

Analyse der Lichtstreuung zur Textur-Optimierung von Zinkoxid-Frontkontakten für Silizium-Dünnschichtsolarzellen

Gabrielle Christina Elisabeth Jost

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

Analyse der Lichtstreuung zur Textur- Optimierung von Zinkoxid-Frontkontakten für Silizium-Dünnschichtsolarzellen

Gabrielle Christina Elisabeth Jost

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

Band / Volume 223

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-978-2

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Physikalische und technologische Grundlagen | 7 |
| 2.1 | Solarzellen | 7 |
| 2.1.1 | Funktionsweise und Kenngrößen | 7 |
| 2.1.2 | Unterschiedliche Zellendesigns | 9 |
| 2.1.3 | Besonderheiten von Dünnschichtsolarzellen | 12 |
| 2.2 | Transparente und leitfähige Zinkoxid-Schichten | 14 |
| 2.2.1 | Materialeigenschaften und Kristallstruktur | 14 |
| 2.2.2 | Elektrische Eigenschaften | 15 |
| 2.2.3 | Optische Eigenschaften | 18 |
| 2.3 | Kathodenzerstäubung als Depositionstechnologie | 21 |
| 2.3.1 | Grundlagen des Kathodenzerstäubens | 21 |
| 2.3.2 | Magnetron-unterstütztes Kathodenzerstäuben | 23 |
| 2.3.3 | Unterschiedliche Anregungsarten | 24 |
| 2.3.4 | Reaktives Sputtern | 25 |
| 2.4 | Wachstummodelle für dünne Schichten | 27 |
| 2.4.1 | Thornton-Modell für dünne Metallfilme | 28 |
| 2.4.2 | Modifiziertes Thornton-Modell für Zinkoxid | 29 |
| 2.4.3 | Erweiterung des modifizierten Thornton Modells | 30 |
| 2.5 | Ätzmodelle für ZnO:Al | 32 |
| 2.5.1 | Grundlagen zum Ätzen von Zinkoxid mit Säuren | 33 |
| 2.5.2 | Ätzen von Zinkoxid-Einkristallen | 33 |
| 2.5.3 | Ätzen von polykristallinem Zinkoxid | 34 |
| 2.6 | Optische Modelle der Lichtstreuung | 36 |
| 2.6.1 | Strahlenoptik-Modell | 36 |
| 2.6.2 | Gitter-Modell | 38 |
| 2.6.3 | Phasen-Modell | 39 |
| 2.7 | SiO _x N _y -Zwischenschichten | 39 |
| 2.7.1 | Optische Eigenschaften | 40 |
| 2.7.2 | Barrieren-Eigenschaften | 41 |
| 2.7.3 | Wachstum-Eigenschaften | 42 |
| 3 | Experimentelles | 43 |
| 3.1 | Präparation der Frontkontakte, Zwischenschichten und Rückkontakte | 43 |
| 3.1.1 | Großflächige Kathodenzerstäubung | 43 |
| 3.1.2 | Experimentelle kleinflächige Kathodenzerstäubung | 47 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1.3 | Texturierung mittels nasschemischem Ätzprozess | 48 |
| 3.2 | Präparation der Solarzellen | 48 |
| 3.2.1 | Siliziumdeposition in verschiedenen großflächigen Anlagen | 48 |
| 3.2.2 | Rückkontaktdeposition und Kontaktierung | 49 |
| 3.3 | Charakterisierung der Frontkontaktschichten..... | 50 |
| 3.3.1 | Elektrische Eigenschaften | 51 |
| 3.3.2 | Optische Eigenschaften | 52 |
| 3.3.3 | Textureigenschaften | 54 |
| 3.3.4 | Winkelaufgelöste Streulichtmessungen..... | 58 |
| 3.3.5 | Röntgenbeugung..... | 62 |
| 3.3.6 | Schichtdickenbestimmung..... | 63 |
| 3.4 | Charakterisierung von Solarzellen | 64 |
| 3.4.1 | Strom-Spannungskennlinie..... | 64 |
| 3.4.2 | Externe Quanteneffizienzmessungen | 65 |
| 4 | Entwicklung einer gesputterten SiO_xN_y -Zwischenschicht | 67 |
| 4.1 | Brechungsindexanpassung | 68 |
| 4.1.1 | Einfluss des Sauerstoff-zu-Stickstoff-Verhältnisses | 68 |
| 4.1.2 | Theoretischer Transmissionsgewinn | 72 |
| 4.1.3 | Zusammenfassung | 76 |
| 4.2 | Wachstumseigenschaften von ZnO:Al auf der SiO_xN_y -Zwischenschicht | 76 |
| 4.2.1 | Elektrische Eigenschaften des ZnO:Al | 77 |
| 4.2.2 | Textureigenschaften des ZnO:Al | 81 |
| 4.2.3 | Zusammenfassung | 88 |
| 4.3 | Barriereigenschaften der SiO_xN_y -Zwischenschicht | 89 |
| 4.3.1 | Vergleich mit und ohne Barrierschicht..... | 89 |
| 4.3.2 | Stöchiometrieabhängigkeit der Barrierewirkung..... | 91 |
| 4.3.3 | Zusammenfassung | 92 |
| 5 | Hochraten-Frontkontakt-Entwicklung auf Floatglas | 95 |
| 5.1 | Druck- und Temperaturserien | 95 |
| 5.1.1 | Elektrische Eigenschaften | 96 |
| 5.1.2 | Optische Eigenschaften | 98 |
| 5.1.3 | Oberflächentextur | 103 |
| 5.1.4 | Zusammenfassung | 109 |
| 5.2 | Entwicklung einer optimierten Textur für a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ -Tandemsolarzellen | 110 |
| 5.2.1 | Variationsmöglichkeiten von Einfachtexturen | 110 |
| 5.2.2 | Doppelte Texturierung | 121 |
| 5.2.3 | Zusammenfassung | 124 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6 | Vorätzanalyse der Oberflächenstruktur | 125 |
| 6.1 | Oberflächencharakterisierung mittels AFM und REM | 125 |
| 6.2 | Oberflächencharakterisierung mit Haze | 128 |
| 6.3 | Oberflächenmodifikation durch Ätzprozessanpassung | 130 |
| 6.4 | Zusammenfassung | 133 |
| 7 | Winkelaufgelöste Streulichtmessungen..... | 135 |
| 7.1 | Relevanz von winkelaufgelösten Streulichtmessungen für Solarzellen | 135 |
| 7.1.1 | Kurzschlussströme von Einfach-Solarzellen | 135 |
| 7.1.2 | Kurzschlussströme von Tandemsolarzellen | 146 |
| 7.1.3 | Einfluss der Textur auf die Kristallinität von $\mu\text{c-Si:H}$ -Solarzellen | 160 |
| 7.1.4 | Zusammenfassung | 161 |
| 7.2 | Prozessregelung mit Rückführung von Streulichtmessungen | 162 |
| 7.2.1 | Regelung des Depositionsprozesses | 163 |
| 7.2.2 | Regelung des Ätzprozesses | 169 |
| 7.2.3 | Strom-Optimierung von Einfachzellen..... | 170 |
| 7.2.4 | Zusammenfassung | 172 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 173 |
| 9 | Anhang | 177 |
| 9.1 | Literaturverzeichnis | 177 |
| 9.2 | Abbildungsverzeichnis | 191 |
| 9.3 | Tabellenverzeichnis..... | 195 |
| 9.4 | Abkürzungen | 196 |
| 9.5 | Vorab-Veröffentlichungen | 201 |
| 9.6 | Danksagungen | 203 |

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 223
ISBN 978-3-89336-978-2

