

SILIZIUMKARBID - HALBLEITERSCHALTER

I. Koch, F. Hinrichsen

1 EINLEITUNG

Die wachsende Nachfrage nach leistungselektronischen Systemen bringt neue Anforderungen an die elektrischen Bauteile mit sich. Gerade leistungselektronische Anwendungen im Automotive-Bereich stellen höchste Ansprüche an die hierfür benötigten Halbleiter. Diese sollen hohe Wirkungsgrade durch geringe dynamische und statische Verluste aufweisen und höhere Betriebstemperaturen gegenüber konventionellen Silizium-(Si)-Halbleitern ermöglichen. Des Weiteren sollen die Baugruppen in solchen Anwendungsbereichen ein geringes Gewicht haben und ein kleines Bauvolumen in Anspruch nehmen, wobei die resultierenden Systemkosten möglichst gering gehalten werden müssen. Herausragende Eigenschaften des Halbleitermaterials Siliziumkarbid (SiC) ermöglichen hierfür attraktive Leistungshalbleiterbauelemente auf Basis der etablierten und fortgeschrittenen Si-Technologie [1]. Nachdem SiC-Schottkydioden bereits als kommerzielles Serienprodukt verfügbar waren, folgten vielfältige Lösungsansätze für SiC-Leistungsschalter [2]. Hierbei hat sich der Vertical Junction Field Effect Transistor (VJFET) als eine marktreife SiC-Halbleiterstruktur herauskristallisiert [1]. Im vorliegenden Beitrag werden die Material- und die daraus resultierenden Bauteileigenschaften von SiC mit anderen Halbleitermaterialien verglichen und ein Versuchsumrichter mit SiC-VJFETs vorgestellt.

2 MATERIALEIGENSCHAFTEN VON SiC IM VERGLEICH ZU Si

SiC zählt zu den Wide-Band-Gap-Halbleitermaterialien und kann in verschiedenen Polytypen hergestellt werden [3]. In der so genannten 4H-SiC Konfiguration gilt es als das aussichtsreichste aller Materialien für Leistungshalbleiter [4]. Das rührt hauptsächlich daher, dass Herstellungsprozesse aus der bekannten Si-Technologie übernommen werden können, und dass SiC ein thermisches Oxid bildet, wodurch die MOS-Technologie übertragbar wird [1]. **Tabelle 1** zeigt die elektrischen Eigenschaften der Wide-Band-Gap-Materialien im Vergleich. Im Balkendiagramm (**Bild 1**) sind die wichtigsten elektrischen Eigenschaften von SiC im Vergleich zum herkömmlichen Halbleitermaterial Si dargestellt.

Der größere Bandabstand von SiC ermöglicht gegenüber konventionellen Halbleitern deutlich höhere Betriebstemperaturen [5], wobei die Verlustwärme durch eine bessere Wärmeleitfähigkeit und die größere Temperaturdifferenz besser abgeführt werden kann. Außerdem lässt der größere Bandabstand wesentlich höhere Sperrspannungen zu. Diese höhere Sperrfähigkeit kann aber auch für eine dünnere Halbleitersperrschicht im Bauteil genutzt werden, wodurch die etwas schlechtere Elektronendriftgeschwindigkeit kompensiert wird.

Außerdem ermöglichen die dünneren Halbleiterschichten geringere Durchlasswiderstände, die wiederum die statischen Verluste reduzieren [6].

Tabelle 1: Wide-Band-Gap-Materialien im Vergleich [3]

Eigenschaften	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	Diamant
Bandabstand E_g [eV]	1,12	1,43	2,4	3	3,2	3,4	5,5
Gitterkonstante \AA	$a=5,43$	$a=5,65$	$a=4,36$	$a=3,08$ $c=15,12$	$a=3,08$ $c=10,08$	$a=3,189$ $c=5,185$	$a=3,567$
Durchbruchfeldst. E_c [MV/cm]	0,25	0,3	2	2,5	2,2	3	5
Sättigungsgeschw. v_{Sat} [10^7 cm/s]	1	1	2,5	2	2	2,5	2,7
Elektronenbew. μ_n [cm^2/Vs]	1300	8500	1000	415 _{senk.,c} 87 _{par.,c}	947 _{senk.,c} 1141 _{par.,c}	400	2200
Löcherbew. μ_p [cm^2/Vs]	480	400	40	80	120	30	1600
Dielektrische Konstante ϵ_r	11,9	13	9,7	10	10	9,5	5
Wärmeleitfähigkeit λ [W/cmK]	1,5	0,5	3,5 - 5,0	3,5 - 5,0	3,5 - 5,0	1,3	20
Th. Ausdehnungskoeff. [$10^{-6}/\text{K}$]	2,6	5,73	3	4,5	k.A.	5,6	0,8
Dichte [g/cm^3]	2,3	5,3	3,2	3,2	3,2	6,1	3,5
Schmelzpunkt [$^\circ\text{C}$]	1420	1240	2830	2830	2830	2500	4000
Direkt/Indirekt	I	D	I	I	I	D	I

