

IGBT-Grundlagen

Teil 2: Dynamische Kenndaten und Betriebsverhalten

IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) verbinden die einfache Ansteuerung und hohe Schaltgeschwindigkeit einer MOSFET-Struktur mit der für bipolare Bauelemente kennzeichnenden Eignung für hohe Stromstärken. Auch hinsichtlich des Spannungsabfalls sind IGBTs vorteilhaft. Die Anfang der 1980er Jahre entwickelte IGBT-Technologie hat es in Applikationen mit Spannungen über 400 V und Schaltfrequenzen bis 130 kHz rasch zu großer Verbreitung gebracht.

MARIO ALEO

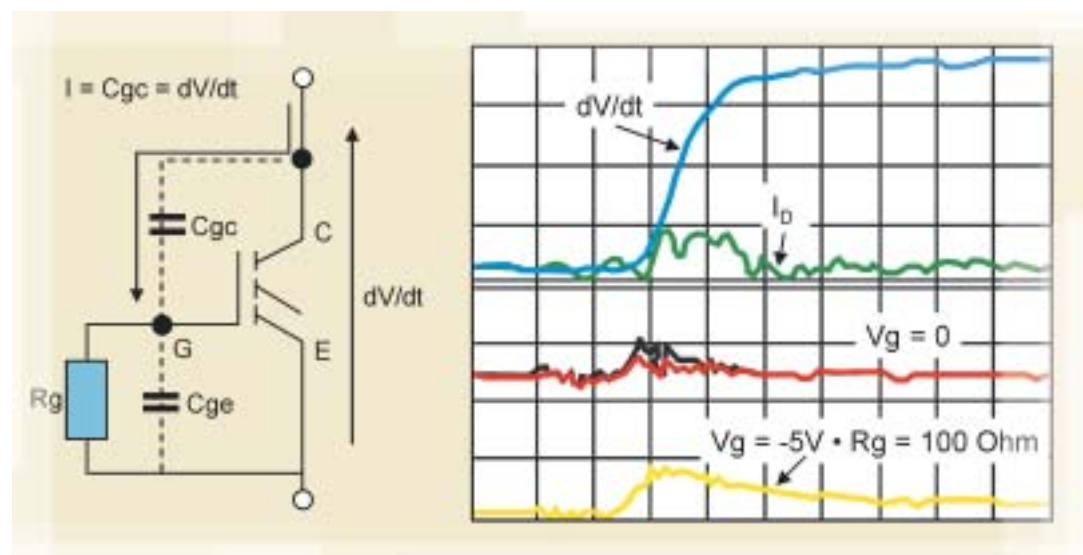


Abb.1: Auswirkung von R_g auf dV/dt



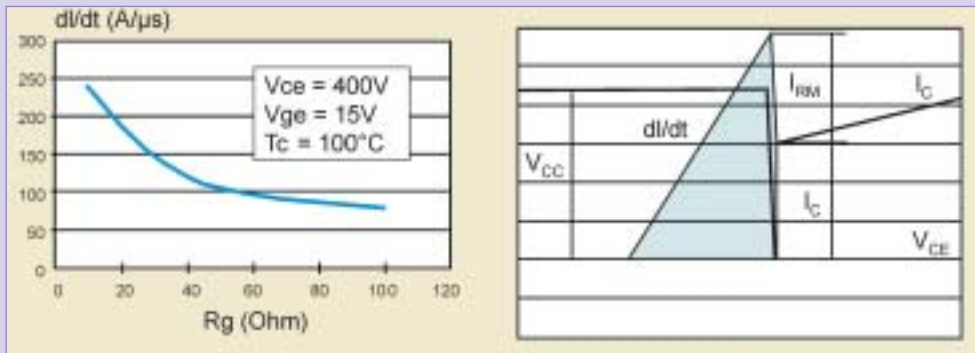
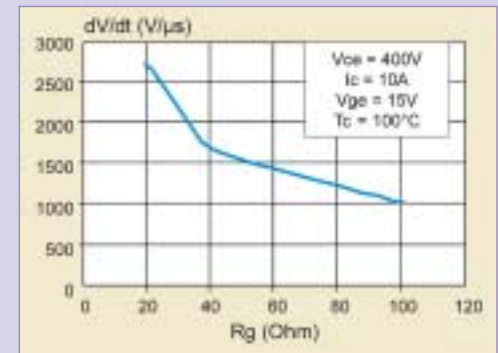
Mario Aleo ist Senior Technical Marketing Engineer bei STMicroelectronics

