

Approche systémique de cellules à colorant à base de nanostructures de ZnO

Programme HABISOL 2009-2012

Coordinateur LMGP (Grenoble)

Partenaires LEPMI (Grenoble); CEA-LITEN (Grenoble); CEISAM (Nantes); EDF-IRDEP (Chatou); IRDEP-CNRS (Chatou); LECIME (ex LECA, Paris); APERAM Imphy (ex Arcellor Mittal SNA, Imphy)

Contexte et Objectifs

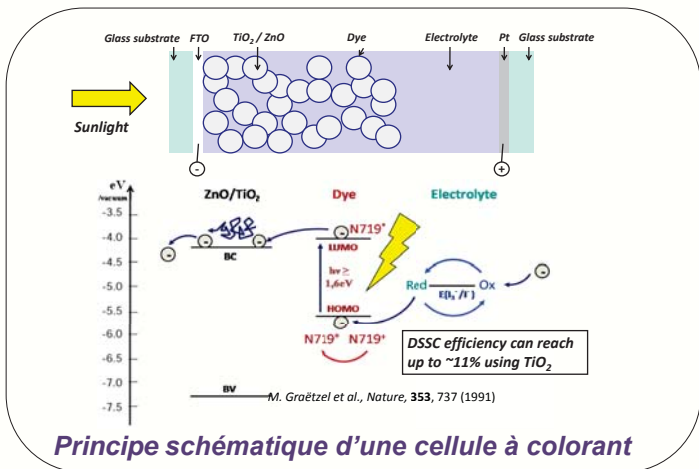
Intérêts des cellules à colorant

- Bas coût
- Pouvant être élaborées sur substrat flexible
- Pouvant présenter des couleurs différentes...

Rendement record = 12.3%

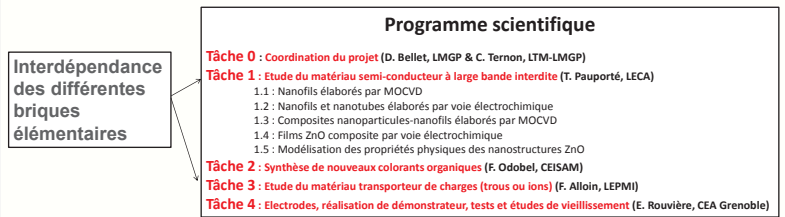
Objectifs du projet ASYSCOL

- Utilisation du ZnO au lieu de TiO₂
- nanocomposites = nanofils + nanoparticules de ZnO
- ⇒ Optimiser le transport
- ⇒ Développer des colorants efficaces et compatibles avec ZnO
- ⇒ Remplacer l'électrolyte liquide volatil habituel par un transporteur de trous non volatil.

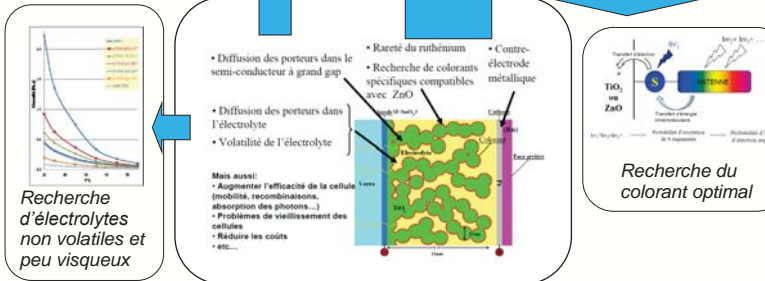
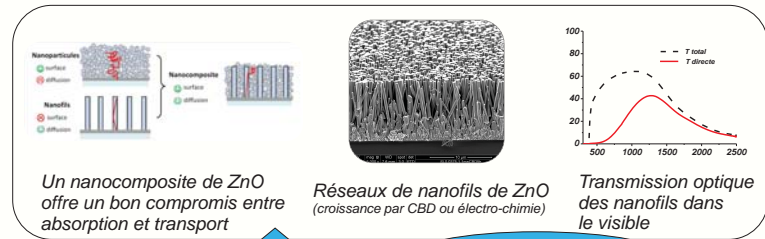


Méthodologie et Résultats

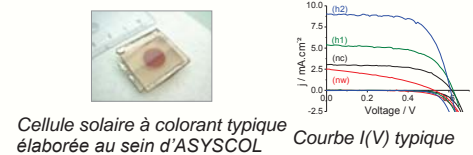
Une approche systémique



Points clés du projet, concepts et résultats



Réalisation de cellules



Conclusions et Perspectives

- Études sur l'élaboration de nanocomposites à base de ZnO (par voie électrochimique, par dépôt en bain chimique: CBD)
 - ⇒ propriétés structurales et optiques
- Efforts sur la recherche du colorant et de l'électrolyte optimisés pour les cellules à colorant à base de ZnO
 - ⇒ Expérience et compétence pour élaborer ces cellules avec des rendements de 4 à 5 %. (>3 partenaires)
- Poursuite de l'approche systémique (collaborations entre partenaires ASYSCOL)
 - ⇒ Mutualisation des compétences et équipements complémentaires

Impacts et valorisation

Le projet ASYSCOL (toujours en cours) a conduit à ce jour à la publication de plusieurs articles et a servi de "tremplin" à plusieurs projets de type aussi bien industriels qu'académiques.

CONTACT :

Daniel.Bellet@grenoble-inp.fr

Crédits photo : LMGP (E. Puyoo)

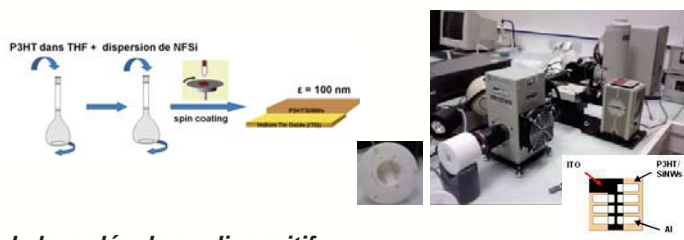


Coordinateur: J.Davenas, IMP, Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL)
Partenaires: LMI (UCBL), LPMCN (UCBL), INL (Ecole Centrale de Lyon)

Contexte et Objectifs

Le projet Physipo a porté sur la mise au point de nouveaux systèmes hybrides basés sur l'incorporation de nanofils de silicium dans des matrices de polymère conjugués photoactifs (P3HT, PVK) se prêtant à la réalisation de films photovoltaïques organique-inorganique à un coût réduit. Un taux de remplissage réduit est permis par le facteur de forme élevé des nanofils de silicium formant des chemins de conduction naturels pour les électrons et une dissociation efficace des paires de charges photogénérées dans un polymère bon conducteur de trous. L'innovation au niveau des matériaux porte à la fois sur l'originalité des nanostructures conduisant à des propriétés électroniques nouvelles ainsi que sur le procédé se prêtant à une industrialisation pour la production en continu de nappes photovoltaïques. L'innovation au niveau des dispositifs porte sur une modélisation approfondie des propriétés optiques et électroniques des structures en étroite interaction avec les laboratoires.

La croissance par mécanisme OAG permet la production de poudre de nanofils de silicium de diamètre inférieur à 10 nm, qui après broyage est dispersée sous ultra sons en solvant organique. Un mélange avec une solution du polymère déposé à la tournette sur un substrat d'ITO permet la production de couches de 100 nm dont la morphologie est contrôlée par le solvant. Les meilleures dispersions de nanofils ont été obtenues avec le THF pour une concentration optimum de 10 % et plus.... pour les nanofils fonctionnalisés avec de courtes chaînes polymères (PS). Le spectre d'absorption du silicium est élargi permettant une absorption plus efficace des photons solaires vers le proche IR dans le domaine des transitions indirectes permises par l'effet de confinement montré par la photoluminescence des NFSi à 850 nm à RT. L'extinction de la photoluminescence du polymère est optimum pour une concentration de 10 % de nanofils indiquant la dissociation des paires électron-trou photogénérées qui est améliorée par traitement avec une solution d'acide HF ou la fonctionnalisation des nanofils réduisant le rôle des états de surfaces. L'amélioration de l'interface silicium-polymère a permis une augmentation du rendement de conversion atteignant 3%.



de la molécule au dispositif

Couches P3HT/SiNW	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
NFSi bruts	0.4	0.88	0.31	0,57
NFSi traités HF	0.45	1.42	0.34	1,14
NFSi fonctionnalisés	0.5	3.3	0.35	3,04

Méthodologie et Résultats

Les briques élémentaires ont été optimisées en intégrant les objectifs de matériaux et process à coût modéré : production à fort flux de nanofils par voie VLS, fonctionnalisation des nanofils, couches photoactives hybrides produites par voie mélange... puis assemblées pour réaliser des dispositifs tests qui ont été évalués.

Conclusions et Perspectives

Une voie de production de cellules solaires hybrides à faible coût a été développée permettant d'atteindre des rendements de 3 % qui pourront être améliorés par une augmentation des transferts de charges du polymère aux nanofils basée sur une réduction des états d'interface par une fonctionnalisation de surface encore plus efficace.

CONTACT :

Joel.Davenas@univ-lyon1.fr



VISTASOLOR

Stratégies pour améliorer la stabilité des cellules solaires organiques incluses dans du double vitrage

HABISOL – Année 2008

Coordinateur: XLIM/MINACOM, UMR 6172, Université de Limoges

Partenaires: IMN, UMR 6502, Université de Nantes

LPMM, UMR 6505, Université de Clermont-Ferrand

Contexte et Objectifs

L'objectif du projet VISTASOLOR est l'étude de solutions technologiques permettant d'augmenter significativement la durée de vie des cellules solaires organiques afin de permettre leur inclusion dans l'habitat, notamment dans les double-vitrages. C'est sur cette base que travaille le consortium formé de 3 équipes de recherche académiques :

- étudier de nouvelles architectures de cellules solaires à cathode auto-encapsulante et/ou limitant le passage de fortes densités de courant aux électrodes, afin d'accroître la durée de vie intrinsèque des cellules solaires,
- développer des procédés de fabrication compatibles avec ces nouvelles géométries ou favorisant l'obtention de matériaux plus stables,
- effectuer le suivi dans le temps des performances photovoltaïques de ces dispositifs élaborés suivant les géométries et les procédés développés,
- étudier la photodégradation des couches actives organiques et des interfaces,
- étudier l'évolution des pièges au cours du temps par des caractérisations électriques des dispositifs.

Méthodologie et Résultats

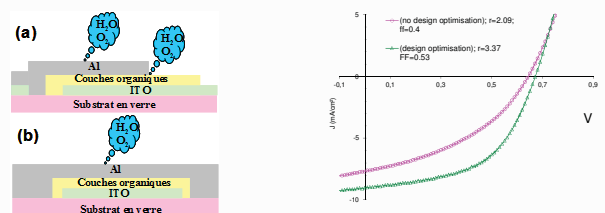
Méthodologie:

- XLIM (Université de Limoges, coordinateur) propose des solutions technologiques faisant intervenir des procédés de dépôts des électrodes et des géométries de dispositifs limitant le vieillissement des cellules solaires, et effectue également les caractérisations concernant les performances photovoltaïques,
- l'IMN (Université de Nantes) étudie l'évolution des propriétés de transport électrique dans les cellules solaires à l'état initial et après vieillissement,
- le LPMM (Université de Clermont-Ferrand) effectue la caractérisation du photo-vieillessement des matériaux et des interfaces.

Résultats:

Les études de design et de durée de vie ont porté sur les cellules solaires à petites molécules (CuPc-C₆₀).

