

## Mesure statistique de la résistance de contact d'une grille sérigraphiée pour cellules solaires au silicium multicristallin

F. Chelli<sup>1\*</sup>, R. Tala-Ighil<sup>2</sup>, S. Sali<sup>2</sup>, S. Oussalah<sup>3</sup>,  
M. Boumaour<sup>2</sup>, F. Tayour<sup>2</sup> et Y. Si-Ahmed<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites, 'LMMC'  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université M'Hamed Bougara  
Avenue de l'Indépendance, Boumerdes, Algérie

<sup>2</sup> Division des Cellules et Modules Photovoltaïques,  
Unité de Développement de la Technologie du Silicium, 'UDTS'  
2 Bd Frantz Fanon, B.P. 140 Alger Sept Merveilles, Algérie

<sup>3</sup> Division de Microélectronique et Nanotechnologie  
Centre de Développement de Technologies Avancées, 'CDTA'  
Cité 20 Août 1956, Baba Hassen, Alger, Algérie

(reçu le 22 Novembre 2009 – accepté le 20 Décembre 2010)

**Résumé** - La métallisation par sérigraphie est une des étapes les plus importantes dans la technologie d'élaboration des cellules solaires pour une production à grande échelle. Néanmoins, elle demeure dépendante de plusieurs paramètres variables. Pour le silicium multi cristallin, tout changement dans le procédé de réalisation des cellules solaires influence directement l'optimisation du profil de recuit de la métallisation par sérigraphie. Les plaquettes de silicium multi cristallin subissent toutes les étapes classiques de réalisation des cellules solaires comme le nettoyage chimique et la décontamination, une diffusion au phosphore et le dépôt du nitrure de silicium  $\text{SiN}_x$  par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Il y a juste le dépôt du contact Argent Ag sur la face avant de la plaquette. Nous avons utilisé la pâte de sérigraphie Ag Ferro 3349. La grille métallique comporte six (06) motifs TLM (Transfer Length Method) pour les mesures de la résistance de contact. Le principal but de ce travail est le contrôle de la qualité du contact  $\text{Ag/SiN}_x/n^+-\text{Si}$  dans les cellules solaires au silicium multicristallin. Les mesures TLM révèlent une cartographie des valeurs de la résistance de contact pour chaque température. Le profil optimal de température de recuit est autour de 750 °C.

**Abstract** - Screen printing metallization is one of the most important steps in the solar cell technology, aimed at obtaining large scale production. Nevertheless, it remains dependent on any parameters variations. For multi-crystalline silicon, any change in the manufacturing or the solar cell technological process may influence the screen printing optimization profile. In this work, we undertake a thorough insight on the screen printing temperature annealing from 650°C to 750°C for multi-crystalline silicon wafers. The screen printed contact microstructure is studied for this temperature interval. It is deposited onto  $\text{SiN}_x/\text{Si}(N^+)/\text{Si}(P)$  structure. The multi-crystalline silicon wafers undergo the classical steps for photovoltaic solar cells realization such as: chemical cleaning and decontamination, phosphorus diffusion, and PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) silicon nitride deposition. Only silver (Ag) contacts are deposited on the front wafer. we used Ag ferro 3349 paste. The metallization grid comprises (06) TLM (Transfer Length Method) pattern distributed onto the cell surface for contact resistance ( $R_c$ ) measurements. The main purpose of this work is to assess the  $\text{Ag/SiN}_x/n^+-\text{Si}$  contact

\* faridchelli@yahoo.fr

*quality for the multi-crystalline silicon solar cells. TLM measurements reveal a mapping of the resistance values for each temperature. The optimized annealing temperature profile is about 750 °C.*

**Mots clés:** Résistance de contact – Silicium multi cristallin – Métallisation par sérigraphie – Cellule solaire SiN<sub>x</sub> – TLM.

## 1. INTRODUCTION

La maîtrise de métallisation par sérigraphie est incontournable dans la fabrication des piles solaires au silicium multi-cristallin pour une fabrication à grande échelle. La qualité du contact métal-semi conducteur de la métallisation influence considérablement leur rendement de conversion [1, 2].

Chaque amélioration d'une étape ou d'un processus de la réalisation des piles solaires est toujours le bienvenu afin de rendre l'énergie solaire photovoltaïque compétitive par rapport aux autres types d'énergies [3].

La méthode de dépôt par sérigraphie consiste en l'application d'une pâte sur un substrat, la cellule, au travers d'un masque. Cet écran sérigraphique, est le négatif du motif à reproduire [4]. Un traitement thermique à suivre va permettre la solidification de la pâte, sa densification et sa solidification à la cellule.