Teil 1 des Beitrags (DESIGN & VERIFICATION 5, more@click DV52201) ging zunächst kurz auf die Struktur und die physikalischen Aspekte des IGBT ein und widmete sich anschließend den wichtigsten statischen Kenndaten. Der Teil 2 des Beitrags diskutiert die dynamischen Kenndaten und das Verhalten des Bausteins im Betrieb. Insgesamt erhält der Leser

somit einen vollständigen Überblick über die wichtigsten Parameter, die Merkmale sowie das statische und dynamische Verhalten dieses Leistungshalbleiters.

Dynamische Kenndaten

Die dynamischen Kenndaten geben Auskunft über das Verhalten eines Bauelements während

Abb. 2: Auswirkungen von R_g auf di/dt und den Energiefluss beim EinschaltenAbb. 3: Abhängigkeit zwischen dV/dt und R_g

der Schaltvorgänge. Ein Blick auf die Ersatzschaltung eines IGBT macht deutlich, dass das Ansteuersignal für einen IGBT an den MOSFET gelegt werden muss.

Die Treiberschaltung für einen IGBT entspricht damit praktisch derjenigen für einen MOSFET und ist weniger komplex als die Treiberkonfiguration für einen Bipolartransistor. Beim Anlegen einer positiven Gate-Vorspannung wird im MOSFET ein N-Kanal gebildet. Liegt die von dem hieraus resultierenden Stromfluss hervorgerufene Spannung im Bereich von 0,7V, so wird die P+/N--Sperrschicht in Durchlassrichtung vorgespannt, sodass Minoritätsträger in den N-Bereich injiziert werden und durch Löcher ein bipolarer Strom fließt. Die Einschaltzeit ist eine Funktion der Ausgangsimpedanz der Treiberschaltung und der angelegten Gate-Spannung. Die Geschwindigkeit des Bausteins lässt sich über den Wert des Gate-Widerstands R_g (Abb. 1) variieren. Man verändert hiermit die Geschwindigkeit,

mit die eingangsseitigen parasitären Kapazitäten C_{ge} und C_{gc} geladen werden.

Anders ausgedrückt: Durch Verändern von R_g lässt sich die Zeitkonstante des parasitären Stromkreises aus R_g und $C_{ge}+C_{gc}$ und damit auch dv/dt beeinflussen. Die üblicherweise verwendete und in den Datenblättern zugrundeliegte Gate-Ansteuerspannung ist 15V. In Abbildung 2 finden sich die Signalverläufe für das Schalten einer induktiven Last. Abbildung 3

dagegen zeigt di/dt als Funktion von R_g und macht den Einfluss des Gate-Widerstands auf die Einschaltgeschwindigkeit des IGBT deutlich.

Der Wert von R_g hat deshalb starken Einfluss auf die Schaltverluste, denn er wirkt sich, wie in der Abbildung gezeigt, auch auf dv/dt aus.

Auch am Abschaltverhalten des IGBT wird das hybride, die Eigenschaften von Leistungsmosfets und bipolaren Sperrschicht-Transistoren

