

# SiC-BIFET - Ein bipolarer SiC-Feldeffekttransistor für das Mittelspannungsnetz

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

**Andreas Hürner**

aus Pegnitz

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Tag der mündlichen Prüfung: 10.7.2017

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr. Lothar Frey  
Gutachter: Prof. Dr. Thomas Mikolajick

Erlanger Berichte Mikroelektronik

Band 1/2017

**Andreas Hürner**

**SiC-BIFET**

Ein bipolarer SiC-Feldeffekttransistor für das Mittelspannungsnetz

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5456-9

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)



## Kurzzusammenfassung

Ein weiterer Ausbau erneuerbarer Energiequellen bedarf einer substantiellen Weiterentwicklung des Mittelspannungsnetzes. Hierzu ist unter anderem ein neuer technologischer Lösungsansatz zur Realisierung eines halbleiterbasierten Leistungsschalters erforderlich, der eine effiziente Steuerung des Energieflusses zwischen den Energiequellen und der Verteilerebene ermöglicht. Ein solcher Leistungsschalter sollte dabei vor allem über möglichst geringe Durchlassverluste sowie über eine hohe Sperr- und Kurzschlussfestigkeit verfügen. In den vergangenen Jahren konnte am Beispiel des bipolaren SiC-IGBTs bereits hinlänglich gezeigt werden, dass sich bei der Verwendung von SiC als Halbleitergrundmaterial Leistungsschalter mit den geforderten Durchlassverlusten und Sperrfestigkeiten realisieren lassen. Aufgrund des auf einem MIS-Kondensator basierenden Steuerungsprinzips des SiC-IGBTs, erscheint es jedoch fraglich, ob für diesen auch eine entsprechend hohe Kurzschlussfestigkeit erreicht werden kann. Unter diesem Aspekt stellt der SiC-BIFET, bei dem es sich ebenfalls um einen bipolaren SiC-Feldeffekttransistor handelt, dessen Steuerungsprinzip aber auf der Modulation der Raumladungszone eines pn-Überganges basiert, einen vielversprechenden Lösungsansatz zur Realisierung eines solchen Leistungsschalters dar.

Die tatsächliche Eignung des SiC-BIFETs wird entscheidend davon bestimmt, ob sich mit diesem bislang weitestgehend unerforschten Bauelementkonzept auch die entsprechenden Durchlassverluste in der geforderten Spannungsklasse von mindestens 10kV erzielen lassen. Um dies zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit 10kV-SiC-p-BIFETs mit p-dotiertem Kanal- und Driftgebiet und 10kV-SiC-n-BIFETs mit n-dotiertem Kanal- und Driftgebiet und einer nominellen Sperrfestigkeit von jeweils 10kV hergestellt und elektrisch charakterisiert. Auf Grundlage der gemessenen Durchlasseigenschaften konnte sowohl für den 10kV-SiC-n-, als auch für den 10kV-SiC-p-BIFET eine leichte Modulation des Driftgebietes nachgewiesen werden. Dies zeigt die prinzipielle Möglichkeit mit beiden Varianten dieses Bauelementkonzeptes eine für bipolare Leistungsbaulemente typische Modulation des Driftgebietes erreichen zu können. Allerdings zeigen diese Ergebnisse auch, dass für den SiC-n-BIFET in zukünftigen Entwicklungen ein deutlich größeres Entwicklungspotential als für den SiC-p-BIFET zu erwarten ist. Die Weiterentwicklung des SiC-BIFETs sollte sich daher explizit auf die Weiterentwicklung des SiC-n-BIFETs konzentrieren.

