

Procédé technologique LUMELEC : au carrefour de l'optique et de l'électronique

P.Arguel^(1,2), J.Grisolia^(3,4), J.Launay^(1,5), H.Tap^(1,6),
C.Capello^(4,7), C.Rouabhi^(2,7), F.Guerin^(3,4), F.Gessinn^(4,7)
arguel@laas.fr

- (1) LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France
- (2) Université Paul Sabatier, 118 Route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex 9, France
- (3) Université de Toulouse, INSA-CNRS-UPS, LPCNO, 135 Avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France
- (4) Institut National des Sciences Appliquées, 135 Avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France
- (5) IUT A Paul Sabatier, 115 Route de Narbonne, F-31077 Toulouse Cedex, France
- (6) Toulouse INP-ENSEEIH Toulouse II, 2 Rue Camichel, F-31071 Toulouse Cedex 7, France
- (7) Atelier Interuniversitaire de Micro-nano-Electronique, 135 Avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France

RESUME : Chaque année, les installations de l'AIME (Atelier Interuniversitaire de Micro-nano-Electronique) de Toulouse sont utilisées par une quarantaine de filières d'enseignement qui y trouvent tous les moyens techniques pour concevoir, réaliser et caractériser un ensemble de dispositifs électroniques ou des microsystèmes électromécaniques. S'inscrivant dans une volonté d'élargissement de l'offre de formation de cette structure inter-établissement, et afin de répondre à une demande croissante de ses utilisateurs, un nouveau procédé technologique visant la conception, la réalisation et la caractérisation de dispositifs optoélectroniques a été mis en place en 2012 et est suivi aujourd'hui par environ 250 étudiants par an, en provenance de diverses formations universitaires ou écoles d'ingénieurs.

Ce procédé, baptisé LUMELEC, a pour objectif de fabriquer, sur un même substrat de silicium, divers photodétecteurs destinés à être caractérisés et dont les performances font l'objet d'une étude comparative en fonction de l'application visée. En rupture avec les approches conventionnelles, nous proposons ici la mise en œuvre d'une réelle microfabrication par les étudiants, succédant à une phase de modélisation et aboutissant à une caractérisation quasi exhaustive du système réalisé. Ainsi, les contraintes liées à des applications dans des domaines aussi variés que la conversion photovoltaïque, la domotique, la biologie, l'environnement,... sont analysées afin de déterminer les caractéristiques du dispositif le mieux adapté à sa fonction. Aujourd'hui, bénéficiant d'un retour d'expérience sur plusieurs années, nous décrivons dans cet article les principales options retenues pour permettre une mise en œuvre aisée et « modulaire » de ce projet, et faire en sorte qu'il réponde aux demandes de formations diverses.

Mots clés : cellule photovoltaïque, photodétection, conversion d'énergie, optoélectronique, photonique.

1 INTRODUCTION

Les dispositifs associant l'optique et l'électronique investissent des champs d'applications aussi variés que la conversion d'énergie, la domotique, la biologie, la surveillance environnementale,... Afin de répondre à un besoin croissant de formation dans ce domaine, et à l'issue d'un travail

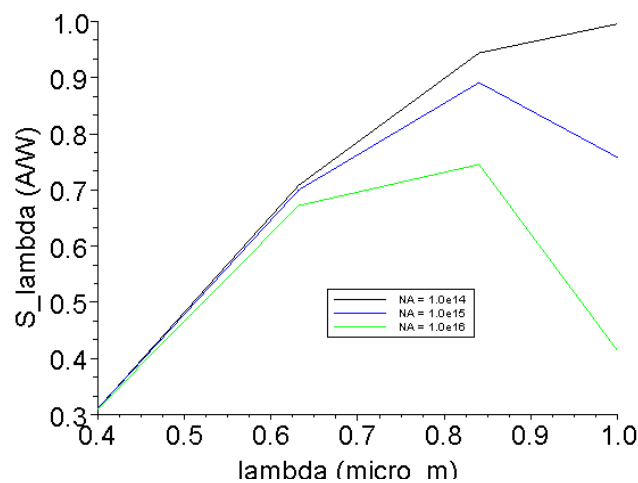
collaboratif regroupant cinq établissements toulousains, nous avons proposé, dès 2012, la mise en place du procédé technologique LUMELEC au sein de l'AIME [1]. Ce procédé a pour objectif la réalisation et la caractérisation de photodétecteurs présentant divers stades de sophistication. A travers l'étude de ces dispositifs optoélectroniques élémentaires, nous explorons alors quelques voies permettant d'améliorer aussi bien les performances intrinsèques que les performances d'une association de plusieurs composants de ce type. L'objectif de la démarche est d'amener les étudiants, à partir de leurs propres réalisations technologiques, à maîtriser des concepts relatifs à la photodétection et à les mettre en œuvre dans le cadre d'applications diverses et concrètes.

La mise en œuvre du procédé LUMELEC s'est basée sur les résultats d'une étude préalable de modélisation qui a permis de déterminer les principaux paramètres technologiques de la structure. Le dessin des dispositifs a ensuite été réalisé de sorte à faciliter les étapes de caractérisation, et un procédé technologique offrant divers stades d'élaboration, sous forme d'étapes optionnelles, a été établi. Enfin, un banc de test a été conçu pour étudier de façon aussi complète que possible les performances des dispositifs réalisés, selon différentes configurations.

2 MODELISATION DE LA STRUCTURE

Les principaux paramètres technologiques des dispositifs à réaliser ont été déterminés par une modélisation de la structure envisagée. A cette fin, un modèle Scilab a été mis en œuvre sur la base d'une cellule photosensible de type N⁺P. Afin d'optimiser les performances de la cellule, nous avons alors étudié l'influence de certains paramètres clefs tels que la valeur des dopages, la tension de polarisation, l'épaisseur de cathode,...

Tout d'abord, la réponse spectrale a été évaluée pour différentes valeurs de dopage de l'anode (Fig.1). Cette première étude a montré que la sensibilité est d'autant meilleure que les valeurs de dopage sont faibles. Cependant, pour des raisons de disponibilité et de coût des wafers de silicium, un dopage de type P avec $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ a été retenu. On peut remarquer qu'un dopage inférieur permettrait d'améliorer la sensibilité aux grandes longueurs d'onde (avec peu d'influence sur la game spectrale visible), mais il augmenterait aussi le temps de réponse en augmentant la durée de vie des porteurs minoritaires dans l'anode, ce qui pourrait s'avérer handicapant pour certaines applications.



*Figure 1 : Réponse spectrale pour différentes valeurs de dopage de l'anode.
De haut en bas : $N_A = 10^{14}$; 10^{15} ; 10^{16} cm^{-3}*

Ensuite, la réponse spectrale a été évaluée pour différentes valeurs de polarisation inverse de la photodiode. On observe alors que la valeur de la tension inverse de polarisation, tension qui permet d'augmenter l'étendue de la zone de charge d'espace, est un paramètre négligeable pour améliorer la sensibilité de la photodiode. En revanche, ce paramètre est très important pour abaisser la valeur de la capacité équivalente du dispositif et, par là-même, améliorer si besoin ses caractéristiques dynamiques.

Enfin, la réponse spectrale de la photodiode a été évaluée pour différentes valeurs d'épaisseur de cathode. Comme attendu, la sensibilité est d'autant meilleure que l'épaisseur de la cathode est faible. Il est à noter que ce paramètre est important essentiellement pour les courtes longueurs d'onde (domaine où le coefficient d'absorption dans le silicium est le plus élevé). Nous nous efforcerons donc de réaliser des dispositifs présentant une profondeur de jonction la plus faible possible. Cependant, avec les équipements dont nous disposons, il est difficile d'obtenir et de contrôler des épaisseurs inférieures au micromètre. Nous choisissons donc de retenir cette épaisseur-là pour prétendre à une précision et une reproductibilité acceptables.

