

ZnO-Schichten für Silizium-Dünnschichtsolarzellen: Stand, Potenzial und Herausforderungen

B. Rech
B.Rech@fz-juelich.de

J. Hüpkens
S. Calnan
M. Berginski
H. Siekmann
FZ Jülich

Silizium-Dünnschichtsolarzellen in der so genannten p-i-n "Superstrate"-Konfiguration (TCO-beschichtetes Glassubstrat) erfordern TCO-Schichten, die niedrige Schichtwiderstände mit hoher Transparenz im sichtbaren Spektralbereich (400-800 nm) für Solarzellen aus amorphem Silizium (a-Si:H) und bis 1.100 nm für Solarzellen aus mikrokristallinem Silizium ($\mu\text{c-Si:H}$) kombinieren. Eine geeignete Oberflächenrauigkeit ist zusätzlich notwendig um das Licht effektiv zu streuen und dadurch eine stärkere Absorption in den Siliziumschichten zu erzielen. Industrielle Anwendungen erfordern außerdem kostengünstige Produktionsverfahren wie beispielsweise das reaktive Magnetronspütern von metallischen Targets.

ZnO-Schichten, die mit Sputterverfahren hergestellt werden, sind in der Regel glatt, das heißt, ihre Rauigkeit beträgt nur wenige Nanometer. Durch einen nasschemischen Ätzschritt können die Schichten aufgeraut werden und es entstehen meist Krater-ähnliche Strukturen mit einer breiten Palette an Strukturgrößen. Die mittlere Rauigkeit (root mean square roughness) kann prinzipiell bis auf 200 nm gesteigert werden. Solche oberflächentexturierte Schichten mit hervorragend geeigneten Lichtstreuungseigenschaften werden am IPV mit rf-Sputterprozessen von keramischen ZnO-Targets hergestellt [1,2]. Den Herausforderungen, diese Technik auf Quadratmetergröße mit kostengünstigen Sputterverfahren zu skalieren, stellt sich ein Verbundprojekt mit den Partnern Fraunhofer-Institut IST, RWTH Aachen,

Applied Films, Saint Gobain Glas, RWE SCHOTT Solar, Sentech Instruments und dem IPV [3].

Das IPV konzentriert sich auf die Entwicklung von hochleitfähigen und transparenten ZnO-Schichten mit reaktiven und nicht-reaktiven Sputtertechniken auf Substratgrößen bis $30 \times 30 \text{ cm}^2$. Mit dem Ziel der Anwendung in Silizium-Dünnschichtsolarzellen liegt der Fokus auf dem Zusammenhang zwischen Sputterprozessbedingungen, den resultierenden Materialeigenschaften der ZnO-Schichten und den Oberflächenstrukturen, die durch das nasschemische Ätzen erzeugt werden. Dabei zeigt sich, dass die Prozessparameter Temperatur und Depositionsdruck [2], die Wahl des Arbeitspunkts beim reaktiven Sputterprozess [4] als auch das gewählte Substratmaterial die Ätzeigenschaften maßgeblich beeinflussen.

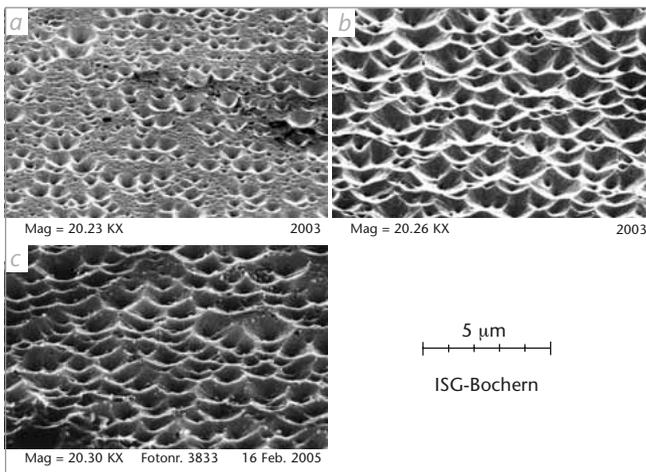


Abbildung 1

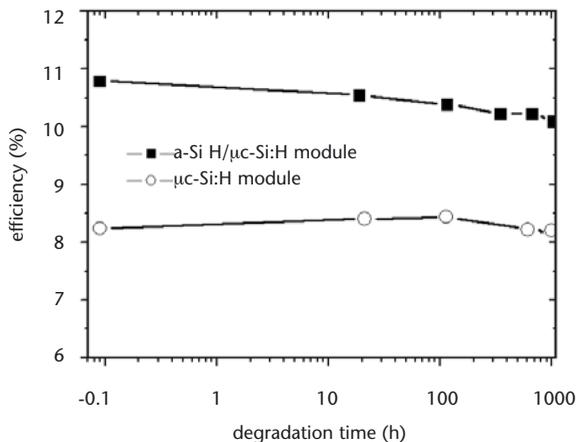
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von ZnO-Schichten nach dem Ätzen: (a) RF-gesputterte ZnO:Al-Schicht nach einem kurzen Eintauchen in verdünnte Salzsäure, (b) eine identische Schicht nach optimierter Ätzeit und (c) eine MF reaktiv gesputterte ZnO-Schicht, ebenfalls nach optimierter Ätzeit.

