

Herstellung von semi-isolierenden Siliziumkarbid-Einkristallen

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

Matthias Bickermann

Erlangen 2002

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 21. Januar 2002

Tag der Promotion: 19. März 2002

Dekan: Prof. Dr. A. Winnacker

Berichterstatter: Prof. Dr. A. Winnacker
Prof. Dr. J.-M. Spaeth

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
1.1 Motivation	8
1.2 Eigenschaften von SiC und Anwendung als Halbleitermaterial	9
1.3 Gliederung der Arbeit	12
2. Störstellen und Kompensation in SiC	13
2.1 Motivation	13
2.2 Elektronische Niveaus in der Bandlücke	14
2.2.1 Inäquivalente Gitterplätze	14
2.2.2 Extrinsische Störstellen in SiC	15
2.2.3 Intrinsische Defekte und Defektkomplexe	19
2.3 Störstellen in der Volumenkristallzüchtung	23
2.4 Kompensation von Störstellen am Beispiel Vanadium	25
2.4.1 Kompensationsmodell	25
2.4.2 Der Weg zur Herstellung von semi-isolierenden SiC-Einkristallen mittels Vanadiumdotierung	27
2.5 Zusammenfassung	30
3. Die Herstellung von SiC-Einkristallen	31
3.1 Motivation	31
3.2 Überblick über das modifizierte Lely-Verfahren	32
3.2.1 Aufbau und experimentelle Durchführung	32
3.2.2 Wärme- und Stofftransport	35
3.2.3 Kristallwachstum	36
3.2.4 Dotierungstechnologie	39
3.2.5 Defektstrukturen in SiC-Einkristallen	41
3.3 Präparation und Charakterisierungsverfahren	43
3.3.1 Bestimmung der Orientierung und Modifikation der Kristalle ..	43
3.3.2 Bestimmung des Dotierstoffeinsatzes	44
3.3.3 Elektrische und optische Charakterisierung	45
3.4 Zusammenfassung	47

4. Die Züchtung hochreiner, nominell undotierter SiC-Kristalle	49
4.1 Motivation	49
4.2 Anlagen- und Prozessreinheit	50
4.2.1 Anlagentypische Verunreinigungen	51
4.2.2 Verunreinigungen in Pulver und Inertgas	53
4.2.3 Volumendiffusion	54
4.2.4 Verbesserung der Reinheit	55
4.2.5 Grenzen des Ausheizprozesses	58
4.3 Eigenschaften nominell undotierter Kristalle	59
4.3.1 Chemische Analyse	59
4.3.2 Elektrische Eigenschaften	60
4.3.3 Laterale Homogenität der elektrischen Eigenschaften	63
4.4 Zusammenfassung	65
5. Die Züchtung p-leitender, bordotierter SiC-Kristalle	66
5.1 Motivation	66
5.2 Überlegungen zur Herstellung von p-leitenden SiC-Volumenkristallen	67
5.2.1 Vergleich der Dotierstoffspezies bei Züchtungsbedingungen .	67
5.2.2 Dotierung mit Feststoffquelle	69
5.2.3 Dotierung mit gasförmigen Precursoren	71
5.2.4 Dotierung mit Dotierstoffreservoir	72
5.2.5 Wahl des Dotierstoffs und der Dotierungsmethode	73
5.3 Transport und Segregation von Bor	73
5.3.1 Pulverpräparation	73
5.3.2 Effektiver Transferkoeffizient	75
5.3.3 Segregation und Abdampfverluste	77
5.4 Einbauverhalten der Borspezies	79
5.4.1 Wachstum auf unterschiedlich orientierten Kristallen	79
5.4.2 Stufenfluss und laterale Inhomogenität	81
5.4.3 Kristallinität bei hoher Bordotierung	83
5.5 Bestimmung des lokalen Boreinbaus aus der Ladungsträgerkonzentration unter Berücksichtigung von Kompensationseffekten ...	86
5.5.1 Optische Absorption	86
5.5.2 Temperaturabhängige Halleffektmessungen	87
5.5.3 Kompensation gering bordotierter Kristalle durch Stickstoff ...	90
5.5.4 Homogenität der Ladungsträgerkonzentration	94
5.6 Zusammenfassung	97

6. Die Züchtung semi-isolierender SiC-Kristalle mittels Vanadiumdotierung	99
6.1 Motivation	99
6.2 Die Züchtung vanadiumdotierter SiC-Einkristalle	100
6.2.1 Erstellung eines Dotierungskonzepts	100
6.2.2 Pulverpräparation	101
6.2.3 Züchtung mit geringer Vanadiumzugabe	103
6.2.4 Transport und Segregation	104
6.2.5 Löslichkeit und Ausscheidungsbildung	107
6.2.6 Verbesserung des Dotierstoffkonzepts	110
6.2.7 Zusammenfassung	113
6.3 Eigenschaften vanadiumdotierter SiC-Kristalle	113
6.3.1 Optische Bestimmung von Vanadium-Ladungszuständen	113
6.3.2 Magnetische Elektronen-Spinresonanz	117
6.3.3 Temperaturabhängige Halleffektmessungen	118
6.3.4 Axiale Homogenität der elektrischen Eigenschaften	119
6.3.5 Absorptionsmessungen an hochkompensierten 6H- und 4H-Proben	121
6.3.6 Kapazitive Messung des spezifischen Widerstandes und laterale Homogenität der elektrischen Eigenschaften	123
6.3.7 Zusammenfassung	125
6.4 Co-Dotierung von Vanadium und Bor	126
6.4.1 Technik der Co-Dotierung	126
6.4.2 Optische Absorption	129
6.4.3 Temperaturabhängige Halleffektmessungen	130
6.4.4 Zusammenfassung	133
6.5 Hochreines, semi-isolierendes SiC (HPSI-SiC)	134
7. Zusammenfassung und Ausblick	137
Literaturverzeichnis	139
Veröffentlichungen	161
Danksagung.....	163
Lebenslauf	165