SOLYCO
Superior Solar Solutions

Module bi-verre équipé de cellules solaires à hétérojonction

Whitepaper

Depuis 1996, nos experts ont acquis une solide expérience dans le domaine des modules photovoltaïques et des solutions solaires. Fort de ce savoir-faire, SOLYCO Solar AG, fondée en 2020, s'est positionnée comme un acteur majeur du marché. En parallèle, notre filiale Solyco Technology GmbH, pionnière dans le secteur depuis 2007, mène des projets de recherche, développement et conseils pointus sur les technologies solaires et leurs procédés de fabrication.

Reconnus pour notre expertise et notre fiabilité, nous offrons à nos clients des modules photovoltaïques durables et performants. Grâce à notre équipe d'experts et de chercheurs, nous développons en continu des systèmes solaires innovants, adaptés à toutes les configurations de toiture. Notre engagement : vous accompagner vers une énergie propre et durable.

Contenu

1. Introduction.....2
2. Technologie HJT.....2
2. 1. Mécanisme de fonctionnement.....2
2. 2. Historique.....3
2. 3. En quoi cette nouveauté est-elle justifiée?
3. Technologie de production 4
3. 1. HJT-Cellule solaire 4
3. 2. SOLYCO HJT-Module solaire.....5
4. Propriétés techniques.....6
4. 1. Rendement.....6
4. 2. Coefficient de température 6
4. 3. Bifacialité.....6
4. 4. Dégradation 6
4. 5. Résistance aux intempéries 7
5. Résumé.....8

1. Introduction

HJT est l'acronyme de Heterojunction Technology et désigne une technologie de cellule solaire qui gagne en importance en raison notamment de son rendement élevé et de son coefficient de température amélioré. Ce livre blanc présente en détail cette technologie, son histoire, ainsi que la conception de ses produits et ses paramètres techniques. Des comparaisons avec la technologie PERC, dominante sur le marché ces dernières années, seront établies, et les avantages pour l'utilisateur par rapport aux modules TOPCon, actuellement au centre de l'attention, seront mis en évidence.

2. Technologie HJT

2. 1. Mécanisme de fonctionnement

Le fonctionnement d'une cellule solaire HJT est fondamentalement le même que celui des autres cellules solaires. Les cellules solaires absorbent la lumière du soleil et la convertissent en énergie électrique. Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule, les électrons du matériau sont excités électriquement et forment des paires électron-trou. Ces paires sont séparées, créant ainsi une tension électrique. Cette tension entraîne le flux d'électrons à travers un circuit électrique, produisant ainsi du courant continu (CC).

Cependant, la structure interne de la cellule solaire diffère selon les technologies. Les cellules HJT reposent sur une passivation électrique exceptionnelle de la surface du wafer de silicium cristallin grâce à

une succession de couches de silicium amorphe dopées différemment. Ces hétérojonctions entraînent des sauts de dopage particulièrement abrupts. Ils réduisent ainsi la recombinaison des porteurs de charge générés dans le wafer de silicium par la lumière solaire capturée. Ces porteurs de charge peuvent désormais contribuer de manière plus importante à la production d'énergie électrique. Par la suite, une couche d'oxyde transparent conducteur (OTC) est déposée des deux côtés des couches de silicium amorphe, dirigeant les porteurs de charge vers les électrodes. Celles-ci sont constituées d'un réseau de contact métallique composé de fines lignes imprimées.

La technologie des couches minces utilisée dans le processus de fabrication est connue dans l'industrie de l'affichage et permet une fabrication à basse température. Cela réduit la consommation d'énergie lors de la fabrication des cellules HJT.

2. 2. Historique

La technologie HJT a été initialement développée et brevetée par la société SANYO, ce qui a conféré à cette dernière un monopole sur son utilisation pendant de nombreuses années. L'histoire du procédé HJT remonte aux années 1970, lorsque les chercheurs ont commencé à appliquer les technologies de couches minces, issues de l'industrie des écrans, aux cellules photovoltaïques à base de silicium. L'excellente passivation de surface électrique des cellules HJT se traduit par des tensions électriques élevées, des rendements exceptionnellement élevés et un coefficient de température amélioré. Ce dernier entraîne, par rapport à d'autres technologies, des rendements spécifiques plus élevés à des températures élevées des modules solaires.

