



Fehlstellendotierung von Eisenoxid- und Bismutsulfid-Nanopartikeln

Jan Peter Mock

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 415

ISBN 978-3-95806-309-9

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung
IEK-5 Photovoltaik

Fehlstellendotierung von Eisenoxid- und Bismutsulfid-Nanopartikeln

Jan Peter Mock

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 415

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-309-9

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Gliederung der Arbeit	9
2. Grundlagen und Charakterisierungsmethoden	11
2.1. Grundlagen	11
2.1.1. Bandmodell und Zustandsdichte	11
2.1.2. Ladungsträgertransport in kristallinen Halbleitern	12
2.1.3. Ladungsträgerkonzentration	12
2.1.4. Seebeck-Effekt	13
2.1.5. Thermoelektrische Kraft	15
2.1.6. Defekte und Fehlstellen in Halbleitern	16
2.1.7. Potentialbarrieren	16
2.1.8. Ladungstranport durch Polaronen	18
2.2. Charakterisierungsmethoden	20
2.2.1. Thermokraft und Leitfähigkeit	20
2.2.2. Photothermische Deflektionsspektroskopie	23
2.2.3. Raman-Spektroskopie	23
2.2.4. Rasterelektronenmikroskopie	23
2.2.5. Kennlinien-Messplatz	24
2.2.6. Fouriertransformierte Photostrom-Spektroskopie	25
3. Materialeigenschaften	27
3.1. Eisenoxid	27
3.1.1. Phasendiagramm und Kristallstruktur	27
3.1.2. Elektrische Transporteigenschaften	30
3.1.3. Beweglichkeit von Ladungsträgern	32
3.2. Bismutsulfid	35
3.2.1. Elektrische Transporteigenschaften	36
3.2.2. Photovoltaische Anwendung von Bismutsulfid	38
4. Untersuchung von Eisenoxid-Nanopartikeln	41
4.1. Probenherstellung	41
4.1.1. Nanopartikel-Schichten	41
4.1.2. PECVD-Dünn-Schichten	42
4.2. Elektrische Transporteigenschaften unter Temperaturbehandlung	43
4.2.1. Elektrische Leitfähigkeit	43
4.2.2. Thermische Aktivierungsenergie der Leitfähigkeit	44

4.2.3.	Thermoelektrische Kraft	45
4.2.4.	Ladungsträgerkonzentration und Beweglichkeit	46
4.2.5.	Thermische Aktivierungsenergie der Ladungsträgerkonzentration und Beweglichkeit	49
4.2.6.	Einfluss der Atmosphäre auf die Leitfähigkeit	58
4.3.	Optische Charakterisierung von temperaturbehandelten Eisenoxid- Nanopartikeln	62
4.3.1.	Raman-Spektroskopie	62
4.3.2.	Photothermische Deflektionsspektroskopie	64
4.4.	Zusammenfassung der elektrischen Transporteigenschaften von Hämatit . .	66
4.5.	Überprüfung des Konzepts einer Nanopartikel-Solarzelle	68
5.	Untersuchung von Bismut-sulfid-Nanopartikeln	73
5.1.	Probenherstellung	73
5.1.1.	Nanopartikel-Synthese	73
5.1.2.	Schichtherstellung mit Ligandenaustausch	74
5.2.	Elektrische Transporteigenschaften	76
5.2.1.	Initialer Probenwiderstand	76
5.2.2.	Leitfähigkeit und Thermokraft	77
5.2.3.	Ligandenaustausch	79
5.2.4.	Atmosphärischer Einfluss	80
5.2.5.	Thermische Aktivierungsenergien	85
5.2.6.	Fehlstellendotierung	92
5.3.	Optische Charakterisierung von temperaturbehandelten Bismut-sulfid- Nanopartikeln	95
5.3.1.	Raman-Spektroskopie	95
5.3.2.	Photothermische Deflektionsspektroskopie	96
5.4.	Hybrid-Solarzellen mit Bismut-sulfid-Nanopartikeln	99
5.4.1.	Architektur und Herstellung	99
5.4.2.	Optimierung der Herstellungsparameter	102
5.4.3.	Beitrag der Bismut-sulfid-Nanopartikel zur spektralen Quantenaus- beute	108
5.4.4.	Temperaturbehandlung der Bismut-sulfid-Nanopartikel	112
5.5.	Zusammenfassung der Untersuchung von Bismut-sulfid-Nanopartikeln . . .	127
6.	Zusammenfassung der Arbeit	129

A. Anhang	133
A.1. Vergleich der Boltzmann-Näherung mit der Fermi-Dirac-Statistik	133
A.2. Kontaktierungsmaske	134
A.3. Aktivierungsenergie der Beweglichkeit von Hämatit	135
A.4. SEM-Aufnahmen des Querschnitts von Hämatit-Dünn-Schichten	136
A.5. Bestimmung der Mindesttemperatur der Leitfähigkeitssteigerung einer Hämatit-Nanopartikel-Schicht	137
A.6. Absorption von Hämatit und Magnetit	138
A.7. Thermokraftmessungen einer Bismutsulfid-Nanopartikel-Schicht	139
A.8. Aktivierungsenergien der Transporteigenschaften einer Bismutsulfid- Nanopartikel-Schicht	140
A.9. Referenzwerte der Aktivierungsenergie der Beweglichkeit von Bismutsulfid	143
A.10. Absorption von temperaturbehandelten Bismutsulfid-Nanopartikel-Schichten	144
A.11. Solarzellenlayout	146
A.12. Dunkelkennlinien von Bismutsulfid-Nanopartikel-Solarzellen (DLE-Serie) .	147
A.13. Quantenausbeute einer Bismutsulfid-Nanopartikel-Solarzelle	148
A.14. Absorbanz von undotiertem Zinkoxid	150
A.15. Quantenausbeute einer Bismutsulfid-Nanopartikel-Solarzellenserie	151
A.16. Dunkelkennlinien von Bismutsulfid-Nanopartikel-Solarzellen (Temperatur- Serie)	154
A.17. Dunkelstromdichte und Fehlstellenkonzentration für die neutrale Zone der Bismutsulfid-Nanopartikel-Solarzellen	155
A.18. Idealitätsfaktor der temperaturbehandelten Bismutsulfid-Nanopartikel- Solarzellen	158
A.19. Dominante Streumechanismen	161
B. Publikationsliste	166
C. Curriculum Vitae	167
D. Danksagung	168
Literaturverzeichnis	171

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 415
ISBN 978-3-95806-309-9

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

