

Die 4H-SiC/SiO₂-Grenzfläche in SiC-basierten Power-MOSFETs

Der Artikel gibt einen aktuellen Einblick in den Stand der weltweiten Forschung an dem Verständnis der Eigenschaften der 4H-SiC/SiO₂-Grenzfläche, dem zentralen Element von SiC-basierten MOSFETs.

GREGOR POBEGEN, HANS-JOACHIM SCHULZE *

Der Inhalt dieses vorliegenden Artikels basiert auf einer Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen, die von einer Reihe von Personen durchgeführt wurden. Die Ausrichtung der wissenschaftlichen Untersuchungen wurde durch das KAI Kompetenzzentrum für Automobil- und Industrielektronik, ein Tochterunternehmen von Infineon Technologies Austria, koordiniert.

Eigenschaft und Anwendung SiC-basierter Power-MOSFETs

Siliziumkarbid-basierte Power-MOSFETs ermöglichen infolge des im Vergleich zu Silizium-basierten Bauelementen deutlich größeren Bandabstands eine um etwa eine Größenordnung erhöhte kritische maximale Feldstärke, wodurch für eine bestimmte angestrebte Sperrfähigkeit der Bauelemente eine deutlich verringerte vertikale Ausdehnung der Drift-Zone ermöglicht wird. Aus diesem Grund erfordern SiC-MOSFETs nur etwa 10% der Drift-Zonendicke von Silizium-MOSFETs, um eine bestimmte Sperrfähigkeit zu ermöglichen. Dies wiederum bedingt eine erhebliche Reduzierung der Durchlassverluste dieser Power-MOSFETs und eine gesteigerte Strombelastbarkeit. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus den relativ geringen Kapazitäten dieser Bauelemente, die relativ hohe Schaltfrequenzen ermöglichen. Auch die höhere Wärmeleitfähigkeit und die größere spezifische Wärmekapazität von SiC tragen zu einem besseren Wärmemanagement bei. Im Vergleich zu Si-basierten Insulated Gate

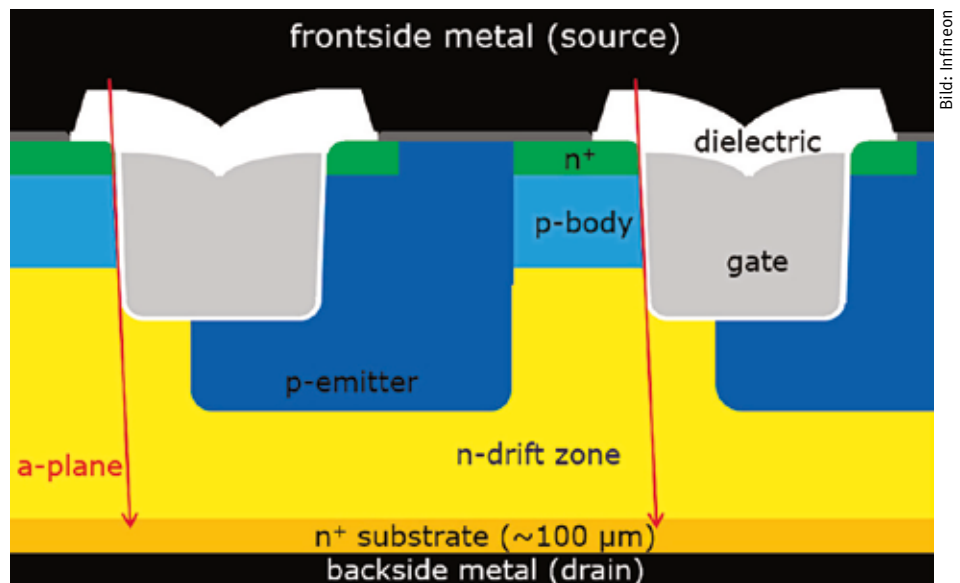


Bild 1: Schnitt durch die Transistorzelle des CoolSiC-MOSFET.

Bipolar Transistors (IGBTs) sind die Schaltverluste infolge des unipolaren Stromflusses der SiC-MOSFETs signifikant geringer; daher sind MOSFETs für hochfrequente Anwendungen zu bevorzugen.

Diese speziellen Eigenschaften der SiC-MOSFETs ermöglichen in vielen Applikationen dieser Bauelemente relevante Vorteile. Insbesondere für die Verwendung in Schaltnetzteilen sind SiC-basierte MOSFETs eine sinnvolle Wahl. Für Traktionsanwendungen und zum Einsatz in der Automobilelektronik, und hierbei insbesondere für die Elektromobilität, wirken sich vor allem das geringere Gewicht passiver Komponenten und die relativ geringe Größe der SiC-basierten Komponenten vorteilhaft auf das Gesamtsystem aus. Auch in der Medizintechnik oder für Solarwechselrichter können SiC-MOSFETs infolge deren spezieller Eigenschaften vorteilhaft eingesetzt werden.