À l'heure actuelle, le procédé HJT est considéré comme l'une des technologies les plus efficaces dans le domaine de la photovoltaïque.[1]

2. 3. En quoi cette nouveauté est-elle justifiée ?

Le procédé HJT est une technologie mature, utilisée commercialement dans les modules photovoltaïques résidentiels depuis plus de 20 ans. Bien que cette technologie ait été principalement exploitée par SANYO, puis par PANASONIC pour la production de modules PV, elle a connu un développement exponentiel depuis l'expiration du brevet au milieu des années 2010. Depuis lors, de nombreux centres de recherche et entreprises ont travaillé à l'industrialisation de la technologie HJT.

Un élément essentiel pour une adoption industrielle à grande échelle est la disponibilité d'un large éventail d'équipements de production. Les avancées significatives dans le domaine de la construction mécanique ont notamment permis, ces deux dernières années, à un nombre croissant d'entreprises d'investir dans des usines de production HJT. Néanmoins, le nombre total d'usines commerciales pertinentes reste relativement faible, avec seulement 10 à 15 sites dans le monde, ce qui fait que la technologie HJT n'est pas encore largement répandue. Les modules HJT demeurent une spécialité, et l'exploitation d'une usine HJT nécessite une équipe hautement qualifiée sur le plan technologique.

SOLYCO a établi un partenariat avec un fabricant entièrement dédié à la technologie HJT. Cette collaboration a permis d'optimiser les processus de production et de réduire significativement les coûts, rendant ainsi la technologie HJT économiquement viable. Si les coûts de production et de vente des modules HJT restent légèrement supérieurs à ceux des modules PERC et TOPCon, les gains en termes d'efficacité, de tolérance à la température et de bifacialité positionnent la technologie HJT comme une solution économique très intéressante.

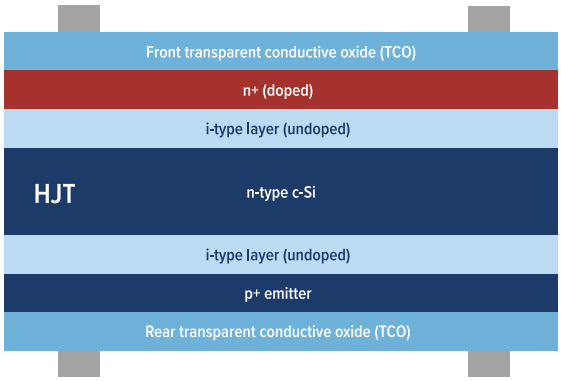


Figure 1 : Structure d'une cellule HJT

[1] https://pv-magazine-usa.com/2022/11/21/longi-claims-worlds-highest-efficiency-for-silicon-solar-cells/

Figure 2 : Schéma des procédés de fabrication des cellules solaires TOPCon et HJT

3. Technologie de production

Nous allons à présent examiner, d'une part, les spécificités des procédés de fabrication des cellules et modules solaires HJT et, d'autre part, celles des technologies PERC et TOPCon. Bien que de nombreuses étapes de production des modules HJT soient similaires, la fabrication des cellules solaires HJT diffère considérablement de celle des cellules PERC ou TOPCon. Tandis que les modules HJT et TOPCon utilisent des wafers de silicium dopés au phosphore (type n), les cellules PERC sont basées sur du silicium dopé au bore (type p).

