
Gottfried Heinrich Bauer

Photovoltaik – Physikalische Grundlagen und Konzepte



Springer Spektrum

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Verschiedene Formen der Primärenergie	1
1.2 Globaler und lokaler Bedarf an Primärenergie	2
1.3 Flächenbedarf und technologischer Aufwand von Photovoltaikanlagen	3
Literatur	4
2 Strahlungsquelle Sonne	5
2.1 Thermische Strahlung aus dem Fusionsreaktor Sonne	6
2.2 Geometrische Konfiguration Sonne-Planeten	6
2.3 Die Sonne aus der Sicht eines irdischen Beobachters	8
2.4 Spektrale Verteilung der solaren Strahlung	9
2.4.1 Ansatz nach Planck	9
2.4.2 Ansatz mit einem elektronischen Zwei-Niveau-System	14
2.4.3 Emission aus dem Planck-Volumen	16
2.5 Absorptions- und Emissionsvermögen	18
2.5.1 Wellenlängenabhängigkeit von Absorptions- und Emissionsvermögen	18
2.5.2 Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz	18
2.6 Strahlungsbilanzen	20
2.6.1 Sonne-Erde	20
2.6.2 Sonne-Erde mit Speicherung oder Entnahme chemischer Energie	21
2.6.3 Sonne-Planeten	23
2.7 Konzentration solarer Strahlung	24
2.7.1 Konzentrationsfaktor Raumwinkel	24
2.7.2 Konzentration mit der Näherung der geometrischen Optik	25
2.7.3 Etendue als Erhaltungsgröße	30
2.7.4 Nichtabbildende Konzentration	32
2.8 Partikeleigenschaften solarer Strahlung	33
2.8.1 Gesamter solarer Photonenstrom	34
2.8.2 Mittlere Energie solarer Photonen	34

2.8.3	Energetische Barriere für solare Photonen	34
2.8.4	Impuls solarer Photonen und Photonendruck	35
2.9	Entropiestromdichte solarer Photonen	37
2.10	Das Chemische Potential von Strahlung	38
2.11	Fragen/Aufgaben zu Kap. 2	43
	Literatur	43
3	Theoretische Grenzen der Wandlung solarer Strahlung	45
3.1	Thermodynamische Beziehungen	45
3.1.1	Carnot-Ansatz	45
3.1.2	Energietransport durch Strahlung	46
3.2	Endoreversible Thermodynamik	49
3.2.1	Curzon-Ahlnborn-Maschine	49
3.2.2	Stefan-Boltzmann-Konzept	52
3.2.3	Mueser-Maschine	55
3.2.4	Mueser-Anordnung für maximale Strahlungskonzentration	58
3.3	Direkte Wandlung in elektrische Energie durch Anregung eines Elektronensystems	59
3.3.1	Ratenbilanz ohne elektrischen Kontakt nach außen und maximales Chemisches Potential	60
3.3.2	Ratenbilanz mit Entnahme von angeregten Zuständen	63
3.3.3	Wirkungsgrad eines idealen elektronischen Systems	67
3.3.4	Injektion von Ladungen aus einer äußeren Quelle	68
3.4	Wandlung monochromatischer Strahlung	70
3.5	Spektrale Unterteilung der solaren Strahlung	70
3.5.1	Spektral selektive Absorption	70
3.5.2	Photonenenergie und energetische Schwelle zur Absorption	71
3.5.3	Multispektrale Nutzung	71
3.6	Fragen/Aufgaben zu Kap. 3	73
	Literatur	74
4	Grundlegende Prinzipien der Photovoltaik	75
4.1	Anregung durch Strahlung	76
4.2	Elektronische Zustände	76
4.3	Dichten elektronischer Zustände	80
4.4	Effektive Masse	82
4.5	Unterscheidung Metall – Halbleiter	84
4.6	Wechselwirkung von Strahlung mit Materie im Wellenbild	86
4.6.1	Komplexer Brechungsindex	86
4.6.2	Propagation in Materie und Amplitudendämpfung	89
4.6.3	Propagation über Phasengrenzen/Reflexion	90
4.6.4	Matrix-Transfer-Formalismus	92
4.6.5	Einkopplung von Strahlung in Materie	94

4.7	Absorption von Strahlung im Teilchenbild	94
4.7.1	Direkte Übergänge zwischen Energiebändern.	95
4.7.2	Indirekte Übergänge zwischen Energiebändern	97
4.7.3	Übergänge mit Beteiligung von Defekten, Verunreinigungen/Dotieratomen und Bandausläuferzuständen	99
4.8	Besetzung von elektronischen Energieniveaus	102
4.8.1	Thermisches Gleichgewicht.	102
4.8.2	Konzept der Defektelektronen	103
4.8.3	Besetzung von Niveaus unter Photoanregung	104
4.8.4	Photoanregung und Quasi-Fermi-Niveaus.	104
4.9	Rekombination	108
4.9.1	Rekombinationskoeffizienten	109
4.9.2	Übergänge zwischen Energieniveaus.	110
4.9.3	Rekombinationsprozesse	110
4.10	Exzitonen	120
4.10.1	Frenkel Exzitonen	122
4.10.2	Mott-Wannier Exzitonen	122
4.11	Transportvorgänge	123
4.11.1	Boltzmann-Transportgleichung	123
4.11.2	Ladungstransport	125
4.11.3	Transporteigenschaften	128
4.11.4	Gradienten als treibende Kräfte	132
4.11.5	Kontinuitätsgleichungen für Elektronen und Löcher	135
4.11.6	Transport exzitonischer Anregungszustände	136
4.11.7	Tunneleffekt	137
4.12	Struktur idealer Solarzellen	139
4.13	Arbeitspunkt maximaler Ausgangsleistung	144
4.14	Vorzeichenumkehr von Photonen- und Ladungsträgerströmen	145
4.15	Irreversible Effekte und Entropieterme	148
4.15.1	Absorption solarer Photonen und photon cooling	148
4.15.2	Entropiegeneration beim Transport	150
4.16	Fragen/Aufgaben zu Kap. 4.	153
	Literatur.	153
5	Solarzellen aus anorganischen und organischen Halbleitern	155
5.1	Anorganische Halbleiter	156
5.1.1	Anorganische Halbleiter im thermischen Gleichgewicht	158
5.1.2	Anorganische Halbleiter unter Beleuchtung	162