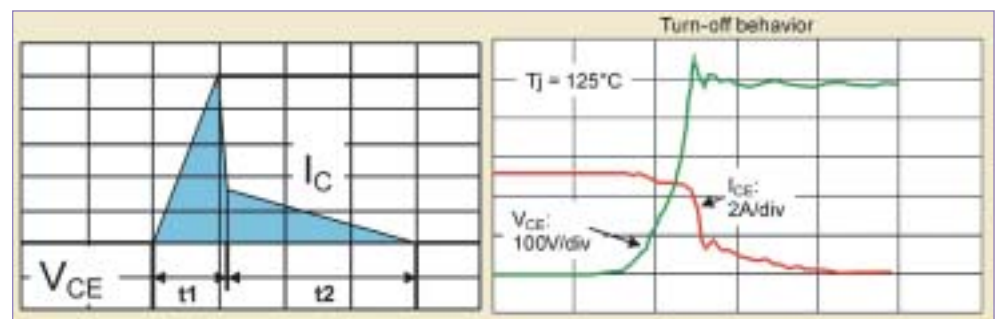


Abb. 4: Abschaltverhalten des IGBT bei induktiver Last

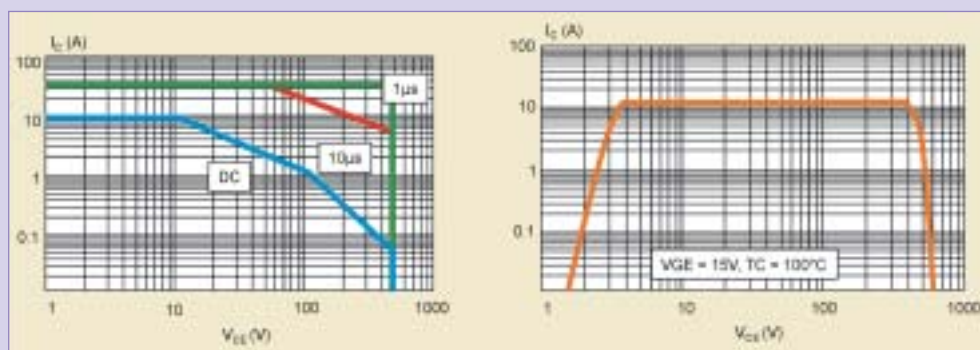
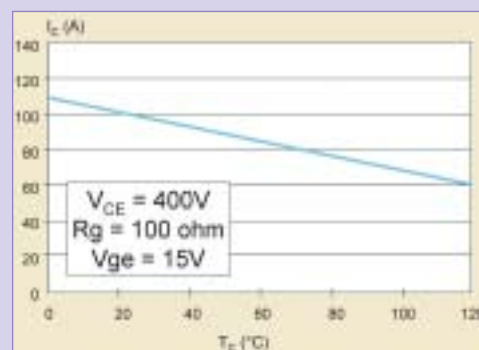


Abb. 5: SOA

Abb. 6: Veränderung von I_{latch} als Funktion der Temperatur

sistoren kombinierende Wesen des IGBT deutlich. Sobald das Ansteuersignal am Gate so weit absinkt, dass der Miller-Effekt einsetzt, beginnt V_{CE} anzusteigen. Wie schon zuvor erwähnt, geht der Strom, nachdem V_{CE} den Maximalwert erreicht, abhängig vom Treiber und dem Miller-Effekt von C_{ge} und C_{gc} nicht umgehend auf Null zurück, sondern nimmt die typische Form einer Schleife an, deren Länge ausschließlich von der Lebensdauer der Minoritätsträger bestimmt wird.

Diese Ladungsträger, die während der positiven Ansteuerung des Bausteins in die N-Region injiziert wurden, sind die Hauptursache dafür, dass der IGBT in seinem Schaltverhalten dem MOSFET unterlegen ist. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diesen Effekt zu reduzieren. Zum Beispiel ist es möglich, den Prozentsatz der beim Einschalten aus dem P+-Substrat injizierten Löcher zu verringern und gleichzeitig die Rekombinationsgeschwindigkeit zu steigern, indem man die Dotierungsstärke und die Dicke der Pufferschicht anhebt. Der Nachteil dieser Maßnahmen ist eine Schmälerung der Stromtragfähigkeit wegen der Zunahme von $V_{CE(sat)}$ sowie wegen möglicher Latching-Probleme.

Der sichere Arbeitsbereich

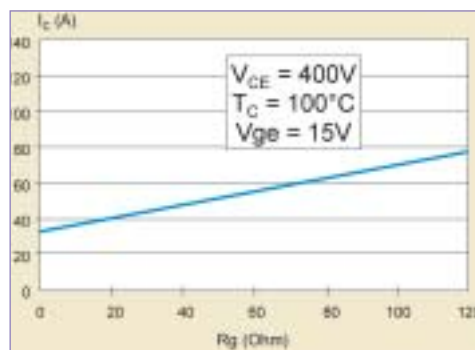
Der SOA (Safe Operating Area) eines IGBT lässt sich in drei Hauptabschnitte einteilen, die gemäß Tabelle 1 eingeteilt werden.

Die Kurven, die die Robustheit in Durchlassrichtung (Forward Bias Safe Operating Area;

FBSOA), in Sperrichtung (Reverse Bias Safe Operating Area; RBSOA) und im Kurzschlussbetrieb (Short Circuit Safe Operating Area; SCSOA) beschreiben, sind normalerweise in jedem Datenblatt angegeben.

