

Mise en place d'un TP de simulation, élaboration et caractérisation d'une cellule photovoltaïque de première génération

Céline Ternon^{a,b}, Delphine Constantin^b, Anne Kaminski^{a,b}, Lionel Claudon^{a,b}, Fabien Volpi^{a,b},
 Quentin Rafhay^{a,b}, Ahmad Bsiesy^b

(a) Grenoble-INP – Phelma, 3 parvis Louis Néel – BP257 – 38016 Grenoble Cedex 1

(b) Centre Interuniversitaire de Microélectronique et Nanotechnologies (CIME Nanotech),
 Pôle CNFM de Grenoble, 3 parvis Louis Néel, 38016 Grenoble Cedex 1

Avec les besoins croissants en énergie renouvelable, les activités industrielles dans le domaine du photovoltaïque gagnent une place considérable dans le secteur de l'énergie. Afin d'être en adéquation avec ce marché de l'emploi en plein développement, il devient important de former des ingénieurs compétents dans ce domaine.

Un TP est développé au CIME Nanotech pour simuler, élaborer et caractériser une cellule photovoltaïque de première génération. Le travail de simulation (sur SILVACO) porte sur les procédés de fabrication de la cellule, ainsi que sur sa réponse I-V sous éclairement. La fabrication (effectuée dans la salle blanche du CIME Nanotech) comprend essentiellement les étapes suivantes : (1) texturation de la surface d'un substrat de silicium (2) réalisation d'une jonction pn, (3) dépôt d'une couche anti-reflet et (4) métallisation. Au-delà de la confrontation aux procédés de fabrication en salle blanche, les étudiants appréhendent l'importance d'étapes technologiques comme, par exemple, la texturation ou la couche anti-reflet en organisant des parcours différents à leurs échantillons. Ainsi quatre cellules différentes peuvent être élaborées : une jonction pn simple / une jonction pn avec texturation de surface seule / une jonction pn avec dépôt anti-reflet seul / une jonction pn avec texturation et dépôt anti-reflet. Ces cellules sont ensuite testées électriquement sous obscurité et sous simulateur solaire. Les caractéristiques I-V à l'obscurité et sous éclairement sont mesurées. Les rendements et autres paramètres caractéristiques (facteur de forme, résistance série...) de chaque cellule sont ensuite calculés et comparés.

Introduction

Le développement de l'énergie photovoltaïque connaît un réel essor depuis une dizaine d'années, et de nombreux pôles de recherches y sont maintenant entièrement consacrés. Notamment en Rhône-Alpes où l'INES (Institut National de l'Energie Solaire), localisé à Chambéry, occupe une place de référence dans son domaine à travers l'Europe grâce à des partenaires tels que le CEA ou le CNRS eux mêmes à la tête d'un pôle scientifique majeur de rang international à Grenoble. C'est dans l'optique de mieux préparer les élèves-ingénieurs aux enjeux du contexte énergétique actuel que le cas de l'énergie solaire doit être abordé de façon pédagogique, au sein du groupe Grenoble INP.

Le centre de formation CIME Nanotech et l'école d'ingénieur Phelma, se donnent pour objectif de proposer des enseignements à l'état de l'art des connaissances scientifiques et des moyens technologiques. Cette pédagogie s'appuie évidemment sur les activités de recherche

développées dans de leurs équipes. Avec cet objectif, il est devenu important de mettre en place des enseignements spécifiques dans le domaine de l'énergie solaire, et plus particulièrement dans celui des cellules solaires photovoltaïques de première génération (les plus répandues de nos jours). Dans cette optique, l'objectif majeur de ce projet réalisé au CIME Nanotech est d'établir une chaîne de procédés technologiques fiable permettant la fabrication d'une cellule solaire, dans un but pédagogique.

