

Kleiner Punkt mit großer Wirkung

High-Power-Technologie für IGCTs

Tobias Wikström, Sven Klaka



Um die Performance leistungselektronischer Systeme zu steigern, die Größe und Kosten zu reduzieren und eine höhere Flexibilität beim Design leistungselektronischer Anwendungen zu gewährleisten, wird versucht, die Nennströme und -spannungen von Leistungshalbleitern zu erhöhen. Der IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) ist zwar das Halbleiterbauelement mit der höchsten Leistung, doch aufgrund seiner Geometrie ist er auch am schwierigsten zu schalten. Die neue High-Power-Technologie (HPT) von ABB ermöglicht IGBTs mit einer bisher unerreichten Leistungsfähigkeit.

Halbleiter

Der IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) ist ein Leistungshalbleiterschalter, der für Anwendungen mit besonders hohen Leistungen ausgelegt ist. Da der IGCT vom Thyristor abstammt, ist er in der Lage, große Mengen elektrischer Leistung in einer einzigen Komponente zu schalten. Aufgrund dieser Fähigkeit wird der IGCT in Mittelspannungsantrieben, Netzkupplungen, statischen Kompensatoren (sog. STATCOMs), Halbleiterschaltern und Choppern eingesetzt.

Als der IGCT in den 1990er Jahren als handbetriebener abschaltbarer Thyristor (Gate Turn-off Thyristor, GTO) eingeführt wurde, ähnelte sein Grundaufbau noch stark dem eines normalen GTO-Thyristors **Infobox**. Der Hauptunterschied bestand in der Ansteuerung (der sogenannten „harten“ oder Hard-Drive-Ansteuerung), mit der der Thyristor wie der IGBT¹⁾ ausschließlich im pnp-Transistormodus abgeschaltet wird.

Da das Schalten von pnp-Strukturen homogener ist als bei npnp-Strukturen wie beim GTO-Thyristor, ist der Betrieb ohne Schutzbeschaltungen (sog. „Snubbers“) und die Verwendung von verlustarmem Silizium möglich. Im Durchlasszustand verhält sich der IGCT wie ein Thyristor im durchgeschalteten Zustand. Dies ermöglicht äußerst geringe Durchlassverluste und eine hohe Flexibilität bei der Anpassung der Eigenschaften an die jeweilige Anwendung.

Erweiterung des SOA

Eine besondere Herausforderung für die IGCT-Technologie ist seit jeher die Erhöhung des Abschaltvermögens, das durch den sogenannten RBSOA (Reverse Bias Safe Operating Area = sicherer Arbeitsbereich in Sperrrichtung)²⁾ definiert wird. Bei kleinflächigen IGBTs liegt der RBSOA mit über 1 MW/cm² deutlich oberhalb der Grenze, ab der andere Faktoren wie Verluste und die Stoßstromfestigkeit ausschlaggebender

sind. Je größer die Fläche, desto geringer ist die spezifische Belastbarkeit. Dabei verhält sich der RBSOA annähernd proportional zur Quadratwurzel der Bauelementfläche. Der RBSOA des gängigsten 4“-IGCT von ABB (5SHY 35L4510) liegt bei 3.500 A bei 2,8 kV DC. Mit der im Folgenden beschriebenen High-Power-Technologie (HPT) wird dieser Wert auf 5,5 kA erhöht und damit nahezu verdoppelt. Die tatsächliche Belastbarkeit der HPT-Technologie beträgt über 7 kA.

Der IGCT im Betrieb

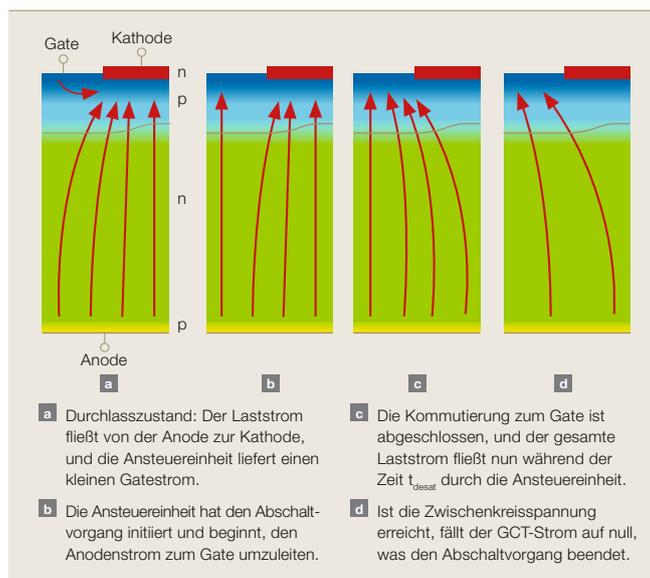
Der Grund für die sublineare Skalierung des RBSOA liegt in den Einzelheiten des Abschaltvorgangs des IGCT. Der schematische Aufbau eines IGCT umfasst das Hauptschaltelement, den GCT