5.1.3	Aufspaltung der Quasi-Fermi-Niveaus in anorganischen Halbleitern	163
5.1.4	Quasi-Fermi-Niveaus mit Randeffekten	164
5.1.5	Barrieren	166
5.1.6	Raumladungszonen	166
5.2	Homogener pn-Übergang	169
5.2.1	Raumladungszone im homogenen pn-Übergang als einfaches Beispiel.	169
5.2.2	Stromdichte-Spannungs-Relation der unbeleuchteten pn-Diode	173
5.2.3	Beleuchtete pn-Diode	180
5.2.4	Quasi-Fermi-Niveaus in einer beleuchteten homogenen pn-Diode.	181
5.2.5	Ausgangsspannung einer beleuchteten Diode	183
5.2.6	Idealitätsfaktor einer Diode	186
5.2.7	Raumladungszone und Gradienten der Bänder	190
5.2.8	Das sogenannte Back „Surface Field“	191
5.3	Kontakte	194
5.4	Heteroübergänge	195
5.4.1	Konzept der Hetero-Diode.	195
5.4.2	Elektronische Eigenschaften von Hetero-Dioden	197
5.5	P-i-n-Dioden	199
5.5.1	Konzept der p-i-n-Diode	199
5.5.2	Raumladung und Bänder in p-i-n-Dioden	200
5.5.3	Beleuchtete p-i-n-Diode.	201
5.6	Metall-Halbleiter-Dioden.	204
5.6.1	Banddiagramm und Raumladungszone in Schottky-Dioden	204
5.6.2	Schottky-Diode unter Beleuchtung	207
5.7	Organische Materie für Strahlungswandlung	209
5.7.1	Organische Systeme mit π -Bindungen	210
5.7.2	Elektronische Eigenschaften	211
5.7.3	Absorption von Photonen und Generation von Exzitonen	211
5.7.4	Donator-Akzeptor-Strukturen zur Strahlungswandlung	213
5.7.5	Farbstoffsensibilisierte Absorber	216
5.7.6	Stromdichte-Spannungs-Kennlinien von organischen Solarzellen	218
5.8	Photoelektrochemische und photochemische Zellen	219
5.8.1	Photoelektrochemische Zellen.	219
5.8.2	Photochemische Zellen	219
5.9	Absorptionsprofile	221
5.9.1	Exponentielle Generationsprofile und optimale Dicke von Absorbern	222

5.10	Elektrische Ersatzschaltung beleuchteter Dioden	223
5.11	Wirkungsgrade von realen Solarzellen	226
5.11.1	Verluste in realen Solarzellen.	226
5.11.2	Tabelle zu Wirkungsgraden von Solarzellen	226
5.12	Fragen/Aufgaben zu Kap. 5	227
	Literatur.	228
6	Konzepte zur Erhöhung der Ausbeute	231
6.1	Erhöhung der Photondichte im Absorber.	233
6.1.1	Einkopplung von Photonen in Materie	233
6.1.2	Rauhe und strukturierte Oberflächen.	233
6.1.3	Konzentration der Strahlung	235
6.2	Spektrale Unterteilung solarer Photonen	237
6.2.1	Spektrale Separation mit optischen Methoden	238
6.2.2	Abfolge von Absorbern mit unterschiedlichen Bandabständen – Tandemsolarzellen.	238
6.2.3	IMB-Solarzellen	241
6.2.4	Unterteilung eines homogenen Absorbers.	242
6.3	Spektrale Manipulation solarer Photonen	244
6.3.1	Verringerung der Photonenenergie – down-conversion	244
6.3.2	Erhöhung der Photonenenergie – up-conversion.	245
6.3.3	Änderung der Photonenenergie mit gleichzeitiger Konzentration der Strahlung	246
6.4	Überschussenergie der Ladungsträger, <i>hot electrons</i>	253
6.4.1	Extraktion hochenergetischer Elektronen	255
6.4.2	Impact Ionization	256
6.4.3	Mehrfach-Trägergeneration durch ein Photon.	257
6.5	Plasmonische Effekte.	259
6.5.1	Plasmonen in Metallclustern	260
6.5.2	Plasmonresonanz zur Generation freier Ladungsträger	261
6.6	Thermophotovoltaik.	261
	Literatur.	262
	ANHANG.	265
	Stichwortverzeichnis.	297