

Friedrich Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Technische Fakultät



**Charakterisierung von Metall-Oxid-Halbleiter-  
Strukturen auf der Silicium- und Kohlenstoff-  
seite von 4H-Siliciumcarbid**

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Michael Josef Grieb

Erlangen, 2010

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

Tag der Einreichung:	22.03.2010
Tag der Promotion:	06.08.2010
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard German
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel apl. Prof. Dr. Martin Hundhausen

Erlanger Berichte Mikroelektronik

Band 1/2010

**Michael Grieb**

**Charakterisierung von Metall-Oxid-Halbleiter-  
Strukturen auf der Silicium- und Kohlenstoffseite  
von 4H-Siliciumcarbid**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9411-3

ISSN 0948-3462

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)

*Für Ruth*

*„Wissenschaft ist ein offen bleibendes Abenteuer des Suchens“  
(Wilhelm von Humboldt)*

# Kurzfassung

Die Reduzierung des weltweiten Energiebedarfs ist eine der wichtigsten Herausforderungen unserer Zeit. Die Minimierung der Verlustleistung bei der Umwandlung von elektrischer Energie kann hierzu einen bedeutenden Beitrag liefern. Leistungsbaulemente auf der Basis von Siliciumcarbid (SiC) haben das Potential, die materialabhängigen Grenzen heutiger auf Silicium basierter Leistungsbaulemente zu überwinden und damit erheblich zur Reduzierung der Verlustleistung beizutragen. Obwohl in der SiC-Prozesstechnologie große Fortschritte erzielt wurden, gibt es immer noch eine Reihe von Problemen, welche gelöst werden müssen.

Die Beweglichkeit der Inversionsladungsträger im n-MOSFET liegt noch weit vom theoretischen Maximum entfernt und hat auch noch keinen zufriedenstellenden Wert erreicht. Eine niedrige Beweglichkeit führt zu einem kleineren Stromfluss und das wiederum zu kleineren Leistungsdichten des Transistors und damit zu höheren Herstellungskosten. Um die Beweglichkeit des MOSFETs zu steigern muss der Oxidationsmechanismus und die Grenzfläche SiC/Isolator intensiver untersucht und verstanden werden. Sowohl die Oxidation selbst als auch die Grenzfläche haben direkten Einfluss auf die Leistung des Transistors. Des Weiteren genügen die SiC-Baulemente noch nicht den Zuverlässigkeitsanforderungen, zum Beispiel von der Automobilindustrie, und liegen noch ein Stück weit von Silicium-Baulementen entfernt. Auch hier muss insbesondere der Isolator, welcher der empfindlichste Teil des Schalters ist, und die Grenzfläche SiC/Isolator verbessert werden.

Es existieren verschiedene Ansätze um die Beweglichkeit und die Oxidzuverlässigkeit eines MOSFETs zu erhöhen. Auf der einen Seite sind die Hauptvariablen der Oxidation, die Temperatur und die Atmosphäre, welche einen großen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften des Oxides haben. Auf der anderen Seite ist es möglich das Oxid abzuscheiden, um Kohlenstoffansammlungen an der Grenzfläche zu vermeiden. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit eine Art Zwitter herzustellen: erst wird das Oxid abgeschieden und im Anschluss oxidiert.

Diese Arbeit diskutiert die Vor- und Nachteile der beiden Oxid-Herstellungsmethoden unter Berücksichtigung der sich ergebenden elektrischen Eigenschaften, wie zum Beispiel die Flachbandspannung, die Anzahl der Oxidladungen oder die Grenzflächenzustandsdichte, und der Oxidzuverlässigkeit auf der Silicium- und Kohlenstoffseite von Siliciumcarbid.

Dazu wurden als erstes die Oxidationsmechanismen auf den beiden Seiten bei verschiedenen Temperaturen und Atmosphären untersucht. Die Kohlenstoffseite oxidiert wesentlich schneller als die Siliciumseite und die Oxidationsraten sind mit Silicium vergleichbar. Es wurde gezeigt, dass bei der Trockenoxidation der Siliciumseite durch eine Erhöhung der Temperatur von 1100°C auf 1280°C die Prozesszeiten um 90% von 66 auf zwei Stunden verringert werden können, allerdings werden diese durch den Einsatz von stickoxidhaltigen Oxidationsgasen wieder verlängert. Während der Oxidation in stickoxidhaltigen Atmosphären bilden sich an der Grenzfläche Si≡N Bindungen, welche vor dem Voranschreiten

der Oxidation wieder aufgebrochen werden müssen. Stickoxidhaltige Gase während des Oxidationsprozesses sind vorteilhaft, weil dadurch die Anzahl der offenen Bindungen an der Grenzfläche SiC/Isolator deutlich verringert werden können.

