



Das breite Einsatzspektrum der Cool-SiC-MOSFET-Technologie

Einfach konfigurierbar, ohne Kompromisse bei der Zuverlässigkeit

Viele Anwender bringen Siliziumkarbid-Feldeffekttransistoren aufgrund ihrer niedrigen Schaltverluste tendenziell mit hohen Schaltfrequenzen in Verbindung. Tatsächlich ist die Palette möglicher Einsatzgebiete jedoch sehr viel breiter. Cool-SiC-MOSFETs lassen sich über den Gatekreis für unterschiedlichste Anwendungen konfigurieren.

Autor: Klaus Sobe

Obwohl alle derzeit kommerziell erhältlichen Siliziumkarbid-MOSFETs (SiC-MOSFET) Anreicherungstypen und daher im Normalzustand ausgeschaltet sind, zeichnen sich die erforderlichen Ansteuerschaltungen nicht unbedingt durch Einfachheit aus. Bei vielen SiC-Schaltertechnologien gewährleistet erst der Einsatz verhältnismäßig hoher Einschalt- und negativer Ausschaltspannungen am Gate einen verlustarmen Betrieb.

Häufig gelangen auch Kombinationen mit Snubber- und diskret aufgebauten Klemmschaltungen zum Einsatz. In Summe bedeutet das relativ komplexe Schaltungsgebilde zur Versorgung des Treibers und Ansteuerung des Transistors. Im Gegensatz lassen sich Cool-SiC-MOSFETs

mit einfachsten Treiberschaltungen betreiben, ohne dadurch Leistungsfähigkeit einzubüßen.

Zuverlässigkeit als Fundament

Der Schlüssel zu einer leistungsfähigen und gleichzeitig auch zuverlässigen Schaltertechnologie ist der Kanalwiderstand. Bei SiC-MOSFETs macht dieser, besonders bei planaren Typen, etwa die Hälfte des gesamten Durchlasswiderstands (on-state resistance, $R_{DS(on)}$) aus. Ein nicht zu vernachlässigender Faktor, der das Preis-Leistungs-Verhältnis wesentlich beeinflusst.

Zum Leidwesen der Entwickler wird der Kanalwiderstand vieler SiC-MOSFETs häufig durch Maßnahmen minimiert, die sich negativ auf die Zuverlässigkeit des Bauteils auswirken. So kommen aktuell

hohe Einschaltspannungen, dünne Gate-Oxide und niedrige Schwellenspannungen zum Einsatz. Dieser Ansatz ist zwar effek-



Eck-DATEN

Die Vorteile von SiC-MOSFETs gegenüber Si-IGBTs sind unbestritten. Entwickler verbinden die SiC-Bauelemente vor allem mit Anwendungen mit hohen Schaltfrequenzen, doch mit der richtigen Konfiguration sind Cool-SiC-MOSFETs in vielen Anwendungen zu Hause. Bei der Entwicklung der Technologie lag das Augenmerk des Herstellers auf Zuverlässigkeit und Benutzerfreundlichkeit. Am Beispiel von zwei äußerst unterschiedlichen Anwendungsfällen – einer Ladeeinheit für E-Autos und dem Einsatz in Servoantrieben – wird gezeigt, wie das Bauteil mit gekonnter Beschaltung seine Stärken ausspielen kann.