und die Ansteuereinheit, die die Vorspannung der pn-Sperrschicht zwischen den Kathoden- (n) und den Gatekontakten (p) steuert. Im Durchlasszustand liefert die Ansteuereinheit einen kleinen Durchlassstrom, der den Thyristor im durchgeschalteten Zustand hält **1**. Während des Abschaltvorgangs spannt die Ansteuereinheit die pn-Sperrschicht durch Aktivierung des Abschaltkanals (rot gekennzeichnet in **3**) in Sperrrichtung vor. Der Abschaltkanal ist eine niederinduktive Spannungsquelle, die gerade eben unterhalb der Rückwärts-Sperrfähigkeit der pn-Sperrschicht vorgespannt wird. Dadurch wird der Kathodenstrom in den Gatekreis „gezwungen“. Die Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, wird von der Streuimpedanz des Gatekreises bestimmt (**2** zeigt die Stromzunahme in der Zeit t_{com}). Damit das Element wie ein pnp-Transistor funktioniert, muss der gesamte Laststrom von der Kathode umgelenkt werden.

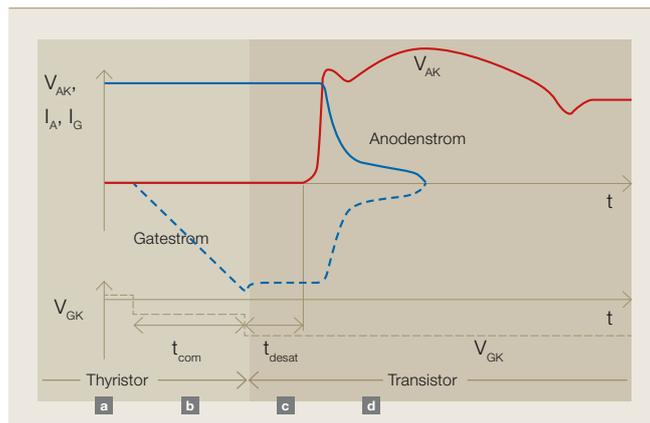
Die Ansteuereinheit muss nicht nur die gesamten Anodenströme aufnehmen, sondern auch die Kommutierung in deutlich weniger als 1 μ s durchführen. Sobald diese Zeit verstrichen ist, beginnt der IGCT, Spannung aufzubauen (nach Beendigung von t_{com} und t_{desat} **2**). Für einen sicheren Betrieb ist es unerlässlich, dass das Element nun im pnp-Transistormodus arbeitet.

Betrachtet man den IGCT als einzelnes leistungstechnisches Element, besteht offensichtlich eine makroskopische Bedingung hinsichtlich der Geschwindigkeit, die erfüllt werden muss, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten – die Grenze der harten Ansteuerung. Diese

1 Stromfluss (rote Pfeile) in einem IGCT-Segment während des Abschaltvorgangs. Die Phasen **a-d** sind in **2** dargestellt.



2 Wellenform von Spannung, Gate- und Anodenstrom während des Schaltvorgangs



Fußnoten

¹⁾ Mehr über IGBTs lesen Sie in den Artikeln „Auf das Packaging kommt es an“ auf Seite 9 und „Das Plus an Leistung“ auf Seite 19 dieses Hefts.

²⁾ Ein sicherer Arbeitsbereich (SOA) ist der Spannungs- und Strombereich, über den ein Element betrieben werden kann, ohne selbst Schaden zu nehmen. Der RBSOA ist der sichere Arbeitsbereich, wenn das Element abgeschaltet ist.

entspricht dem Kreuzungspunkt in **4**. Hierbei handelt es sich um ein charakteristisches Merkmal sowohl des GCT-Wafers, da verschiedene Waferdesigns mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ($t_{com} + t_{desat}$) reagieren, als auch der Ansteuereinheit (t_{com}) aufgrund ihrer Streuimpedanz.

