

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 419

Dipl.-Ing. Christian Bödeker,
Bremen

Extrinsische und intrinsische Beeinflussungen des Verhaltens von Siliziumkarbid- Leistungshalbleiter- bauelementen



Berichte des Instituts für elektrische
Antriebe, Leistungselektronik und
Bauelemente der Universität Bremen

Extrinsische und intrinsische Beeinflussungen des Verhaltens von Siliziumkarbid-Leistungshalbleiterbauelementen

Vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Bödeker

aus Bremen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Josef Lutz

Eingereicht am: 09.03.2018
Tag des Promotionskolloquiums: 18.09.2018

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Christian Bödeker,
Bremen

Nr. 419

Extrinsische und
intrinsische
Beeinflussungen des
Verhaltens von
Siliziumkarbid-
Leistungshalbleiter-
bauelementen



Berichte des Instituts für elektrische
Antriebe, Leistungselektronik und
Bauelemente der Universität Bremen

Bödeker, Christian

Extrinsische und intrinsische Beeinflussungen des Verhaltens von Siliziumkarbid-Leistungshalbleiterbauelementen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 419. Düsseldorf: VDI Verlag 2019.

184 Seiten, 179 Bilder, 18 Tabellen.

ISBN 978-3-18-341921-0, ISSN 0178-9481,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

Für die Dokumentation: Siliziumkarbid – parasitäre Elemente – Streuinduktivität – Messwiderstand – thermische Stabilität – statisches und dynamisches Verhalten – Halbleitergehäuse – Kelvin-Source-Anschluss – Kurzschlussverhalten – Überspannungsschutz

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Verhalten von Halbleitern aus Siliziumkarbid (SiC). Zunächst werden die Auswirkungen par. Elemente betrachtet. Es wird u.a. der planare M-Shunt untersucht. Die Charakterisierung der Halbleiter wird mit stat. und dyn. Messmethoden durchgeführt. Der Sperrbetrieb der Dioden wird im Hinblick auf therm. Stabilität untersucht und bei der dyn. Charakterisierung werden die Überspannung sowie die Ladung bestimmt. Bei den stat. Messungen der Transistoren wird das Verhalten hinsichtlich verschiedener Transistortypen sowie herstellerbedingter Unterschiede aufgezeigt. Die dyn. Vermessung der Transistoren umfasst eine Analyse des Einflusses der Ansteuerparameter, der Gehäuse, der Sperrschichttemperatur und unterschiedlicher Dioden auf das Schaltverhalten. Des Weiteren werden die Zerstörungsgrenzen von SiC-MOSFETs und die Anwendbarkeit von Überspannungsschutzbeschaltungen auf SiC-MOSFETs analysiert.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Dissertation Universität Bremen

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9481

ISBN 978-3-18-341921-0

Verlags-Innentitel (gestaltet vom Verlag)

Impressumseite (gestaltet vom Verlag)

Vorwort

Die Grundlage für die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen meiner Anstellung am Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB) der Universität Bremen im Zeitraum zwischen September 2010 und November 2017 gelegt. Die Tätigkeit am IALB hat mir die Gelegenheit gegeben, Forschungsergebnisse zu erzielen, welche in eine Vielzahl an Veröffentlichungen und darüber hinaus auch in diese Arbeit eingegangen sind. Hierbei hat die Arbeit unter anderem Unterstützung vom European Center for Power Electronics e. V. (ECPE) im Zusammenhang mit dem Projekt „Current Measurement with Low-inductive Planar Shunts“ erfahren, das im Rahmen des „ECPE Joint Research Programme“ gefördert wurde. Einige der Veröffentlichungen sind durch Kooperationen mit Industriepartnern beziehungsweise der Unterstützung von Firmen entstanden. Hierbei ist im Speziellen Dr. Jeffrey B. Cassidy, Edgar Ayerbe und Cam Pham von Wolfspeed, Dr. Ranbir Singh von GeneSiC, Dr. Martin Domeij von ON Semiconductor sowie der Firma Isabellenhütte Heusler ein Dank für die Versorgung mit Materialien und auch Informationen auszusprechen.

Bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Josef Lutz möchte ich mich für die Übernahme der Gutachten zu dieser Arbeit bedanken. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski, Herrn Prof. Dr. phil. nat. Dieter Silber und natürlich allen Kolleginnen und Kollegen beider Arbeitsgruppen des IALBs für die vielen hilfreichen und wertvollen Diskussionen. Insbesondere sind diesbezüglich Melanie Adelmund, Alexander Würfel, Michael Hanf, Matthias Joost und Jacek Borecki hervorzuheben. Ferner sei Dr.-Ing. Tobias Appel (ehemals Universität Rostock) für einige hilfreiche Hinweise gedankt.

Die zahlreichen betreuten studentischen Arbeitsvorhaben an der Universität Bremen haben selbstverständlich auch zur vorliegenden Arbeit beigetragen. Hierfür danke ich allen von mir betreuten Studentinnen und Studenten recht herzlich. Ebenfalls möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, die im Rahmen einer Anstellung als Hilfskraft beigetragen haben.

Ein weiterer großer Dank gilt Elke Krüger, Melanie Adelmund, Michael Hanf und Alexander Würfel für die Durchsicht der Rohfassung der Arbeit auf Fehler.

Zu guter Letzt möchte ich meinen Eltern ganz herzlich für die jahrelange Unterstützung während des Studiums und der anschließenden Zeit der Promotion danken.

Inhalt

Vorwort.....	III
Inhalt.....	V
Formelzeichen und Abkürzungen.....	VII
Kurzfassung.....	XIII
Abstract	XIV
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen der Siliziumkarbid-Bauelemente	3
2.1 Materialeigenschaften	3
2.2 Siliziumkarbid-Bauelemente	5
2.2.1 pin-Diode.....	5
2.2.2 Schottky-Diode	6
2.2.3 Bipolartransistor (BJT).....	8
2.2.4 Sperrschichtfeldeffekttransistor (JFET)	11
2.2.5 Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET)	14
2.3 Parasitäre Elemente.....	17
3 Messtechnik.....	21
3.1 Schaltversuche.....	21
3.1.1 Doppelpulsversuch.....	22
3.1.2 Kurzschlussversuch.....	24
3.1.3 Messplatzkonzept	25
3.1.4 Schaltverläufe und deren Auswertung.....	27
3.2 Strommessung über einen Widerstand	31
3.2.1 Koaxialer Messwiderstand (Koaxialshunt)	35
3.2.2 Hair-pin-Shunt	40
3.2.3 M-Shunt.....	43
3.2.4 PCB-M-Shunt	47
3.2.5 Messwiderstände im Überblick.....	48
3.3 Lastinduktivitäten für Messaufbauten	49
4 Sperr- und Schaltverhalten von Dioden	53
4.1 Thermische Stabilität von 0,6 kV bis 1,7 kV Dioden im Sperrbetrieb.....	53
4.1.1 Selbsterwärmung und thermisches Weglaufen	53
4.1.2 Leckströme	55
4.1.3 Ermittlung der Verdopplungstemperaturdifferenzen der Leckströme.....	61
4.1.4 Anwendung des Stabilitätskriteriums	67
4.1.5 Lawinendurchbruch in SiC im Vergleich mit Silizium und Galliumnitrid	69