- Cathode auto-encapsulante: cellules avec la cathode réalisée par le procédé IBAD (ion beam assisted deposition), avec une **augmentation de la durée de vie d'un facteur 28**.
- Géométries d'électrodes limitant la dissipation: **augmentation du rendement de 50 %**.
- Anodes tri-couches (ITO/métal/ITO) pour un meilleur compromis transmission/R_{sq}: T = 90 % et R_{sq} = 8 W/□



- établissement de données prédictives à partir des propriétés physico-chimiques des matériaux afin de permettre une optimisation des procédés d'élaboration des cellules solaires à grande échelle: screening de 4 polymères P3HT et deux PCBM. Des relations ont été établies entre les paramètres de procédés (concentration massique en solution, température et durée de recuit) et les propriétés physico-chimiques (masse moléculaire, polydispersité, régiorégularité).
- Dépôt d'un brevet (WO2010/010254A1), 7 articles, 5 communications invitées, 9 congrès avec proceedings.

Conclusions et Perspectives

Des avancées significatives en terme de stabilité des cellules, des solutions pour augmenter les surfaces. Il reste à effectuer les tests de vieillissement des dispositifs en condition d'encapsulation double-vitrage et à monter une infrastructure d'IBAD assurant une reproductibilité du process au cours des 6 derniers mois (prolongation jusqu'à juin 2012).

CONTACT :

bernard.ratier@unilim.fr

Coordinateur : Pr G. Hadziioannou (LCPO)

Partenaires : LCPO (Bordeaux); LCC (Toulouse); InESS (Strasbourg); IS2M (Mulhouse); CEA-INES (Chambéry); Arkema ; Hutchinson

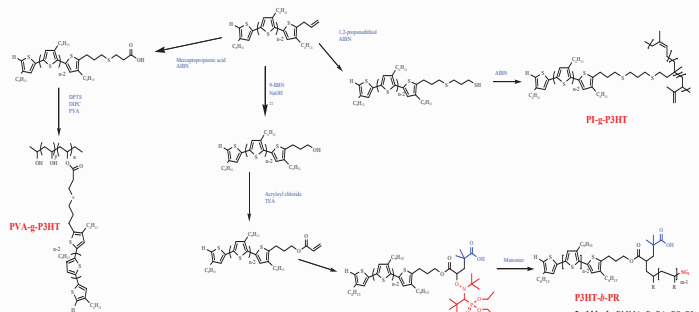
Contexte et Objectifs

Les cellules photovoltaïques organiques (et notamment à base de polymères) sont une bonne alternative aux technologies matures comme le silicium et elles permettent la réalisation de dispositifs flexibles et/ou à moindre coût. En effet cette technologie utilise des procédés de fabrication « doux » (dépôts à partir de solution) et permettent ainsi d'envisager des applications plus diversifiées, comme par exemple les dispositifs nomades ou les fenêtres des immeubles. Parmi les limitations de cette technologie encore émergente, on peut citer le manque de stabilité dans le temps des cellules et le faible recouvrement spectral par rapport à la lumière du soleil, et en particulier le domaine de l'infrarouge.

Le projet « Spirwind » se propose d'adresser ces deux points particuliers en associant les efforts des équipes de 4 laboratoires universitaires (2 en synthèse des matériaux et 2 pour leur caractérisation), un laboratoire du CEA (l'institut de l'énergie solaire) et 2 partenaires industriels. Il concerne donc l'élaboration de cellules solaires organiques en prenant en compte les différentes problématiques depuis la synthèse de matériaux efficaces et stables jusqu'à l'encapsulation du dispositif final.

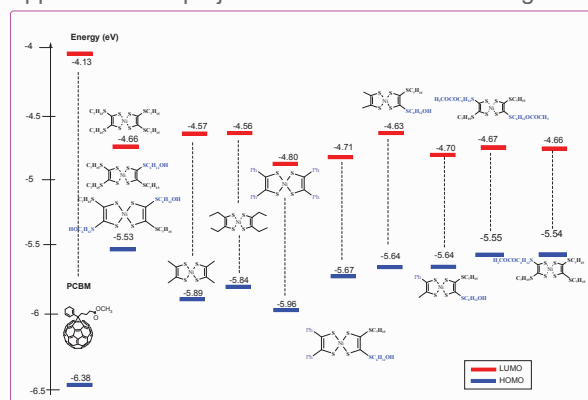
Méthodologie et Résultats

(1) **Design de nouveaux copolymères à blocs utilisables comme tensio-actifs** dans la couche active des cellules solaires organiques (tache réalisée par le LCPO). L'idée ici est de stabiliser la morphologie du mélange P3HT PCBM qui constitue la couche active d'une cellule standard. Ci-dessous sont représentés des exemples de copolymères synthétisés durant le projet.

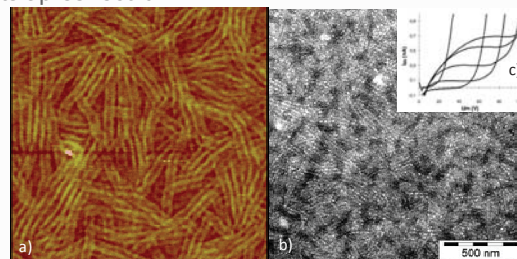


(2) **Design et synthèse de complexes solubles de Nickel originaux absorbant dans l'infrarouge (LCC)**. Ces complexes ont été ensuite greffés sur des polymères (en collaboration avec le LCPO) afin de pouvoir les intégrer dans des cellules organiques stables.

Ci-dessous sont représentés quelques exemples de complexes développés durant le projet avec leurs niveaux d'énergie:



(3) **Caractérisation morphologique, optique et électronique** des matériaux synthétisés (IS2M et InESS). Ci-dessous un exemple de caractérisations morphologiques et électriques d'une couche active constitué d'un copolymère à bloc le Poly(3-hexylethiophène-b-vinylepyridine) et d'un fullerène (PCBM). Les résultats indiquent une bonne stabilité morphologique (absence d'agrégats après recuit).



Mélange P3HT-P4VP/PCBM (ratio bloc-P3HT:PCBM de 1:0.7) après recuit
 (a) Image de phase en AFM après 1h à 160°C. Surface : 1µm x 1µm.
 (b) Image TEM après 1h à 160°C + 24h à 120°C.
 (c) Caractéristiques électrique d'un transistor à effet de champ

(4) **Elaboration de dispositifs photovoltaïques stables** à partir des matériaux synthétisés et/ou en utilisant des électrodes stables chimiquement et des architectures de cellules adaptées (structures inversées notamment).

(5) Enfin, une réflexion à plus long terme concerne **l'encapsulation des dispositifs** avec différents films barrières. Ce travail est mené conjointement par les deux partenaires industriels.

Conclusions et Perspectives

Les différentes étapes de l'élaboration de cellules solaires stables et efficaces, depuis la synthèse jusqu'à l'encapsulation du dispositif final, ont été menées à bien. Trois publications sont déjà parues sur ce travail et plusieurs autres sont en cours de dépôt. La prochaine étape consiste à réaliser une cellule test qui intègre tous ces développements.

CONTACT :

hadzii@enscbp.fr

LCPO

LCC

InESS

IS2M

INES
INSTITUT NATIONAL
DE L'ENERGIE SOLAIRE

ARKEMA
The world is our inspiration

HUTCHINSON
WORLDWIDE

MODCOLOR

MODules photovoltaïques COLORés
pour une meilleure intégration architecturale.
HABISOL 2008



Coordinateur: CEA-LITEN

Partenaires: CEA INES, Alliance Concept et TENESOL

Contexte et Objectifs

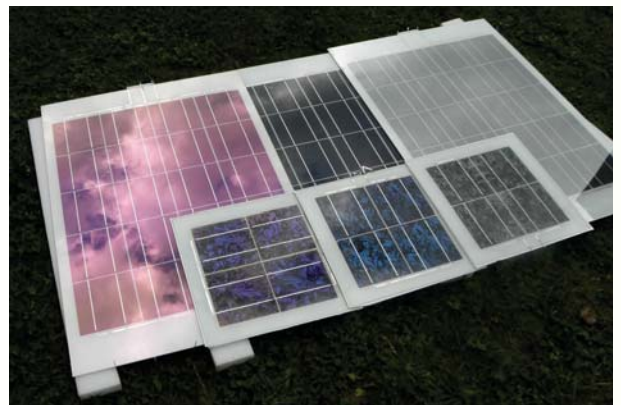
Les bâtiments offrent des surfaces importantes qui peuvent avantageusement être exploitées pour l'intégration de systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques. Cependant, l'intégration architecturale de modules solaires PV classiques est souvent limitée par la couleur bleu profond des modules à base de silicium cristallin, couleur qui est difficilement compatible avec l'architecture des bâtiments de certaines régions, notamment le pourtour méditerranéen.

La disponibilité de modules PV de différentes couleurs constitue donc une solution attractive pour favoriser leur intégration architecturale aussi bien dans des bâtiments traditionnels que des bâtiments modernes, pour lesquels l'aspect esthétique reste une priorité.

La diminution du rendement associée à la coloration des modules reste une difficulté importante qui explique la faible disponibilité des modules colorés sur le marché actuel, dans un contexte où le rendement de conversion reste le critère prioritaire.

Le défi majeur du projet MODCOLOR consiste à développer des modules de couleur qui présentent un bon rendement de conversion, et un surcoût limité associé à la coloration.

Les deux couleurs choisies pour réaliser des modules de démonstration sont le gris et le violet qui correspondent respectivement à l'épaisseur de filtre la plus faible et la plus épaisse dans chacune des deux filières. Des grands modules de 4X5 cellules avec vitrage coloré et de 2X2 cellules avec cellules colorées ont déjà été réalisés.



Sur la photo ci-dessus le module du milieu est le module référence (vitrage non teinté ou cellules polycristallines bleues).

Méthodologie et Résultats

La coloration du module est réalisée par filtres interférentiels intégrés selon deux filières différentes : directement sur la cellule PV ou sur le vitrage d'encapsulation des modules. La première voie est bien adaptée aux cellules polycristallines et la seconde aux cellules polycristallines texturées qui sont intrinsèquement « noires ». La technologie de dépôt de couches de SiN et de SiO₂ par MOCVD est utilisée pour la coloration des cellules (156x156 mm²). La technologie de dépôt de couches de TiO₂ et de SiO₂ par pulvérisation cathodique réactive en DC pulsé pour la coloration des vitrages (1x.7 m²).

Conclusions et Perspectives

Des modules colorés ont été réalisés par intégration de filtres interférentiels directement sur cellules PV ou sur vitrage en grande surface. La conception des filtres est telle que la perte de rendement relatif ne dépasse pas 10%. C'est ce qui doit être vérifié dans les mois qui viennent lors des tests électriques. Le coût de coloration dans une filière existante est de l'ordre de 2 à 4c€/W ce qui permet d'envisager de nombreux développements architecturaux pour les bâtiments du futur.

CONTACT :

Philippe.bouchut@cea.fr



Coordinateur : CEA-INES, DRT/LITEN/DTS/LMPV

Laboratoire des technologies pour les Modules PhotoVoltaïques

Partenaires : IMN, SOLEMS, ARDEJE

Contexte et Objectifs

Les cellules solaires organiques notamment celles à base de polymères sont en constante progression et atteignent aujourd'hui des rendements de 8 % (5% pour les composés de référence P3HT et PCBM). Avec cette progression des rendements, la durée de vie limitée des cellules organiques devient le principal obstacle à leur essor. Pour résoudre ce problème qui est étroitement lié à la structure de type M-I-M, nous proposons de développer une nouvelle génération de cellules polymères de structure P-I-N ou N-I-P, intégrant des couches d'OMSCT p et n. D'autre part, l'emploi de l'impression par jet d'encre constituera une véritable rupture technologique et économique pour la réalisation de cellules solaires P-I-N imprimées sur des substrats rigides. Le projet **SOLHYPIN** propose de résoudre le problème de la durée de vie sous un angle nouveau en proposant une architecture novatrice compatible avec l'utilisation de matériaux stables et autorisant la réalisation de dispositifs semi-transparentes.

