



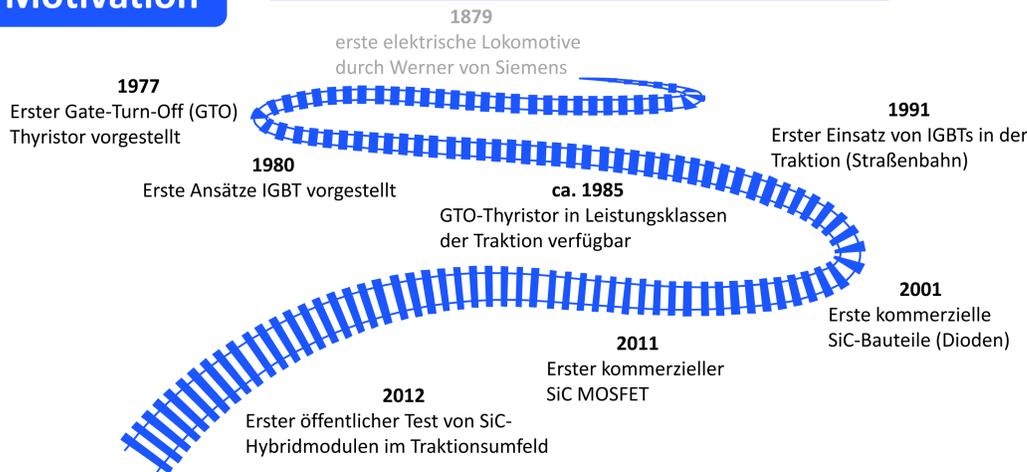
Dr.-Ing. Patrick Hofstetter

„Hochausnutzung von Siliziumkarbid-Feldeffekttransistoren in Traktionsumrichtern“

Promotionsprüfung am 20.05.2020

Motivation

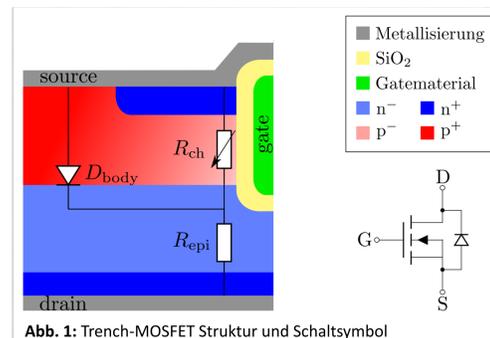
Leistungshalbleiter als Innovationstreiber in der elektrischen Traktion



2017-2019
SiCuM Projekt: Erforschung von SiC MOSFETs in der urbanen Mobilität

Hochausnutzung von SiC MOSFETs in Traktionsumrichtern:
Erforschung der Robustheit und des Schaltverhaltens von SiC MOSFETs im Traktionsumrichter und dazu passender Schutz- und Ansteuermethoden

Schaltcharakterisierung der SiC MOSFETs



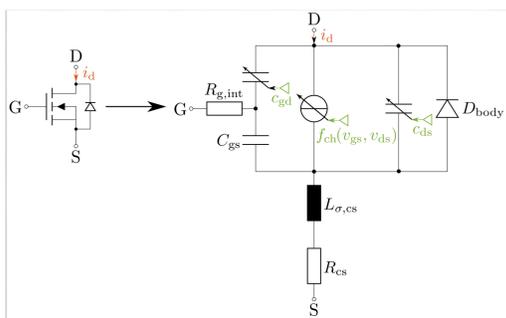
Vorteile SiC MOSFET vs. Si IGBT

- Material SiC:
 - hohe kritische Feldstärke
 - Basis SiC Bauelement deutlich dünner
- Unipolare Bauelemente z.B. MOSFET bei gleicher Chipfläche 1000-mal niedrigerer Driftzonenwiderstand
- Struktur MOSFET (siehe Abb. 1):
 - Rückwärtsleitfähigkeit direkt durch Bodydiode gewährleistet
 - Unipolares Bauelement
 - keine Schleusenspannung
 - kein Tailstrom beim Schalten

Schaltcharakterisierung in den Umgebungsbedingungen vom Traktionsumrichter

- Doppelpulsexperiment:
 - Einzelchips → Zwischenkreisinduktivität L_{σ} auf das selbe $L_{\sigma} \cdot I_{d,n}$ skaliert wie bei Applikation
 - Auslegung Gatewiderstände
 - maximale Zwischenkreisspannung $V_{ZK} = 1200V$ und $1700V$ SiC MOSFETs
 - Auslegung in Grenzfallbedingungen folgend immer auf 500V Überspannung!