C'est lors de cette étape, que le contact, en face avant comme en face arrière, est réalisé par la diffusion des éléments métalliques de la pâte dans le semi- conducteur. Ces éléments métalliques constitutifs sont l'argent pour la pâte de la face avant (type n) et un mélange argent et aluminium pour la face arrière (type p) [5].

La méthode TLM (Transmission Line Method) est basée sur la mesure de la résistance totale entre deux contacts ohmiques en fonction de la distance entre ces contacts [6]. Cette résistance dépend de la résistance de la couche semi-conductrice, de la résistance spécifique des contacts et de la résistance des fils de connexions.

La mesure de cette résistance totale en fonction de la distance permet d'accéder aussi bien à la résistance spécifique des contacts qu'à la résistance de la couche semi-conductrice [7].

## 2. EXPERIMENTAL

Le processus de réalisation de la pile solaire par préparation des plaquettes de silicium multi-cristallin consiste à passer toutes les étapes (process) technologiques, telles que le nettoyage, la diffusion de phosphore, le dépôt de la couche de nitrure de silicium de passivation et la métallisation par sérigraphie.

Pour cette dernière étape, on a réalisé (06) motifs (M1, M2, ..... , M6) de la face avant (motif TLM) pour une étude statistique de la résistance, en déposant une couche de la pâte d'argent, un balayage de la température de recuit entre 650 °C et 750 °C a été exécuté.

Les mesures de résistivité par la méthode TLM sont effectuées sous pointes grâce à une station de mesure équipée d'un microscope optique et d'appareils de mesures électriques.

### 3. RESULTATS

Pour mesurer la résistivité spécifique des contacts, nous avons réalisé par lithographie des motifs TLM (Fig. 1) consistant en une rangée de contacts rectangulaires de dimensions variables.

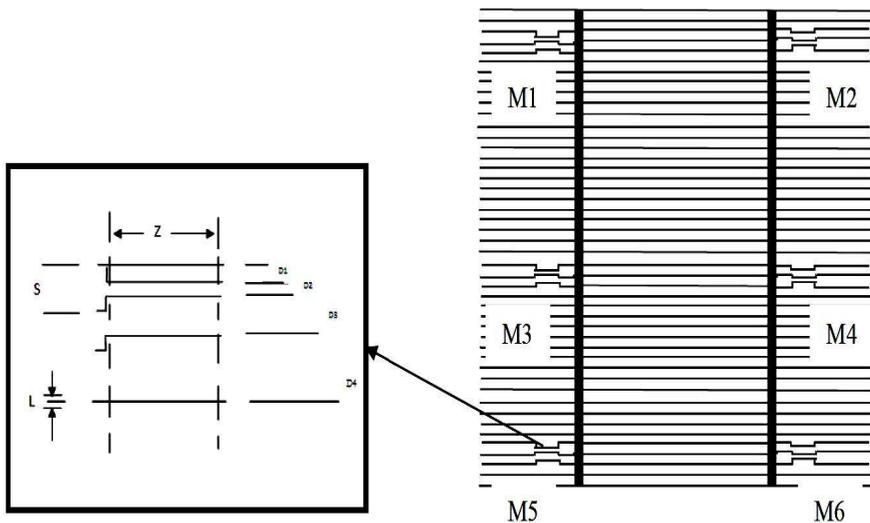


Fig. 1: Contact en motif TLM réalisé par lithographie sur le silicium multi-cristallin

**Tableau 1:** Résistance de contact par le tracé de la résistance en fonction de la distance

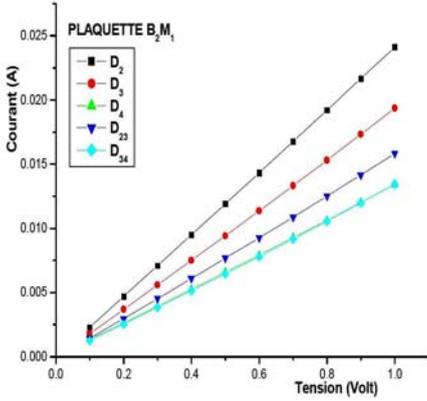
|    |             |       |
|----|-------------|-------|
| S  | 0.003 m     |       |
| D1 | 0.0009 m    | 0.3*S |
| D2 | 0.0015 m    | 0.5*S |
| D3 | 0.0027 m    | 0.9*S |
| D4 | 0.0039 m    | 1.3*S |
| D5 | 0.0042 m    | D2+D3 |
| Z  | 6 mm        |       |
| L  | 140 $\mu$ m |       |

