

ZnO-Dünnschichten gezüchtet mit Laserplasma-Abscheidung (PLD) - Forschungsstand und Anwendungen

Die Dünnschicht-Züchtungsmethode Laserplasma-Abscheidung (Pulsed Laser Deposition - PLD) hatte ihren Durchbruch mit der Entdeckung des Hochtemperatur-Supraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ um 1987 und erlebt seitdem einen enormen Aufschwung. Die unerreichte Flexibilität bezüglich der abzuscheidenden Materialien (*Tab. 1*) und der oft unveränderte Übertrag der chemischen Zusammensetzung auch von komplexen Multi-elementverbindungen vom Target in die Filme sind Vorteile der PLD gegenüber länger etablierten Methoden wie thermischer Verdampfung, Kathodenzerstäubung (sputtern) oder metallorganischer Gasphasenabscheidung (MOCVD). Besonders die PLD-Abscheidung von oxidischen Heterostrukturen bei der Suche nach neuen funktionellen Dünnschicht-Materialkombinationen hat sich international als vorteilhaft erwiesen [1].

Zinkoxid ist ein optisch transparenter, dielektrischer und piezoelektrischer II-VI-Halbleiter mit einer Energiebandlücke im ultravioletten Spektralbereich (wide bandgap material). In der gegenwärtigen Renaissance der ZnO-Forschung sind die elektrischen, optischen und magnetischen Eigenschaften und die Defektstruktur des ZnO in Hinblick auf neuartige UV-Lichtemitter, die transparente Elektronik, die Spin-elektronik und die Nanotechnologie international von besonderem Interesse [1-7].

M. Lorenz
mlorenz@physik.
uni-leipzig.de

H. Hochmuth
D. Spemann
H. von Wenckstern
H. Schmidt
M. Grundmann
Universität Leipzig

*Tabelle 1
Übersicht über in
Leipzig untersuchten
Dotierelemente in
ZnO-Dünnschichten auf
Saphir, geordnet nach
aufsteigender Ord-
nungszahl. Die Trans-
ferfaktoren des Dotier-
elementübertrages
vom ZnO:X-Target in
den PLD-Film stam-
men aus RBS/PIXE-
Analysen. Es wurden
pro Dotierelement
mindestens 5 Filme
mit teilweise unter-
schiedlichen PLD-
Wachstumsparametern
berücksichtigt [5].
Die Abweichungen
vom Faktor 1 gehen
auf unterschiedliche
thermische und chemi-
sche Eigenschaften der
beteiligten Spezies im
Laserplasma und auf
dem geheizten Sub-
strat (400-700 °C)
zurück.*

Dotierelement für ZnO	Ziel der Dotierung	PLD-Übertrag der Zusammensetzung
Li	p-Leitung	1.37 ± 0.72
N	p-Leitung	nicht bestimmt
Mg	E _g -Erhöhung	1.86 ± 0.49
Al	n-Leitung	1.56 ± 0.44
P	p-Leitung	0.50 ± 0.01
Ti	Ferromagnetismus	1.15 ± 0.43
Mn	Ferromagnetismus	1.03 ± 0.28
Fe	Ferromagnetismus	1.47 ± 0.16
Co	Ferromagnetismus	1.23 ± 0.09
Ni	Ferromagnetismus	0.15 ± 0.02
Cu	Ferromagnetismus	0.74 ± 0.25
Ga	n-Leitung	1.54 ± 1.04
Cd	E _g -Verringerung	0.09 ± 0.12
Sb	p-Leitung	1.71 ± 0.32

Abb. 1 zeigt das PLD-Labor der Arbeitsgruppe, neben der gezeigten UHV-Abscheidekammer sind noch 4 weitere PLD-Kammern mit dem Ziel von p-leitenden, ferromagnetischen und Cd-legierten ZnO-Dünnschichten sowie von ZnO-Nano-Heterostrukturen in Betrieb. Nennenswerte aktuelle ZnO-Forschungsergebnisse aus Leipzig sind:

- Abstimmbarkeit der Energiebandlücke durch Legierung mit MgO und CdO [2]
- Undotierte und dotierte PLD-ZnO-Dünnschichten mit Ladungsträgerkonzentrationen von ca. 10¹² bis über 10²⁰ cm⁻³ bei 300 K, siehe auch *Abb. 2*



Abbildung 1
 PLD-UHV-Kammer mit
 in-situ spektroskopischem
 Ellipsometer
 (vorn) und Excimer-
 laser (hinten) im PLD-
 Labor der Abteilung
 Halbleiterphysik in der
 Universität Leipzig
 (Foto M. Lorenz)

