

Caractérisation de la rigidité et étude de la rupture de plaques en silicium de qualité photovoltaïque

L. Zhao, A. Maynadier, D. Nélis

Université de Lyon, INSA-Lyon, LaMCoS UMR CNRS 5259 ; F69621 Villeurbanne, France
lv.zhao@insa-lyon.fr

Résumé :

Le travail présenté consiste à caractériser la rigidité et étudier la rupture de plaques en silicium multicristallin de qualité photovoltaïque. Les éprouvettes sont obtenues par découpe au laser de wafers de silicium provenant de deux processus de fabrication différents, soit MCSI et RST. En s'appuyant sur des essais de flexion à 4-points, des moyens expérimentaux et numériques sont mis en place en parallèle pour aboutir à une caractérisation du module de Young adéquate. Les comportements à rupture sous flexion, soit le mode de rupture et la cause de l'amorçage, sont étudiés à l'aide d'imagerie rapide et de fractographie.

Abstract :

This study aims to characterize the rigidity and study the fracture of solar-grade multi-crystalline silicon plates. The specimens are laser cut from silicon wafers with two different manufacturing processes, i.e. MCSI and RST. Based on 4-point bending tests, both experiments and simulations are carried out in order to conduct a proper assessment of the Young's modulus. Concerning the fracture study, the high speed imaging technique and the fractography are performed to investigate the fracture mode as well as the crack origin, respectively.

Mots clefs : silicium Photovoltaïque, wafer en silicium multi-cristallin, rigidité, essais de flexion à 4-point, analyse éléments finis, rupture, imagerie rapide, fractographie

1 Introduction

Le silicium multi-cristallin est très largement utilisé pour réaliser les wafers des cellules photovoltaïques. À ce titre, il a été extensivement étudié d'un point de vue physico-chimique dans le but d'optimiser le rendement électronique. Cependant, les études portant sur la tenue mécanique du wafer sont encore rares. Pourtant la rigidité et la résistance à la rupture de cette pièce maîtresse durant la fabrication, le transport ou en service devient actuellement un point clé pour les industriels. En effet, l'augmentation de la fiabilité des cellules, et par conséquent des panneaux permettra le large développement de cette nouvelle source d'énergie propre.

Le silicium multi-cristallin est un matériau naturellement hétérogène. En effet il peut être vu comme un agrégat de monocristaux (les grains) dont les tailles caractéristiques sont du même ordre de grandeur que celle de la structure. Le polycristal peut être homogénéisé comme un matériau isotrope

s'il possède suffisamment de grains qui n'ont pas d'orientations privilégiées. Bien que moins efficace électroniquement, le silicium multi-cristallin est largement utilisé dans les cellules PV grâce à son coût de fabrication inférieur à celui du silicium monocristallin.

Récemment, la résistance mécanique des dispositifs PV a été identifiée comme un problème clé pour le développement de l'énergie solaire [9]. Les investigations sont souvent menées à l'échelle du module entier [2, 7], ou de la cellule encapsulée ou non [6,8,10]. Plus rares sont les études qui s'intéressent à la tenue mécanique des wafers multi-cristallins, on signalera toutefois les travaux de Sherman sur la rupture du Si mono [5], les études numériques de Saffar et al. [1] et les modélisations EF de propagations de fissures trans- ou intra-granulaires de Infuso et al. [8]

Dans cette étude, nous travaillons sur des plaques en silicium multi-cristallin qui sont obtenues par découpe au laser de wafers issus de deux différents processus de fabrication, soit le classique ingot cast découpé au fil (MCSI), soit le ruban de silicium sur substrat temporaire (RST obtenu par dépôt de Si liquide sur ruban de carbone sacrificiel) [3]. Les objectifs sont de caractériser la rigidité globale et étudier la rupture des deux types de wafers à température ambiante. Les éprouvettes ont une surface de 50x50mm² avec une épaisseur de 170µm environ pour les plaques MCSI et de 90µm environ pour les plaques RST. Concernant la caractérisation de rigidité, des essais de flexion à 4-points sont mis en œuvre. Ceux-ci permettent de calculer facilement le module de Young à l'aide de la théorie des poutres. Un modèle éléments finis est réalisé en parallèle afin de corriger les mesures. Pour l'étude de la rupture, nous nous appuyons sur l'imagerie rapide pour observer la répartition et propagation des fissures, ainsi que sur la fractographie pour identifier l'origine de l'amorçage.

