

H.-J. Lewerenz H. Jungblut

# Photovoltaik

Grundlagen und Anwendungen

Mit 295 Abbildungen, 11 Tabellen,  
zahlreichen Übungsaufgaben und vollständigen Lösungen



Springer

# Inhalt

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung in die Energiethematik</b>  | <b>1</b> |
| 1.1      | Forschungsaspekte   | 1        |
| 1.2      | Wirtschaftliche Betrachtungen   | 2        |
| <b>2</b> | <b>Physik der Solarzelle</b>  | <b>5</b> |
| 2.1      | Einführung in energieumwandelnde Prozesse                                       |          |
|          | an Halbleiterkontakten  | 5        |
| 2.1.1    | Vorbetrachtungen  | 5        |
| 2.1.2    | Zum Prinzip lichtinduzierter energieumwandelnder Prozesse                       | 5        |
| 2.1.3    | Überblick zu lichtinduzierten energieumwandelnden Prozessen                     | 6        |
| 2.2      | Grundzüge der angewandten Halbleiterphysik                                      | 12       |
| 2.2.1    | Vorbetrachtungen: Vom Atom zum Festkörper                                       | 12       |
| 2.2.2    | Der nicht entartete Halbleiter  | 13       |
| 2.2.3    | Der dotierte Halbleiter   | 18       |
| 2.2.4    | Einfluß der Dotierung auf Fermi-niveau und effektive Ladungsträgerkonzentration | 21       |
| 2.2.5    | Absorptionsverhalten; Anregungsprozesse   | 24       |
| 2.3      | Der belichtete Halbleiter   | 32       |
| 2.3.1    | Thermalisierung   | 32       |
| 2.3.2    | *Rekombinationsprozesse im Volumen  | 33       |
| 2.3.3    | Rekombination an Oberflächen  | 42       |
| 2.3.4    | Überschußladungsträger und Quasiferminiveaus                                    | 45       |
| 2.4      | Gleichrichtende Kontakte  | 48       |
| 2.4.1    | Gleichgewichtseinstellung zwischen Systemen mit geladenen Teilchen              | 48       |
| 2.4.2    | Kontaktpotentiale und Raumladungszonen  | 52       |
| 2.4.3    | Der ideale Metall-Halbleiter-Kontakt  | 56       |
| 2.4.4    | Das Anderson-Modell einer Halbleiter-Heterostruktur                             | 58       |
| 2.5      | Photovoltaische Eigenschaften gleichrichtender Kontakte                         | 60       |
| 2.5.1    | Stromfluß an einer unbelichteten Diode  | 61       |
| 2.5.2    | Einfaches Modell für die belichtete Diode                                       | 63       |
| 2.5.3    | Das Gärtner-Modell  | 65       |
| 2.5.4    | Anwendungen des Gärtner-Modells   | 69       |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 2.6      | Sonnenspektrum und Auswahlkriterien für Solarzellen . . . . .                        | 71         |
| 2.6.1    | Spektrale Eigenschaften des Sonnenlichts . . . . .                                   | 71         |
| 2.6.2    | Optimierungsbedingungen für den Wirkungsgrad<br>photovoltaischer Systeme . . . . .   | 74         |
| 2.7      | *Jenseits des Anderson-Modells . . . . .   | 81         |
| 2.7.1    | Übersicht . . . . .  | 81         |
| 2.7.2    | Fermi-level pinning . . . . .  | 84         |
| 2.7.3    | Grenzflächendipole und Banddiskontinuitäten . . . . .                                | 102        |
| 2.8      | Probleme . . . . .   | 110        |
|          | Literatur . . . . .  | 111        |
| <b>3</b> | <b>Solarzellen auf Silizium-Basis . . . . .</b>                                      | <b>113</b> |
| 3.1      | Die klassische Silizium-Solarzelle . . . . .   | 113        |
| 3.1.1    | Historisches . . . . .   | 113        |
| 3.1.2    | Das physikalische Konzept<br>der kristallinen Silizium p-n-Solarzelle . . . . .      | 114        |
| 3.1.3    | Von Sand zu Silizium: Herstellung von Einkristallen . . . . .                        | 116        |
| 3.1.4    | Verunreinigungen und Dotierung . . . . .   | 118        |
| 3.1.5    | Herstellung von p-n-Übergängen<br>und Optimierung der Solarzellen . . . . .          | 120        |