Herausforderungen beim echten Gerät
Großflächige Elemente sind anspruchs-

Infobox GTO-Thyristoren

Normale Thyristoren können nur ein- aber nicht wieder abgeschaltet werden. Das Einschalten erfolgt mithilfe eines Gate-signals. Auch wenn das Gatesignal entfernt wird, bleibt der Thyristor im Durchlasszustand, d. h. leitend. Ein GTO-Thyristor (Gate Turn-Off Thyristor) kann hingegen durch ein Gatesignal mit negativer Polarität auch wieder abgeschaltet werden. Das Einschalten erfolgt durch einen positiven Stromimpuls zwischen den Gate- und Kathodenanschlüssen. Um den GTO-Thyristor im Durchlasszustand zu halten, ist ein kleiner positiver Gatestrom erforderlich. Das Abschalten erfolgt mithilfe eines negativen Spannungsimpulses zwischen Gate und Kathode. Ungefähr ein Drittel bis ein Fünftel des Durchlassstroms wird umgelenkt, wodurch eine Spannung zwischen Kathode und Gate induziert und der GTO in den Sperrzustand versetzt wird. Der Abschaltvorgang ist beendet, wenn sämtliche Ladungen aus dem Element entfernt sind. Daher ist die maximale Frequenz für den Einsatz von GTO-Thyristoren auf etwa 1 kHz beschränkt.

voller, da mit der Stromstärke auch die Anforderungen hinsichtlich der Streuimpedanz des Gatekreises steigen.

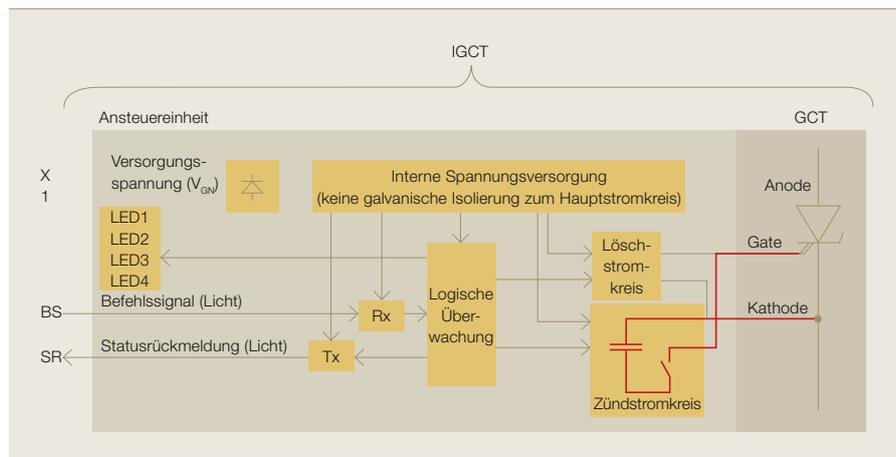
Das Titelbild zu diesem Artikel zeigt den neuesten 5,5-kA-GCT-Wafer mit Tausenden von parallelen GCT-Segmentverbindungen, die alle synchron betrieben werden müssen, um eine inhomogene Verteilung des Stroms zu verhindern. Die Segmente sind in zehn Ringen auf dem Wafer angeordnet. Der ebenfalls ringförmige Gatekontakt befindet sich zwischen dem fünften und sechsten Segmentring.

Zwangsläufig weisen diese Segmentringe leicht unterschiedliche Impedanzen zur Ansteuereinheit auf. Eine Simulation der Geometrie von Wafer, Gehäuse und Ansteuereinheit zeigt die unterschied-