2 Module de Young des wafers MCSI et RST

2.1 Caractérisation expérimentale

Les deux procédés de fabrication étudiés induisent des microstructures différentes. Les morphologies de grains sont présentées dans la Fig. 1 pour les deux types de wafers. Concernant les plaques MCSI, les grains ne présentent pas d'orientation particulière et leur taille varie de quelques mm² à plusieurs cm². Le matériau est considéré isotrope. Pour les plaques RST, les grains sont fortement étirés dans la direction de tirage du ruban de Si. Certains traversent intégralement la plaque en longueur, leur largeur varie du mm au cm. La rigidité dans la direction parallèle à la direction de tirage et celle dans la direction perpendiculaire seront distinguées. Dans les deux cas de nombreuses macles sont visibles dans les grains.

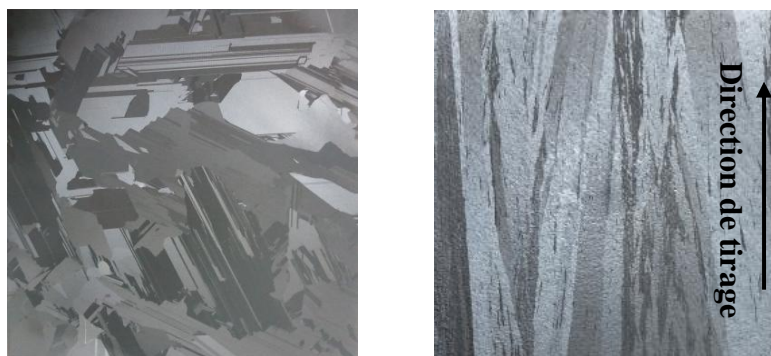


Figure 1. Morphologie des grains pour les plaques MCSI (gauche) et les plaques RST (droite).
(Dimensions des éprouvettes : 50x50mm²)

La caractérisation expérimentale est basée sur la théorie des poutres appliquée à la configuration d'un essai de flexion 4-points. Cette dernière est illustrée dans la Fig. 2. Les essais sont pilotés en déplacement. Le module de Young peut être calculé à l'aide de l'équation 1, en connaissant la force de réaction, le déplacement du poinçon ainsi que les dimensions de l'éprouvette et l'écartement entre les appuis :

$$E = \frac{P(a-d)^2(a+2d)}{4Lh^3f} \quad (1)$$

avec L la largeur et h l'épaisseur de la plaque (non représentés dans la Fig. 2).

