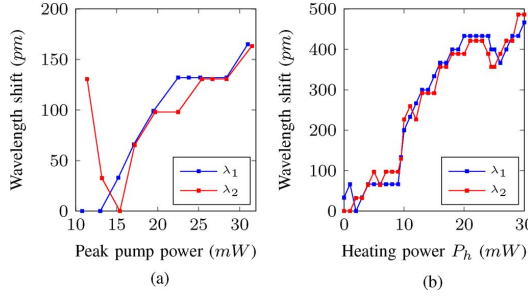


Fig. 7. Red-shifts induced by (a) the pump or (b) the heater. (a) Influence of the pump power with a 2% duty cycle [same conditions as Fig. 6(a)]. (b) Influence of heater (same conditions as in Fig. 5).

intensity of the single mode emission ($P_h = 0$ mW and $P_h = 24.5$ mW) with the same pumping conditions.

The increase of the electrical power in the device leads to higher local temperatures, resulting in a red-shifted emission. For a 2% duty cycle pump power, self heating leads to around $8 \text{ pm} \cdot \text{mW}^{-1}$ red-shifts [Fig. 7(a)]. The use of heaters also changes the resonant wavelength: with $P_h \leq 30$ mW, the shift is limited to 0.5 nm [Fig. 7(b)] that is extremely small compared to the wavelength hop ($\lambda_2 - \lambda_1 = 13$ nm). Moreover, the comparison of the electro-optical characteristics in Fig. 6(a) confirms that the heater has almost no influence on the laser even with a more than 10 mW increased heating power ($P_h = 0$ for λ_1 and $P_h = 10.4$ mW for λ_2).

From (4), the resonant frequency ω also depends on $\Delta\phi$ and a maximum variation of $\Delta\omega = \pm\tau_c^{-1}/2$ is theoretically expected. In our case, this corresponds to a maximum variation $\Delta\lambda \sim 300$ pm from the estimation of τ_c^{-1} . Unfortunately, the sensitivity to the heating power (around $17 \text{ pm} \cdot \text{mW}^{-1}$) is too high to observe variations induced by the modulation of the effective coupling loss rate τ_{eff}^{-1} .

F. Conclusion and Limitations

Using a thermal control of the coupling conditions, we experimentally demonstrate that the lasing wavelength can be selected independently from the pumping conditions. Dual mode emission is obtained when 2 modes compete due to similar effective coupling loss rates τ_{eff}^{-1} . Multimode emission with more than three modes is theoretically possible for a particular silicon waveguide length for which all the selected modes have the same phase shift $\Delta\phi = \pi[2\pi]$. Unfortunately, it is not easy to balance their respective intensity, since their effective coupling loss rates will vary the same way with $\Delta\phi$ [16].

Last, since the resonator and the waveguide are not processed at the same lithography step, misalignment may lead to a relative difference δ_c of the coupling loss rates at each coupling areas, resulting to a lower quality factor Q_{max} for the selected WGM:

$$Q_{\text{max}} \approx Q_c \cdot (\delta_c + (1 - r))^{-1}. \quad (10)$$

Losses in the silicon waveguide (related to $1 - r$) can be controlled and limited to low values (less than few %) with a good reproducibility, for instance through the curvature of the waveguide. If $\delta_c \gg 1 - r$, the contrast between the selected mode ($Q = Q_{\text{max}}$) and the unwanted ones ($Q \sim Q_c/2$) is reduced.

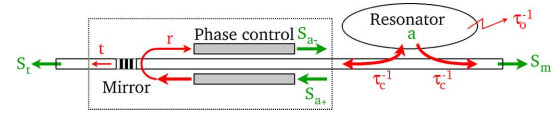


Fig. 8. Schematic drawing of the device.

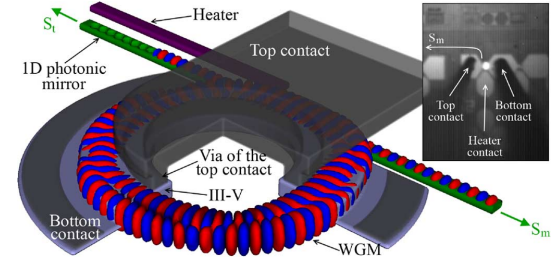


Fig. 9. Sliced 3-D drawing of an integrated resonator coupled to a Si waveguide with a 1-D PC mirror at one end. Inset is a microscope view of a lasing device.

Besides, another limitation of this device concerns the optical losses linked to $1 - r$: they are dominating for the selected mode and can not be collected, leading to a poor coupling efficiency (Table I).

For these two reasons, we propose to study a more robust solution to misalignment for which coupling areas A and B are merged (leading to $\delta_c = 0$) and for which both S_t and S_m are available.

III. COUPLING OF A MICRODISK TO A PSEUDO CAVITY WITH A PHOTONIC CRYSTAL MIRROR

Instead of using interferences at a second coupling point, a mirror [17] gets light back to the same coupling point ($\phi_{AB} = 0$), and so with the same local coupling loss rate τ_c^{-1} whatever the misalignment (Fig. 8). A schematic view of the whole device is presented in Fig. 8.

In this particular structure, the control system changes the optical index of the waveguide between the resonator and the mirror. The main issue consist in the design of the mirror since its reflectivity must be low enough to satisfy $(1 - r) \cdot \tau_c^{-1} \gg \tau_0^{-1}$ and losses must be as low as possible compared to the transmission t^2 . Fig. 9 represents an integrated solution based on a 1-D tapered photonic crystal (PC).

The presence of a single coupling area allows wider contacts and a more efficient electrical injection is expected.

A. Design of the Device

The PC mirror is designed in order to be compatible with 248 nm lithography: 250×400 nm rectangular holes are fabricated in a 900 nm wide Si waveguide with a 650 nm period. To enhance its reflection and reduce the wavelength sensitivity, 2 smaller holes (300 and 450 nm wide) are added to act as a taper [17]. For this particular design, a reflection coefficient r^2 higher than 95% is achieved between wavelengths 1.4 and 1.7 μm .

For a good effective index adaptation at the coupling area and to increase the interaction length, a wider (1.04 μm width) bent (18.75 μm radius) waveguide is positioned below the resonator (Fig. 10), at the maximum of the energy density of the most

3078

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 30, NO. 19, OCTOBER 1, 2012

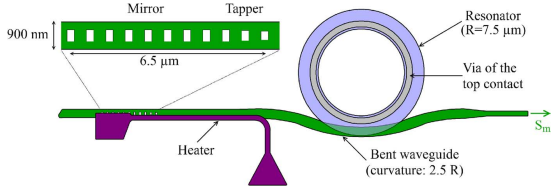


Fig. 10. Top view of the resonator, the waveguide and the heater (GDS datas). Only S_m is connected to an optical coupler for the optical measurements.

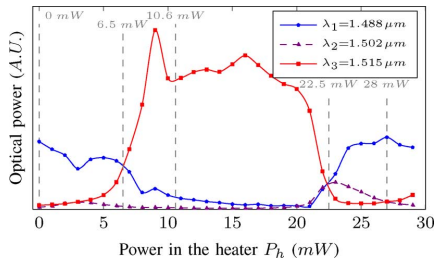


Fig. 11. Optical intensity for the three lasing modes depending on the heating power (for 3.5 V pump pulses and a 2% duty cycle).

confined WGMs. The control of the optical path between the coupling area and the mirror is achieved thanks to a heater.

These devices were fabricated on the same 200 mm SOI wafer as the previously studied resonators since only the shape of the Si waveguides and of the heater differ. Since S_t was not connected to an optical coupler for optical measurements, all experimental results were obtained using the S_m signal, despite its lower optical power.

B. Mode Hopping and Electro-Optical Properties

The following experimental results are obtained with a resonator for which only the waveguide, its heater and the bottom contact shape differs from the previous part.

Fig. 11 is equivalent to Fig. 5 and shows the intensity of the dominating modes as a function of the heating power. As there is no MMI coupler, the intensity of the dominating mode is flatter (6.5 to 22.5 mW for λ_3 for instance). For this particular length of the silicon waveguide ($\sim 12 \mu\text{m}$) between the coupling area and the mirror, only modes λ_1 and λ_3 compete to reach the lasing regime with single mode emission. On another device, with a 45 nm longer Si waveguide ($\Delta\phi$ is theoretically $\pi/3$ -shifted), lasing regime was also obtained with mode λ_2 .

The emitted spectra around $1.50 \mu\text{m}$ for each domain and intermediate regimes of Fig. 11 are given in Fig. 12(b). Multi-mode emission is observed for a heating power of 6.5 mW and 22.5 mW. In the second case, the triple mode emission is the consequence of the particular evolution of mode selection illustrated in Fig. 11 where mode λ_2 is reaching its maximum optical power while modes λ_1 and λ_3 are balanced with the same optical power.

In comparison with the previous device for single mode emission, current thresholds [Fig. 12(a)] are reduced to 2.85 mA (instead of 3.9 mA in Fig. 6) and the power conversion efficiency is 15 times higher due to a better electrical injection (larger bottom

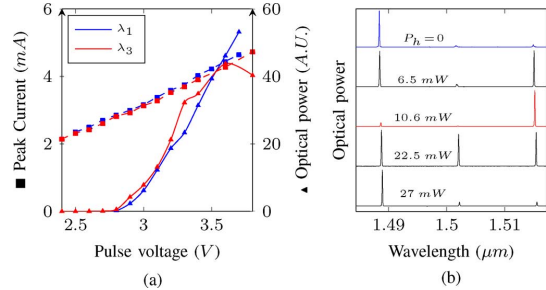


Fig. 12. Electro-optical characteristics and optical spectrum for the same device as in Fig. 11. (a) Electro-optical characteristics of modes λ_1 and λ_3 for 0 and 10.6 mW heating power respectively. (b) Optical spectra for different heating conditions P_h (3.5 V pulses).

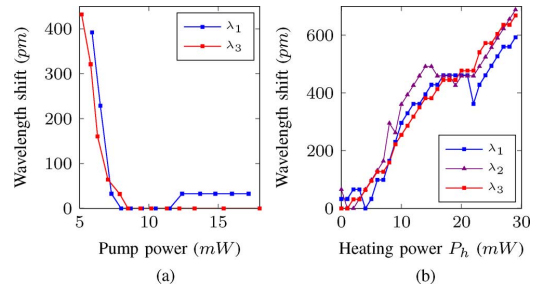


Fig. 13. Red-shifts induced by (a) the pump or (b) the heater. (a) Influence of the pump power [same conditions as in Fig. 12(a)]. (b) Influence of the heater (same conditions as in Fig. 11).

contact) and a higher coupling rate leading to a higher mode selectivity.

Thanks to a better electrical injection, the laser is running at lower electrical power and self heating effects are significantly lower. Here, the lasing wavelength is almost independent from the pump power [Fig. 13(a)] and the maximum observed red-shift correspond to the resolution of our spectrometer (33 pm).

The heater induces a $22 \text{ pm} \cdot \text{mW}^{-1}$ red shift [Fig. 13(b)] that is in the same range as for the microdisk with two coupling areas [Fig. 7(b)].

Last, these measurements demonstrate that the S_m signal can be used to monitor the device (Fig. 2), since its optical power is high enough to characterize the emission. The output signal S_t could not be collected in the present design because no waveguide with its optical coupler was drawn on the initial GDS masks for light collection from this side of the device. It is then clear that considerable improvement in the collection efficiency and control (via the reflectivity magnitude which can be set at will) should be achieved. We are currently working on new designs along this line.

C. Demonstration of A Bi-Mode Laser

To send the same datas to different targets in a WDM circuits and double the bandwidth, one may need a laser emitting on two selected wavelengths at the same time. In this part, we manually set the heating power to balance the energy in two modes. Here, the studied device has a longer Si waveguide between the PC

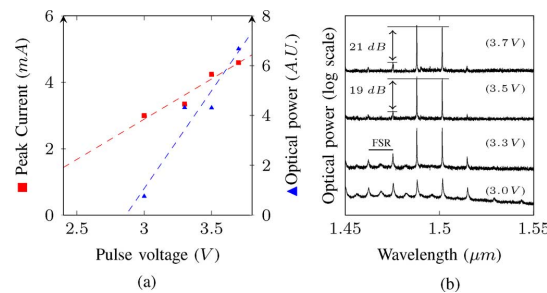


Fig. 14. Double mode emission obtained by a manual tuning of the heating power. (a) Electro-optical characteristics. (b) Corresponding spectra.

mirror and the microdisk: for this reason, phase conditions on $\Delta\phi$ are different from those in the previous section, but the potential lasing wavelengths are the same since the sample was fabricated at the same time resulting in the same disk radius and loss rates. Consequently, for different pump conditions, we balanced the emission over modes λ_1 and λ_2 [Fig. 14(b)].

Results presented in Fig. 14(a) prove that a lasing regime is achieved at room temperature with a maximum SMSR of 21 dB. We also estimate a threshold current around 2.5 mA [Fig. 14(a)] instead of 2.85 mA for single mode emission [Fig. 12(a)].

We assume that this threshold reduction is linked to a better electrical injection for two stationary modes with prime azimuthal order. Indeed, for a stationary single lasing mode there are $2 \cdot m$ directions where spontaneously emitted photons in the QWs are poorly funneled into the selected mode since the most confined WGM have $2 \cdot m$ nodes. In case of two modes distanced by the FSR (leading to prime azimuthal orders), only two directions correspond to a poor electrical injection. Consequently, we assume that the lasing threshold is always lower for dualmode emission and stationary WGMs.

IV. CONCLUSION

An original structure to control laser emission by modulation of its coupling losses is presented and two derived devices are experimentally studied. These very compact lasers with tunable spectral properties are based on microdisk resonators and fabricated on a CMOS pilot line but the theoretical concepts proposed in this article may be applied to different kind of resonators. Both solutions rely on the modulation of the coupling loss rates to select the emitted wavelength(s) using a thermal effect to change the silicon optical index.

We demonstrate that the output power of our microlasers is set by the electrical pumping conditions while their emitted wavelength is independently monitored by a second electrical signal. The control system also contributes in increasing the contrast in term of effective coupling losses between the selected mode and the unwanted ones leading to a lasing threshold reduction. To benefit from a high speed control of the lasing properties and avoid a temperature increase of the laser, the heater can be replaced by well known CMOS compatible technologies based on carrier depletion or injection in Si waveguides.

For the first solution, with a waveguide coupled at two different points, a particular attention must be paid on fabrication since performances may be limited by asymmetrical coupling

constants. Instead, the linearity of the phase shift $\Delta\phi$ helps in controlling the emitted wavelength. Such a device can be easily automatically controlled by a feedback loop since without the MMI coupler, one end of the Si waveguide can be used to control the emission spectrum (using filters and broadband photodiodes), while the second one is used as the single optical output. In this case, half the optical power is wasted to control the emission.