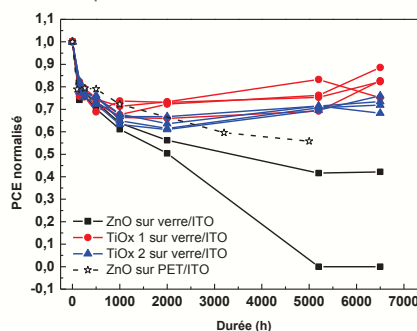
- Performances OPV :

AM1,5, 100 mW.cm⁻²

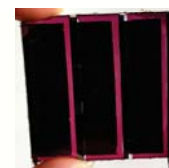
dispositifs	Surface active	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA.cm ⁻²)	FF (%)	PCE (%)
Cellules	0,28 cm ²	0,6	11,2	55,2	3,7
Modules 5x5 cm ²	11 cm ²	1,63	10,1	64,1	3,5

- Stabilité OPV :

encapsulation flexible, illumination continue AM1,5, 100 mW.cm⁻²



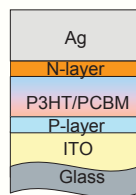
Stabilité:
T₀ >3.0%
-18% @ 6500 h



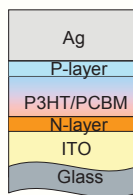
- Intégration grille métallique à valider

Méthodologie et Résultats

- Architecture P-I-N ou N-I-P :



OMSCT n = ZnO, TiOx



OMSCT p = NiO ou polymère conducteur p

- Procédés : spin coating (référence laboratoire), sputtering, jet d'encre (T <150C, transférable sur PET)
- Etapas de validation :
 - Validation performance et stabilité de chacune des couches OMSCT n et p
 - Validation grille métallique
 - Intégration en cellules OPV, 0,28 cm²
 - Intégration en modules OPV, 25 cm²

Conclusions et Perspectives

Elaboration de **cellules et modules OPV stables et performants** :

- PCE = **3,5 %** à t=0 (cellules et modules)
- **Durée de Vie > 6000 h** d'illumination continue avec des pertes en rendements < 20 % ~3-5 ans de fonctionnement conditions réelles
- Dépôt brevet IMN/CEA/Ardèche : Transfert industriel de l'OMSCT n pour la production à grande échelle.
- Elargissement du domaine de compétences de Solems dans le dépôt d'oxyde semi-conducteur par sputtering.
- Démonstration de la stabilité des cellules OPV ; déploiement de la technologie pour les cellules et modules tandems pour accéder aux 10% de rendements (ANR TANDORI, PROGELEC 2011).
- Création d'une start up d'élaboration de modules OPV par jet d'encre par Ardèche (projet FUI Solarjet).

CONTACT :

xxx@xxx.fr

Solenn.bernon@cea.fr

Stephane.guillerez@cea.fr

MULTIPHOT-PV

Multiplication de Photons pour Augmentation du Rendement des Cellules PhotoVoltaïques.



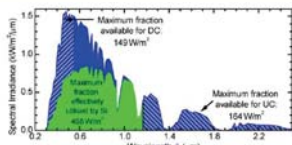
HABISOL-2009

Coordinateur: Bernard Moine, Laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux Luminescents (LPCML, Lyon)

Partenaires: Laboratoire des Matériaux et du Génie Physique (LMGP, Grenoble), Sciences Chimiques de Rennes (SCR, Rennes), Commissariat à l'Energie Atomique - Laboratoire d'Innovations pour les Technologies des Energies nouvelles et le Nanomatériaux (CEA-INES, Grenoble, Le Bourget du Lac), SunLand21 (Anse)

Contexte et Objectifs

Ce projet vise à développer des matériaux simultanément « convertisseurs de fréquences » et « multiplicateurs de photons » qui pourront être déposés sous forme de couches minces, notamment à la surface de cellules en silicium cristallin, mais également sur des couches organiques/minérales transparentes nécessaires à l'encapsulation et à la protection mécanique en face avant des cellules solaires. Les processus physiques qui réalisent cette conversion mettent en jeu des ions luminescents et des transferts d'énergie entre ces ions. Ces processus de « quantum-cutting » conduisent à une multiplication des photons dans la couche mince active et une adaptation de leur énergie au pic de sensibilité du matériau constituant la cellule. L'utilisation plus efficace de la partie UV-visible du spectre solaire permet ainsi d'envisager une augmentation significative du rendement des cellules solaires.



Méthodologie et Résultats

Il s'agit tout d'abord de déterminer des couples ions / matrice qui sont le siège des processus de « quantum cutting », qui présentent une forte absorption et qui puissent être déposés sous forme de couches minces par différentes techniques (PLD, CVD atmosphérique, Sol-Gel). Le LPCML, le SCR et le CEA-INES sont en charge de la synthèse de différents systèmes et de l'étude spectroscopique, le LMGP développe une méthode de dépôt originale par MCVD à pression atmosphérique, le CEA-INES réalise des cellules test et mesure les rendements obtenus, enfin l'entreprise SunLand 21 est en charge de la réalisation d'un prototype.

L'ion Yb^{3+} a été choisi pour son émission à 980nm qui se situe juste au dessus du gap du Silicium. Pour le sensibiliser, le Pr^{3+} et le Ce^{3+} sont de bons candidats. La matrice CaYAlO_4 a été étudiée en premier car dans cette matrice les bandes d'absorption et d'émission de Ce^{3+} sont bien positionnées (Fig. 1,2,3).

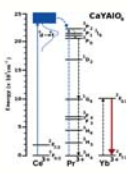


Figure 1

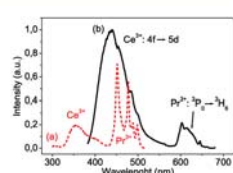


Figure 2

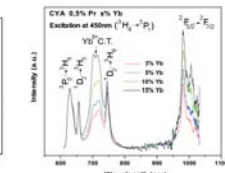


Figure 3

Méthode de dépôt:

Des précurseurs organo-métalliques (acétylacétonate, tétraméthylheptanedionate) achetés sous forme de poudre sont dissous dans un solvant (butanol). La solution est placée dans une burette à niveau constant reliée à un pot de pulvérisation qui crée un brouillard à l'aide d'une céramique piezo-électrique. Le brouillard est transporté jusqu'au porte-substrat par un flux d'air ; le porte substrat est chauffé par un élément résistif inclus dans la masse. Le dépôt se forme suite à la décomposition des précurseurs en phase gazeuse sous l'action de la chaleur. Le brouillard restant (précurseurs n'ayant pas réagi et produits de la réaction) est évacué et condensé par un piège à eau et un piège à froid (N_2 liquide). Des observations réalisées au MEB-FEG du LMGP ont permis de mesurer l'épaisseur des couches minces de manière directe, jusqu'à près de 500nm pour les plus épaisses.

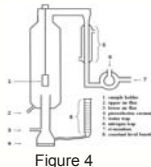


Figure 4



Figure 5

Le transfert d'énergie entre Pr^{3+} et Yb^{3+} a été observé dans le verre $37,5\text{GeS}_2-25\text{Ga}_2\text{S}_3-37,5\text{CsCl}$ (Fig.6). De plus, sur les spectres d'émission excités à 487nm, on constate que l'émission visible de Pr^{3+} diminue avec l'introduction d' Yb^{3+} , mais l'émission d' Yb^{3+} à 990nm et celle de Pr^{3+} à 1330nm augmentent. Ceci signifie que la première relaxation croisée entre le Pr^{3+} et Yb^{3+} est efficace, mais que le transfert à partir du niveau 1G_4 ne l'est pas.

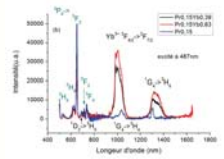


Figure 6

Les poudres La_2O_3 co-dopés $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ sont préparées par combustion. On a observé une photoluminescence intense dans la poudre $(\text{La}_{0,985}\text{Er}_{0,005}\text{Yb}_{0,01})_2\text{O}_3$. Le rendement quantique de la poudre $(\text{La}_{0,985}\text{Er}_{0,005}\text{Yb}_{0,01})_2\text{O}_3$ sous excitation à 380nm a été mesuré à l'aide d'une sphère intégrante. L'absorption de l'échantillon est déterminée par la différence entre la diffusion de lumière incidente de la référence et celle de l'échantillon (Fig. 7). Le rendement quantique pour $\lambda < 1200\text{nm}$ est de 117%, et celui pour $\lambda < 1650\text{nm}$ est de 160%. Ces résultats confirment l'existence du « quantum cutting ». Ce matériau pourrait être utilisé pour améliorer le rendement des cellules solaires, notamment pour des cellules au Ge.

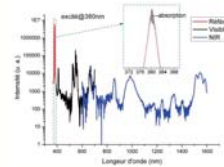


Figure 7

Les couches minces de $\text{GeS}_2-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{CsCl}$ dopés Yb^{3+} sont préparées par pulvérisation cathodique. La condition de pulvérisation est optimisée pour avoir un taux de dépôt élevé. L'épaisseur de la couche mince est contrôlée par la durée de dépôt. Des couches minces transparentes ont été obtenues (Fig.9).

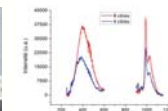


Figure 9: Photoluminescence des couches minces de GGC dopé Yb^{3+} . (à gauche, les spectres d'excitation (émission à 986nm), à droite les spectres d'émission (excitation à 390nm et 400nm respectivement))

Dans le cadre du projet MultiPhotPV, le LCP de l'INES a développé un outil de modélisation simple, flexible et réaliste permettant d'évaluer rapidement le gain potentiel sur le rendement d'une cellule donnée par l'apport d'une couche à conversion spectrale en face avant. Le but étant d'identifier les cellules cibles judicieuses (Si Homojonction / HET / RCC / SoG, ou CIGS...) au regard du comportement spectroscopique de l'espèce et d'adapter les configurations optométriques au besoin. Le modèle calcule un spectre solaire modifié effectivement « vu » par la cellule et tient compte des modifications de réflectivité de la cellule par la couche de conversion. Le code traite deux types de mécanismes de down-conversion : le Quantum Cutting et le Down Shifting. En effet, si des matériaux à quantum-cutting (efficace) sont difficilement réalisables, les matériaux à down-shifting à haut rendement peuvent constituer une alternative pertinente (Fig.10).

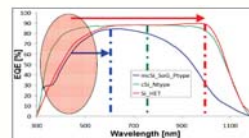


Figure 10

Conclusions et Perspectives

Le taux d'avancement global du projet est tout à fait correct et conforme au planning. Le jalon critique « sélection du meilleur couple ion/matrice pour chacune des méthodes de dépôt » n'a cependant pas encore trouvé de réponse définitive à ce jour.

