

IGBTs in HGÜ-Anwendungen

(Bild: Thorsten Schier – Fotolia)

Die Elektronik in HGÜ-Anwendungen muss gewissen Anforderungen genügen: Robustheit, Kurzschlussfestigkeit und dynamisches Leistungsverhalten. Speziell dafür entwickelte Infineon einen 4,5-kV-IGBT- und Dioden-Chipsatz.

Von Thomas Schütze und Josef Georg Bauer

An die Elektronik der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) werden hohe Anforderungen gestellt, vor allem an die Robustheit der einzelnen Komponenten. Dazu zählen auch Leistungshalbleiter. Infineon hat einen für HGÜ-Anwendungen optimierten 4,5-kV-IGBT mit speziellem Dioden-Chipsatz entwickelt. In einem Modul verbaut, bietet er einige Vorteile: niedrige Durchlassverluste mit schnellem Einschaltverhalten für hohe Ströme und Spannungen bei gleichzeitig robustem Kurzschlussverhalten. Die Schaltrobustheit wird durch die HDR-Technologie (High Dynamic Robustness) für IGBT und Diode erreicht. Die Spannungsklasse 4,5 kV ergänzt die bereits für IGBT-Module existierenden Spannungsclassen 3,3 kV und 6,5 kV.

Der Chipsatz ist in zwei unterschiedlichen Gehäusebauformen erhältlich. Zum einen in einem hochisolierenden 6,5-kV-Modulgehäuse, welches 10,2 kV Isolationsvermögen und entsprechende Luft- und Kriechwege bietet, wie sie durch die rauen Betriebsbedingungen

von Traktionsumrichtern mit Netzgleichspannungen im Bereich von 2500 bis 3000 V erforderlich sind. Ein zweiter Chipsatz wurde für das IHV-B-Gehäuse (Bild 1) ausgelegt, dem Nachfolger des IHV-A-Moduls. Dieses Modul adressiert das weite Feld der industriellen Anwendungen wie Mittelspannungsantriebe, HGÜ-Anwendungen sowie flexible Drehstromübertragungssysteme (Flexible AC Transmission System, kurz: FACTS).

Der auf IGBT-Modulen basierende, selbstge-

führte Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis wird zunehmend eine wichtige Rolle für zukünftige HGÜ-Anlagen spielen. Im Gegensatz zu den bekannten, netzgeführten Umrichtern auf Thyristor-Basis erlaubt die IGBT-basierte Lösung aufgrund der Ein- und Ausschaltbarkeit dieses Bauelements in dieser Anwendung eine unabhängige Steuerung von Wirk- und Blindleistung. Darüber hinaus zeigen IGBTs ein dynamischeres Verhalten bei Störungen im AC-Netz.

Für Hochspannungsanwendungen sind eine hohe Anzahl von Halbleitern in Serie zu schalten; gleichzeitig ist für diese ein möglichst simultanes Schalten sicherzustellen. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurde der MMC (Modular Multilevel Converter) für Hochspannungsanwendungen wie HGÜ und FACTS entwickelt. Die Schaltfrequenz der einzelnen IGBT-Module kann in dieser Schaltung stark reduziert werden. In Hinblick auf möglichst geringe Gesamtverluste hat die Optimierung der Bauelemente auf niedrige Durchlassverluste eine besondere Bedeutung.

Der Chipsatz und seine Eigenschaften

Die IGBT-Trench-Technologie bietet diese Optimierung in Richtung geringer Durchlassverluste, wobei der Effekt des



Bild 1.
Das speziell für HGÜ-Anwendungen entwickelte 4,5-kV-Modul FZ1200R45HL3 mit IHV-B-Gehäuse.

(Bilder: Infineon)

Ladungsträgerstaus durch die Trench-Zellen mit einem angepassten Zellraster optimal genutzt wird. Kanallänge sowie Kanalweite sind der hohen Sperrspannung entsprechend angepasst. Die Trench-Technologie eröffnet im Vergleich zur planaren Zell-Technologie die Möglichkeit, die Ladungsträgerkonzentration und -verteilung über einen deutlich größeren Bereich einzustellen.

Bild 2 zeigt den schematischen Querschnitt eines 4,5-kV-IGBT und einer EC-Diode (Emitter Controlled). Für den Rand beider Chips wird das VLD (Varied Lateral Doping) eingesetzt. In Kombination mit der vertikalen HDR-Struktur kann im Randbereich durch eine deutliche Reduzierung der dort auftretenden Feldstärken eine extrem hohe Abschaltrobustheit des IGBT beziehungsweise eine Kommutierungsrobustheit der Diode erreicht werden.