FBSOA

Bei diesem Teil des SOA handelt es sich um den Bereich, in dem während der Einschaltspitze der Stromfluss sowohl auf Elektronen als auch auf Löchern basiert. Die maximale Spannung, die der Baustein verkraftet, während I_C im Sättigungsbereich ist (Abb. 5), stellt die physikalische Grenze dar.

Abb. 7: Veränderung von I_{latch} als Funktion von R_g

RBSOA

Dieser Bereich entspricht der Abschaltspitze, bei der die Gate-Ansteuerspannung Null ist oder negatives Vorzeichen hat, während I_C nach wie vor fließt, da der Löcher-Strom noch

nicht eingedämmt ist. In dieser Phase kann es im weiter oben beschriebenen parasitären Transistor zu einem Latch-up kommen, wenn der Strom zu steil ansteigt. In diesem Fall ist der Baustein nicht mehr über das Gate steuerbar. IGBTs neuester Bauart legen dieses Verhalten nicht mehr an den Tag, da man durch Veränderungen von Struktur und Prozess dafür sorgen kann, dass das Triggern dieses parasitären SCR (Silicon Controlled Rectifier) bei einer Stromstärke auftritt, die weit über den während des normalen Betriebs vorkommenden Strömen liegt (typisch beträgt I_{latch} mehr als das Fünffache des nominellen Kollektorstroms). Abbildung 6 und 7 zeigen, wie sich der Latch-Strom als Funktion von Sperrschichttemperatur und Gate-Widerstand verändert.

SCSOA

Für die Messung des SCSOA wird der Baustein bei seiner Betriebsspannung eingeschaltet und die maximale Zeit gemessen, für die die Ansteuerschaltung den Prüfling steuern kann. Abbildung 8 zeigt den Signalverlauf und die Aus-Zeit dreier Bauelemente mit vergleichbaren Eigenschaften, die jedoch mit verschiedenen Technologien hergestellt wurden.

Die maximale Betriebsfrequenz

Die Schaltfrequenz ist ein sehr wichtiges Kriterium bei der Auswahl eines IGBTs. Die große

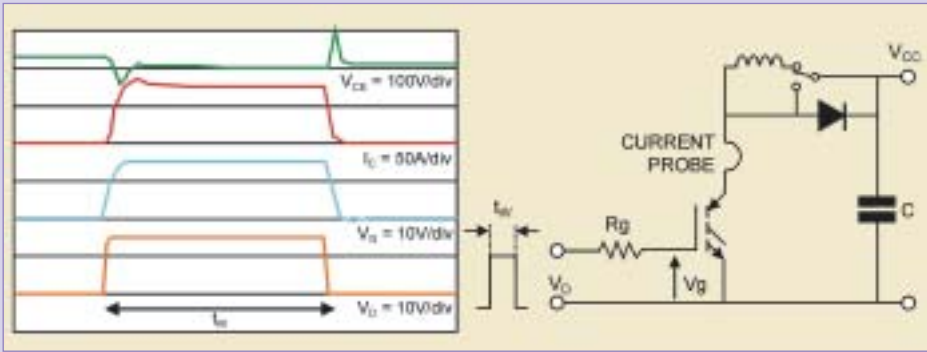


Abb. 8: Kurzschlussprüfung

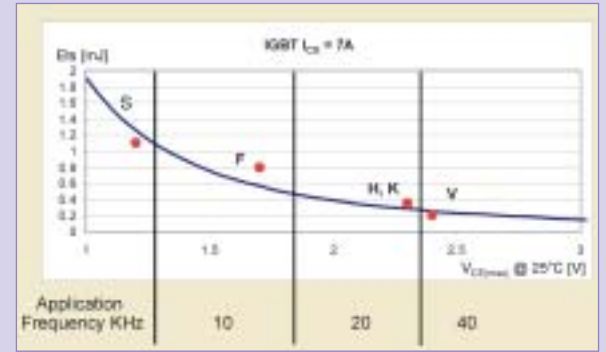


Abb. 10: Kompromiss zwischen $V_{CE(sat)}$ und E_{ts}

Bedeutung dieses Parameters erklärt sich aus dem unmittelbaren Zusammenhang mit der Verlustleistung des Bausteins. Aus diesem Grund bieten alle Hersteller mehrere Produktfamilien an, die jeweils für den Betrieb mit unterschiedlichen Schaltfrequenzen ausgelegt sind.

