

Technologieplattform für die Herstellung von MEMS aus  
Siliziumcarbid am Beispiel eines Drucksensors

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II  
- Physik und Mechatronik -  
der Universität des Saarlandes

von

Nils Rasmus Behnel

Saarbrücken

2011

Tag des Kolloquiums: 27.01.2012

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. H. Seidel

Mitglieder des Prüfungsausschusses:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. S. Seelecke

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. H. Seidel

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Mücklich

Akad. Mitarbeiter: Dr. T. Sauerwald

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik  
Recent Developments in MEMS

Band 22

**Nils Rasmus Behnel**

**Technologieplattform für die Herstellung von MEMS  
aus Siliziumcarbid am Beispiel eines Drucksensors**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0962-0

ISSN 1862-5711

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)



---

## Kurzzusammenfassung

In der Automobil-, Energie- und Industrietechnik gibt es eine ganze Reihe von Anwendungen für Mikrosysteme in heißen und aggressiven Umgebungen, die erhöhte Anforderungen an die verwendbaren Konzepte und Materialien stellen. Siliziumcarbid (*SiC*) ist als alternative Materialbasis im Vergleich zu Silizium thermisch, elektrisch sowie mechanisch stabiler und zeichnet sich zudem durch eine hohe Medienbeständigkeit aus.

Der erste Teil dieser Arbeit umfasst die Entwicklung von polykristallinem *SiC* als Materialsystem zur Anwendung in oberflächenmikromechanischen Sensoren und den zugehörigen Fertigungstechnologien. Zum einen wurden Verfahren zur Herstellung von leitfähigen polykristallinen *SiC*-Dünnschichten aus der Gasphase untersucht und evaluiert. Zum anderen wurde ein fluorbasiertes, plasmaunterstütztes Trockenätzverfahren zur Strukturierung von *SiC* entwickelt, das auf zyklisch alternierenden Prozessgasen basiert und die Erzeugung tiefer Gräben mit steilen Kanten erlaubt. Zur Herstellung von freistehenden *SiC*-Strukturen diente eine neue hochselektive Opferschichttechnologie, die auf einer vergrabenen Schicht aus Silizium-Germanium basiert. Darüber hinaus erfolgte die Untersuchung unterschiedlicher Metallisierungen zur temperaturstabilen ohmschen Kontaktierung.

Im zweiten Teil wurde ein Konzept für einen robusten Drucksensor entwickelt und mittels einer FEM-Simulation ausgelegt. Die Fertigung des Drucksensors erfolgte mit den im ersten Teil dieser Arbeit beschriebenen Technologien.

---

## Abstract

New applications in automotive, energy and industrial technology indicate an increased demand for microsystems adapted to environments having elevated temperatures and aggressive media, resulting in higher requirements on suitable concepts and materials. Compared to conventional silicon, silicon carbide (*SiC*) is electrically, mechanically and thermally more stable and shows a higher chemical inertness.

In the first part of this work, polycrystalline *SiC* for the application of electrically conductive layers in sensors produced in surface technology has been developed. The production of conductive, *in situ*-doped layers occurred by plasma enhanced chemical vapour deposition as well as plasmaless deposition. In addition, a new fluorine based dry etch of *SiC* has been developed, using gas switching to preserve deep trenches with high aspect ratios. To achieve free standing structures a new developed high selective sacrificial layer technology was adopted using a buried layer of silicon-germanium and chlorine trifluoride as etchant. Moreover, several metallic materials have been investigated to meet the requirements of temperature stable ohmic contacts on polycrystalline *SiC*.