Im Vergleich zu Siliziumleistungshalbleitern ist bei SiC-MOSFETs jedoch zu berücksichtigen, dass hier eine andere Defektkine-

tik und insbesondere auch niedrigere Kanalbeweglichkeiten vorliegen, die spezielle Maßnahmen erfordern, um den Einfluss dieser Effekte zu minimieren. Hierbei spielt insbesondere die Grenzfläche zwischen dem SiC-Halbleiter und dem Gateoxid eine entscheidende Rolle.

Die 4H-SiC/SiO₂-Grenzfläche ist Kern des CoolSiC-MOSFET

Das wichtigste Element eines jeden Metalloxid-Halbleiter Feldeffekttransistors (MOSFET) ist die stromführende Grenzfläche zwischen dem Halbleiter und dem Dielektrikum. 2017 wurde der auf Siliziumkarbid basierte CoolSiC-MOSFET von Infineon Technologies auf der PCIM vorgestellt. Auch für diesen CoolSiC-MOSFET ist die Qualität dieser Grenzfläche von enormer Wichtigkeit, da sie einen erheblichen Einfluss auf den Durchlasswiderstand und damit auf die Verlustleistung des fertigen Transistors hat.

Infineon nutzt für die Herstellung des Leistungstransistors den 4H-Kristallpolytyp von



* Dr. Gregor Pobegen
... ist Staff Engineer bei KAI Kompetenzzentrum für Automobil- und Industrielektronik in Villach, Österreich.



* Dr. Hans-Joachim Schulze
... ist Senior Principal bei Infineon, München.

Siliziumkarbid. 4H-SiC besitzt eine hexagonale Gitterstruktur, bei der sich die Kristallstruktur nach jeweils vier Kristall-Lagen immer wiederholt. Kommerziell erhältliche Scheiben für die Herstellung elektronischer Bauelemente werden heute gewöhnlich auf der Silizium-Seite poliert angeboten. In diesen kann das so genannte a-face des SiC-Kristalls durch Ätzung von weniger als einem Mikrometer tiefen Gräben (trench) freigelegt werden. Der Stromfluss des Transistors passiert damit vertikal von der Ober- zur Unterseite des SiC-Kristalls. Die a-face-Kristalloberfläche hat herausragende Eigenschaften gegenüber anderen Kristallflächen von 4H-SiC, sprich höhere Beweglichkeiten der Elektronen im MOSFET-Kanal und damit niedrigere Durchlasswiderstände des fertigen Transistors. Bild 1 zeigt den Aufbau des CoolSiC-MOSFET.

Die wichtigste Kennlinie für die Charakterisierung eines MOSFETs ist die so genannte Transferkennlinie, bei der die Abhängigkeit des Ausgangsstroms des Transistors (Drain-Strom) gegenüber der Steuergröße des MOSFET (Gate-Spannung) aufgetragen wird. Bild

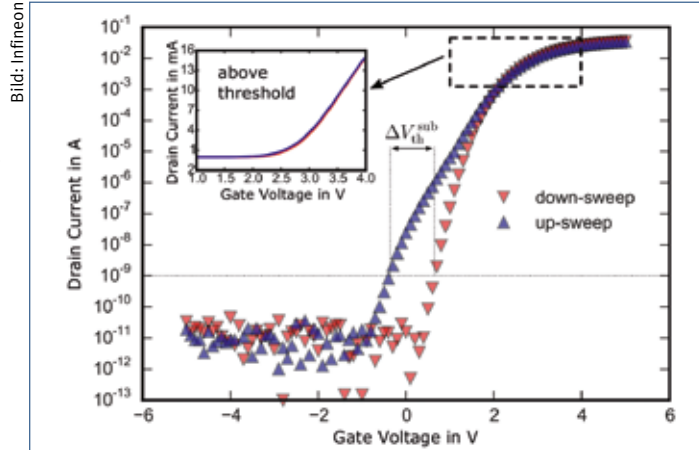


Bild 2: Beispiel für eine Transferkennlinie eines CoolSiC-MOSFET mit linearer und logarithmischer y-Achse.

2 zeigt ein Beispiel für eine solche Transferkennlinie mit der Einsatzspannung V_{TH} (englisch threshold voltage).