The second solution is more robust to fabrication issues since there is a single coupling area and the reflection in the mirror does not need to be very high. Unfortunately, the control of $\Delta\phi$ is not as linear as for the previous solution. Meanwhile, the design flexibility of photonic crystals may lead to a more accurate design of the mirror with a better response. This is even easier as high reflection is not necessary. A very high coupling efficiency can be achieved for the main output. Its second output (which was used for the experimental measurements), with a low coupling efficiency, can be used to automatically control such a laser and do not waste as much optical power as the first solution.

Mode hopping is demonstrated in both cases since the minimum frequency shift corresponds to the Free Spectral Range of each device. A balanced dual mode emission is obtained each time that two modes are in competition. Tri-mode emission is also achieved thanks to the nonlinear wavelength dependence of the reflectivity phase in the device based on a photonic crystal mirror. These simultaneous multi-wavelength emissions can be fruitfully exploited in WDM optical circuits to transmit data to different targets at the same time. Hopping from one mode to another may also reduce the number of optical sources if the modulation speed of a single laser is high enough to fulfill the required bandwidth of the targeted electro-optical circuit.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Thijs Spuesens for his interesting discussions concerning microdisk lasers.

REFERENCES

- [1] D. Miller, "Device requirements for optical interconnects to silicon chips," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 7, pp. 1166–1185, Jul. 2009.
- [2] L. Vivien, D. Marris-Morini, J. Mangeney, P. Crozat, E. Cassan, S. Laval, J. Fedeli, J. Damlencourt, and Y. Lecunff, "42 GHz waveguide germanium-on-silicon vertical PIN photodetector," in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Group IV Photon.*, 2008, pp. 185–187.
- [3] L. Liao, A. Liu, J. Basak, H. Nguyen, M. Paniccia, D. Rubin, Y. Chetrit, R. Cohen, and N. Izhaky, "40 Gbit/s silicon optical modulator for high-speed applications," *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 22, 2007.
- [4] E. Kyriakis-Bitzaros, N. Haralabidis, M. Lagadas, A. Georgakilas, Y. Moisiadis, and G. Halkias, "Realistic end-to-end simulation of the optoelectronic links and comparison with the electrical interconnections for system-on-chip applications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 19, no. 10, pp. 1532–1542, Oct. 2001.
- [5] J. Van Campenhout, L. Liu, P. Rojo Romeo, D. Van Thourhout, C. Seassal, P. Regreny, L. Di Cioccio, J. Fedeli, and R. Baets, "A compact SOI-integrated multiwavelength laser source based on cascaded InP microdisks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 16, pp. 1345–1347, Aug. 2008.
- [6] F. Mandorlo, P. Rojo Romeo, X. Letartre, R. Orobtcchouk, and P. Viktorovitch, "Compact modulated and tunable microdisk laser using vertical coupling and a feedback loop," *Opt. Exp.*, vol. 18, no. 19, pp. 19612–19625, 2010.
- [7] C. Manolatu, M. Khan, S. Fan, P. Villeneuve, H. Haus, and J. Joannopoulos, "Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, no. 9, pp. 1322–1331, Sep. 2002.

- [8] L. Liu, J. Brouckaert, G. Roelkens, D. Van Thourhout, and R. Baets, "Compact wavelength-selective resonant photodetector based on III-V/silicon-on-insulator heterogeneous integration," in *Proc. Conf. Lasers Electro-Optics*, 2009.
- [9] M. Masi, R. Orobtcouk, G. Fan, J. Fedeli, and L. Pavesi, "Towards a realistic modelling of ultra-compact racetrack resonators," *J. Lightw. Technol.*, vol. 28, no. 22, pp. 3233–3242, Nov. 2010.
- [10] A. Morand, K. Phan-Huy, Y. Desieres, and P. Benech, "Analytical study of the microdisk's resonant modes coupling with a waveguide based on the perturbation theory," *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 827–832, Mar. 2004.
- [11] F. Mandorlo, P. Rojo Romeo, X. Letartre, and P. Viktorovitch, "A simple perturbative analysis for fast design of an electrically pumped micro-disk laser," *Opt. Exp.*, vol. 17, no. 1, pp. 70–79, 2009.
- [12] F. Mandorlo, P. Rojo-Romeo, J. Fedeli, H. MD-Sohrab, and R. Orobtcouk, "Mode density reduction and coupling in microdisk lasers processed on a 200 nm CMOS pilot line," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 17, pp. 1183–1185, 2011.
- [13] L. Grenouillet, A. Bavenove, T. Dupont, and Al, "CMOS compatible contacts and etching for InP-on-silicon active devices," in *Proc. Group IV Photon.*, 2009.
- [14] Q. Xu, S. Manipatruni, B. Schmidt, J. Shakya, and M. Lipson, "12.5 Gbit.s⁻¹ carrier-injection-based silicon micro-ring silicon modulators," *Opt. Exp.*, vol. 15, no. 2, pp. 430–436, 2007.
- [15] J. McCauley, V. Donnelly, M. Vernon, and I. Taha, "Temperature dependence of the near-infrared refractive index of silicon, gallium arsenide, and indium phosphide," *Phys. Rev. B*, vol. 49, no. 11, p. 7408, 1994.
- [16] F. Mandorlo, P. Rojo-Romeo, X. Letartre, J. Fedeli, and P. Viktorovitch, "Improvement of threshold and mode selectivity of a microdisk laser by engineering its coupling to an external passive cavity," in *Proc. 6th IEEE Int. Conf. Group IV Photon.*, 2009, pp. 205–207.
- [17] P. Velha, J. Rodier, P. Lalanne, J. Hugonin, D. Peyrade, E. Picard, T. Charvolin, and E. Hadji, "Ultra-high-reflectivity photonic-bandgap mirrors in a ridge SOI waveguide," *New J. Phys.*, vol. 8, p. 204, 2006.

Fabien Mandorlo was born in 1982. He received the Engineer diploma from the Ecole Centrale de Lyon, Ecully, France, in 2005, and the M.S. degree in electronics from the University of Lyon, Lyon, France, in 2005.

Then, he conducted researches both at CEA-LETI and INL (Lyon Institute of Nanotechnologies). In 2010, he joined the Silicon Photonic team at the Institut d'Electronique Fondamentale (IEF) to work on Si-Ge APD photodiodes for telecom applications. Since 2011, he has been part of the solar energy team of the INL. His research concerns the design, fabrication, and optimization of electrooptical devices. His previous work on heterogeneous integration of III-V based devices in CMOS platforms led to the first microdisk laser emitting at 1.55 μm fabricated on a 200-nm pilot line (European project WADIMOS) with low power, CMOS compatible voltage operation, and wavelength control.

Pedro Rojo Romeo was born in 1958 in Madrid, Spain. He received the Ing. Dipl. degree in physics and Ph.D. degree in electronic devices from the Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Lyon, France, in 1981, and 1984, respectively.

Since 1988, he has been an Associate Professor in electronics with the Institute of Nanotechnologies of Lyon (INL), Ecole Centrale de Lyon, Ecully, France. His primary research interests include electrical and optical devices fabrication technology, characterization of micro-electronic and optoelectronic micro—nanodevices. He is also involved in optical interconnection systems, nanotechnologies, and optical integrated circuits technologies. His recent research areas are focused on: heterogeneous integration of III-V structures on Si-based substrates: development of CMOS compatible III-V nanolasers coupled to Si waveguides; development of novel 2.5-D photonic crystal lasers for guided and free space laser emission; localization of nanostructures on a patterned surface using e-beam lithography techniques: localization of InAs quantum dots on InP for single photon sources, localized growth of III-V nanowires on Si, localization of metal nanostructures for plasmonic applications.

Nicolas Olivier received the Technologic diploma from Saint-Etienne University, Saint-Etienne, France, in 2000.

In 2000, he joined the Commissariat l'Energie Atomique (CEA) Valduc, France, where he worked on fabrication of MegaJoule's laser microtargets. In 2005, he joined the Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information (CEA LETI), Grenoble, France, where he was involved with the MOSEL European project for the fabrication of single-mode 1.3- μm VCSELs. In 2008, he joined the Silicon Photonics Group, where he is currently a specialist in III-V materials. He works on various technological aspects on photonics on CMOS (hybrid laser development). He has been involved in many European projects (HELIOS, WADIMOS, SILVER, and MICROS).

Lydie Ferrier received the Ph.D. degree in micro-nanophotonics from the Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France, in 2008.

For two years, she performed her postdoctoral research on Bose Einstein condensation of polaritons in GaAs microcavities at the Laboratory of Photonics and Nanostructures near Paris. She then joined the Institut des nanotechnologies de Lyon, Lyon, France, as a Postdoctoral Researcher in 2010. Her major interests focus on photonic crystals and nanostructures for integrated photonics and light matter interactions in III-V semiconductors. She is the author and coauthor of ten papers in international journal and approximately 15 international conferences.

Régis Orobtcouk received the Ph.D. degree from the University of Paris XI, Paris, France, in 1996.

Since 1998, he has been with the Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL) Laboratory, INSA de Lyon, Lyon, France, as an Assistant Professor. He is the author and coauthor of 25 papers in international journals, two book contributions, five patents, and 70 international conferences. His major interest is focused on silicon-based photonics for optical interconnect and telecommunication applications. A part of his work is also related to the fabrication of periodic nanostructures by holographic method.

Xavier Letartre received the Ing. Dipl. degree from the Institut Supérieur d'Electronique du Nord, France, in 1987, and the Ph.D. degree in material sciences from the Université des Sciences de Lille, Lille, France, in 1992.

He joined Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), Ecole Centrale de Lyon, Ecully, France, in 1992. He is currently a Research Director with CNRS, Ecole Centrale de Lyon. His areas of interest include physics of optoelectronic devices, photonic crystals and nanostructures for optical devices and circuits.

Jean Marc Fedeli received the Electronics Engineer diploma from INPG Grenoble, Grenoble, France, in 1978.

Then, he conducted research with the CEA-LETI on various magnetic memories and magnetic components as project leader, group leader, and program manager. For two years, he acted as advanced program director in Memscap company for the development of RF-MEMS, then he returned to CEA-LETI in 2002 as coordinator of silicon photonic projects. Under a large partnership with universities and research laboratories, he works on various technological aspects on Photonics on CMOS (Si rib and stripe waveguides, Si₃N₄ and a-Si waveguides), Si modulators, Ge photodetectors, SiOx material, InP sources on Si. His main focus is on the integration of a photonic layer at the metallization level of an electronic circuit. He has been participating on different European FP6 projects (PICMOS, PHOLOGIC, MNTE, ePIXnet). Under the European Project FP7, he is involved in the WADIMOS and PhotonFAB (ePIXfab) projects and managing the HELIOS project.

Pierre Viktorovitch is a Research Director at CNRS. His research activities, have been concerned with silicon microelectronic devices, photovoltaic solar energy conversion devices based on amorphous silicon, III-V compound semiconductor microelectronic devices. His current research interests concern Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems (MOEMS) based on III-V compound Semiconductors, micro-nano-photonics devices (especially based on photonic crystals) and III-V—Silicon/active—passive heterogeneous or hybrid integration. He is the author and coauthor of approximately 150 articles in international journals, 150 publications in international conferences, 70 invited conferences, six book contributions, and eight patents.



Influence of patterning the TCO layer on the series resistance of thin film HIT solar cells

Romain Champory¹, Fabien Mandorlo^{1,a}, Christian Seassal², and Alain Fave¹

¹ Université de Lyon, Institut des Nanotechnologies de Lyon INL – UMR 5270 CNRS, INSA Lyon, 69621 Villeurbanne, France

² École Centrale de Lyon, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex, France

Received: 25 August 2016 / Received in final form: 23 November 2016 / Accepted: 28 November 2016

© R. Champory et al., published by EDP Sciences, 2017

Abstract Thin HIT solar cells combine efficient surface passivation and high open circuit voltage leading to high conversion efficiencies. They require a TCO layer in order to ease carriers transfer to the top surface fingers. This Transparent Conductive Oxide layer induces parasitic absorption in the low wavelength range of the solar spectrum that limits the maximum short circuit current. In case of thin film HIT solar cells, the front surface is patterned in order to increase the effective life time of photons in the active material, and the TCO layer is often deposited with a conformal way leading to additional material on the sidewalls of the patterns. In this article, we propose an alternative scheme with a local etching of both the TCO and the front a-Si:H layers in order to reduce the parasitic absorption. We study how the local resistivity of the TCO evolves as a function of the patterns, and demonstrate how the increase of the series resistance can be compensated in order to increase the conversion efficiency.

1 Introduction

Thin c-Si (mono crystalline silicon) based solar cells are excellent candidates to design light and flexible solar cells requiring a low amount of raw material. Theoretically, their energy conversion efficiencies may reach those of standard cells as long as the thickness of c-Si is at least of the order of 10 μm to 20 μm [1]. An efficient light trapping structure like a photonic crystal is necessary to enhance the absorption in the active material [1–8]. As surface recombinations are much more critical for thin solar cells, the HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) structure is a powerful solution since it currently allows the best conversion efficiency with a c-Si absorber [9]. However, when collectors of minority carriers are located on both sides of the absorber, it is then necessary to add a TCO (Transparent Conductive Oxide) layer to collect carriers into the nearest metal finger. This layer also acts as an anti-reflective coating (ARC), and generally induces parasitic absorption at low wavelengths [5]. Optical simulations demonstrated that the total optical losses in the front a-Si:H and the TCO layers can correspond to a short circuit current density (J_{sc}) decrease up to 5 mA cm^{-2} for a thin film HIT solar cell [10] or up to 9.3% for a 1 μm thick micro crystalline solar cell [8]. The material used

to make the heterojunction itself can lead to additional absorption losses, including when it is made of a-Si:H [5].

Patterning a standard vertical HIT structure by a photonic crystal (PC) is an efficient strategy to strongly increase the photonic current with thin absorbers [2, 3, 5, 6]. However, instead of using conformal TCO and collector layers on top of the PC (Fig. 1a), we propose to pattern these two layers. A passivation step is necessary to protect the surface of the photonic crystal (blue element in Fig. 1b). Then, parasitic absorption can be reduced leading to a higher short circuit current [8]. For an ultrathin solar cell (1 μm thick), such an alternative geometry drops down the parasitic absorption from 9.3% to 2.6%, leading to a 8.1% increase of the absorption in the active material [8]. However, the contribution of the series resistance corresponding to the travel of carriers towards the metallic fingers in the TCO also increases.

