

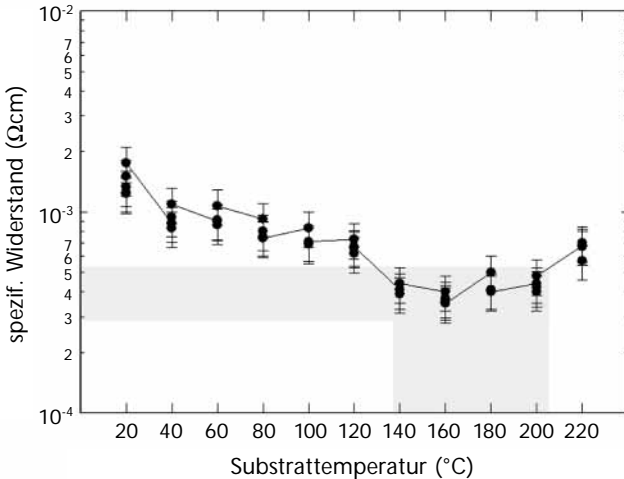
## Al-dotierte ZnO-Schichten für a-Si/c-Si Solarzellen

F. Fenske,  
S. Brehme,  
W. Henrion,  
M. Schmidt  
HMI, Abt. Silizium-  
Photovoltaik  
fenske@hmi.de

Heterosolarzellen vom Typ a-Si/c-Si erfordern eine ganzflächige transparente Elektrode auf dem a-Si, die die generierten Ladungsträger mit hoher Effizienz sammelt und abführt [1]. Geeignet sind dafür nur dünne Schichten aus der Materialgruppe der Transparent Conducting Oxide's. Sowohl die Filmeigenschaften als auch Kostenfragen sind Entscheidungskriterien für eine Solarzellenapplikation. Die durchgeführten Untersuchungen zum Al-dotierten ZnO zeigen eine kostengünstige Alternative zum etablierten ITO als Fensterelektrode. Dabei wird das ZnO durch rein reaktives Sputtern eines metallischen Targets im Gegensatz zu dem üblichen Sputtern keramischer Targets hergestellt.

Die Schichtdeposition erfolgte durch Magnetronsputtern eines ZnAl<sub>2</sub> %-Targets unter Ar/O<sub>2</sub>-Reaktivgasatmosphäre. Die Saugleistung der Vakuumpumpe wurde so groß gewählt, dass sie grundsätzlich die O<sub>2</sub>-Pumpgeschwindigkeit auch während des Beschichtungsprozesses im System bestimmt. Damit werden Instabilitäten während der Deposition (Hystereseeffekt des O<sub>2</sub>-Partialdrucks) vermieden [2] und der Restgaspartialdruck wird außerdem gering gehalten. Ein weiterer, wesentlich stabilisierender Faktor bei der reaktiven Beschichtung ist die Wahl des Konstantspannungsregelmodus des Plasmagenerators [3]. Die Schichten wurden auf Quarzglas deponiert jeweils bei geringer ( $P_1 \approx 350$  W) und hoher ( $P_h \approx 700$  W) mittlerer Plasmaverlustleistung  $\langle P \rangle$ . Durch Variation der Sauerstoffeinlassrate (und damit des Sauerstoffpartialdrucks) erfolgte die Optimierung der TCO-Schichteigenschaften hinsichtlich maximaler Transparenz und Leitfähigkeit. Unter diesen Bedingungen betragen die Depositionsraten 1.6 nm/s ( $P_1$ ) bzw. 3.6 nm/s

( $P_h$ ). Die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Substrattemperatur zeigt *Abb. 1* für Depositionen mit



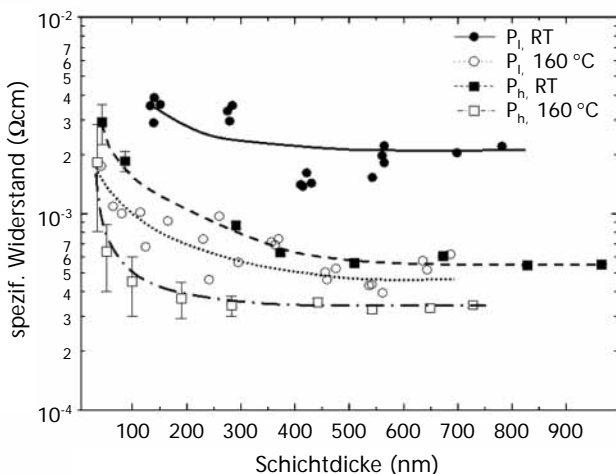
*Abbildung 1*  
 Spezifischer Widerstand von ZnO:Al2 %-Schichten mit einer Dicke >100 nm in Abhängigkeit der Substrattemperatur (Depositionsparameter  $\langle P \rangle = P_h$ ).

