



30.3.2003, 10:30

Beweglichkeitsbegrenzung von entartet dotierten Zinkoxidschichten und deren mögliche Überwindung

K. Ellmer

**Hahn-Meitner-Institut, Solare Energetik
Glienicke Str. 100, 14109 Berlin**

Zinkoxid (ZnO) als breitbandiger Halbleiter ¹ ($E_g=3.2$ eV) wird als transparente Elektrode für Dünnschichtsolarzellen und flache Anzeigen (flat-panel displays) eingesetzt und wird auch als aktives Material für blaue Leuchtdioden oder Laser untersucht.

Für die Anwendung als transparentes Elektrodenmaterial wird ZnO mit Elementen der III. Hauptgruppe (B, Al, Ga, In) entartet dotiert ($N \approx 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), so dass spezifische Widerstände im Bereich von $2 \cdot 10^{-4} \text{ } \Omega\text{cm}$ erreicht werden können ², ohne dass die Transparenz im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich beeinträchtigt ist. Seit mehr als 20 Jahren wurden die verschiedensten Abscheideverfahren wie reaktives und nichtreaktives Magnetronspütern, metallorganische Gasphasenabscheidung oder gepulste Laserablation benutzt, um ZnO-Schichten herzustellen. Unabhängig vom Verfahren und von solchen Abscheidparametern wie z.B. Substrattemperatur bzw. Sputterdruck konnte ein spezifischer Widerstand von etwa $2 \cdot 10^{-4} \text{ } \Omega\text{cm}$ nicht unterschritten werden. Das ist zum einen zurückzuführen auf eine maximale Ladungsträgerkonzentration in den TCO-Schichten von ca. $1.5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, die übereinstimmt mit den Löslichkeitsgrenzen der entsprechenden Dotanden in diesen Schichten ³. Andererseits sind die Beweglichkeiten in diesen (homogen) entartet dotierten Halbleiterschichten begrenzt durch die Streuung an ionisierten Störstellen ($\mu < 50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) ⁴. In Anbetracht dieser physikalischen Grenze für homogen dotierte Schichten müssen andere Wege beschritten werden, wenn die Beweglichkeit erhöht werden soll. Ein Weg ist die inhomogene oder Modulationsdotierung von TCO-Schichten, bei der die Dotierfunktion von der Ladungsträgertransportfunktion getrennt wird, so dass in den Transportbereichen die ionisierte Störstellenstreuung vermieden werden kann. Dieses generelle Prinzip wurde erstmals 1978 für das System GaAs- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ demonstriert ⁵.

In unserer Arbeitsgruppe soll dieses Prinzip auf entartet dotierte transparente Halbleiter angewendet werden. Zu diesem Zweck wurden einkristalline ZnO- und ZnO:2wt%Al-Schichten auf Saphirsubstraten verschiedener Orientierungen mittels reaktiven Magnetronspüterns gewachsen und mittels Röntgenbeugung, Transmissionselektronenmikroskopie, Rutherford-Rückstreuung (RBS) und elektrischen Messungen untersucht. Die Schichten wachsen epitaktisch, selbst bei Raumtemperaturabscheidungen, jedoch hängt die Güte der Epitaxie ab von der Substrattemperatur und insbesondere von der Saphirorientierung. Die kristallographisch besten Schichten, bewertet anhand der Rockingkurvenbreiten und RBS, wurden auf (110)-oder A-Saphir im Temperaturbereich von 200 – 500 °C hergestellt. Diese Schichten weisen auch höhere Beweglichkeiten auf, als Schichten, die auf C-Saphir abgeschieden wurden.

Neben der kristallographischen Qualität bestimmt wesentlich der Oxidationsgrad der ZnO(:Al)-Schichten die elektrischen Parameter. Geringe Sauerstoffkonzentrationen im Restgas oder in der Sputteratmosphäre können den spezifischen Widerstand deutlich erhöhen. Erste Experimente zu modulationsdotierten ZnO/ZnO:Al-Schichten werden ebenfalls vorgestellt.

- ¹ G. Heiland, E. Mollwo, and F. Stöckmann, *Solid State Phys.* **8**, 191 (1959).
- ² T. Minami, *MRS Bull.* **25**, 38 (2000).
- ³ K. Ellmer, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33**, R17 (2000).
- ⁴ C. Agashe, O. Kluth, J. Hüpke, U. Zastrow, B. Rech, and M. Wuttig, *J. Appl. Phys.* **95**, 1911 (2004).
- ⁵ R. Dingle, H.-L. Störmer, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, *Appl. Phys. Lett.* **33**, 665 (1978).