

Silizium-Dünnschichtsolarmodule: Ziele und Stand der 30x30 cm²-Technologie in Jülich

Einleitung und Zielsetzung

Bernd Rech und das 30x30 cm²-Team
Forschungszentrum Jülich
Institut für Photovoltaik
B.Rech@fz-juelich.de

Dünnschichtsolarzellen aus amorphem Silizium (a-Si:H) decken heute etwa ein Zehntel des Photovoltaikmarktes ab und haben einen Modulwirkungsgrad von 6-7%. Vorteile der a-Si-Technologie sind die unbegrenzt verfügbaren, nicht toxischen Ausgangsmaterialien sowie die niedrigen Prozesstemperaturen (< 300 °C), die nur geringe Energiemengen zur Modulherstellung erfordern und die Verwendung einer Vielfalt kostengünstiger Substratmaterialien (Glas, Plastik, Stahl) ermöglichen. Ziel der Arbeiten am Institut für Photovoltaik (IPV) ist es, die Grundlagen und die Technologie für zukünftige Silizium-Dünnschichtsolarmodule auf der Basis von amorphem und mikrokristallinem Silizium (μc-Si:H) zu erarbeiten. Der Ansatz ist, angefangen von grundlagenorientierten Materialuntersuchungen über Prozess- und Solarzellenentwicklung bis hin zur Demonstration von industrierelevanten Herstellungsverfahren für komplette Module das ganze Spektrum der Forschungs- und Entwicklung abzudecken. Mittelfristig sollen Modulwirkungsgrade über 10% unter Verwendung industrienahe Prozesse erreicht werden.

Zur Realisierung dieser technologischen Ziele ist eine Prozesstechnologie zur Herstellung von Silizium-Dünnschichtsolarmodulen mit einer Substratgröße von 30x30 cm² am IPV aufgebaut und in Betrieb genommen worden. Im Fol-

enden werden das Konzept der Technologie und erste Ergebnisse kurz vorgestellt. Hintergrundinformationen finden sich in [1,2].

Das Konzept und die Laboranlagen

Die Solarmodule basieren auf Tandemsolarzellen aus amorphem und mikrokristallinem Silizium (siehe Abb. 1). Besonderheiten sind der Einsatz von mikrokristallinem Silizium als Absorberschicht in der Bottomzelle der Tandemstruktur und die Verwendung von Zinkoxid als TCO-Material, das mit Magnetronspütern hergestellt wird. Die ZnO-Schicht muss dabei gleichzeitig transparent und hochleitfähig sein sowie eine Oberflächentextur aufweisen, die das Licht geeignet in die Solarzelle einkoppelt und streut. Die erforderliche Rauigkeit des ZnO-Frontkontakts wird beim IPV-Ansatz durch einen nasschemischen Ätzprozess nach der Sputterdeposition erreicht. Zusammen mit dem ZnO/Metall-Rückreflektor bildet die gesamte Solarzellenstruktur eine Lichtfalle ("light-trap"), die eine hohe Stromdichte bei kleinen Schichtdicken der Silizium Absorberschichten ermöglicht.

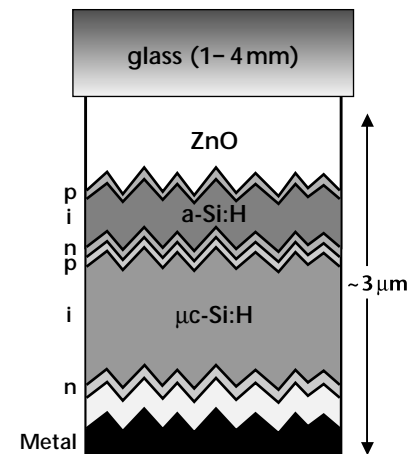


Abbildung 1
Schichtaufbau einer a-Si:H/μc-Si:H-Tandemsolarzelle

Abbildung 2
PECVD-Anlage für eine
Substratgröße von
30x30 cm²

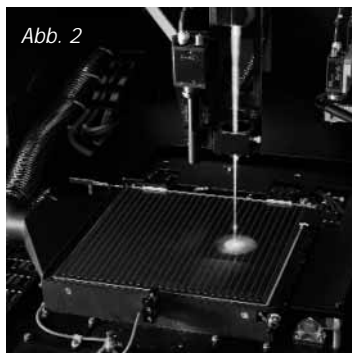
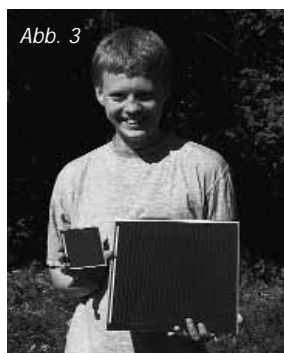


Abbildung 3
In-Line Sputteranlage für
eine Substratgröße von
30x30 cm²



Solarzellen aus $\mu\text{-Si:H}$ lassen sich wie a-Si:H mit dem PECVD-Verfahren (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) abscheiden, zeigen jedoch im Gegensatz zu a-Si:H -Solarzellen keine oder nur eine geringe lichtinduzierte Degradation und nutzen auch den langwelligen Spektralbereich des Sonnenlichts. Allerdings sind aufgrund der kleinen Absorptionskoeffizienten für langwelliges Licht ein effektives „light trapping“ und Schichtdicken von 1–3 μm notwendig (bei a-Si ca. 0,3 μm), um $\mu\text{-Si}$ -Solarzellen mit ausreichend hohen Kurzschlussströmen herzustellen. Hohe Depositionsraten bei gleichzeitig guter Materialqualität sind daher eine notwendige Voraussetzung für eine zukünftige industrielle Produktion von Solarzellen aus mikrokristallinem Silizium.