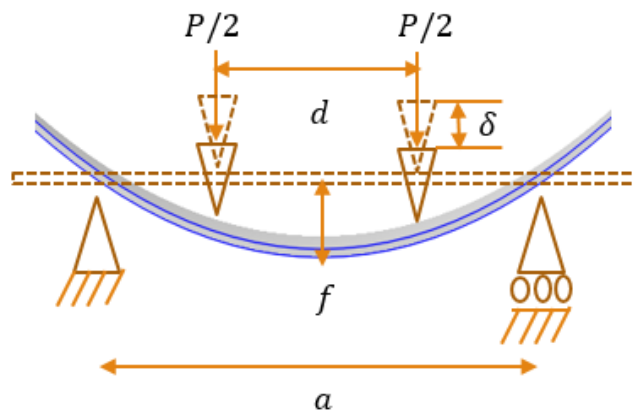


Figure 2. Configuration de l'essai de flexion 4-points

2.2 Correction par simulation numérique

En identifiant le module de Young par la théorie des poutres, on suppose que l'effet Poisson est négligeable ainsi que les variations dues aux contacts entre les appuis et la plaque. Un modèle éléments finis est construit afin d'estimer l'erreur relative liée à ces hypothèses. Étant donné que les propriétés mécaniques du monocristal de Silicium sont bien connues dans la littérature, le modèle est validé dans un premier temps par la comparaison entre les résultats numériques (analyse EF) et expérimentaux sur une plaque en silicium monocristallin (Fig. 3). Nous utilisons les constantes élastiques reportées dans la littérature [4] pour la simulation. Ensuite, des études paramétriques sont effectuées afin d'en déduire l'erreur relative pour un module de Young de 160 GPa et un coefficient de Poisson de 0,2, en faisant varier l'épaisseur de plaque. Nous constatons que pour un intervalle de déplacement de poinçon [0,4 mm-0,6 mm], l'erreur relative est quasiment constante pour toutes les épaisseurs considérées (entre 75 μ m et 180 μ m) et vaut 16,3%.

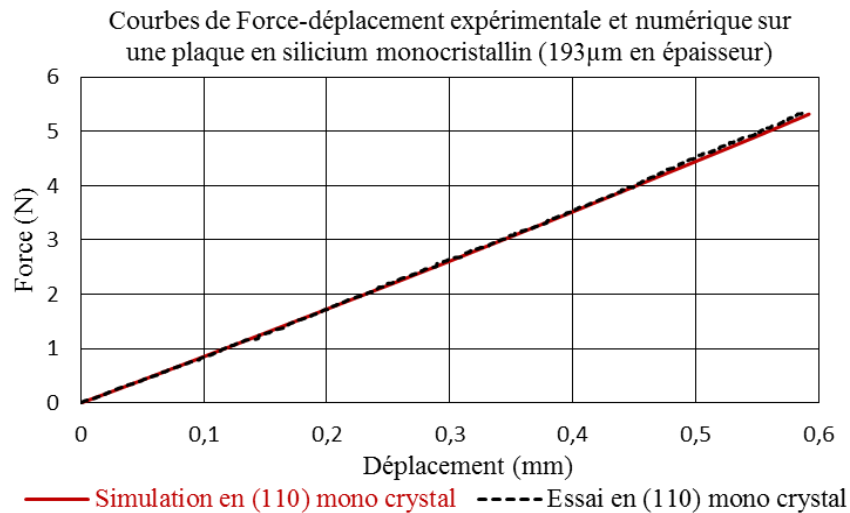


Figure 3. Comparaison de courbes Force-Déplacement numérique et expérimentale sur un monocristal de silicium PV ayant la même orientation.

Après correction de l'erreur, le module de Young pour les plaques MCSI est estimé à 166 ± 5 GPa. Pour les plaques RST les modules de Young sont 172 ± 4 GPa et 163 ± 6 GPa dans la direction de grains allongés (sens du tirage) et dans la direction perpendiculaire, respectivement, ce qui révèle une légère anisotropie.

3 Rupture de MCSI et de RST

3.1 Mode de rupture

Les joints de grains étant visibles à l'œil nu, l'imagerie rapide est utilisée afin d'observer la trajectoire des fissures. Un miroir à 45 degrés est installé en dessous de la plaque pour permettre à la caméra d'imager la surface inférieure de l'éprouvette (face en tension). L'image vue par la caméra est reproduite dans la Fig. 4.

