



## Cellules photovoltaïques optimisées avec wafers de silicium à faible réflexion

Birgit Meinel<sup>1</sup>, Prof. Dr. Jörg Acker<sup>1</sup>, Dr. Burcu Kantowski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Lausitz, Fakultät für Naturwissenschaften, Physikalische Chemie  
Großenhainer Straße 57, 01968 Senftenberg ; Courriel : Joerg.Acker@hs-lausitz.de

<sup>2</sup>Analytik Jena AG, Konrad-Zuse-Strasse 1, D- 07745 Jena

### Introduction

La forte concurrence du marché international et la pression croissante sur les prix imposent une baisse des frais de fabrication des cellules photovoltaïques et une augmentation continue de leur rendement. Un procédé de sciage plus efficace peut constituer ici un atout important. Les travaux de recherche actuels se concentrent sur l'élimination du défaut d'équarrissage, qui est fonction du procédé utilisé, et sur l'optimisation de la texture de la surface du wafer afin de réduire nettement le pouvoir de réflexion.

### Fabrication des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de silicium monocristallin ou polycristallin. Le procédé de cristallisation a une grande influence sur la puissance potentielle et les coûts d'une cellule. La production de silicium monocristallin est particulièrement complexe. On recourt ici à un procédé de cristallisation, le procédé Czochralski, permettant d'obtenir un lingot cylindrique monocristallin par tirage d'un bloc de silicium en fusion, que l'on soumettra à une lente rotation. Le cristal est alors scié en tranches fines (wafer), puis transformé en cellules photovoltaïques. Ce procédé est particulièrement complexe et très onéreux, entre autres en raison des chutes issues de la fabrication des wafers carrés à partir des cristaux ronds.

Le silicium polycristallin est cristallisé dans des blocs carrés de plusieurs centaines de kg. Le matériau obtenu est constitué de nombreux petits cristaux, avec des limites de grains partiellement visibles, d'où la structure polycristalline. Les blocs sont divisés en briques carrées avant d'être transformés.

La fabrication des wafers en silicium polycristallin est plus économique et a une meilleure efficacité énergétique. Les modules solaires polycristallins sont donc moins onéreux.

Pour obtenir les wafers nécessaires à la production de cellules solaires à partir

de la barre monocristalline Czochralski et des briques carrées, on procède à un équarrissage, consistant à découper des tranches de moins de 200 µm d'épaisseur. Jusqu'à présent, seul le procédé de sciage à fil s'est imposé. Un mince fil d'acier d'env. 110-140 µm est guidé sur la brique à une vitesse de 10-20 m/s, qui sera polie par un mélange de polyéthylène glycol et de carbure de silicium (slurry). Les grains de carbure de silicium, chargés de l'extraction du matériau, sont à l'origine des déformations locales et des cassures, suivies de la destruction des particules de silicium. Pour remédier au problème d'usure de fil, de matériau de polissage et de préparation du carbure de silicium, on a récemment mis au point le procédé de sciage au fil diamanté. La découpe est réalisée ici par un fil d'acier revêtu de petits cristaux de diamant, sans matériau de polissage. Ce procédé permet de réduire les temps de sciage de 50% et d'augmenter nettement la productivité.

La surface des wafers sciés (as cut) présente une structure cristalline très hétérogène, des défauts de sciage (voir Figure 1a et 2c) qui doivent être éliminés. Lors de l'absorption de la lumière du soleil, ces énormes défauts cristallins entraînent la formation de paires électron-trou qui se recombinent si rapidement que la cellule solaire ne pourra pratiquement plus fournir de courant.

Pour remédier à ce problème, on utilise des composés d'acide à base d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique. L'acide n'agit pas seulement sur la surface du wafer, mais crée également une certaine structure tridimensionnelle, la texture (Figure 3) qui sera essentielle pour l'exploitation de la lumière du soleil. L'objectif est d'obtenir une optique de Schmidt ou une structure pyramidale, qui ne renverra pas directement dans l'espace les faisceaux lumineux du soleil réfléchis par la surface du wafer, mais qui les déviara en d'autres points de la structure superficielle. La réflexion multiple

de la lumière solaire dans la surface du silicium augmente l'efficacité de la cellule solaire, qui absorbe davantage de lumière solaire et produit davantage d'énergie.