CONTACT:

bernard.moine@univ-lyon1.fr



Coordinateur: Eric CLOUTET (Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques, CNRS-Université de Bordeaux)

Partenaires: Stéphane ROGER (Hutchinson, Chalette sur Loing); Christophe NAVARRO (Arkema, Lacq); Philippe POULIN (CRPP, CNRS-Université de Bordeaux); Jean-Jacques SIMON (IM2NP, Aix-Marseille Université); Denis TONDELIER (LPICM, Ecole Polytechnique Palaiseau); Laurence VIGNAU (IMS, CNRS-Université de Bordeaux)

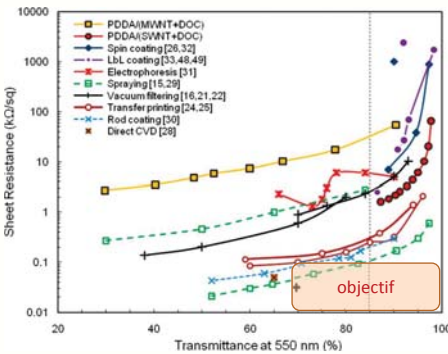
Contexte et Objectifs

Développement de films transparents conducteurs à base de nanotubes de carbone pour substituer les électrodes de type ITO (oxyde d'indium et étain)

Caractéristiques visées et comparées d'électrodes à base d'ITO et de Nanotubes de Carbone (NTC)

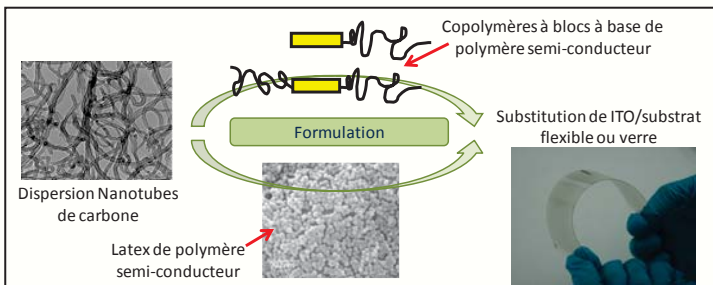
Paramètres	ITO sur verre	NTC sur substrat verre ou PET
Transmittance (%) ($\lambda=550$ nm).	80	70
Résistivité (Ω/\square)	$R_{\square} = 10 - 20$	$R_{\square} = 10 - 100$
Conductivité (S/cm)	$\sigma = 10^3 - 10^4$	$\sigma = 10^3$
Rugosité (nm)	> 10	< 10

Etat de l'art: Différents types de films à base de NTC



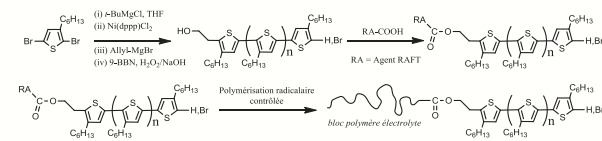
Y. T. Park, J. Phys. Chem. C, 2010, 114, 6325-6333

Méthodologie

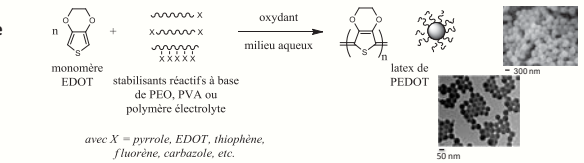


Résultats

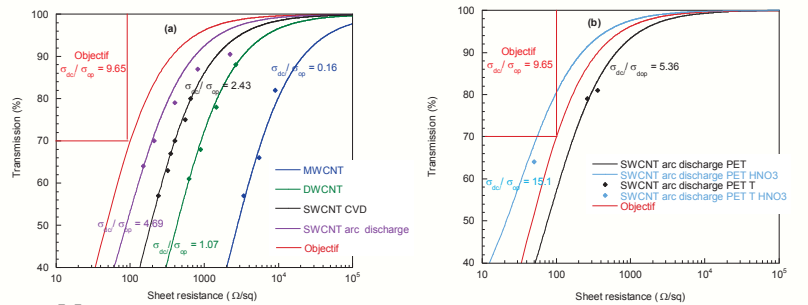
Synthèse de copolymères à blocs avec un bloc semi-conducteur



Synthèse de latex de polymère semi-conducteur



Caractéristiques transmission-résistance de différents types de films de NTC sur verre (a) et sur PET (b)



T : Transparence
 t : épaisseur du film
 Rs : Résistance carrée
 Z_0 : impédance de l'air (377Ω)

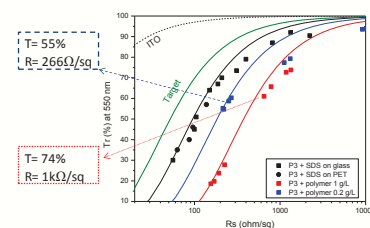
$$T = \left(1 + \frac{Z_0}{2} \sigma_{op} t\right)^{-2}$$

$$R_s = (\sigma_{DC} t)^{-1}$$

$$T = \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_0}{2R_s} \sigma_{op}\right)^2}$$

σ_{op} : Conductivité optique
 σ_{DC} : Conductivité électrique

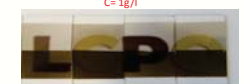
Etude de films de NTC /copolymères à blocs sur verre



Films obtenus par spray avec différentes épaisseurs C=0.2g/l



Films obtenus par spray avec différentes épaisseurs C=1g/l



Conclusions et Perspectives

- Synthèses de polymères et copolymères semi-conducteurs (en solution ou en dispersion) et leurs formulations avec des nanotubes de carbone pour la préparation de film transparents conducteurs;
- Optimisation des caractéristiques électriques;
- Optimisation des caractéristiques optiques;
- Intégration dans des dispositifs

CONTACT :

Eric CLOUTET, LCPO, CNRS-Université de Bordeaux,
 ENSCBP, 16 avenue Pey Berland
 33607 PESSAC
 cloutet@enscbp.fr
 tél.: 05 40 00 84 88



Coordinateur : N. Barreau (IMN, UMR 6502, Univ Nantes)

Partenaires : GPM (UMR 6634, Univ Rouen), CNRS-IRDEP (UMR 7174, Chatou), EDF-IRDEP (Indus., Chatou), 44solar (PME, Nantes)

Contexte et Objectifs

Les cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2 contiennent le plus souvent une fine couche tampon de sulfure de cadmium (CdS) déposée par bain chimique. La présence de Cd au sein de ces dispositifs est à proscrire pour des questions environnementales. A ce jour deux familles de matériaux montrent d'excellentes raisons d'être considérées comme candidats sérieux à la **substitution du CdS**; à savoir les dérivés du sulfure d'indium (In_2S_3) et les oxy-sulfures de zinc (Zn(O,S)).

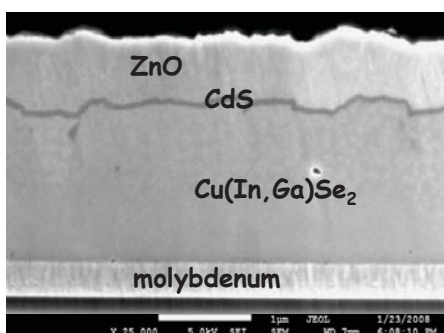


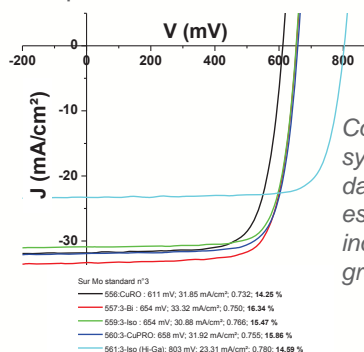
Image MEB de la coupe transverse d'une photopile à base de CIGSe

Néanmoins, la dispersion des performances d'un laboratoire à un autre et d'une ensemble d'échantillons à un autre laisse entendre que substituer le CdS ne peut se faire sans repenser le composant dans sa globalité. L'objectif du projet est d'explorer l'influence des **propriétés de la couche absorbante et des interfaces** qu'elle forme avec les matériaux adjacents sur le comportement des dispositifs à **couche tampon alternative**.

Méthodologie et Résultats

Afin de contrôler finement les propriétés des couches minces de CIGSe, ces dernières sont synthétisées par co-évaporation à l'IMN, sur des couches minces de molybdène elles aussi déposées à l'IMN avec l'expertise de 44solar dans le domaine.

Sur ces absorbeurs à propriétés ajustées sont ensuite déposées les couches tampon alternatives à l'IRDEP (Zn(O,S) par bain chimique) et à l'IMN (In_2S_3 par co-évaporation); des références CdS sont aussi étudiées. Les structures réalisées sont caractérisées du point de vue opto-électronique à la fois à l'IMN et à l'IRDEP (analyses complémentaires) et du point de vue matériaux à l'IMN (MET, Raman) et au GPM (sonde atomique); ces techniques de caractérisation sont aussi très complémentaires.



Courbes J(V) des cellules synthétisées sur le Mo déposé dans le cadre du projet. Le CIGSe est déposé par des procédés induisant gradients d'éléments du groupe III différents.

A ce jour, les résultats montrent que l'orientation préférentielle de la couche absorbante n'a pas d'influence majeure sur la qualité des dispositifs en tant que telle; en revanche étant la conséquence de la présence plus ou moins importante de sodium dans le CIGSe, c'est ce dernier paramètre qui peut être d'influence majoritaire. La propriété du CIGSe qui semble **la plus influente** est la nature du **gradient $[\text{Ga}]/([\text{In}]+[\text{Ga}])$** du contact arrière vers la surface de l'absorbeur. Ce paramètre est aussi la conséquence de nombreux paramètres de croissance qui peuvent eux aussi être influents; le principale travail reste d'isoler l'impact de chacun d'eux.

Conclusions et Perspectives

La différenciation de l'influence de chaque paramètre sur les caractéristiques de cellules à couche tampon alternative progresse bien et devrait permettre d'avoir une image globale du système d'ici peu.

CONTACT :

nicolas.barreau@univ-nantes.fr

Tel: 02 51 12 55 26

Coordinateur : Solarforce

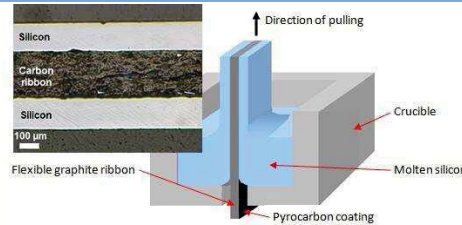
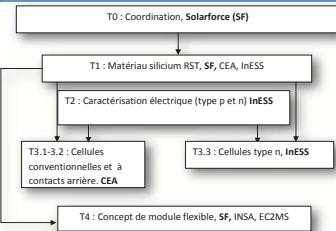
Partenaires : CEA-INES, CNRS-InESS, EC2MS, INSA-LaMCoS

Contexte et Objectifs

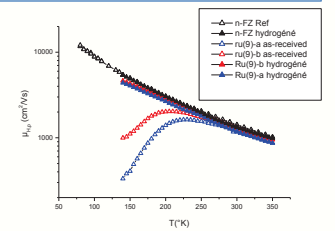
Le projet CASIMIR s'inscrit dans l'AXE THEMATIQUE 3 : FILIERES PHOTOVOLTAÏQUES du programme HABISOL dans un contexte concurrentiel caractérisé par des objectifs de coût de production au niveau module de 0,6€/Wc à l'horizon 2015. le coût de production de la plaque de silicium dans la technologie RST, inférieur à 20c€/Wc, est dans ce contexte un atout essentiel.

La technologie RUBAN RST développée dans CASIMIR a une propriété unique, non partagée par les procédés rubans concurrents en production, EFG de Schott solar et STR de Sovello ou en développement, RGS de ECN : Tirer des rubans de silicium dont l'épaisseur peut descendre en dessous de 100µm.