In this article, we investigate the influence of TCO patterning on the series resistance to quantify how much the overall efficiency of new generation solar cells with a front PC is impacted. First, we will theoretically investigate the influence of TCO patterning on the local series resistance which will be used to calculate its impact on a standard solar cell (156 \times 156 mm^2 for instance). We will study how the photonic crystal orientation affects the electro-optical performances of the device. Last, we describe geometries for which the electrical losses could be neglected compared

^a e-mail: fabien.mandorlo@insa-lyon.fr

2

R. Champory et al.: EPJ Photovoltaics 8, 80101 (2017)

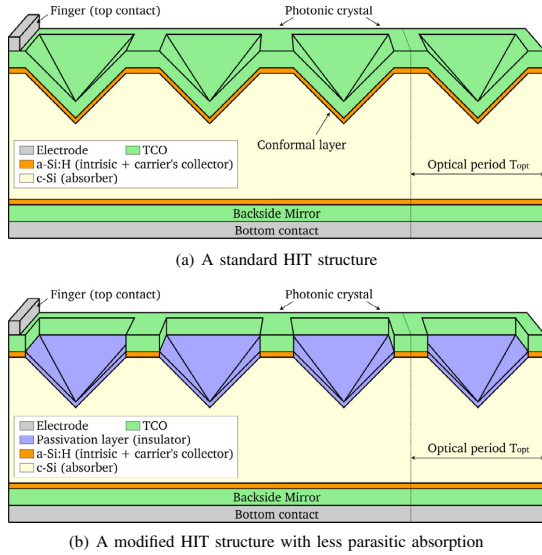


Fig. 1. HIT thin film solar cells with a top photonic crystal (inverted pyramids).

to the absorption increase in the active material, in order to increase the conversion efficiency.

2 Study of the local sheet resistance

2.1 Definition of the electric period

Figure 2 represents top views of two different solar cells patterned by a square lattice of cylinders holes, with a period T_{opt} . The optical elementary pattern is delimited by dash lines, and its main directions can be aligned (a) or not (b) with the metallic finger. Considering that the cell is infinite in the direction of finger, the minority carriers generated under the PC then join electrodes by the shortest path and encounter a periodic pattern (blue squares in Fig. 2) towards the finger. The period of the electric pattern T_{el} can be identical with the optical one in case (a) and 45 degrees shifted in case (b) leading to $T_{el} = \sqrt{2} \cdot T_{opt}$.

2.2 Behavior of the local sheet resistance

The objective is to mimic nanopatterns like inverted nanopyramids (fabricated by wet etching [1, 5, 11]) and cylindrical nanoholes (obtained by dry etching [4, 5, 11, 12]), covered by a partial TCO layer.

Figure 3 represents the electric periodic elements for a PC made of a square lattice of squares, rounds and diamonds with a top finger aligned (a) or not (b) with the PC directions. All these patterns were simulated using the 2D Silvaco ATLAS module [13].

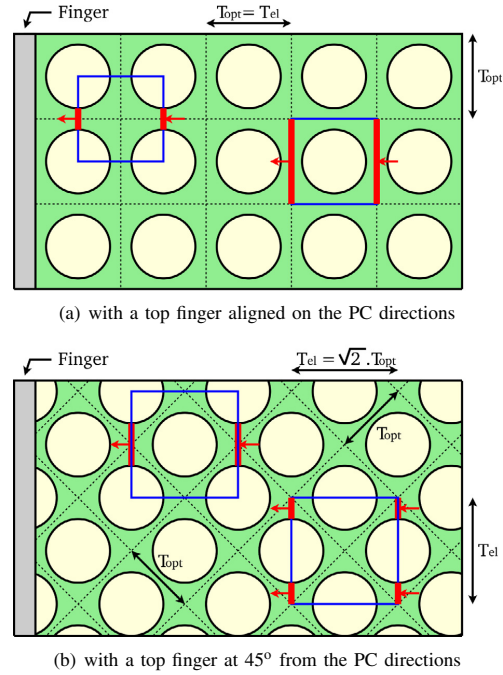


Fig. 2. Top view of a square lattice of round holes in the TCO. Blue squares represent the electric periodic pattern and red arrows represent the current flows in direction to the metallic finger.

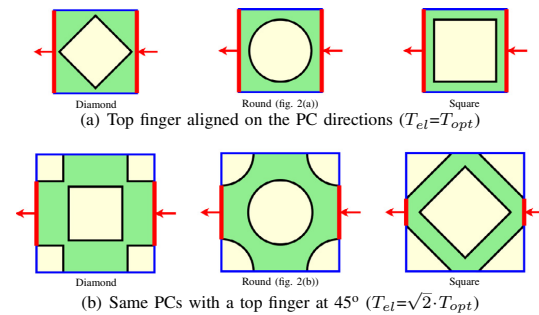


Fig. 3. On scale elementary electrical patterns for a square PC.

The conductivity of the TCO layer (including if necessary the top carrier collector) induces an elementary sheet resistance R_{PC} for these lateral current flows. The relative increase of this resistance compared to that one of the unpatterned solution R_0 will be called the degradation ratio $r = R_{PC}/R_0$. By considering a scale factor k , both resistances R_{PC} and R_0 are proportional to $\rho_0 \cdot k^{-1}$ where ρ_0 is the resistivity of the patterned material. Consequently, r depends neither on ρ_0 nor on the size of the square pattern T_{el} . For our study, we assume that the TCO layer

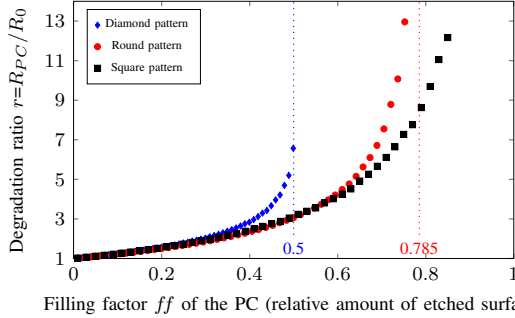


Fig. 4. Degradation ratio of the lateral resistance of the TCO layer for different patterns (patterns are simulated with T_{el} equal to 500 nm).

has a constant resistivity even if the transport mechanisms can be more complicated and linked to the presence of traps and tunneling effects at the boundary of its grains in case of ITO [14, 15]. In this particular material, if the minimum dimension of the elementary sheet resistance is in the range of its grain size the degradation ratio r could be over-estimated since the crystal mobility is higher than that one of the polycrystalline ITO [14]. Since optimal values of T_{opt} are larger than 500 nm and $T_{opt} \leq T_{el}$, only high values of ff (relative amount of etched TCO Layer) may be impacted, assuming that the grain size is in the same range as the TCO thickness (typ. 60–80 nm) [1, 4, 5, 11, 12].

Figure 4 shows the impact of the filling factor ff on the degradation ratio r . These simulations showed that it was not influenced by the orientation of the PC since we had exactly the same results (Fig. 4) for both structures in Figures 3a and 3b, even if the electric period T_{el} is different. Actually, this degradation ratio only depends on the filling factor ff of the pattern.

The results show that for a low ff , the impact of the shape is limited, since the degradation is similar in all three cases ($ff < 0.3$). The difference between round patterns or square ones remains limited for ff smaller than 0.5. For PCs requiring a high ff (typ. >0.6), it is preferable to use a square pattern rather than a round one to minimize R_{PC} .

2.3 Experimental determination of the degradation ratio

In order to confirm the dependance of r with ff , we performed various samples made of a thin patterned Al layer (fabricated thickness 100 nm) on a resistive c-Si substrate, deposited by a lift off process. To ensure compatibility with our LASER lithography setup (Heidelberg μ PG101) in terms of precision, the period T_{el} is increased up to 50 μ m. Last, thicker metallic pads (200 nm) are locally deposited to collect current (Fig. 5) and we apply the Transmission Line Method (TLM) to measure the patterned layer's resistance. For the sake of technological

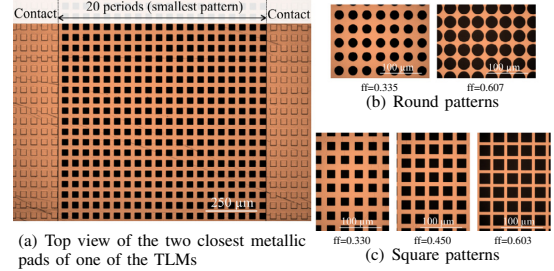


Fig. 5. Microscope views of the fabricated TLMs with different patterns and T_{el} equal to 50 μ m. Scales for pictures in (b) and (c) are the same.

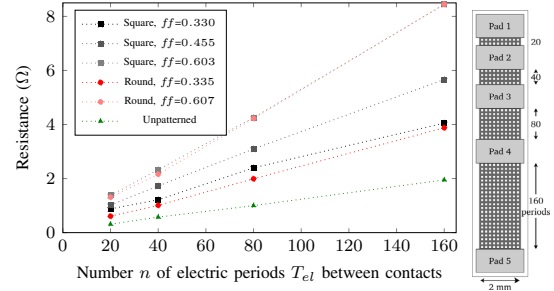


Fig. 6. TLM measurements on patterned Al layers with a pattern aligned with the metallic pads.

Table 1. Degradation ratio obtained experimentally with a 100 nm thick Al layer. The theoretical values are calculated using the measured filling factor.

Shape of the pattern	Filling factor ff		Degradation ratio r	
	Measured	Expected	Experiment	Simulation
Square	0.330	0.360	1.99	2.08
	0.455	0.500	2.85	2.80
	0.603	0.640	4.35	4.17
Round	0.335	0.360	2.03	2.00
	0.607	0.640	4.43	4.43

simplicity, we have chosen Aluminum since it is compatible with a lift-off process.

Using a four probe measurement setup to limit the influence of the contact resistivity, we can plot Figure 6 for different filling factors ff and shapes of the holes.

All the TLM devices were made identically, on the same substrate with a controlled number of periods n between each pads, and same width W , except for the shape of the elementary pattern and its ff . As a consequence, the metal thickness t_0 is the same for all the characterized devices and $n_W = W/T_{el}$ patterns are present in parallel.

Slopes in Figure 6b can be used to extract the resistance of the elementary pattern since it is equal to R_{PC}/n_W for the patterned TLMs and R_0/n_W for the unpatterned one. Consequently, their ratio corresponds to the measured degradation ratio $r = R_{PC}/R_0$ (Tab. 1).

4

R. Champory et al.: EPJ Photovoltaics 8, 80101 (2017)

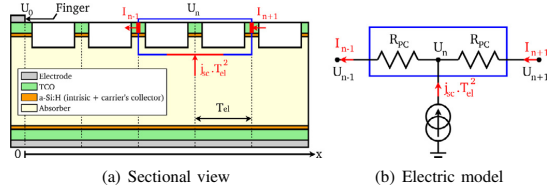


Fig. 7. Sectional view of the patterned HIT solar cell.

In order to provide an accurate estimation of r , we measured the average size of the patterns with SEM observations and we interpolated data from Figure 4. Table 1 shows a very good agreement between the expected and experimental degradation ratios r with a maximum difference of 5%.

3 Impact of the patterns: from the local resistance to the series resistance of a large solar cell

In this part, we calculate the potential at the TCO surface and then deduce from the distance p between two metallic fingers the front side series resistance of a large solar cell.

3.1 TCO layer modeling with a resistance array

Figure 7 represents a HIT solar cell with a top surface photonic crystal. Every elementary electrical pattern produces a small photogenerated current $j_{sc} \cdot T_{el}^2$. In between each pattern, the lateral resistance corresponds to R_{PC} , as described in the electrical circuit of Figure 7b.

Around node n of the resistance array, the application of the Kirchhoff's current law states:

$$\frac{U_n - U_{n-1}}{R_{PC}} = \frac{U_{n+1} - U_n}{R_{PC}} + j_{sc} \cdot T_{el}^2. \quad (1)$$

At position N , the node position is assumed to be located just in between two fingers, so that only half the current produced by an elementary pattern contributes to the ohm law:

$$U_{N-1} - U_N = -\frac{1}{2} \cdot j_{sc} \cdot R_{PC} \cdot T_{el}^2. \quad (2)$$

At the finger, when the solar cell is short circuited, current I_0 is equal to the sum of the photogenerated current $j_{sc} \cdot T_{el}^2 \cdot (N - 1/2)$, so the ohm law leads to the following initial condition:

$$U_0 - U_1 = -j_{sc} \cdot R_{PC} \cdot T_{el}^2 \cdot \left(N - \frac{1}{2}\right). \quad (3)$$

Then, the solution of equations (1)–(3) with an arbitrary finger potential U_0 is:

$$\forall n \in [0, N], \quad U_0 - U_n = j_{sc} \cdot R_{PC} \cdot T_{el}^2 \cdot \frac{N^2 - (n - N)^2}{2}. \quad (4)$$

This equation gives the potential at the TCO surface between two fingers when the solar cell is short circuited.

3.2 Expression of the series resistance

Thanks to the surface potential U_n , one can calculate the total dissipated power P_J by Joule effect in the entire patterned TCO layer:

$$P_J = \frac{1}{R_{PC}} \cdot \sum_{n=1}^N (U_n - U_{n-1})^2. \quad (5)$$

This equation leads to:

$$P_J = \frac{j_{sc}^2 \cdot T_{el}^4 \cdot N^2 \cdot R_{PC}}{3} \cdot \left(N - \frac{1}{4 \cdot N}\right). \quad (6)$$

Let's introduce the series resistance R_S^1 for a single strip of resistances so that it dissipates P_J when delivering the total photogenerated current I_0 . This resistance depends on the orientation of the PC since the width of the strip is linked to T_{el} . Then,

$$P_J = R_S^1 \cdot \left(j_{sc} \cdot T_{el}^2 \cdot \left(N - \frac{1}{2}\right)\right)^2. \quad (7)$$

Then, assuming $N \gg 1$, we get:

$$R_S^1 = \frac{R_{PC}}{3} \cdot \frac{2 \cdot N^2 + N}{2 \cdot N - 1} \approx N \cdot \frac{R_{PC}}{3}. \quad (8)$$

One may notice that this elementary resistance R_S is different from the sheet resistance (equal to $N \cdot R_{PC}$) of the same patterned layer. Indeed, the current sources are regularly spread on the length of the layer, instead of being applied on two opposite cross sections.

If we neglect the influence of the bus bars connecting each fingers, a solar cell with a surface S contains $S/(N \cdot T_{el}^2)$ elementary stripes in parallel with an elementary series resistance R_S^1 . The length of these stripes is also equal to half the pitch $p/2 = N \cdot T_{el}$. As a result, the series resistance R_S of such a solar cell is given by:

$$R_S = \frac{R_{PC} \cdot p^2}{12 \cdot S} = \frac{r \cdot R_0 \cdot p^2}{12 \cdot S}. \quad (9)$$

In case the lateral conduction is achieved in a single layer of resistivity ρ_0 and thickness t_0 (like a TCO), this last equation is also equal to:

$$R_S = \frac{r \cdot \rho_0 \cdot p^2}{12 \cdot t_0 \cdot S} \text{ with } R_0 = \frac{\rho_0}{t_0}, \quad (10)$$

since the sheet resistance R_0 is also equal to ρ_0/t_0 for a square pattern with width and length equal to T_{el} .