I. Objectifs pédagogiques

Lors de la conception de ce TP, un certain nombre de choix pédagogiques ont été réalisés. En effet, si l'on considère la filière technologique pour les cellules solaires de première génération, il n'y a que peu de points communs avec les filières technologiques de la microélectronique. Or, le temps en salle blanche pour les étudiants étant limité et n'ayant pas encore de filière d'enseignement entièrement dédiées au photovoltaïque, il nous fallait mettre au point un TP permettant d'allier à la fois découverte des cellules solaires et découvertes des différentes technologies utilisées en salle blanche. Ainsi, des procédés utilisés en standard dans l'industrie du photovoltaïque ont été remplacés par des procédés standard de la microélectronique. Par exemple, plutôt que l'usage de la sérigraphie pour la prise de contact électrique, nous avons opté pour un procédé *lift-off* (photolithographie suivie d'une pulvérisation) pour la face avant et une évaporation pour la face arrière. Egalement dans un premier temps, l'étape de diffusion est remplacée par une implantation ionique suivie d'un recuit, ce qui permet de ne pas avoir à découper la cellule en fin de procédé (effet de bord). Ainsi les procédés découverts par les étudiants au cours de ce TP sont au nombre de neuf : texturation par bain de KOH, implantation ionique, recuit thermique, dépôt par PECVD, pulvérisation et évaporation, photolithographie et gravure humide, technique du *lift-off*. La figure 1 illustre la filière technologique choisie. A ces procédés d'élaboration s'ajoute l'initiation à des techniques de caractérisation comme l'ellipsométrie, la microscopie électronique à balayage (MEB), la profilométrie, la R \square ,...

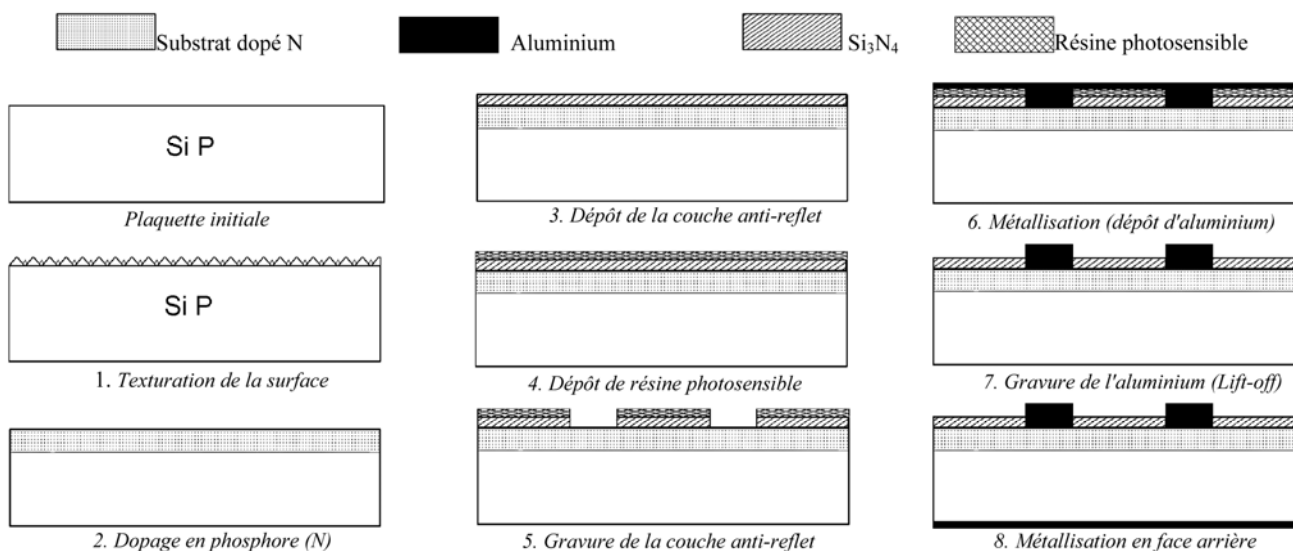


Figure 1 : Vue d'ensemble de la filière technologique choisie. Pour plus de clarté, la texturation n'a pas été reportée sur chacun des schémas.

Enfin, le but de ce TP n'est pas la performance de la cellule mais que les étudiants comprennent l'intérêt des différentes étapes, telles que la texturation et la couche anti-reflet. Ainsi, chaque groupe d'étudiants réalise au cours d'un cycle de TP quatre cellules différentes : (i) une

jonction PN simple, (ii) une jonction PN texturée, (iii) une jonction PN recouverte d'une couche anti-reflet, et (iv) une jonction PN texturée et recouverte d'une couche anti-reflet (voir figure 2). Ainsi lors de la caractérisation, il est possible de déterminer l'apport de chacune des étapes sur le rendement final de la cellule.