Statische Eigenschaften

Um die erwünschten niedrigen Durchlassspannungen für den 4,5-kV-IGBT zu erzielen, wurde die bereits für 6,5-kV-Bauelemente verwendete Trench-Technologie angepasst. Dazu gehören ein geeignetes Grundmaterial aus Silizium, eine adaptierte Feldstopp-Auslegung und ein optimiertes Zelldesign. Das Ergebnis ist ein 4,5-kV-Bauelement mit den niedrigsten am Markt verfügbaren Durchlasseigenschaften. Bei 1200 A, dem Nominalstrom des FZ1200R45HL3-Moduls, wird ein typisches

$U_{CE(sat)}$ von 2,35 V bei +25 °C, 2,9 V bei +125 °C und 3,0 V bei +150 °C Sperrschichttemperatur erreicht. Die EC-Diode zeigt bei ihrem Nennstrom von 1200 A einen nahezu neutralen Temperaturkoeffizienten. Der typische Durchlassspannungsabfall im gesamten Temperaturbereich von +25 bis +150 °C ist kleiner 2,5 V.

Dynamische Eigenschaften

Bild 3 zeigt Beispiele für das Schaltverhalten unter nominalen Bedingungen, also bei $U_{CE} = 2,8$ kV, $I_C = 1200$ A und $T = +150$ °C. Bei einer Kommutierungsinduktivität von 150 nH kann ein sehr softes, oszillationsfreies Abschaltverhalten beobachtet werden. Die Kollektorspannung erreicht dabei einen Schei-

telwert von 3,4 kV. Dieses gewünscht softe Abschaltverhalten stellt sich aber auch bei ungünstigeren Bedingungen wie höheren Streuinduktivitäten, höherem Strom und Betriebstemperaturen bis herab zu -40 °C ein. Weiterhin ist ein typisches Einschalten des IGBT sowie das Abschalten der Diode zu sehen. Deutlich zu erkennen ist der Tail-Strom, der das sanfte Schaltverhalten der Diode gewährleistet.

Schalten bei hohen Spannungen und Strömen

Für HGÜ-Anwendungen ist es wichtig, dass der IGBT auch bei anliegenden hohen Spannungen und Strömen im Fehlerfall sicher abschalten kann. Um die Robustheit des Bauelementes unter diesen grenzwertigen Bedingungen abzusichern, wird auch das Verhalten jenseits der Grenzen des sicheren Arbeitsbereiches RBSOA (Reverse Bias Safe Operating Area) des IGBT und SOA (Safe Operation Area) der Diode untersucht.

Die Kanalweite ist einer der Parameter, mit denen das Einschaltverhalten

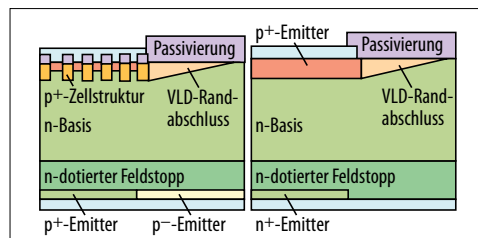


Bild 2. Schematischer Querschnitt des IGBT (links) und der EC-Diode (rechts) mit HDR- und VLD-Randstruktur.

des IGBT wirkungsvoll beeinflusst wird. Durch eine höhere Kanalweite kann ein schnelleres Einschalten auch sehr hoher Ströme erreicht werden. Allerdings führt eine Vergrößerung der Kanalweite gleichzeitig zu einer Erhöhung des im Falle eines Kurzschlusses auftretenden Stromes. Daher musste bei der Auslegung ein Kompromiss zwischen Optimierung des Einschaltverhaltens und der Kurzschlussfestigkeit gefunden werden. Die vertikale Chipstruktur des IGBT wurde dahingehend modifiziert, dass diese gegenläufigen Anforderungen erfüllt werden konnten.