From equations (9) or (10), the additional front series resistance is proportional to both the square of the pitch p and the perturbation of the local series resistance r . It is worth to notice that it does not depend on the orientation of the photonic crystal (Fig. 2), even if the electric period T_{el} may vary.

4 Degradation of the conversion efficiency of a large solar cell

Simulating a solar cell patterned by a PC to study the influence of the pattern on the series resistance is unfortunately not possible, since it would be necessary to simulate thousands of periods of the PC, which would require too much memory and computation time (even for a 2D simulation). However, equation (10) can be exploited to get the I - V curve of a realistic solar cell, and so its conversion efficiency, with the simulation of a single period of the PC and its “local” electric characteristic.

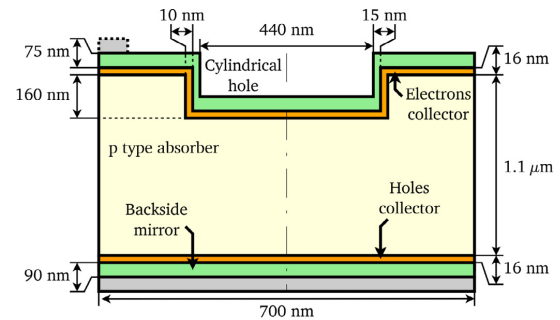
4.1 Estimation of the J_{sc} gain

From [11], cylindrical holes lead to a significantly lower ff than reverse pyramids, and so to a lower degradation ratio r (Fig. 4). For this reason, we focus on cylindrical nanoholes optimized by 3D FDTD (Finite Difference Time Domain) simulations. As the parasitic absorption occurs in the short wavelengths, we consider an ultra thin HIT solar cell ($1.1 \mu\text{m}$) to maximize its photogeneration rate in the active layer. In order to get a more realistic estimation of the J_{sc} gain than in [8], we also take into account the a-Si:H layers dispersion characteristics.

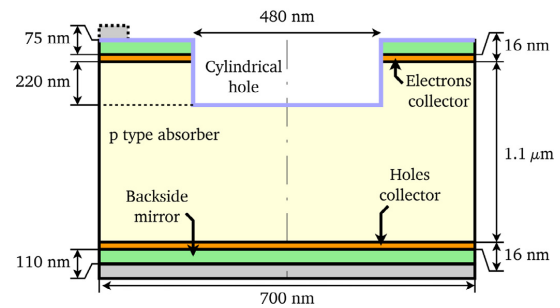
When all the top surface is covered by the TCO and a-Si:H layers (Fig. 8a), the thickness of these layers on the sidewalls is proportional to the thickness on the front and bottom surfaces of the pattern with a ratio extracted from experimental observations [5]. When patterning both the TCO and a-Si:H layers (Fig. 8b), the passivation layer is not taken into account since it does not absorb light and its thickness ($\leq 10 \text{ nm}$) can be neglected compared to the considered wavelength range. The optimization is applied on the thickness of the top and bottom a-Si:H and TCO layers and on the geometry of the pattern (period, size and depth). The optimal configurations correspond to Figure 8. Whatever the patterning is, the convergence is reached for the same period (700 nm), but the backside mirror is slightly thicker in case of patterned TCO and a-Si:H layers. For both structures, the diameter of the hole in the c-Si layer is quite similar: 490 nm and 480 nm , respectively. The optimized filling factor is equal to 0.37 , leading to $r \approx 2.15$ from Figure 4.

The photonic current densities calculated in each layer (Tab. 2) demonstrate that all the photons that are not absorbed in the front TCO and a-Si:H layers are efficiently collected by the active layer. Indeed, the absorption in these two top layers is reduced by $0.3+0.8 = 1.1 \text{ mA cm}^{-2}$: this value matches the increase of the absorption in the c-Si absorber.

As a consequence, for cylindrical holes, even taking into account the presence of the a-Si:H layers that are more absorbing than the c-Si layer, we can still expect a current density gain higher than 1 mA cm^{-2} thanks to a lower parasitic absorption in the blue range of the solar spectrum.



(a) Without TCO (ITO) and a-Si:H patterning



(b) With TCO (ITO) and a-Si:H patterning.

Fig. 8. Description of the two optimized structures by 3D FDTD and genetic algorithm for a $1.1 \mu\text{m}$ thick HIT solar cell (same legend as Fig. 1).

Table 2. Photonic current densities calculated by integration of the absorbed photons in each layer (mA cm^{-2}).

	Layer	Front TCO and a-Si:H layers	
		Not patterned (Fig. 8a)	Patterned (Fig. 8b)
Top	ITO	2.0	1.7
	a-Si:H	3.5	2.7
	c-Si (absorber)	17.5	18.6
Bottom	a-Si:H	2.0	2.0
	ITO	2.5	2.3
	Metal	5.0	4.6

4.2 Estimation of the conversion efficiency losses in a large solar cell

In order not to depend on the geometry of the PC, we will consider an ideal solar cell ruled by its open circuit voltage V_{oc} , its short circuit current I_{sc} and its ideality factor n . As the series resistance R_S does not influence both V_{oc} and I_{sc} for any solar cell, the following parts will focus on the conversion efficiency. Then, at first approximation, the current I and the voltage V of such a solar

Table 3. Parameters of an ideal efficient solar cell with a top TCO layer.

	Parameter	Value	Unit
Solar cell	Open circuit voltage V_{oc}	0.750	V
	Short circuit current I_{sc}	4.02	A
	Ideality factor	1.15	–
	(to match the conversion efficiency)		
	Surface S	101.8	cm ²
TCO	Temperature T	25	°C
	Thickness t_0	75	nm
	Resistivity ρ_0	540	$\mu\Omega$ cm

cell at temperature T are linked by;

$$I = I_{sc} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot \frac{q \cdot (V - R_S \cdot I)}{n \cdot k_B \cdot T} - 1}{\frac{q \cdot V_{oc}}{e \cdot n \cdot k_B \cdot T} - 1} \right) \quad (11)$$

derived from:

$$I = I_{sc} - I_{dark} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V - R_S \cdot I)}{n \cdot k_B \cdot T}} - 1 \right) \quad (12)$$

where the dark current I_{dark} has been expressed as a function of V_{oc} since it corresponds to $I = 0$.

Equation (11) can be used to express the voltage V as a function of the current I , and so, the available electric power P :

$$P = \frac{n \cdot k_B \cdot T \cdot I}{q} \cdot \ln \left(\left(1 - \frac{I}{I_{sc}} \right) \cdot e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot k_B \cdot T}} + \frac{I}{I_{sc}} \right) - R_S \cdot I^2. \quad (13)$$

Then, the maximum conversion efficiency η of this ideal solar cell with a serial resistance R_S can be found from this last expression by calculating the maximum of $P(I)$.

In order to maximize the influence of R_S , we will consider an efficient solar cell with a V_{oc} , j_{sc} close to the actual record for a HIT structure [16], with the same conversion efficiency $\eta_0 = 24.7\%$. We assume that a 75 nm thick ITO layer is responsible for the front series resistance increase. Finally, all the parameters are summed up in Table 3.

Figure 9 represents the degradation of the conversion efficiency η of this ideal solar cell as a function of the pitch p between the fingers and the degradation ratio r with the same vertical axis as for Figure 4. The cases where $r = 1$ describe the evolution of the conversion efficiency for a TCO covering all the pattern (Fig. 1a). When $r > 1$, the solar cell looks like Figure 1b with partial TCO and a-Si:H layers. White contour lines obtained thanks to equations (9) show that for a given degradation ratio r , the conversion efficiency of the solar cell with a patterned TCO is the same as for the un-patterned one if both the pitch p and the width of the fingers (same optical shading) are divided by \sqrt{r} . Consequently, patterning the TCO layer can be compensated by reducing the distance between two

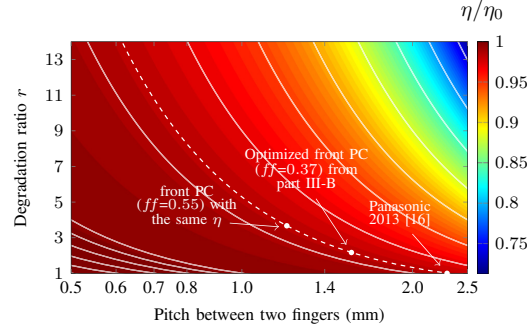


Fig. 9. Relative degradation of the conversion efficiency for an ideal efficient solar cell (see Tab. 3). Only the front series resistance is taken into account to calculate the conversion efficiency degradation. White lines are contour levels.

fingers to prevent the increase of the series resistance. Reducing the fingers width with the same ratio \sqrt{r} would avoid extra shadowing, so parasitic absorption in the top metal layer would stay unchanged. Furthermore, by also scaling their width, Joule losses along the fingers are unchanged, with no additional electrical losses. Then, the solution presented in Figure 1b can be used to reduce the parasitic absorption in the TCO, and, under the condition that a smaller pitch with thinner fingers can be achieved, its conversion efficiency can be higher than for a solar cell like Figure 1a.

For instance, if we consider that a PC patterned thin film solar cell can reach the same performance as the Panasonic reference (pitch estimated at 2.3 mm) [16], then a filling factor of 0.55 (pessimistic value since the previous part shows that it could be as low as 0.37) leads to a degradation ratio $r \approx 3.6$ (Fig. 4). Consequently, the minimum pitch is 1.2 mm for an ITO layer with a resistivity of 540 $\mu\Omega$ cm. The width of the fingers should also be divided by a factor ≈ 1.9 to keep the same shadowing and series resistance contribution of the electrical fingers. According to the International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), it is expected that this 50% decrease of the fingers' width is reached in 10 years, passing from 45 to 22.5 μm [17].

On the other hand, if technological considerations lead to constraints in terms of fingers width and periodicity, one can define a threshold value of the pitch p_{th} for which the increase of the photogeneration is balanced by the increase of the series resistance in the TCO. This particular point depends on the solar cell itself (more particularly its J_{sc}). The main consequence is that our structure can be more efficient if $p < p_{th}$. For instance, using the extreme example used for Figure 9 with a pitch of 1.5 mm (instead of 1.2 mm) for a PC with a ff equal to 0.55 induces a relative 2.4% conversion efficiency loss. In that case, the benefit of a 1 mA cm⁻² current density increase would be compensated by the increase of the electrical losses, so the pitch should be chosen between 1.2 and 1.5 mm to increase the solar cell conversion efficiency. However,

the previous part suggests that the optimal ff of the PC could be lower than 0.55, requiring a scale factor $\sqrt{r} \approx 1.4$: a 32% reduction of the pitch and finger's width is enough to ensure that no impact on the series resistance is introduced. Consequently, it should be possible to pattern the TCO so that the optical gain corresponds to a minimum $+1 \text{ mA cm}^{-2}$ increase of J_{sc} . Then, our solution is still more interesting even if the pitch is not as low as possible.

Last, one may notice that for thin film HIT solar cells with a thinner c-Si absorber, the short circuit current is actually limited to lower values that reduce the impact of the series resistance, leading to less constraint on the pitch and the width of the fingers.

4.3 Influence of the pattern' shape

Reference [11] demonstrates that for reverse pyramids, the filling factor ff must be around 0.9 to maximize the photon current density in the active material. From Figure 4 and Table A.1, this condition typically corresponds to $r \approx 19$. On the contrary, with a pattern of cylinder holes, the optimal ff is in the range 0.3–0.6, leading to smaller degradation ratio (typ. $r < 4.3$). Using Figure 9, we can deduce that for cylinder holes, the ideal pitch and width of the fingers is closer to the industrial standard processes.

The contour lines of Figure 9 and the relation between filling factor and the degradation ratio (Fig. 4) can be used as an abacus to directly obtain the pitch of the patterned TCO solar cell with the same series resistance. In that case, using equations (9) or (10) and a the simulation of a single period of the photonic crystal, the additional series resistance to be taken into account to convert a local I - V curve into that one of a large device can be calculated. Then, the conversion efficiency of the large solar cell can be calculated.

5 Conclusion

We report on the increase of the series resistance in thin HIT solar cells when patterning the front TCO layer. We demonstrate that this degradation of the electric properties only depends on the shape and filling factor of the pattern, and not its orientation towards the position of the electric fingers.

We also explain that a single local simulation can be used to calculate the series resistance of a large solar cell, and its conversion efficiency, even taking into account the patterning of the TCO layer.

Last, we demonstrate that the increase of the series resistance can be compensated by lowering the distance between fingers and their width. Then, for a HIT solar cell with a periodic photonic crystal, the increase of the absorption in the active material thanks to the reduction of the parasitic absorption can be completely used to increase the conversion efficiency. The only limitation is the capacity to reduce the finger's width to prevent the increase of optical shadowing. Consequently, the lower parasitic absorption in the TCO layer of a thin HIT solar cell

Table A.1. Coefficient to approximate $r^{-1}(ff)$ with a maximum relative difference of 5% compared to the simulations (Fig. 4).

Pattern	Diamond	Round	Square
ff range	[0, 0.489]	[0, 0.754]	[0, 0.949]
r range	[1, 4.977]	[1, 12.62]	[1, 42.27]
a_3	3.2866	-1.0560	-0.6656
a_2	2.9322	1.8109	1.7028
a_1	-2.2921	-1.9870	-2.0389
a_0	1.0049	1.0006	0.9938

with a patterned TCO layer can increase the conversion efficiency at the cost of a different front contact design. A gain on the short circuit current density up to 1 mA cm^{-2} is expected.

This work was supported by the project FP7-PhotonVoltaics (Grant No. 309127). The authors would like to thank the Nanolyon technological platform at INL where samples were processed and Nicolas Terrier and Céline Chevalier for their help on the Laser lithography technique.

Appendix

In order to ease the estimation of the overall performance of a large solar cell from a local simulation, we propose to interpolate r^{-1} with a polynomial expression of the filling factor ff :

$$r^{-1}(ff) = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot ff^i. \quad (\text{A.1})$$

Then, using the coefficients in Table A.1, one may easily assess the degradation of diamond, round and square patterns in the TCO layer (Fig. 4).



Romain CHAMPORY was born in 1991. He received his engineer diploma from Institut National Polytechnique de Grenoble – PHELM (Physics, Electronics, Materials), Grenoble, France in 2013. After an internship at CEA-INES, he joined at the end of 2013 the photovoltaic team at Lyon Institute of Nanotechnologies (INL) to start his Ph.D. on thin-film monocrystalline silicon solar cells.