### Mesure de la réflexion par spectrophotomètre SPECORD® PLUS

Les défauts de sciage et de la texture superficielle sont éliminés avec différents composés d'acide. Le pouvoir de réflexion est mesuré à l'aide de l'appareil SPECORD® PLUS (figure 1a), rattaché à une sphère d'intégration, la sphère d'Ulbricht (figure 1b). Ceci permet de déterminer la réflexion diffuse des wafers de silicium.

Le SPECORD® PLUS est un photomètre à deux faisceaux spécifié pour les longueurs d'onde de 190-1100nm, avec résolution variable et deux photodiodes refroidies (CDD-Cooled Double Detection). La transmission et la réflexion sont mesurées à un très haut niveau de sensibilité. La sphère d'intégration est mise en place dans le trajet optique du compartiment à échantillons du SPECORD® PLUS. Elle est idéale pour les mesures de la transmission et de la réflexion diffusées des échantillons solides, liquides et poudreux. L'intérieur de la sphère d'intégration est en Spektral® pur, caractérisé par de très bonnes propriétés réfléchissantes. Les caractéristiques optiques des solides de surface rugueuse sont déterminées en mesurant les facteurs de réflexion diffuse à l'aide de la sphère d'intégration, reliée au SPECORD®. Le facteur de réflexion diffuse d'un échantillon est déterminé à partir du rayonnement réfléchi de manière diffuse par sa surface, divisé par le rayonnement réfléchi de manière diffuse de la surface parfaitement blanche et mate d'un échantillon étalon, obtenu dans les mêmes conditions optiques. L'échantillon utilisé pour mesurer la transmission est positionné devant la sphère, l'échantillon destiné à la mesure de la réflexion diffuse est placé sur le bord opposé. Pour mesurer la réflexion diffuse avec la sphère d'intégration, l'échantillon est implanté dans la sphère. La surface de l'échantillon est alors soumise à un faisceau

lumineux focalisé, appliqué à un angle fixe par rapport à la normale à la surface. Le rayon réfléchi de manière diffuse dans la sphère d'intégration par la surface de l'échantillon est alors focalisé et transmis sous forme de rayon diffus sur le récepteur du spectrophotomètre.

La sphère d'intégration est utilisée de préférence pour les mesures du facteur de réflexion diffuse des poudres et des échantillons présentant une surface structurée, comme la cellulose, le cuir, les textiles ou - comme ici - pour les surfaces de wafers de silicium et les échantillons caractérisés par un brillant azimuthal, c'est-à-dire un brillant qui varie en tournant l'échantillon sur sa normale à la surface.

### Réalisation de la mesure

Lors de la mesure réalisée avec la sphère d'intégration, on applique une géométrie de mesure diffuse/8°. Cela signifie que la surface de l'échantillon est soumise à un rayon focalisé sous un angle de 8° par rapport à la normale de sa surface et que le rayonnement réfléchi de manière diffuse dans la sphère d'intégration par la surface de l'échantillon, arrive de manière diffuse sur le récepteur. Le facteur de réflexion de l'échantillon varie en fonction de la longueur d'onde. Il est déterminé par rapport à une valeur de référence, l'étalon de blanc, qui dans le cas idéal présente une réflexion diffuse de 100% et n'absorbe aucune lumière. L'échantillon Spektral® (étalon de blanc) sert de référence. Après avoir absorbé le spectre de référence, le wafer de silicium est mis en place et analysé par le SPECORD® PLUS.

### Résultats

Le pouvoir de réflexion des surfaces est présenté à l'aide de deux wafers découpés de différente manière et de leur défaut résultant.

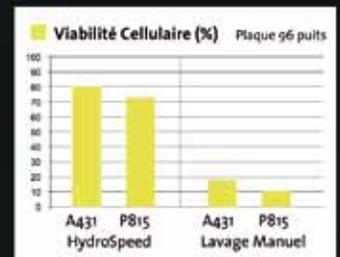
Comme le montrent les enregistrements réalisés par microscopie électronique à balayage (Figure 2 a et b), la surface d'un wafer as cut soumis aux



## Efficienc e ou souplesse

### Le nouveau laveur de microplaque HydroSpeed™ vous offre les deux

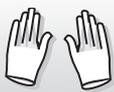
### Profitez de l'optimisation unique de tous vos paramètres de lavage pour des résultats sans précédent.



