

Abscheidung von ZnO-Schichten mittels der LPCVD-Technik für die Anwendung in der Dünnschichtphotovoltaik

Transparente, leitfähige Oxidschichten (TCO, transparent conductive oxide) erfüllen zentrale Funktionen in Dünnschichtsolarzellen. In Siliziumdünnschichtsolarmodulen ist neben einer guten elektrischen Leitfähigkeit und einer geringen optischen Absorption des TCO's auch wesentlich, welches Lichteinfangpotenzial ("light trapping") in der photoaktiven Siliziumschicht dieses TCO aufgrund seiner Oberflächenmorphologie besitzt. Die durch einen hohen Lichteinfang mögliche Schichtdickenreduktion des Absorbers reduziert die Depositionszeiten und die Lichtalterung der Siliziumdünnschichtsolarzellen und senkt damit direkt die Kosten pro Wp.

Von Floatglasproduzenten hergestelltes TCO basierend auf fluor-dotiertem Zinnoxid ($\text{SnO}_2:\text{F}$) ist kommerziell erhältlich aus den USA (Pilkington North America und AFG Industries) sowie Japan (Asahi Glass und Nippon Sheet Glass), aber entweder nicht optimal angepasst an die Anforderungen von Dünnschichtsolarmodulen oder wie im Falle von Asahi U teuer und großflächig nicht erhältlich. Im Vergleich zum weit verbreiteten fluor-dotierten Zinnoxid ist Zinkoxid (ZnO) auch ein vielversprechender Kandidat als kostengünstiges und umweltfreundliches TCO für Dünnschichtsolarzellen. Niedrigere Depositionstemperaturen von um 200°C eröffnen zudem die Möglichkeit einer breiteren Substratauswahl

U. Kroll
Ulrich.Kroll@unaxis.com

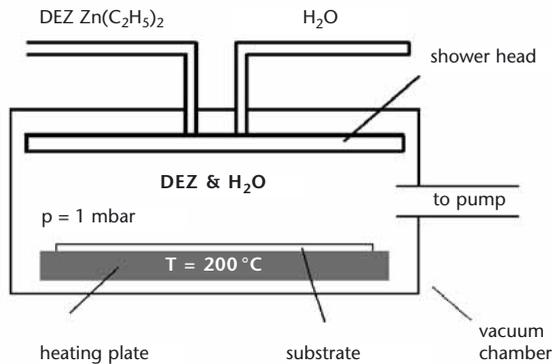
A. Hügli
G. Androutsopoulos
S. Benagli
J. Meier
Unaxis SPTec SA

O. Kluth
H. J. Kuhn
D. Plesa
M. Poppeller
A. Büchel
Unaxis Balzers AG

S. Faj
Institut de
Microtechnique (IMT)

und ferner dieses TCO auch direkt als Rückkontakt in Dünnschichtsolarzellen einzusetzen.

Abbildung 1
Schematische Darstellung des LPCVD-Reaktionsprinzips für die Abscheidung von Zinkoxidschichten



Die Firma Unaxis AG greift die vom Institut de Microtechnique in Neuchâtel erarbeitete LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) Abscheidetechnik für hochtexturierte Zinkoxidschichten auf und hat sich zum Ziel gesetzt, diesen Prozess auf Flächen von über einem Quadratmeter aufzukalieren. Siemens setzte bereits in den 90er Jahren diese Art Zinkoxid in p-i-n a-Si:H-Module mit hohem Wirkungsgrad in einer Pilotproduktion erfolgreich ein [1]. In diesem LPCVD-Prozess reagieren Diethylzink und Wasserdampf an der Substratoberfläche bei Temperaturen um $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ unter reduziertem Druck zu Zinkoxid (Abb. 1). Bei geeigneten Prozessbedingungen können Schichten mit exzellenter Oberflächentextur direkt ohne irgendeine Nachbehandlung bei Raten von über 25 \AA/s unter $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgeschieden werden. Eine ausgeprägte pyramidale Oberflächentextur (Abb. 2) konnte mittels Elektronenmikroskopaufnahmen festgestellt werden und ist im Einklang mit Röntgenbeugungsmessungen, die ein stark preferentielles Wachstum in (110) Richtung ergeben.

	SnO ₂ :F (Asahi U)	LPCVD ZnO
Film thickness	0.8 - 0.9 μm	2 μm
Sheet resistance	11 - 13 - Ωsq	6 - 8 Ωsq
Resistivity	1 mΩ cm	1.4 mΩ cm
Carrier concentration	~ 10 ²⁰ cm ⁻³	~ 10 ²⁰ cm ⁻³
Hall-Mobility	36 cm ² /Vs	32 cm ² /Vs

Tabelle 1

Vergleich von fluor-dotiertem SnO₂ von Asahi und dem LPCVD-ZnO

Eine Hinzugabe von geringen Mengen Diboran zu den Prozessgasen ermöglicht eine Dotierung des abgeschiedenen ZnO-Materials und führt zu hochleitfähigen und hochtransparenten TCO-Schichten. Für ca. 2 μm dicke Schichten wurden spezifische Schichtwiderstände im Bereich von 1.4 mΩ cm erreicht. Die Konzentration und Beweglichkeit der Ladungsträger wurde mittels Hallmessungen bestimmt, und die Dotiereffizienz analysiert. In *Tab. 1* werden die wesentlichen Eigenschaften von dem besten, kommerziell erhältlichen fluor-dotierten SnO₂ (Asahi type U) mit dem LPCVD-Zinkoxid verglichen.

