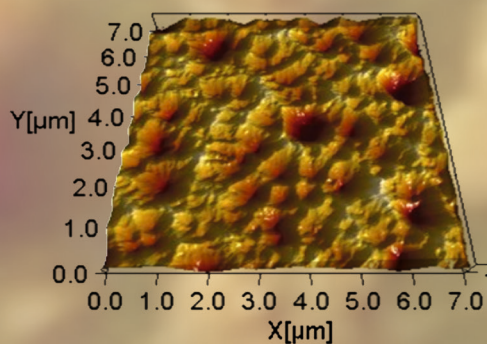


Ohne Ionenbeschuss



Mit Ionenbeschuss

## Zinkoxid: Einfluss von Dotierung und Legierungen auf elektro-optische Eigenschaften, auf das Ätzverhalten und auf die Tempernachbehandlung

Marek Warzecha

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)  
Photovoltaik (IEK-5)

# **Zinkoxid: Einfluss von Dotierung und Legierungen auf elektro-optische Eigenschaften, auf das Ätzverhalten und auf die Tempernachsbehandlung**

Marek Warzecha

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 207

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-938-6

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische und technologische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Transparent leitfähige Oxide (TCO)	5
2.2	Kristallstruktur von ZnO	6
2.3	Elektrische Eigenschaften von ZnO	6
2.3.1	Dotierung von ZnO	7
2.3.2	Elektrischer Transport in Halbleitern	8
2.3.3	Der Hall-Effekt	12
2.4	Optische Eigenschaften von ZnO	13
2.5	Vorteile von ZnO:Ga gegenüber ZnO:Al	17
2.6	ZnMgO	18
2.7	Herstellung von ZnO-Schichten	19
2.7.1	Struktur-Zonen-Modell für ZnO	21
2.7.2	Wachstum von Zinkoxid	23
2.7.3	Ionen-unterstütztes Sputtern von ZnO	24
2.7.3.1	Verspannung der Schichten	24
2.8	Temperaturnachbehandlung	25
2.8.1	Hochtemperaturbehandlung unter einer a-Si:H-Schutzschicht	26
2.9	Ätzen von ZnO	26
2.10	Solarzellen	27
2.10.1	Silizium-Dünnschichtsolarzellen	27
2.10.2	Der PECVD-Prozess	29
2.10.3	Charakteristische Größen einer Solarzelle	30
2.10.4	Theoretische Grenzen und Simulationen	32
<b>3</b>	<b>Experimentelle Methoden</b>	<b>35</b>
3.1	Clustertool-Depositionssystem	35
3.2	Sputterkammer des CT II	36
3.2.1	Wachstum von Gallium-dotierten ZnO-Schichten	37
3.2.2	Wachstum von Ga-dotierten ZnMgO-Schichten	39
3.2.3	Ionenunterstützte Deposition von ZnO:Ga-Schichten	41
3.3	Charakterisierung von ZnO	42
3.3.1	Schichtdickenmessung	42