STMicroelectronics bietet zur Zeit zwei Produktserien (H und S) an, doch sind bereits weitere Familien in der Entwicklung (K, F und L). Der Entwickler hat dadurch die Möglichkeit, für jede Anwendung einen Baustein mit der optimalen Kombination aus Leitungs- und Schaltverlusten zu finden.

Man kann die Leitungsverluste als jene Verluste definieren, die entstehen, während der Strom fließt. Sie werden in erster Linie durch $V_{CE(sat)}$ bestimmt:

$$P_{cond} = V_{CE} \cdot I_C \cdot d \quad (d \text{ ist das Tastverhältnis})$$

Die Schaltverluste hängen von der Kommutierung des IGBT ab. Sie stehen hauptsächlich mit der Gesamtenergie E_{ts} zusammen, die während des Betriebs anfällt, und werden direkt von der Betriebsfrequenz f des jeweiligen Geräts bestimmt.

$$P_{sw} = E_{ts} \cdot f$$

Die Gesamtverluste sind somit die Summe zweier Terme:

$$P_{tot} = P_{cond} + P_{sw}$$

Somit wird deutlich, dass die Gesamt-Verlustleistung in erster Linie von den beiden Parametern E_{ts} und $V_{CE(sat)}$ beeinflusst wird.

Die Wahl des richtigen Kompromisses zwischen diesen beiden Variablen, die direkt von der IGBT-Technologie beeinflusst werden, gibt dem Entwickler die Möglichkeit, die im jeweiligen Endgerät anfallende Verlustwärme zu minimieren.

Abhängig von der Betriebsfrequenz des Endgeräts und der Stromstärke (beide hängen von den Spezifikationen der Applikation ab) werden somit unterschiedliche Bauelemente gewählt, um die Leistungsaufnahme zu minimieren.

STMicroelectronics bietet speziell im Bereich der Stromstärken, die sich ideal für Motorsteuerungs-Anwendungen eignen, einen optimalen Kompromiss zwischen E_{ts} und $V_{CE(sat)}$ (Abb. 10) an. Durch die Art der Dotierung kann ferner erreicht werden, dass $V_{CE(sat)}$ mit zuneh-

mender Temperatur abnimmt, was für den Einsatz des Bausteins weitere Vorteile mit sich bringt. Darüber hinaus werden auch neue Familien mit anderen Kombinationen von E_{ts} und $V_{CE(sat)}$ entwickelt. Die vergrößerte Produktauswahl soll den Entwicklern mehr Unabhängigkeit bei der Festsetzung der Designkriterien verleihen.

www.publish-industry.net
[more@click DV92201](mailto:more@click@DV92201)

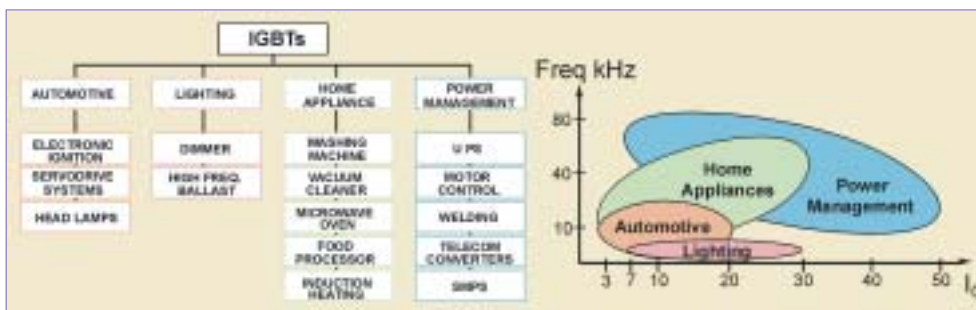


Abb. 9: Eigenschaftsprofile verschiedener Anwendungsgebiete

Tabelle 1: Einteilung der sicheren Arbeitsbereichs			
	Spannung	Strom	Physikalische Grenze
Zone 1	hoch	gering	Durchbruchspannung
Zone 2	gering	hoch	Latch-up
Zone 3	hoch	hoch	Verlustleistung