Trägt man auf der Y-Achse den Drain-Strom nicht linear, sondern logarithmisch auf, sieht man mehr Details unterhalb der Einsatzspannung, im Sub-threshold-Bereich. Auffallend ist hier, dass nur dann, wenn man die Aufnahme der Kennlinie bei negativen Gate-

Spannungen beginnt und in Richtung positiver Gate-Spannungen fortsetzt, die Kennlinie unterhalb der V_{TH} verändert ist. Man spricht bei diesem Effekt von einer Subthreshold-sweep-Hysteresis. Auf den ersten Blick ist dieser Effekt ungewohnt, da er in Silizium-basierten Transistoren kaum sichtbar ist. Er ist ausgeprägter nur bei SiC-basierten Transistoren und hier besonders bei der

pcim
EUROPE

Internationale Fachmesse und Konferenz
für Leistungselektronik, Intelligente Antriebstechnik,
Erneuerbare Energie und Energiemanagement

Nürnberg, 05. – 07.05.2020

Spezialisiert auf
LEISTUNGSELEKTRONIK?

Jetzt Ausstellerunterlagen anfordern:
pcim.de/aussteller



mesago
Messe Frankfurt Group

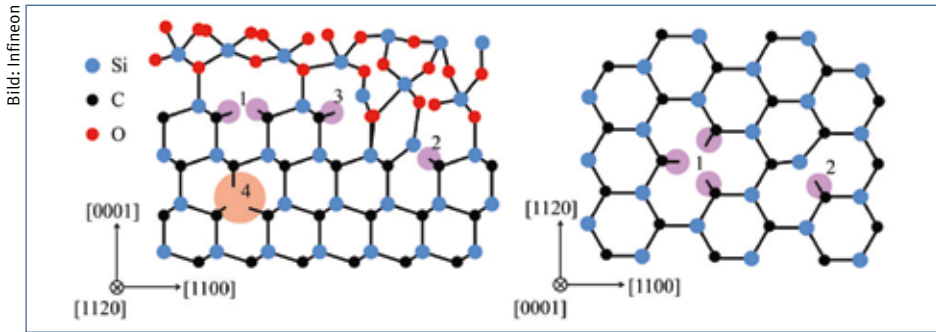


Bild 3: Schematische Darstellung des PbC-Punktdefekts an der 4H-SiC/SiO₂-Grenzfläche.

Trench-Technologie. Im nachfolgenden Abschnitt ist die physikalische Ursache für diesen Effekt und seine Eigenschaften beschrieben.

Physikalische Ursache der Subthreshold-sweep-Hysteresis

Wenn bei der Messung einer Transferkennlinie eine negative Gate-Spannung angelegt wird, bewegen sich Löcher aus dem p-dotierten Gebiet des SiC zur SiO₂-Grenzfläche. An dieser Grenzfläche befinden sich kristallographische Punktdefekte im SiC genauso wie im SiO₂, schon alleine aufgrund der unterschiedlichen Gitterabstände der beiden Kristalle. Nicht jedes Si- oder C-Atom kann einen Bindungspartner im SiO₂ finden, da einfach nicht genügend benachbarte Atome zur Verfügung stehen. Es entstehen ungepaarte Elektronen, dangling bonds genannt, welche elektrisch umgeladen werden können und damit die Elektrostatik des Transistors beeinflussen. Im speziellen Fall der Subthreshold-sweep-Hysteresis konnte zuerst nur bestimmt werden, dass es sich um Grenzflächenzustände handelt, die energetisch im Bereich der Mitte der Energie-Bandlücke von 4H-SiC liegen. Hier versteckt sich auch der

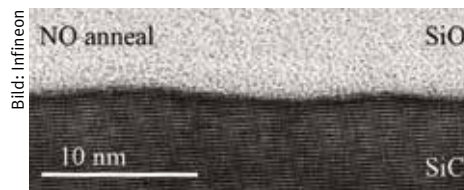


Bild 4: Hochauflösendes Transmissionselektronen-Mikroskopbild der 4H-SiC/SiO₂-Grenzfläche des CoolSiC-MOSFET. Im SiC ist die regelmäßige Anordnung der Si- und C-Atome zu sehen. Das SiO₂ ist amorph und daher unregelmäßig angeordnet. Aufgrund der Verkipfung des Substrats um 4 Grad gegenüber der Oberfläche entstehen kleine Stufen (step bunching).

Grund, warum dieser Effekt bei Trench-SiC-MOSFETs verstärkt auftritt: die dabei benutzte a-face des 4H-SiC-Kristalls hat eine höhere Grenzflächenzustandsdichte nahe der Mitte der Bandlücke als die Si-face, die bei konventionellen, lateralen SiC-MOSFETs verwendet wird. Auch bei lateralen SiC-MOSFETs gibt es also die Subthreshold-sweep-Hysteresis, sie ist aber kleiner als bei Trench-SiC-MOSFETs.