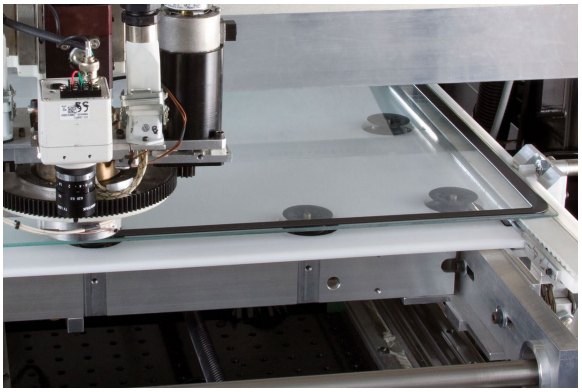
3. 1. HJT-Cellule solaire

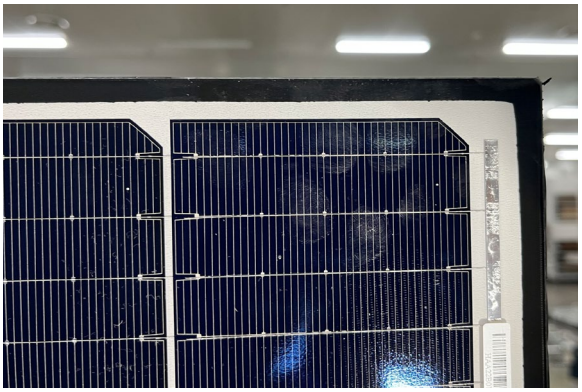
La structure conceptuelle d'une cellule solaire HJT est relativement simple et nécessite peu d'étapes de fabrication. En production de masse, environ 8 étapes de processus sont requises, tandis que les cellules PERC et TOPCon nécessitent en moyenne 13 étapes de production.

Cependant, les étapes de processus pour l'HJT sont fondamentalement différentes et la fabrication des cellules solaires HJT repose principalement sur des technologies de processus sous vide. Cela entraîne des coûts d'installation très élevés, l'investissement pour une usine de cellules HJT étant plus du double de celui d'une usine PERC comparable.

Le dépôt des couches sur les wafers se fait à basse température, inférieure à 300°C, tandis que les températures de process pour les cellules PERC et TOPCon atteignent jusqu'à 900°C. Cela réduit la consommation d'énergie dans l'usine de cellules d'environ 11% [2]. L'architecture spécifique des cellules HJT, avec des couches de silicium amorphe, limite la température maximale à laquelle une cellule solaire HJT peut être exposée. Cette limite est d'environ 250°C, car il faut éviter la cristallisation des couches de silicium amorphe passivantes. Cela a des répercussions sur la métallisation (frontgrid) des cellules HJT, car les technologies de métallisation haute température conventionnelles ne peuvent pas être utilisées. Seules des pâtes d'écran spéciales, riches en argent (et donc coûteuses), peuvent être utilisées.

[2] https://archive.org/details/china-pv-industry-development-roadmap-2022-2023.pdf





Figures 3 et 4 : Les figures montrent l'application d'un joint en butyle sur le verre comme étape supplémentaire pour assurer l'étanchéité. Ce joint noir est ensuite dissimulé par le cadre en aluminium.

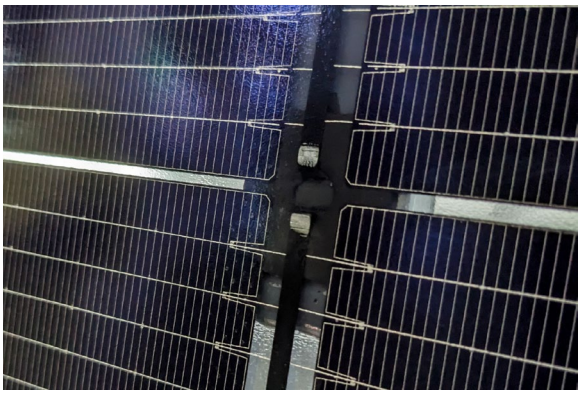


Figure 5 : montre comment les boîtes de jonction sont protégées de l'humidité par des joints en butyle.

Type de module	R-TG 108p.3	R-TG 108n.4	R-TG 96h.5
Technologie	PERC	TOPCon	HJT
Tc	-0,35 %/°C	-0,29 %/°C	-0,24 %/°C

Tableau 1 : L'impact de la technologie de cellule solaire sur les coefficients de température (Tc) de la puissance des modules SOLYCO est significatif et varie selon les types de modules.

3. 2. SOLYCO HJT-Module solaire

Les procédés de brasage conventionnels ne peuvent être utilisés pour relier les cellules solaires individuelles en un module solaire. Des procédés basse température sont donc également employés. L'encollage électriquement conducteur à l'aide d'adhésifs argentés est une technique industrielle établie, mais elle est associée à une consommation d'argent très élevée. Afin de réduire la consommation d'argent, un procédé de brasage basse température à l'aide d'un alliage étain-bismuth est utilisé, et pour optimiser la consommation d'argent, 18 fils de connexion (habituellement 10 à 16) sont utilisés[3].