4.2	Schaltverhalten von 1,2 kV Dioden	71
4.2.1	Einschaltverhalten	74
4.2.2	Ausschaltverhalten	77
5	Durchlass- und Schaltverhalten von Transistoren	82
5.1	1,2 kV BJT.....	83
5.1.1	Durchlassverhalten	83
5.1.2	Schaltverhalten.....	84
5.2	1,2 kV JFET	87
5.3	1,2 kV MOSFET	89
5.3.1	Durchlassverhalten	89
5.3.2	Schaltverhalten.....	94
5.4	3,3 kV MOSFET	114
5.4.1	Durchlassverhalten.....	115
5.4.2	Schaltverhalten.....	116
5.5	Zerstörungsgrenzen beim Kurzschluss	117
5.6	Überspannungsschutz	126
5.6.1	Active Clamping	128
5.6.2	Dynamic Voltage Rise Control	129
5.6.3	Dynamic Active Clamping	133
6	Zusammenfassung	138
7	Anhang	141
7.1	Darstellung des Messplatzes	141
7.2	Wichtige Komponenten zur Durchführung der Schaltversuche	142
7.3	Darstellung der Messplatinen für vergleichende Messungen	143
7.4	Technische Zeichnung des erstellten Simulationsmodells vom Koaxialshunt.....	144
7.5	SiC-BJT: Schaltgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von I_c und T_J	145
7.6	SiC-MOSFET: Schaltverläufe in Abhängigkeit von $C_{GS,ext}$	146
7.7	SiC-MOSFET: Schaltgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von $C_{GS,ext}$ und T_J	147
7.8	SiC-MOSFET: Simulationsmodell	148
8	Literaturverzeichnis	149
8.1	Fachliteratur	149
8.2	Datenblätter und Bedienungsanleitungen.....	160
8.3	Betreute studentische Arbeitsvorhaben	164

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen/ Abkürzung	Bedeutung
A	Chipdicke
A*	Richardson-Konstante
A _{aktiv}	Aktive Fläche des Chips
AC	Active Clamping
A _{Chip}	Gesamtfläche eines Chips
A _{Diode}	aktive Fläche der Diode
A _{Spule}	Fläche einer Spule
B	Stromverstärkung
b	Breite
BJT	Bipolar Junction Transistor, Bipolartransistor
BV	Breakdown Voltage, Durchbruchspannung
C	Kapazität
C _{DC}	Zwischenkreis Kapazität
C _{DS}	Drain-Source-Kapazität
C _{GD}	Gate-Drain-Kapazität, Miller-Kapazität
C _{GS}	Gate-Source-Kapazität
C _{GS,ext}	externe Gate-Source-Kapazität
C _{iss}	Eingangskapazität eines MOSFETs
C _J	Sperrschichtkapazität
C _{komp}	Kapazität des Kompensationsnetzwerks
C _{koppel}	Koppelkapazität
C _{L,par}	parasitäre Induktivität der Lastinduktivität
C _{oss}	Ausgangskapazität des MOSFETs
C _{ox}	Oxid-Kapazität
C _S	Speed-Up-Kondensator
C _{th}	spezifische Wärmekapazität
C _{th}	Wärmekapazität, thermische Kapazität
C _σ	parasitäre Kapazität
d	Dicke, Schichtdicke
d _{Chip}	Chipdicke
d _{Epitaxie}	Epitaxieschichtdicke
d _{Wafer}	Wafer-Dicke
D	Diode
DAC	Dynamic Active Clamping
D _F	Freilaufdiode
D _p	Diffusionskoeffizient von Löchern
D _{Spule}	Durchmesser einer Spule
DVRC	Dynamic Voltage Rise Control
E	elektrische Feldstärke

