

# Elektrische und optische Eigenschaften reaktiv gesputterter $\text{In}_{0,9}\text{Sn}_{0,1}\text{O}_x$ -Schichten

R. Mientus  
Optotransmitter-  
Umweltschutz-  
Technologie e.V.  
out-ev@gmx.de

$\text{In}_{0,9}\text{Sn}_{0,1}\text{O}_x$ -Schichten (ITO) werden großtechnisch als transparente Elektroden in Flachbildschirmen und Dünnschicht-solarzellen eingesetzt. In der vorliegenden Arbeit soll der elektrische Transport untersucht werden, der in der Literatur nur selten ausführlich behandelt wird.

K. Ellmer  
HMI

Die Schichten (ca. 100 nm dick) wurden reaktiv ( $\text{Ar}+\text{O}_2$ ) vom  $\text{In}_{90}\text{Sn}_{10}$ -Target gesputtert (balancierte Magnetronquellen, Substrate: Glas, Si, Sigradur, Target-Substrat-Abstand: 60 mm). Der Sauerstoffpartialdruck  $p_{\text{O}_2}$  wurde variiert, um Schichten mit unterschiedlicher Stöchiometrie herzustellen. Mit wachsendem  $p_{\text{O}_2}$  erfolgt abrupt ein Phasenübergang von undurchsichtigen Oxid-Metall-Gemischen zu transparenten Schichten mit Halbleiter- bzw. Isolatoreigenschaften. Der Druck, bei dem dieser Umschlag erfolgt, wird durch die Bildungsenthalpie für das Oxid bestimmt. Er liegt bei den Abscheidebedingungen 100  $\text{W}_{\text{DC}}$ , 0.5 Pa für  $\text{In}_2\text{O}_3$  ( $\Delta H/\text{In-Atom} = 615 \text{ kJ/mol}$  [1]) mit ca. 0.15 Pa deutlich niedriger als ca. 0.25 Pa für  $\text{SnO}_2$  ( $\Delta H/\text{Sn-Atom} = 285 \text{ kJ/mol}$  [1]). Nichtoxidiertes Sn im Indiumoxid kann als Dotand wirken.

Allerdings gibt es ein nur sehr schmales Prozessfenster für die Erzeugung transparenter und leitfähiger ITO-Schichten, da mit weiter zunehmendem  $p_{\text{O}_2}$  auch das Sn oxidiert wird und die ITO-Schichten sehr hochohmig werden. Eine höhere Dichte von atomarem Sauerstoff (höhere Anregungsfrequenz) verschiebt das Prozessfenster zu niedrigeren Drücken,

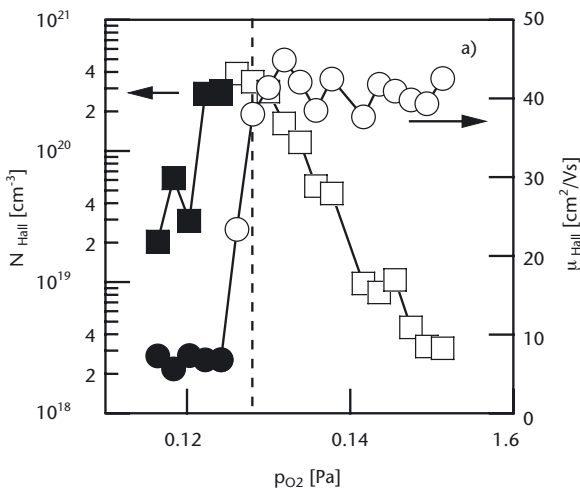
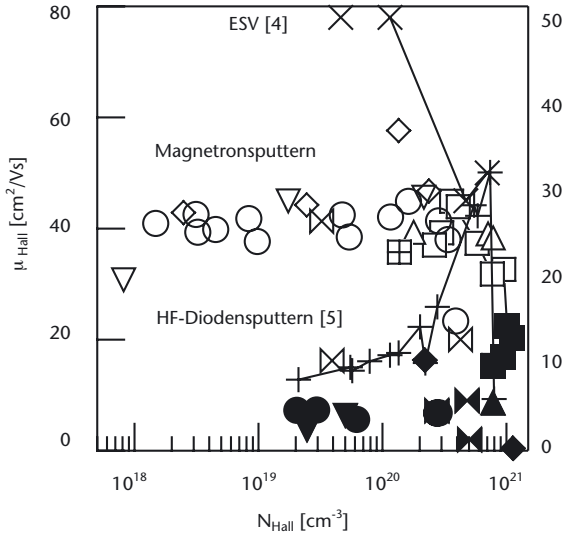


