

H.-J. Lewerenz H. Jungblut

Photovoltaik

Grundlagen und Anwendungen

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



Springer

Inhalt

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Einführung in die Energiethematik | 1 |
| 1.1 | Forschungsaspekte | 1 |
| 1.2 | Wirtschaftliche Betrachtungen | 2 |
| 2 | Physik der Solarzelle | 5 |
| 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 Fermineveau 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 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 |
| 3 | Solarzellen auf Silizium-Basis | 113 |
| 3.1 | Die klassische Silizium-Solarzelle | 113 |
| 3.1.1 | Historisches | 113 |
| 3.1.2 | Das physikalische Konzept 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 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 aus der Schmelze | 129 |
| 3.2.4 | Einfluß von Korngrenzen auf Ladungsträgertransport und Absorption | 134 |
| 3.2.5 | Passivierung von Kristallfehlern 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 |
| 4 | Dünnschichtsolarzellen | 155 |
| 4.1 | Einleitung | 155 |
| 4.2 | Stöchiometrie und elektronische Eigenschaften 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_2 und CuInS_2) | 166 |
| 4.4.1 | Vorbetrachtungen | 166 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.4.2 | Historisches | 166 |
| 4.4.3 | Die n-CdS/p-CuInSe ₂ -Heterostruktur; physikalische Eigenschaften | 168 |
| 4.4.4 | Herstellungsverfahren für Dünnschichtsolarzellen mit CuInSe ₂ und erste Leistungsdaten | 171 |
| 4.4.5 | Präparation und Eigenschaften effizienter Dünnschichtsolarzellen auf CuInSe ₂ -Basis – reale Systeme | 172 |
| 4.4.6 | Effiziente Dünnschichtsolarzellen mit CuInS ₂ | 180 |
| 4.5 | Die Galliumarsenid-Solarzelle | 190 |
| 4.5.1 | Einleitung | 190 |
| 4.5.2 | Physikalische Eigenschaften von GaAs und 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 der p-i-n-Struktur | 224 |
| 4.8 | Heterostrukturen aus amorphem und kristallinem Silizium | 229 |
| 4.9 | Probleme | 231 |
| | Literatur | 232 |
| 5 | Photoelektrochemische Solarzellen | 235 |
| 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 photoelektrochemischer Solarzellen | 243 |
| 5.1.5 | Photokorrosion und Stabilitätskriterien | 246 |
| 5.2 | Fallstudien an ausgewählten Systemen | 251 |
| 5.2.1 | Stabilität mit Übergangsmetaldichalkogeniden als Photoanoden | 251 |
| 5.2.2 | Effiziente Solarzellen durch Oberflächenmodifizierung von III-V Halbleitern | 259 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2.3 | Lichtinduzierte Stabilisierung von CuInSe_2 | 271 |
| 5.2.4 | Sensibilisierungssolarzellen | 280 |
| 5.2.5 | Systeme mit verbessertem Wirkungsgrad | 282 |
| 5.3 | Probleme | 285 |
| | Literatur | 285 |
| 6 | Kombinierte Systeme | 287 |
| 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 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 |
| 7 | Perspektiven der Photovoltaik | 327 |
| 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 |
| 8 | Lösungen | 359 |
| | Anhang: Bandlücken und Gitterkonstanten einiger Halbleiter . | 362 |
| | Sachverzeichnis | 363 |