Fabien MANDORLO was born in 1982. He received his engineer diploma from the École Centrale de Lyon, Ecully, France in 2005, and the same year his M.S. degree in electronics from the University of Lyon. Then, he conducted researches both at CEA-LETI and INL (Lyon Institute of Nanotechnologies). In 2010, he joined the Silicon Photonic team at the Institut d'Electronique Fondamentale (IEF) to work on Si-Ge APD photodiodes for telecom applications. Since 2011, he is part of the photovoltaic team of the INL.



Christian SEASSAL is Senior Researcher at CNRS. He graduated from INSA de Lyon (1993) and received his Ph.D. from École Centrale de Lyon in 1997. His research activities concern photonic nanostructures and their applications for integrated photonics and solar photovoltaics, and he is Deputy Director of the Lyon Institute of Nanotechnology (INL). He has authored and co-authored about 110 research papers in international journals, and of over 50 invited conferences. He is member of the Optical Society (OSA), the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) and the International Society for Photonics and Optics (SPIE). He is deputy editor of the OSA Optics Express Journal. He received the French CNRS bronze medal in 2002.



Alain FAVE is Associate Professor at INSA-Lyon. He graduated at INSA-Lyon as Material Sciences Engineer. He received his Ph.D. in 1996 from INSA-Lyon about III-V Solar cells. After a research fellowship on GaN MBE growth at ETL (Tsukuba, Japan), he joined the Photovoltaic group of INL. His research activities mainly concern Silicon epitaxy and related technologies for thin film solar cells. More recently, he is involved in projects concerning III-V/Si tandem solar cells.

References

1. A. Mavrokefalos, S.E. Han, S. Yerci, M.S. Branham, G. Chen, *Nano Lett.* **12**, 2792 (2012)
2. J.M. Gee, in *Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE* (IEEE, 2002), pp. 150–153
3. P. Bermel, C. Luo, L. Zeng, L.C. Kimerling, J.D. Joannopoulos, *Opt. Exp.* **15**, 16986 (2007)
4. X. Meng, V. Depauw, G. Gomard, O. El Daif, C. Trompoukis, E. Drouard, C. Jamois, A. Fave, F. Dross, I. Gordon et al., *Opt. Exp.* **20**, A465 (2012)
5. C. Trompoukis, I. Abdo, R. Cariou, I. Cosme, W. Chen, O. Deparis, A. Dmitriev, E. Drouard, M. Foldyna, E.G. Caurel et al., *Physica Status Solidi A* **212**, 140 (2015)
6. M.S. Branham, W.C. Hsu, S. Yerci, J. Loomis, S.V. Boriskina, B.R. Hoard, S.E. Han, G. Chen, *Adv. Mater.* **27**, 2182 (2015)
7. K. Ishizaki, M. De Zoysa, Y. Tanaka, T. Umeda, Y. Kawamoto, S. Noda, *Opt. Exp.* **23**, A1040 (2015)
8. N.A. Yahaya, N. Yamada, Y. Kotaki, T. Nakayama, *Opt. Exp.* **21**, 5924 (2013)
9. K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara et al., *Photovoltaics IEEE J.* **4**, 1433 (2014)
10. R. Champory, F. Mandorlo, L. Lalouat, P. Harouri, A. Roca I Cabarrocas, R. Orobtcchouk, A. Fave, E. Fourmond, C. Seassal, Reduction of parasitic absorption in ITO for ultra-thin film c-Si solar cell, in *6th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics* (Silicon PV, 2016)
11. V. Depauw, C. Trompoukis, O. El Daif, L. Lalouat, H. Ding, J. Liu, A. Harouri, R. Orobtcchouk, F. Mandorlo, A. Fave et al., When nanophotonics meet thin crystalline-silicon photovoltaics, in *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference-EUPVSEC* (2015)
12. V. Depauw, X. Meng, O. El Daif, G. Gomard, L. Lalouat, E. Drouard, C. Trompoukis, A. Fave, C. Seassal, I. Gordon, *Photovoltaics IEEE J.* **4**, 215 (2014)
13. *ATLAS User's Manual, Device Simulation Software*, SILVACO International, Santa Clara (2015)
14. K. Ellmer, R. Mientus, *Thin solid films* **516**, 4620 (2008)
15. K. Ellmer, R. Mientus, *Thin Solid Films* **516**, 5829 (2008)
16. M. Taguchi, A. Yano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, T. Nishiwaki, K. Fujita, E. Maruyama, *Photovoltaics IEEE J.* **4**, 96 (2014)
17. International technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2015 Results v.2, SEMI Europe, Berlin, Germany (2016), p. 26

Cite this article as: Romain Champory, Fabien Mandorlo, Christian Seassal, Alain Fave, Influence of patterning the TCO layer on the series resistance of thin film HIT solar cells, *EPJ Photovoltaics* **8**, 80101 (2017).



Temperature and color management of silicon solar cells for building integrated photovoltaic

Mohamed Amara¹, Fabien Mandorlo^{2,*}, Romain Couderc¹, Félix Gérenton², and Mustapha Lemiti²

¹ Univ Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR5008, 69621 Villeurbanne, France

² Université de Lyon, Institut des Nanotechnologies de Lyon INL – UMR5270 CNRS INSA Lyon, 69621 Villeurbanne, France

Received: 27 March 2017 / Received in final form: 12 July 2017 / Accepted: 7 September 2017

Abstract. Color management of integrated photovoltaics must meet two criteria of performance: provide maximum conversion efficiency and allow getting the chosen colors with an appropriate brightness, more particularly when using side by side solar cells of different colors. As the cooling conditions are not necessarily optimal, we need to take into account the influence of the heat transfer and temperature. In this article, we focus on the color space and brightness achieved by varying the antireflective properties of flat silicon solar cells. We demonstrate that taking into account the thermal effects allows freely choosing the color and adapting the brightness with a small impact on the conversion efficiency, except for dark blue solar cells. This behavior is especially true when heat exchange by convection is low. Our optical simulations show that the perceived color, for single layer ARC, is not varying with the position of the observer, whatever the chosen color. The use of a double layer ARC adds flexibility to tune the wanted color since the color space is greatly increased in the green and yellow directions. Last, choosing the accurate material allows both bright colors and high conversion efficiency at the same time.

Keywords: CIE 1931 color space / BIPV / thermal management / operating temperature / ARC / conversion efficiency / silicon solar cell

1 Introduction

Building integrated photovoltaics (BIPV) [1] is one of the solutions to support and develop renewable and non-polluting energy. As a rule, performances of solar panels depend on the material quality and solar cells architecture, but also on cell temperature condition since high temperature degrades the conversion efficiency [2]. Nowadays, under the present conditions, the BIPV are not favorable to the cooling of solar cells. In addition, the esthetics of the PV panels must also be taken into account, including their color related to the urban environment.

In order to determine the cell or module operating temperature, it is possible to use experimental correlation such as those listed and discussed in the review of Skoplaki and Palyvos [3] and Kurnik et al. [4]. Even if these correlations calculate the module temperature as function of environmental conditions, they do not make it possible to link the thermal equilibrium as a function of the cells characteristics, in particular the anti-reflective layers. Moreover, the optimization of solar cells is done at

standard test conditions (STC, 25 °C) which ignores the actual temperature of the cell. It is necessary to use a thermal model in addition to the electro-optical ones to take into account heat exchange in order to calculate the operating temperature.

To adjust the perceived color of a solar cell observed outside a building, we can control the reflection on its top surface, and so adjust the thickness of the anti-reflective coating (ARC) layers [5]. Such a solution is both easy and flexible since we only need to control the duration of a deposited layer. However, we have to balance between the brightness/contrast of the reflected light, and the number of photons producing the electrons and holes. Indeed, maximizing the short circuit current J_{sc} , which corresponds to the number of carriers that are photogenerated and collected in electrodes, is a simple way to optimize the conversion efficiency at STC [6–9] for which the solar cell is cooled at the ambient temperature 25 °C, with no heat transfer. In real configurations, thermal conditions and solar irradiation are major varying factors that strongly affect the conversion efficiency of photovoltaic cells. As a consequence, thermal effects are likely to be required for the optimization analysis of ARC layers of PV cells. It is clear from this observation that the obvious criterion is the maximization of the electrical conversion efficiency.

* e-mail: fabien.mandorlo@insa-lyon.fr

Ideally, the aim is to satisfy two conflicted requirements: obtain both the wanted colors and a high conversion efficiency.

In this article, we propose to determine the influence of the ARC thickness on the color and conversion efficiency taking into account the thermo-electro-optical properties.

2 Modeling of solar cells performances and colors

2.1 Solar cell simulation

For cell simulation, we use our in-house computer simulation tool [10] based on the resolution of three interdependent physical aspects. The first one is the heat transfer, which includes the following source terms: local heat due to radiation absorption and thermal emission (Q_R), non-radiative recombination (Q_{NRR}), excess power released by thermalization (Q_T), Joule effect (Q_J) which corresponds to the interaction between the charge carriers current and the electrical field inside the cell, and Thomson effect (Q_{TM}) due to the heat carried and extracted from the cell by the charge carriers. The second set is a spectral radiative transfer, which is solved through a gray per band approach and separated treatments of the direct and diffuse components of radiation fluxes. The third set of equations is related to generation and diffusion of electrons and holes in the device.

All the equations are solved with spectral and thermal variation of all used parameters. So, in range $[0.2\text{--}15]\text{ }\mu\text{m}$, the incident spectrum is decomposed in several spectral bands. For the boundary conditions, in addition to the front and back surface recombination velocity respectively, we take into account current flow at metal-semiconductor interfaces thanks to the Peltier effect (Q_P) and the heat exchange by convection (Q_{Conv}).

2.2 Optical calculation: conversion of an optical spectrum to a color in the CIE 1931 color space

In this part we focus on the color prediction of a solar cell, by using its reflected spectrum. The CIE 1931 XYZ color space has been created by the International Commission on Illumination (CIE) [11] in 1931 in order to link the visible spectrum with the perceived colors of the human eye. To match the sensitivity of the short-middle-long wavelength of “standard” human cone cells, this color space relies on 3 color matching functions $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, and $\bar{z}(\lambda)$ (Fig. 1).

These functions are used to calculate the tristimulus values X , Y and Z by projection of the optical signal to be converted $S(\lambda)$ on the visible range from 380 to 780 nm [12]. For this article, the optical signal $S(\lambda)$ will be the reflected light ($R(\lambda)$) coming from a normalized power density spectrum $AM_x(\lambda)$, leading to $S(\lambda) = R(\lambda) \cdot AM_x(\lambda)$:

$$\begin{cases} X = W^{-1} \cdot \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \\ Y = W^{-1} \cdot \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \\ Z = W^{-1} \cdot \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

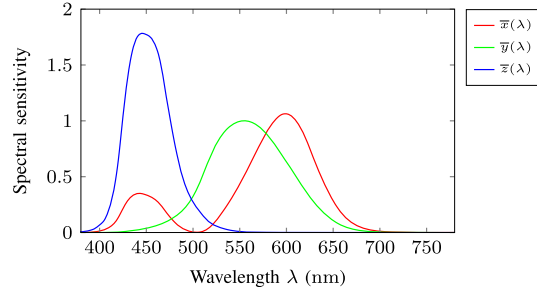


Fig. 1. CIE 1931 standard observer color matching functions.

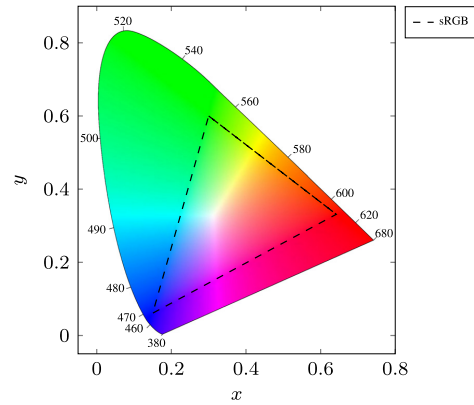


Fig. 2. CIE1931 color space chromaticity diagram including the sRGB one (used for displays).

with:

$$W = \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \cdot AM_x(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (2)$$

Among coordinates (X, Y, Z) , Y represents the brightness of the signal, since the human eyes perceive light mainly through the middle range cone cells, which correspond to the green color detection. This parameter necessarily varies between 0 (no visible light) and 1 (all visible light is reflected). The chromaticity of a color, that quantifies the balance between each elementary wavelengths of the signal, is described by two derived parameters x and y defined such as:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad \text{and} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}. \quad (3)$$

Then, x , y and Y scalars correspond to the CIE 1931 xyY color space. Its chromaticity diagram, also called gamut (Fig. 2) represents the domain covered by x and y for any visible signal: it is delimited by the single wavelength optical signals and any linear combination of the 380 and 780 nm ones (also called the “purple line”).

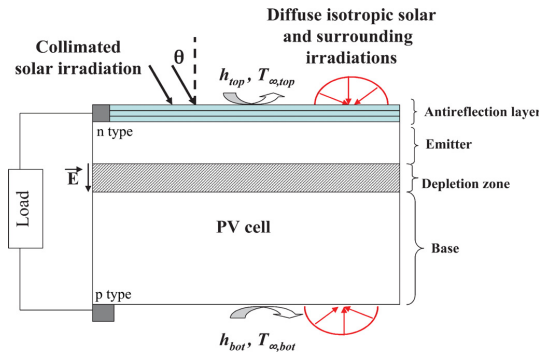


Fig. 3. Description of the simulated solar cell and its boundary conditions.

We can also use the tristimulus values to convert them into the sRGB system using [13] to calculate the Red, Green and Blue (RGB) coordinates for computers and displays. As this color space is smaller than the CIE 1931 xyY one (Fig. 2), colors out of the sRGB domain are approximated: the perceived color on a display (and so on this article) is slightly different from the real color of the simulated structure.

3 Simulation inputs parameters

3.1 Description of the reference solar cell

A non-encapsulated flat photovoltaic cell is considered with a generic structure composed of a standard p-n junction with a negatively doped upper zone (n-type, emitter), a positively doped lower zone (p-type, base) and a depletion zone or charge space (Fig. 3).

In addition, the front surface is covered by a stack of dielectric thin films (ARC) in order to minimize the reflection of the incident light. The cell's upper face is subject to collimated and diffuse isotropic solar irradiations. The incidence of collimated beam is characterized by the incidence angle θ . Additional diffuse isotropic radiation fluxes are considered at both boundaries and refer to surroundings' infrared radiation emission. The surroundings are considered as black bodies at $T_{+\infty, top}$ and $T_{+\infty, bot}$ and the ambient temperature is noted T_{amb} . To get the optical response of the ARC stack on the solar cell, we use the transfer matrix formalism [14] that has been validated by comparison with [15] to calculate the reflected spectrum of a multi-stack system and convert it into the CIE 1931 xyY color space. The studied cell has the parameters given in Table 1.