Um diesen Effekt bis ins letzte Detail zu verstehen, wurden die SiC-MOSFETs mit

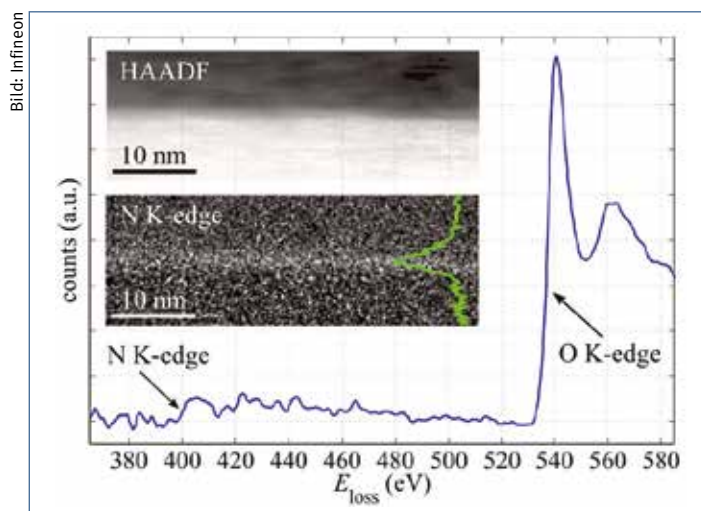
Elektronenspinresonanz-Spektroskopie untersucht. Dabei nutzt man aus, dass sich die Energieniveaus von ungepaarten Elektronen in einem Magnetfeld aufspalten; aus einem Energieniveau werden dadurch zwei (Zeeman-Effekt). Bringt man durch Bestrahlung des MOSFETs mit einer elektromagnetischen Welle definierter Frequenz genau diese Energiedifferenz auf, kommt es zur Resonanz. Da das lokale Magnetfeld des ungepaarten Elektrons auch von den Nachbaratomen beeinflusst wird, kann man Rückschlüsse auf die lokale Umgebung des Elektrons ziehen. Im konkreten Fall des SiC-MOSFETs zeigte sich, dass das Elektron an einem Kohlenstoffatom nahe der SiC/SiO₂-Grenzfläche sitzt. Diesem Kristalldefekt wurde der Name PbC center gegeben. Das Bild 3 zeigt eine schematische Darstellung dieses Kristalldefekts.

Wie wird man nun Herr über diesen physikalischen Effekt, der eine sehr natürliche Ursache hat, nämlich die unveränderbaren Kristallstrukturen von 4H-SiC und SiO₂? Die Lösung besteht darin, die ungesättigten Bindungen an der Grenzfläche mit einem anderen Atom zu passivieren, sodass sich wieder reguläre Bindungen aus einem Elektronenpaar bilden, die nicht elektrisch umgeladen werden können. Bei SiC funktioniert diese Passivierung mit Stickstoff (N). Dabei muss sich aber der Stickstoff möglichst nur an der SiC/SiO₂-Grenzfläche einbauen. Denn im SiO₂ würde der Stickstoff wiederum einen Kristalldefekt bilden, der negative Auswirkungen auf die Stabilität des Transistors haben kann. Im SiC fungiert Stickstoff außerdem als n-Dotierung und muss deshalb auch in der Konzentration kontrolliert werden. Bei SiO₂ auf SiC geschieht die gezielte Einbringung von Stickstoff an der Grenzfläche durch einen Hochtemperaturschritt in Stickstoffmonoxid (NO). Dass Stickstoff in diesem Fall auch wirklich an der Grenzfläche haftet und nicht anderswo, konnte mit der Transmissionselektronen-Mikroskopie gezeigt werden, wie in den Bildern 4 und 5 dargestellt.

Zusammenfassend zeigen SiC-basierte Leistungstransistoren spezielle Effekte, die auf den ersten Blick ungewohnt erscheinen. Durch gezielte Forschung konnte aber belegt werden, dass sie natürliche Ursachen haben und durch die richtigen Maßnahmen kontrollierbar sind. Das Verständnis bis auf die Ebene von Elektronen, Atomen und Kristalldefekten schafft Vertrauen und Sicherheit bezüglich der Anwendbarkeit von SiC-basierten Leistungstransistoren in kritischen Bereichen wie Energieversorgung und Energieumwandlung.

// KU

Bild 5: Elektronenenergieverlust des Stickstoffs an der Grenzfläche.



KAI Kompetenzzentrum/Infineon