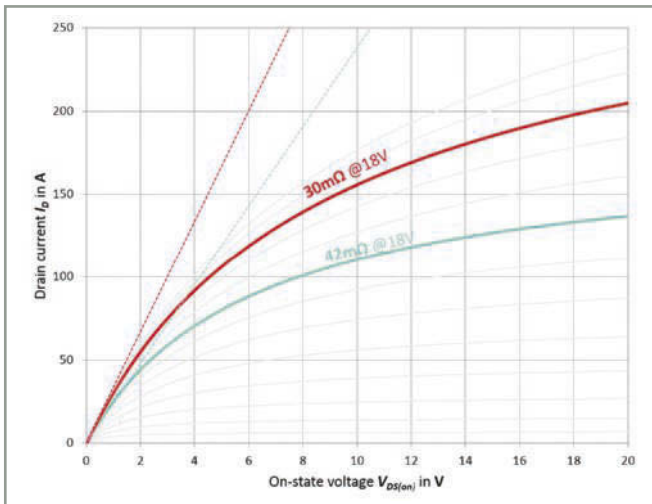


Bild 1: Durch den hohen Anteil des MOS-Kanals am Gesamtdurchlasswiderstand lassen sich bei 1200-V-Cool-SiC-MOSFETs (IM-W120R030M1H) die Leitungsverluste mit einer Ansteuerspannung von 18 V um bis zu 30 Prozent reduzieren.

tiv, aber eben nicht frei von Nebenwirkungen. Während die ersten beiden Maßnahmen mit einer Erhöhung der Oxidbeanspruchung und folglich auch der Ausfallrate einhergehen, bedeutet eine niedrige Schwellenspannung eine stärkere Tendenz zu parasitärem Einschalten. Mit negativen Ausschaltspannungen lässt sich diese zwar grundsätzlich verringern, allerdings geht dies wieder zulasten des Gate-Oxids.

Bei der Entwicklung der eigenen Schaltertechnologie war für Infineon deshalb klar, dass Kompromisse dieser Art nicht akzeptabel sind. Dank der besonderen Trench-Struktur von Cool-SiC-MOSFETs lassen sich Kanäle mit sehr guter Leitfähigkeit und hoher Qualität fertigen – trotz dicker Oxidschichten, niedriger Einschaltspannungen und hoher Schwellenspannungswerte. Die hinsichtlich Zuverlässigkeit sehr konservative Auslegung bedeutet nicht nur langfristig niedrige Ausfallraten. Auch unmittelbar im Betrieb ergeben sich Vorteile: Wegen der hohen Schwellenspannungswerte in Kombination mit den ausgewogenen Bauteilkapazitäten weisen Cool-SiC-MOSFETs eine sehr gute

Steuerbarkeit auf und sind trotzdem ausgesprochen robust gegenüber parasitärem Einschalten.

Ansteuerung leichtgemacht

Wie eingangs skizziert lassen sich die Ansteuerschaltungen von Cool-SiC-MOSFETs sehr einfach halten. Aufgrund der geringen Package-Kapazitäten gilt dies insbesondere für diskrete Bauteile: ein Treiber, eine unipolare Hilfsspannungsversorgung und zwei Gate-Widerstände sind ausreichend für einen leistungsfähigen und zuverlässigen Betrieb – egal ob mit steilen Schaltflanken in einem Gleichspannungswandler oder mit moderaten Schaltgeschwindigkeiten in einem Antriebsumrichter gearbeitet wird.

Diskrete MOSFETs der 1200-V-M1H-Familie sind mit Einschaltspannungen von 18 V oder 15 V betreibbar. Während eine Gate-Spannung von 18 V den Kanalwiderstand reduziert und damit deutlich attraktivere Durchlassverluste liefert, ergibt sich mit 15 V ein kurzschlussfestes Bauteil. Der quantitative Einfluss der Einschaltspannung ist in den Bildern 1 und 2

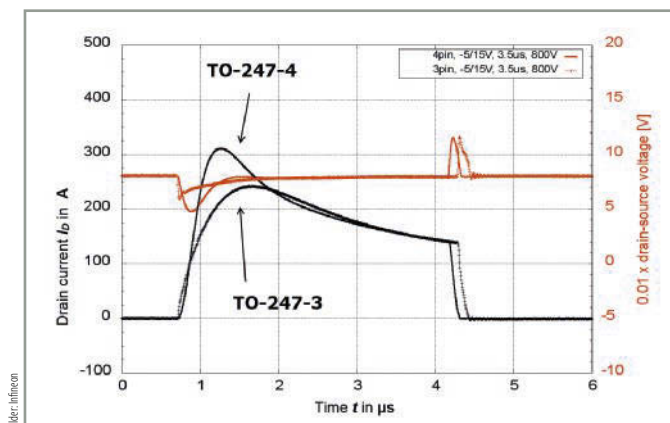


Bild 2: Kurzschluss eines 1200-V-Cool-SiC-MOSFETs bei 800 V. Mit einer Gatespannung von 15 V lässt sich eine Zerstörung des Bauteils für 3 μs ausschließen.