The used incident spectrum is a standard AM_{1.5G} [16]. The influence of air mass is investigated by also using AM_{1G} and AM_{3G} spectra (Fig. 4). As for the coefficient of convection on each side of the module h_{conv} , its value depends on the configuration of the module integration. Thus, there are many empirical correlation depending on the wind velocity (forced convection) or ambient temperature (free convection). For example, Jones and Underwood analysis [17] indicates a large variation of the

Table 1. Parameters and their default values used in simulation.

Wafer thickness	250 μm
Base doping (p-type, uniform)	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Emitter doping (n-type, uniform)	$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Junction depth	300 nm
Volume SRH lifetime	1 ms
Front surface recombination velocity	$1000 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$
Rear surface recombination velocity	$10\,000 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$
Inclination θ	0°
Top surrounding temperature	25°C
$T_{+\infty, top}$	
Bottom surrounding temperature	25°C
$T_{+\infty, bot}$	
Ambient temperature T_{amb}	25°C
Emissivity in silicon ε_{Si}	0.8

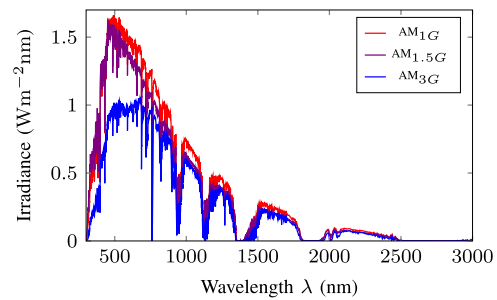


Fig. 4. Spectral irradiances for different air masses.

heat coefficient in between 1.2 and $9.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. The last value corresponds to forced convection condition which is greatly favorable to the cooling of the modules. In order to evaluate the impact of ARC on the cell temperature, we choose two values of h_{conv} : 2 and $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, which corresponds respectively to disadvantageous and favorable cooling conditions. In case of standard conditions, h_{conv} is equal to $+\infty$ leading to an operating temperature of 25°C equal to the temperatures $T_{+\infty, top}$, $T_{+\infty, bot}$ and T_{amb} .

3.2 Optical and thermophysical properties

In this article, we use two types of data: experimental measurements and databases (Fig. 5). To calculate the infrared radiation emission and exchange with the atmosphere, we need to know the dispersion curve of all the materials until $\lambda = 15 \mu\text{m}$. Only few materials are known from visible to long wavelength infrared. Due to the lack of experimental data for other materials, we decide to use Philipp [18] and Kischkat et al. [19] for SiO_2 . As for Si_3N_4 , we use the data given by Gao et al. [20] and Kischkat et al. [19]. It should be noted that the concatenation procedure of these data creates a discontinuity for Si_3N_4 at $1.5 \mu\text{m}$. However, around this value, there is no impact on optical absorption and thermal behaviors.

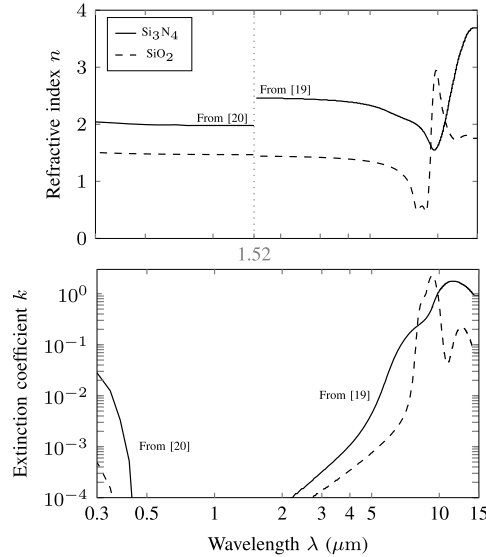


Fig. 5. Refractive index of SiO_2 and Si_3N_4 to cover both the visible and long wavelength infrared domains (data extracted from [18–20]).

Nevertheless, industrial solar cells are based on hydrogenated SiN_x and SiO_x . In order to predict colors with these materials, we will use experimental data in the visible range. For this purpose, both $\text{SiO}_x\text{:H}$ and $\text{SiN}_x\text{:H}$ layers are deposited by LF-PECVD with different stoichiometries [21,22]. One of the $\text{SiN}_x\text{:H}$ layers ($n = 2.08$ at $\lambda = 600$ nm) is optimized for both passivation and optical efficiency for standard flat silicon solar cells with no glass and no EVA. Then, a Horiba Jobin Yvon UVISEL ellipsometer is used to extract their optical indexes in the visible range (Fig. 6).

To take into account the temperature variation of the semiconductor models, we implement Fermi–Dirac free carriers statistics, free-carriers mobility [23], intrinsic carrier density [24], bandgap and bandgap narrowing [25,26] with temperature dependent models. Last, the transport of photogenerated carriers is governed by a standard diode equation. Details related to the determination of the band gap, optical and radiation properties, minority carrier diffusion coefficients, recombination rates and intrinsic concentrations can be found in our previous paper [24].

4 Results and discussion

4.1 Achievable color space depending on the position of the observer

In order to design colored solar cells, we propose to study both the thickness t_{ARC} of a single layer ARC and the influence of the observation angle of an illuminated solar cell by an $\text{AM}_{1.5G}$ spectrum.

The theoretical result for a Si_3N_4 ARC layer is shown in Figure 7a. The chromaticity is compatible with Figure 7 in

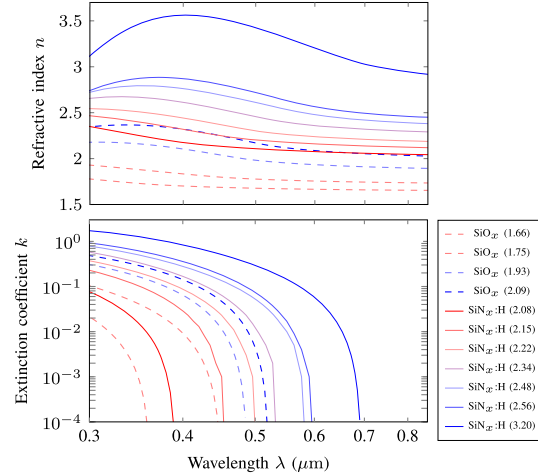


Fig. 6. Experimental optical indexes of different silicon oxides and nitrides (refractive index n at $\lambda = 600$ nm in brackets).

[27] or Figure 2b in [9] for the normal reflection ($\theta = 0$). We observe that for a thin ARC (single mode regime), the color (Fig. 7a) and the brightness (Fig. 7b) are almost independent from the inclination of the solar cell. When the optical path of photons in the ARC layer is very long (i.e. for very high values of θ or t_{ARC}), the higher number of interferences lowers the color selectivity and the emitted light is close to a dark gray (Y close to 25%).

From Figure 7b, the brightness (and so the contrast), gets its minimum and maximum values for $\theta = 0$. We can also observe that colored cells are quite dark since the domain where the perceived colors are different from gray (Fig. 7a) correspond to the minimum domains of the brightness Y (Fig. 7a). Figure 8 represents the chromaticity of the calculated colors. The dotted black line corresponds to the evolution of the color for a 75 nm thick ARC, from an inclination from 0° to 85° . With such a thickness, the solar cell is blue when observed with an $\text{AM}_{1.5G}$ irradiance and its color varies in direction of the gray point $x \approx y \approx 0.33$ when θ increases. This particular trend is verified whatever the thickness of the ARC. Consequently, drawing the chromaticity for $\theta = 0$ can be used to get all the achievable colors for a single layer ARC.

Figure 8 also shows that a small part of the visible colors can be obtained with a silicon nitride ARC, with ability to reproduce dark-blue colors. Indeed, a standard 75 nm thick ARC (point B_1 in Fig. 8) reflects blue light with a low brightness ($Y = 1.8\%$ in Fig. 7), that corresponds to the perceived light when a standard solar cell is observed. On the contrary, red and green colors cannot be easily obtained, since the extension of the gamut is very poor in direction to the 520 and 680 nm wavelengths.

Figure 9 shows the reflected power at normal incidence in the visible range for points R, G, B_1 and B_2 in the gamut diagram. These curves correspond to $t_{\text{ARC}} = 60, 390, 75$ and 360 nm respectively.

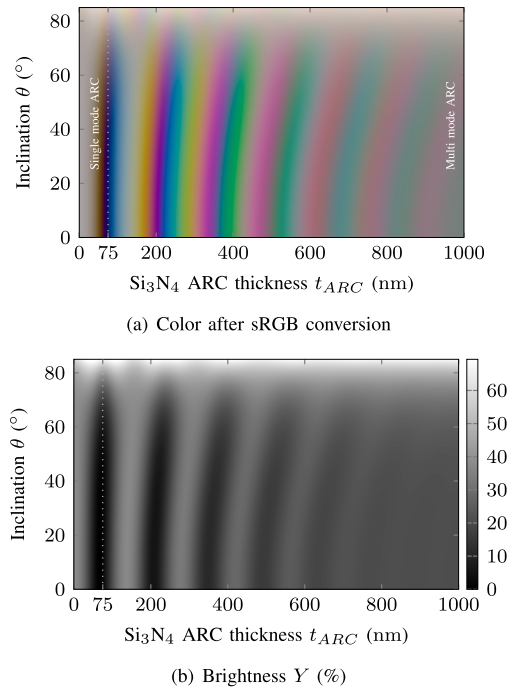


Fig. 7. Perceived color converted into sRGB (a) and brightness (b) depending on the observation angle and ARC thickness for Si₃N₄.

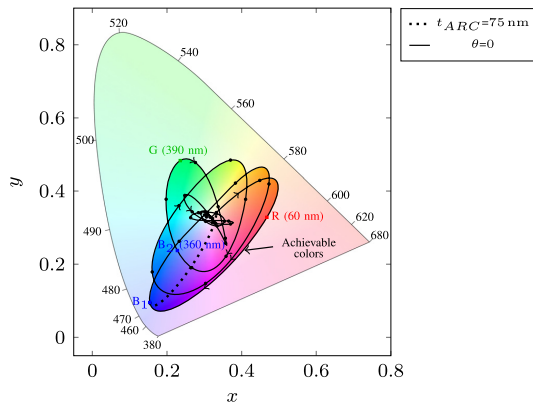


Fig. 8. CIE1931 color space chromaticity for a Si₃N₄ ARC with an AM_{1.5G} irradiance. For $\theta = 0$, arrows represent the direction for which t_{ARC} is increasing and round marks correspond to ARC thicknesses multiples of 25 nm.

We can clearly observe that curves for R, G and B₁ are well accurate to maximize X, Y and Z respectively and obtain red, green and blue solar cells. Indeed, in order to get a green color, the reflected power must be maximum

around $\lambda = 550$ nm and minimum around 450 nm and 600 nm: for this reason, we need a thick multimode ARC, leading to $t_{ARC} = 390$ nm. It is important to note that the chromaticity diagram is not sufficient to infer the perceived color. Indeed, for the R and B points, the brightness is so low ($Y < 3\%$) that side of a solar cell with a thickness corresponding to G ($Y = 21\%$), the human eye will perceive them as almost black. This is confirmed by Figure 7a, even with the sRGB approximation.

Last, the comparison of spectrum for the points B₁ and B₂ shows that both are accurate to get a high value of X, but in case of B₂ the Y and Z variables are higher (see Eq. (1)), leading to x and y values closer to the (0.33, 0.33) point in the chromaticity diagram (Eq. (3)). The reflected power in case of B₂ is multiplied by a factor 6.8, even if this color is less “pure” in terms of blue content.

4.2 Influence of the irradiance on the perceived color

In this part, we propose to study whether the irradiance influences or not the color of the reflected light. As the atmosphere absorbs more light in the short wavelengths, the balance between short (blue color) and long wavelengths (red color) varies in disfavor of the blue content when the air mass increases. Consequently, the AM_{1D,G} irradiance spectra relatively contain more power in the short wavelengths than AM_{3D,G}. Here, we propose to calculate the response of the same Si₃N₄ layer as in the previous part for AM₁, AM_{1.5} and AM₃ spectrum (direct and global).

As previously explained, only the simulation for $\theta = 0$ is necessary to extract the reachable chromaticity domain for a given single ARC layer. Consequently, after the simulation, we applied a Jarvis based method [28] to extract the convexhull of the data at normal incidence. Results are presented in Figure 10.

The shapes and delimited surfaces by the convex hull of the achievable colors are close for each spectrum. However, each domain is shifted and rotated in order to reduce the coverage in the blue side and increase it in the green and red ones when the air mass increases (i.e. from AM_{1D,G} to AM_{3D,G}). This is a consequence of a lower amount of blue photons reaching the surface of the solar cell (Fig. 4). The comparison of the direct and global spectra shows that direct spectra have a lower blue content than the global ones for a given air mass. Consequently, the gamut of a direct spectrum is always shifted in the red direction compared to that one of a global spectrum.

In all cases, the color of a given optical system is not affected a lot by the incident spectrum.

4.3 Gamuts using silicon nitrides and oxides

Figure 11 shows the color behavior for both silicon nitrides and oxides taking into account the experimental dispersion curves (Fig. 6).

As we can observe in Figure 11a, the difference between Si₃N₄ and SiN_x:H (2.08) is quite limited: the stoichiometric nitride has a better extension in the green direction while the standard passivating ARC allows more orange hues. We can also observe that increasing the Si

6

M. Amara et al.: EPJ Photovoltaics 9, 1 (2018)

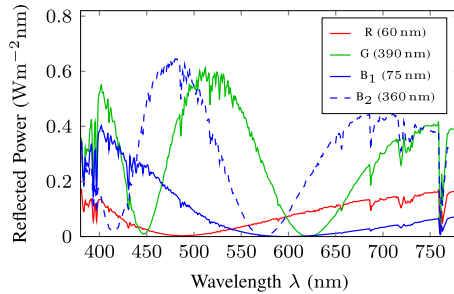


Fig. 9. Reflected power for different thicknesses at normal incidence.

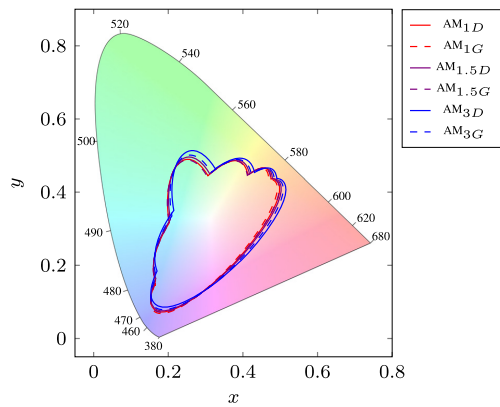
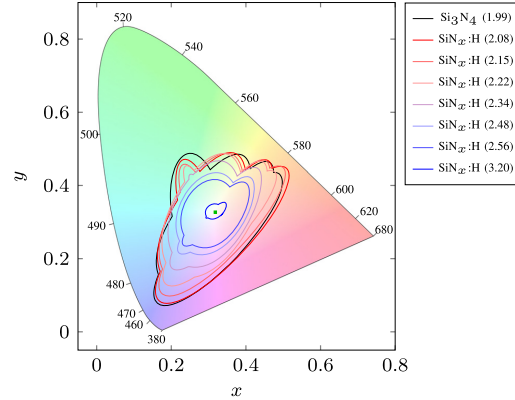


Fig. 10. Influence of the illumination on the perceived color (Si_3N_4 ARC) at normal incidence for different irradiances.