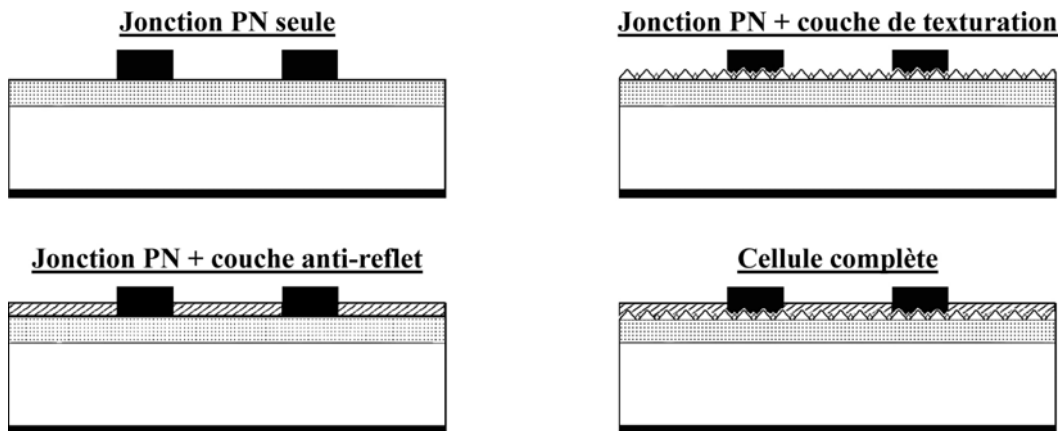


Figure 2 : Coupe des quatre cellules réalisées lors du cycle de TP. Les codes couleurs sont identiques à ceux utilisés sur la figure 1.

Par ailleurs, une séance de simulation sous les logiciels ATLAS et ATHENA de la société Silvaco® a également été conçue en préambule des séances en salle blanche afin de permettre aux étudiants de découvrir les techniques de simulation existantes et de leur permettre de comprendre l'enchaînement des étapes technologiques avant d'y être confronté en salle blanche. Les cellules alors simulées n'intègrent pas l'effet de la couche de texturation.

II. Simulation

Une séance de 4 heures est dédiée à la simulation. Une première étape, réalisée sous ATHENA, permet de simuler la structure de la cellule telle que présentée sur la figure 3a. Pour parvenir à ce résultat, un certain nombre de paramètres sont fournis aux étudiants, tels que les caractéristiques du substrat initial, la dose à implanter, les températures de recuit post-implantation, quelle réflexion doit minimiser la couche anti-reflet... Ainsi, outre la réalisation du programme de simulation, les étudiants doivent également tester les paramètres restants comme la durée du recuit post-implantation ou déterminer l'épaisseur de la couche anti-reflet.

Une seconde étape, réalisée sous ATLAS, permet ensuite de modéliser le comportement électrique sous éclairage obtenu avec une telle cellule. La figure 3b présente la caractéristique $I(V)$ obtenue dans le domaine de fonctionnement actif.

Une fois le programme réalisé, les étudiants sont libres de modifier les différents paramètres, voire éliminer la couche anti-reflet, afin d'en déterminer les conséquences sur les propriétés électriques des cellules.

Enfin, les étudiants n'ayant a priori aucune connaissance sur les cellules solaires, cette séance permet d'introduire les notions fondamentales telles que le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le point de puissance maximum (P_{mp}), le rendement, le facteur de forme...