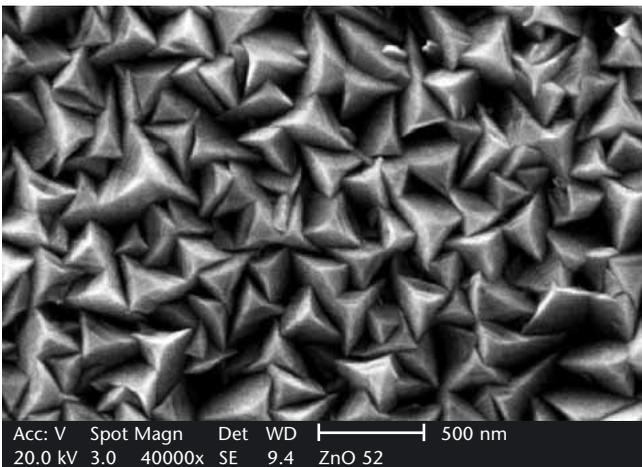
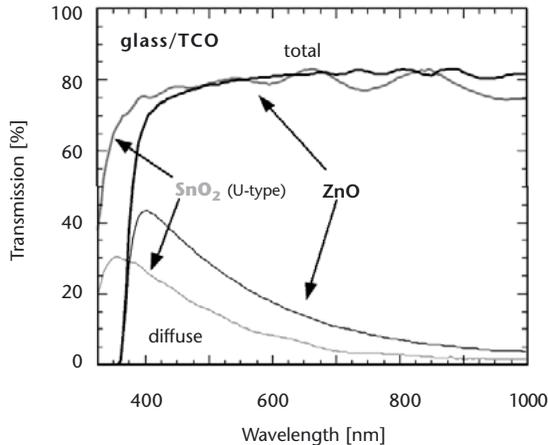


Abbildung 2

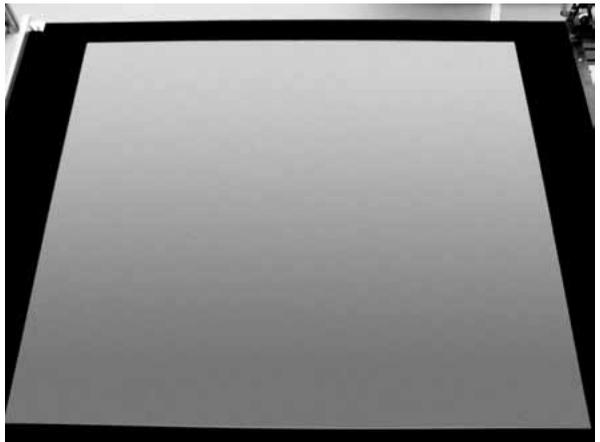
Elektronenmikroskopaufnahme der Oberfläche der Zinkoxidschichten

Abbildung 3
 Totale und diffuse
 optische Transmission
 von SnO₂ (Asahi U
 Typ) und dem LPCVD-
 Zinkoxid



Die hohe optische Lichtstreuung und Transmission der ZnO-Schichten wurden durch optische Transmissionsmessungen bestätigt (Abb. 3). Die herausragenden Eigenschaften dieses TCO's wurden durch Zell- und Modulresultate am Institut für Mikrotechnik (IMT) in Neuchâtel bereits mehrfach nachgewiesen [2-4]. Resultate von amorphen Einfachzellen abgeschrieben auf diesem LPCVD ZnO weisen im Vergleich zum besten kommerziell erhältlichen SnO₂ (Asahi type U) eine höhere Quanteneffizienz aus und bestätigen das enorme Lichtstreuungspotenzial dieser ZnO-Schichten [2-4]. Das IMT präsentierte amorphe p-i-n-Einfachzellen mit einem stabilisierten Wirkungsgrad von 9.47% (NREL bestätigt) unter Verwendung dieser ZnO-Schichten für Vorder- und Rückkontakt [2-4].

Die Firma Unaxis AG skalierte unter Beibehaltung der ZnO-Eigenschaften den am IMT entwickelten „modifizierten“ LPCVD-Prozess auf. Gegenwärtig können Gläser mit einer Größe von 1.100 mm auf 1.250 mm homogen mit diesem qualitativ hochwertigen TCO beschichtet werden (Abb. 4,5).



*Abbildung 4 (links)
Foto einer 1.4 m²
großen ZnO beschich-
teten Glasscheibe*

*Abbildung 5 (rechts)
Uniforme Textur des
ZnO's über eine
Fläche von 1.050 mm
x 1.200 mm*

Literatur

- [1] R. van den Berg, H. Calwer, P. Marklstorfer, R. Meckes, F. W. Schulze, K. -D. Ufert and H. Vogt, „7% Stable Efficiency large area a-Si:H Solar Modules by Module Design Improvement“, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 31 (1993) pp. 253-261
- [2] J. Meier, U. Kroll, S. Dubail, S. Golay, J. Dubail, A. Shah, „Efficiency Enhancement of Amorphous Silicon p-i-n Solar Cells by LP-CVD ZnO“, *Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, USA, September 2000, 2000*, pp. 746-749

- [3] J. Meier, J. Spitznagel, S. Faÿ, C. Bucher, U. Graf, U. Kroll, S. Dubail, A. Shah,
„Enhanced Light-Trapping for Micromorph Tandem Solar Cells“
Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, New Orleans, May 2002, pp. 1118-1121
- [4.] J. Meier, J. Spitznagel, U. Kroll, C. Bucher, S. Faÿ, T. Moriarty, A. Shah,
„High-Efficiency Amorphous and „Micromorph“ Silicon Solar Cells“,
Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, May 2003, CD-ROM, ISBN 4-9901816-3-8, 2004, S2O-B9-06, pp.2801-2805.