S: Distance entre deux doigts; L: Largeur du doigt; Z: Largeur du contact

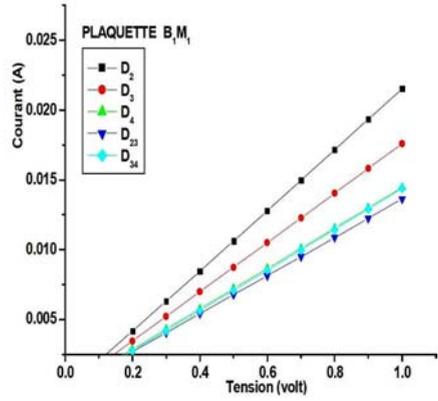
Nous avons déduit les résistances de contact par le tracé de la résistance en fonction de la distance. On représente les points  $R_{23}$  (D2),  $R_{34}$  (D3),  $R_{45}$  (D4),  $R_{24}$  (D23),  $R_{35}$  (D34) ou D2, D3, D4, D23, D34 sont les distances TLM.

La résistance de contact entre le silicium et le doigt métallique est la moitié de l'intersection de la pente  $R(D)$  avec l'axe des ordonnées [8].

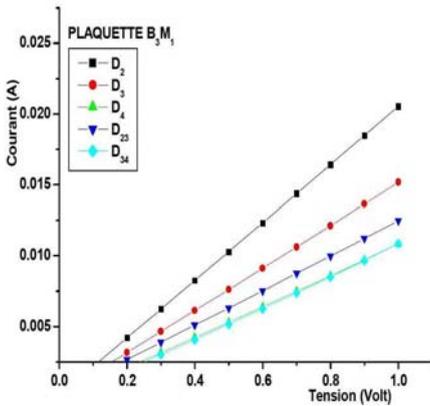
La figure 2 montre un exemple de mesure de la résistance de contact pour le motif  $M_1$



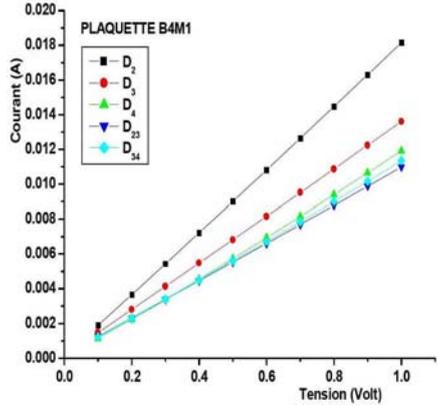
Echantillon B<sub>1</sub>



Echantillon B<sub>2</sub>



Echantillon B<sub>3</sub>



Echantillon B<sub>4</sub>

Fig. 2: Caractéristiques I (V) pour les distances du motif TLM  $M_1$

Même chose pour les autres motifs  $M_2, M_3$ . Les résultats sont dans le **Tableau 2** suivant.

**Tableau 2:** Résistances de contact TLM

| Rc (Ohm) |         |         |         |  |
|----------|---------|---------|---------|--|
| B1       | B2      | B3      | B4      |  |
| (650°C)  | (680°C) | (700°C) | (750°C) |  |
| .....    |         |         |         |  |

|                           |       |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| M1                        | 15.55 | 16.49 | 21.60 | 26.92 |
| M2                        | 19.95 | 9.90  | 27.36 | 28.98 |
| M3                        | 18.84 | 26.87 | 23.75 | 10.64 |
| Rc moy (Ohm)<br>R contact | 18.11 | 17.65 | 24.23 | 15.51 |