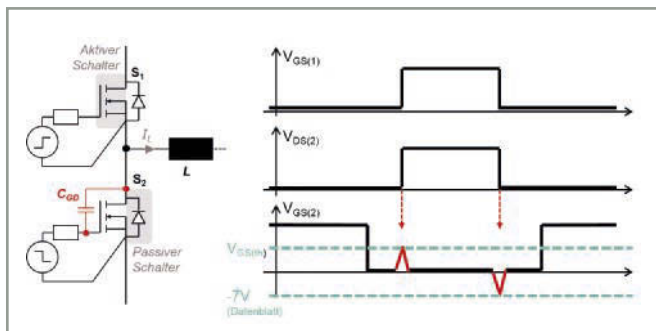
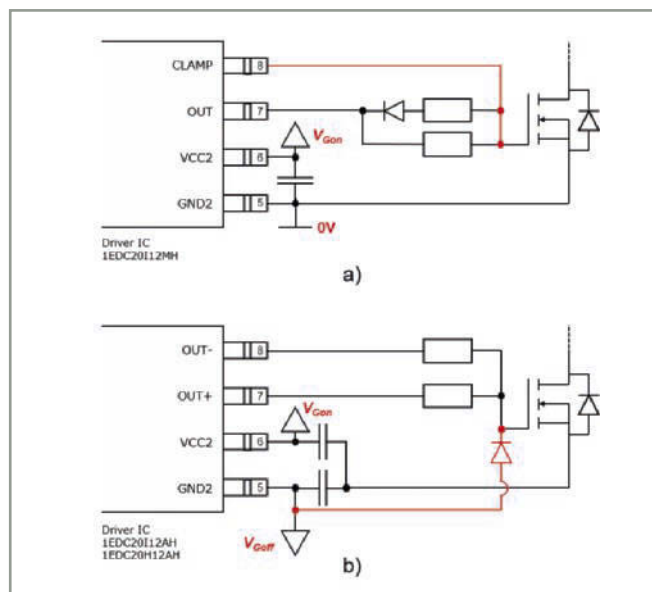


Bild 3: Qualitative Darstellung der Gate-Spannungen in einer als Tiefsetzsteller arbeitenden Halbbrücke; während der aktive Schalter in Vorwärtsrichtung betrieben wird und die Kommutierungszeitpunkte vorgibt, wird der passive Schalter ausschließlich in Rückwärtsrichtung betrieben.

Bild 4: Empfohlene unipolare (oben) und bipolare (unten) Ansteuerschaltungen für Cool-SiC-MOSFETs; rot hervorgehoben sind die Elemente, die eine Unterdrückung der eingekoppelten Spannungsspitzen bewirken.



detaillierter zu sehen. Entwickler können also durch die Festlegung der Einschaltspannung zwischen einer Reduktion der Durchlassverluste um 20 bis 30 Prozent oder einer Kurzschlussfestigkeit von 3 μ s wählen.

Die Wahl der Ausschaltspannung ist in der Regel keine Frage der Leistungsfähigkeit. Erfahrungsgemäß ist die Abschaltgeschwindigkeit eines SiC-MOSFETs nämlich auch bei einer Gate-Spannung von 0 V ausreichend hoch. Vielmehr geht es um die Wahl eines Spannungsniveaus, das einerseits niedrig genug ist, um parasitäres Einschalten zu verhindern, andererseits aber nicht so niedrig ist, dass die Zuverlässigkeit des Gate-Oxids darunter leidet. In Bild 3 ist deutlich erkennbar, dass dafür der passive Schalter einer Brückenkongfiguration zu betrachten ist, insbesondere während der Kommutierungsphasen.