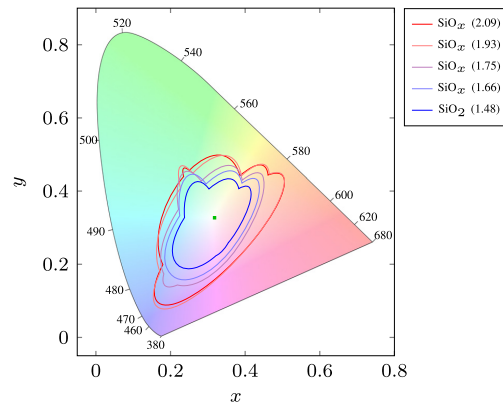
content reduces the gamut since the optical index gets closer to the Si one, leading to a less selective reflection at the front surface.

On the contrary, for sub-stoichiometric oxides (Fig. 11b), increasing the amount of Si increases the surface of the chromaticity diagram in every direction (Fig. 11b). By comparing the behavior of all the SiO_x layers, we can deduce that lowering the optical index reduces the size of the convex hull in every direction. For Si rich oxides we get similar gamuts as for Si_3N_4 and $\text{SiN}_x\text{:H}$ since their optical indexes are close. However, in case of silicon oxides, increasing the Si concentration in the ARC helps designing the wanted color, but also increases the parasitic absorption due to a higher extinction coefficient in Figure 6.

From both figures, we can deduce that the widest gamut corresponds to an optical index close to $n=2$. Consequently, $\text{SiN}_x\text{:H}$ is a very interesting layer since it combines a wide range of colors with low absorption and good electrical passivation. This property is compatible with the study of the reflected spectra in the previous part, since the optical index of this standard $\text{SiN}_x\text{:H}$ is close to $\sqrt{n_{\text{Si}} \cdot n_{\text{air}}}$ (optical index of silicon and air respectively), and so, well adapted to maximize the transmission into the



(a) Silicon nitrides



(b) Silicon oxides

Fig. 11. CIE 1931 color space chromaticity for different ARC layers with an $\text{AM}_{1.5G}$ irradiance (optical index at $\lambda = 600$ nm in brackets). The green point in the center of the gamut corresponds to the simulation with no ARC.

active material. As a consequence, it is also accurate to avoid partial reflection of unwanted wavelengths, leading to a better color selectivity.

4.4 Optical benefits of using a double layer ARC

In order to extend the reachable gamut, we propose to study a double layer ARC made of both SiO_2 and Si_3N_4 . This particular combination is not optimized to reduce the reflectivity [29].

The obtained colors with $\theta=0$, approximated in the sRGB domain, are presented in Figure 12a. The corresponding CIE 1931 xyY color space is shown in Figures 12b and 13. On this second figure, we also add the convex hull of the gamut for both single layer SiO_2 and Si_3N_4 ARCs. It must be mentioned that these two layers have the same

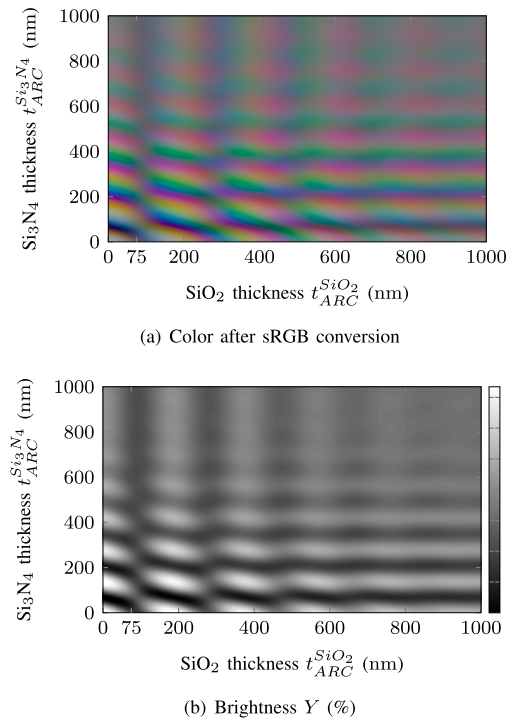


Fig. 12. Perceived color and brightness converted into sRGB for a $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ double layer ARC at normal incidence.

behavior when t_{ARC} increases with the same sequence of colors to define the convex hull, but this latter is smaller for SiO_2 .

The behavior of the double layer ARC is quite similar as the single one studied previously: when the optical path increases (either in SiO_2 or Si_3N_4), the system becomes multi-mode and the color sensitivity decreases, converging toward a gray color. However, in the case of this study, the convergence is quicker with the increase of the silicon nitride thickness than for the silica one, due to its higher optical index. For instance, we observe limited variations of the brightness Y for $t_{\text{ARC}}^{\text{Si}_3\text{N}_4} > 650$ nm while for $t_{\text{ARC}}^{\text{SiO}_2} > 650$ nm, the color and the brightness still significantly vary.

The main advantage of using a double layer ARC is the wider extension of the chromaticity (Fig. 13) compared to the single one (Fig. 11), more particularly in the cyan, green, yellow and orange directions. On the contrary, in the red, magenta and blue directions, the chromaticity seems to be limited by the Si_3N_4 layer.

4.5 Thermal and electrical behaviors

Figure 14 depicts plots of the cell's temperature as a function of the ARC thickness for Si_3N_4 (solid lines) and SiO_2 (dashed lines). In the range 0–200 nm, the cell temperature is strongly sensitive to the ARC thickness regardless of the composition of the ARC layer and the heat coefficient h_{conv} . The peak

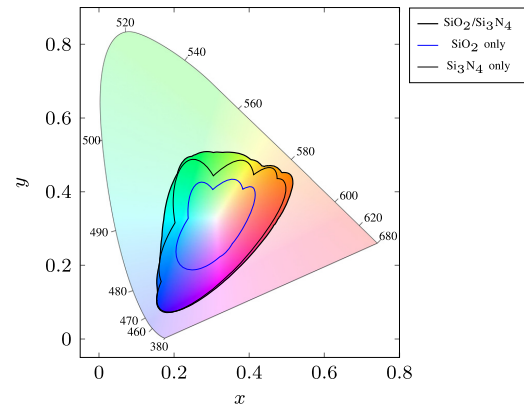


Fig. 13. CIE xyY 1931 color space for a double-stack ARC layer ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) with an $\text{AM}_{1.5G}$ irradiance.

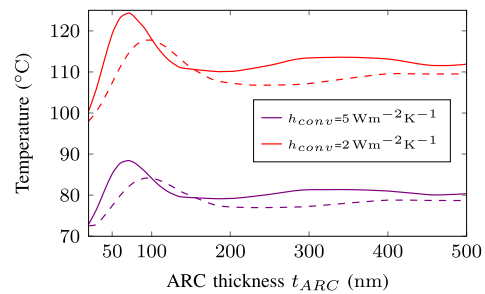


Fig. 14. Solar cell temperature as a function of the ARC thickness under $\text{AM}_{1.5G}$ illumination. For $h_{\text{conv}} = +\infty$, temperature is 25 °C whatever t_{ARC} . Solid lines: Si_3N_4 , dashed lines: SiO_2 .

temperature is achieved with $d = 70$ nm with a Si_3N_4 coating and about 100 nm for SiO_2 . Besides, it is obvious that increasing the heat coefficient induces more cooling of the cell temperature. Beyond $d = 200$ nm, the temperature shows less sensitivity to the ARC thickness even if it presents a second local maximum around 350 nm for Si_3N_4 and 400 nm for SiO_2 .

To explain the variation of the temperature with the ARC thickness, we display in Figure 15 the variation of the heat sources and sinks in case of $h_{\text{conv}} = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. As we can see, all sources exhibit the same trend: an increase followed by a decrease, and again, an increase and decrease. However, the second peak is less pronounced. In addition, the maximum of the curves does not occur at the same thickness of the ARC. It can also be observed that the heating is dominated by the thermalization, the Joule and the Peltier sources with less contribution for non-radiative recombination. As for cooling, it is mainly due to convection and radiation. The contribution of the Thomson effect is negligible.

It should be pointed out that the thermal sources are higher with Si_3N_4 compare to SiO_2 , thanks to a lower reflection at the front surface (Fig. 16). Actually, as

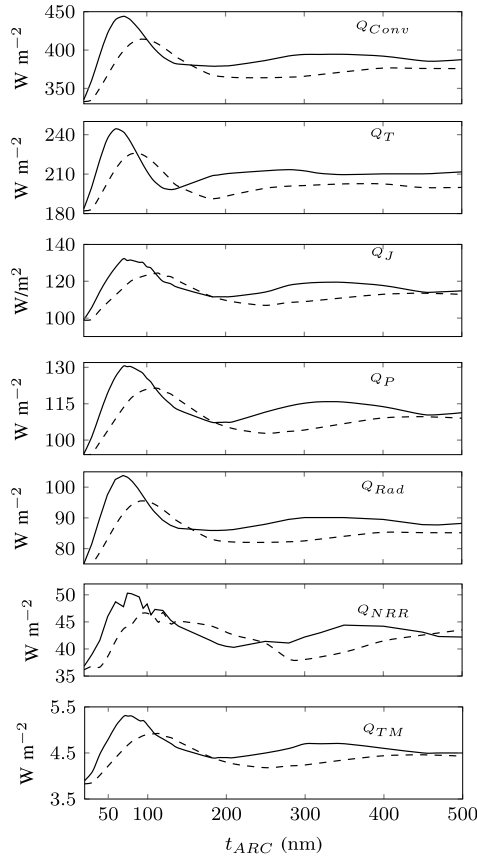


Fig. 15. Heat and sink sources as a function of the ARC thickness (Solid lines: Si_3N_4 , dashed lines: SiO_2).

explained in Section 4.3, the optical index of Si_3N_4 is close to $\sqrt{n_{\text{Si}} \cdot n_{\text{air}}}$. The same effect may explain the trend of the Joule and the Thomson sources, since both phenomena are correlated to the photocurrent.

The anti-reflecting layers are usually designed in order to maximize the short-circuit current density J_{sc} at STC where the cell temperature is maintained at 25 °C. This is illustrated in Figure 17 in the case of SiO_2 and Si_3N_4 layers. Our own finding indicates that whatever the ARC layer, the optimum thickness does not depend on the heat coefficient h_{conv} . This is readily explained by the fact that the bandgap is weakly influenced by temperature, and so the absorption range. Thus, we find an optimum thickness for SiO_2 around 105 nm and 75 nm for Si_3N_4 . It should be emphasized that the maximum of J_{sc} occurs very close to maximum of the temperature.

Now, considering the electrical conversion efficiency η with real environmental conditions as criterion (rather than J_{sc} at STC) leads to different conclusions as illustrated in Figure 18:

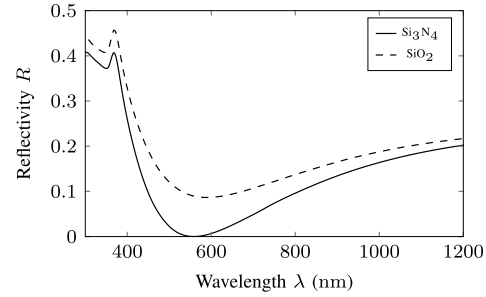


Fig. 16. Reflectivity of the solar cell at the maximum of the thermalization sources.

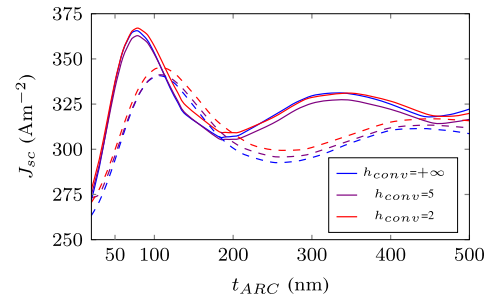


Fig. 17. Short current circuit current density as a function of the ARC thickness (solid lines: Si_3N_4 , dashed lines: SiO_2).

- the decrease of the heat coefficient h_{conv} lowers the conversion efficiency η ;
- the optimum thickness depends on the thermal environment of the solar cell (Tab. 2) since the thermal heat and sources vary with the ARC thickness (see Fig. 15);
- at high temperature (small value of h_{conv} in Figure 14), the variation of the conversion efficiency η is less pronounced.

Table 2 summarizes the optimal characteristic of the ARC regarding the thermal coefficient. It should be emphasized that calculated values with $h = +\infty$ is equal to those obtained with STC optimization criteria.

We can clearly observe that whatever the ARC material, the optimal thickness must be increased when the cooling conditions deteriorates, i.e. when h_{conv} decreases, even for realistic conditions with wind ($h_{conv} = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).

4.6 Color selection and its impact on the thermal and electrical performances

From previous analysis, we observed that the thickness of an ARC layer can be easily used to tune the color of a solar cell. However, taking into account the thermal effects, we have shown that beyond $t_{ARC} = 125 \text{ nm}$, the electro-thermo-optical balance of the solar cell leads to similar conversion efficiencies.

This behavior is mainly the consequence of a lower thermalization due to absorption of blue photons, and less heat production, that lowers the conversion efficiency.

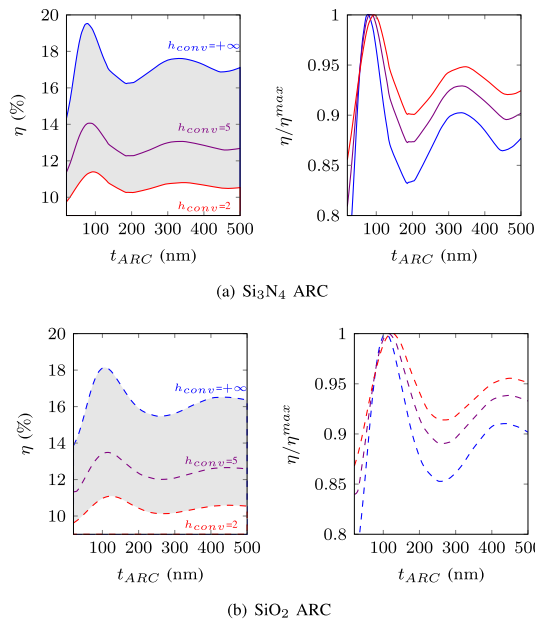


Fig. 18. Absolute and relative conversion efficiencies as a function of the ARC thickness for both SiO_2 and Si_3N_4 .