E	Energie, Schaltenergie
E_{aus}	Ausschaltenergie
E_{chip}	in einen Chip eingebrachte Energie
E_{ein}	Einschaltenergie
E_{epitaxie}	in die Epitaxieschicht eines Chips eingebrachte Energie
E_{ges}	Gesamtenergie
E_{krit}	kritische elektrische Feldstärke
ECPE	European Center for Power Electronics e. V.
f	Frequenz
f_{Mess}	Messfrequenz
f_{N}	Faktor für Spuleninduktivität
$f_{\text{res,Spule}}$	Resonanzfrequenz einer Spule, Resonanzfrequenz einer Lastinduktivität
f_{Signal}	Signalfrequenz
g_{fs}	Transkonduktanz
H	magnetische Feldstärke
h	Plancksches Wirkungsquantum
h_{FE}	Stromverstärkung
HP-Shunt	Hair-pin-Shunt
i	intrinsisches Halbleitergebiet
I, i	Strom
IALB	Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente
$I_{\text{B}}, \dot{I}_{\text{B}}$	Basisstrom
$I_{\text{C}}, \dot{I}_{\text{C}}$	Kollektorstrom
$I_{\text{CO}}, \dot{I}_{\text{CO}}$	Strom durch Kapazität
$I_{\text{D}}, \dot{I}_{\text{D}}$	Drain-Strom
$\dot{I}_{\text{D,Leck}}$	Drain-Source-Leckstrom
$I_{\text{DSC}}, \dot{I}_{\text{DSC}}$	Drain-Strom im Kurzschlussfall
$I_{\text{DSC,max}}, \dot{I}_{\text{DSC,max}}$	maximaler Drain-Strom im Kurzschlussfall
$I_{\text{E}}, \dot{I}_{\text{E}}$	Emitterstrom
$I_{\text{F}}, \dot{I}_{\text{F}}$	Strom durch Freilaufdiode
$I_{\text{G}}, \dot{I}_{\text{G}}$	Gate-Strom
$\dot{I}_{\text{G,Leck}}$	Gate-Leckstrom
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
I_{komp}	Strom durch ein Kompensationsnetzwerk
$I_{\text{L}}, \dot{I}_{\text{L}}$	Strom durch Lastinduktivität
I_{Nenn}	Nennstrom
I_{R}	Leckstrom
$\dot{I}_{\text{Referenz}}$	Strom eines Referenzshunts
\dot{I}_{RR}	Rückstrom
I_{RRM}	Rückstromspitze
$I_{\text{S}}, \dot{I}_{\text{S}}$	Source-Strom
$I_{\text{SC}}, \dot{I}_{\text{SC}}$	Kurzschlussstrom
\dot{I}_{shunt}	Shuntstrom

I_{Test}	Teststrom
J, j	Stromdichte
JFET	Junction Field Effekt Transistor, Sperrschichtfeldeffekttransistor
J_F, j_F	Stromdichte im Durchlassbetrieb einer Diode
$J_{\text{Generation}}$	Generationsleckstromdichte
J_R, j_R	Leckstromdichte
J_s	Diffusionsleckstromdichte
J_{TFE}	Leckstrom durch thermionische Feldemission
k_B	Boltzmann-Konstante
K_{XY}	Koppelfaktor der Induktivitäten L_x und L_y mit der Gegeninduktivität M_{xy}
l	Länge
L_{Kanal}	Kanallänge
l_{Spule}	Länge der Spule
L	Induktivität
L^a	äußere Induktivität zwischen zwei Leitern (koaxiale Anordnung)
L_B	Basis-Induktivität
L_C	Kollektor-Induktivität
L_D	Drain-Induktivität
L_E	Emitter-Induktivität
L_G	Gate-Induktivität
L_a	innere Induktivität eines äußeren Leiters (koaxiale Anordnung)
L_i	innere Induktivität eines Leiters (koaxiale Anordnung)
$L_{i,\text{hohl}}$	innere Induktivität eines inneren hohlen Leiters (koaxiale Anordnung)
$L_{i,\text{massiv}}$	innere Induktivität eines inneren massiven Leiters (koaxiale Anordnung)
L_{KS}	Kelvin-Source-Induktivität
L_L	Lastinduktivität, Lastspule
L_{Mess}	Induktivität des Messkreises
L_S	Source-Induktivität
L_{Shunt}	Induktivität eines Shunts, Streuinduktivität eines Shunts
$L_{\text{Shunt,ber}}$	berechnete Induktivität eines Shunts
$L_{\text{Shunt,ideal}}$	ideale Induktivität eines Shunts
$L_{\text{Shunt,sim}}$	simulierte Induktivität eines Shunts
L_σ	parasitäre Induktivität, Streuinduktivität
$L_{\sigma,\text{Diode}}$	Induktivität zwischen Dioden-Chip und Gehäuseanschlüssen
M	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
m	Masse
m	effektive Elektronenmasse
m_0	Elektronenmasse
m_{Chip}	Chipmasse
M_{Mess}	Gegeninduktivität des Messkreises
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
n	Anzahl der Messpunkte zur Filterung mittels gleitender Mittelwertbildung
n, n^-, n^+	n-dotiertes Halbleitergebiet

