

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. Breisgau

2., überarbeitete und erweiterte Auflage
Mit 131 Abbildungen und 2 Tabellen



B. G. Teubner Stuttgart 1997

Inhalt

1	Photovoltaik	13
1.1	Prinzip der Photovoltaik	13
1.2	Geschichte der Photovoltaik	13
1.3	Bedeutung der Photovoltaik	15
2	Sonnenenergie	17
2.1	Strahlungsquelle Sonne	17
2.2	Normierte Strahlung	18
3	Grundlagen der Photovoltaik	20
3.1	Kristallstruktur und Bändermodell von Halbleitern	20
3.1.1	Bändermodell vierwertiger Halbleiter	21
3.1.2	Elektronen und Löcher im Halbleiter	25
3.1.3	Energiezustände, Fermi - Niveau	26
3.1.4	Zustandsdichte der Elektronen und Löcher	28
3.1.5	Thermischer Gleichgewichtszustand	32
3.2	Leitungsmechanismen in Halbleitern	33
3.2.1	Eigenleitung, Feldstrom und Beweglichkeit	33
3.2.2	Störstellenleitung	36
3.2.3	Diffusionsstrom, Diffusionskonstante	40
3.3	Erzeugung von Ladungsträgern durch Absorption von Licht	42
3.3.1	Absorption in Halbleitern	43
3.3.1.1	Absorption in direkten Halbleitern	44
3.3.1.2	Absorption in indirekten Halbleitern	46
3.4	Rekombination, Trägerlebensdauer	48
3.4.1	Strahlende Rekombination	48
3.4.2	Auger-Rekombination	49
3.4.3	Störstellenrekombination	51
3.4.4	Rekombination durch Dotierung	56
3.5	Grundgleichungen der Halbleiter-Bauelemente-Physik	58
3.5.1	Gleichungen für die Stromdichten	58
3.5.2	Poisson'sche Gleichung	58
3.5.3	Kontinuitätsgleichung	59

8 Inhalt

4	P-N-Übergang	63
4.1	Grundgleichungen	63
4.2	Raumladungszone	63
	4.2.1 Potentialdifferenz	65
	4.2.2 Elektrisches Feld und elektrisches Potential	68
	4.2.3 Raumladungszonenweite und Kapazität	71
4.3	Belasteter p-n-Übergang	72
	4.3.1 P-N-Übergang bei geringer Rekombination und schwacher Injektion	74
	4.3.2 Durchlaßcharakteristik und Sättigungsströme	74
5	Physik der Solarzelle	79
5.1	Der beleuchtete infinite p-n-Übergang	79
	5.1.1 Strom-Spannungs-Charakteristik einer infiniten Solarzelle	80
	5.1.1.1 Kurzschlußstrom	81
	5.1.1.2 Leerlaufspannung	81
	5.1.1.3 Füllfaktor	83
	5.1.1.4 Wirkungsgrad	83
5.2	Reale Solarzelle	84
	5.2.1 Photoströme einer realen Solarzelle	85
	5.2.1.1 Photostrom aus der Basis	86
	5.2.1.2 Photostrom aus dem Emitter	87
	5.2.1.3 Photostrom aus der Raumladungszone	88
	5.2.2 Sättigungsströme einer realen Solarzelle	88
	5.2.2.1 Sättigungsstrom aus der Basis	89
	5.2.2.2 Sättigungsstrom aus dem Emitter	90
	5.2.3 Ohmsche Widerstände in realen Solarzellen	91
	5.2.3.1 Parallelwiderstand (R_p)	92
	5.2.3.2 Serienwiderstand (R_s)	92
	5.2.4 Zweiodenmodell	92
	5.2.4.1 Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle	94
	5.2.4.1 Einfluß der Ohm'schen Widerstände	97
6	Solarzellen hoher Wirkungsgrade	100
6.1	Bedeutung des hohen Wirkungsgrades	100
6.2	Elektrische Verluste	104
	6.2.1 Verluste durch Rekombination	104