Die verschiedenen hergestellten Oxide zeigten zum Teil ein deutlich unterschiedliches elektrisches Verhalten. Mit Hilfe von C-U-Messungen wurde die Grenzflächenzustandsdichte bestimmt. Durch die Erhöhung der Temperatur und durch den Einsatz von Lachgas konnte diese um fast eine Größenordnung von  $5 \cdot 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  auf unter  $7 \cdot 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  reduziert werden. Gleichzeitig wurde dadurch die Stabilität der Oxide erhöht. Die Ladung, welche durch das Oxid fließen muss, bis dieses zerstört ist (der intrinsische  $Q_{BD}$ -Wert), erhöhte sich von  $6 \cdot 10^{-3} \text{Ccm}^{-2}$  auf  $57,4 \text{Ccm}^{-2}$ . Weitere Verbesserungen wurden erzielt durch den Einsatz von abgeschiedenen und thermisch nachbehandelten PECVD-Oxiden. Durch das erstmalige Verwenden von NO zur Nachbehandlung konnte die Grenzflächenzustandsdichte auf unter  $10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  reduziert werden und ist so mit typischen Dichten auf Silicium vergleichbar.

Auf der Kohlenstoffseite konnte ebenfalls eine Verbesserung der elektrischen Oxideigenschaften durch den Einsatz von stickoxidhaltigen Gasen nachgewiesen werden. In dieser Arbeit wurde erstmalig die Zuverlässigkeit von Oxiden auf der C-Seite von 4H-SiC untersucht, die erreichten  $Q_{BD}$ -Werte liegen bei über  $100 \text{Ccm}^{-2}$  und damit deutlich höher als auf der Siliciumseite oder auf Silicium.

Auf der Siliciumseite wurden auch Transistoren hergestellt. Die Schalter mit einem in NO nachbehandeltem PECVD-Oxid zeigten im Vergleich mit einem in  $\text{N}_2\text{O}$  hergestellten Oxid, eine Erhöhung der Beweglichkeit der Inversionsladungsträger von 6 auf  $24 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ . Dadurch würde sich in einem Leistungsbaulement im VDMOS-Design der Anteil des Kanals am Gesamtwiderstand von über 50% auf unter 25% reduzieren.

Anhand der Ergebnisse wurde ein Modell aufgestellt, das beschreibt wie sich die Oxidation auf die Eigenschaften des Halbleiters und die Oxidqualität auswirkt. Des Weiteren wurde aufgezeigt, an welchen Punkten weitere Untersuchungen nötig sind, um die Leistungsdichte und Zuverlässigkeit von SiC-Bauelementen weiter zu erhöhen.



# Abstract

The reduction of the worldwide energy consumption is one of the most important challenges in our time. Imperfect energy conversion presents a significant, yet dispensable part of it. High power silicon-carbide (SiC) devices have the potential to overcome the limits of silicon based devices and reduce significantly the amount of lost power. The last years have seen a rapid progress in silicon-carbide process technology, but several problems remain to be solved. First of all, the mobility of inversion charge carriers in n-MOSFETs is far lower than the theoretical maximum and has not reached a satisfactory level. A small mobility results in a small current and this leads to a low power density and to higher fabrication costs per device. To increase the mobility of MOSFETs the oxidation mechanism and the interface SiC/silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) need further attention and have to be studied more intensively. Both, the oxidation itself and the quality of the interface influence the performance of the transistor.

Furthermore, today's silicon-carbide devices do not comply with the reliability demands, for example of the automotive market, and exhibit a far lower reliability level compared to silicon devices. To enhance the reliability level of SiC devices, especially the insulator, which is the most sensitive part of the device, and the SiC/ $\text{SiO}_2$  interface have to be improved.

There are different approaches to increase the mobility and oxide reliability of MOSFETs on silicon carbide. On one side the oxidation temperature and conditions are the main variables of the oxidation process and have a major influence on the electrical properties. On the other side, instead of growing the oxide directly from SiC, it is possible to deposit the oxide, this way naturally omitting problems with possible carbon segregation. Furthermore there is the possibility to fabricate a kind of hybrid: to deposit an oxide followed by a post oxidation step.

This thesis investigates the advantages and disadvantages of the above mentioned methods with respect to the electrical properties, such as breakdown field, flatband voltage and density of interface states, and with respect to reliability aspects.

At first the oxidation mechanism is studied. The oxidation rate on the carbon face is much higher than on the silicon face and is comparable to the oxidation rate of silicon. It was shown, that the process time can be reduced about 90% from 66 hours to 1,5h to get 80nm silicon dioxide by increasing the oxidation temperature for dry oxidation from 1100°C to 1280°C. However, an oxidation in NO or  $\text{N}_2\text{O}$  atmosphere increases the oxidation time because  $\text{Si}\equiv\text{N}$  bonds are created at the interface and these bonds have to be disconnected again in order for the oxidation to proceed. An oxidation in NO or  $\text{N}_2\text{O}$  atmosphere is thought to be advantageous for the quality of the interface SiC/ $\text{SiO}_2$  because of the  $\text{Si}\equiv\text{N}$  bonds.