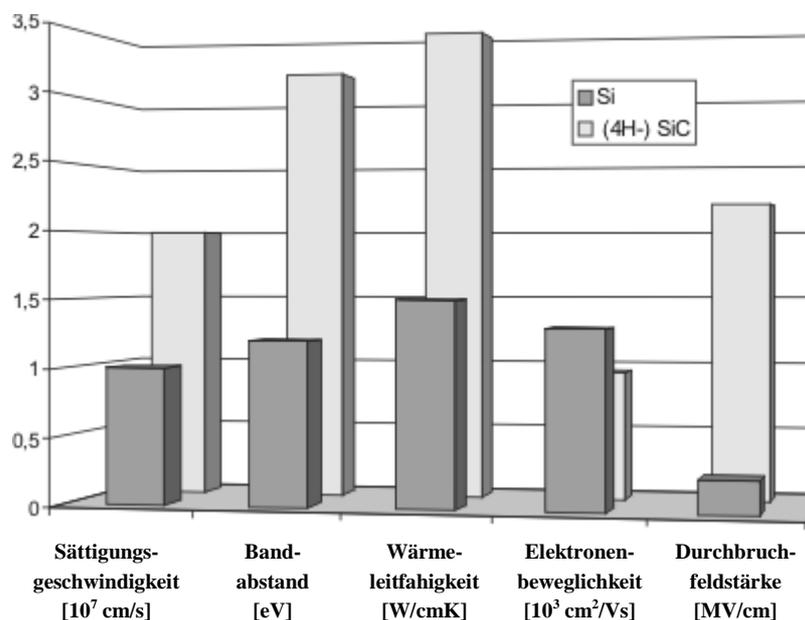


Bild 1: SiC- und Si-Materialeigenschaften im Vergleich [6]

Bipolare SiC-Bauteile besitzen exzellente Dioden-Rückwärtserholeigenschaften (**Bild 2**). Das günstigere Schaltverhalten bringt geringere dynamische Verluste mit sich, die gegenüber Si-Halbleitern nahezu temperatur- und alterungsunabhängig sind [6].

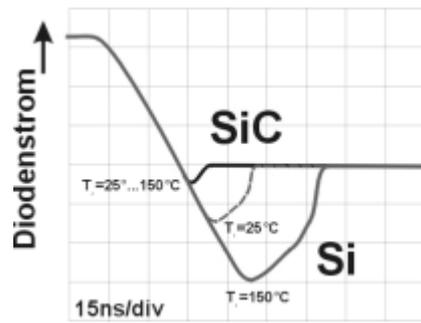


Bild 2: Diodenströme im Vergleich

3 DERZEITIGER STAND VON SiC-VJFETS

Der SiC-VJFET besitzt die im Vergleich zu anderen SiC-Lösungen aussichtsreichste Struktur für Leistungsschalter. Derzeit können Bauteile mit Stromtragfähigkeiten bis zu 100 A und aufgrund einer unproblematischen Reihenschaltung der Chips Sperrspannungen bis über 10 kV erreicht werden. Nachteile bei diesen Bauteilen sind allerdings die hohen Basismaterialkosten, die auch langfristig über denen von Si liegen werden [1]. Die momentan auf 200 °C begrenzten Betriebstemperaturen werden durch die Packaging-Technologie bestimmt, deren Fortschritt schlecht abschätzbar ist. Nach [1] resultieren aus den dynamischen Qualitäten der SiC-VJFETs Leistungshalbleiter, die sehr hohe Taktfrequenzen und kleine Geräte-Baugrößen ermöglichen. Das strukturbedingte normally-on-Verhalten kann durch einen Si-Low-Voltage-MOSFET mit dem VJFET in Kaskodenschaltung [5] an konventionelle Treiberstufen angepasst werden. Trotz der Kaskodierung bleibt die maximale Bauteil-Betriebstemperatur in etwa gleich und aufgrund der relativ kleinen Freilaufdiode verschlechtern sich die dynamischen Eigenschaften nicht. Alternativ kann der VJFET aber auch in anderen Topologien eingesetzt werden, bei denen das normally-on-Verhalten dem Anforderungsprofil entspricht.