| 3.1.6    | Hochleistungssolarzellen mit kristallinem Si . . . . .                               | 125        |
| 3.2      | Polykristallines Silizium . . . . .  | 126        |
| 3.2.1    | Übersicht . . . . .  | 126        |
| 3.2.2    | Blockgießen mit gerichteter Erstarrung . . . . .                                     | 127        |
| 3.2.3    | Verfahren zur Herstellung von Siliziumscheiben<br>aus der Schmelze . . . . .         | 129        |
| 3.2.4    | Einfluß von Korngrenzen auf Ladungsträgertransport<br>und Absorption . . . . .       | 134        |
| 3.2.5    | Passivierung von Kristallfehlern<br>in polykristallinem Silizium . . . . .           | 136        |
| 3.2.6    | *Modellbetrachtungen zum Bänderziehverfahren . . . . .                               | 138        |
| 3.3      | Schottky-, MIS und SIS-Solarzellen . . . . .   | 145        |
| 3.4      | Probleme . . . . .   | 152        |
|          | Literatur . . . . .  | 152        |
| <b>4</b> | <b>Dünnschichtsolarzellen . . . . .</b>  | <b>155</b> |
| 4.1      | Einleitung . . . . .   | 155        |
| 4.2      | Stöchiometrie und elektronische Eigenschaften<br>in Verbindungshalbleitern . . . . . | 155        |
| 4.3      | Cadmium-Tellurid-Solarzellen . . . . .   | 157        |
| 4.3.1    | Historisches . . . . .   | 157        |
| 4.3.2    | Physikalische Eigenschaften der CdS/CdTe-Heterostruktur                              | 158        |
| 4.3.3    | Herstellungsverfahren für CdS/CdTe-Solarzellen . . . . .                             | 160        |
| 4.4      | Ternäre Chalkopyrite (CuInSe <sub>2</sub> und CuInS <sub>2</sub> ) . . . . .         | 166        |
| 4.4.1    | Vorbetrachtungen . . . . .   | 166        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.4.2    | Historisches . . . . .   | 166        |
| 4.4.3    | Die n-CdS/p-CuInSe <sub>2</sub> -Heterostruktur;<br>physikalische Eigenschaften . . . . .                          | 168        |
| 4.4.4    | Herstellungsverfahren für Dünnschichtsolarzellen<br>mit CuInSe <sub>2</sub> und erste Leistungsdaten . . . . .     | 171        |
| 4.4.5    | Präparation und Eigenschaften effizienter<br>Dünnschichtsolarzellen auf CuInSe <sub>2</sub> -Basis – reale Systeme | 172        |
| 4.4.6    | Effiziente Dünnschichtsolarzellen mit CuInS <sub>2</sub> . . . . .   | 180        |
| 4.5      | Die Galliumarsenid-Solarzelle . . . . .  | 190        |
| 4.5.1    | Einleitung . . . . .   | 190        |
| 4.5.2    | Physikalische Eigenschaften von GaAs und<br>Konzept der AlGaAs/GaAs-Solarzelle . . . . .                           | 191        |
| 4.5.3    | Herstellungsverfahren . . . . .  | 197        |
| 4.6      | Amorphes Silizium . . . . .  | 204        |
| 4.6.1    | Übersicht . . . . .  | 204        |
| 4.6.2    | Herstellung von a-Si:H Schichten . . . . .   | 204        |
| 4.6.3    | Physikalische Eigenschaften . . . . .  | 206        |
| 4.6.4    | Elektronische Eigenschaften . . . . .  | 207        |
| 4.6.5    | Rekombinationsprozesse . . . . .   | 216        |
| 4.7      | Solarzellen mit amorphem Silizium . . . . .  | 217        |
| 4.7.1    | Historisches . . . . .   | 217        |
| 4.7.2    | Die Dotierung von a-Si:H . . . . .   | 218        |
| 4.7.3    | p-i-n-Struktur für Solarzellen . . . . .   | 219        |
| 4.7.4    | Bedingungen für leistungsfähige p-i-n-Solarzellen . . . . .  | 220        |
| 4.7.5    | Verbesserungen bei der Herstellung von p-i-n-Strukturen  | 221        |
| 4.7.6    | Technische Realisation von a-Si:H p-i-n-Solarzellen . . . . .  | 222        |
| 4.7.7    | Entwicklung effizienter Systeme auf der Basis<br>der p-i-n-Struktur . . . . .                                      | 224        |
| 4.8      | Heterostrukturen aus amorphem und kristallinem Silizium . . . . .  | 229        |