The second part attends to a newly developed pressure sensing principle which has been designed with the aid of a FEM-Simulation especially for the application in harsh environments in the engine compartment of automobiles. The fabrication of the sensor was realized through the technologies described in part one.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Theoretische Einführung</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Sensoren in rauen Umgebungen</b>	<b>12</b>
1.1	Einleitung . . . . .	12
1.2	Anwendungsgebiete . . . . .	13
1.2.1	Anwendungen in der Automobiltechnik . . . . .	13
1.3	Zusammenfassung . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Siliziumcarbid in der Mikrosystemtechnik</b>	<b>16</b>
2.1	Einleitung . . . . .	16
2.2	Grenzen von Silizium . . . . .	16
2.3	Hochtemperaturhalbleiter . . . . .	17
2.4	Siliziumcarbid . . . . .	18
2.4.1	Kristallstruktur von SiC . . . . .	18
2.4.2	Polytypismus . . . . .	19
2.4.3	Anwendung in der Mikrotechnik . . . . .	21
2.5	Materialeigenschaften von kristallinem SiC . . . . .	21
2.6	Zusammenfassung . . . . .	23
<b>II</b>	<b>Technologieplattform zur Herstellung von MEMS aus SiC</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>Einführung</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>Schichtentwicklung von polykristallinem SiC</b>	<b>28</b>
4.1	Einleitung . . . . .	28
4.2	Physikalische Verfahren . . . . .	29
4.3	CVD-Verfahren . . . . .	30
4.3.1	Prozessgase . . . . .	31
4.3.2	Einbau von Dotierstoffen . . . . .	31
4.4	APCVD-Verfahren . . . . .	34
4.5	LPCVD-Verfahren . . . . .	35

4.5.1	Stand der Technik . . . . .	36
4.5.2	Abscheidung mit Dichlorsilan und Acetylen . . . . .	36
4.5.3	Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands . . . . .	38
4.5.4	Zusammensetzung und Kristallinität der Schicht . . . . .	38
4.6	PECVD-Verfahren . . . . .	39
4.6.1	Stand der Technik . . . . .	41
4.6.2	PECVD-Abscheidung mit Silan und Acetylen . . . . .	41
4.6.3	Einfluss der Temperatur . . . . .	42
4.6.4	Einfluss von Dotiergas . . . . .	45
4.6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	47
4.7	Zusammenfassung . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Strukturierung von polykristallinem SiC</b>	<b>49</b>
5.1	Einleitung . . . . .	49
5.2	Plasmaunterstützte Trockenätzverfahren . . . . .	50
5.2.1	Ätzen mit SF <sub>6</sub> . . . . .	50
5.2.2	C-Polymerisation . . . . .	51
5.2.3	Unterstützung durch Sauerstoff . . . . .	51
5.2.4	Unterstützung durch Argon . . . . .	52
5.2.5	Oberflächenanalyse . . . . .	52
5.2.6	Weitere Einflussfaktoren . . . . .	54
5.3	Zielsetzung . . . . .	55
5.4	Zweistufiges Ätzverfahren mit SF <sub>6</sub> und O <sub>2</sub> zur Strukturierung von Poly-SiC . . . . .	56
5.4.1	Versuchsdurchführung . . . . .	57
5.4.2	Versuchsergebnisse . . . . .	57
5.4.3	Vorteile des Verfahrens . . . . .	61
5.5	Maskierung . . . . .	62
5.5.1	Photolack . . . . .	62
5.5.2	Metallische Masken . . . . .	63
5.5.3	Nicht-metallische Masken . . . . .	64
5.6	Aluminiumnitrid als Ätzstopp . . . . .	65
5.7	Zusammenfassung . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Herstellung freistehender Strukturen aus polykristallinem SiC</b>	<b>68</b>
6.1	Einleitung . . . . .	68
6.2	Stand der Technik . . . . .	68
6.2.1	Nasschemische Opferschichttechnologie mit SiO <sub>2</sub> . . . . .	68
6.2.2	Trockenätzverfahren zur Herstellung freistehender Si-Strukturen	69
6.3	Opferschichttechnologie für SiC mit SiGe-Opferschicht und ClF <sub>3</sub> als Ätzgas . . . . .	69
6.3.1	Technische Details . . . . .	70
6.3.2	Ergebnisse . . . . .	72