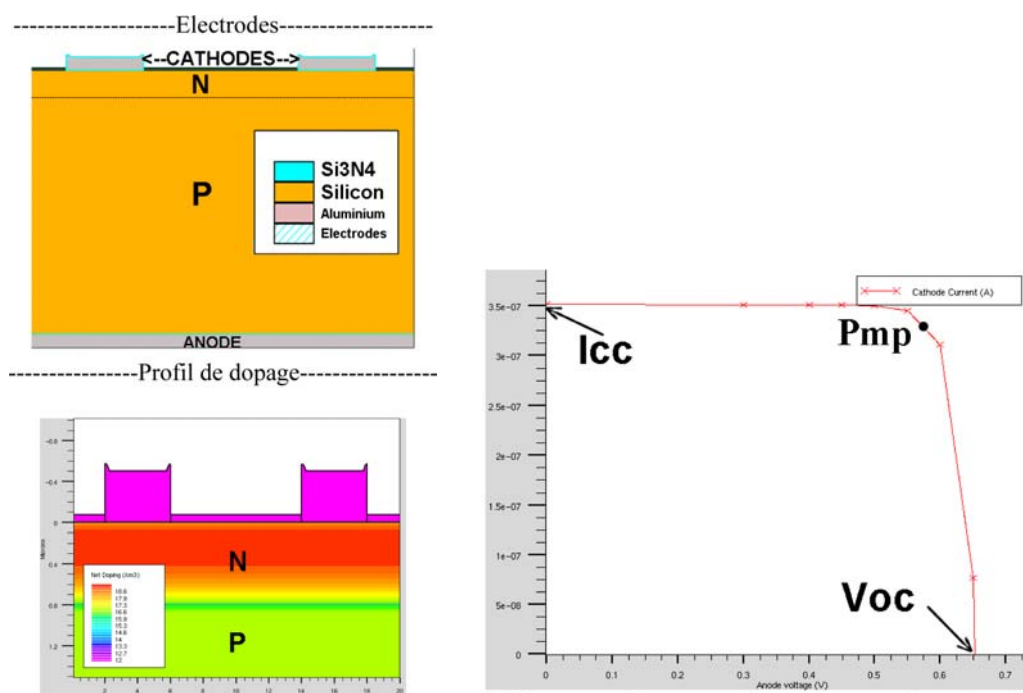


Figure 3 : (a) haut : structure de la cellule, bas : profil de dopage ; (b) caractéristique $I(V)$ obtenue sous éclaircissement.

III. Réalisation en salle blanche

Une dizaine d'heures sont dédiées au travail en salle blanche. Les principaux procédés technologiques abordés sont les suivants :

- Nettoyage standard des plaquettes (attaque HF, caro, HF)
- texturation par attaque chimique du substrat. La figure 4 présente un exemple type de texturation obtenue en TP (observations au MEB)
- Dépôt par PECVD de la couche de nitrure anti-reflet (étape effectuée par les équipes techniques en dehors de la séance de TP)
- Implantation ionique
- Recuit d'implantation (activation des dopants et passivation des défauts)
- Photolithographie
- Gravure humide par bain d'attaque HF/NH₄F
- Dépôt d'aluminium par pulvérisation cathodique (Face avant)
- Dépôt d'aluminium par évaporation (Face arrière)
- Retrait du métal par le procédé de lift-off

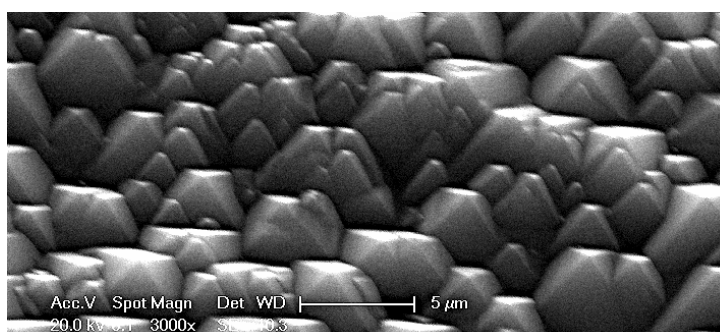


Figure 4 : Texturation de la surface d'un substrat de silicium, observé au MEB.

Outre ces étapes technologiques, de nombreuses étapes de caractérisation « en ligne » sont prévues au cours des séances telles que :

- observations au microscope électronique à balayage de la couche de texturation (voir figure 4)
- mesure à l'ellipsomètre de l'épaisseur de la couche anti-reflet de Si_3N_4 ,
- mesure de la résistivité des contacts métallique

Egalement, un temps est accordé pour la simulation de l'implantation au moyen du logiciel TRIM.

La figure 5 présente le découpage et l'organisation des séances permettant la réalisation des cellules solaires.

