

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                  |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                                | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Physikalische und technologische Grundlagen</b>                               | <b>5</b>  |
| 2.1      | Transparente und leitfähige Oxide (TCOs) . . . . .                               | 5         |
| 2.1.1    | Beispiele für TCOs und deren Anwendung . . . . .                                 | 5         |
| 2.2      | Zinkoxid . . . . .                                                               | 6         |
| 2.2.1    | Kristallstruktur . . . . .                                                       | 6         |
| 2.2.2    | Elektrische Eigenschaften . . . . .                                              | 7         |
| 2.2.3    | Optische Eigenschaften . . . . .                                                 | 11        |
| 2.3      | Herstellung der ZnO:Al-Schichten . . . . .                                       | 14        |
| 2.3.1    | Der DC-Magnetron-Sputterprozess . . . . .                                        | 15        |
| 2.3.2    | RF-Anregung . . . . .                                                            | 17        |
| 2.3.3    | Reaktives Sputtern von Zinkoxid . . . . .                                        | 18        |
| 2.3.4    | Mittelfrequenz (MF)-Anregung . . . . .                                           | 21        |
| 2.3.5    | Statische und dynamische Beschichtung . . . . .                                  | 22        |
| 2.4      | Wachstum gesputterter Schichten . . . . .                                        | 24        |
| 2.4.1    | Struktur-Zonen-Modell . . . . .                                                  | 24        |
| 2.4.2    | Wachstum verschiedener Metalloxide . . . . .                                     | 27        |
| 2.4.3    | Wachstum von Zinkoxid . . . . .                                                  | 27        |
| 2.4.4    | Verspannungen der Schichten . . . . .                                            | 29        |
| 2.5      | Ätzen von Zinkoxid . . . . .                                                     | 30        |
| 2.5.1    | Ätzverhalten von ZnO-Einkristallen . . . . .                                     | 32        |
| 2.5.2    | Ätzverhalten von polykristallinen ZnO:Al-Schichten . . . . .                     | 32        |
| 2.6      | Solarzellen . . . . .                                                            | 33        |
| 2.6.1    | Silizium-Dünnschichtsolarzellen . . . . .                                        | 34        |
| 2.6.2    | ZnO:Al als TCO-Material für Dünnschichtsolarzellen aus Silizium . . . . .        | 37        |
| 2.6.3    | Charakteristische Größen einer Solarzelle . . . . .                              | 38        |
| 2.6.4    | $\mu$ c-Si:H-Solarzellen auf oberflächen-texturierten ZnO:Al-Schichten . . . . . | 40        |
| <b>3</b> | <b>Experimentelles</b>                                                           | <b>43</b> |
| 3.1      | Herstellung der Schichten und Schichtsysteme . . . . .                           | 43        |
| 3.1.1    | Inline-Sputteranlage . . . . .                                                   | 43        |
| 3.1.2    | Vorgehen beim Sputtern einer ZnO:Al-Schicht . . . . .                            | 45        |