Abb. 1 zeigt, wie sich die Oberflächenstruktur einer vom keramischen Target rf-gesputterten ZnO-Schicht durch das nasschemische Ätzen variieren lässt. Dabei wurde diese

ZnO-Schicht unter optimierten Abscheidebedingungen (in diesem Fall kleiner Sputterdruck und relativ hohe Substrattemperatur) hergestellt. Nach einem kurzen Eintauchen in die Säure (*Abb. 1a*) entstehen zufällig verteilte Krater mit Durchmessern von bis zu einem Mikrometer, wobei - auf einer mikroskopischen Skala - Teile der ZnO-Oberfläche nicht angegriffen werden. Wird der Ätzprozess weitergeführt, bildet sich eine homogen texturierte Oberfläche aus (*Abb. 1b*). Aktuell gelang es praktisch identische Oberflächenstrukturen mit reaktiven mf-Sputterprozessen von metallischen Zn/Al Targets zu realisieren (*Abb. 1c*).

Im Folgenden wird kurz der Stand der Entwicklung von Silizium-Dünnschichtsolarzellen und Solarmodulen auf Oberflächen-texturierten ZnO-Schichten am IPV vorgestellt. Weitere Details und Informationen finden sich in einer aktuellen Publikation [5]. Die Ergebnisse zeigen das große Potenzial von Wirkungsgradverbesserungen in der Produktion, wenn es gelingt, die Verfahren vom Labormaßstab auf große Flächen zu skalieren. Die hohe Flexibilität der Prozesstechnologie am IPV erlaubt den direkten Vergleich verschiedener Typen von Silizium-Dünnschichtsolarmodulen mit Substratgrößen von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ und $30 \times 30 \text{ cm}^2$. Alle Verschaltungsschritte werden dabei mit schnellen Laserverfahren durchgeführt. Eine Schlüsselrolle spielt die Übertragung der ZnO-Sputterprozesse und des nachfolgenden nasschemischen Ätzens von statischen auf dynamische Verfahren, um gleichmäßig raue Oberflächenstrukturen auf der gesamten Substratfläche zu realisieren.

Voraussetzung ist außerdem die Realisierung von homogenen Wachstumsbedingungen der $\mu\text{c Si:H}$ -Absorberschichten. Als erfolgreiches Beispiel zeigt *Abb. 2* den Wirkungsgrad eines $\mu\text{c Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ -Solarmoduls als Funktion der Beleuchtungszeit. Dieses kleinflächige Modul zeigt einen



stabilen Wirkungsgrad von 10.1 % nach 1.000 h Beleuchtungszeit. Ebenfalls in *Abb. 2* ist der Wirkungsgrad eines (mikro-) kristallinen Silizium-Solarmoduls dargestellt, das praktisch keine Lichtalterung zeigt und einen stabilen Wirkungsgrad von 8.1 % besitzt.

Abbildung 2
Aperturwirkungsgrad von Silizium-Dünnschichtsolarmodulen als Funktion der Beleuchtungszeit (degradation time). Die Apertur- und Substratflächen sind 64 beziehungsweise 100 cm². Der stabile Wirkungsgrad dieser a-Si:H/μc-Si:H- und μc-Si:H-Solarmodule wurde unabhängig vom NREL (USA) mit 10.1 % und 8.1 % bestätigt (siehe auch [5]).

Literatur

- [1] B. Rech, O. Kluth, T. Repmann, T. Roschek, J. Springer, J. Müller, F. Finger, H. Stiebig and H. Wagner, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 74, 439 (2002).
- [2] O. Kluth, G. Schöpe, J. Hüpkes, C. Agashe, J. Müller, B. Rech, *Thin Solid Films* 442 (2003) 80-85.

- [3] J. Müller, G. Schöpe, O. Kluth, B. Rech, V. Sittinger, B. Szyszka, R. Geyer, P. Lechner, H. Schade, M. Ruske, G. Dittmar, H.-P. Bochem, *Thin Solid Films* 442 (2003) 158.
- [4] J. Hüpkes, B. Rech, S. Calnan, O. Kluth, U. Zastrow, H. Siekmann and M. Wuttig, *Proc. 5th Int. Conf. on Coatings on Glass, Saarbrücken, Germany* (2004) 895-903.
- [5] T. Repmann, T. Kilper, C. Zahren, H. Stiebig, B. Rech, *Proc. of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference and Exhibition, Orlando, USA* (2005), im Druck.