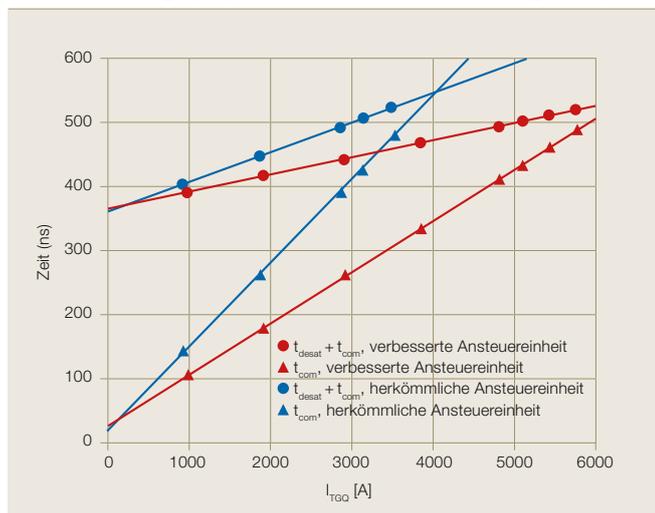
liche Streuinduktivität der einzelnen Segmentringe in Abhängigkeit von der Ringnummer **5**. Dieses Ungleichgewicht ergibt sich ausschließlich aus den Randbedingungen, unter denen der Strom vom Wafer zur Ansteuereinheit fließt. Da die aktive Fläche eines Segmentrings mit der Ringnummer ins Quadrat zunimmt, ist der Strom in den äußeren Ringen am größten. Folglich ist davon auszugehen, dass sich die Auswirkungen dieses Ungleichgewichts in erster Linie in den äußeren Ringen bemerkbar machen. Experimente bestätigen dies. So sind die deutliche Mehrheit der Segmentringe, die zu RBSOA-Verletzungen führen, äußere Ringe.

Dieses Ungleichgewicht in der Induktivität ist ein Ergebnis der geometrischen Auslegung des IGCT-Package. Folglich

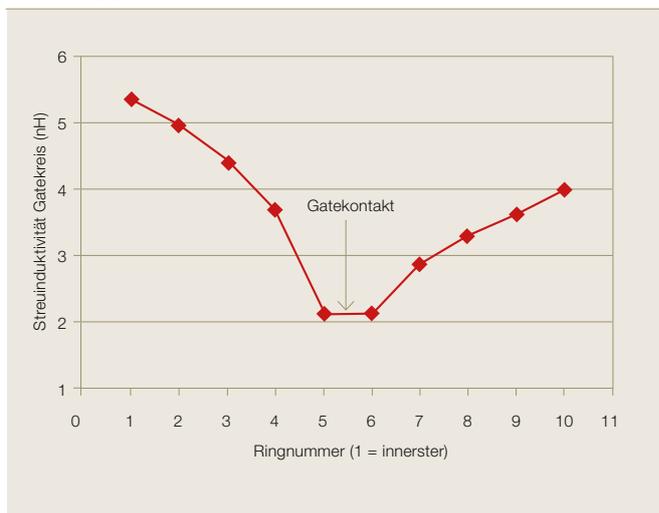
3 Prinzipschaltbild des IGCT mit der Ansteuereinheit und den äußeren Anschlüssen links und dem GCT-Leistungshalbleiter rechts



4 t_{com} und $t_{com} + t_{desat}$ in Abhängigkeit vom Strom bei der HPT-Technologie (rot) und der herkömmlichen Technologie (blau)



5 Streuinduktivität der einzelnen Segmentringe eines GCT-Wafers in Abhängigkeit von ihrer Position



Halbleiter

kommt es im GCT-Element unweigerlich zu einer gewissen Stromumverteilung, wenn sich das Gatesignal über den Wafer ausbreitet. Der zweite Grund, warum eine Vergrößerung der IGCT-Fläche mit Schwierigkeiten verbunden ist, ist die Tatsache, dass die am weitesten vom Gatekontakt entfernten Zellen mit einer höheren Streuinduktivität belastet werden. Das einzige Gegenmittel aus Sicht der Siliziumtechnologie ist die Fertigung eines Wafers, der bei ungleicher Impedanz weniger empfindlich reagiert.

Die Besonderheit des HPT-IGCT von ABB ist eine ausgestülpte p-Basis. Die Hauptmerkmale dieser Technologie sind in 6 dargestellt. Bei der herkömmlichen Technologie ist die Diffusion der p-Basis über den gesamten Wafer homogen. Bei der HPT-Technologie hingegen ist die untere p-Diffusions-schicht unterhalb der Kathodenfinger maskiert. Dies führt zu einem ausgestülpten Erscheinungsbild der p-Basis. Zusammen mit der neuen Ansteuer-einheit hat dies erhebliche Auswirkungen auf den RBSOA. Es ist schon erstaunlich, welche Wirkung ein derart kleiner Punkt mit reduzierter Dotierung haben kann.

Die neue Technologie...