En conclusion, le modèle Scilab mis en œuvre nous a permis de définir la structure optimale qu'il est judicieux de fabriquer sur substrat silicium, à un coût raisonnable, avec les moyens disponibles au sein de la centrale technologique de l'AIME. Les valeurs retenues sont rappelées ici :

- Dopage de l'anode (wafer de silicium) : $N_A = 1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- Profondeur de la cathode : $X_n = 1.10^{-4} \text{ cm}$
- Dopage de la cathode : $N_D = 1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Le dispositif réalisé sera ensuite testé sous une tension de polarisation inverse égale à -5V.

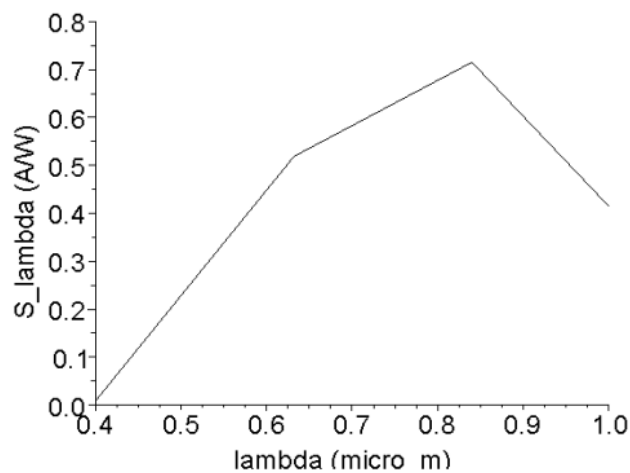


Figure 2 : Réponse spectrale de la cellule projetée (sous polarisation inverse égale à -5V).

La réponse spectrale de la cellule projetée selon les paramètres qui viennent d'être décrits est présentée sur la figure 2. Cette étude de modélisation est proposée, en option, aux étudiants des formations Master 1 et 2 afin qu'ils maîtrisent les principaux paramètres technologiques conditionnant les performances d'une photodiode et qu'ils en connaissent les ordres de grandeurs.

3 DESSIN DES DISPOSITIFS

Le premier dispositif envisagé dans le cadre de la mise en place du procédé a été une cellule photovoltaïque « standard ». Généralement, une telle cellule est réalisée sur un wafer entier de silicium. Son dessin est alors optimisé pour couvrir au maximum la surface de matériau disponible tout en permettant un pavage « sans trou » lors de la réalisation ultérieure de panneaux [2].

Afin de permettre aux étudiants d'évaluer le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque unitaire sous illumination mais, également, de les confronter à l'assemblage de ces cellules tel qu'on peut le retrouver sur un panneau de type commercial (pour augmenter les valeurs de tension et courant « récupérables »), nous avons souhaité implanter quatre composants de taille plus réduite sur un seul et même wafer de silicium de deux pouces de diamètre.

Deux niveaux de masques de photolithographie compatibles avec les équipements disponibles ont ainsi été conçus à l'AIME et réalisés au LAAS-CNRS [3] (Fig.3) :

- le premier niveau pour délimiter, dans l'oxyde de masquage du wafer de silicium, les fenêtres de diffusion de dopants,
- le second niveau pour créer les lignes métalliques de collecte du courant et d'interconnexion vers une circuiterie externe.

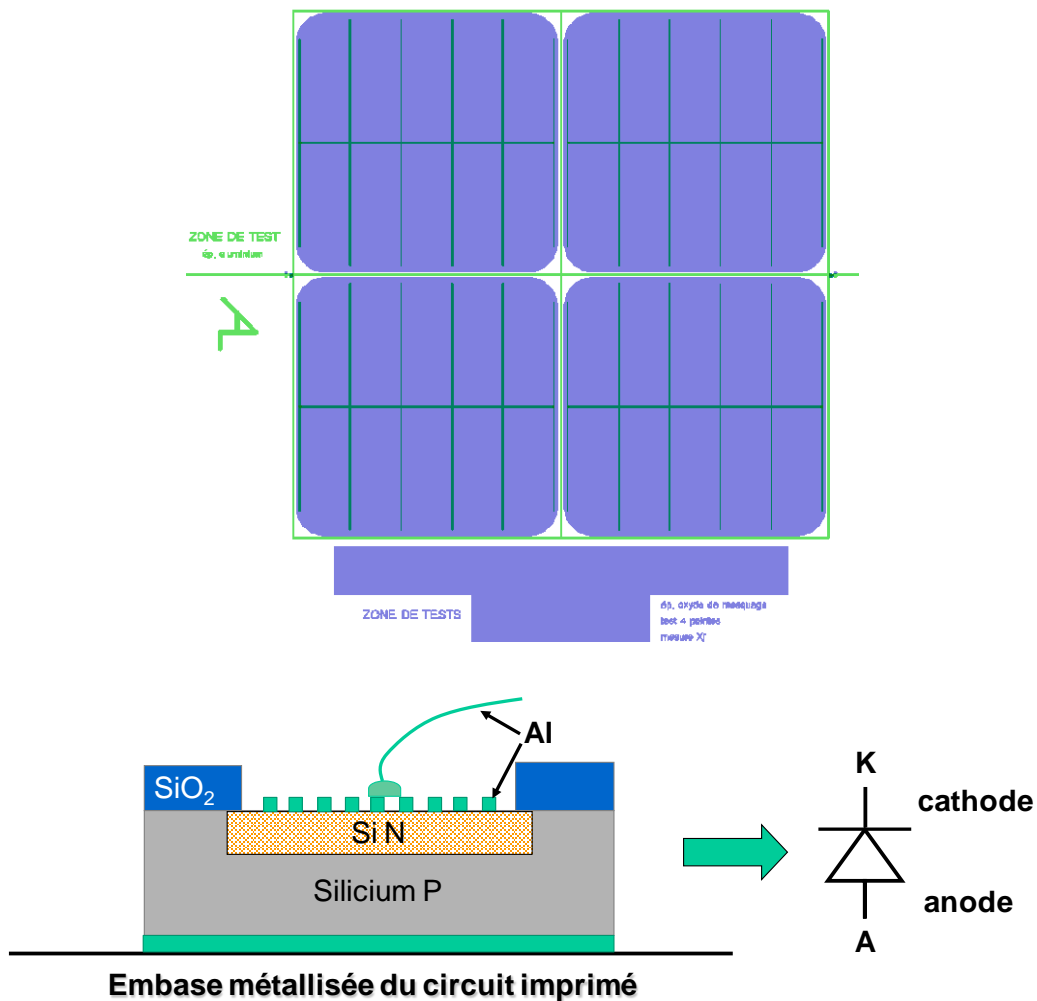


Figure 3 : Haut : Superposition des deux masques conçus pour la réalisation de 4 cellules identiques sur un wafer unique de silicium de diamètre 2 pouces. Bas : schéma en coupe de la structure finale d'une cellule unitaire et symbole correspondant.

Des zones supplémentaires ont également été prévues sur ces deux masques afin de permettre les caractérisations physiques et électriques intermédiaires nécessaires à la vérification du bon déroulement du procédé technologique en cours d'exécution (épaisseurs des couches d'oxyde ou de métal, dopages du silicium pré- et post-diffusion).

Au-delà du dispositif « standard », et dans le cadre d'une amélioration optionnelle de ses performances, il est à noter qu'un troisième niveau de masquage a été conçu pour dégager les plots d'interconnexion lors de la mise en œuvre d'une couche antireflet (voir partie 4. Procédé de Fabrication).

