

Sonnenenergie: Photovoltaik

Physik und Technologie der Solarzelle

Von Prof. Dr. rer. nat. Adolf Goetzberger
Dipl.-Phys. Bernhard Voß
und Dr. rer. nat. Joachim Knobloch
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
Freiburg i. Br.

Mit 124 Abbildungen

D

Technische Hochschule Darmstadt

Fachbereich-Mechanik

Bibliothek

Nr.

BM 62194



B.G. Teubner Stuttgart 1994

Inhalt

1	Photovoltaik	11
1.1	Prinzip der Photovoltaik	11
1.2	Geschichte der Photovoltaik	11
1.3	Bedeutung der Photovoltaik	13
2	Sonnenenergie	15
2.1	Strahlungsquelle Sonne	15
2.2	Normierte Strahlung	16
3	Grundlagen der Photovoltaik	18
3.1	Kristallstruktur und Bändermodell von Halbleitern	18
3.1.1	Bändermodell vierwertiger Halbleiter	19
3.1.2	Elektronen und Löcher im Halbleiter	23
3.1.3	Energiezustände, Fermi - Niveau	24
3.1.4	Zustandsdichte der Elektronen und Löcher	26
3.1.5	Thermischer Gleichgewichtszustand	29
3.2	Leitungsmechanismen in Halbleitern	30
3.2.1	Eigenleitung, Feldstrom und Beweglichkeit	30
3.2.2	Störstellenleitung	34
3.2.3	Diffusionsstrom, Diffusionskonstante	38
3.3	Erzeugung von Ladungsträgern durch Absorption von Licht	40
3.3.1	Absorption in Halbleitern	41
3.3.1.1	Absorption in direkten Halbleitern	41
3.3.1.2	Absorption in indirekten Halbleitern	43
3.4	Rekombination, Trägerlebensdauer	45
3.4.1	Strahlende Rekombination	46
3.4.2	Auger-Rekombination	47
3.4.3	Störstellenrekombination	48
3.4.4	Rekombination durch Dotierung	54
3.5	Grundgleichungen der Halbleiter-Bauelemente-Physik	55
3.5.1	Gleichungen für die Stromdichten	55
3.5.2	Poisson'sche Gleichung	56
3.5.3	Kontinuitätsgleichung	57

4	P-N-Übergang	60
4.1	Grundgleichungen	60
4.2	Raumladungszone	60
4.2.1	Potentialdifferenz	62
4.2.2	Elektrisches Feld und elektrisches Potential	65
4.2.3	Raumladungszonenweite und Kapazität	68
4.3	Belasteter p-n-Übergang	70
4.3.1	P-N-Übergang bei geringer Rekombination und schwacher Injektion	71
4.3.2	Durchlaßcharakteristik und Sättigungsströme	72
5	Physik der Solarzelle	76
5.1	Der beleuchtete infinite p-n-Übergang	76
5.1.1	Strom-Spannungs-Charakteristik einer infiniten Solarzelle	77
5.1.1.1	Kurzschlußstrom	78
5.1.1.2	Leerlaufspannung	78
5.1.1.3	Füllfaktor	80
5.1.1.4	Wirkungsgrad	80
5.2	Reale Solarzelle	81
5.2.1	Photoströme einer realen Solarzelle	82
5.2.1.1	Photostrom aus der Basis	82
5.2.1.2	Photostrom aus dem Emitter	84
5.2.1.3	Photostrom aus der Raumladungszone	85
5.2.2	Sättigungsströme einer realen Solarzelle	85
5.2.2.1	Sättigungsstrom aus der Basis	85
5.2.2.2	Sättigungsstrom aus dem Emitter	86
5.2.3	Ohmsche Widerstände in realen Solarzellen	88
5.2.3.1	Parallelwiderstand	88
5.2.3.2	Serienwiderstand	88
5.2.4	Zweidiodenmodell	88
5.2.4.1	Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle	90
5.2.4.1	Einfluß der Ohm'schen Widerstände	93
6	Solarzellen hoher Wirkungsgrade	96
6.1	Bedeutung des hohen Wirkungsgrades	96
6.2	Elektrische Verluste	100
6.2.1	Verluste durch Rekombination	100