Die HPT-Technologie ist in asymmetrischen IGCT-Versionen mit 4,5 und 6,5 kV erhältlich. 7 zeigt das neue Design eines HPT-IGCT von ABB.

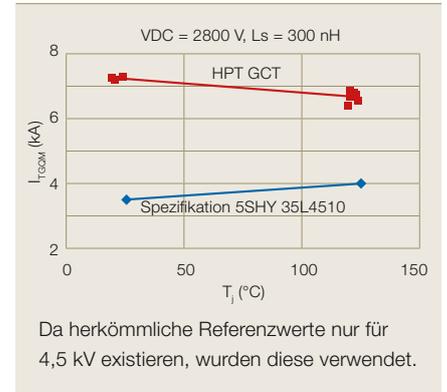
Dank der HPT-Technologie konnte die Zerstörungsgrenze des IGCT bei 125 °C um 50% und bei Raumtemperatur um 80% erhöht werden. Der IGCT weist bei maximal schaltbarem Strom einen negativen Temperaturkoeffizienten auf. Das bedeutet, dass für ihn nun die gleichen Beschränkungen gelten wie bei IGBTs 8.

Aufgrund seiner Robustheit ist der HPT-IGCT in der Lage, dem Betrieb im sogenannten Switching-Self-Clamping-Modus (SSCM) standzuhalten. Hierbei handelt es sich um einen strengen Maßstab für die Robustheit, der im Zusammenhang mit IGBTs in den letzten fünf Jahren umfassend beschrieben wurde.

... und ihre Zukunft

Neben den oben genannten unmittelbaren Vorteilen legt die neue Technologie den Grundstein für folgende zukünftige Verbesserungen im Bereich der IGCTs:

- 8 Der maximale Abschaltstrom eines HPT-IGCT im Vergleich zu einem herkömmlichen IGCT.



- In Zukunft werden die Abschaltströme von 10-kV-IGCTs mit denen heutiger 6-kV-Elemente vergleichbar sein.
- Grundsätzlich ermöglicht die HPT eine bessere Homogenität des Abschaltvorgangs über den Waferquerschnitt hinweg.
- Eine weitere Vergrößerung des Waferquerschnitts scheint möglich.

Nimmt man diese Vorteile zusammen, so ist es sehr wahrscheinlich, dass in naher Zukunft größere IGCTs in der Lage sein werden, über 4 kA gegen Gleichspannungen von über 6 kV zu schalten. Dies wiederum ermöglicht die Realisierung von Dreipunkt-Mittelspannungsantrieben mit 20 MW für 6-kV-Drehstrommotoren, ohne die Notwendigkeit einer Reihen- oder Parallelschaltung.

Am anderen Ende des Anwendungsspektrums ergeben sich aufgrund des enormen Abschaltvermögens in Verbindung mit einem potenziell thyristorartigen Durchlassspannungsabfall weitere Möglichkeiten für den Einsatz von IGCTs als verschleißfeste statische Leistungsschalter.

Mehr über das ABB IGCT- und IGBT-Produktangebot lesen Sie im Artikel „Das Geschäft mit den Halbleitern“ auf Seite 6 dieses Hefts.

Tobias Wikström

Sven Klaka

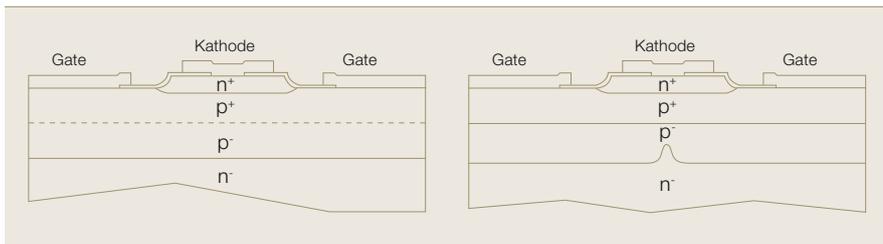
ABB Semiconductors

Lenzburg, Schweiz

tobias.wikstroem@ch.abb.com

sven.klaka@ch.abb.com

- 6 Aufbau und Dotierung einer herkömmlichen GCT-Zelle (links) und die HPT-Technologie mit ausgestülpter p-Basis (rechts)



- 7 Der neue HPT-IGCT von ABB ist als 4,5-kV- und 6,5-kV-Variante erhältlich.