Les différents masques qui viennent d'être décrits sont disponibles en trois exemplaires, utilisables par trois binômes d'étudiants sur trois machines à insoler en parallèle (Fig.4).

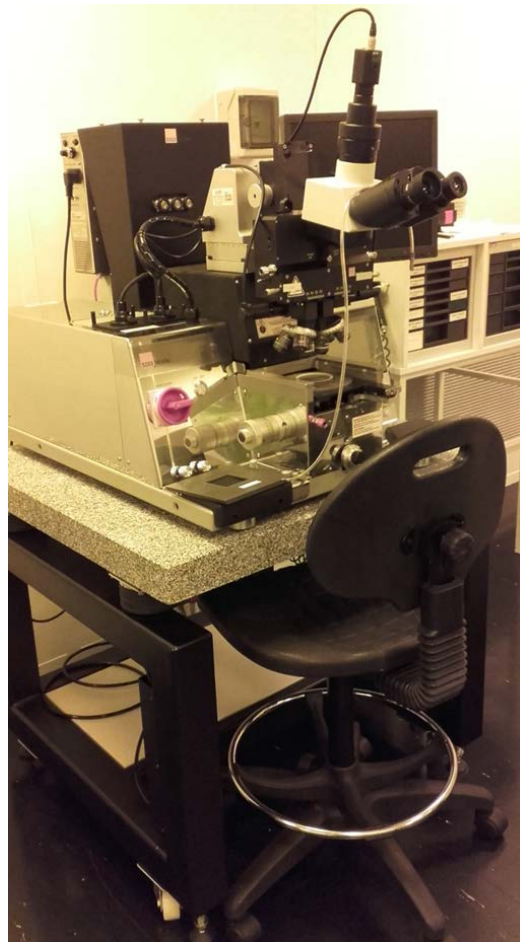


Figure 4 : Machine à insoler utilisée pour les différentes étapes de photolithographie.

Après une première réalisation testée en configuration réelle de stage pour étudiants, la pertinence des masques proposés a été confirmée tout en dégagant quelques pistes d'amélioration. Nous avons alors décidé de perfectionner le dessin des cellules photovoltaïques pour tenir compte de plusieurs paramètres impactant leurs performances, comme indiqué ci-dessous.

Nous avons choisi de :

- réduire la largeur des doigts de la grille de contact afin de diminuer le taux de couverture (ou d'ombre) dû aux métallisations en surface,

- espacer les doigts de la grille en respectant au mieux les résultats d'optimisation proposés par Cheknane & al [4],
- placer deux plots d'interconnexion, de part et d'autre de chaque cellule, afin d'autoriser une utilisation symétrique (donc plus souple) lors de leur assemblage sur les supports PCB qui servent de véhicule de test,
- arrondir les angles de chaque cellule, à l'image des cellules commerciales qui sont optimisées, à la fois, pour recouvrir la plus grande surface des wafers de silicium et limiter les zones évidées lors de leur association sur des panneaux [2]. Ce dernier point éveille généralement la curiosité des étudiants et suscite des questions de leur part.

4 PROCEDE DE FABRICATION

Dans les années 1950, les premières cellules solaires réalisées utilisaient des substrats de type N (dopés au phosphore). A cette époque, leur première application n'était pas terrestre mais spatiale, pour l'alimentation électrique des satellites [5]. Les substrats de type P se révélant plus résistants aux radiations, les cellules photovoltaïques ont ensuite été développées sur du cristal dopé au bore. Ces premières cellules étaient seulement constituées d'une jonction diffusée et d'un contact ohmique. Par rapport à ces simples photodiodes, l'architecture des cellules photovoltaïques a ensuite rapidement évolué pour aboutir à l'architecture standard actuelle. Nous partirons donc de ce dernier type de substrats, de type P, pour la réalisation technologique des composants projetés, en cohérence avec le modèle Scilab décrit précédemment.

A la différence des procédés de réalisation de dispositifs microélectroniques, on utilise ici toute la surface du wafer de silicium. Ces wafers sont initialement découpés en usine, à la scie à fil, dans des lingots cylindriques selon différents procédés. Bien qu'une épaisseur de 10 μm suffirait théoriquement pour que la quasi-totalité des photons du domaine visible soit absorbée, les techniques actuelles de découpe ne permettent pas d'atteindre des épaisseurs inférieures à 100 μm . D'autre part, des épaisseurs aussi faibles réduisent considérablement la résistance mécanique des wafers et imposent une manipulation très minutieuse de ces derniers. Pour le procédé de fabrication envisagé, et sachant que les manipulations seront effectuées par des étudiants, nous utiliserons donc des wafers présentant une épaisseur de 300 μm . Ainsi, nous nous affranchissons en partie du risque de casse en cours de procédé.

Au niveau industriel, trois grandes avancées technologiques ont permis l'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques. Il s'agit respectivement de :

- la texturation de surface supérieure des cellules (texturation de la face avant),
- l'usage d'une couche antireflet (CAR) sur la face avant,
- l'usage d'un champ de surface arrière (Back Side Field : BSF).

Nous avons donc choisi de proposer, en option, ces différentes étapes technologiques dans le procédé de fabrication afin de faire appréhender aux étudiants l'importance de chacune de ces opérations. Nous offrons bien sûr la possibilité de ne pas appliquer systématiquement l'ensemble de ces trois options afin, par exemple, de pouvoir comparer la part de chacune d'elles sur le rendement du dispositif final. Cependant, il est à noter que l'utilisation d'une texturation de la face avant, alliée à une couche antireflet (CAR), permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident.

Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface de la plaquette de silicium (option 1). Cela permet de multiplier les angles d'incidence et donc les possibilités pour la lumière de pénétrer dans le matériau. Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie humide alcaline (KOH, ...). Cependant, les voies humides acides et les voies

sèches font l'objet d'un intérêt croissant et nous nous sommes ainsi orientés vers une attaque humide $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}$ pour éviter, notamment, une contamination éventuelle de la salle blanche par le Potassium. La figure 5 montre un exemple de texturation de surface obtenue par le procédé retenu.

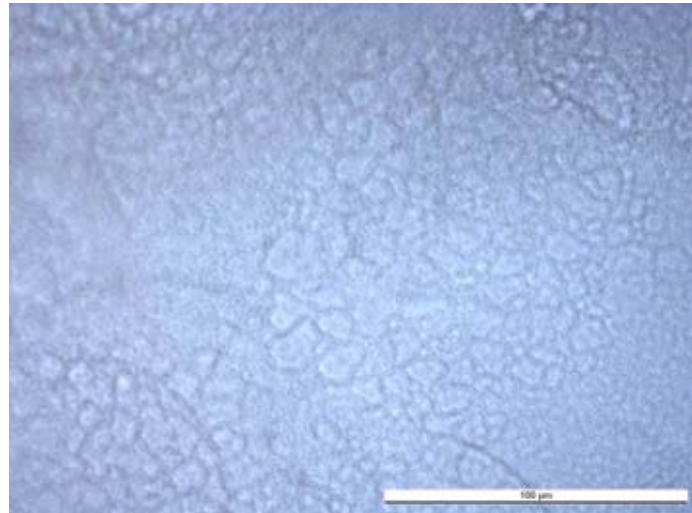


Figure 5 : Résultat d'une attaque acide de texturation sur une surface de silicium initialement polie.