$\langle P \rangle = P_h$  und Schichtdicken  $d_s > 100$  nm.

Der Widerstand reduziert sich um nahezu eine Größenordnung auf Werte von  $3\text{-}5 \cdot 10^{-4}$  Ωcm bei Substrattemperaturen  $T_s$  im Bereich von 140-200 °C.

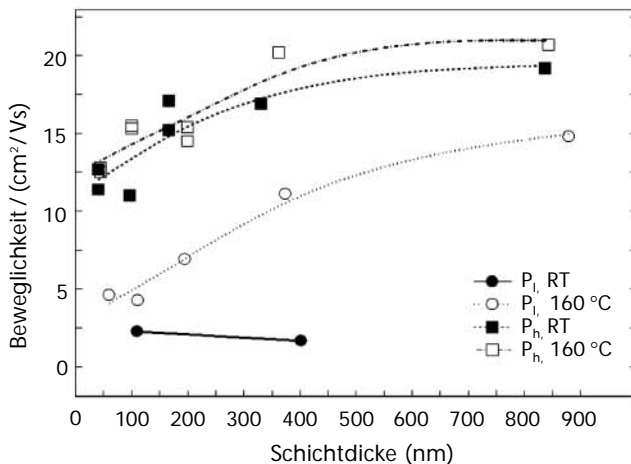
Messungen der spektralen Empfindlichkeit ergaben, dass geometrisch bedingte optische Verluste durch Reflexion zu erheblichen Einbußen führen, wenn die ZnO-Schichtdicke nicht optimiert ist. Die optimale Dicke ergibt sich zu  $d_s \approx 80$  nm für senkrechten Lichteinfall mit einem Reflexionsminimum 1. Ordnung bei  $\lambda = 600$  nm bei einem Brechungsindex des ZnO von 2. Die aus optischen Gründen erforderliche geringe Dicke der TCO-Schicht zieht allerdings das Problem der Erzielung eines geringen Schichtwiderstandes nach sich. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zur Dickenabhängigkeit der elektrischen und optischen Schichteigenschaften durchgeführt.

Abbildung 2  
 Abhängigkeit des spezifischen Widerstands von ZnO:Al2 %-Schichten von der Schichtdicke (Depositionsparameter:  $\langle P \rangle$ ,  $T_S$ ).



Der spezifische Widerstand dünner ZnO:Al2 %-Schichten nimmt mit geringer werdender Schichtdicke zu (s. Abb. 2). Dabei sind die Depositionsparameter von wesentlicher Bedeutung. Die Dickenabhängigkeit ist um so geringer ausgeprägt, je höher  $\langle P \rangle$  und  $T_S$  ( $140\text{ °C} < T_S < 200\text{ °C}$ ). In diesem Fall steigt der spezifische Widerstand signifikant erst

Abbildung 3  
 Abhängigkeit der Ladungsträgerbeweglichkeit von der Schichtdicke (Depositionsparameter:  $\langle P \rangle$ ,  $T_S$ ).



für  $d_s < 100$  nm an. Hall-Messungen ergaben eine stetige Zunahme der Ladungsträgerbeweglichkeit  $\mu_H$  mit steigender Schichtdicke (Abb. 3). Unabhängig von der Schichtdicke zeigt sich eine ähnliche Abhängigkeit von den Depositionsparametern  $\langle P \rangle$  und  $T_S$  wie für die Leitfähigkeit  $\sigma$  (s. Abb. 2): Höhere  $\langle P \rangle$  und  $T_S$  bei der Deposition führen zu höheren  $\mu_H$  und  $\sigma$  in den Schichten. Hieraus könnte man als Ursache der Schichtdickenabhängigkeit des spezifischen Widerstandes eine  $\mu_H(d_s)$ -Abhängigkeit vermuten, die morphologisch/strukturell bedingt ist. Weitere detaillierte Untersuchungen müssen diesen Sachverhalt klären.

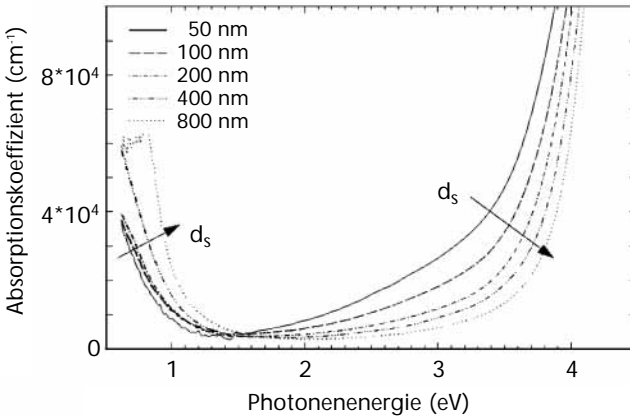
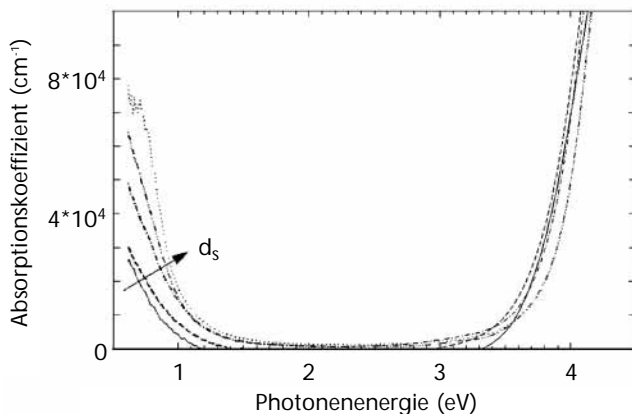