L'objectif principal du projet CASIMIR est de développer la technologie RST en rubans ultraminces depuis le tirage jusqu'à la fabrication de cellules à contacts reportés en face arrière avec une cible de rendement $\eta = 15\%$. A cela s'ajoute une composante module probatoire



▪ Ruban: 1-2m long x 7 cm largeur
▪ Epaisseur ~ 50-100µm → flexible



▪ Hydrogénation plasma améliore la mobilité des porteurs majoritaires dans le ruban type n

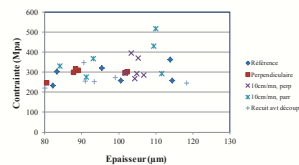
Méthodologie et Résultats

1 - Matériau RST

T1- Solarforce
Fabrication de plaques minces

Résultats tirage	Performances
Épaisseur (µm)	60-120
90µm	± 6%
Vitesse (cm/min)	4-5 (90-110µm)
Largeur (mm)	55-65
Longueur (m)	40
Planéité (courbure m ⁻¹)	1±0,5
Asymétrie	0,52
Régime de croissance	Stable

T4.1- INSA_LaMCoS
Caractéristiques mécaniques des plaques RST



Conclusion des essais de flexion de plaques non encapsulées :
Le silicium RST ne semble pas plus fragile intrinsèquement qu'un silicium mc-Si.
Améliorations en vue → optimisation tirage et découpe laser LMJ

2- Cellules

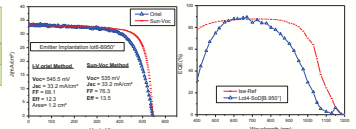
T3.1. CEA-INES : structure de cellule classique → diffusion/gaz BCl3 et sérigraphie des contacts
T3.2. CEA_INES : structure de cellule à contacts reportés en face arrière

Surface (5cmx5cm)	Jsc [mA/cm ²]	Voc (mV)	FF	η
BSF AL	29,6	575,5	0,713	12,2



T3.3. InESS - CNRS : structure de cellule classique sur substrat de type n:
→ Emetteur Bore par « Oxyde dopé Bore (B-SOD) » ou « Implantation d'ions Bore » et Recuit Thermique

Surface (1,2cm ²)	Jsc [mA/cm ²]	Voc (mV)	FF	η
I-V Oriol	33,2	545,5	0,681	12,3
Sun-Voc	33,2	535	0,763	13,5

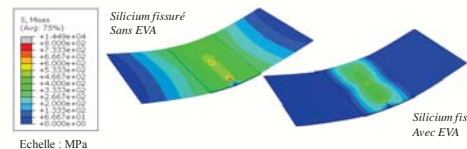


Facteurs limitant :
passivation de l'émetteur p+; FF

3 - Modules

T4.2. Comportement de fissures en flexion avec et sans EVA (simulation EC2MS).

- L'EVA bloque les mouvements d'ouverture et de fermeture de fissure en bas et en haut de la lèvres de la fissure.
- Réduction très importante (>10) du facteur d'intensité de contrainte K1, qui caractérise la résistance du matériau à la propagation de fissures.



T1- Solarforce
Rendement de fabrication des plaques.

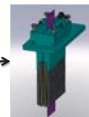
- ✓ Suppression des déformations de grande amplitude
- ✓ Réduction des contraintes
- ✓ Qualité de défilement du ruban RST au tirage

Amélioration du système de traction et réduction des déformations

→ Rendement de fabrication de plaques au tirage de 96% démontré

Réduction de la fragilité des rubans sur les bords et détensionnement post-tirage

→ Rendement de découpe des triplaques sur le banc laser ≈ 100% possible



Nouveau four de post-chauffage, détensionnement en ligne avec le tirage

T4.1. Optimisation du procédé. Déformations / simulations- INSA-LaMCoS et EC2MS

Résultats antérieurs

ANR RUBANSOLAIRE & OSEO-Tenerrdis (phénomène de flambage)

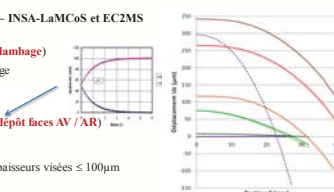
→ Conditions favorables à la suppression du flambage au tirage

→ Première limitation de la largeur des rubans à 80mm

Résultats CASIMIR (Rôle de l'asymétrie de l'épaisseur du dépôt faces AV / AR)

→ Déformée et épaisseur en fonction de la largeur des rubans ;

→ Nouvelle limitation de la largeur des rubans à 80mm aux épaisseurs visées ≤ 100µm



Contact : C. Belouet
Solarforce
1 rue du Dauphin 38300 Bourgoin,-Jallieu
Christian.belouet@solarforce.fr
Téléphone : 04.74.93.27.08
Fax :

Coordinateur: A. Slaoui, InESS-CNRS/ULP, Strasbourg

Partenaires: INL/INSA-Lyon, LPICM, SMS-Ecole des Mines, TOTAL, CORNING, AET technologies

Contexte et Objectifs

Contexte:

Développement industriel possible de la filière couche mince en Si cristallin sur substrat verre

Objectifs scientifiques et techniques:

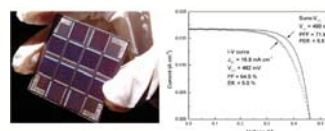
- produire des **substrats verres céramiques transparents**, supportant les grandes températures (>900°C), stable mécaniquement et facile à texturer
- Croître des couches tampon en **silicium cristallin par cristallisation induite par aluminium du silicium amorphe (AIC)**, avec des grands grains (>20µm), puis une **épitaxie en phase solide (SPE, VPE)**
- Réaliser des cellules à **hétérojonctions et à contacts interdigités** sur les couches optimisées; ==> rendements de conversion dépassant **10%**
- Développer un **réacteur de dépôt** pour grande taille
- Evaluer **économiquement** la faisabilité d'une telle filière.

Résultats principaux:

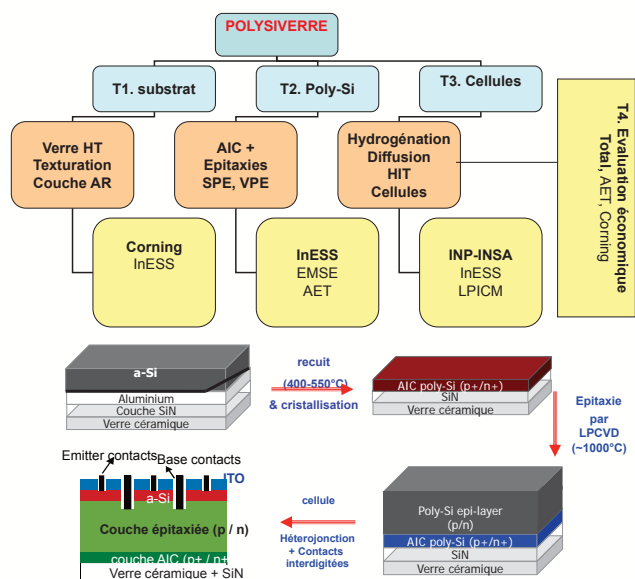
1. Développement de substrats verre céramique (GCG) et haute température (HTG) pouvant supporter des traitements thermiques à des températures maximales de respectivement 1050°C et 900°C, tout en répondant aux exigences d'ordre mécanique (déformation) et optique (transparence) compatible avec la technologie du silicium polycristallin. *un brevet a été déposé par Corning.*
2. Réalisation de films poly-Si très minces (< 5µm) de type p ou n, présentant des très grands grains cristallins (moyenne ~20µm) par le procédé de cristallisation induite par aluminium (AIC) suivi de l'épitaxie en phase solide ou vapeur.



3. Fabrication de cellules interdigitées et à hétérojonction sur Si polycristallin de 2µm d'épaisseur; des rendements de plus que 6% (surface réelle) ont été obtenus sans optimisation du confinement optique.



Méthodologie et Résultats



4. Conception et montage d'un réacteur prototype destiné au dépôt des films Si à grande vitesse et au recuit a été conçu, monté et validé au cours du projet.
5. Evaluation économique de l'approche « polysiverre » pour une éventuelle usine. Un rendement de 12% est exigé pour la viabilité du projet.

Conclusions et Perspectives

- Des avancées scientifiques et technologiques notables ont été obtenues sur le développement de substrats verres novateurs et sur des procédés intéressants pour réaliser les couches poly-Si et les cellules.
- Le confinement optique doit être implémenté pour ces couches en Si cristallin
- L'augmentation notable des grains (par fusion laser par exemple) devra être appliquée

CONTACT:

Abdelilah SLAOU
InESS – CNRS – Univ. Strasbourg
23 rue du Loess, F-67037 Strasbourg
slaoui@iness.c-strasbourg.fr
Tel. 0388106328

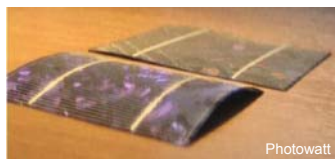


Coordinateur : Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL) – INSA Lyon
 Partenaires : Photowatt (Bourgoin-Jallieu), CEA INES (Chambéry),
 Tenesol (Toulouse)

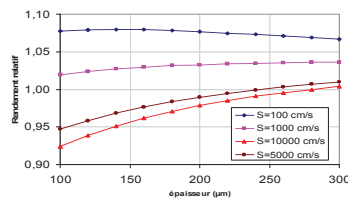
Contexte et Objectifs

La réduction des coûts de production des cellules PV en silicium peut passer par une réduction de l'épaisseur des wafers. Il n'est alors plus possible de conserver en face arrière le traditionnel champ en aluminium sérigraphié : celui-ci entraîne une courbure des plaques, et la passivation de surface n'est plus suffisante.

L'objectif de ce projet est de remplacer cette couche d'aluminium par des couches de passivation diélectriques et/ou par un dopage au bore. La mise en module des cellules est aussi réalisée pour valider la structure sur un long terme.



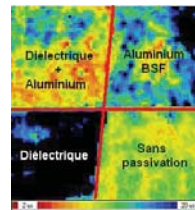
Courbure d'une cellule mince (150µm) lors de l'emploi d'une pâte de sérigraphie standard.



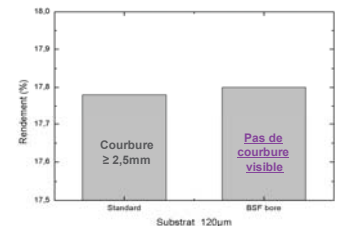
Influence de la vitesse de recombinaison en face arrière sur le rendement d'une cellule PV, en fonction de son épaisseur.

La diffusion de bore en face AR est réalisée par une diffusion de BCl₃ à haute température, ou bien par un dépôt d'oxyde dopé au Bore (BSG) par PECVD.

Dans les deux structures, la passivation de surface AR est maximale en utilisant une superposition de couches SiO_x et SiN_x. Les couches épaisses de diélectriques sont à privilégier, particulièrement dans le cas où la face AR est recouverte de métal.



Cartographie en durée de vie permettant la comparaison de différentes structures de passivation en face AR. La couche diélectrique est meilleure que l'Alu seul.

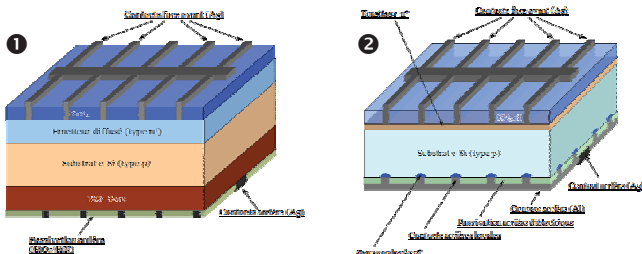


Résultats sur silicium monocristallin de 120 µm avec BSF bore et SiO₂ thermique. Le rendement est légèrement amélioré et la courbure des plaques supprimée.

Méthodologie et Résultats

Deux structures principales sont testées en parallèle :

1. Un dopage bore en face arrière de la cellule, complété par une couche de passivation (INES);
2. Une couche de passivation diélectrique ouverte localement par laser, suivie d'une métallisation par Aluminium (PW + INL).



Les couches de passivation sont déposées par dépôt par plasma (PECVD) pour rester compatibles avec les moyens de production classiques du photovoltaïques.