Nach [1] sind die in Zukunft erreichbaren Fortschritte der Si-Technologie schwer zu beziffern, jedoch sind in Hinblick auf den Temperaturbereich bei Si physikalische Grenzen gesetzt, wobei im oberen Bereich der Einfluss der Temperatur auf das Schaltverhalten berücksichtigt werden muss. Auch für den SiC-JFET sind die mittelfristig möglichen Fortschritte kaum abschätzbar, doch ist aufgrund der hohen physikalischen Temperaturgrenze von ca. 600 °C für SiC [5] und der guten Materialeigenschaften mit weiter verbesserten Leistungsschaltern zu rechnen.

4 AUFBAU EINES SiC-MODELLUMRICHTERS

Um die Einsetzbarkeit im konventionellen Spannungszwischenkreisumrichter zu prüfen und erste Untersuchungen durchführen zu können, wurde ein kleines Versuchsmodell mit SiC-VJFET-Prototypen und Si-IGBTs aufgebaut. Hierbei dient ein Diodengleichrichter zur Speisung eines Spannungszwischenkreises, an dem lastseitig eine H-Brücke mit den

Versuchsmustern als Wechselrichter geschaltet ist. Die Ansteuerung der Schalter übernimmt eine externe Platine, die aus einem vorgegebenen Sinussignal pulswidenmodulierte Steuersignale generiert und so einen sinusförmigen Strom am Ausgang erzeugt. Die Last bildet ein einphasiger Spaltpolmotor. **Bild 3** zeigt das vereinfachte Schaltbild des Wechselrichters mit SiC- (T1, T2) und Si-Schaltern (T3, T4).

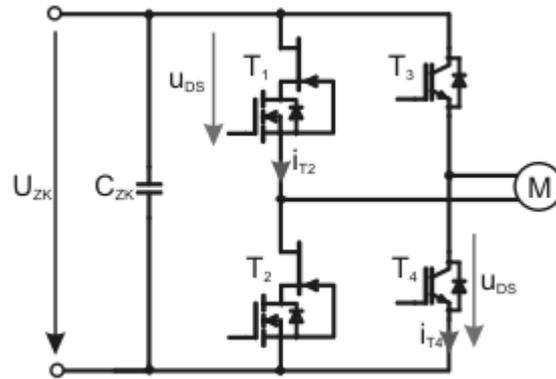


Bild 3: Wechselrichter mit SiC-Kaskode und Si-IGBTs

Durch den Einsatz von SiC-Schaltern mit der oben vorgestellten Kaskodenschaltung aus SiC-VJFET und Si-MOSFET erhält der Schalter das gewünschte normally-off Verhalten. Des Weiteren wird hierdurch die Steuerspannung des Bauteils an die bereits bestehenden Treiberstufen angepasst.