SiC MOSFET Simulationsmodell



Aufbau und Parametrierung

- Aufbau (siehe Abb. 2):
 - Reduktion auf die Elemente, welche das Schaltverhalten maßgeblich bestimmen
 - ideale Diode als Bodydiode
- Einfache Parametrierung:
 - Passive Elemente
 - Common-Source-Elemente (cs) aus Kurzschlussmessung bestimmt
 - Rest aus Datenblatt
 - Spannungsabhängige Kapazitäten
 - aus Datenblatt
 - Dynamische Transferkennlinien
 - aus Schaltvorgängen (siehe Abb. 3)

$$f_{ch}(v_{gs}, v_{ds}) = \max((\min(i_{d,act}(v_{ds}), i_{d,sat}(v_{gs}, v_{ds})), 0)$$

$$i_{d,act}(v_{ds}) = \frac{v_{ds}}{R_{ds,on}}$$

$$i_{d,sat}(v_{gs}, v_{ds}) = \frac{K}{2} \cdot (v_{gs} - V_{th}) \cdot (1 - \alpha_1 \cdot v_{ds})^M \cdot (1 + \alpha_2 \cdot v_{ds})$$

Abb. 2: Aufbau des Simulationsmodells

Performance des Modells

- Einfache Parametrierung mit Datenblatt und einzelnen Messungen
- kein Modell des Herstellers nötig
- Repräsentation der Schaltvorgänge sehr gut
 - Einschaltvorgang: Bei hohen Temperaturen keine bipolare Vorgänge der Bodydiode implementiert
 - Ausschaltvorgang immer gut repräsentiert
- Für Optimierung des Ausschaltens ideal

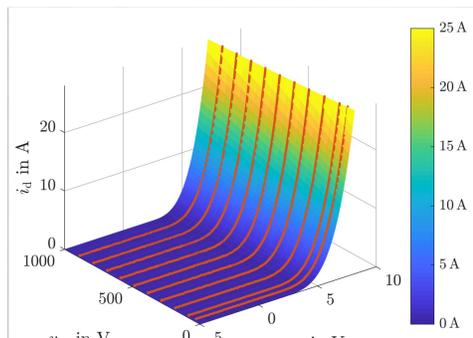


Abb. 3: Transferkennlinien (orange) und gefittetes $i_{d,sat}(v_{gs}, v_{ds})$

Optimierung des Schaltverhaltens

Ziel der Optimierung:
Verbesserung des Trade-offs zwischen Ausschaltoszillation und Schaltverlusten

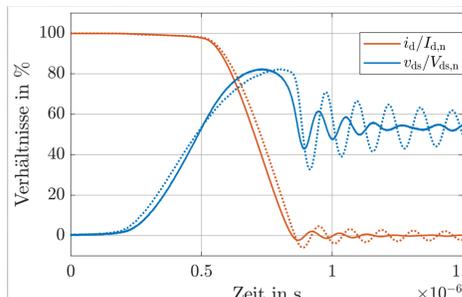


Abb. 4: Vergleich zwischen Ausschaltmessung des alten (gestrichelt) und des neuen SiCuM-MOSFETs (durchgezogen) mit gesenkter C_{gd} -Kapazität

Einschaltvorgang

- Begrenzend ist Ausschaltvorgang der Bodydiode durch Reverse-Recovery und damit verbundener Überspannung
- Totzeitoptimierung kann Bodydiode entlasten, sodass Schaltvorgang beschleunigt werden kann
- Ausnutzen parasitäres Wiederaufsteuern (PTO)
 - bei dem DUT führt leichtes PTO zu deutlich niedrigerer Überspannung (siehe Abb. 5)
 - Durch Beschleunigung ca. 1/10 der Ein-Verluste

Ausschaltvorgang

- Parameteranalyse im halbphysikalischen Modell zeigt enorme Vorteile von niedrigem C_{gd}/C_{gs} -Verhältnis
 - Optimierter SiC MOSFET zeigt deutlich weniger Oszillation und niedrigere Verluste (siehe Abb. 4)
- Optimierung durch externe Maßnahmen
 - Erhöhung der Common-Source-Induktivität durch Ansteuerung an den Lastanschlüssen des Source
 - Steuerspannungspuls (eher für niederinduktive Anwendungen denkbar)
 - Einbringen externes C_{gs} wirkt ebenfalls

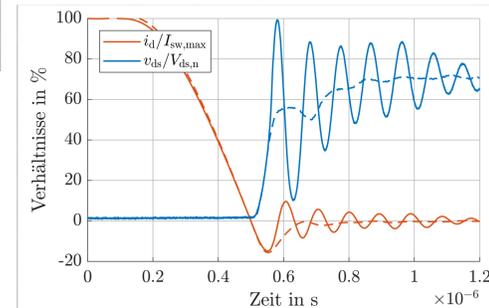
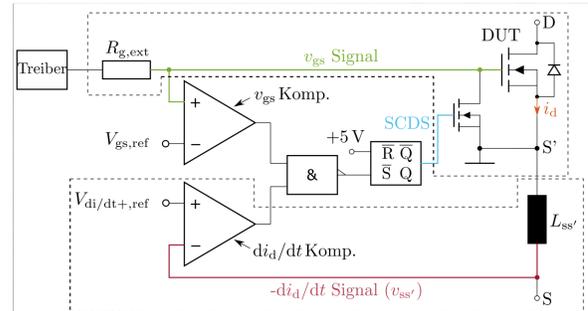