Im Normalfall lassen sich diskrete Cool-SiC-MOSFETs zuverlässig mit 0 V betreiben, vor allem, wenn Treiber mit „Active Miller Clamp“ zum Einsatz kommen. Diese Ansteuerungsvariante ist in Bild 4a dargestellt. Im ausgeschalteten Zustand überbrückt die im Treiber integrierte Klemmschaltung die Gate-Widerstände. Damit ergibt sich eine niederohmige Verbindung zwischen Gate und Source des Transistors, die sowohl positive, als auch negative Spannungsspitzen effektiv unterdrückt.

Soll auf eine negative Spannung nicht verzichtet werden – etwa, weil mehrere Bauteile parallelgeschaltet sind –, dann bietet sich die in Bild 4b gezeigte Schaltung an. Hier sorgt eine diskrete Diode für die Unterdrückung negativer Spannungsspitzen. Die Steuerung der Schaltflanken erfolgt typischerweise über Gate-Widerstände. Um Ein- und Ausschaltverhalten

unabhängig voneinander zu optimieren, finden im Idealfall separate Widerstände Anwendung. Aufgrund ihrer ausgewogenen Bauteilkapazitäten weisen Cool-SiC-MOSFETs eine ausgezeichnete Steuerbarkeit der Schaltflanken aus.

Einsatz in Ladeeinheiten für E-Autos

Die einfache und effektive Ansteuerung von Cool-SiC-MOSFETs machen sie zu einer benutzerfreundlichen und vielseitig einsetzbaren Schlüsselkomponente in unterschiedlichsten leistungselektronischen Systemen. Exemplarisch liegt im Folgenden der Fokus auf zwei unterschiedlichen Einsatzgebieten.

Im Allgemeinen verbinden Anwender SiC-MOSFETs gerne mit steilen Schaltflanken und hohen Schaltfrequenzen. Gleichspannungswandler, wie sie etwa in

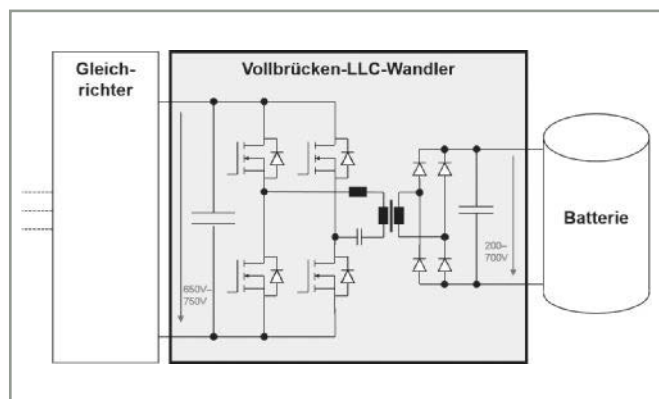


Bild 5: Vollbrücken-LLC-Wandler mit weitem Ausgangsspannungsbereich als Teil einer stationären Ladesäule für Elektroautos. Der LLC-Wandler sorgt für die galvanische Trennung und lädt die Batterie entsprechend dem geforderten Ladeprofil.

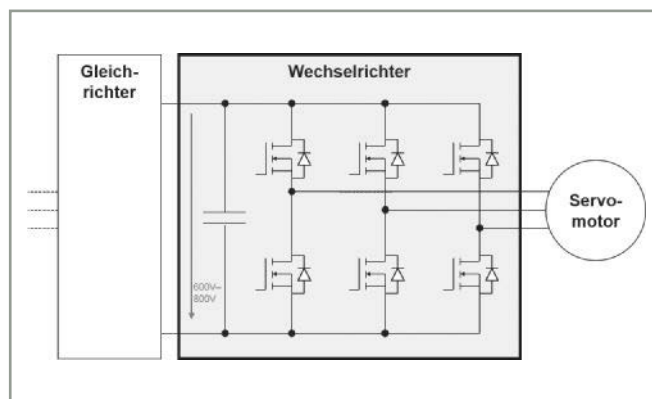


Bild 6: Klassische Wechselrichtertopologie für einen dreiphasigen Motor. Angenommen wird ein Servoantrieb mit einem Nominalstrom von 9 A und einem Pulsstrom von 27 A, als Schalter 40 A IGBTs beziehungsweise 42-m Ω -MOSFETs.