Les cellules solaires HJT étant légèrement sensibles à l'humidité, une technologie de module de haute qualité est indispensable. SOLYCO utilise une technologie standard dans la fabrication de verre isolant, qui garantit une protection complète contre l'humidité pendant des décennies. Un joint en butyle est appliqué sur le bord extérieur du module solaire pour empêcher toute diffusion de vapeur d'eau. Les cellules solaires sont ainsi parfaitement protégées contre la pénétration d'eau.

Une telle étanchéité au butyle sur les bords augmente les coûts de production, ce qui explique pourquoi cette technologie n'est utilisée que dans très peu d'usines. Cependant, nous avons décidé d'utiliser uniquement les technologies les plus avancées pour notre nouveau produit phare, afin de combiner la meilleure technologie cellulaire avec la meilleure conception de module.

La technologie bi-verre avec joint périphérique est la plus avancée pour assurer une protection optimale des cellules solaires HJT et une longue durée de vie du module.

[3] Bien que cet alliage contienne actuellement du plomb, nous déployons tous nos efforts pour mettre au point une solution sans plomb.

4. Propriétés techniques

4. 1. Rendement

Avec un rendement des cellules solaires atteignant environ 25 % en production de masse, la technologie HJT surpasse les 24 % de TOPCon et les 23 % de PERC.

Cette supériorité se confirme au niveau du module, où les HJT affichent un rendement supérieur à 22 %, démontrant ainsi leur avancée technologique.

4. 2. Coefficient de température

Le coefficient de température est un paramètre crucial pour les modules solaires, car en général, l'efficacité – et donc la puissance – des cellules solaires en silicium diminue avec l'augmentation de la température. Les modules HJT, grâce à leur tension élevée, présentent le meilleur coefficient de température de toutes les technologies silicium, ce qui signifie qu'ils perdent moins de puissance à des températures de fonctionnement élevées par rapport aux autres produits.

Cet avantage est particulièrement important lors d'une installation en toiture, où les modules solaires peuvent atteindre des températures très élevées en raison de la chaleur accumulée derrière eux. Le graphique suivant compare la puissance par mètre carré des modules PERC, TOPCon et HJT typiques. On constate qu'avec l'augmentation de la température de fonctionnement, l'avantage de la technologie HJT se renforce, ce qui se traduit dans la pratique par une production d'énergie électrique en kWh significativement supérieure pour les installations photovoltaïques équipées de modules HJT.

4. 3. Bifacialité

Un autre avantage significatif de la technologie HJT réside dans la haute bifacialité de ses cellules. Des grilles de métallisation sont déposées sur les deux faces de la cellule solaire. Grâce à cette structure largement symétrique, des coefficients de bifacialité de 90 à 95 % sont réalisables. Cela signifie que la face arrière de la cellule solaire est presque aussi efficace pour convertir la lumière du soleil en électricité que la face avant. Pour les cellules PERC, ce coefficient est d'environ 70 à 75 %, et pour les cellules TOPCon, il est d'environ 80 %. Un coefficient de bifacialité élevé se traduit par une production d'énergie électrique accrue, bien que le gain réel en pratique dépende de nombreux paramètres du système, tels que la réflectivité du substrat, l'inclinaison du module et la distance au toit.

> La combinaison d'un rendement élevé et d'une excellente stabilité thermique confère aux modules HJT une puissance nettement supérieure à celle des modules PERC et TOPCon en conditions réelles. En conséquence, les installations sur toiture équipées de modules HJT produisent un rendement énergétique significativement plus élevé.

4. 4. Dégradation

Les cellules solaires en silicium cristallin subissent une dégradation au fil du temps en raison de différents mécanismes. Les deux plus connus sont la dégradation induite par la lumière (LID) et la dégradation induite par la lumière et la température élevée (LeTID), qui peuvent fortement affecter les performances des cellules.

Le défaut LID apparaît dans les premières heures de fonctionnement des modules solaires concernés et entraîne une réduction significative du rendement, pouvant atteindre jusqu'à 2 %. Ce défaut étant lié à une interaction entre les atomes de bore et les hautes concentrations d'oxygène dans le wafer de silicium, il peut être évité en utilisant des wafers de type n.