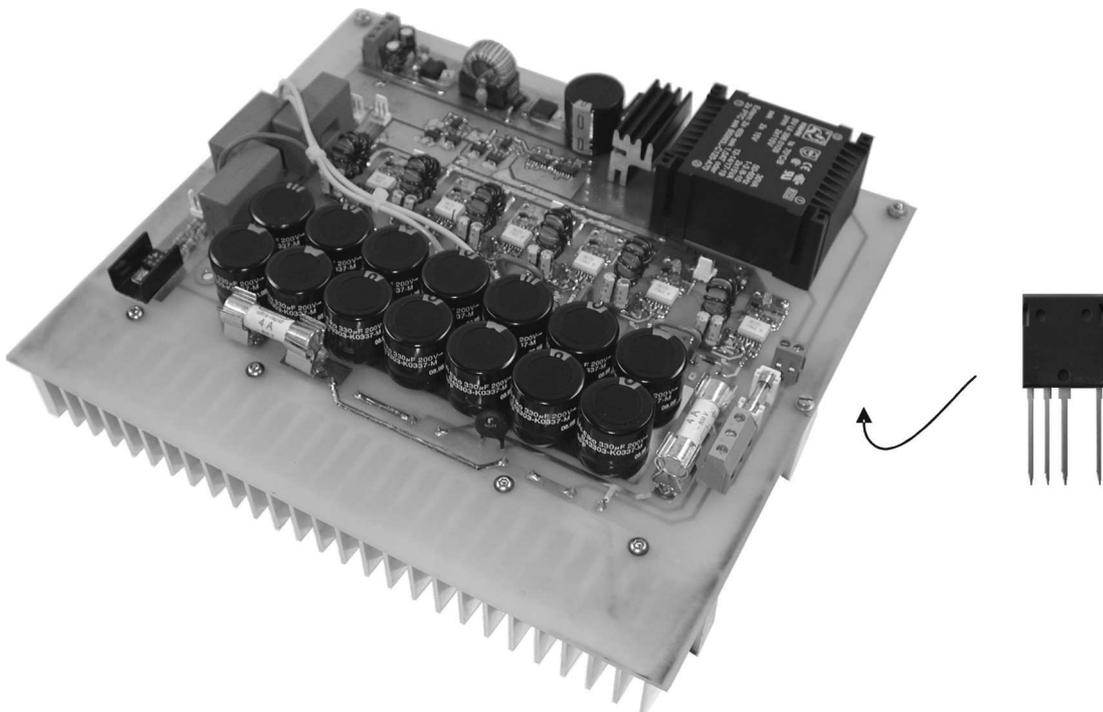


Bild 4: Versuchsaufbau mit SiC-VJFETs

Bild 4 zeigt den Aufbau des Umrichters. Die Kondensatoren im Vordergrund bilden den Zwischenkreis, dahinter liegen die Treiberstufen und die Versorgung derselben. Die Gleichrichterioden, die IGBTs und die SiC-VJFETs sind von unten an die Kühlkörper montiert. In dem Aufbau kommen SiC-Samples mit 600 V/2 A des Herstellers SiCED und Standard-IGBTs vom Typ BUP314 1200 V/42 A (Siemens) zum Einsatz. Die Gate-Widerstände beider Schaltertypen wurden so dimensioniert, dass die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit unter $1 \text{ kV}/\mu\text{s}$ bleibt. Damit wird zum einen sichergestellt, dass keine Spannungen auftreten, die die Motorisolation unzulässig belasten und zum anderen, dass gleiche Voraussetzungen für den Vergleich der charakteristischen Kurvenverläufe von beiden Schaltertypen geschaffen sind.

Die Kurvenverläufe in **Bild 5** und **Bild 6** zeigen für beide Schaltertypen Spannung und Strom während des Einschaltens, wobei ein günstigeres Verhalten des JFETs erkennbar wird.