6.2.1.1	Rekombinationsverluste in der Basis	104
6.2.1.2	Photostrom und Sättigungsstrom aus dem Emitter	110
6.2.1.3	Einfluß der Basisdotierung	115
6.2.1.4	Rekombination in der Raumladungszone	116
6.2.2	Ohm'sche Verluste	117
6.2.2.1	Kontaktwiderstand Metall-Halbleiter	118
6.2.2.2	Ohmsche Verluste im Halbleiter	126
6.2.2.3	Ohmsche Verluste in den Metallkontakten	129
6.3	Optische Verluste	130
6.3.1	Antireflexverfahren	130
6.3.1.1	Antireflexion mittels dünner Schichten	131
6.3.1.2	Texturierung	134
6.3.2	Durchstrahlungsverluste	136
6.3.3	Abschattungsverluste durch Kontaktfinger	137
6.4	Struktur einer hocheffizienten Solarzelle	138
6.5	Herstellprozesse für hocheffiziente Silizium - Solarzellen	140
6.5.1	Prozeßfolge für höchste Wirkungsgrade	141
6.5.2	Vereinfachter Herstellprozeß	144
7	Technologie der Si - Solarzellen	149
7.1	Technologie zur Herstellung von Silizium	149
7.1.1	Grundmaterial	149
7.1.2	Refraktionierungsverfahren	151
7.1.3	Herstellung von polykristallinem Si-Material	151
7.1.4	Kristallziehverfahren	152
7.1.4.1	Czochralski (CZ) - Verfahren	153
7.1.4.2	Zonenziehverfahren	154
7.1.5	Herstellung von Silizium-Scheiben	155
7.1.6	Polykristallines Silizium-Material	156
7.1.7	Folienmaterialien	158
7.1.7.1	EFG-Verfahren	158
7.1.7.2	SSP-Verfahren	159
7.2	Technologien für Si - Solarzellen	160
7.2.1	Technologien für p-n-Übergänge	161
7.2.1.1	Diffusionstechnologie, Theorie der Diffusion	161
7.2.1.2	Diffusionstechnologie	166
7.2.2	Oxidationstechnologie	170

10 Inhalt

7.2.3	Hilfstechnologien	172
7.2.3.1	Ätz- und Reinigungstechniken	173
7.2.3.2	Photolithographie	174
7.2.4	Metallisierung von Solarzellen	174
7.2.4.1	Strukturierung des Finger-Gitters	175
7.2.4.2	Hochvakuum-Aufdampftechnologie	176
7.2.4.3	Dickfilmtechnologie	177
7.2.5	Antireflextechnologien	178
7.2.5.1	Aufbringen von Antireflexschichten	178
7.2.5.2	Herstellung von texturierten Siliziumoberflächen	178
8	Ausgewählte Solarzellentypen	183
8.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium	183
8.1.1	Konzentratorzellen	183
8.1.2	Bifacial - Solarzelle	186
8.1.3	"Buried - Contact" - Solarzelle	187
8.1.4	MIS-Solarzelle	188
8.1.5	Solarzellen aus polykristallinem Silizium	189
8.1.6	Dünnschichtzellen aus kristallinem Silizium	192
8.1.6.1	Vorteile und Anforderungen	192
8.1.6.2	Zusammenhänge zwischen den elektrischen und den Zellenparametern	193
8.1.6.3	Herstelltechnologien für Si - Dünnschicht- Solarzellen	198
8.1.7	Mehrschichtszellen aus Silizium	200
8.2	Dünnschicht - Solarzellen	203
8.2.1	Solarzellen aus amorphem Silizium	204
8.2.2	Solarzellen aus Gallium-Arsenid	208
8.2.3	Solarzellen aus Cadmium-Tellurid	213
8.2.4	Solarzellen aus Kupfer-Indium-Diselenid	213
8.3	Tandem-Solarzellen	215
8.4	Farbstoffsensibilisierte Solarzelle	216
9	Analytik und Meßtechnik	225
9.1	Strom - Spannungs - Charakteristik	225
9.1.1	Messung der Hellkennlinie	226
9.1.2	Messung der Dunkelstromkennlinie	227

9.1.2.1	Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Einstrahlung	229
9.1.2.2	Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Temperatur	230
9.2	Spektrale Empfindlichkeit einer Solarzelle	232
9.2.1	Spektrale Empfindlichkeit einer vorderseitig beleuchteten Solarzelle	232
9.2.2	Spektrale Empfindlichkeit einer rückseitig beleuchteten Solarzelle	234
9.3	PCVD-Verfahren	236
9.4	PCD-Methode	238
9.4.1	Bestimmung des Emittersättigungsstromes	239
9.4.2	Bestimmung der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit	241
9.5	Mikrowellendetektiertes Photoleitfähigkeitsabklingen	241
9.6	Modulierte Ladungsträger-Absorption	244
9.7	Kurzschlußstrom-Topographie (LBIC)	249
9.8	DLTS-Verfahren	251
Anhang A, Liste der Symbole		254
Anhang B, Physikal. Konstanten, ausgewählte Si-Parameter		256
Anhang C, Bücher über Photovoltaische Systeme		257
Sachverzeichnis		258