Une couche antireflet peut également être déposée sur la face avant des cellules pour améliorer le confinement optique (option 2) [6]. La CAR permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le silicium, et ainsi minimiser les réflexions. Pour cela, il est nécessaire que cette couche présente un indice de réfraction ainsi qu'une épaisseur adaptés au milieu extérieur. La CAR la plus répandue pour les cellules photovoltaïques est constituée de nitrure de silicium hydrogéné ($\text{a-SiN}_x\text{:H}$). En effet, ce matériau permet de combiner des propriétés optiques excellentes et un niveau élevé de passivation de surface. Ne disposant pas de l'équipement nécessaire pour le dépôt de telles couches, nous nous sommes orientés vers l'utilisation d'un matériau de type AZ BARLi II 200 qui se dépose à la tournette. Après un recuit à 180°C , ce matériau peut être structuré par gravure sèche (source gazeuse : $\text{CHF}_3/\text{C}_2\text{F}_6/\text{O}_2$) ou par plasma oxygène. Cette couche, de l'ordre de 200 nm d'épaisseur, permet de réduire la réflectivité des semiconducteurs qui, en l'absence de ce type de traitement, est habituellement de l'ordre de 30% dans le domaine du visible.

En face arrière des cellules photovoltaïques, il est nécessaire de prendre un contact métallique sur l'anode. Au niveau du contact, la vitesse de recombinaison de surface atteint des valeurs très élevées qui diminuent le rendement des dispositifs. Pour réduire le taux de recombinaison sur cette face arrière, il est possible de diminuer les défauts d'interface ou d'éloigner un des types de porteurs. L'efficacité d'un champ répulsif en face arrière a été d'abord démontrée par la réalisation d'un gradient de dopage : la jonction ainsi formée éloigne les porteurs minoritaires de la face arrière et diminue les recombinaisons au niveau du contact. Dans le cas de cellules standards, la technique la plus répandue au niveau industriel utilise une couche d'Aluminium déposée en face arrière (option 3) [7]. Lors d'un traitement thermique adapté, un alliage eutectique AlSi est formé qui, en refroidissant, donne naissance à une zone dopée Aluminium. Cette étape technologique agit doublement sur la longueur de diffusion des porteurs en diminuant, à la fois, les recombinaisons volumiques et surfaciques. Cette étape optionnelle a donc été retenue pour le procédé développé à l'AIME.

Ces diverses possibilités d'amélioration étant établies, leur évaluation a permis de quantifier l'impact qu'on pouvait en attendre sur les performances des dispositifs. Ainsi, une cellule photovoltaïque réalisée selon le procédé technologique « basique », c'est-à-dire sans avoir recours à l'une des options proposées, présente un rendement généralement compris entre 5% et 7%. L'application d'une métallisation sur la face arrière suivie d'un recuit approprié (option 3) permet d'obtenir un rendement pouvant atteindre, voire dépasser, 14% (voir exemple dans la partie 5 « Caractérisation »). Cette amélioration notable des performances, au prix d'une très légère complexité technologique, nous a progressivement conduits à proposer l'application systématique de cette option dans le déroulement du procédé. La texturation de la face avant par voie chimique (option 1) ou le dépôt d'une couche anti-reflet (option 2) sont quant à elles des opérations technologiques un peu plus longues et complexes dont l'impact attendu sur les performances est sensiblement identique. Ainsi, une seule des options 1 ou 2 associée à l'option 3 peut permettre d'atteindre des rendements voisins de 17%, et l'application des trois options proposées conduit à des valeurs de rendement proches de 20%, caractéristiques de cellules photovoltaïques ordinaires réalisées à partir de silicium monocristallin.

En pratique, et selon les options retenues, la réalisation technologique des cellules photovoltaïques (4 cellules par wafer) peut maintenant se résumer aux principales étapes suivantes appliquées à un wafer de silicium de type P et de diamètre 2 pouces :

- oxydation de masquage,
- photogravure n°1 d'ouverture de diffusion de la cathode,
- gravure humide de l'oxyde de masquage après protection de la face arrière,
- ** option 1 : texturation de la face avant par voie chimique,*
- dopage de la cathode par diffusion thermique (Fig.6),
- désoxydation des fenêtres de diffusion,
- métallisation de la face avant,
- photogravure n°2 pour la gravure du métal en face avant,
- ** option 2 : dépôt et structuration d'une couche antireflet en face avant,*
- désoxydation de la face arrière après protection de la face avant
- ** option 3 : métallisation de la face arrière et formation du BSF par recuit rapide,*
- découpe, montage sur support PCB et microsoudure des contacts.

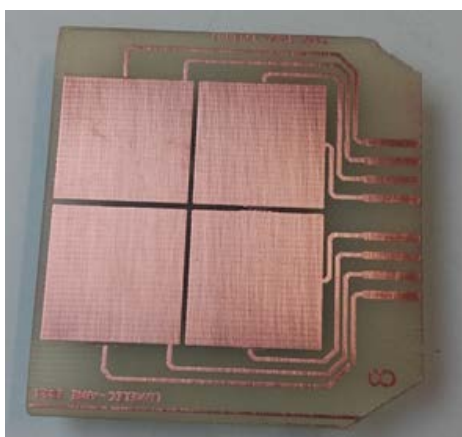
Il est à noter que, en parallèle de ces étapes technologiques, des mesures sont effectuées sur une plaquette « témoin » dédiée aux tests afin de déterminer les différentes épaisseurs, dopages et profondeur de jonction pendant le déroulement du procédé de fabrication.

D'autre part, dans un souci permanent d'amélioration du procédé, et afin de proposer une diversification des solutions apportées, nous travaillons actuellement sur la possibilité de remplacer le peigne de contact en Aluminium, sur la face avant, par une solution alternative permettant de réduire les pertes optiques induites par l'ombrage de ces contacts. Une fois établie et maîtrisée, cette quatrième étape optionnelle sera exploitable par les étudiants, en complément des trois précédentes qui viennent d'être présentées.

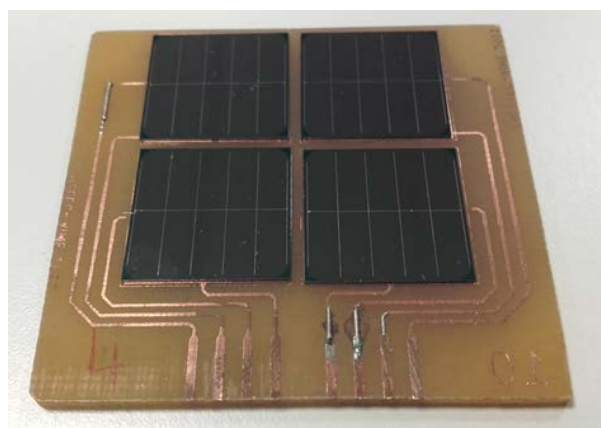


Figure 6 : Four de dopage de la cathode par diffusion thermique.

In fine, le procédé « standard » de réalisation et de caractérisation (incluant aujourd'hui l'option 3) se déroule sur deux journées complètes et est effectué par des étudiants travaillant en binôme. Un procédé « à option(s) 1 ou 2 » peut, quant à lui, demander une demi-journée à une journée supplémentaire en fonction des améliorations recherchées. Cependant, chaque procédé se termine par les étapes communes de découpe, de report sur support PCB (Fig.7a) et de microsoudure des cellules photovoltaïques afin de constituer le véhicule test (Fig.7b) permettant la caractérisation des dispositifs.



(a)



(b)

Figure 7 : (a) Support PCB avant le report des cellules photovoltaïques, (b) Véhicule test constitué par le support PCB portant 4 cellules issues de la même plaquette de silicium (le côté d'une cellule mesure 16,5 mm).

5 CARACTERISATION

A l'issue du procédé technologique, l'objectif est de tester les dispositifs réalisés en offrant plusieurs niveaux d'approfondissement. Ainsi, nous proposons de relever et interpréter des caractérisations électriques et optiques correspondant à des publics et des niveaux de formation différents.