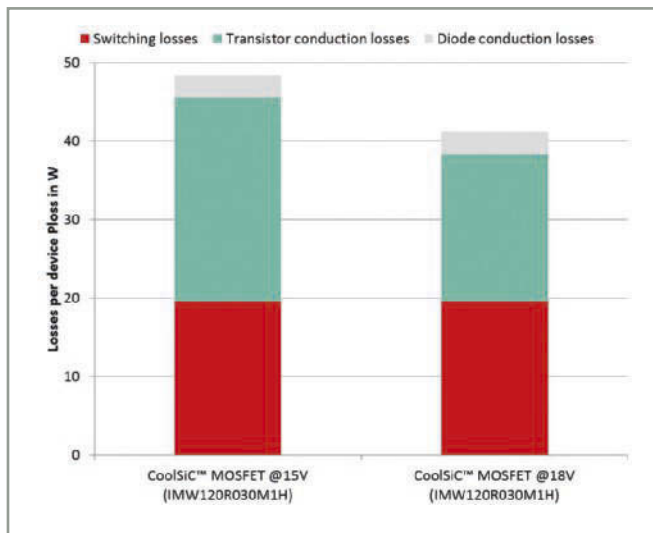


Bild 7: Verluste der MOSFETs beim Betrieb mit niedriger Ausgangsspannung und vollem Ausgangsstrom.

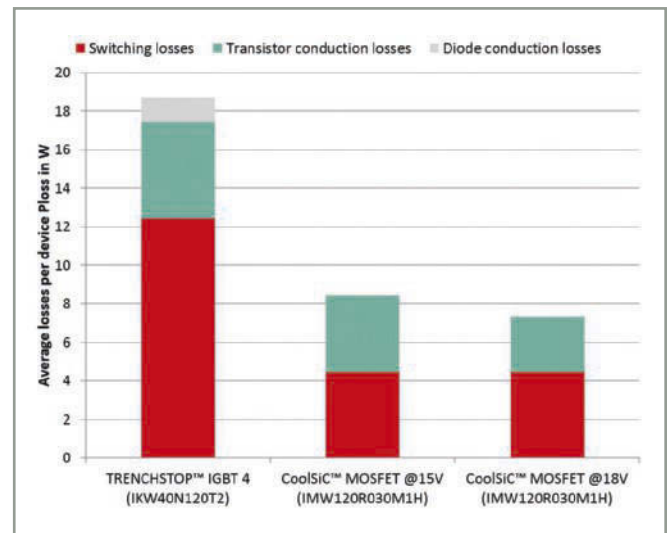


Bild 8: Durchschnittliche Verluste der Schalter in einem Servoantrieb bei 8 kHz: Pulsstrom für 0,25 s, Nominalstrom für 3,75 s, Pulsstrom für 0,25 s etc.

Batterieladegeräten Verwendung finden, fallen in diese Kategorie. Bild 5 zeigt die mögliche Umsetzung für eine Ladeinheit für Elektroautos. In der Realität sind mehrere solcher Ladeeinheiten parallelgeschaltet und in stationären Schnellladesäulen verbaut. Ein wesentliches Kriterium bei der Entwicklung derartiger Einheiten ist die Sicherstellung möglichst weiter Spannungs- und Strombereiche am Ausgang. Sie sind unabdingbar, um ein optimales, also schnelles und batterieschonendes Ladeprofil sicherzustellen.