Durch den Vergleich der gemessenen Durchlasseigenschaften mit den Ergebnissen der numerischen Modellbildung ließ sich für diesen nachweisen, dass der Grad der Modulation durch eine Erhöhung der ambipolaren Lebensdauer im Driftgebiet deutlich gesteigert werden kann. In den vergangenen Jahren konnten durch die Entwicklung eines entsprechenden Verfahrens bereits erhebliche Fortschritte bei der Erhöhung der ambipolaren Lebensdauer erzielt werden. Bei einer Weiterentwicklung dieses Verfahrens ist daher zu erwarten, dass es in naher Zukunft möglich sein wird, das aus der Modulation des Driftgebietes resultierende Potential des bipolaren Bauelementkonzeptes bezüglich einer Minimierung der Durchlassverluste vollständig auszunutzen. Darüber hinaus ermöglicht die Auslegung des SiC-n-BIFETs als ein im Normalbetrieb leitfähiges Bauelement (normally-on), für das der Steuerungsbereich unabhängig von der Gate-Ansteuerung dimensioniert werden darf, eine weitere signifikante Reduzierung der Durchlassverluste.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen unterstreichen damit die vielversprechende Eignung des SiC-BiFETs für die Anwendung als Leistungsschalter im Mittelspannungsnetz. Der SiC-BiFET stellt den bislang einzigen technologisch bekannten Lösungsansatz zur Realisierung eines halbleiterbasierten Leistungsschalters für das Mittelspannungsnetz dar.

## Abstract

A further development of renewable energy sources requires a substantial improvement of the medium-voltage grid. Therefore, amongst other things a novel technological solution for realizing a solid-state power switch enabling an efficient control of the energy flow between the energy sources and the distribution level of the grid is necessary. Such a solid-state power switch has to be endowed with low conduction losses as well as a high blocking and short circuit capability. In recent years, using the example of the SiC-IGBT it could be demonstrated sufficiently that the required conduction losses and blocking capability can be realized by solid-state power switches based on the semiconductor material SiC. But, due to the control scheme of the SiC-IGBT which is formed by a MIS-capacitor, it seems to be doubtful that for the SiC-IGBT a sufficient short circuit capability can be achieved. In contrast to the SiC-IGBT, the control scheme of the SiC-BIFET is based upon the modulation of the space charge region of a pn-junction. Accordingly the SiC-BIFET which is a bipolar field-effect-transistor represents a very promising solution for realizing a solid-state power switch.

The applicability of the SiC-BIFET will be strongly determined by the success in achieving the required conduction losses for a rated blocking voltage of at least 10kV with this novel device concept. To analyze this, in this study 10kV-SiC-p-BIFETs with p-doped channel- and drift-layer as well as 10kV-SiC-n-BIFETs with n-doped channel- and drift-layer being endowed with a blocking voltage of 10kV were fabricated and characterized electrically. According to the results of the measured conduction properties, for both the 10kV-SiC-p- and the SiC-n-BIFET a modulation of the drift-layer could be demonstrated. These results underline that for both types of the SiC-BIFET conductivity modulation in the drift-layer being typical for bipolar power switches can be achieved. However, in addition these results show that in future developments the potential of development is higher for the SiC-n-BIFET than for the SiC-p-BIFET. Consequently, further developments of the SiC-BIFET should focus on the development of the SiC-n-BIFET.

Regarding the results of the numerical simulations, it was figured out that for the SiC-n-BIFET the conductivity modulation could be increased significantly by increasing the ambipolare lifetime in the drift-layer. In recent years, the ambipolare lifetime was increased considerable due to the development of a lifetime-enhancement process. Therefore, it is expected that in the near future the potential of the bipolar device concept resulting from the conductivity modulation of the drift-layer could be exploited completely and results in considerable reduced conduction losses. Besides this, the SiC-BIFET is a normally-on device which allows to design the control scheme independent on the gate unit. Hence, a further reduction of the conduction losses is possible with this device concept.