Abb. 5: Vergleich zwischen Body-Dioden Ausschaltvorgang mit PTO (gestrichelt) und ohne PTO (durchgezogen)

Kurzschlusschutz von SiC MOSFETs

SiC MOSFET Kurzschlussmessungen zeigen Sättigungsströme über dem 5-fachen Nennstrom und Zerstörungen weit vor 10 μ s

Spezieller Kurzschlusschutz nötig



Spezieller Schaltungsaufwand für SiC MOSFETs

- mehrstufige Abschaltstrategie zur schnellen Reaktion auf das SCDS Signal (Position im oberen eingerahmten Teil)
- Oszillationsunterdrückung um Fehlauflösung bei Drainstromoszillation auszublenden (Position im unteren eingerahmten Teil)

Performance des Kurzschlusschutzes

- normale Einschaltvorgänge werden auch bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen nicht beeinflusst
- KS2 (siehe Abb. 7) und KS1 werden noch weit vor der Sättigung sicher abgeschaltet

Aufbau des Kurzschlusschutzes

- Verwendung der 2D-Detektionsmethode
- prinzipielles Schaltbild (siehe Abb. 6)
- Auslösen des Kurzschlussdetektionssignals (SCDS) bei positiven di/dt und Überschreiten des Gatekomparators

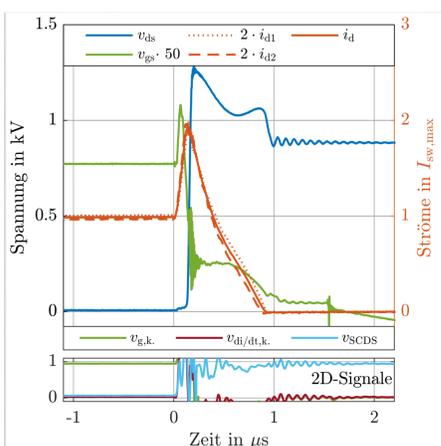


Abb. 7: Eingreifen des Kurzschlusschutzes im KS2

Stoßstrombelastung an SiC Bodydioden

Nach erfolgreicher Kurzschlussabschaltung kommt es zu Stoßstrombelastungen der SiC Bodydioden

Anforderung im Vergleich zu Siliziumdioden

$$\frac{I_{FSM,SiC}}{A_{SiC}} \stackrel{(6.2.3)}{\approx} \frac{I_{FSM,SiC}}{[0,75 \dots 1,5] \cdot A_{Si,Diode}} \stackrel{(6.2.5)}{\approx} \left[\frac{2}{3} \dots \frac{4}{3} \right] \cdot \frac{I_{FSM,Si,Diode}}{A_{Si,Diode}}$$

Ergebnisse der Messungen

- typischerweise Ausfall durch Schmelzen der Oberseitenmetallisierung → $T_{Aluminium} \approx 660^{\circ}C$
- Ausfall bei Variation der Temperatur und Pulslänge über eigenes thermisches Modell erklärbar
- Zuschalten des MOS-Kanals je nach Bauteil vor- oder nachteilig
- mehrfache Stoßstrombelastung zeigt Vorschädigungen erst kurz vor Erreichen des Einfachpuls-Ausfallwertes (SPF-Wert)

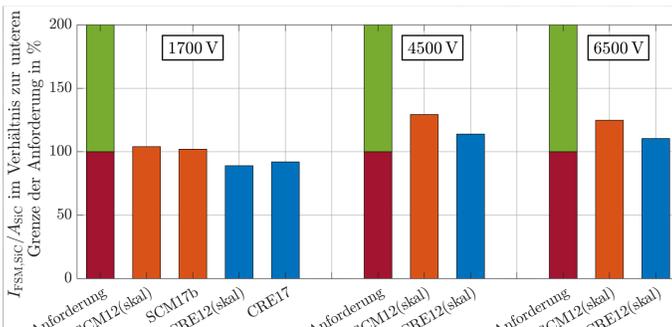


Abb. 8: Vergleich flächenabhängiger Stoßstromfestigkeit (SPF) mit jeweiligen Anforderungen

Vergleich mit der Anforderung

- Skalierung hergeleitet für Vergleich mit noch nicht kommerziell verfügbaren SiC Spannungsklassen
- Ergebnis in Abb. 8
- Stoßstromfestigkeit der SiC Bodydioden am unteren Rand der Anforderung
- durch fortschreitende Entwicklung weiter Forschungsthema