The different oxides show a different electrical behaviour. To investigate the electrical quality C-V measurements on MOS capacitors were performed and the density of inter-

face states was calculated. It was shown that the increase of the oxidation temperature from 1100°C to 1280°C and the use of N<sub>2</sub>O the density of interface states was decreased by almost an order of magnitude from 5·10<sup>12</sup>eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup> to 7·10<sup>11</sup>eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>. Contemporaneously the oxide reliability improved. For example the intrinsic charge to breakdown ( $Q_{BD}$ ), a measure for the ability of the oxide to withstand voltage or current stress, increased from 6·10<sup>-3</sup>Ccm<sup>-2</sup> up to 57,4Ccm<sup>-2</sup>. Further improvements have been achieved by the use of thermally treated, deposited PECVD-oxides. We used NO for this post oxidation step and to our knowledge NO was used for the first time in this oxidation step. This method resulted in a density of interface states below 1·10<sup>11</sup>eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>, which is comparable to typical interface state densities in silicon MOSFETs.

On the carbon face the oxidation with N<sub>2</sub>O similarly increases the electrical properties significantly. In this work the reliability of oxides on the C-face was investigated for the first time and intrinsic  $Q_{BD}$ -values of 100Ccm<sup>-2</sup> and more were achieved.

On the silicon face, MOSFETs with PECVD oxide treated in NO were fabricated and investigated. The mobility was four times higher (24cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> for the PECVD oxide) than for oxides fabricated with N<sub>2</sub>O (6cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>). Thus the channel resistance of a high power MOSFET in VDMOS design was reduced from over 50% down to 25% of the total device resistance.

A model was established to explain the effects of different oxidations conditions on the electrical properties of the semiconductor and the quality of the oxide. An outlook with important areas of future research to enhance the performance and the stability of SiC high power devices is also included.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Kristallstrukturen von Siliciumcarbid . . . . .	5
2.2	Oxidationsverhalten von Siliciumcarbid . . . . .	7
2.3	Theoretische Beschreibung von MOS-Strukturen . . . . .	10
2.3.1	Ideale MOS-Kapazität . . . . .	11
2.3.2	Reale MOS-Kapazität . . . . .	15
2.4	Theoretische Grundlagen des MOSFETs . . . . .	16
2.5	Leitungsmechanismen in Siliciumdioxid . . . . .	19
2.5.1	Beschreibung des Stromflusses . . . . .	19
2.5.2	Schädigung des Oxides durch elektrische Belastung . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Experimentelle Vorgehensweise</b>	<b>25</b>
3.1	Probenherstellung . . . . .	25
3.1.1	Ausgangsmaterial und Reinigung . . . . .	25
3.1.2	Thermische Oxidation . . . . .	26
3.1.3	Gateoxidabscheidung . . . . .	27
3.1.4	Gateabscheidung und -dotierung . . . . .	27
3.1.5	Photolithographie und nasschemische Strukturierung . . . . .	28
3.2	Schichtdickenbestimmung . . . . .	28
3.3	Elektrische Messung . . . . .	29
3.3.1	Messungen an MOS-Kapazitäten . . . . .	29
3.3.1.1	Strom-Spannungs-Messung . . . . .	29
3.3.1.2	Admittanz-Spannungs- und quasistatische C-U-Messung . . . . .	30
3.3.1.3	Zuverlässigkeitsmessungen . . . . .	33
3.3.2	Messungen an MOSFETs . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>39</b>
4.1	Oxidationsverhalten auf der Si- und C-Seite . . . . .	39
4.1.1	Trocken- und Feuchtoxidation . . . . .	40
4.1.2	Oxidation in Lachgas . . . . .	43
4.2	Elektrische Eigenschaften . . . . .	46
4.2.1	Einfluss der Oxidationstemperatur . . . . .	46
4.2.2	Einfluss der Oxidationsatmosphäre . . . . .	52
4.2.3	Varianten der Lachgas-Oxidation . . . . .	57
4.2.4	Thermische Oxide auf der C-Seite . . . . .	63
4.2.5	Abgeschiedene Oxide . . . . .	69

---

4.3	Langzeitstabilität der hergestellten Gateoxide . . . . .	76
4.3.1	Messungen auf der Siliciumseite . . . . .	76
4.3.1.1	Vergleich der unterschiedlichen Oxidationstemperaturen . . . . .	76
4.3.1.2	Vergleich der verschiedenen Oxidationsatmosphären . . . . .	79
4.3.1.3	Vergleich der verschiedenen Oxidationsvarianten in stick- oxidhaltiger Atmosphäre . . . . .	81
4.3.1.4	Vergleich der abgeschiedenen Oxide . . . . .	83
4.3.2	Messungen auf der Kohlenstoffseite . . . . .	86
4.4	Zwischenfazit . . . . .	88
4.5	Transistorcharakterisierung . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Wertung</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>99</b>