In conclusion, these investigations carried out in this study underline the applicability of the SiC-BIFET as solid-state power switch for the medium-voltage grid. By now the SiC-BIFET is the only technological solution for realizing a solid-state power switch for the medium-voltage grid.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen bipolarer SiC-Feldeffekttransistoren (SiC-BIFET)</b>	<b>9</b>
2.1. Elektrische Eigenschaften von SiC	10
2.1.1. Intrinsische Ladungsträgerkonzentration	10
2.1.2. Ladungsträgerkonzentration in dotierten SiC-Schichten	11
2.1.3. Ladungsträgerbeweglichkeit	13
2.1.4. Ambipolare Lebensdauer	15
2.1.5. Stoßionsiation	17
2.2. Aufbau und Funktionsprinzip des SiC-BIFETs	18
2.2.1. Steuerungsprinzip	24
2.2.2. Ambipolare Leitfähigkeit	27
2.2.3. Bipolare Stromverstärkung	31
2.2.4. Durchbruchspannung	33
2.3. Prozesstechnologie	35
2.3.1. Epitaxie	43
2.3.2. Implantation	45
2.3.3. Trockenätzen	46
2.3.4. Metallisierung	48
2.4. Elektrische Messverfahren	49
<b>3. Modellierung bipolarer SiC-Feldeffekttransistoren (BIFET)</b>	<b>53</b>
3.1. Maximale Sperrfestigkeit	56
3.1.1. Abschaltspannung	56
3.1.2. Randfeldbegrenzung	59
3.2. Einfluss der Lebensdauer auf die Durchlasseigenschaften	62
3.2.1. Injektionsfähigkeit des Quasi-Emitters	66
3.2.2. Flussspannung und differentieller Widerstand	71
3.2.3. Gate-Stromdichte	77
3.3. Sättigungsstrom und Kurzschlussfestigkeit	80
3.3.1. Einfluss der Kanaldotierung	83
3.3.2. Einfluss der bipolaren Stromverstärkung	87
3.3.3. Einfluss der Temperatur	92
<b>4. Ergebnisse und Diskussion zur elektrischen Charakterisierung bipolarer SiC-Feldeffekttransistoren (SiC-BIFET)</b>	<b>95</b>
4.1. Schicht- und Kontaktwiderstand	98
4.2. Elektrische Eigenschaften bipolarer SiC-Dioden	101
4.2.1. Einfluss der Implantation auf die Injektionsfähigkeit des Emitters	102
4.2.2. Differentieller Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur	106

---

4.3. Elektrische Eigenschaften von 3kV-SiC-p-BIFETs . . . . .	109
4.3.1. Flussspannung und differentieller Widerstand . . . . .	111
4.3.2. Steuerungsprinzip und sicherer Arbeitsbereich . . . . .	112
4.3.3. Sättigungsstrom und Kurzschlussfestigkeit . . . . .	117
4.3.4. Sperrfestigkeit . . . . .	119
4.4. Elektrische Eigenschaften von 10kV-SiC-p-BIFETs . . . . .	122
4.4.1. Flussspannung und differentieller Widerstand . . . . .	124
4.4.2. Gate-Strom in Abhängigkeit des Flussstromes . . . . .	130
4.5. Elektrische Eigenschaften von 10kV-SiC-n-BIFETs . . . . .	135
4.5.1. Strom-Spannungs-Beziehung der Gate-Emitter-Diode . . . . .	136
4.5.2. Einfluss parasitärer Leckströme zwischen Gate- und Kanalgebiet auf das Schaltverhalten . . . . .	145
4.5.3. Ableitung der ambipolaren Lebensdauer aus der Flussspannung und dem differentiellen Widerstand . . . . .	149
4.5.4. Einfluss der Temperatur auf die Flussspannung und den differentiellen Widerstand . . . . .	156
4.5.5. Gate-Strom in Abhängigkeit der Flussstromdichte und Temperatur . . . . .	160
<b>5. Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick</b>	<b>163</b>
<b>6. Literaturverzeichnis</b>	<b>169</b>
<b>A. Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>183</b>
<b>B. Wissenschaftliche Veröffentlichungen</b>	<b>187</b>