| 4.9      | Probleme . . . . .   | 231        |
|          | Literatur . . . . .  | 232        |
| <b>5</b> | <b>Photoelektrochemische Solarzellen . . . . .</b>   | <b>235</b> |
| 5.1      | Grundlegende Betrachtungen . . . . .   | 235        |
| 5.1.1    | Einleitung und Historisches . . . . .  | 235        |
| 5.1.2    | Kontaktbildung zwischen Halbleiter und Elektrolyt . . . . .  | 237        |
| 5.1.3    | Ladungstransfer und Stromfluß . . . . .  | 241        |
| 5.1.4    | Regenerative Arbeitsweise<br>photoelektrochemischer Solarzellen . . . . .  | 243        |
| 5.1.5    | Photokorrosion und Stabilitätskriterien . . . . .  | 246        |
| 5.2      | Fallstudien an ausgewählten Systemen . . . . .   | 251        |
| 5.2.1    | Stabilität mit Übergangsmetaldichalkogeniden<br>als Photoanoden . . . . .  | 251        |
| 5.2.2    | Effiziente Solarzellen durch Oberflächenmodifizierung<br>von III-V Halbleitern . . . . .                           | 259        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.2.3    | Lichtinduzierte Stabilisierung von $\text{CuInSe}_2$ . . . . .                           | 271        |
| 5.2.4    | Sensibilisierungssolarzellen . . . . .   | 280        |
| 5.2.5    | Systeme mit verbessertem Wirkungsgrad . . . . .  | 282        |
| 5.3      | Probleme . . . . .   | 285        |
|          | Literatur . . . . .  | 285        |
| <b>6</b> | <b>Kombinierte Systeme</b> . . . . .   | <b>287</b> |
| 6.1      | Tandem-Solarzellen . . . . .   | 287        |
| 6.1.1    | Grundlegende Betrachtungen . . . . .   | 287        |
| 6.1.2    | Ausgewählte Beispiele . . . . .  | 293        |
| 6.2      | Konzentratorsysteme . . . . .  | 299        |
| 6.2.1    | Einleitung . . . . .   | 299        |
| 6.2.2    | Physikalische Effekte<br>bei hoher lichtinduzierter Ladungsträgerkonzentration . . . . . | 300        |
| 6.2.3    | Solarzellen für Konzentratorsysteme . . . . .  | 309        |
| 6.2.4    | Optische Systeme und Nachführung . . . . .   | 312        |
| 6.3      | Probleme . . . . .   | 324        |
|          | Literatur . . . . .  | 325        |
| <b>7</b> | <b>Perspektiven der Photovoltaik</b> . . . . .   | <b>327</b> |
| 7.1      | Photovoltaik im materialwissenschaftlichen Umfeld . . . . .                              | 327        |
| 7.2      | Neuartige Verbindungshalbleiter . . . . .  | 328        |
| 7.2.1    | Substitutionelle Verbindungen . . . . .  | 329        |
| 7.2.2    | Interstitielle Verbindungen . . . . .  | 330        |
| 7.2.3    | Geordnete Leerstellenverbindungen . . . . .  | 331        |
| 7.2.4    | Verbindungen mit d- bzw. f-Elektronen . . . . .  | 331        |
| 7.2.5    | Schichtgitterhalbleiter mit Gruppe IVB-Metallen . . . . .                                | 334        |
| 7.2.6    | Legierungen neuer Materialien . . . . .  | 335        |
| 7.3      | Materialien mit reduzierter Dimensionalität . . . . .                                    | 338        |
| 7.3.1    | Photovoltaische Bauteile mit Halbleiterübergittern . . . . .                             | 339        |
| 7.3.2    | Nanokristalline Halbleiter und kolloidale Teilchen . . . . .                             | 340        |
| 7.4      | Alternative Materialien und Herstellungsverfahren . . . . .                              | 346        |
| 7.4.1    | Organische Solarzellen . . . . .   | 346        |
| 7.4.2    | Alternative amorphe Halbleiter . . . . .   | 348        |
| 7.4.3    | Alternative Herstellungsverfahren . . . . .  | 351        |
| 7.5      | Probleme . . . . .   | 357        |
|          | Literatur . . . . .  | 358        |
| <b>8</b> | <b>Lösungen</b> . . . . .  | <b>359</b> |
|          | <b>Anhang: Bandlücken und Gitterkonstanten einiger Halbleiter</b> . . . . .              | <b>362</b> |
|          | <b>Sachverzeichnis</b> . . . . .   | <b>363</b> |