N_D	Dichte der Donatoren
n_i	intrinsische Ladungsträgerdichte
n_w	Windungszahl
p, \bar{p}, p^+	p-dotiertes Halbleitergebiet
PCB	Printed Circuit Board, Leiterplatte
P_R	Verlustleistung im Sperrbetrieb
P_{SC}	Verlustleistung während eines Kurzschlusses
P_{Shunt}	umgesetzte Verlustleistung in einem Shunt
P_V	Verlustleistung
q	Elementarladung
Q	Bipolartransistor
Q_C	Sperrschichtladung
Q_{RR}	Sperrverzögerungsladung
Q_{th}	Wärmemenge
r	Radius
R	Widerstand
$R_{Abschluss}$	Abschlusswiderstand
R_B	Basis-Widerstand
$R_{CE,on}$	Durchlasswiderstand eines BJTs
r_{on}	spezifischer Widerstand
$r_{CE,on}$	spezifischer Durchlasswiderstand eines BJTs
$r_{DS,on}$	spezifischer Durchlasswiderstand eines MOSFETs beziehungsweise eines JFETs
$R_{DS,on}$	Durchlasswiderstand eines MOSFETs beziehungsweise eines JFETs
R_G	Gate-Widerstand
$R_{G,ext}$	externer Gate-Widerstand
$R_{G,int}$	interner Gate-Widerstand
$R_{G,ges}$	Gesamt-Gate-Widerstand
R_{Koaax}	Widerstand eines Koaxialshunts
R_{komp}	Widerstand eines Kompensationsnetzwerks
$R_{Kontakt}$	Kontaktwiderstand, Übergangswiderstand
R_{min}	Mindestwiderstand im Ansteuerkreis
R_S	Widerstand im Speed-Up-Zweig einer Ansteuerschaltung
R_{shunt}	Widerstand eines Shunts
$R_{shunt,Ref}$	Widerstand eines Referenzshunts
$R_{th,JA}$	thermischer Widerstand zwischen Sperrschicht und Umgebung
SC	Short Circuit, Kurzschluss
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
s_{LShunt}	Standardabweichung von L_{Shunt}
T	Transistor
T	Temperatur
T_A	Umgebungstemperatur
$T_{A,0}$	Umgebungstemperatur

$T_{A,krit}$	kritische Umgebungstemperatur
T_j	Sperrschichttemperatur
$T_{j,ini}$	initiale Sperrschichttemperatur
TC	Temperaturkoeffizient
t	Zeit
t_{SC}	Kurzschlusszeit beziehungsweise -dauer
$t_{SC,krit}$	kritische Kurzschlusszeit beziehungsweise -dauer
$t_{\Delta E}$	Zeitdauer, in der Energie entnommen wird
U_{BE}, U_{BE}	Basis-Emitter-Spannung
U_{CB}, U_{CB}	Kollektor-Basis-Spannung
U_{CE}, U_{CE}	Kollektor-Emitter-Spannung
U_{DC}	Zwischenkreisspannung
U_{DS}, U_{DS}	Drain-Source-Spannung
$U_{DS,ein}$	Drain-Source-Spannung im Durchlassfall
U_{FRM}	Durchlassverzögerungsspannung
U_{GKS}	Gate-Kelvin-Source-Spannung
U_{GS}, U_{GS}	Gate-Source-Spannung
$U_{GS,Miller}$	Spannung des Miller-Plateaus
U_{komp}, U_{komp}	kompensiertes Spannungssignal
$U_{Kontakt}$	Kontaktspannung
$U_{korrigiert}$	korrigiertes Spannungssignal
U_L	induktiver Spannungsanteil im Messsignal
U_{Lo}, U_{Lo}	Überspannung an Induktivität
U_Q	Quellenspannung
$U_{Q,erhöht}$	erhöhte Quellenspannung
u_R	ohmscher Spannungsanteil im Messsignal
U_R	Sperrspannung
$U_{R,max}$	maximale Sperrspannung beziehungsweise Sperrfähigkeit
u_S	Spannung an der Induktivität L_S
U_{Shunt}	Spannung am Shunt, Messspannung am Shunt
U_{Signal}	Signalspannung
U_{th}	Schwellenspannung
$U_{Treiber}, U_{Treiber}$	Treiberspannung
$u_{\sigma,Diode}$	von $L_{\sigma,Diode}$ bedingte Spannung
V_{Chip}	Chipvolumen
v_{sat}	Sättigungsgeschwindigkeit
W	Weite
w	Driftgebietsweite
w_g	Bandlücke
w_{RLZ}	Weite der Raumladungszone, Weite der Sperrschicht
Z	Wellenwiderstand
α	Temperaturkoeffizient
α_{20}	Temperaturkoeffizient eines Widerstandsmaterials bei 20 °C