Le banc de caractérisation mis en œuvre a pour ambition de démontrer aux étudiants, d'une part, que sans pièce mécanique en mouvement, sans bruit, sans recours aux énergies fossiles et sans production de polluants, les cellules photovoltaïques qu'ils ont fabriquées convertissent directement l'énergie solaire en électricité sous forme de courant continu et, d'autre part, que l'utilisation de cette énergie nécessite des stratégies et des précautions particulières. L'objet de cette séance de caractérisation est alors de leur faire découvrir et interpréter les performances des cellules solaires individuelles ou assemblées en mini-panneaux, ainsi que d'acquérir quelques notions de radiométrie. Pour cela, les expériences installées en salle de caractérisation de l'AIME se répartissent en quatre modules qui permettent de :

- Tracer et comprendre les caractéristiques I(V) d'une cellule solaire individuelle.
- Monter en série et en parallèle des cellules solaires pour la réalisation d'un panneau.
- Mettre en évidence les effets d'ombrage et le rôle de diodes anti-retour.
- Mettre en place une application permettant d'utiliser l'énergie électrique générée.

Le banc de caractérisation développé à cet effet est représenté sur la figure 8 et il est composé des principaux éléments suivants :

- Un simulateur solaire délivrant un faisceau de lumière collimaté dont l'intensité peut être ajustée de façon continue.
- Un puissance-mètre optique ou un luxmètre.
- Un support mécanique (support d'illumination) nécessaire au maintien du véhicule test et à son positionnement précis par rapport au flux lumineux.
- Un boîtier de « multiplexage » permettant la réalisation de différentes configurations lors de l'association des cellules élémentaires du véhicule test (Fig.9).
- Le matériel électronique de polarisation et de mesure (source de tension, oscilloscope,...).
- Le logiciel LabTracer, programme gratuit permettant d'interfacer l'équipement de mesure Keithley Instruments Inc.

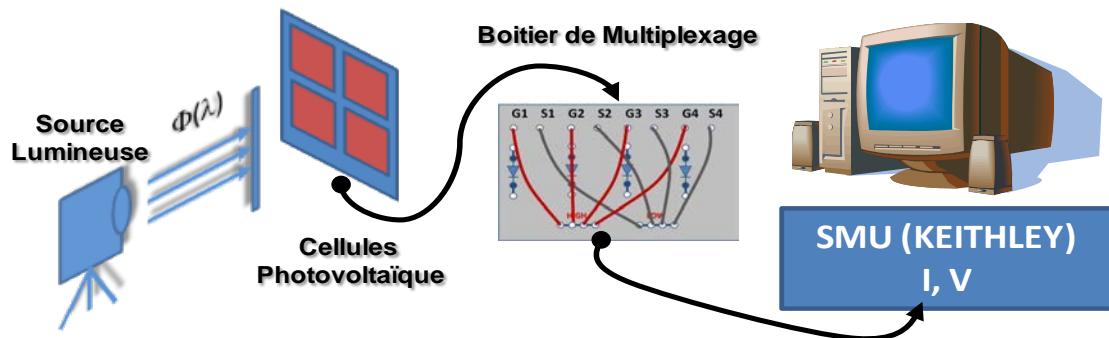


Figure 8 : Schéma du banc de caractérisation.

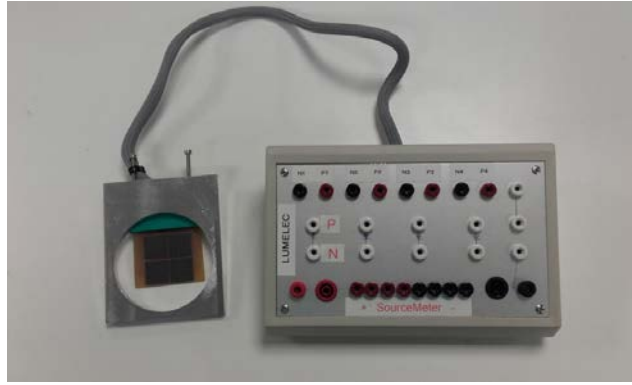


Figure 9 : Véhicule test fixé dans le support d'illumination et relié au boîtier de « multiplexage ». Les bornes rouges et noires de la rangée supérieure du boîtier permettent des associations différentes des cellules. Les bornes blanches centrales permettent la mise en œuvre de diodes anti-retour. Les bornes de la rangée inférieure sont destinées aux appareils de mesure.

Dans la pratique, et dans une première partie, ce banc de test permet de mettre en évidence les caractéristiques fondamentales des cellules réalisées. Il permet de montrer aux étudiants que chaque cellule photovoltaïque délivre un courant sous une tension qui lui est propre, que sa tension lorsqu'aucun courant ne circule à ses pôles est appelée « tension en circuit ouvert » (V_{CO}), et que le courant circulant lorsqu'il n'y a aucune tension est le « courant de court-circuit » (I_{cc}).

Les étudiants comprennent alors que ces deux situations sont les cas extrêmes de fonctionnement de la cellule pour lesquels aucune puissance n'est délivrée. Ils en déduisent que ces situations sont toujours à éviter et qu'il faut faire fonctionner le panneau photovoltaïque avec une tension et un courant à puissance maximale (V_m et I_m). Ce sont alors ces deux paramètres qui servent à déterminer le rendement nominal du panneau photovoltaïque (défini par le rapport de la puissance électrique maximale disponible à la puissance optique du rayonnement incident) dont la puissance est alors exprimée en W_C (Watt crête). En outre, l'exploitation des courbes obtenues permet ensuite d'extraire le Facteur de Forme (filling factor) FF, et donne alors l'occasion de réfléchir à la relation entre les étapes technologiques du procédé et les caractéristiques électriques observées.

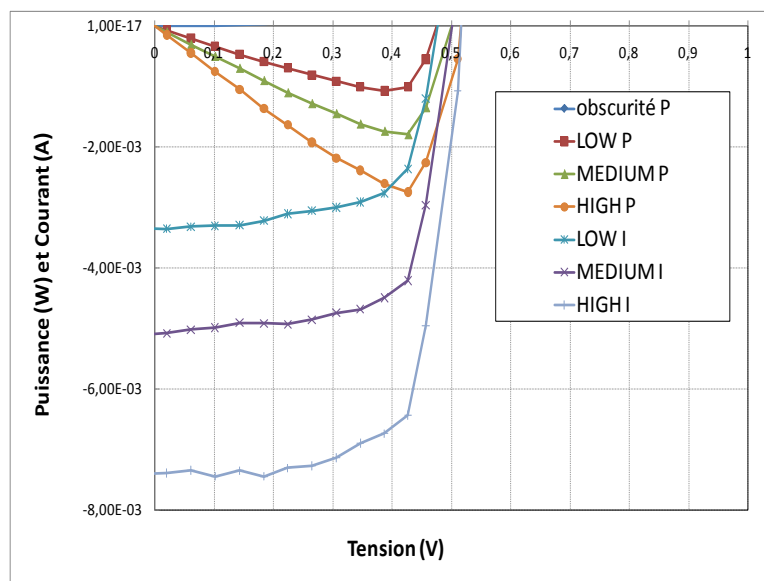


Figure 10 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ sous éclairissement croissant (de haut en bas) d'une cellule photovoltaïque individuelle.

La figure 10 présente un exemple de caractéristiques d'une cellule individuelle testée par les étudiants en faisant varier l'intensité lumineuse incidente, et pour laquelle ils ont obtenu les caractéristiques de fonctionnement suivantes : $V_{CO} \sim 510 \text{ mV}$, $I_{CC} \sim 7.4 \text{ mA}$, $P_{Max} \sim 1.2 \text{ mW}$ et un rendement $\eta \sim 14.5\%$.

