

Étude du comportement mécanique des tranches fines de silicium pour applications photovoltaïques. Influence des conditions d'élaboration du matériau et de sa découpe en tranches.

Référence Thot : SL-DRT-17-0729

Encadrants : Roland RIVA (CEA - DRT/DTS/SMCP/LMPS) et Daniel NELIAS (INSA Lyon – LaMCoS)

Description du sujet

Contexte :

Dans le domaine des technologies de fabrication des cellules solaires photovoltaïques (PV), la réduction d'épaisseur des plaquettes de silicium (*wafers*) reste un objectif industriel important, en raison du gain de productivité induit. Ces *wafers* sont très majoritairement obtenus par découpe de briques massives en tranches de 156 mm × 156 mm dont l'épaisseur est aujourd'hui voisine de 180 µm à l'état brut (les opérations de fabrication des cellules réduisent ensuite cette valeur de 20 à 30 µm). A l'horizon 2020, les prévisions actuelles la situent à 120 µm pour les cellules finales (*International Technology Roadmap for Photovoltaic* - ITRPV, 7^{ème} édition, 2016). Cet amincissement peut toutefois être à l'origine d'une dégradation de leur tenue mécanique durant le processus d'élaboration des cellules ainsi qu'au cours de l'exploitation des modules PV. La résistance mécanique de ces plaquettes peut dépendre, d'une part, de la qualité du matériau avant son sciage (silicium mono-cristallin ou multi-cristallin, défauts cristallographiques et microstructuraux) et, d'autre part, des conditions de sciage en tranches, qui s'effectue par découpe au fil (entraînement d'un abrasif en suspension - découpe au *slurry* - ou diamants fixés sur le fil ; le procédé utilisant des fils diamantés est en passe de s'imposer, car il permet de réduire le trait de coupe ainsi que le temps de sciage). Par ailleurs, les méthodes habituellement utilisées pour quantifier les propriétés des plaquettes d'épaisseur standard, par exemple, pour le calcul des contraintes à rupture, peuvent être inadaptées au cas des tranches fines, en raison de leur grande déformation (figure 1), nécessitant la mise en œuvre d'approches particulières (calculs aux éléments finis).

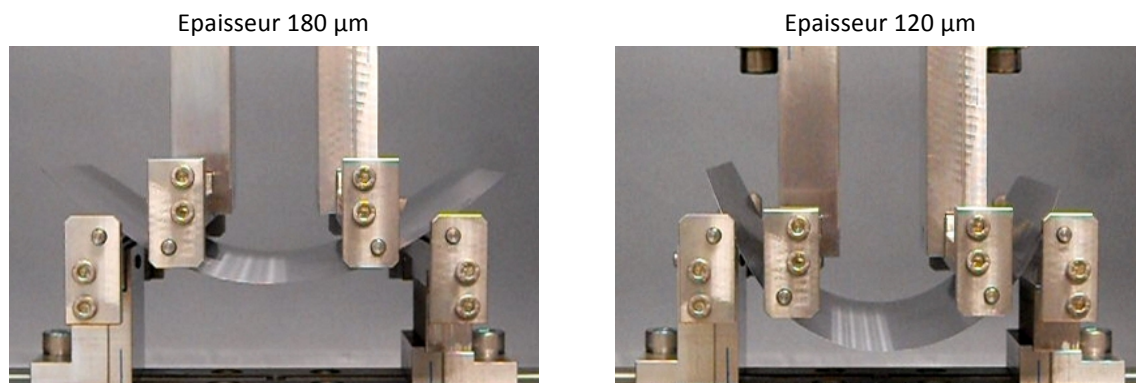


Figure 1 : Visualisations de la déformation maximale avant rupture de plaquettes de silicium mono-cristallin 156 mm x 156 mm testées en flexion 4 lignes (images CEA - LMPS).