Für das Aufskalieren der PECVD-Prozesse aus dem Labor in die Produktion, wird die Verwendung der Standard-Industriefrequenz von 13,56 MHz zur Plasmaanregung favorisiert. Es hat sich gezeigt, dass bei der Verwendung von 13,56 MHz Anregungsfrequenz ein hoher Depositionsdruck (>5 mbar) notwendig ist, um gleichzeitig hohe Raten und gute Solarzeleigenschaften für $\mu\text{-Si:H}$ -Solarzellen zu erreichen. Solche $\mu\text{-Si:H}$ Solarzellen wurden mit einer Depositionsrate 5 \AA/s bereits in der 30x30 cm² PECVD-Anlage



Abbildung 4
Anlage zur
Laserstrukturierung

(siehe Abb. 2) hergestellt und als Bottomzellen in $\text{a-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ Tandemsolarzellen eingesetzt. Die besten Tandemzellen mit einer Fläche von 1 cm² zeigten einen stabilisierten Wirkungsgrad von 11,2 % (nach 1000 h Alterung). Das Aufskalieren der ZnO-Schichten mit industriennahen Sputterverfahren erfolgt in einer In-Line Sputteranlage für 30 x 30 cm² (siehe Abb. 3).

Die Anlage ist mit Kathodenplätzen zum RF, DC- und MF-Sputtern ausgestattet. Zielsetzung ist die Entwicklung von TCO-Frontkontakt- und TCO/Metall-Rückkontakt-Schichten. Für die nasschemische Strukturierung des ZnO-Frontkontakts zur Verbesserung der Lichteinkopplung wurde eine In-line Ätzanlage konzipiert und in Betrieb genommen. Die Realisierung einer Laserstrukturierung mit möglichst geringer Verschaltungsbreite erfolgt in Zusammenarbeit mit der RWE Solar GmbH. Dabei sind die Strukturierung des ZnO, des $\mu\text{-Si}$ und des metallischen Rückkontakts mit dem Laser teilweise technologisches Neuland und deshalb eine besondere Herausforderung. Abb. 4 zeigt die Laseranlage im Betrieb.



Abbildung 5
Ein Mitarbeiter der
Prozesstechnologie zeigt
zwei Kleinmodule mit den
Abmessungen 10x10 cm²
und 30x30 cm²

Stand der Modulentwicklung

Die Anlagen zur Herstellung und Strukturierung der Solarmodule sind erfolgreich in Betrieb genommen. Erste funktionstüchtige Module mit Abmessungen von 10x10 cm² und 30x30 cm² konnten bereits hergestellt werden (siehe Abb. 5). Der Schichtaufbau ist in Abb. 1 skizziert. Die monolithische Serienschaltung erfolgte vollständig mit Laserprozessen. Die Aperturwirkungsgrade der in Abb. 5 gezeigten Kleinmodule betragen 10,6 % bei einer Aperturfläche von 64 cm² bzw. 9,2 % bei einer Aperturfläche von 676 cm². Die zugehörigen Hellkennlinien gemessen vor der Alterung sind in den Abbildungen 6 und 7 gezeigt.

Danksagung

Vielen Dank an das BMWi für die finanzielle Unterstützung, an die RWE-Solar GmbH für Know-How-Transfer sowie an die Kolleginnen und Kollegen im Forschungszentrum Jülich für die vielfältige Mitarbeit bei Konzeption und Realisierung der Anlagen und Laborräume. Besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Photovoltaik für ihre Unterstützung mit Rat und Tat.

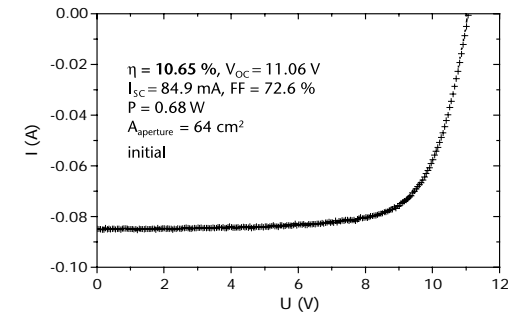


Abbildung 6
Hellkennlinie eines
10x10 cm²-Solarmoduls

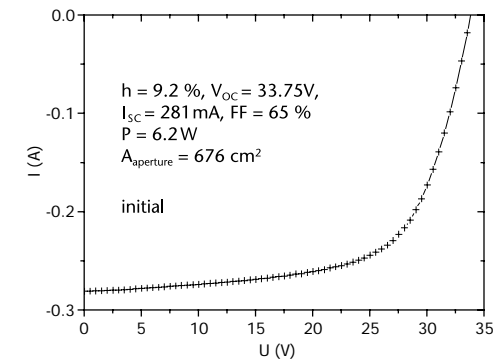


Abbildung 7
Hellkennlinie eines
30x30 cm²-Solarmoduls

Literatur

- [1] B. Rech, O. Kluth, T. Repmann, T. Roschek, J. Springer, J. Müller, F. Finger, H. Stiebig and H. Wagner, Solar Energy Materials and Solar Cells 74 (2002) 439
- [2] T. Repmann, W. Appenzeller, T. Roschek, B. Rech, O. Kluth, J. Müller, W. Psyk, R. Geyer, P. Lechner, Proc. of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conf., edited by B. McNelis, W. Palz, H. A. Ossentrink, P. Helm (WIP-Munich and ETA-Florence), Munich, 2001, p. 2836