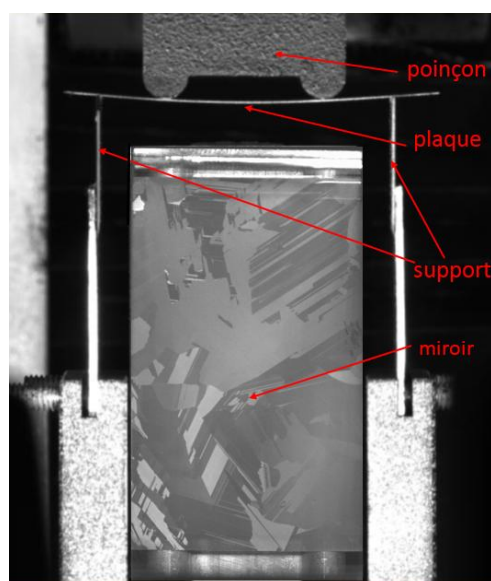


Figure 4. Vision de la caméra rapide sur la surface de de plaque

La fréquence utilisée dans cette partie est 13000Hz. La Figure 5 présente deux images successives juste avant et après la fracture. Les plaques se rompent en une multitude de fragments. Nous pouvons observer que la trajectoire d'une fissure est parfaitement rectiligne dans un grain. Toutes les fissures sont parallèles lorsqu'elles traversent un même grain. Nous constatons également qu'elles changent de direction quand elles entrent dans un grain voisin. En conclusion, la rupture est intra-granulaire et les fissures se propagent probablement sur des plans cristallographiques comme (111) ou (110). Des essais similaires ont été menés sur les wafers RST dans le sens parallèle et perpendiculaire au sens de tirage du ruban. Les images obtenues mènent aux mêmes conclusions avec cependant moins de lisibilité à cause de l'élongation des grains et de la rugosité de la surface.

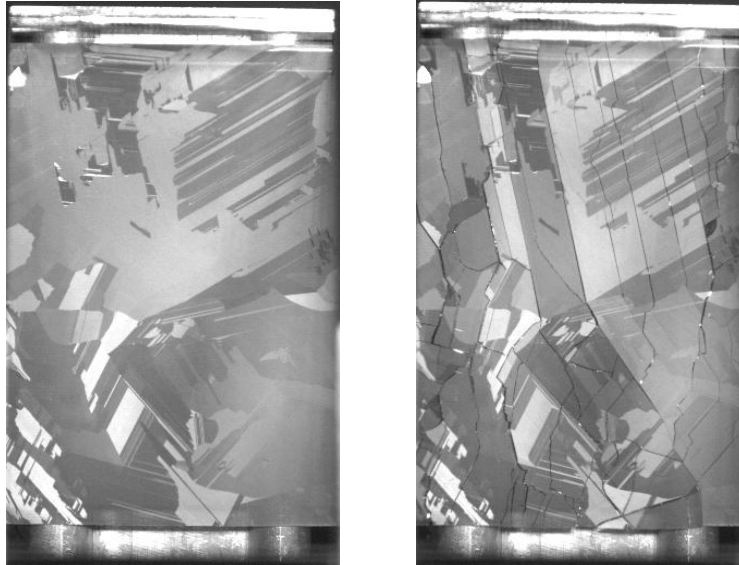


Figure 5. Images successives avant et après la rupture dans un wafer de MCSI

3.2 Lieu et cause d'amorçage des fissures

Les instabilités sur le faciès de rupture de silicium permettent de déterminer la direction de propagation de fissure ([5]). Nous avons donc réalisé une campagne d'observation fractographique afin de localiser le point d'amorçage pour la première fissure. Celui-ci est repéré car à partir de ce point il est possible d'identifier deux directions de propagations opposées. La Figure 6 montre dans l'image à gauche la première fissure capturée par la caméra rapide à une fréquence de 33000Hz et dans l'image à droite l'observation sous microscope confocal Keyence du faciès de la première fissure. Grâce aux instabilités présentes sur le bord de la face en compression, nous arrivons à trouver le sens de propagation de la fissure (en noir) et l'origine de rupture, indiquée par la flèche blanche (ici une cavité de taille importante). Les différents essais analysés nous permettent de conclure que les fissures s'amorcent au bord de la plaque sur des défauts dus à la découpe laser. Aucune des plaques rompues n'a initié sa rupture sur un précipité ou un défaut de forme de la plaque.