Für die in der Praxis bewährten LLC-Wandler ist besonders der Arbeitspunkt bei niedriger Ausgangsspannung und hohem Ausgangsstrom zu beachten. Thermisch ist dieser am herausforderndsten: der LLC-Wandler ist mit hohen Schaltfrequenzen zu betreiben, um die niedrige Ausgangsspannung zu erreichen, gleichzeitig werden aber hohe Ströme geschaltet. In Bild 7 sind die Verluste der Halbleiterschalter bei einem Betrieb mit 15 V und 18 V am Gate zusammengefasst. Da Kurzschlussfestigkeit in dieser Anwendung keine Rolle spielt, empfiehlt es sich, Cool-SiC-MOSFETs mit 18 V zu betreiben. Allein diese Maßnahme reduziert die Verluste am Schalter um 15 Prozent und damit auch die Chiptemperatur.

Der Cool-SiC-MOSFET in Servoantrieben

Die zweite Anwendung sind Servoantriebe. Der Wechselrichter wird üblicherweise mit drei Halbbrücken gemäß Bild 6 rea-

lisiert. Hinsichtlich der Anforderungen unterscheidet sich ein Antriebsumrichter in fast allen Punkten von den oben betrachteten Ladegeräten. Erstens kommen in diesem Einsatzgebiet praktisch nur kurzschlussfeste Schalter zum Einsatz, zweitens sind Schaltfrequenzen jenseits der 10 kHz Ausnahmefälle, und drittens lassen sich die Halbleiter nicht beliebig schnell schalten.

Um Schäden am Motor, etwa an der Wicklungsisolation oder den Lagern zu vermeiden, werden die Spannungsflanken beim Ein- und Ausschalten der Halbleiter auf eine Steilheit von üblicherweise 5 V/ns begrenzt. Aus Sicht eines SiC-MOSFETs, der bei entsprechender Ansteuerung auch mehr als das Zehnfache dieser Steilheit liefern könnte, ist diese Geschwindigkeit als moderat zu bezeichnen. In Bild 8 ist ersichtlich, dass Siliziumkarbidschalter trotz dieser Bedingungen nicht einmal halb so viele Verluste verursachen wie ein IGBT.

Interessanterweise lässt sich dies vorrangig über eine Reduktion der Schaltverluste erklären, und das trotz der einheitlichen Drosselung der Spannungsflanken. Als Ursachen sind hier vor allem die temperaturunabhängigen Schaltverluste des MOSFETs sowie die massive Reduktion der Sperrverzögerungsladung durch die SiC-Body-Diode zu nennen. Zur Sicherstellung der Kurzschlussfestigkeit müssen Cool-SiC-MOSFETs in dieser speziellen Anwendung mit einer Gatespannung von 15 V betrieben werden. Die

damit einhergehende, leichte Erhöhung der Leitungsverluste des MOSFETs ist praktisch vernachlässigbar.

Zusammenfassung

Die grundsätzlichen Vorteile kommerziell erhältlicher Siliziumkarbid-MOSFETs gegenüber Silizium-IGBTs sind unbestritten und gelten unabhängig vom Hersteller. Um sich langfristig und in möglichst vielen Anwendungen durchzusetzen, reicht Leistungsfähigkeit allein jedoch nicht aus.

Bei der Entwicklung der Cool-SiC-MOSFET-Technologie war Zuverlässigkeit eine der Hauptanforderungen. Sie ist bei dieser Technologie das Fundament aller weiteren Optimierungen, die beispielsweise die Robustheit gegenüber parasitärem Einschalten oder die Steuerbarkeit garantieren.

Auch wenn sich diese Charakteristika des Cool-SiC-MOSFET, im Unterschied zu typischen Leistungsmerkmalen, nicht direkt im Datenblatt wiederfinden – in Summe ergeben diese ein äußerst benutzerfreundliches Bauteil, dass seine Stärken in unterschiedlichsten Anwendungen ausspielen kann. (na)

Autor

Klaus Sobe

Staff Engineer Technical Marketing for discrete SiC and IGBT bei Infineon Technologies



all-electronics.de
infoDIREKT

806ei1219