α_T	Transportfaktor
γ	Emitter-Effizienz
δ	Eindringtiefe
ΔE	Energiedifferenz, Energieentnahme
$\Delta E_{SC,krit}$	Differenz zweier kritischer Kurzschlussenergien
ΔR_{Shunt}	Widerstandsänderung
ΔT	Temperaturänderung
ΔT_d	Verdopplungstemperaturdifferenz
ΔT_J	Sperrschichttemperaturänderung
ΔU	Spannungsversatz
ΔU_{DC}	Abfall der Zwischenkreisspannung
ϵ	Dielektrizitätskonstante
ϵ_R	relative Permittivität
Θ	Durchflutung
λ	Wärmeleitfähigkeit
μ	Permeabilität
μ_0	Permeabilitätskonstante
μ_r	relative Permeabilität
μ_n	Elektronenbeweglichkeit
μ_n^*	Elektronenbeweglichkeit im Kanal
μ_p	Löcherbeweglichkeit
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand
ρ	Dichte eines Materials
ρ_{20}	spezifischer Widerstand eines Materials bei 20 °C
σ	Leitfähigkeit
τ_g	Generationsträgerlebensdauer
τ_p	Lebensdauer der Löcher
φ_B	Barrierenhöhe
ω	Kreisfrequenz