|          |                                                                                         |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3    | Homogenität des reaktiven, dynamischen Sputterprozesses . . . . .                       | 46        |
| 3.1.4    | Ätzverfahren . . . . .                                                                  | 47        |
| 3.1.5    | Herstellung der Solarzellen . . . . .                                                   | 48        |
| 3.2      | Charakterisierung . . . . .                                                             | 49        |
| 3.2.1    | Schichtdickenmessung . . . . .                                                          | 50        |
| 3.2.2    | Bestimmung der elektrischen Eigenschaften . . . . .                                     | 50        |
| 3.2.3    | Optische Charakterisierung . . . . .                                                    | 53        |
| 3.2.4    | Röntgenbeugung . . . . .                                                                | 55        |
| 3.2.5    | Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) . . . . .                                           | 59        |
| 3.2.6    | Chemische Analyse . . . . .                                                             | 59        |
| 3.2.7    | Charakterisierung der Solarzellen . . . . .                                             | 61        |
| <b>4</b> | <b>Hoch leitfähige und hoch transparente ZnO:Al-Schichten mit hoher Depositionsrate</b> | <b>63</b> |
| 4.1      | Stabilisierung des reaktiven Sputterprozesses . . . . .                                 | 63        |
| 4.2      | Depositionsraten . . . . .                                                              | 67        |
| 4.2.1    | Einfluss des Arbeitspunktes . . . . .                                                   | 67        |
| 4.2.2    | Einfluss der Substrattemperatur . . . . .                                               | 68        |
| 4.2.3    | Einfluss des Depositionsdruckes . . . . .                                               | 69        |
| 4.2.4    | Zusammenfassung der Depositionsraten . . . . .                                          | 70        |
| 4.3      | Homogenität beim reaktiven, dynamischen Sputtern . . . . .                              | 71        |
| 4.4      | Einfluss des Aluminiumgehaltes auf die ZnO:Al-Schicht-Eigenschaften . . . . .           | 74        |
| 4.4.1    | Einfluss der Depositionsparameter . . . . .                                             | 75        |
| 4.4.2    | Elektrische Eigenschaften . . . . .                                                     | 79        |
| 4.4.3    | Optische Eigenschaften . . . . .                                                        | 80        |
| 4.4.4    | Strukturelle Eigenschaften . . . . .                                                    | 84        |
| 4.4.5    | Diskussion . . . . .                                                                    | 85        |
| 4.5      | Zusammenfassung . . . . .                                                               | 89        |
| <b>5</b> | <b>Einfluss der Depositionsbedingungen auf die ZnO:Al-Schicht-Eigenschaften</b>         | <b>91</b> |
| 5.1      | Statische und dynamische Beschichtung . . . . .                                         | 91        |
| 5.1.1    | Örtlich aufgelöste Wachstumsrate . . . . .                                              | 93        |
| 5.1.2    | Elektrische Eigenschaften . . . . .                                                     | 93        |
| 5.1.3    | Strukturelle Eigenschaften . . . . .                                                    | 94        |
| 5.1.4    | Ätzverhalten von statisch und dynamisch gesputterten ZnO:Al-Schichten . . . . .         | 95        |
| 5.1.5    | Variation der Depositionsbedingungen . . . . .                                          | 97        |
| 5.1.6    | Diskussion . . . . .                                                                    | 98        |
| 5.2      | Einfluss von Depositionsdruck und Substrattemperatur . . . . .                          | 101       |
| 5.2.1    | Elektrische Eigenschaften . . . . .                                                     | 101       |
| 5.2.2    | Optische Eigenschaften . . . . .                                                        | 103       |
| 5.2.3    | Strukturelle Eigenschaften . . . . .                                                    | 104       |
| 5.2.4    | Ätzverhalten . . . . .                                                                  | 105       |
| 5.2.5    | Diskussion . . . . .                                                                    | 107       |

|          |                                                                  |            |
|----------|------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3      | Arbeitspunkt . . . . .                                           | 110        |
| 5.3.1    | Elektrische Eigenschaften . . . . .                              | 111        |
| 5.3.2    | Optische Eigenschaften . . . . .                                 | 112        |
| 5.3.3    | Schichtdickenabhängigkeit . . . . .                              | 113        |
| 5.3.4    | Strukturelle Eigenschaften . . . . .                             | 115        |
| 5.3.5    | Ätzverhalten . . . . .                                           | 116        |
| 5.3.6    | Optische Eigenschaften der geätzten ZnO:Al-Schichten . . . . .   | 119        |
| 5.3.7    | Diskussion . . . . .                                             | 121        |
| 5.4      | Zusammenfassende Diskussion . . . . .                            | 123        |
| 5.4.1    | Zusammenfassung . . . . .                                        | 123        |
| 5.4.2    | Statische Deposition . . . . .                                   | 125        |
| 5.4.3    | Verspannungen in den ZnO:Al-Schichten . . . . .                  | 126        |
| <b>6</b> | <b>Ätzverhalten von Zinkoxid</b>                                 | <b>129</b> |
| 6.1      | Ätzverhalten von polykristallinen ZnO:Al-Schichten . . . . .     | 129        |
| 6.2      | Ätzverhalten von ZnO-Einkristallen . . . . .                     | 131        |
| 6.3      | Diskussion . . . . .                                             | 133        |
| 6.4      | Zusammenfassung . . . . .                                        | 134        |
| <b>7</b> | <b>Solarzellen</b>                                               | <b>137</b> |
| 7.1      | Solarzellen als Charakterisierungswerkzeug . . . . .             | 137        |
| 7.1.1    | Solarzellen auf ZnO:Al-Schichten der Gruppen A–C . . . . .       | 138        |
| 7.1.2    | Solarzellen auf ZnO:Al-Schichten der Arbeitspunktserie . . . . . | 139        |
| 7.2      | Optimierung der ZnO:Al-Schichten für die Solarzellen . . . . .   | 142        |
| 7.3      | Beste Solarzellen auf MF-gesputterten ZnO:Al-Schichten . . . . . | 143        |
| 7.4      | Solarmodule auf MF-gesputterten ZnO:Al-Schichten . . . . .       | 144        |
| 7.5      | Diskussion . . . . .                                             | 145        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                              | <b>149</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                      | <b>154</b> |