Abbildung 4  
 Spektrale Verteilung des  
 Absorptionskoeffizienten  
 für verschiedene  
 Schichtdicken  $d_s$   
 (Depositionsparameter:  
 $\langle P \rangle = P_{hr}$ ,  $T_S = RT$ )

Die materialspezifisch bedingten optischen Verluste sind durch den Absorptionskoeffizienten charakterisiert. Dieser wurde im interessierenden Energiebereich von 1 eV bis 4 eV für verschiedene Schichtdicken für jeweils geheiztes ( $160^\circ\text{C}$ ) und ungeheiztes Substrat ermittelt. Abb. 4 zeigt den spektralen Verlauf des Absorptionskoeffizienten der auf ungeheiztes Substrat deponierten ZnO:Al2 %-Schichten. Charakteristisch für diese Schichten ist eine im höherener-

Abbildung 5  
 Spektrale Verteilung des  
 Absorptionskoeffizienten  
 für verschiedene  $d_s$   
 (vgl. Abb. 4)  
 (Depositionsparameter:  
 $\langle P \rangle = P_{hv}$ ,  $T_S = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ )



getischen Bereich des Transmissionsfensters zu beobachten-  
 de stärkere Absorption, was die für das Auge erscheinende  
 gelbliche Färbung der Schichten erklärt. Diese Eigenschaft  
 ist umso ausgeprägter, je dünner die Filme sind. Im Gegen-  
 satz dazu zeigen die auf geheiztes Substrat deponierten  
 Schichten im gesamten Transmissionsfenster eine vernach-  
 lässigbare Absorption (s. Abb. 5).

Die Grundgitterabsorptionskante dieser Schichten zeigt  
 keine Abhängigkeit von der Schichtdicke. Generell kann für  
 alle untersuchten Schichten festgestellt werden, dass die  
 freie Ladungsträgerabsorption des ZnO:Al2 % unter 1.1 eV  
 einsetzt und so keine Minderung der spektralen Empfind-  
 lichkeit der a-Si/c-Si-Solarzelle bewirkt. Die beobachtete  
 Schichtdickenabhängigkeit der Absorption wird von mehre-  
 ren Faktoren bestimmt. Ladungsträgerkonzentration und  
 -beweglichkeit wirken in gegenläufiger Tendenz auf die  
 freie Ladungsträgerabsorption [4].

Die Lage der Grundgitterabsorption wird wesentlich durch  
 die Ladungsträgerkonzentration  $n_e$  beeinflusst, wenn  $n_e \geq$   
 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , wie es bei dotierten TCO-Schichten in der Regel

der Fall ist (Burstein-Moss-Verschiebung, Verringerung der Bandlücke [5]). Darüber hinaus sind weitere Effekte für die Grundgitterabsorptionskante des ZnO wirksam und müssen bei der Bandlückenbestimmung berücksichtigt werden [6]. Damit haben Filmstruktur und -morphologie außer einem direkten Einfluss auch einen indirekten Einfluss auf die optischen Schichteigenschaften über Ladungsträgerkonzentration und -beweglichkeit. Zur Klärung dieser komplizierten Abhängigkeiten bedarf es weiterer experimenteller Untersuchungen und Simulationsrechnungen.

## Literatur

- [1] M. Taguchi, K. Kawamoto, S. Tsuge, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, N. Nakamura, S. Kiyama, O. Oota, Progress in Photovoltaics 8(2000)503.
- [2] A.G. Spencer, R.P. Howson, R.W. Lewin, Thin Sol. Films, 158(1988)141.
- [3] J. Affinito, R.R. Parsons, J. Vac. Sci. Technol. A2 3 (1984)1275.
- [4] T.J. Coutts, X.Wu, W.P. Mulligan, J.M. Webb, J. Electr. Mat., 25(1996)935.
- [5] K.Ch. Park, D.Y. Ma, K.H. Kim, Thin Sol. Films, 305(1997)201.
- [6] M. Rebien, W. Henrion, M. Bär, Ch. Fischer, Appl. Phys. Lett., 80(2002)3518.