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den extrinsischen - somit von der Gehäuse- sowie Schaltungsumgebung bedingten - und den intrinsischen - also vom Chip herrührenden - Beeinflussungen des Verhaltens von Leistungshalbleiterbauelementen aus Siliziumkarbid (SiC). Zunächst werden deren strukturelle Eigenschaften und die Auswirkungen parasitärer Elemente allgemein betrachtet. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung der für die Charakterisierung verwendeten Messschaltungen sowie der durch notwendige Bestandteile der Schaltung eingebrachten parasitären Elemente. Es wird dabei unter anderem der planare M-Shunt, der mit dem Koaxialshunt verwandt ist, untersucht. Den Messergebnissen zufolge weist der M-Shunt - wie angestrebt - eine deutlich geringere Streuinduktivität auf als der häufig in Messschaltungen genutzte Koaxialshunt. Die Charakterisierung der SiC-Dioden und SiC-Transistoren wird mittels statischer und dynamischer Messmethoden, das heißt mit unterschiedlichen Kennlinienschreibern und einem Doppelpulsmessplatz, durchgeführt. Der Sperrbetrieb der Dioden wird im Hinblick auf die thermische Stabilität untersucht und die Leckströme werden in Abhängigkeit der Sperrschichttemperatur beschrieben. Ein wesentliches Ergebnis der Messungen ist, dass die thermische Stabilität der SiC-Dioden nur unter atypischen Umgebungsbedingungen hinterfragt werden muss beziehungsweise gefährdet ist. Demgegenüber werden bei der dynamischen Charakterisierung der Dioden die Einschaltüberspannung sowie die zu extrahierende Ladung beim Ausschalten bestimmt. Abschließend werden die ermittelten Kenngrößen jeweils mit den entsprechenden Werten von Silizium-Dioden verglichen. Bei den statischen Messungen der SiC-Transistoren wird das Durchlassverhalten hinsichtlich verschiedener Transistortypen sowie herstellerbedingter Unterschiede beim SiC-MOSFET aufgezeigt. Die dynamische Vermessung der Transistoren umfasst eine Analyse des Einflusses der Ansteuerparameter, der Gehäuse, der Sperrschichttemperatur und unterschiedlicher SiC-Freilaufdioden auf das Schaltverhalten beziehungsweise auf die Schaltenergien. Mit Hilfe der Messungen lässt sich unter anderem quantitativ zeigen, wie groß der Vorteil von mit Kelvin-Source-Anschluss ausgestatteten Gehäusen gegenüber klassischen Gehäusen wie dem TO-247-3L-Gehäuse ist. Allerdings wird anhand ergänzend durchgeführter Simulationen auch ersichtlich, dass es bei den mit einem Kelvin-Source-Anschluss aufgewerteten Gehäusen zu neuen Beeinflussungen beziehungsweise auch Einschränkungen kommt, da diese zum Teil in der verwendeten Schaltung eine Zunahme der Streuinduktivitäten hervorrufen. Des Weiteren werden die Zerstörungsgrenzen von SiC-MOSFETs untersucht und das Kurzschlussverhalten beschrieben. Abschließend wird die Anwendbarkeit unterschiedlicher Überspannungsschutzbeschaltungen auf SiC-MOSFETs analysiert. Hierbei zeigt sich, dass insbesondere die von Silizium-IGBTs bekannte Dynamic Active Clamping-Beschaltung auch bei SiC-MOSFETs zu guten Ergebnissen führt.

Abstract

The present work deals with the extrinsic - thus dependent on the package and the surrounding circuit - and the intrinsic - thus caused by the chip - effects on the behaviour of silicon carbide (SiC) power semiconductor devices. First, their structural properties and the effects of parasitic elements are generally considered. This is followed by a summary of the measuring circuits used for the characterisation as well as the parasitic elements introduced by necessary components of the circuit. Among other things, the planar M-shunt is investigated, which is related to the coaxial shunt. According to the measurement results, the M-shunt has - as desired - a significantly lower stray inductance than the coaxial shunt that is frequently used in measurement circuits. The characterisation of the SiC diodes and SiC transistors is carried out by means of static and dynamic measuring methods, i. e. with different curve tracers and a double pulse test bench. The blocking operation of diodes is examined regarding the thermal stability and the leakage currents are described as a function of the junction temperature. An essential result of the measurements is that the thermal stability of SiC diodes only has to be questioned under atypical environmental conditions and is endangered under these, respectively. In contrast, by dynamic characterisation of the diodes, the turn-on overvoltage and the charge to be extracted during turn-off are determined. Finally, the investigated values are compared with the corresponding values of silicon diodes. Static measurements of SiC transistors show the on-state behaviour regarding different transistor types as well as manufacturer specific differences for SiC-MOSFETs. The dynamic characterisation of the transistors comprises an analysis of the impact of the drive parameters, the housing, the junction temperature and different SiC freewheeling diodes on the switching behaviour and the switching energies, respectively. The measurements show i. a. quantitatively the great advantage of housings with Kelvin source connection over the classical TO-247-3L housing. However, based on additional simulations, it becomes apparent that new influences and restrictions arise due to the usage of the housings with Kelvin source connection, since in some cases these lead to higher stray inductances in the used circuit. Furthermore, the destruction limits of SiC-MOSFETs are investigated and the short-circuit behaviour is described. Finally, the application of different overvoltage protection circuits to SiC-MOSFETs is analysed. It is shown that in particular the dynamic active clamping circuit, which is known from silicon IGBTs, leads also to good results for SiC-MOSFETs.