Conclusions et Perspectives

La structure ① basée sur le BSF bore combiné avec une couche de SiO₂ thermique donne des bons résultats, supérieurs au standard sur le silicium monocristallin, pour des épaisseurs de wafers allant jusqu'à 120 µm. Les résultats sont un peu moins bons sur le silicium multicristallin, en raison du traitement thermique à plus haute température nécessité par la diffusion du bore.

Les résultats de la structure ② sont comparables aux résultats standards. La couche diélectrique peut de plus servir de masque en face AR, lors de la diffusion du phosphore en face AV. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des contacts en Al déposés par pulvérisation cathodique, les pâtes de sérigraphie restant à optimiser.



Module avec des cellules BSF bore à η=18,35%, en test de vieillissement chez Tenesol

CONTACT :

erwann.fourmond@insa-lyon.fr
 n.lequang@photowatt.com
 nicolas.auriac@cea.fr
 a.saint-lary@tenesol.com



INXILICIUM

Capteurs photovoltaïques de silicium imprimés en couches minces par jet d'encre

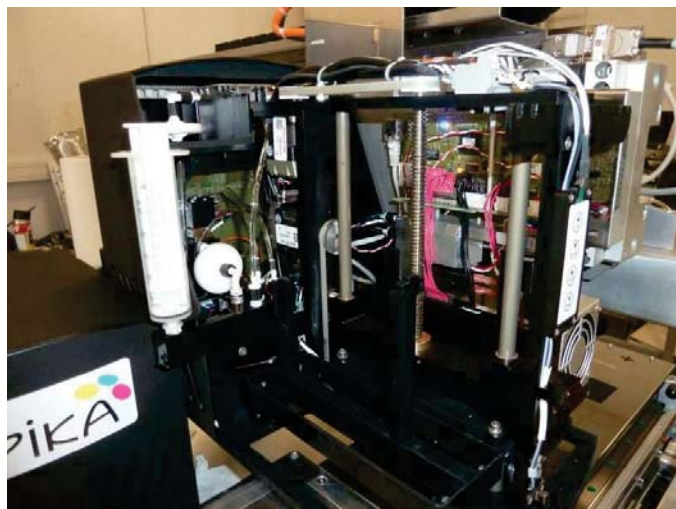
HABISOL 2008



Coordinateur: Institut Charles Gerhardt (Université Montpellier II, CNRS)
Partenaires: Centre de Microélectronique de Provence (EMSE), Impika, Institut d'Electronique du Sud, Institut de Recherche et Développement sur l'Energie Photovoltaïque (CNRS, EDF, ENSCP)

Contexte et Objectifs

INXILICIUM tend à démontrer la faisabilité d'une cellule photovoltaïque utilisant des couches de nanoparticules de silicium déposées par jet d'encre. Les nanoparticules de silicium sont élaborées par une voie de synthèse chimique. Le projet a pour but de formuler une encre stable de ces nanoparticules pouvant être jetée par jet d'encre, de développer une tête d'impression spécifique, puis d'établir la relation entre la méthode d'élaboration et les propriétés structurales, optiques et électroniques des couches obtenues.



Les dépôts sont effectués sur des couches minces (400 – 500 nm) d'oxyde de zinc dopé aluminium (ZnO :Al) et de molybdène (Mo).

Un système d'impression spécifique au jet d'une dispersion de nanoparticules de silicium a été développé (**voir figure**). Ce système présente des caractéristiques générales en adéquation avec le projet (compatible encre base eau ou base solvant, faible encombrement, facilement intégrable en laboratoire, maintenance aisée grâce à un système de nettoyage intégré) et adapté pour jeter une encre à base de nanoparticules (système de recirculation de l'encre pour éviter une sédimentation dans le circuit d'encre et dans la tête, régulation de la température pour ajuster la viscosité de l'encre).

Les couches de silicium obtenues font l'objet d'une caractérisation électro-optique après optimisation de la géométrie et des conditions de recuit (théorique: dimensionnement de la structure et expérimental: micro-ondes, SPS, RTA).

Conclusions et Perspectives

La synthèse de nanoparticules de silicium était un enjeu majeur du projet. Cet objectif a été obtenu par gravure électrochimique avec un scale-up jusqu'à 500 mL de dispersion.

La jetabilité de cette dispersion et le post-traitement pour contrôler l'état de surface des nanoparticules reste l'objectif du projet Inxilicium, avec une tête piézo-électrique compatible développée et testée au cours de la première phase du projet.

Méthodologie et Résultats

La gravure électrochimique sur wafer de silicium donne des résultats adéquats en termes de granulométrie des poudres obtenues. Cette méthode réalisée sur des wafers p et n fortement dopés permet notamment de s'affranchir de dopage ultérieur. Les formulations effectuées à ce jour (500 mL, base éthanol) sont compatibles avec les spécifications des têtes piézo-électriques retenues pour la suite du projet.

CONTACT :

David.Zitoun@univ-montp2.fr
Frederic.Favier@univ-montp2.fr



Coordinateur : InESS (Institut d'Electronique du Solide et des Systemes)
 Université de Strasbourg - CNRS (UMR 7163) 23 rue du Loess BP20 67037 Strasbourg cedex 2

Partenaires : CEA LITEN, APERAM, IREPA LASER, EXCICO, PHOTOWATT, SOPREMA

Contexte et Objectifs

Le silicium poly-cristallin (pc-Si) en couche mince présente un grand nombre d'avantages dans le domaine des applications photovoltaïques (PV) :

- réduction de la consommation de silicium
- relaxation sur la qualité électronique du matériau
- stabilité engendrée par son caractère cristallin
- transférabilité technologique immédiate.

Le projet SiLaSol vise à réaliser des mini-modules PV à faible coût, de 15 x 15 cm² à base de pc-Si (< 5 µm) déposé sur substrat métallique. Un rendement de conversion supérieur à 12% est recherché.

Au vu de l'application visée et des partenaires impliqués, le projet SiLaSol revêt un **caractère fortement industriel**.

Méthodologie et Résultats

Pour atteindre ces objectifs, le **projet SiLaSol** intègre:

- le développement de substrats métalliques résistants aux hautes températures
- la réalisation de films pc-Si de qualité électronique en associant de manière innovante les procédés laser et les fours à lampes
- la fabrication de cellules à hétérojonction
- l'élaboration d'une architecture de mini-modules pertinente d'un point de vue technique et économique

Plusieurs alliages métalliques et couches barrières ont été présélectionnés dans le cadre d'un projet ANR antérieur (CRISILAL). Ce sont sur ces ensembles substrats/couches barrières que la croissance de la couche active de pc-Si est réalisée.

Celle-ci se déroule en plusieurs étapes comme l'illustre la figure 1(A). L'épaisseur finale de couche active est comprise entre 2 et 5 µm. Les cellules ainsi obtenues seront ensuite associées en série pour former des mini-modules suivant le schéma présenté sur la figure 1(B).

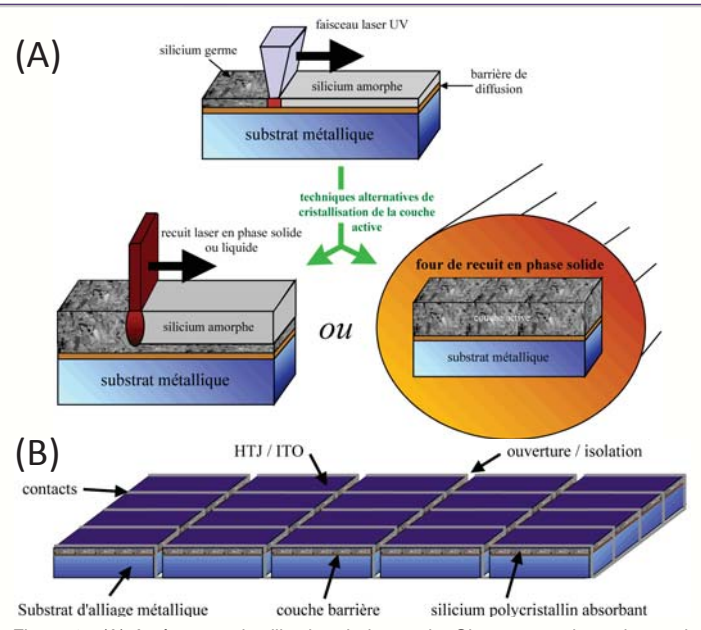


Figure 1 : (A) Après une cristallisation de la couche Si-germe par laser, la couche active est, soit cristallisée par laser, soit par une épitaxie en phase solide (recuit thermique). (B) Les cellules seront associées en série pour former les modules de grande surface.

Conclusions et Perspectives

De nombreux verrous scientifiques et techniques sont identifiés dans ce projet, principalement :

- le développement de substrats métalliques répondant à des critères thermique, chimique et électrique exigeants
- la réalisation de couches barrières de diffusion efficaces et conductrices
- l'élaboration de films de pc-Si de haute qualité électronique, obtenus par des traitements laser

À ce jour, les expériences menées dans le cadre du projet SiLaSol nous ont permis d'identifier l'alliage métallique du substrat, de définir la couche barrière adéquate, de choisir la technique de dépôt du silicium amorphe appropriée et d'éliminer les procédés lasers non adaptés à sa cristallisation.

Ce projet permettra le développement d'une technologie présentant un **fort potentiel industriel**.

CONTACT :
 Frédéric ANTONI (Coordinateur du projet)
 Institut d'Electronique du Solide et des Systemes (InESS)
 Uds-CNRS (UMR 7163)
 23 rue du Loess BP20
 F-67037 Strasbourg cedex2
 phone : +33(0)388106556
 fax : +33(0)388106548
 e-mail : frederic.antonini@iness.c-strasbourg.fr



Coordinateur : CEA-INES

Partenaires : EDF, LGEP, LPICM, UPC

Contexte et Objectifs

Le projet SHARCC vise à diminuer le coût de l'électricité photovoltaïque (PV) en développant une structure de cellule solaire innovante. La technologie basée sur le silicium cristallin (c-Si) est aujourd'hui bien implantée au niveau industriel mais le rendement des modules PV commercialisés reste aujourd'hui inférieur à 20%. Ce projet vise à explorer une nouvelle voie pour la fabrication de cellules PV en c-Si par l'utilisation combinée de deux technologies à haut rendement validées au niveau industriel: l'hétérojonction silicium (Si-HJ) de SANYO et les contacts en face arrière RCC (Rear Contact Cells) de SUNPOWER (Fig. 1). Ce projet constitue la suite du projet QC-PASSI qui visait à démontrer la faisabilité de ce type de structure innovante, quel que soient les moyens utilisés. Les recherches sont désormais menées sur des équipements industriels permettant un transfert rapide des technologies développées à l'industrie.

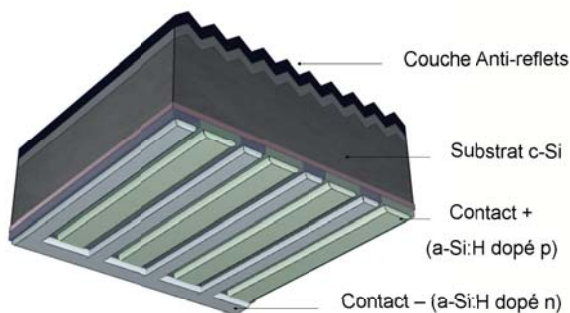


Figure 1. Vue schématique d'une cellule PV à hétérojonction silicium et contacts en face arrière (Si-HJ RCC)

Méthodologie et Résultats

Le projet est divisé en 7 tâches distinctes visant à la fabrication de modules PV ainsi qu'à l'évaluation du coût de la technologie développée (Fig. 2). Chaque partenaire est responsable d'au moins une tâche pour laquelle il est spécialiste, comme la caractérisation et la simulation (tâche 1) pour le Laboratoire de Génie Electrique de Paris. Cette tâche a permis le développement d'un modèle pour simuler les cellules Si-HJ, et les paramètres impactant le rendement des cellules ont pu être identifiés.