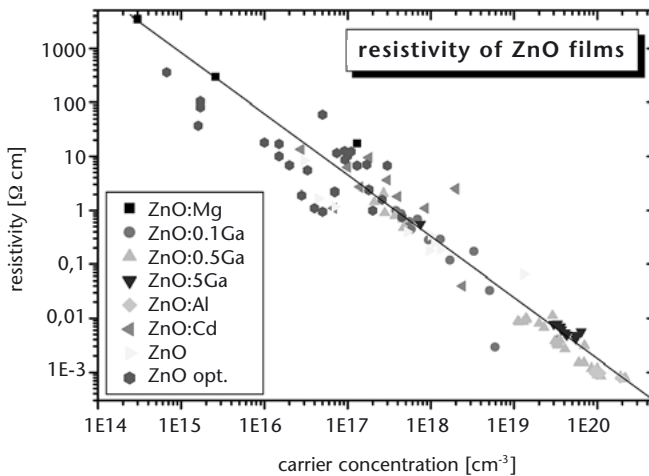
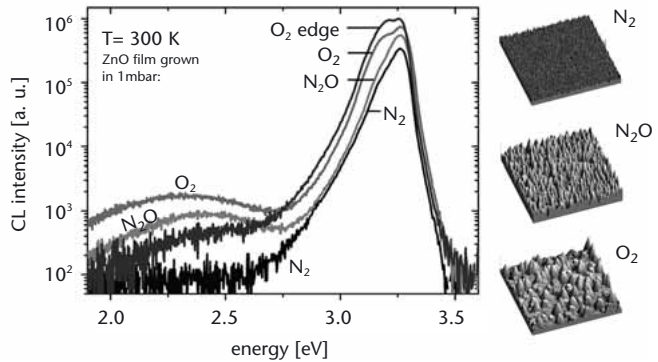


Abbildung 2
 Spezifischer Wider-
 stand und Ladungs-
 trägerkonzentration
 bei Raumtemper-
 atur (300 K) von undotier-
 ten und dotierten PLD-
 ZnO-Dünnschichten auf
 Saphir

Abbildung 3

Kathodolumineszenzspektren von ZnO-Dünnschichten (300 K), gezüchtet bei 1 mbar O₂, N₂O, oder N₂, zusammen mit AFM-Oberflächenscans (10 x 10 μm²). Die mittleren AFM-Rauigkeiten R_a betragen für O₂ 125 nm, für N₂O 66 nm und für N₂ 10 nm.



- undotierte ZnO-Filme mit hoher Elektronenbeweglichkeit bis 155 cm²/Vs [3]
- PLD-Züchtung und optische Charakterisierung des vollständigen Mischbereiches ZnO-MgO, das elektronische Bandgap variiert von 3.3 eV (ZnO) bis ca. 8 eV (MgO).
- Bragg-Spiegel aus Mehrschichten MgO-ZnO und YSZ-MgO mit spektral selektiver Reflektivität von 98 % bei 3.2 eV
- Reduzierung von Interdiffusionseffekten von ZnO auf Al₂O₃ durch MgO-Diffusionsbarriere-Schichten, dadurch wurden Ladungsträgerkonzentrationen kleiner 10¹⁴ cm⁻³ in ZnO erreicht.
- Reproduzierbare Schottkykontakte auf ZnO-Einkristallen und ZnO-Dünnschichten für MSM-Photodetektoren und Untersuchungen von Defektniveaus im ZnO [4]

- ZnO-Filme bis 2-Zoll-Durchmesser mit besonders hoher Lumineszenzausbeute bei 300 K (*Abb. 3*) für Anwendungen in Szintillationsdetektoren in Zusammenarbeit mit der Firma El-Mul Technologies Ltd., Israel, siehe *Abb. 3* und [6]
- Erste ferromagnetische ZnO:Mn-Filme für die Spinelektronik [7]

Danksagung

Die Arbeiten werden vom BMBF in der Nachwuchsgruppe „Spinelektronik“ (FKZ 03N8708) und im DFG Schwerpunktprogramm 1136 „Substitutionseffekte in ionischen Festkörpern“ gefördert.

Literatur

Siehe auch www.uni-leipzig.de/~hlp/:

- [1] A. Ohtomo, A. Tsukazaki, *Semicond. Sci. Technol.* 20, S1-S12 (2005).
- [2] M. Lorenz, E. M. Kaidashev, H. von Wenckstern, V. Riede, C. Bundesmann, D. Spemann, G. Benndorf, H. Hochmuth, A. Rahm, H.-C. Semmelhack, M. Grundmann *Solid State Electronics* 47, 2205 (2003).
- [3] E. M. Kaidashev, M. Lorenz, H. von Wenckstern, A. Rahm, H.-C. Semmelhack, K.-H. Han, G. Benndorf, C. Bundesmann, H. Hochmuth, M. Grundmann *Appl. Phys. Lett.* 82, 3901 (2003).

- [4] H. von Wenckstern, E. M. Kaidashev, M. Lorenz, H. Hochmuth, G. Biehne, J. Lenzner, V. Gottschalch, R. Pickenhain, M. Grundmann, Appl. Phys. Lett. 84, 79 (2004).
- [5] D. Spemann, E. M. Kaidashev, M. Lorenz, J. Vogt, T. Butz, Nucl. Instr. Meth. B 219-220, 891-896 (2004); und Dissertation D. Spemann, Leipzig, (2005).
- [6] M. Lorenz, H. Hochmuth, J. Lenzner, T. Nobis, G. Zimmermann, M. Diaconu, H. Schmidt, H. von Wenckstern, M. Grundmann, Thin Solid Films (2005) in press.
- [7] M. Diaconu, H. Schmidt, H. Hochmuth, M. Lorenz, G. Benndorf, J. Lenzner, D. Spemann, A. Setzer, K.-W. Nielsen, P. Esquinazi, M. Grundmann, Thin Solid Films (2005) in press.