

Hans-Günther Wagemann, Heinz Eschrich

Photovoltaik

Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften

Solarzellenkonzepte und Aufgaben

mit 132 Abbildungen und 20 Übungsaufgaben



Teubner

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Symbole	IX
1. Einleitung	1
1.1 Geschichtliche Entwicklung der Photovoltaik	3
2. Die Solarstrahlung als Energiequelle der Photovoltaik	7
2.1 Strahlungsquelle Sonne und Strahlungsempfänger Erde	7
2.2 Die Sonne als Schwarzer Strahler	9
2.3 Leistung und spektrale Verteilung der terrestrischen Solarstrahlung	10
3. Halbleitermaterial für die photovoltaische Energiewandlung	19
3.1 Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Festkörper	19
3.2 Photovoltaischer Grenzwirkungsgrad	22
3.3 Beschreibung der Ladungsträgergeneration durch Absorption von Strahlung	25
3.4 Grundlagen der Halbleitertechnik für Solarzellen	29
3.5 Überschussladungsträgerprofil in homogenem Halbleitermaterial	31
3.6 Strategien zur Trennung der generierten Überschussladungsträger	38
3.7 Reflexionsverluste	41
4. Grundlagen für Solarzellen aus kristallinem Halbleitermaterial	43
4.1 Die Halbleiterdiode als Solarzelle	43
4.2 Grundmodell einer kristallinen Solarzelle	45
4.2.1 Elektronenstrom	47
4.2.2 Löcherstrom	49
4.2.3 Gesamtstrom	51
4.2.4 Spektrale Empfindlichkeit	53
4.3 Bestrahlung mit einem Standardspektrum	55
4.4 Technische Solarzellen-Parameter	56
4.5 Das Ersatzschaltbild einer kristallinen Solarzelle	58
4.6 Grenzwirkungsgrad einer Dioden-Solarzelle aus Silizium	59

5. Monokristalline Silizium-Solarzellen	63
5.1 Diskussion der spektralen Empfindlichkeit	63
5.2 Temperaturverhalten der Generatoreigenschaften	74
5.3 Parameter einer optimierten c-Si-Solarzelle	77
5.4 Kristallzüchtung	78
5.5 Präparation	80
5.6 Hochleistungs-Solarzellen	82
5.7 Degradation der Solarzelleneigenschaften beim Einsatz im Weltraum (radiation damage)	86
6. Polykristalline Silizium-Solarzellen	90
6.1 Aufbereitung des Ausgangsmaterials zum SGS-Silizium	90
6.2 Vergleich der Herstellungsverfahren	95
6.3 Kokillenguss-Verfahren für multikristalline Silizium-Blöcke (mc-Si)	97
6.4 Modell der Korngrenze im multikristallinen Silizium	100
6.4.1 Berechnung der spektralen Überschussladungsträgerdichte	103
6.4.2 Zweidimensionales Randwertproblem der Photostromdichte eines einzelnen Mikrokristalliten	105
6.5 Bewertung von spektraler Empfindlichkeit und Photostromdichte	110
6.6 Präparation	114
7. Solarzellen aus Verbindungshalbleitern	119
7.1 Vergleich der Solarzellenmaterialien Silizium und Galliumarsenid	119
7.2 Konzept der GaAs-Solarzelle mit AlGaAs-Fensterschicht	120
7.3 Modellrechnung zur AlGaAs/GaAs-Solarzelle	121
7.4 Kristallzüchtung	127
7.5 Flüssigphasen-Epitaxie für GaAs-Solarzellen	129
7.6* Präparation von GaAs-Solarzellen mit LPE	130
7.7 Gasphasen-Epitaxie der III/V-Halbleiter zur Abscheidung dünnster Schichten	130
7.8 Stapel-Solarzellen aus III/V-Halbleiter-Material	132
7.9 Konzentrationstechnologie mit III/V-Stapelzellen	136
8. Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem Silizium	140
8.1 Eigenschaften des amorphen Siliziums	140
8.2 Dotieren des amorphen Siliziums	144
8.3 Physikalisches Modell der a-Si:H-Solarzelle	148
8.3.1 Dunkelstrom	149