Kurzschlussfestigkeit und Robustheit

Um die Kurzschlussfestigkeit des IGBT zu demonstrieren, wurde der Kurz-

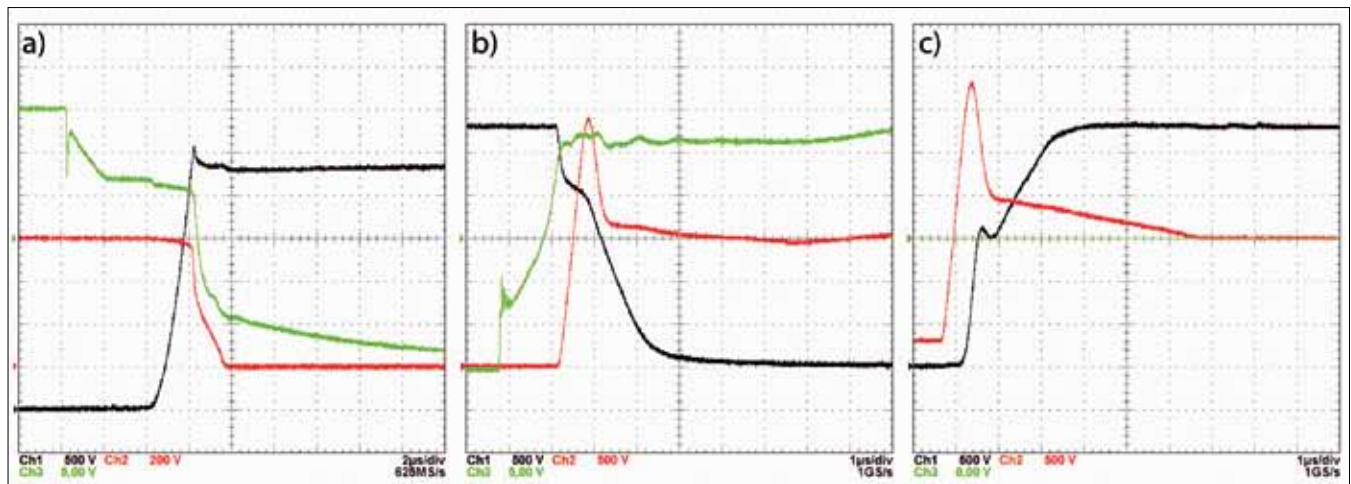


Bild 3. Typische Schaltverläufe bei 2800 V/1200 A, 150 μ H, 150 °C. Abschalten (a): $U_{CE} = 400$ V/div; $I_C = 150$ A/div; $R_{goff} = 5,1 \Omega$; $U_{GE} = 5$ V/div. Einschalten (b): $U_{CE} = 350$ V/div; $I_C = 300$ A/div; $R_{gon} = 1,2 \Omega$; $U_{GE} = 5$ V/div. Dioden-Recovery (c): $U_{CE} = 500$ V/div; $I_C = 500$ A/div; $R_{gon} = 1,2 \Omega$.

schluss 1 unter den Bedingungen $U_{CE} = 3000$ V, $U_{GE} = 17$ V und $T = +125$ °C getestet. 9500 A, fast der 8-fache Nennstrom, konnte erfolgreich abgeschaltet werden. Die vertikale Struktur des IGBT wurde so optimiert, dass auch lange Kurzschlussdauern möglich sind. Bild 4 zeigt die Verläufe eines Kurzschluss-tests. Der Kurzschluss konnte

durch das IGBT-Modul FZ1200R45HL3 erfolgreich abgeschaltet werden. Kurzschlussdauern bis 10 μ s sind zulässig.

Sowohl in HGÜ- als auch in Traktionsanwendungen gewährleistet eine hohe Überstromabschaltfähigkeit für IGBT und Diode die Zuverlässigkeit des Systems. Durch Anwendung des HDR-Konzepts kann der Einfluss des Randab-

schlusses auf die erreichbare Robustheit vernachlässigt werden. Somit stellt lediglich das Zelldesign einen limitierenden Faktor dar. Die Trench-Struktur erlaubt auf einfache Art eine weitere Reduzierung der Source-Länge im IGBT. Durch diese Maßnahme kann die Stromdichte reduziert werden, da sie invers proportional zur Source-Länge

ist und somit das Latch-up-Verhalten des IGBT deutlich verbessert wird. Hierdurch kann eine sehr gute Abschaltrobustheit erreicht werden. Dies wird durch Abschalten von Strömen in Höhe bis zum 5fachen Nennstrom ohne Auftreten von Oszillationen auf den Strom- und Spannungsverläufen demonstriert.

Zusätzlich zu den niedrigen Durchlassverlusten der 4,5-kV-EC-Diode zeigt diese eine außergewöhnliche Robustheit bzgl. in der Diode auftretender Recovery-Verluste. Anhand eines Moduls mit 200 A Nennstrom wurden Spitzenleistungen von $P_{\max} \geq 4$ MW ohne Zerstörung geschaltet.

Im Fehlerfall, z.B. bei einem Kurzschluss in der Hochspannungsleitung, können extreme Stoßströme während des Diodenbetriebs auftreten. Die Fähigkeit, diesen Stoßströmen standzuhalten, ist ein wichtiges Kriterium für die Nutzbarkeit eines Moduls. Die hohe Stoßstromfestigkeit konnte durch Optimierung der vertikalen Struktur erreicht werden, was gleichzeitig zu einem sehr niedrigen Durchlasswert U_f führt. Für ein Modul mit $I_c = 1200$ A und einer Sperrschichttemperatur von $+125$ °C wird ein typischer zulässiger Stoßstrom IFSM in der Größenordnung von 10 kA erreicht, was einem I^2t -Wert von $500 \text{ kA}^2\text{s}$ entspricht.