In Figure 19, we draw the limit conversion efficiencies with $h = +\infty$ (infinite convection) and $h = 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (no wind), and superimposed the sRGB colors calculated for $\text{AM}_{1.5G}$ and $\theta = 0$. We can observe that the contrast of the colors achieved by the SiO_2 ARC is lower than for Si_3N_4 , that is compatible with the smaller chromaticity diagram for SiO_2 (Fig. 12). In fact, this behavior is a direct consequence of the higher curvature (Fig. 16) of the reflectivity spectrum that helps in color selection. We can also notice that higher conversion efficiencies are achieved for the standard Si_3N_4 layer, making it the ideal candidate to satisfy both performance constraint and color flexibility. In both cases, the peak of the maximum conversion efficiency only leads to dark orange, red, magenta and blue colors (sequence obtained thanks to the gamut in Fig. 8), and the maximum conversion efficiency does not correspond to the darkest blue. Indeed, these dark colors correspond to a high thermalization level that reduces the conversion efficiency due to a high operating temperature. Then, increasing the ARC thickness first leads to a gray color and, then, different colors are available for even thicker ARCs. As a consequence, except for few colors, the maximum conversion efficiency cannot be obtained and it may be difficult to balance the relative brightness between solar cells with different colors. However, for higher ARC thicknesses ($t_{\text{ARC}} > 125 \text{ nm}$), the conversion efficiency is lower but do not vary a lot with the ARC thickness since the ARC also favors the absorption of infrared photons. Then, designers are almost free to tune t_{ARC} and get the color they need since cyan green and yellow colors can be also obtained. This can be done at the cost of a relative

Table 2. Optimal thickness as a function of the heat coefficient to maximize the conversion efficiency.

	$h_{\text{conv}} = +\infty$	$h_{\text{conv}} = 5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$h_{\text{conv}} = 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Si_3N_4	80 nm	80 nm	95 nm
SiO_2	105 nm	110 nm	120 nm

5–10% decrease of the conversion efficiency. If the blue color is necessary for a multi-color BIPV project, one may consider the range 200–225 nm to balance its brightness with the other colors for Si_3N_4 .

Last, the chromaticity diagram (Fig. 8) shows different intersections: for instance, the yellow color at point ($x = 0.41$, $y = 0.45$) can be obtained using a 155 nm or a 290 nm thick Si_3N_4 layer. The respective brightnesses are $Y = 0.32$ and $Y = 0.30$, meaning that the thinner ARC will lead to little bit brighter solar cells, with a slightly lower conversion efficiency (Fig. 19a).

5 Impact of the EVA and glass for Si flat solar cells

A realistic solar cell is actually protected by a front glass with an EVA layer to prevent its degradation. This structure may affect both optical and thermal behavior.

5.1 Optical impact

From Section 4.3, the best candidate for an extended gamut is expected to correspond to the material for which the transmission in silicon is very efficient. Taking into account the optical index of EVA [30], the optimal index is expected to be around $\sqrt{n_{\text{Si}} \cdot n_{\text{EVA}}}$. This is what we observe in Figure 20 since the widest gamut is obtained for n between 2.34 and 2.48 for SiN_xH layers [21]. Then, the gamut extension in the red and blue directions are very close to the previous study without considering the EVA and glass materials (Fig. 11a), but the extension in the green-cyan and green-yellow directions is better.

The main issue in using Si rich SiN_xH layers is the increase of the parasitic absorption in the ARC layer. A standard ARC layer optimizing the conversion efficiency at STC leads to an optical index close to 2.22 [30]. Then, the gamut is mainly reduced in the red and green directions.

5.2 Thermal impact of the encapsulation

The encapsulation of the solar cells affects the thermal balance by adding thermal resistances and modifies the thermal emission of the module. Regarding silicon/EVA/glass stack structure, the thermal energy balance can be expressed through an effective thermal resistance, R_{eff} , between the cell and the environment [31]:

$$R_{\text{eff}} = \frac{T_c - T_{\text{amb}}}{H} \quad (4)$$

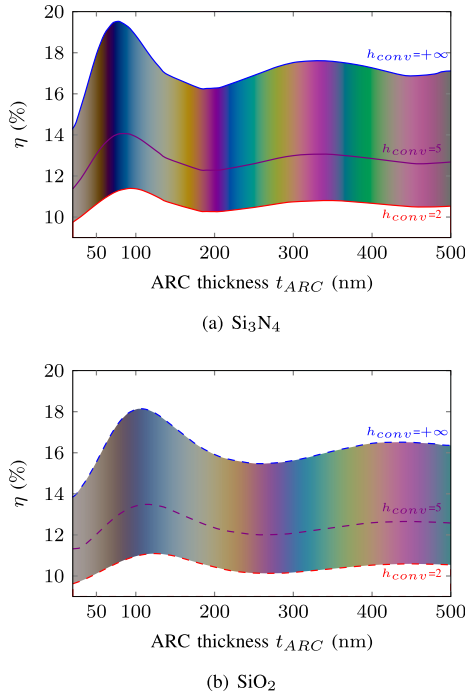


Fig. 19. Conversion efficiency and perceived color for different single layer ARC thicknesses (with $\theta = 0$).

where H is the total heat source, T_c the temperature of the cell and T_{amb} the ambient temperature. It is possible to calculate the value of R_{eff} through the total of its components for one side of the module:

$$R_{eff} = (h_{conv} + h_{rad})^{-1} + R_{EVA} + R_{glass} \quad (5)$$

where h_{rad} is the heat coefficient induced by radiative cooling, h_{conv} represents the convection effect, and R_{EVA} and R_{glass} are the thermal resistances of glass and EVA layers. With typical EVA and glass characteristics [32], $R_{EVA} \approx 2 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, $R_{glass} \approx 2 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ and h_{rad} is around $7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. When $h_{conv} > 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, the contribution of $R_{EVA} + R_{glass}$ is less than 3% in the final value of R_{eff} . This result is consistent with Weiss et al. [33] and shows that the thermal behavior of a solar module is dominated by heat convection and heat radiation of the solar cell.

Since glass and EVA absorb slightly solar radiation in the UV part which is mostly thermalized in a cell without encapsulation, the heat source, H , does not change much. Therefore, only the emission by thermal radiation is modified.

The variation of h_{rad} caused by the increase of the emissivity of the module from 0.8 to 0.9 [34] induces a variation of R_{eff} below 10 %. This variation has the same impact on the thermal energy balance that a similar variation of h_{conv} which has been analyzed in Figures 14 and 19 on the non-encapsulated cell. The only case which is not treated correctly through the non-

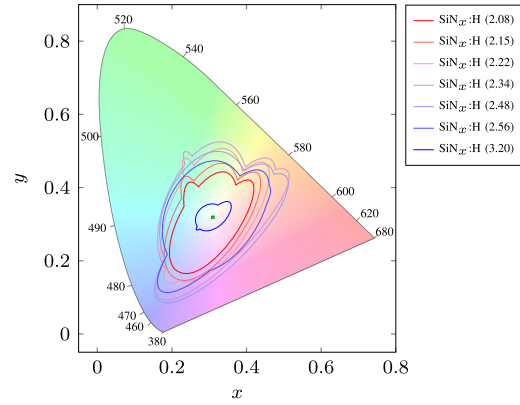


Fig. 20. CIE1931 color space chromaticity for different $\text{SiN}_x\text{:H}$ ARC layers with an $\text{AM}_{1.5G}$ irradiance (optical index at $\lambda = 600$ nm in brackets) when taking the EVA and glass layers into account. The green point in the center of the gamut corresponds the simulation with no ARC.

encapsulated cell is $h_{conv} = 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Indeed, the increase of the emissivity can slightly decrease the operating temperature. However, the trends described in Figures 14 and 19 are sufficient to understand the implications of such higher emissivity because the impact is limited to only few °C. Hence, this analysis can only be improved marginally with the consideration of the glass and the EVA layers whereas texturisation of the surfaces is an interesting challenge to take up.

6 Conclusion

In our study, we focused on a solar cell without any encapsulating materials (glass and EVA) on the front surface. However, these materials have a little impact on our conclusions as for colors, the standard ARC suitable for this kind of encapsulation should be accurate for the same reasons as the $\text{SiN}_x\text{:H}$ we used. From a thermal point of view, the incorporation of these elements leads to use an effective value of the convection coefficient h slightly higher to that used in our demonstration.

The balance between the conversion efficiency and the possibility to tune the perceived color of a solar cell has been studied. We have demonstrated that increasing the ARC thickness, has a limited impact on the energy production, which implies that the color can be almost freely chosen. This behavior is the consequence of an almost constant thermalization level, and small variations of the thermal sources. When the convection cooling conditions deteriorate, the impact of choosing the solar cell's color decreases further.

Concerning the color properties, we demonstrated that the thinner the ARC, the wider is the inclination for which the perceived color is not degraded. This color is almost independent from the irradiance spectrum, and so the latitude on Earth. For a single layer ARC, the standard Si_3N_4 leads to more contrasted colors compared to

sub-stoichiometric SiO_x materials. As its optical index is close to that one of the standard $\text{SiN}_x\text{:H}$ used for both surface passivation and optical transmission into silicon, we can deduce that this material is also a great candidate to cover a wide range of colors. Last, using a double layer ARC mainly extends the available colors in the cyan, green, yellow and orange directions. These conclusions are obtained for stoichiometric Si_3N_4 and SiO_2 which are not the standard materials in PV industry. For more realistic results, it is mandatory to extend the characterization of the optical properties to long wavelength infrared.

Considering the glass and the EVA layers on front of the solar cell slightly extends the gamut around the green color. As for thermal effect, the heat source is not affected since the absorbed light in the active material is marginally impacted. As for cooling, the thermal resistance of glass and EVA is not increased enough to increase significantly the operating temperature.

As a conclusion, taking into account realistic thermal conditions helps in reducing the difference in terms of conversion efficiency between two solar cells with different colors. This may be very handy for BIPV since making drawings or colored patterns with different color solar cells may not influence significantly the overall conversion efficiency.

The authors are thankful to the NanoLyon platform for processing and characterizing different PECVD deposited layers.

Author contribution statement

All authors have contributed to the writing of the manuscript. More precisely, Romain COUDERC and Mohamed AMARA have refined the home-made code of the 1D electro-thermo-optical model. Mustapha LEMITI and Fabien MANDORLO worked on the optical behavior for any incident signal and color properties of the simulated solar cells. Felix GERENTON has fabricated and characterized all the SiN_x and SiO_x layers to get realistic estimation of the gamut when simulating the optical stack.

References

1. B.P. Jelle, C. Breivik, *Energy Procedia* **20**, 78 (2012)
2. A.J. McEvoy, L. Castaner, T. Markvart, *Solar cells: materials, manufacture and operation* (Academic Press, 2012)
3. E. Skoplaki, J. Palyvos, *Sol. Energy* **34**, 23 (2009)
4. J. Kurnik, M. Jankovec, K. Brecl, M. Topic, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95**, 373 (2011)
5. I. Tobias, A.E. Moussaoui, A. Luque, *IEEE Trans. Electron Devices* **46**, 1858 (1999)
6. P. Nubile, *Thin Solid Films* **342**, 257 (1999)
7. H. Nagel, A.G. Aberle, R. Hezel, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **7**, 245 (1999)
8. B.S. Richards, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **12**, 253 (2004)
9. M. Li, L. Zeng, Y. Chen, L. Zhuang, X. Wang, H. Shen, *Int. J. Photoenergy* **2013**, 352473 (2013)
10. R. Couderc, M. Amara, M. Lemiti, *IEEE J. Photovolt.* **6**, 1123 (2016)
11. International Commission on Illumination. [Online]. Available at: www.cie.co.at
12. J. Schanda, *Colorimetry: understanding the CIE system* (John Wiley & Sons, 2007)
13. International Electrotechnical Commission et al., *Multimedia systems and equipment – colour measurement and management – part 2-1: Colour management – default RGB colour space – sRGB*, IEC 61966-2-1, Tech. Rep., 1999
14. F. Bernoux, J.-P. Piel, B. Castellon, C. Defranoux, J.-H. Lecat, P. Boher, J.-L. Stehle, *Ellipsométrie. Théorie, in Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle* (2003), p. R6490-1
15. D.L. Windt, *Comput. Phys.* **12**, 360 (1998)
16. C.A. Gueymard, *Sol. Energy* **71**, 325 (2001)
17. A.D. Jones, C.P. Underwood, *Sol. Energy* **70**, 349 (2001)
18. H.R. Philipp, *J. Electrochem. Soc.* **120**, 295 (1973)
19. J. Kischkat, S. Peters, B. Gruska, M. Semtsiv, M. Chashnikova, M. Klinkmüller, O. Fedosenko, S. Machulik, A. Aleksandrova, G. Monastyrskiy, et al., *Appl. Opt.* **51**, 6789 (2012)
20. L. Gao, F. Lemarchand, M. Lequime, *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ.* **8**, 13010 (2013)
21. J.-F. Lelièvre, E. Fourmond, A. Kaminski, O. Palais, D. Ballutaud, M. Lemiti, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93**, 1281 (2009)
22. F. Gérenton, F. Mandorlo, E. Fourmond, M. Le Coz, D. Blanc-Pélissier, M. Lemiti, *J. Vac. Sci. Technol. A* **34**, 051201 (2016)
23. D.B.M. Klaassen, *Solid-State Electron.* **35**, 953 (1992)
24. R. Couderc, M. Amara, M. Lemiti, *J. Appl. Phys.* **115**, 093705 (2014)
25. R. Pässler, *Phys. Rev. B* **66**, 085201 (2002)
26. A. Schenk, *J. Appl. Phys.* **84**, 3684 (1998)
27. J. Henrie, S. Kellis, S. Schultz, A. Hawkins, *Opt. Express* **12**, 1464 (2004)
28. R.A. Jarvis, *Inf. Process. Lett.* **2**, 18 (1973)
29. D.N. Wright, E.S. Marstein, A. Holt, Double layer anti-reflective coatings for silicon solar cells, in *Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE* (IEEE, 2005), pp. 1237–1240
30. H. Nagel, A.G. Aberle, R. Hezel, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **7**, 245 (1999)
31. A. Royne, C.J. Dey, D.R. Mills, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **86**, 451 (2005)
32. G. Notton, C. Cristofari, M. Mattei, P. Poggi, *Appl. Therm. Eng.* **25**, 2854 (2005)
33. L. Weiss, M. Amara, C. Ménéz, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **24**, 12 (2015)
34. E. Kaplani, S. Kaplanis, *Sol. Energy* **107**, 443 (2014)

Cite this article as: Mohamed Amara, Fabien Mandorlo, Romain Couderc, Félix Gérenton, Mustapha Lemiti, Temperature and color management of silicon solar cells for building integrated photovoltaic, EPJ Photovoltaics 9, 1 (2017)