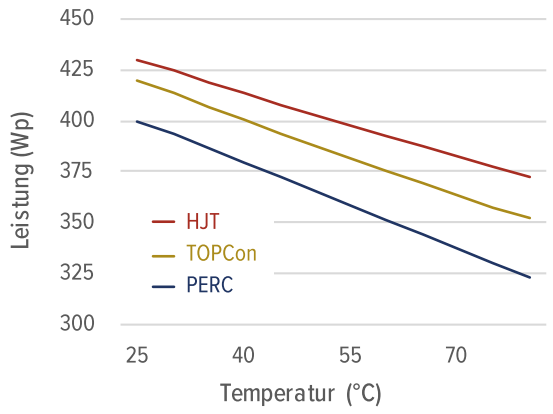


Figure 6 : Comportement de la puissance des modules en fonction de la température d'exploitation pour les technologies PERC, TOPCon et HJT.

En revanche, le défaut LeTID apparaît après quelques mois ou années et peut entraîner une réduction très importante du rendement, de l'ordre de 5 à 10 %. Ce défaut est dû à une interaction complexe de l'hydrogène introduit dans le wafer de silicium pendant la fabrication avec d'autres éléments dans la cellule solaire et est influencé par le processus de fabrication exact. Ce défaut n'apparaît pas non plus dans les cellules HJT.

4. 5. Résistance aux intempéries

La connexion électrique des cellules solaires est réalisée par des soudures. L'humidité entraîne toujours une corrosion des connexions électriques, se manifestant par une augmentation de la résistance électrique et, par conséquent, par une perte de puissance progressive du module. Une avancée significative par rapport aux modules solaires les moins chers est représentée par une structure de module en technologie verre-verre. La durée de vie plus longue attendue peut être démontrée par des tests de vieillissement accélérés en chambre climatique dans des conditions ambiantes chaudes et humides (tests d'humidité et de chaleur). La figure montre l'évolution de la puissance de deux modules équipés de la même cellule solaire (PERC) en technologie verre-film et verre-verre.

Les modules SOLYCO HJT sont soumis à des contrôles continus par un laboratoire d'essai indépendant. Certains tests IEC sont effectués selon un standard trois fois supérieur. Les modules SOLYCO ont obtenu les meilleurs résultats. Sur la base de ces résultats de test, nous pouvons offrir une garantie de performance supérieure à 90 % après 30 ans.

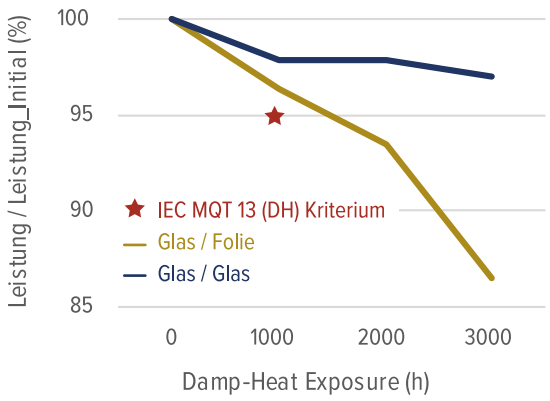


Figure 7 : Dans les modules verre-film, l'humidité diffuse à travers la face arrière vers les cellules solaires, entraînant à long terme des phénomènes de corrosion et une perte de performance. Les modules double vitrage présentent une meilleure résistance à long terme lors des essais.

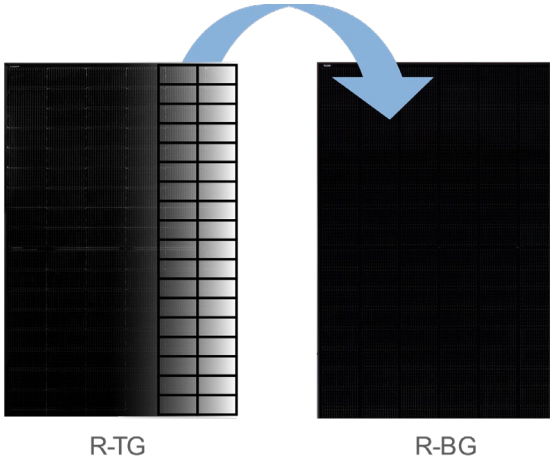


Figure 8 : La variante R-BG est entièrement noire mais reste bifaciale grâce à une grille noire appliquée au dos du module.