8.3.2 Photostrom	152
8.4 Präparation	159
8.5 Verringerung der Degradationseffekte	163
8.6 Herstellung von a-Si:H-Solarzellen	164
9. Alternative Solarzellen-Konzepte	167
9.1 Bifacial-MIS-Solarzelle aus kristallinem Silizium	167
9.2 Solarzellen aus Kupfer-Indium-Diselenid (CuInSe ₂)	168
9.3 a-Si:H/c-Si-Solarzellen	169
9.4 Die Kugelelement-Solarzelle	171
9.5 Solarzellen aus organischen Halbleitern	173
9.5.1 Halbleiter aus organischen Molekülen	173
9.5.2 Solarzellen aus organischem Werkstoff	176
9.5.3 Farbstoff-Solarzellen (engl.: <i>dye solar cells</i>)	178
9.6 Solarzellen der 3. Generation	179
10. Ausblick	183
Anhang A Rechnungen und Tabellen	- 185
A.1 Lösung des Integrals zur Berechnung des Grenzwirkungsgrades	185
A.2 Lösung der Diffusionsgleichung	187
A.3 Das Standardspektrum AM 1.5global	193
A.4 Der Absorptionskoeffizient von Silizium für T=300 K	194
Anhang B Übungsaufgaben	195
Aufgabe Ü 2.1 zum Kap. 2 AM-Werte unterschiedlicher Orte in Europa	195
Aufgabe Ü 2.2 zum Kap. 2 Abschätzung der Solarkonstanten E ₀ mit einfachen Mitteln	197
Aufgabe Ü 2.3 zum Kap. 2 Abschätzung des AM(1,5)-Wertes für Berlin	200
Aufgab©*) 2.4 zum Kap. 2 Tägliche Sonnenbahn und solare Bestrahlungsstärke sowie Tages- und Jahressummen der Sonnenenergie auf einer Horizontalfläche an einem Ort wie Berlin	201
Aufgabe Ü 3.1 zum Kap. 3 Dember-Solarzelle	208
Aufgabe Ü 3.2 zum Kap. 3 Zweidimensionale numerische Lösung der Differentialgleichung der Ladungsträger-Diffusion	212
Aufgabe Ü 3.3 zum Kap. 3 Analytische Lösung der partiellen Differentialgleichung der Elektronen-Verteilung An(x,y) in einer p-leitenden Silizium-Scheibe der Größe BH unter solarer Beleuchtung	217
Aufgabe Ü 5.1 zum Kap. 5 Analyse von Silizium-Solarzellen	219

Aufgabe Ü 5.01 zum Kap. 5 Messung der Generator-Kennlinie	221
Aufgabe Ü 5.02 zum Kap. 5 Messung der spektralen Empfindlichkeit	223
Aufgabe Ü 5.03 zum Kap. 5 Messung der Sperrschicht-Kapazität von Solarzellen	226
Aufgabe Ü 5.04 zum Kap. 5 Bestimmung des Dioden-Sperrsättigungsstromes I_0 durch Messungen von Kurzschluss-Strom $I_{ph}(E)$ und Leerlauf-Spannung $U_L(E)$ bei jeweils zwei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken E_1 und E_2	229
Aufgabe Ü 5.05 zum Kap. 5 Bestimmung des parasitären Serienwiderstandes R_s durch Errechnung der Tangente im Leerlaufpunkt $U_L=U(I=0)$ nach vorheriger Bestimmung des Sättigungssperrstromes I_0	232
Aufgabe Ü 5.06 zum Kap. 5 Bestimmung des parasitären Parallelwiderstandes R_p durch Berechnung der Tangente im Kurzschlusspunkt $I_K=I(U=0)$ nach vorheriger Bestimmung von R_s	233
Aufgabe Ü 5.07 zum Kap. 5 Berechnung des Diffusionskoeffizienten der Ladungsträger in Basis und Emitter	235
Aufgabe Ü 5.08 zum Kap. 5 Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger der Basis	236
Aufgabe Ü 5.09 zum Kap. 5 Bestimmung der Diffusionslänge des höher dotierten Bereiches	238
Aufgabe Ü 5.10 zum Kap. 5 Externer Quantenwirkungsgrad $Q_{ext}(\lambda)$ als Messgröße und als Rekonstruktion	239
Aufgabe Ü 5.11 zum Kap. 5 Generator-Kennlinie $I(U)$ als Rekonstruktion aus den Halbleiterparametern	242
Aufgabe Ü 7.1 zum Kap. 7 Ultimativer Wirkungsgrad einer Sechsfach-Stapel-Solarzelle („Sixtupel Cell“)	248
Anhang C Technologische Übungen	252
C1 Einfache Technologie von Silizium-Solarzellen an der TU Berlin	252
C2 Herstellung einer Farbstoff-Solarzelle mit einfachsten Mitteln	256
Literatur	258
Stichwortverzeichnis	263
Verzeichnis der Tafeln	
Detektoren zur Vermessung der terrestrischen Sonnenstrahlung	17
Zusammenhänge zwischen den wichtigsten photoelektrischen Größen	28
Strategien zur Trennung von Überschussladungsträgerprofilen	40
Messung der spektralen Empfindlichkeit	73
Material- und Energieaufwand für die Solarzellen-Herstellung aus Silizium	95
Messung der Generator-Kennlinie in kalibrierter Bestrahlung AM(1,5)	138