8 Inhalt

6.2.1.1	Rekombinationsverluste in der Basis	100
6.2.1.2	Photostrom und Sättigungsstrom aus dem Emitter	106
6.2.1.3	Einfluß der Basisdotierung	110
6.2.1.4	Rekombination in der Raumladungszone	112
6.2.2	Ohm'sche Widerstandsverluste	113
6.2.2.1	Kontaktwiderstand Metall-Halbleiter	114
6.2.2.2	Ohmsche Verluste im Halbleiter	121
6.2.2.3	Ohmsche Verluste in den Metallkontakten	124
6.3	Optische Verluste	125
6.3.1	Antireflexverfahren	125
6.3.1.1	Antireflexion mittels dünner Schichten	125
6.3.1.2	Texturierung	129
6.3.2	Durchstrahlungsverluste	130
6.3.3	Abschattungsverluste durch Kontaktfinger	132
6.4	Struktur einer hocheffizienten Solarzelle	133
7	Technologie der Si - Solarzellen	137
7.1	Technologie zur Herstellung von Silizium	137
7.1.1	Grundmaterial	137
7.1.2	Refraktionierungsverfahren	139
7.1.3	Herstellung von polykristallinem Si-Material	139
7.1.4	Kristallziehverfahren	140
7.1.4.1	Czochralski (CZ)-Verfahren	141
7.1.4.2	Zonenziehverfahren	142
7.1.5	Herstellung von Silizium-Scheiben	142
7.1.6	Polykristallines Silizium-Material	144
7.1.7	Folienmaterialien	146
7.1.7.1	EFG-Verfahren	147
7.1.7.2	SSP-Verfahren	147
7.2	Technologien für Si - Solarzellen	148
7.2.1	Technologien für p-n-Übergänge	148
7.2.1.1	Diffusionstechnologie, Theorie der Diffusion	149
7.2.1.2	Diffusionstechnologie	154
7.2.2	Oxidationstechnologie	158
7.2.3	Hilfstechnologien	160
7.2.3.1	Ätz- und Reinigungstechniken	160
7.2.3.2	Photolithographie	162

7.2.4	Metallisierung von Solarzellen	162
7.2.4.1	Strukturierung des Finger-Grids	162
7.2.4.2	Hochvakuum-Aufdampftechnologie	163
7.2.4.3	Dickfilmtechnologie	165
7.2.5	Antireflextechnologien	165
7.2.5.1	Aufbringen von Antireflexschichten	165
7.2.5.2	Herstellung von texturierten Siliziumoberflächen	166
8	Sonstige Solarzellen	170
8.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium	170
8.1.1	Konzentratorzellen	170
8.1.2	MIS-Solarzellen	172
8.1.3	Solarzellen aus polykristallinem Silizium	174
8.2	Dünnschicht - Solarzellen	175
8.2.1	Solarzellen aus amorphem Silizium	176
8.2.2	Solarzellen aus Gallium-Arsenid	180
8.2.3	Solarzellen aus Cadmium-Tellurid	185
8.2.4	Solarzellen aus Kupfer-Indium-Diselenid	185
8.3	Tandem-Solarzellen	187
8.4	Photoelektrochemische Solarzellen	189
9	Analytik und Meßtechnik	195
9.1	Strom - Spannungs - Charakteristik	195
9.1.1	Messung der Hellkennlinie	196
9.1.2	Messung der Dunkelstromkennlinie	197
9.1.2.1	Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Einstrahlung	199
9.1.2.2	Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Temperatur	200
9.2	Spektrale Empfindlichkeit einer Solarzelle	202
9.2.1	Spektrale Empfindlichkeit einer vorderseitig beleuchteten Solarzelle	202
9.2.2	Spektrale Empfindlichkeit einer rückseitig beleuchteten Solarzelle	204
9.3	PCVD-Verfahren	206
9.4	PCD-Methode	208
9.4.1	Bestimmung des Emittersättigungsstromes	209

10 Inhalt

9.4.2	Bestimmung der Oberflächenrekombinations- geschwindigkeit	211
9.5	Kurzschlußstrom-Topographie (ALBIC-Mapping)	211
9.6	DLTS-Verfahren	213
10	Photovoltaische Anwendungen	216
10.1	Energiepotential	216
10.1.1	Strahlungsangebot in verschiedenen Zonen	216
10.1.2	Einfluß des Anstellwinkels der Module	218
10.2	Herstellung von Modulen	219
10.2.1	Reihenschaltung	219
10.2.2	Parallelschaltung	220
10.2.3	Modulaufbau	220
10.3	Photovoltaiksysteme	221
10.4	Speichersysteme	222
10.5	Einsatzgebiete der Photovoltaik	223
10.5.1	Photovoltaisch versorgte Kleingeräte	223
10.5.2	Photovoltaische Energieversorgung von Häusern	224
10.5.2.1	Photovoltaisch autarke Versorgung	224
10.5.2.2	Netzgekoppelte photovoltaische Versorgung	224
Anhang A,	Liste der Symbole	228
Anhang B,	Physikal. Konstanten, ausgewählte Si-Parameter	230
Sachverzeichnis	231