

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Solarzellen . . . . .	5
2.1.1	Solarzellen-Kenngrößen . . . . .	5
2.1.2	Silizium-Dünnschicht solarzellen . . . . .	7
2.1.3	Zellstruktur von Einfachzellen und Stapelzellen . . . . .	8
2.1.4	Lichtausbeute-Effizienz . . . . .	10
2.1.5	Vorteile von Stapelzellen . . . . .	12
2.1.6	Modulverschaltung . . . . .	14
2.2	Transparente und leitfähige Oxide . . . . .	15
2.2.1	Elektrische Eigenschaften . . . . .	16
2.2.2	Optische Eigenschaften . . . . .	21
2.2.3	Optimierung der elektro-optischen Eigenschaften . . . . .	27
2.2.4	Kristallstruktur von Zinkoxid . . . . .	29
2.3	Deposition von Zinkoxid: Kathodenzerstäuben . . . . .	30
2.3.1	Konventionelles dc-Sputtern . . . . .	30
2.3.2	Magnetron-Sputtern . . . . .	31
2.3.3	Rf-Sputtern . . . . .	31
2.4	Wachstum dünner Filme . . . . .	32
2.4.1	Modell für das Wachstum gesputterter Metallfilme . . . . .	33
2.4.2	Modell für das Wachstum von gesputtertem Zinkoxid . . . . .	34
2.4.3	Ätzverhalten von Zinkoxid-Filmen . . . . .	34
2.4.4	Einfluss der Targetdotiermenge . . . . .	36
2.5	Temperaturstabilität von Zinkoxid . . . . .	37
2.5.1	Undotiertes Zinkoxid . . . . .	37
2.5.2	Aluminium-dotiertes Zinkoxid . . . . .	37
2.6	Theoretische Limits und Simulationen . . . . .	38
2.6.1	Limit nach Yablonovitch und Cody . . . . .	39
2.6.2	Erweiterung durch Tiedje et al. . . . .	39
2.6.3	Erweiterung durch Deckman et al. . . . .	40
2.6.4	Simulationen von Vaněček et al. . . . .	40
<b>3</b>	<b>Experimentelles</b>	<b>43</b>
3.1	Deposition von Zinkoxid und Präparation des Frontkontakts . . . . .	43
3.1.1	Kleinflächige Deposition . . . . .	43
3.1.2	Großflächige Deposition . . . . .	45
3.1.3	Ätzen . . . . .	46
3.1.4	Temperatur-Nachbehandlung von ZnO:Al . . . . .	46

## Inhaltsverzeichnis

3.2	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen . . . . .	46
3.2.1	Silizium . . . . .	46
3.2.2	Solarzellen-Rückkontakt . . . . .	48
3.2.3	Module: integrierte Serienschaltung . . . . .	49
3.3	Charakterisierung . . . . .	50
3.3.1	Oberflächentopographie . . . . .	50
3.3.2	Statistische Auswertung der AFM-Messungen . . . . .	51
3.3.3	Filmdicke . . . . .	54
3.3.4	Strukturelle Eigenschaften . . . . .	54
3.3.5	Elektrische Eigenschaften . . . . .	55
3.3.6	Optische Eigenschaften . . . . .	57
3.3.7	Charakterisierung der Solarzellen . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Materialeigenschaften von ZnO:Al</b>	<b>63</b>
4.1	Depositionsparameterstudie . . . . .	63
4.1.1	Oberflächentopographie nach dem Ätzen . . . . .	63
4.1.2	Statistische Auswertung der AFM-Messungen . . . . .	66
4.1.3	Strukturelle Eigenschaften . . . . .	69
4.1.4	Elektrische Eigenschaften . . . . .	71
4.1.5	Optische Eigenschaften . . . . .	73
4.1.6	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	76
4.2	Temperatur-Nachbehandlung . . . . .	80
4.2.1	Optische und elektrische Eigenschaften . . . . .	80
4.2.2	Strukturelle Eigenschaften . . . . .	82
4.2.3	Einfluss der Depositionsparameter . . . . .	84
4.2.4	Einfluss der Vakuumbedingung . . . . .	88
4.2.5	Diskussion möglicher Ursachen . . . . .	91
4.2.6	Oberflächentopographie und Ätzverhalten . . . . .	93
4.2.7	Zusammenfassung . . . . .	97
<b>5</b>	<b>ZnO:Al als Frontkontakt in Solarzellen</b>	<b>99</b>
5.1	Einfluss der Ladungsträgerdichte . . . . .	99
5.1.1	Charakterisierung der eingesetzten Schichten . . . . .	100
5.1.2	Quanteneffizienz und totale Zellabsorption . . . . .	102
5.1.3	Solarzellen-Charakteristik . . . . .	104
5.2	Optimierte Ladungsträgerdichte für den Einsatz in Modulen . . . . .	107
5.2.1	$\mu\text{-Si:H}$ -Module . . . . .	107
5.2.2	$\text{a-Si:H}/\mu\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ -Stapelzell-Module . . . . .	109
5.2.3	Zusammenfassung: optimierte elektro-optische Balance . . . . .	113
5.3	Einfluss der Targetdotiermenge und der Substrat-Temperatur . . . . .	114
5.3.1	Quanteneffizienz und totale Zellabsorption . . . . .	114
5.3.2	Zellstromdichte . . . . .	116
5.3.3	Offene Klemmenspannung und Füllfaktor . . . . .	119
5.3.4	Zusammenfassung . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Lighttrapping-Limits</b>	<b>125</b>
6.1	Einordnung der experimentellen Ergebnisse . . . . .	125

6.2	Diskussion möglicher $QE$ -Steigerungen . . . . .	130
6.3	Einfluss der Frontkontakt-Transmission . . . . .	133
6.3.1	Konstante $i$ -Silizium Schichtdicke . . . . .	134
6.3.2	Extrapolation auf andere $i$ -Silizium Schichtdicken . . . . .	136
6.4	Praktische Realisierung einer hohen $QE$ . . . . .	137
6.4.1	Rückreflektor-Optimierung . . . . .	137
6.4.2	Brechungsindexanpassung am Frontkontakt . . . . .	140
6.4.3	$QE$ -Steigerung durch abweichende Zellkonzepte . . . . .	143
6.5	Abschätzung möglicher Zellstromdichten . . . . .	144
6.5.1	Diskussion weiterer optischer Verbesserungen . . . . .	144
6.5.2	Abschätzungen einer realisierbaren Quanteneffizienz . . . . .	147
6.6	Zusammenfassung . . . . .	149
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>