Ensuite, dans une seconde partie, l'étude porte sur la caractérisation d'associations de cellules assemblées en série et/ou en parallèle. Les cellules constituent alors un module photovoltaïque fournissant la tension et le courant électrique qui déterminent la puissance utile disponible. En explorant différentes associations, on peut alors rechercher à optimiser cette puissance. La figure 11 présente un exemple de caractéristiques pour quatre cellules individuelles associées en série par les étudiants, et pour lesquelles ils ont obtenu les caractéristiques suivantes (en condition d'éclairé maximal disponible) : $V_{CO} \sim 2.11 \text{ V}$, $I_{CC} \sim 8.37 \text{ mA}$, $P_{Max} \sim 15 \text{ mW}$.

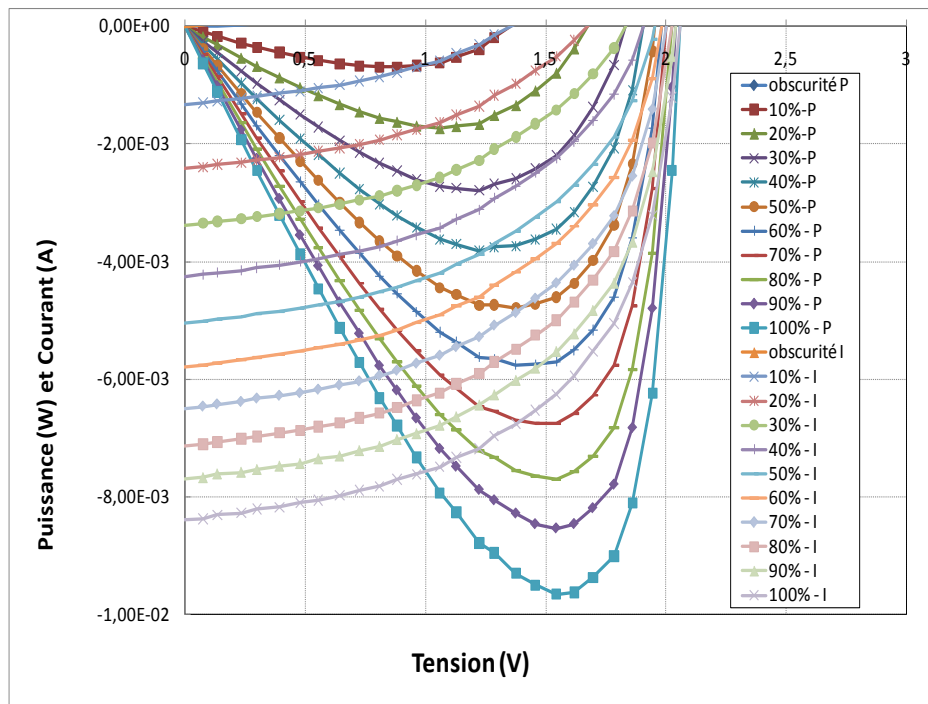


Figure 11 : Caractéristiques I(V) et P(V) sous éclairé croissant (de haut en bas) de 4 cellules photovoltaïques mises en série.

En troisième partie de caractérisation, nous simulons l'effet de l'ombrage d'une ou plusieurs cellules constituant un panneau solaire afin de permettre aux étudiants de comprendre l'utilité de placer, dans le circuit électrique, des diodes anti-retour (DAR) en série avec chaque cellule ou module.

Enfin, dans la quatrième et dernière partie, nous mettons les étudiants en situation d'utiliser la puissance électrique sur une charge et ainsi de travailler sur une application concrète : alimentation d'un moteur électrique surmonté d'un ventilateur (Fig.12), allumage d'une LED... C'est alors l'occasion pour les étudiants d'appliquer toutes les stratégies développées précédemment (association en série, en parallèle, gestion d'ombrage,...) et de choisir le meilleur montage possible en fonction des applications visées.

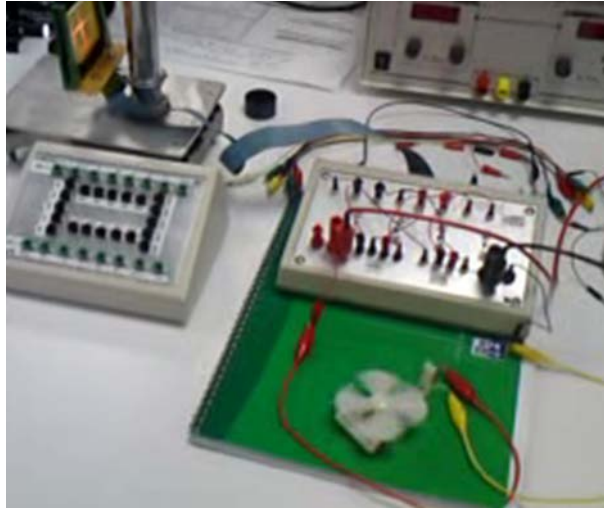


Figure 12 : Vue du boîtier de « multiplexage » reliant les cellules du véhicule test à un moteur de ventilateur. Le moteur est actionné uniquement par l'énergie lumineuse convertie en énergie électrique.

On peut noter que, à court terme, le banc actuel de caractérisation doit évoluer pour permettre de mesurer les données nécessaires au tracé de la réponse spectrale des cellules étudiées. Dans cette perspective, nous travaillons à la mise en place du matériel suivant :

- une série de filtres colorés permettant un échantillonnage spectral centré sur une dizaine de longueurs d'ondes,
- une série de filtres neutres permettant, pour chaque longueur d'onde, le choix de la puissance optique incidente avec une grande dynamique,
- des supports de filtres «à barillet» pour une manipulation rapide, aisée et sûre, des deux séries de filtres ci-dessus,
- deux lentilles convergentes et deux diaphragmes variables permettant de modifier la mise en forme initiale du faisceau lumineux en vue de travailler dans des configurations spécifiques.

Ainsi, outre la caractérisation approfondie des cellules photovoltaïques réalisées par les étudiants, ce nouveau banc permettra la caractérisation d'un large panel de photodétecteurs afin de mener une étude comparative de leurs performances en fonction des applications visées.

6 FORMATIONS ACCUEILLIES ET TRAVAIL TYPE D'UN ETUDIANT

Depuis sa création, le procédé LUMELEC a accueilli près de 1900 étudiants en provenance de 16 filières ou établissements, et a conduit à la formation de 16 encadrants. Les niveaux d'études concernés vont du L2 au M2, avec une fréquentation très disparate selon les niveaux comme le montre le bilan exhaustif présenté ci-dessous. Il est à noter qu'au-delà des effectifs propres à chaque formation, la disparité dans la fréquentation est en grande partie due au nombre d'années durant lesquelles ces formations ont effectué le procédé LUMELEC.