## Inhaltsverzeichnis

3.3.2	Bestimmung der elektrischen Eigenschaften . . . . .	43
3.3.2.1	Vier-Punkt-Messmethode . . . . .	43
3.3.2.2	Hall-Effekt-Messungen . . . . .	43
3.3.3	Optische Charakterisierung . . . . .	44
3.3.3.1	Das Spektrometer . . . . .	44
3.3.3.2	Winkelaufgelöste Streumessung (ARS) . . . . .	45
3.3.4	Röntgenbeugung . . . . .	46
3.4	Oberflächencharakterisierung . . . . .	48
3.4.1	Raster-Elektronen-Mikroskopie (SEM) . . . . .	48
3.4.2	Raster-Kraft-Mikroskopie (AFM) . . . . .	49
3.5	Chemische Analyse . . . . .	50
3.5.1	Dotiereffizienz . . . . .	51
3.6	Temperaturnachbehandlung unter einer Deckschicht . . . . .	51
3.7	Effusion . . . . .	52
3.8	Solarzellen . . . . .	53
3.8.1	Herstellung von Solarzellen . . . . .	53
3.8.2	Charakterisierung von Solarzellen . . . . .	55
3.8.2.1	Der Sonnensimulator . . . . .	55
3.8.2.2	Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Wachstum und Eigenschaften von ZnO:Ga-Schichten</b>	<b>57</b>
4.1	Einfluss der Depositionstemperatur auf das Wachstum von ZnO:Ga	58
4.1.1	Chemische Zusammensetzung von ZnO:Ga-Filmen . . . . .	59
4.2	Elektrische Eigenschaften von ZnO:Ga . . . . .	61
4.2.1	Vergleich zwischen ZnO:Ga und ZnO:Al . . . . .	63
4.3	Optische Eigenschaften . . . . .	65
4.3.1	Substrattemperaturserie . . . . .	65
4.3.2	Dotierserie . . . . .	66
4.4	Ätzverhalten von ZnO:Ga . . . . .	68
4.4.1	Ätzrate und spezifischer Widerstand vor und nach dem Ätzen von ZnO:Ga . . . . .	69
4.4.2	Oberflächentopographie von ZnO:Ga nach dem Ätzen . . . . .	70
4.4.2.1	SEM-Aufnahmen . . . . .	70
4.4.2.2	AFM-Aufnahmen . . . . .	72
4.5	ZnO:Ga als Frontkontakt für Dünnschichtsolarzellen . . . . .	74
4.6	Diskussion . . . . .	75
4.7	Zusammenfassung . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Ga-dotiertes ZnMgO</b>	<b>81</b>
5.1	Theoretischer Stromgewinn . . . . .	81
5.2	Elektrische Eigenschaften von $Zn_{1-x}Mg_xO$ . . . . .	83
5.3	Optische Eigenschaften von $Zn_{1-x}Mg_xO$ . . . . .	85
5.4	Ätzen von $Zn_{1-x}Mg_xO$ . . . . .	87

5.5	Solarzellen mit $Zn_{1-x}Mg_xO:Ga$ als Frontkontakt . . . . .	89
5.6	Diskussion . . . . .	90
5.7	Zusammenfassung . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Ionenunterstütztes Sputtern von ZnO:Ga-Filmen</b>	<b>95</b>
6.1	Strukturelle Eigenschaften von IBAD-ZnO:Ga-Schichten . . . . .	96
6.2	Elektrische Eigenschaften von IBAD-ZnO:Ga-Schichten . . . . .	100
6.3	Optische Eigenschaften von IBAD-ZnO:Ga-Schichten . . . . .	102
6.4	Ätzverhalten von IBAD-ZnO:Ga-Schichten . . . . .	106
6.4.1	Ätzrate . . . . .	106
6.4.2	Oberflächencharakterisierung . . . . .	107
6.5	Temperaturnachbehandlung von IBAD-ZnO:Ga-Schichten . . . . .	108
6.6	Streueigenschaften der geätzten Schichten . . . . .	110
6.7	Solarzellen mit IBAD-ZnO:Ga als Frontkontakt . . . . .	112
6.8	Diskussion . . . . .	117
6.8.1	Einfluss der Verspannung . . . . .	118
6.8.2	Solarzellen auf IBAD-ZnO:Ga-Frontkontakten . . . . .	121
6.9	Zusammenfassung . . . . .	122
<b>7</b>	<b>Thermische Nachbehandlung von TCOs unter einer a-Si-Deckschicht</b>	<b>123</b>
7.1	Etablierung der Tempermethode . . . . .	123
7.2	Thermische Nachbehandlung von ZnO:Al-Schichten . . . . .	126
7.2.1	Effusionsmessung an getempertem ZnO:Al . . . . .	128
7.3	Thermische Nachbehandlung von auf Ga-Dotierung basierenden ZnO-Schichten . . . . .	129
7.3.1	Elektrische Eigenschaften . . . . .	129
7.3.2	Transmissionsmessungen . . . . .	133
7.4	Thermische Nachbehandlung von ITO-Filmen . . . . .	134
7.4.1	Einfluss des Sauerstoffs während der Deposition von ITO-Filmen . . . . .	136
7.5	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	137
7.5.1	Streumechanismen in ZnO . . . . .	138
7.5.2	Einfluss der Verspannung auf das Tempern unter einer Schutzschicht . . . . .	142
7.5.3	Einfluss des Magnesiums auf das Tempern unter einer Schutzschicht . . . . .	144
7.5.4	Einfluss des Temperns auf ITO-Filme . . . . .	145
7.6	Zusammenfassung . . . . .	146
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>149</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>

**Energie & Umwelt / Energy & Environment**  
**Band / Volume 207**  
**ISBN 978-3-89336-938-6**