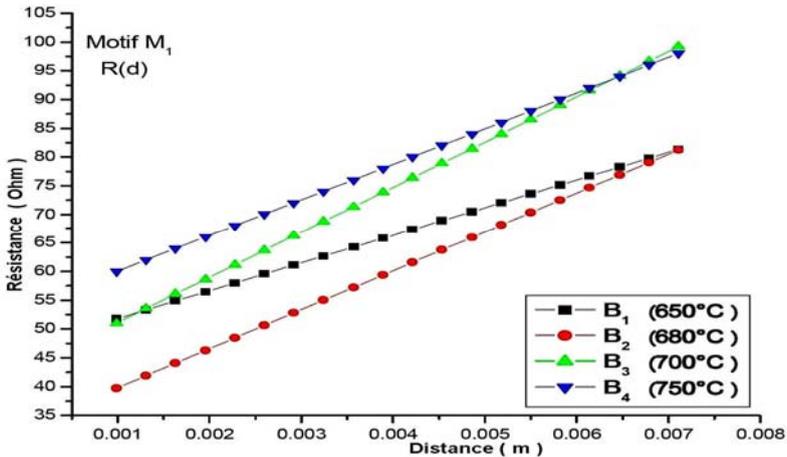


Fig. 3: Résistance de contact en fonction des distances TLM pour le motif  $M_1$

On remarque que la valeur moyenne de la résistance de contact est minimale pour la température 750 °C et qu'il y a disparités des valeurs selon le motif où on se trouve, c'est-à-dire le grain du silicium multicristallin sur lequel se font les mesures la complexité du silicium multi cristallin.

Selon la littérature, il y a formation de quelques pores à 650 °C, ceci est dû au fait qu'il y ait un début du procédé firing throng (à partir de 625 °C). La couche de passivation n'est pas percée. Il y a donc un mauvais contact. Ceci est confirmé par les résultats de la TLM.

Alors qu'à 680 °C, plus de porosité est constatée car le verre fritté de verre qui se trouve à l'interface entre  $SiN_x$  et le silicium. Le process est toujours incomplet, ce qu'expliqueraient les valeurs moyennes de la résistance de contact.

Et enfin, à 750 °C, le procédé firing throng est finalisé. On observe une bonne compacité du contact corrélant avec une valeur minimale de la résistance de contact.

#### 4. CONCLUSION

Des plaquettes de 10 cm de coté de résistivité 1  $\Omega.cm$ , fabriquées dans notre laboratoire ont subi des étapes classiques de réalisation de cellules solaires au silicium multi-cristallin: chimie, diffusion de phosphore avec un  $R = 30-40 \Omega/\square$ , dépôt de la couche de passivation  $SiN_x$ .

Le lot de plaquettes a subi une métallisation par sérigraphie avec une grille face avant à base de pâte d'argent Ferro 3349 et des recuits de frittage qui s'étalent de 650 °C à 750 °C.

La grille face avant possède six (06) motifs TLM avec lequel on a mesuré la résistance de contact afin d'avoir une étude statistique. Il a été trouvé que la résistance de contact est minimale pour une température de 750 °C, en cas de l'utilisation de la pâte d'argent Ferro 3349.

Le contact sérigraphie observé par MEB, a montré une différence de structure selon la température de recuit de frittage.

A 650 °C, quelques pores ont été remarqués. Ceci est dû au fait qu'il y ait un début du process firing through (à partir de 625 °C). La couche de passivation n'est pas percée. Il y a donc un mauvais contact. Ceci est confirmé par les résultats de la TLM.

Alors qu'à 680 °C, plus de porosité est constatée car le verre fritté qui se trouve à l'interface entre le SiN<sub>x</sub> et le silicium. Le process est toujours incomplet, ce qui expliquerait les valeurs moyennes de la résistance de contact.

Et enfin, à 750 °C, le procédé firing through est finalisé. On observe une bonne compacité du contact corrélant avec une valeur minimale de la résistance de contact.

Par conséquent, la métallisation par sérigraphie est en perpétuelle optimisation. Elle dépend de la résistance carrée de l'émetteur, la nature du recuit (classique ou RTP), de la pâte employée, du profil de recuit.

## REFERENCES

- [1] H.H. Berger, 'Contact Resistance on Diffused Resistors', IEEE International Solid State Circuit conference (ISSCC'69), p.160, 1969.
- [2] A. Goetzberger and V.U. Hoffmann, '*Photovoltaic Solar Energy Generation*', Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, 2005.
- [3] P. Würfel, '*Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*', Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2005.
- [4] B. Thuillier, '*Caractérisation Structurale des Contacts Ohmiques Réalisés à partir d'Encres Métalliques sur Cellules Photovoltaïques en Silicium Multicristallin*', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001.
- [5] A. Goetzberger, J. Knobloch and B. Voss, '*Crystalline Silicon Solar Cells*', B.G. Teubner Stuttgart, Germany, 1994.
- [6] M. Weiner, '*Electromagnetic Analysis Using Transmission Line Variables*', World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., USA, 2001.
- [7] R. Tala-ighil, S. Sali, S. Oussalah, M. Boumaour and F. Tayour, '*Correlation between the morphological study and TLM contact resistance measurements of multicristalline silicon solar cells with screen printing metallization*',
- [8] R. Tala-Ighil, '*Etude et Réalisation d'une Cellule Photovoltaïque à Hétérostructure avec Contact Sérigraphié*', Thèse de Doctorat, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2007.