Niveau L2 : 933 étudiants (49% de la fréquentation)

- IUT Toulouse III - DUT Mesures Physiques
- INSA Toulouse - 2^{ème} Année IMACS (Pré-orientation Ingénierie des Matériaux, Composants et Systèmes)

Niveau L3 : 89 étudiants (5% de la fréquentation)

- Université Aix Marseille - L3Pro Consept (Conception des Systèmes Électroniques et Optoélectroniques)
- IUT Toulouse III - L3Pro ISIAER (Instrumentation et Systèmes Innovants pour une Agriculture Éco-Responsable)
- Université Paul Sabatier Toulouse III - L3 Physique Parcours Spécial

Niveau M1 : 54 étudiants (3% de la fréquentation)

- Université Paul Sabatier Toulouse III - M1 Physique Fondamentale et Applications

Niveau M2 : 819 étudiants (43% de la fréquentation) :

- ENSMM Besançon (École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques), 3^{ème} Année, Option Énergie Transport et Environnement
- ENSCBP-INP Bordeaux (École Nationale Supérieure de Chimie, de Biologie et de Physique), 3^{ème} Année, Module Stockage et Conversion de l'Énergie
- ENSIL Limoges (École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges), 3^{ème} Année Électronique et Télécommunications
- Université Aix Marseille - M2 IMM (Instrumentation, Mesure, Métrologie)
- Polytech Marseille, 3^{ème} Année Microélectronique et Télécommunications
- ENSIACET-INP Toulouse (École Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologiques), 3^{ème} Année, Parcours Fonctionnalité, Matériaux Innovants
- ISAE Toulouse (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace), 3^{ème} Année, Module optionnel Énergie Électrique pour les Véhicules Autonomes
- Université Paul Sabatier Toulouse III - M2 PFA-IDIM (Physique Fondamentale et Applications, Parcours Ingénierie du Diagnostic, de l'Instrumentation et de la Mesure)
- Université Paul Sabatier Toulouse III - M2 PFA-PEnTE (Physique Fondamentale et Applications, Parcours Physique de l'Énergie et de la Transition Énergétique)
- Universidade Santa Cecília (Brésil), Cursos de Engenharia Eletrônica, Elétrica, de Telecomunicações e de Computação

Au cours d'un stage LUMELEC, le travail type réalisé par un étudiant se répartit sur quatre demi-journées selon l'enchaînement décrit plus bas. Il s'agit ici du travail réalisé en salle blanche lors du procédé « standard » incluant aujourd'hui l'option 3, hors étude théorique ou simulations préalables du dispositif. Les étudiants travaillent en binôme sous la responsabilité d'un enseignant qui a en charge au plus six étudiants. A l'exception de quelques opérations spécifiques précédées par le signe (*), les étudiants effectuent l'intégralité des manipulations indiquées dans ce qui suit.

1^{ère} demi-journée : *sécurité en salle blanche, traitement du témoin, photolithographie n°1.*

Avant l'entrée en salle blanche, l'enseignant rappelle les consignes de sécurité et de propreté à appliquer ainsi que l'obligation stricte de les respecter (les étudiants ont signé préalablement une charte à ce sujet). Chacun revêt un équipement personnel dans le sas d'entrée de la salle blanche selon la procédure indiquée (blouse, charlotte, sur-chausses, gants, sur-lunettes). Dès l'entrée en salle blanche, les dispositifs de sécurité sont repérés (alarmes, rince-œil, douche,...). Chaque

binôme prend ensuite possession d'une plaquette de silicium « composant » et d'une plaquette « témoin » avec des pinces brucelles individuelles pour leur manipulation. Ces deux plaquettes identiques portent un oxyde de masquage épais sur leurs deux faces.

Les binômes procèdent alors aux opérations suivantes :

- mesure de l'épaisseur de la plaquette « témoin » au moyen d'un palmer électronique. Découpe de cette plaquette en deux parties destinées à l'étalonnage du bain d'attaque de l'oxyde de masquage, et application d'un film de protection sur la moitié de chaque partie découpée. (Il s'agit d'un film adhésif résistant aux attaques acides et aux solvants, et pouvant être retiré après exposition à une lampe UV.)
- (*) immersion successive des deux parties du « témoin » dans un bain « buffer HF » (acide fluorhydrique) avec contrôle visuel de l'attaque de l'oxyde. Le temps d'attaque à appliquer ultérieurement sur la plaquette « composant » est ainsi déterminé et noté.
- retrait du film de protection, rinçage et séchage des deux parties du « témoin ». Mesure de la résistivité du substrat silicium par la « méthode des 4 pointes » et détermination de la concentration en dopant P.
- entrée en salle de photolithographie pour effectuer l'enchaînement technologique destiné à l'ouverture des zones de diffusion de dopant N sur la plaquette « composant » (photolithographie n°1) : déshydratation de la plaquette, dépôt du promoteur d'adhérence suivi du dépôt de la résine photosensible et 1^{er} recuit de la résine sur plaque chauffante. Insolation de la résine sur machine à insoler, développement de la résine, rinçage, séchage et observation sous microscope des motifs révélés. Si le développement est satisfaisant, le 2^{ème} recuit de la résine est appliqué, sinon, la plaquette est délaquée et l'enchaînement technologique est repris à partir de l'étape de déshydratation.

2^{ème} demi-journée : gravure de l'oxyde, dopage N, métallisation face avant, caractérisations.

- protection de la face arrière de la plaquette « composant » au moyen de film adhésif. (*) Immersion de la plaquette dans le buffer HF pendant le temps déterminé précédemment. Rinçage, séchage, et contrôle de la qualité de la gravure sous microscope. En cas de sous-gravure, une brève immersion dans le buffer HF peut à nouveau être appliquée. Retrait du film adhésif, dissolution de la résine, rinçage et séchage.
- nettoyage de la plaquette « composant » et d'une partie du « témoin » au moyen d'un bain approprié (acide sulfurique et eau oxygénée), rinçage, séchage, puis introduction des éléments nettoyés dans le four de diffusion pour dopage N des zones de cathode.
- pendant l'étape automatique de diffusion, mesure de l'épaisseur d'oxyde de masquage sur la partie du « témoin » qui n'a pas été enfournée (mesure effectuée par profilométrie mécanique ou par ellipsométrie).
- à l'issue de l'étape de diffusion, protection d'une bande médiane sur la partie du « témoin » sortie du four et (*) immersion de celle-ci dans le buffer HF avec contrôle visuel pour déterminer le temps d'attaque de l'oxyde de diffusion. Rinçage et séchage.
- (*) immersion de la plaquette « composant » dans le buffer HF pendant le temps qui vient d'être déterminé. Rinçage et séchage, puis (*) introduction de la plaquette « composant » dans le bâti de métallisation afin de déposer une couche d'Aluminium sur sa face avant.
- pendant l'étape automatique de métallisation, mesure des différentes épaisseurs d'oxyde sur la partie du « témoin » sortie du four. Mesure de la résistivité de la zone dopée N par la « méthode des

4 pointes ». Mesure de la profondeur de jonction (rodage mécanique et révélation chimique), et détermination de la concentration de dopant N en surface.

3^{ème} demi-journée : *photolithographie n°2, métallisation face arrière, découpe et montage.*

- entrée en salle de photolithographie pour effectuer l'enchaînement technologique destiné à la définition des contacts métalliques sur la plaquette « composant » (photolithographie n°2) : déshydratation de la plaquette, dépôt de la résine photosensible et 1^{er} recuit de la résine sur plaque chauffante. Après alignement du masque sur la machine à insoler, insolation de la résine, développement, rinçage, séchage et observation sous microscope des motifs révélés. Si le développement est satisfaisant, le 2^{ème} recuit de la résine est appliqué, sinon, la plaquette est délaquée et l'enchaînement technologique est repris à partir de l'étape de déshydratation.
- immersion de la plaquette dans un bain d'attaque d'aluminium avec contrôle visuel. Rinçage, séchage et observation au microscope.
- protection de la face avant de la plaquette avec du film adhésif. (*) Immersion de la plaquette dans le buffer HF pour désoxydation de la face arrière avec contrôle visuel. Rinçage, séchage, retrait du film adhésif et dissolution de la résine.
- (*) introduction de la plaquette dans le bâti de métallisation afin de déposer une couche d'aluminium sur sa face arrière. Après métallisation, introduction de la plaquette dans le four de recuit du métal sous flux d'azote hydrogéné.
- (*) découpe de la plaquette à la scie diamantée pour séparer les quatre cellules qu'elle comporte.
- collage des cellules sur support PCB au moyen d'une colle conductrice permettant la prise de contact sur leur face arrière (côté P).
- (*) micro-soudure des fils de connexion sur la face avant (côté N) des cellules.