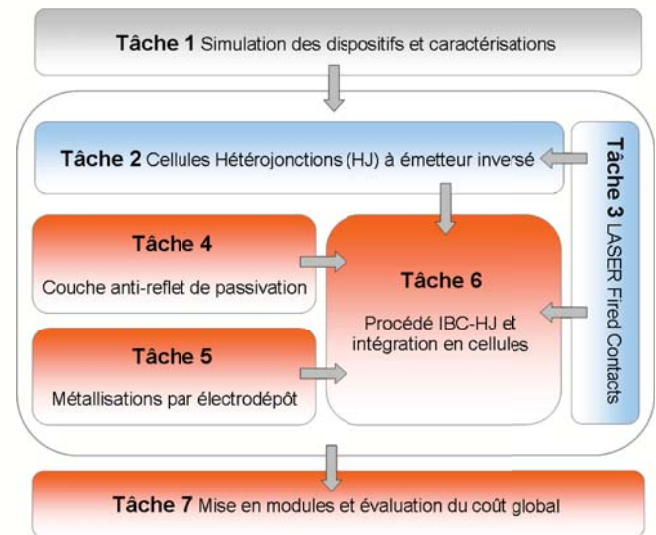


Figure 2. Organigramme du projet SHARCC

Dans la tâche 2, nos travaux ont permis de réaliser des cellules à émetteur inversé avec un rendement de 16.8% sur substrat poli et 17.7% sur texturé. Dans la tâche 3, la technologie Laser a été utilisée pour différentes applications telle que le recuit local des contacts ou la réalisation de caissons dopés. La tâche 4 a permis l'émergence d'une idée innovante pour la fabrication de la Couche Anti-reflets, et dans la tâche 5, une amélioration de la conductivité des électrodes après dépôt électrolytique a été mise en évidence. Le procédé développé pour la 6^e tâche a permis d'obtenir des dispositifs Si-HJ RCC fonctionnels de taille moyenne (25 cm²). Des cellules avec un rendement de 18% ont été réalisées sur substrat non texturé, parmi les meilleurs résultats au niveau mondial.

Conclusions et Perspectives

Le projet SHARCC permet la mise en commun de connaissances spécifiques à différents laboratoires et entreprises. Des résultats prometteurs (rendement de 18%) ont été obtenus sur une structure de cellule innovante. Un rendement supérieur à 20% devra être atteint pour la fin du projet, dans 18 mois.

CONTACT:

thibaut.desrues@cea.fr



energie atomique • énergies alternatives



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH



Coordinateur : INL-Institut des Nanotechnologies de Lyon-CNRS
Partenaires : IM2NP, LPICM, CEA-LETI, CEA-INES

Contexte et Objectifs

L'objectif du projet SPARCS était de développer de nouveaux concepts de cellules photovoltaïques (PV) exploitant le potentiel offert par l'**ingénierie nanophotonique**. Une telle ingénierie permet d'optimiser le rendement de collecte et d'absorption de la lumière incidente, tout en limitant l'épaisseur des couches absorbantes nécessaires. Diverses nanostructures photoniques ont été intégrées :

- des cristaux photoniques
- des réseaux de diffraction
- des structures plasmoniques

De nouvelles architectures de cellules solaires PV ont été développées dans les filières **silicium** et **organique**.

Méthodologie et Résultats

Ce projet a permis de mettre au point des méthodologies uniques pour concevoir, réaliser et caractériser ces nouveaux types de cellules, en intégrant des méthodes de simulation optique (FDTD, RCWA) (Figure 1) et électrique (SENTAURUS, SILVACO). Des procédés originaux ont ensuite été développés afin d'intégrer les structures photoniques au sein de cellules PV (Figure 2). Enfin, des études expérimentales ont permis de déterminer l'impact de ces structures photoniques sur les propriétés optiques des dispositifs réalisés (voir Figure 3).

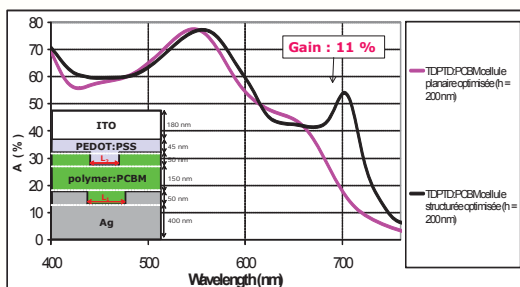


Figure 1 : Démonstration théorique de l'intérêt de l'intégration d'une structure nanophotonique dans une cellule organique

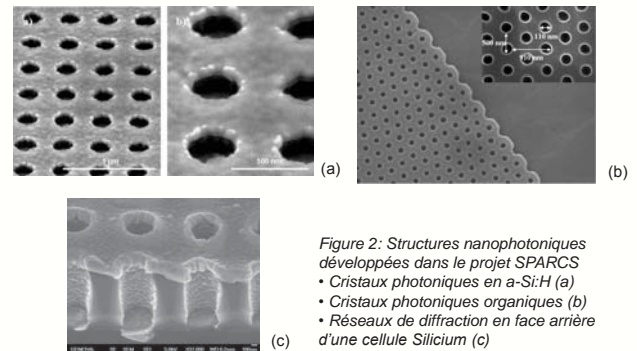


Figure 2 : Structures nanophotoniques développées dans le projet SPARCS
• Cristaux photoniques en a-Si:H (a)
• Cristaux photoniques organiques (b)
• Réseaux de diffraction en face arrière d'une cellule silicium (c)

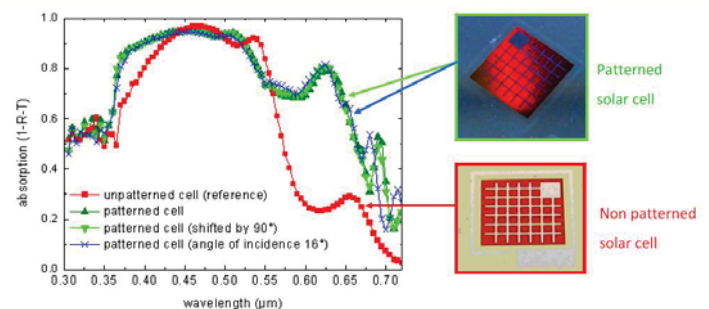


Figure 3 : Démonstration expérimentale de l'impact d'un cristal photonique sur les propriétés d'une cellule en silicium amorphe hydrogéné

Conclusions et Perspectives

Ce projet a permis de démontrer théoriquement et expérimentalement des gains d'absorption jusqu'à 50% dans des couches absorbantes structurées. Des cellules en couches minces complètes à cristaux photoniques ont été conçues, et des premières structures complètes ont pu être réalisées à la fin du projet. Enfin, un travail important a été démarré afin de développer de véritables filières technologiques permettant de réaliser des cellules PV « photonisées ».

Pour permettre le plein essor de ces nouveaux concepts de cellules, il sera nécessaire de poursuivre le développement de ces filières PV spécifiques. Le développement de structures photoniques plus complexes, permettra par ailleurs d'augmenter encore plus le rendement de cellules PV.

CONTACT: Christian SEASSAL

Christian.Seassal@ec-lyon.fr
<http://sparcs.ec-lyon.fr>



Coordination: N. Mangelinck-Noël (IM2NP UMR CNRS 6242, Aix-Marseille University)
 Partners: IM2NP (France), CEA/INES (France), SIMAP (France), ESRF (France), SINTEF (Norvège), MINES Paris Tech CEMEF (France), EMIX (Saint Maurice La Souterraine, France)

Context and Objectives

The grain structure in multi-crystalline photovoltaic silicon impacts drastically on the final photovoltaic properties. The formation of the grain structure relies on basic phenomena which are not well understood and mastered in industrial processes. The objective of the project is to significantly deepen the understanding and the characterisation of grain structures formation and development inside multi-crystalline silicon for photovoltaic applications as nucleation, growth modes (faceted or rough), grain competition and kinetics, twinning, coarsening and crystallographic orientation.

Approach

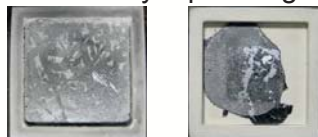
The ambitious scientific objectives of the project are to provide benchmark data on the formation of the grain structure and to develop quantitative predictive simulations concerning the mc-Si solidification. To reach this goal, we propose a joint approach comprising various scale laboratory experiments and modelling and numerical simulations to predict the grain structure in multi-crystalline silicon.

The core experiment and the most original one will consist in X-ray imaging (radiography and topography) characterisation of the mc-Si solidification in real time in samples with dimensions 40mmx6mmx300µm. These experiments will provide new incepts for the understanding of the underlying physicochemical phenomena and of their dynamics.

The core experiment and the most original one will consist in X-ray imaging (radiography and topography) characterisation of the mc-Si solidification in real time in samples with dimensions 40mmx6mmx300µm. These experiments will provide new incepts for the understanding of the underlying physicochemical phenomena and of their dynamics.

Results

Selection of container materials and direct mc-Si wafer by squeezing molding (CEA/INES)



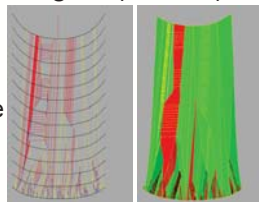
Silica mold + Si₃N₄ coating Silicided graphite mold + Si₃N₄ coating

- only few sticking points
- clean Si surfaces, free of any skin (few Si₃N₄ and SiC precipitates)
- mc structure with large dendritic grains

Study of grain structure in Si ingots (SIMAP)

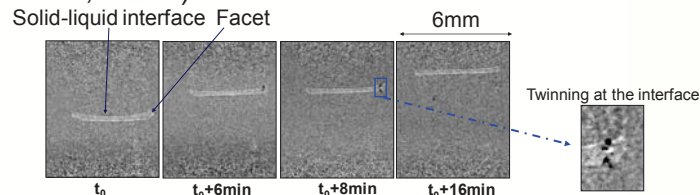


Metallography of the solid liquid interface showing facets at grain boundaries.

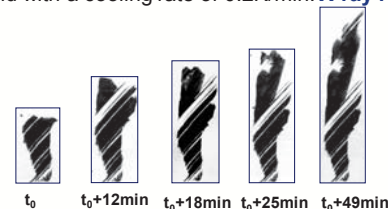


Numerical simulation of grain structure in an ingot, taking into account rough (yellow), faceted (blue) and twinned (red) grain boundaries.

Real time X-ray imaging of silicon solidification (IM2NP, ESRF)



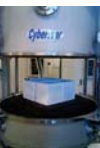
Si growth dynamics: High purity Si solidification at a temperature gradient of 16K/cm and with a cooling rate of 0.2K/min: **X-ray radiography.**



Twin formation: A grain growing during high purity Si solidification at a temperature gradient of 16K/cm and with a cooling rate of 0.2K/min: **X-ray topography.**

Industrial scale directional solidification (SINTEF)

Four multi-crystalline ingots of varying feedstock quality (MG, Two types of UMG, High quality) will be grown in an industrial scale furnace. A thorough post-growth analysis (crystallographic orientation, chemical analyses, PV properties) of these large scale specimens will be performed and compared with those of the small scale samples. The aim will be to extrapolate the grain structure formation observations from the in-situ experiments to explain the observed structures in the industrial scale ingots using models and other tools developed in the project.