Objectif :

L'objectif central de la thèse est d'améliorer la compréhension des mécanismes impliqués dans la fragilisation des tranches fines de silicium, en analysant l'effet de la qualité du matériau de base et l'influence des conditions de découpe. Cet apport est essentiel pour être à même d'établir des recommandations sur les procédés d'élaboration du silicium et de sa mise en forme, ainsi que pour la manipulation des plaquettes lors des étapes technologiques de fabrication des cellules solaires photovoltaïques. Les résultats obtenus devraient en particulier permettre d'optimiser la diamantation des fils de découpe du silicium en tranches, afin de limiter l'endommagement des plaquettes lors du sciage.

Programme de travail :

Une première étape portera sur une étude bibliographique de la croissance cristalline du silicium élaboré pour les applications solaires photovoltaïques, des méthodes de caractérisation de ses défauts résiduels, de sa découpe et des propriétés mécaniques des tranches fines. Ensuite, le travail de recherche comportera les deux volets suivants :

1/ Etude de l'effet du matériau sur le comportement mécanique des tranches de silicium.

Cette phase permettra de corréliser la qualité du matériau (silicium mono ou multi-cristallin, nature et densité des défauts cristallins et micro-structuraux) et la résistance mécanique de plaquettes (solicitation en flexion et par chocs). Dans ce but, des conditions de découpe applicables à tous les matériaux envisagés seront définies, afin de réaliser des essais mécaniques sur des tranches de différentes épaisseurs. A l'issue de cette étape, le choix d'une qualité de matériau pour étudier l'influence de la recette de sciage pourra être effectué.

2/ Etude de l'impact des conditions de découpe sur le comportement mécanique des tranches de silicium. Il s'agira d'identifier l'influence des paramètres de coupe (profils de vitesse et d'avance, consommation de fil, lubrification, ...) et des caractéristiques du fil (diamètre, nature, taille et implantation des diamants), au travers d'un plan d'expérience. L'endommagement des plaquettes sera caractérisé à l'issue du sciage des briques de silicium, avant d'effectuer des essais mécaniques destructifs permettant de déterminer les contraintes de rupture en flexion et d'étudier la propagation des fissures initiées par un choc, qui sera également abordée par le biais de simulations numériques utilisant la méthode des éléments finis étendus (XFEM).

Ces deux volets du travail de thèse seront menés en suivant les étapes décrites ci-dessous.

- Sélection et mise en œuvre de moyens de **caractérisation des défauts de volume du matériau** tels que l'imagerie IR et la photoluminescence intégrée, pour étudier l'impact de la qualité du silicium sur les propriétés mécaniques des tranches obtenues par découpe.
- Application de **méthodologies d'analyse de l'endommagement des tranches** par la découpe comme la mesure de durée de vie de porteurs minoritaires et la profondeur de pénétration de microfissures de sub-surface.
- **Caractérisation du comportement mécanique des plaquettes**, avec mise en place d'outils d'interprétation. Trois types d'essais mécaniques sur tranches (156 mm × 156 mm) seront envisagés : (i) quasi-statiques mono-axiaux (flexion 4 lignes) et bi-axiaux (Ring-on-Ring), avec calcul des contraintes par éléments finis (nécessaire pour les tranches fines) ; (ii) cycliques / cumulatifs (reproduction des opérations de manipulation sur les lignes de production) ; (iii) impulsionnels (essais de choc à énergie contrôlée), avec étude de la propagation de fissures.

Les travaux menés par l'étudiant(e) seront donc en lien direct avec les procédés industriels de fabrication des cellules photovoltaïques. Ils mettront en œuvre des outils de caractérisation du matériau silicium, de son endommagement par la découpe en tranches et de son comportement mécanique avec, pour ce dernier point, une approche à la fois expérimentale et numérique.

La thèse se déroulera principalement sur le site de l'Institut National de l'Energie Solaire (CEA-INES, Le Bourget du Lac, Savoie), au Laboratoire Matériau et Procédés Silicium (LMPS) du Département des Technologies Solaires (DTS), qui dispose de moyens de découpe des *wafers*, de caractérisation des matériaux et d'essais mécaniques. Le Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS de l'INSA Lyon, UMR5259 du CNRS) complétera ces moyens en apportant son expertise dans les domaines de la caractérisation mécanique des matériaux et de la simulation de leur comportement, afin d'étayer l'interprétation des résultats et d'en extraire les informations scientifiques les plus pertinentes.