Robustheit bezüglich Höhenstrahlung

Ein besonderes Augenmerk wurde auf Robustheit des 4,5-kV-IGBT und der zugehörigen EC-Diode bezüglich Höhenstrahlung gelegt. Die typische höhenstrahlungsbedingte Ausfallrate FIT (Failure In Time), d.h. die Anzahl zu erwartender Ausfälle in 10^9 Betriebsstunden, wurde für das Modul FZ-1200R45HL3 bei ca. 3 kV Zwischenkreisspannung zu 100 FIT ermittelt. Neben dem Betrieb mit konstant anliegender Zwischenkreisspannung wurde auch die Situation bei Schaltbetrieb untersucht. Simulationen bestätigen, dass durch die Begrenzung der elektrischen Feldstärke im Bauelement ein zusätzlicher, dynamischer Anteil der FIT-Rate vernachlässigbar ist, wenn sich die auftretenden dV/dt -Werte im Rahmen bis zu $2 \text{ kV}/\mu\text{s}$ bewegen.

Die 4,5-kV-Trench/Feldstopp-IGBT und EC-Diode wurden speziell für die Anforderungen industrieller Anwendungen und, im IHV-B-Gehäuse, für

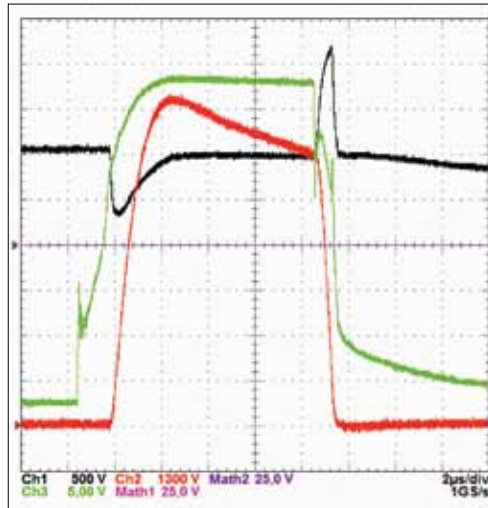


Bild 4. Kollektorstrom und -spannung sowie Gate-Spannung im Kurzschlussfall bei 3000 V, 125 °C, $U_{ge} = 17 \text{ V}$ ($U_{ce} = 500 \text{ V/div}$; $I_c = 1,3 \text{ kA/div}$; $U_{ge} = 10 \text{ V/div}$).

HGÜ-Anwendungen entwickelt. Wesentliche Eigenschaften von IGBT und Diode sind die Optimierung auf geringstmöglichen Durchlass und schnelles Einschaltverhalten auch unter höchsten Spannungen und Strömen jenseits der Standardbedingungen. Der FZ-1200R45HL3 zeigt dabei auch im Kurzschlussfall eine sehr gute Abschaltfähigkeit. Die Bauelemente sind ausgelegt für Betriebstemperaturen bis $+150$ °C. Diese Kennwerte konnten durch die Trench-Technologie sowie Adaption des bereits beim 6,5-kV-IGBT zum Einsatz kommenden Trenchzellen-Design und der Vertikalstruktur mit HDR erreicht werden. ag

Thomas Schütze

betreut als Senior Manager Technical Marketing bei der Infineon Technologies AG die IGBT-Spannungsklassen von 3300, 4500 und 6500 V. Er ist seit 17 Jahren in unterschiedlichen Positionen für das Technische Marketing und den Kunden-Support für Hochleistungsmodule zuständig. Nach seiner Promotion auf dem Gebiet Leistungselektronik an der Technischen Universität Berlin war er fünf Jahre als Entwickler von Traktionsantrieben für U-, S- und Straßenbahnen tätig.

Thomas.Schuetze@Infineon.com

Josef Georg Bauer

ist bei Infineon Technologies AG seit 15 Jahren als Senior Specialist R&D und Projektleiter für Bauelemente-Entwicklung, IGBTs und Dioden der Spannungsklassen von 3300 V bis 6500 V, tätig. Nach dem Studium Physikalische Technik an der Hochschule München war er bei Siemens CT als Entwickler von optoelektronischen Bauelementen in III-V-Halbleiter beschäftigt.

Josef-Georg.Bauer@Infineon.com