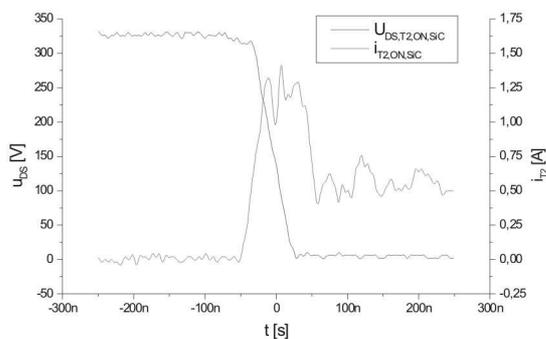


Bild 5: u-i-Kurvenverläufe des SiC-JFETs beim Einschalten

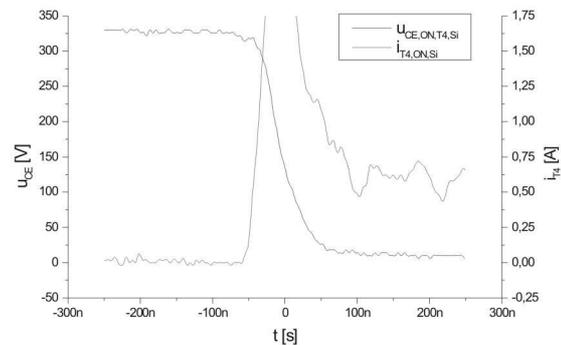


Bild 6: u-i-Kurvenverläufe des Si-IGBTs beim Einschalten

Der typische Stromüberschwinger beim Kommutieren des Stroms auf das eingeschaltete Bauteil ist auf die Rückwärtserholeigenschaften der Diode des jeweils anderen Schalters in der Halbbrücke zurückzuführen. Hierbei ist erkennbar, dass der SiC-JFET in Kaskode mit dem 50V-MOSFET einen niedrigeren Überschwinger aufweist als der Si-IGBT. Die sich aus den Verläufen ergebenden Einschaltverluste sind damit beim SiC-Schalter geringer als beim hier eingesetzten Si-Pendant.

Da aber die Stromtragfähigkeit des verwendeten IGBTs und somit auch die der zugehörigen Freilaufdiode höher ist als die der SiC-Kaskode, ist dieses Verhalten nur tendenziell aussagekräftig. Jedoch konnte gezeigt werden, dass die vorgestellten SiC-Schalter mit konventionellen Treiberstufen verwendet werden können und daher der Einsatz in konventionellen Umrichtertopologien möglich ist. Damit besteht die Möglichkeit, besondere Systemanforderungen wie erhöhte Betriebstemperatur und hohe Taktfrequenzen mit SiC-Schaltern auch in konventionellen Topologien zu erfüllen.

Um eine breite Öffentlichkeit auf die Möglichkeit der neuen Technologie aufmerksam zu machen, wurde der in **Bild 7** abgebildete Aufbau Ende Oktober 2004 auf der Internationalen Zulieferbörse (IZB) in Wolfsburg vorgestellt.



Bild 7: SiC-Messeaufbau

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die herausragenden Materialeigenschaften von SiC als Basismaterial für Leistungshalbleiter machen den Einsatz solcher Bauteile prinzipiell in allen Anwendungsbereichen möglich. Da jedoch die hohen Kosten mittelfristig nicht nachhaltig senkbar [1] sind, müssen für einen gerechtfertigten Einsatz die Bauteileigenschaften im Gesamtsystem zu Kosten- oder Performancevorteilen führen. SiC-Bauteile scheinen prädestiniert zu sein für besondere Anforderungen wie hohe Sperrspannungen, hohe Taktfrequenzen oder hohe Betriebstemperaturen. Hierbei werden minimale Durchlass- und Schaltverluste und somit ein maximaler Wirkungsgrad prognostiziert. Dieses bringt neben einer möglichen Verringerung des Kühlaufwands noch nicht abschätzbare Einsparungen bei zusätzlichen Bauteilen, wie beispielsweise Snubber und Filter, mit sich. In ersten Untersuchungen wurde die Anwendbarkeit von SiC-Schaltern in konventionellen Topologien und deren Schaltverhalten im Vergleich zu Si-IGBTs tendenziell aufgezeigt.

LITERATUR

- [1] P. Friedrichs, H. Mitlehner, D. Peters, D. Stephani: Perspektiven von SiC Leistungsschaltern: Entwicklungsstand und zukünftige Trends, VDE-Tagung, 2004 Berlin
- [2] T. P. Chow: High Voltage SiC Devices for Power Electronic Applications-Future Prospects, EPE 2003, Toulouse
- [3] S.-M. Koo: Design and Process Issues of Junction- and Ferroelectric-Field Effect Transistors in Silicon Carbide, Ph. D. Thesis, Stockholm 2003
- [4] X. Gu, Q. Shui, C. W. Myles, M. A. Gunderson: Comparison of Si, GaAs, SiC and GaN FET-Type Switches for Pulsed Power Applications, IEEE 2003
- [5] R. Elpelt, P. Friedrichs, R. Schörner, K.-O. Dohnke, H. Mitlehner, D. Stephani: Serial connection of SiC VJFETs – features of a fast high voltage switch, EPE 2003 Toulouse
- [6] L. Frey, M. März: Neues Halbleitermaterial: Verkohltes Silizium, Fraunhofer IIS, <http://www.elektroniknet.de/topics/stromversorgung/fachthemen/artikel/02009.htm>, 09.08.04