5. Résumé

La technologie HJT est aujourd'hui la plus performante pour les cellules solaires produites à grande échelle. Certes, son procédé de fabrication est plus complexe que celui de PERC ou TOPCon, mais HTJ représente une avancée technologique majeure. Grâce à des décennies de recherche et développement, notamment par SANYO, cette technologie offre une fiabilité exceptionnelle.

Les modules solaires HJT, nouveaux fleurons de SOLYCO, surpassent en rendement et en production d'énergie spécifique les technologies PERC et TOPCon. Malgré un coût d'investissement légèrement supérieur, les modules HJT permettent de réduire les coûts de production d'électricité sur le long terme, notamment pour les installations résidentielles. La figure 7 illustre clairement les avantages de HJT par rapport à ses concurrentes.

SOLYCO, expert en solutions solaires pour toitures, a choisi HJT pour répondre aux attentes des clients les plus exigeants, alliant performance et esthétique.

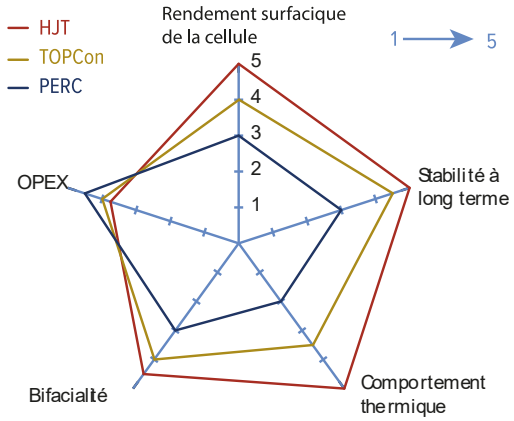
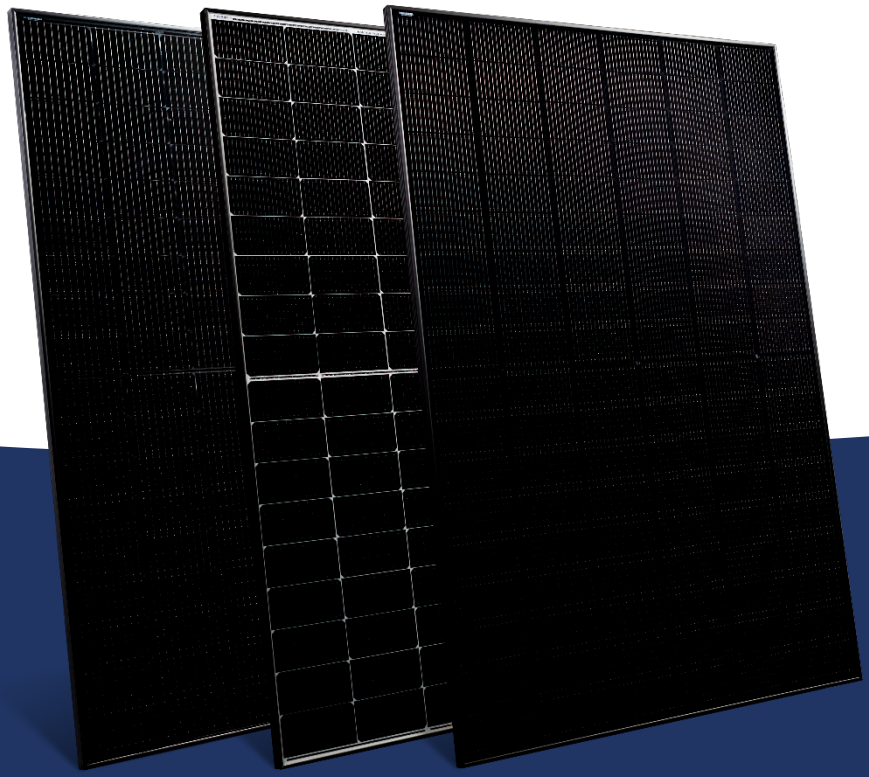


Figure 9 : Synthèse des paramètres les plus importants pour les technologies PERC, TOPCon et HJT.



SOLYCO Solar AG
Flughafen Tegel 1
13405 Berlin, Allemagne

T: +49 30 403 619 42
M: info@solyco.com
solyco.com