REALISATION D'UNE CELLULE SOLAIRE DE PREMIERE GENERATION			
Première séance S1			
Simulation technologique sous Atlas Simulation électrique sous Athena Préparation de la solution KOH			
Deuxième séance S2			
	Durée	Groupe 1	Groupe 2
13h00	30'	Présentation générale salle blanche Fiche de suivi des plaques	
13h30	45'	Nettoyage des plaques 5 substrats vierges	IDEM
	45'	Texturation de surface - bain KOH 3 plaques	IDEM
15h00	60'	Implantation ionique de 4+4 plaques uniquement (un substrat texturé gardé pour observation au MEB)	
16h00	60'	Nettoyage des plaques et recuit d'implantation	
En cours de séance, si l'occasion se présente : démonstration profilomètre et ellipsomètre			
Etapes sous-traitée E1			
Dépôt Si_3N_4 (2 plaques non texturées + 2 plaques texturées)			
Troisième séance S3			
8h00	60'	Etalement résine Photolithographie Dvpt résine - μ scope - durcissement profilomètre → épaisseur résine	
9h20	30'	Gravure humide du Si_3N_4	
9h50	15'	Mise sous vide Présentation pulvérisation cathodique	
10h05	60'	Mesure ellispométrie - $e(\text{Si}_3\text{N}_4)$	Observation MEB
		Observation MEB (texturation)	Mesure ellispo.
11h05	15'	Dépôt Aluminium	
11h20	30'	Lift off métal Profilomètre → épaisseur Al Résistivité aluminium	
11h50	10'	Mise sous vide pour métallisation face arrière	
Quatrième séance I3			
13h00	20'	Dépôt Aluminium face arrière	
13h20	20'	R_carré	Ellipsométrie
13h40	20'	Ellipsométrie	R_carré
14h00		Caractérisation électrique	

Figure 5 : Découpage des séances indiquant les différentes étapes technologiques ainsi que les caractérisations effectuées en cours de réalisation

Afin de sensibiliser les étudiants au concept de suivi de procédé, il est fourni à chaque étudiant une fiche de suivie reprenant les étapes de la filière et lui permettant de noter les caractéristiques techniques de chaque étape et éventuellement les défauts rencontrés.

Enfin, une cellule type obtenue à l'issue des séances en salle blanche est présentée sur la figure 6.



Figure 6 : Cellules solaires types réalisées en TP. De gauche à droite : cellule avec jonction pn seule, cellule avec texturation seule, cellule avec anti-reflet seul, cellule avec texturation et anti-reflet.

IV. Caractérisation

Actuellement, environ 2 heures sont dédiées à la caractérisation électrique sous simulateur solaire de spectre AM1.5. Le but est de mesurer les courbes I(V) dans le noir et sous éclairage, d'en tirer les caractéristiques principales de chaque cellule (rendement, facteur de forme, résistance série, résistance parallèle,...) et surtout de comparer les 4 cellules entre elles et ainsi démontrer l'intérêt de la texturation et de la couche anti-reflet.

Une fois les quatre cellules comparées, on s'intéresse plus en profondeur aux caractéristiques obtenues. Par exemple, la résistance série de nos cellules est trop importante, ce qui est dû au fait que les contacts métalliques ne sont pas recuits après dépôt, il est donc intéressant de faire réfléchir les étudiants sur ce genre de problème et ainsi leur permettre de comprendre comment une caractérisation électrique peut permettre de mettre en évidence des problèmes technologiques en amont.

Conclusion et perspectives

Nous avons donc mis en place un cycle de TP ayant pour but la simulation, la réalisation et la caractérisation de cellules solaires de première génération tout en abordant les principales technologies utilisées en salle blanche. Ainsi, les étudiants sont à la fois confrontés aux points clés de la technologie photovoltaïque et aux technologies dédiées à la microélectronique. Ce cycle de TP a d'ores et déjà été proposé à une vingtaine d'étudiants qui ont fort apprécié de pouvoir découvrir la technologie photovoltaïque.

Des évolutions du TP sont prévues pour les parties réalisation et caractérisation :

- en salle blanche : fenêtres de domaines PV au travers d'un oxyde épais, dopage par diffusion pour la jonction pn (en remplacement de l'implantation ionique), dopage de la face arrière,...
- en caractérisation : test de structures TLM pour accéder aux paramètres électriques (Résistance série,...)

Remerciements

Merci aux responsables pédagogiques de la salle blanche qui ont soutenu ce projet, tout d'abord Michel Labeau, initiateur de ce projet, ainsi qu'à Jallal Jomaah qui a permis de mettre en route les premiers tests pour la mise en place de la filière.