4^{ème} demi-journée : *caractérisations des dispositifs réalisés et interprétations.*

Cette demi-journée est consacrée à la caractérisation de fonctionnement des cellules photovoltaïques au moyen du banc de test et selon la procédure dont la description a été faite dans la partie 5 « Caractérisation ». Une interprétation des différents résultats fait alors l'objet d'échanges entre étudiants et encadrants.

Il est à noter qu'à l'issue du stage, et selon les objectifs de la formation concernée, divers types d'évaluations peuvent être envisagés et éventuellement jumelés :

- un court questionnaire (QCM) sur les principales étapes et principes mis en œuvre au cours du procédé technologique ;
- un rapport écrit sur l'ensemble du procédé, ou sur une étape technologique particulière (imposée ou laissée au choix de l'étudiant) ;
- un rapport écrit sur les performances des cellules et leur interprétation, notamment en lien avec les caractérisations physiques réalisées en cours de procédé ;
- toute autre forme d'évaluation pouvant être associée, ou non, à des enseignements connexes dispensés par ailleurs (physique des semi-conducteurs, simulations physiques, technologie microélectronique, énergies renouvelables, ...).

7 CONCLUSION

Le procédé technologique LUMELEC, proposé au sein de l'AIME depuis 2012, est l'aboutissement d'un projet collaboratif de formation portant sur la modélisation, la technologie et la caractérisation de composants optoélectroniques. Son objectif est de proposer une démarche à la fois théorique et expérimentale conduisant les étudiants des niveaux L2 à M2 à maîtriser les divers paramètres conditionnant les performances de cellules solaires prises isolément ou assemblées en panneau. Le caractère résolument modulaire des enseignements proposés permet à des formations diverses d'approfondir les aspects de leur choix. A ce jour, ce volet de formation a été suivi par près de 1900 étudiants, issus de 16 filières, qui nous ont très largement fait part d'un grand intérêt pour cette forme d'enseignement et les notions qu'elle permet de maîtriser.

Actuellement, une nouvelle amélioration du banc de caractérisation est en cours. Elle permettra, à terme, de mener une caractérisation poussée et comparative de divers photodétecteurs en vue d'applications variées. Les étudiants seront ainsi amenés, à partir de leurs propres réalisations, à approfondir les principaux concepts de la photodétection afin de pouvoir les utiliser dans le cadre d'applications toujours plus diverses et reposant sur des flux lumineux de nature différentes, tant en termes de propriétés spectrales que de propriétés spatiales, énergétiques ou temporelles.

Enfin, au-delà des aspects pédagogiques développés ici, et dans le but d'adapter cette formation à un public beaucoup plus large que le public universitaire, nous envisageons d'initier des collaborations avec le milieu industriel du photovoltaïque, ce domaine étant aujourd'hui un secteur très évolutif et en résonance avec une préoccupation sociétale grandissante sur le développement de sources d'énergie propres, alternatives et renouvelables.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Reasmey TAN et Julien SCHAUBER pour les nombreux échanges et discussions permettant la réalisation et le suivi efficace du procédé LUMELEC.

Références

- [1] <http://www.aime-toulouse.fr>
- [2] Phys. Educ. Vol.55, N.1, 015006, *Understanding the evolution of the geometry of silicon solar cells* (9pp), 2020.
- [3] <https://www.laas.fr/public/fr/plate-forme-de-micro-et-nanotechnologies>
- [4] Rev. Energ. Ren. Vol.7, pp.95-108, 2004.
- [5] Bailey S. and Raffaella R. *Solar Cells and Their Applications* (New York: Wiley), ch.18, pp.395-424, 2010.
- [6] Inter. Conf. on Photovoltaic Power Generation, Hamburg, pp.487-490, 1974.
- [7] IEEE Trans. Elec. Dev., Vol.46, N.7, pp.1363-1370, 1999.

Biographie des auteurs

Philippe ARGUEL est Professeur à l'Université Toulouse III - Paul Sabatier où il est responsable du Master 1 « Systèmes et Microsystèmes Embarqués ». Il enseigne l'optique et l'optoélectronique à différents niveaux de formations et il s'implique depuis plusieurs années dans des actions de diffusion de culture scientifique. Il mène ses activités de Recherche au sein de l'équipe Photonique du LAAS-CNRS où il étudie l'intégration photonique dans les microsystèmes.

Jérémy GRISOLIA est Professeur des Universités à l'INSA de TOULOUSE où il est directeur du Département de Génie Physique depuis 2018. Il enseigne en physique générale, physique des dispositifs à semi-conducteurs, instrumentation physique, tests et mesures, systèmes embarqués, nanotechnologies, microsystèmes... Sa recherche se développe au sein du Laboratoire de Physique et Chimie de Nano-Objets (LPCNO), à l'interface entre physique et chimie, pour la réalisation et l'étude de dispositifs mémoires (nanocristaux de silicium, changement de phase...) et du couplage entre plasmonique et transport électronique dans les assemblées de nanoparticules pour la réalisation de capteurs innovants.

Jérôme LAUNAY est Enseignant-Chercheur à l'IUT Paul Sabatier de Toulouse. Il enseigne au sein du Département Mesures Physiques la mise en œuvre de capteurs et leur conditionnement. Sa thématique de recherche, menée au LAAS-CNRS, est centrée sur l'étude, le développement et la fabrication de microcapteurs bioélectrochimiques pour la détection en phase liquide. Les champs d'application auxquels il se confronte sont la santé, l'environnement et l'agroalimentaire.

Hélène TAP est Professeure à Toulouse INP-ENSEEIH. Elle enseigne principalement l'électronique analogique et la physique des semi-conducteurs. Sa recherche s'effectue dans l'équipe OASIS du LAAS-CNRS sur l'intégration de fonctions analogiques pour des systèmes embarqués intelligents. Elle est actuellement Vice-Présidente CFVU de Toulouse INP.

Christophe CAPELLO est Technicien à l'INSA de Toulouse, affecté à l'AIME. Il est chargé de l'organisation et de l'encadrement des stages étudiants, de l'exploitation de la plateforme de microscopie à force atomique, des équipements thermiques de salle blanche, et des approvisionnements en matériaux, produits chimiques et consommables.

Chérif ROUABHI est Technicien à l'Université Paul Sabatier (Toulouse), affecté à l'AIME. Il est chargé de l'encadrement des stages étudiants, de l'exploitation de l'implanteur ionique moyen courant et de la maintenance de l'instrumentation.

François GUERIN est Ingénieur d'Etude à l'INSA de Toulouse, affecté à l'AIME de 2002 à 2016 où il a participé au développement des nouveaux procédés de fabrication de dispositifs à semi-conducteurs. Il a ensuite rejoint l'équipe Nanotech du LPCNO pour prendre la responsabilité de sa centrale de technologie. Il apporte régulièrement son expertise technique et scientifique lors des observations des nano-objets en microscopie électronique à balayage et lors d'études par analyse X (EDX).

Frédéric GESSINN est Docteur-Ingénieur de Recherche à l'INSA Toulouse, Responsable de la Centrale de Technologie de l'AIME. Ses activités sont principalement orientées vers l'organisation générale de la plateforme (fonctionnement, budgets, management), le développement de nouveaux procédés technologiques en salle blanche pour la formation des étudiants, la maintenance des installations et la sécurité des personnes et des biens.