[www.tecan.com/cell-protection](http://www.tecan.com/cell-protection)

Pour toute information complémentaire : [tecan.france@tecan.com](mailto:tecan.france@tecan.com)

© 2012, Tecan Trading AG, Switzerland, all rights reserved. For disclaimer and trademarks please visit [www.tecan.com](http://www.tecan.com)



effets du slurry présente une structure homogène mate et rugueuse, en forme de dents de scie, avec de multiples et grandes cassures. Le facteur de réflexion est égal à  $R = 24\%$ . Par opposition, la surface d'un wafer scié au fil diamanté a un brillant argenté. Les rainures et les stries sont identifiés à l'œil nu. Avec  $R = 26\%$ , le wafer scié au fil diamanté présente

une réflexion nettement supérieure. Les enregistrements effectués au microscope électronique à balayage (Figure 2 c et d) présentent deux caractéristiques bien distinctes : On a des zones lisses et rugueuses avec des fissures et des cassures.

Ces structures peuvent avoir une nette influence sur les mesures. Le faisceau

de mesure n'arrive pas verticalement sur l'échantillon. Comme le montre le schéma **Tableau 1**, la réflexion mesurée est déterminée également par l'alignement des fissures et des stries des wafers sciés au fil diamanté par rapport au faisceau lumineux entrant. L'alignement n'a aucune influence sur le résultat des mesures effectuées sur des wafers sciés au fil diamanté, présentant une structure superficielle uniforme.

Les wafers polis au slurry et sciés au fil diamanté réagissent différemment aux effets du traitement à l'acide. Comme le montre Figure 3 pour un wafer poli au slurry, le moindre traitement à l'acide effectué au niveau du défaut de sciage ( $< 4 \mu\text{m}$ ) entraîne une réduction de la réflexion. Ceci est probablement dû à l'élimination successive des structures en dents de scie (Figure 2b) qui, comme des micro-miroirs, cause la réflexion élevée des wafers sciés. Les facteurs R augmentent continuellement sous l'effet de l'extraction de matériau et de la texture qui apparaît, sans atteindre la valeur initiale. Après une extraction de  $8 \mu\text{m}$ , on observe une texture typique avec de nombreuses grandes et petites zones concaves (Figure 3).

Les wafers sciés au fil diamanté présentent une courbe similaire, comme le montre Figure 3. Le pouvoir de réflexion diminue nettement à proximité du défaut de sciage pour augmenter en fonction de l'extraction de matériau et dépasser nettement les valeurs des wafers soumis au slurry. Comme le montre Figure 4, le traitement à l'acide est appliqué de préférence sur les fissures et les cassures causées par le sciage, pour obtenir rapidement une structure concave. La plupart des parties lisses des rainures en surface restent tout d'abord inchangées. Ce n'est qu'après un traitement relativement long à l'acide qu'on obtient la texturation complète de la surface du wafer.

Ceci montre que les traitements à l'acide utilisés jusqu'à présent ne conviennent pas aux wafers sciés au fil diamanté. Le nouveau procédé de sciage au fil diamanté plus efficace nécessite un traitement chimique optimisé afin d'avoir une texture homogène sur toute la surface avec un traitement chimique de durée minimale et des valeurs de réflexion aussi faibles que celles que l'obtient actuellement avec les wafers texturés, sciés au slurry.

### Discussion

La réduction de la réflexion des surfaces de wafers solaires obtenue avec des traitements chimiques adéquats est une stratégie importante, visant à optimiser l'efficacité des modules solaires. L'objectif des travaux de recherche actuels est d'éclaircir les rapports entre le procédé de sciage choisi, la texture obtenue après le traitement chimique et leur facteur de réflexion.

Dans le cadre des analyses présentées ici, un spectromètre SPECORD® PLUS relié à une sphère d'intégration a permis de déterminer rapidement le facteur de réflexion, de manière précise et reproductible. Les résultats présentés ici illustrent l'effet de différents procédés de sciage sur les étapes de fabrication des cellules solaires.