Continuous casting (EMIX)

EMIX manufactures ingots by Continuous Casting in Cold Crucible (4C). This process involves strong radial temperature gradients that lead to a fine grained solidification structure with a high density of extended defects.



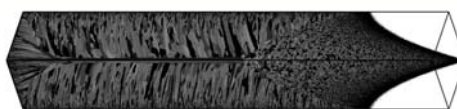
ppbw	Zone 2	Zone 3
Ti	3,271	4,382
Ni	1,186	2,323
Cu	298,261	1085,42

Concentrations of some impurities in two zones of a 4C wafer



Dislocations on a 4C wafer

Modeling of structures (MINES ParisTech CEMEF)



Cellular Automaton - Finite Element simulation of the multi-crystalline structure in a 15x15x100cm³ silicon ingot produced by continuous casting.

Conclusions and Prospects

Benchmark experiments are already yielding unique results concerning the growth of multi-crystalline silicon. We are now analysing the phenomena and the mechanisms by comparing the models, simulations and different scale experiments. The aim is to better understand the phenomena underlying the growth of mc-silicon to be able to better control its solidification. This task will be particularly developed during the last year of the project i.e. 2012.

CEA INES

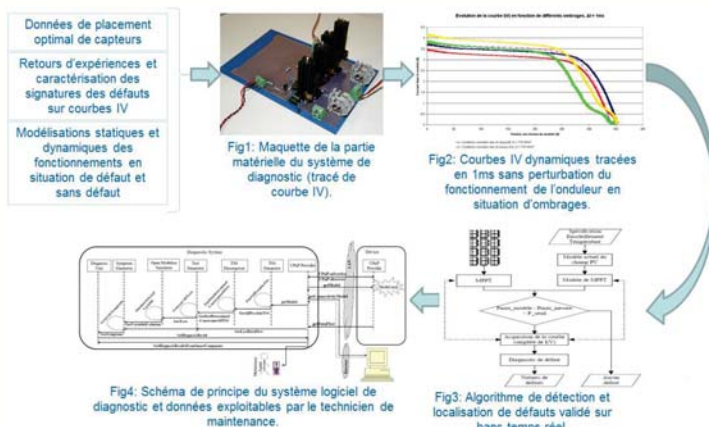
Transenergie, G2ELab, G-Scop

Contexte et Objectifs

- Fort développement des installations PV axé sur la rentabilité et la durée de vie
- Besoins de maintenance pour les premières installations mises en service
- Manque d'outils permettant de qualifier rapidement et de manière fiable l'état de l'installation PV.

L'objectif de ce projet est de proposer un système permettant de détecter et de localiser les défauts dans des installations PV afin de fournir un « service » aux utilisateurs, aux installateurs et aux opérateurs de maintenance pour superviser et diagnostiquer leurs installations.

Méthodologie et Résultats



Chaque partenaire a travaillé sur une brique technique mettant en avant la bonne complémentarité des compétences choisies dans ce projet. Les résultats sont positifs et prometteurs.

Les verrous ont porté principalement sur :

- l'identification des modes de défaillance des systèmes PV,
- l'identification des signatures de défauts,
- la mise au point d'une méthode de mesure non intrusive et d'impact limité en termes de productible, de rentabilité, de coût,
- une interface utilisateur simple et efficace,
- la définition d'une méthode automatisée ou automatisable amenant au diagnostic de défaut.

Comme le montre la figure précédente, l'ensemble des briques technologiques nécessaires au fonctionnement du système a fait l'objet de développements et de tests validant les orientations techniques choisies.

Ces développements ont permis de dépasser les objectifs en ne se contentant pas seulement de détecter et localiser les défauts mais aussi d'en déterminer la nature.

Conclusions et Perspectives

Les résultats étant positifs, la déclinaison en produits a été abordée à travers une étude de marché afin de valoriser au mieux les développements effectués.

Les briques technologiques développées et validées sur le terrain permettent d'envisager différentes applications ou découpage produit :

- Une valise de diagnostic, utilisable comme outil de maintenance des installations
- Un système de diagnostic intégré à l'installation PV pour un suivi plus détaillé

Dans ce cadre nous sommes à la recherche de partenaires industriels pour la poursuite des développements et la mise sur le marché d'une ou des deux solutions ci-dessus.

CONTACT :

nicolas.chaintreuil@cea.fr

MULTIXEN

Silicium multicristallin de type n purifié par voie métallurgique pour la fabrication de cellules solaires à bas coût et à rendement de conversion élevé



Programme HABISOL 2008

Coordinateur: CEA

Partenaires: LPICM, LGEP, IM2NP, SIMaP, PHOTOWATT, APOLLON SOLAR

Contexte et Objectifs

Le développement d'une voie de purification du silicium dite « métallurgique » et alternative à la purification SIEMENS permettrait non seulement de réduire les coûts mais aussi de limiter les risques environnementaux. Néanmoins, cela doit se faire en parvenant à conserver des performances de cellules suffisantes et cela, sur un matériau qui présente des concentrations plus élevées en impuretés métalliques, dopantes et légères (C, O). Le silicium de type p est le matériau généralement utilisé en production pour des raisons historiques et il existe actuellement un procédé de fabrication de cellules bien établi. L'objectif de ce projet est d'étudier le potentiel du silicium de qualité solaire de type n (SO_{G_M}) car ce matériau est connu pour mieux tolérer les impuretés métalliques. Différents procédés de fabrication de cellules seront développés sur ce matériau pour atteindre des rendements de 15%.

La présence d'impuretés métalliques reste de second ordre. Ainsi, il a été possible de déterminer les spécifications en dopants nécessaires pour garantir un rendement de conversion supérieur à 15%.

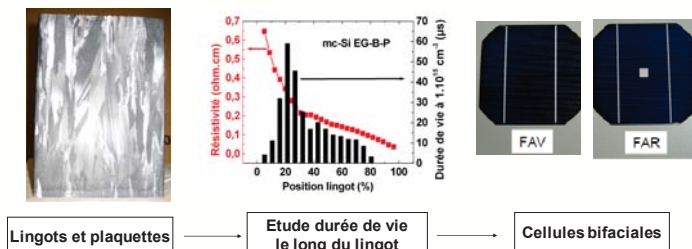
Nom Lingot	Type	[P] (ppmw)	[B] (ppmw)	ddv (μ s)	ρ ($\Omega.cm$)
mc-Si EG (n)	n	~0.05	0	0 - 450	1 - 6
mc-Si EG-P (n)	n	1.2	0	0 - 60	0.1 - 0.3
mc-Si EG-B-P (n)	n compensé	11.0	1.5	0 - 60	0.05 - 0.65
SoG _M -Si (n)	n compensé	11.5	1.6	0 - 30	0.1 - 0.4

Trois procédés de fabrication de cellules ont été développés dans le cadre du projet. Le plus adapté au silicium SO_{G_M} de type n est la structure de cellule bifaciale avec émetteur bore. Ce procédé a permis d'obtenir des rendements de 18.4% sur silicium Cz et de 15.0% sur silicium UMG_M , ce qui correspond aux objectifs.

Méthodologie et Résultats

La force du consortium repose sur sa capacité à traiter le sujet dans sa globalité.

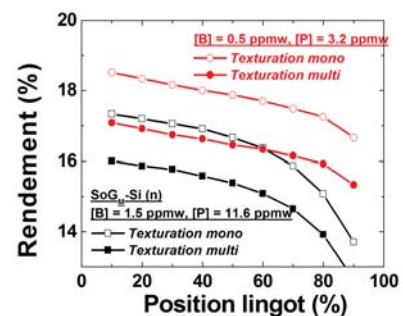
- 1/ Purification du silicium SO_{G_M} (torche plasma)
- 2/ Cristallisation de lingots mc-Si (8 Kg et 80 Kg)
- 3/ Caractérisation physico-chimique et électrique
- 4/ Fabrication de cellules avec différents procédés
- 5 / Caractérisation des cellules



Pour du silicium de type n, le faible coefficient de ségrégation du phosphore entraîne une forte variation de résistivité le long du lingot. Les études ont montré que les concentrations élevées en dopants bore et phosphore (> 2ppmw) obtenues sur du silicium SO_{G_M} limitent la durée de vie du matériau.

Conclusions et Perspectives

Les résultats obtenus associés à des études de simulation ont permis de déterminer les spécifications nécessaires pour exploiter pleinement le potentiel de ce matériau. Plus particulièrement, l'amélioration du procédé de purification pour atteindre des concentrations en dopants plus faibles associé à des lingots monocristallin permettrait d'atteindre des rendements de 18%. Un démonstrateurs est actuellement en cours de réalisation.



CONTACT : Yannick.Veschetti@cea.fr



Coordinateur: Vesuvius France

Partenaires: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Institut National de l'Energie Solaire (INES), Vesuvius France.

Contexte et Objectifs

La cristallisation du silicium multi-cristallin nécessite l'utilisation de creuset en silice fondue préalablement revêtu d'un coating anti adhérent . Le coating de nitrure de silicium appliqué à ce jour par l'utilisateur n'apportent pas toujours les garanties de fiabilité nécessaires (fig1). Le revêtement ainsi réalisé est excessivement fragile et ne peut se transporter. L'objectif de ce projet est de mettre au point une solution plus fiable d'un creuset revêtu prêt à l'emploi (RTU) assurant un démoulage parfait ainsi que la non contamination du lingot de silicium.



Fig1: Casse au démoulage d'un lingot de silicium suite à un coating de mauvaise qualité

Le programme a réuni trois partenaires Vesuvius (creuset, coating), l'Université de Trondheim (cristallisation) et l'INES (caractérisations PV)

Méthodologie et Résultats

Méthodologie;

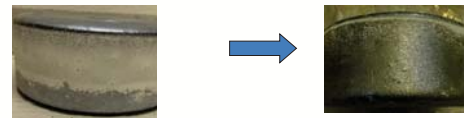
1) Développement du concept d'un creuset revêtu prêt à l'emploi (RTU) ou le coating est mécaniquement renforcé au moyen d'un liant spécifique (breveté)

2) Réalisation de lingots de silicium en four laboratoire pour tester aptitude au démoulage ,contamination ,et propriété photovoltaïques.

3) Sur les meilleurs prototypes, réalisation et caractérisation de cellules solaires et comparaison à la technologie de référence

Résultats:

-Le nouveau coating autorise un demoulage plus aisé



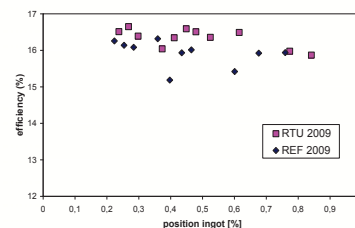
Référence

RTU

-Le coating est mécaniquement plus résistant

-La durée de vie des porteurs minoritaire est similaire ou améliorée

-Les cellules issues du lingot « RTU » ont un rendement légèrement supérieur à la référence (+0,4%)



Conclusions et Perspectives

-Le concept d'un creuset revêtu (RTU) prêt à l'emploi a pu être optimisé et validé.

-Les résultats laboratoire de ce produit publiés en 2009 (1) laissent augurer que ce produit pouvait contribuer à la fiabilité du procédé de cristallisation et à l'amélioration des rendements photovoltaïques.

-Depuis le procédé a été industrialisé et le succès commercial du produit «RTU» a totalement confirmé les résultats de ce projet :

-Plusieurs dizaines de milliers de creusets ont été produits à ce jour:



(1) Ready To Use SOLAR@crucible :Impact on multi crystalline ingot properties and cell performances, J Degouange ,24th European Solar Energy conference ,1264 (2009)

CONTACT :

Christian.martin@vesuvius.com