6.3.3	Vorteile des Verfahrens . . . . .	73
6.4	Anwendung . . . . .	73
6.4.1	Stressentkoppelte Membranen aus Poly-SiC . . . . .	73
6.5	Wirkmechanismus . . . . .	75
6.5.1	Ätzen von Si und SiGe in $\text{ClF}_3$ . . . . .	75
6.5.2	Ätzen von SiC in $\text{ClF}_3$ . . . . .	76
6.6	Verschluss von Opferschichtzugängen . . . . .	76
6.6.1	Verschluss von Opferschicht-Zugängen mit polykristallinem PECVD-SiC . . . . .	78
6.7	Zusammenfassung . . . . .	78
<b>7</b>	<b>Elektrische Kontaktierung von Poly-SiC</b>	<b>81</b>
7.1	Einleitung . . . . .	81
7.1.1	Metall-Halbleiter-Übergang . . . . .	81
7.1.2	Transportmechanismen für Ladungsträger in Schottky-Kontakten	83
7.1.3	Messung des spezifischen Schicht- und Kontaktwiderstands .	84
7.2	Materialauswahl . . . . .	88
7.3	Herstellung von Teststrukturen . . . . .	90
7.4	Messung und Berechnung der Kontaktwiderstände . . . . .	91
7.5	Nickel als Metallisierung . . . . .	91
7.6	Platin als Metallisierung . . . . .	92
7.7	Schichtstapel Titan/Titannitrid/Platin als Metallisierung . . . . .	95
7.8	Langzeitstabilität . . . . .	97
7.9	Zusammenfassung . . . . .	98
<b>III</b>	<b>Anwendung am Beispiel eines Drucksensors</b>	<b>99</b>
<b>8</b>	<b>Konzeption eines robusten Drucksensors</b>	<b>100</b>
8.1	Einleitung . . . . .	100
8.2	Messprinzipien von Drucksensoren . . . . .	100
8.3	Piezoresistive Drucksensoren . . . . .	101
8.3.1	Auswertung von piezoresistiven Drucksensoren . . . . .	102
8.3.2	K-Faktor . . . . .	104
8.3.3	Temperaturstabilität von piezoresistiven Drucksensoren . . .	105
8.3.4	Piezoresistive Drucksensoren aus SiC . . . . .	106
8.4	Kapazitive Drucksensoren . . . . .	107
8.4.1	Kapazitive Drucksensoren im Berührmodus . . . . .	108
8.5	Sensorprinzip mit Membran-Mikrokontakt . . . . .	109
8.6	Vorteile des Messprinzips . . . . .	112
8.7	Mögliche Risiken des Sensorprinzips . . . . .	112
8.8	Zusammenfassung . . . . .	112

<b>9 Simulation eines SiC-Drucksensors mit Membran-Mikrokontakt</b>	<b>114</b>
9.1 Einleitung . . . . .	114
9.2 Analytische Berechnung der Auslenkung einer Membran unter Drucklast . . . . .	115
9.3 FEM-Simulation einer Membran im Berührmodus . . . . .	116
9.4 Sensorsignal eines Membran-Mikrokontakt-Drucksensors . . . . .	118
9.5 Simulationsergebnisse . . . . .	120
9.6 Zusammenfassung . . . . .	122
<b>10 Herstellung und Charakterisierung eines SiC-Drucksensors mit Membran-Mikrokontakt</b>	<b>124</b>
10.1 Einleitung . . . . .	124
10.2 Prozessfolge der Herstellung . . . . .	125
10.3 Ergebnisse . . . . .	127
10.4 Test der Muster auf Funktionalität . . . . .	129
10.5 Möglichkeiten der technologischen Optimierung . . . . .	132
10.6 Ausblick . . . . .	134
10.7 Zusammenfassung . . . . .	135
<b>11 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>136</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>