Figure 1a : Photomètre à deux faisceaux SPECORD® PLUS



Figure 1b : Sphère d'intégration

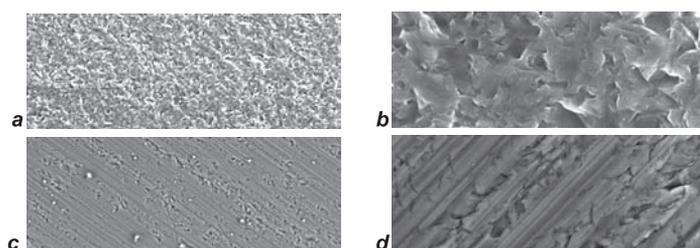


Figure 2: Comparaison des défauts du sciage;

- a) wafer as cut – avec application d'un slurry, grossissement au 500ème
- b) wafer as cut – application d'un slurry, grossissement au 3500ème
- c) wafer as cut – scié au fil diamanté, grossissement au 500ème
- d) wafer as cut – scié au fil diamanté, grossissement au 2500ème

horizontal	vertical	incliné
Faisceau lumineux	Faisceau lumineux	Faisceau lumineux
$R=27,7\pm 0,6\%$	$R=28,1\pm 0,7\%$	$R=28,7\pm 0,7\%$

Tableau 1: Alignement potentiel des wafers sciés au fil diamanté dans la sphère d'intégration et valeurs de réflexion mesurées

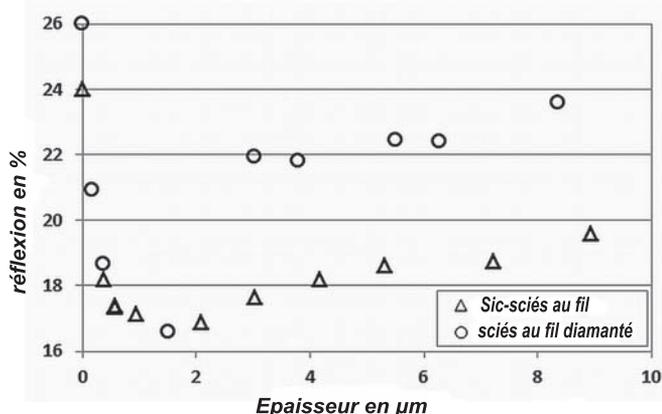


Figure 3: Développement des facteurs de réflexion de wafers monocristallins sciés de différente manière et soumis à un traitement à l'acide

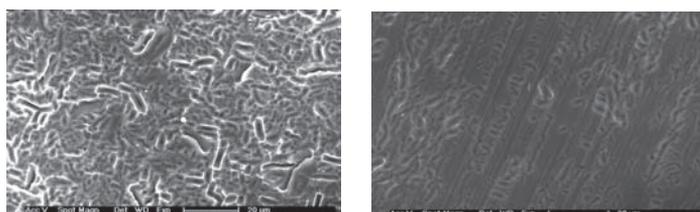


Figure 4: Enregistrements au microscope électronique à balayage de wafers monocristallins, agrandis au 1000ème. Extraction de matériau comprise entre 8 et 9 µm

# Des outils utiles!



Robot de pipetage LISSY



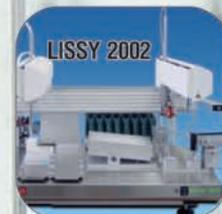
Sondes de pipetage



Des flacons, encore des flacons ....



Robot de remplissage TraySy X



Robot de pipetage LISSY 2002 à deux bras



Distributeur acoustique de nano-volumes



Scanner CT pour petits animaux



Collecteurs de cellules



Cocktails de scintillation liquide



Evaporateur CombiDancer

## ZINSSER ANALYTIC

D-60489 Frankfurt, Eschborner Landstraße 135  
 Tél.: +49 69 789 106-0, Fax +49 69 789 106-80  
 GB-M Maidenhead, Berks; Tél.: +44 1628 773202  
 USA-Northridge, CA; Tél.: +1 818 341-2906  
 Hotline en France: Michel Serralunga  
 Tél.: +33 (0)6 70858330, email: france@zinsser-analytic.com  
 Internet: www.zinsser-analytic.com