Abbildung 1a  
Ladungsträgerkonzentration und Hall-Beweglichkeit als Funktion des Sauerstoffpartialdruckes für ITO-Schichten, Abscheidebedingungen: DC, 75 W, 1 Pa, ungeheizt,  $p_{O_2}$  für minimalen spezifischen Widerstand (gestrichelt)

größere Abscheideraten (höherer Leistungseintrag) zu höheren  $p_{O_2}$  [2]. Mit zunehmendem Sauerstoffpartialdruck steigt im Bereich des Phasenüberganges das Sauerstoff/Metallverhältnis auf den überstöchiometrischen Wert von 1.74 an [2], die Kristallitgröße wächst drastisch von  $\leq 20$  nm auf  $> 200$  nm an (REM, [3]). Die Ladungsträgerdichte und die Hall-Beweglichkeit wachsen mit der zunehmenden Kristallitgröße ebenfalls stark an ( $T = 300$  °C:  $N \approx 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu = 45 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ;  $T < 100$  °C:  $N \approx 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu = 45 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , (Abb. 1)), was zu einem Widerstandsminimum im Zentrum des Prozessfensters führt.

Die weitere Erhöhung von  $p_{O_2}$  vermindert zwar die Ladungsträgerdichte um 2 Größenordnungen, da die Sn-Dotandenatome zunehmend oxidiert werden, die Beweglichkeit bleibt aber konstant bis herab zu Ladungsträgerkonzentrationen  $N \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Bei Abscheideverfahren ohne Ionenbeschuss (Elektronenstrahlverdampfen [4]) wächst die Beweglichkeit mit abnehmender Ladungsträgerdichte  $N$ , was durch die

Abbildung 1b  
 (b) Hall-Beweglichkeit als Funktion der Ladungsträgerkonzentration der Schichten aus (a) sowie bei variierten Abscheidparametern. Zum Vergleich wurden Literaturdaten vom Elektronenstrahlverdampfen (ESV) und HF-Diodensputtern eingetragen. **ESV [4]:** 400 °C (X), Magnetron-sputtern: DC, 100 W, 0.5 Pa, ungeheizt ( $\triangleright$ ), -300 °C ( $\square$ ), Puls-DC 100 kHz, 100 W, 0.5 Pa, ungeheizt ( $\boxplus$ ), HF-13.56 MHz, 100 W, 0.5 Pa, 300 °C ( $\Delta$ ), HF-27 MHz, 1 Pa, ungeheizt ( $\nabla$ ), DC, 12 W, 0.5 Pa, ungeheizt ( $\diamond$ ), DC, 75 W, 1 Pa, ungeheizt (O), HF-Diodensputtern [5]: 75 W, 1.1 Pa, 400 °C (+); offene Symbole ( $T_{\text{sichtbar}} > 80\%$ ), geschlossene Symbole ( $T_{\text{sichtbar}} < 80\%$ )



Abnahme der Streuung an ionisierten Störstellen erklärt werden kann. Beim RF-Diodensputtern dagegen [5] sinkt die Beweglichkeit mit abnehmendem  $N$ . Das gleiche Verhalten wird auch bei magnetrongesputterten ZnO-Schichten beobachtet und auf den behinderten Stromtransport über Korngrenzen mit Raumladungszonen zurückgeführt. Die von uns beobachtete Unabhängigkeit der Beweglichkeit von der Ladungsträgerdichte lässt darauf schließen, dass Korngrenzen im ITO offensichtlich weniger Defekte und damit deutlich niedrigere Korngrenzenbarrieren aufweisen.

Transmissions- und Reflexionsspektren von ITO-Schichten auf Glas wurden mit dem Drude-Model angepasst (Programm Scout, Fa. Theiss, Aachen) und die Plasmawellenzahl  $\Omega_p$  und die Dämpfung  $\Omega_t$  bestimmt. Aus dem Anstieg von  $\Omega_p^2$  über der elektrisch gemessenen Ladungsträgerdichte konnte eine effektive Masse von  $0.46 m_0$  berechnet

werden. Das stimmt gut mit früheren Messungen an ITO von Ohhata [6] überein. Für magnetrongesputterte ZnO: Al-Schichten wurde für hohe Dotierungen eine effektive Masse von  $m^* = 0.5 m_0$  ermittelt [7].

## Literatur

- [1] Perry's Chemical Engineers' Handbook; Ed.:  
R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney  
(McGraw-Hill Book Company, New York, 1984),  
S. 3-147.
- [2] R. Mientus, K. Ellmer: Surf. Coat. Tech. 142-4  
(2001) 748.
- [3] R. Mientus, I. Sieber, K. Ellmer: MRS Symp. Proc. 721  
(2002) 151.
- [4] I. Hamberg, C. G. Granqvist: J. Appl. Phys. 60 (11)  
(1986) R123.
- [5] J. Szczyrbowski, K. Schmalzbauer, H. Hoffmann:  
Thin Solid Films 137 (1986) 169.
- [6] Y. Ohhata, F. Shinoki, S. Yoshida: Thin Solid Films 59  
(1979) 255.
- [7] S. Brehme, F. Fenske, W. Fuhs, E. Nebauer,  
M. Poschenrieder, B. Selle, I. Sieber: Thin Solid Films  
342 (1999) 167.