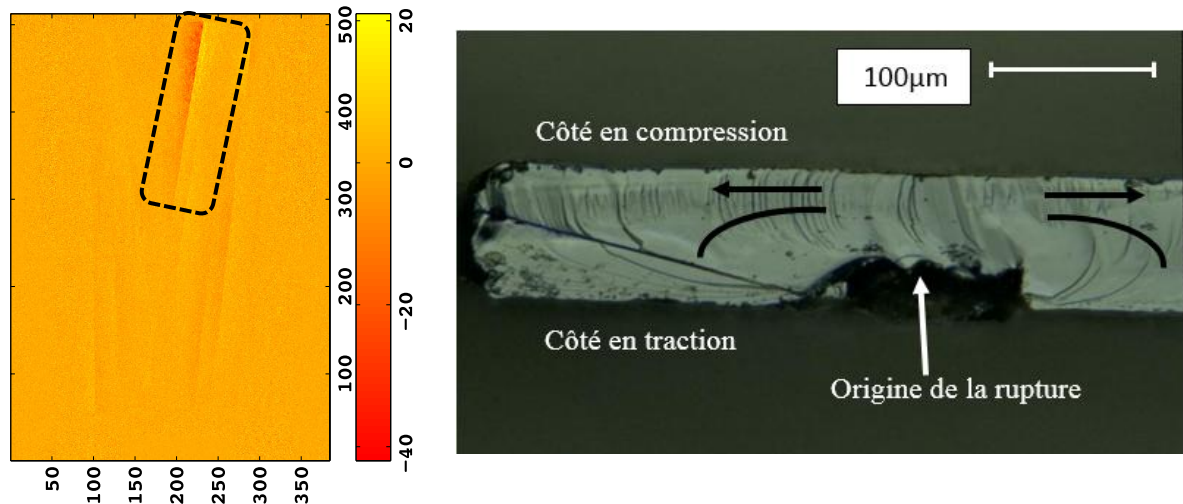


Figure 6. La première fissure capturée par la camera (gauche) et la fractographie sur cette fissure (droite)

4 Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du FUI DEMOS et de l'EquipeX DURASOL, les auteurs souhaitent particulièrement remercier F. De Moro, E. Tupin et C. Belouetde la société Solarforce pour les riches discussions et pour l'approvisionnement en éprouvettes.

Références

- [1] S. Saffar, B. Skallerud, Z.L. Zhang, Analysis of surface cracks in multi-crystalline thin silicon wafers, *Engineering Fracture Mechanics* 124 (2014) 310-321
- [2] M. Sander, S. Dietrich, M. Pander, M. Ebert, J. Bagdahn, Systematic investigation of cracks in encapsulated solar cells after mechanical loading, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 111 (2013) 82 - 89
- [3] F. De Moro, A. Focsa, K. Derbouz, A. Slaoui, N. Auriac and H. Lignier and P. Keller, Multicrystalline silicon solar cells from RST ribbon process, *Phys. Status Solidi C* 9 (2012) 2092-2096
- [4] J. J. Hall, Electronic Effects in the Elastic Constants of n-Type Silicon, *Physical Review* 161 (1967) 756-761
- [5] D. Sherman, Fractography of Dynamic Crack Propagation in Silicon Crystal, *Key Engineering Materials* 409 (2009) 55-64
- [6] F. Kaule, W. Wang, S. Schoenfelder, Modeling and testing the mechanical strength of solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 120 (2014) 441-447
- [7] S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Eitner, M. Köntges, Spatial and orientation distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011) 3054-3059
- [8] A. Infuso, M. Corrado, M. Paggi, Image analysis of polycrystalline solar cells and modelling of intergranular and transgranular cracking, *Journal of the European Ceramic Society* 34 (2014) 2713-2722
- [9] Performance and Reliability of Photovoltaic Systems Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules, IEA PVPS Task 13 External final report IEA-PVPS March 2014, ISBN 978-3-906042-16-9, International energy agency photovoltaic power systems programme
- [10] S. Kajari-Schröder, I. Kunze, M. Köntges, Criticality of cracks in PV modules, *Energy Procedia* 27 (2012) 658 - 663