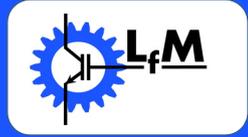




Dr.-Ing. Stefan Hain

„Leistungsfähigkeit und Kurzschlussschutz von spätentsättigenden Micro Pattern Trench IGBTs“

Promotionsprüfung am 24.10.2018

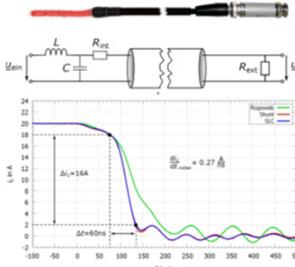


Motivation

Die Effizienz von Halbleitertransistoren bestimmt maßgeblich den Wirkungsgrad von leistungselektronischen Systemen. In dieser Dissertation wird untersucht, wie die Leistungsfähigkeit von 1200V IGBTs durch eine MPT-Steuerkopfstruktur in Verbindung mit einer maximal erhöhten Kanalweite gesteigert werden kann. Da durch den damit verbundenen, stark erhöhten Entsättigungsstrom eine Desat-Kurzschlusserkennung nicht mehr angewendet werden kann, wird in dieser Arbeit eine neuartige, extrem schnelle Kurzschlusserkennung vorgestellt, welche es erlaubt das Potential von spätentsättigenden MPT-IGBTs vollständig auszuschöpfen.

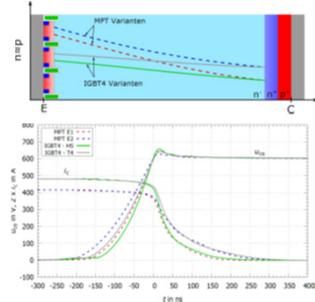
SLC-Stromsensoren

Zur Bestimmung der Steigerung der Leistungsfähigkeit müssen die Schaltverluste der MPT-IGBTs präzise gemessen werden. Zu diesem Zweck wurden in dieser Arbeit die SLC-Stromsensoren sowie deren Auswertesoftware entwickelt, mit welcher der Stromverlauf eines Schaltvorgangs niederinvasiv und mit einer hohen Bandbreite (>150 MHz) gemessen werden kann. Dies ermöglicht die Realisierung von extrem niederinduktiven Kommutierungszellen mit einer Strommessung.

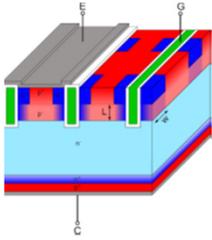


MPT-Technologie

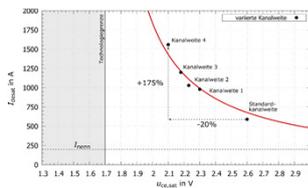
Die MPT-Technologie basiert auf einer reduzierten Mesa-Breite (<1µm) im Steuerkopf, wodurch ein Abfließen der Löcher auf der Vorderseite des IGBTs erschwert wird. Das Resultat ist eine emittenseitig angehobene Ladungsträgerdichte, wodurch die Leitfähigkeit in der Driftzone signifikant verbessert werden kann. Da bei einem Ausschaltvorgang die erhöhte Trägerüberschwingung am Emittor bereits bei kleinen Spannungen ausgeräumt wird, werden die Ausschaltverluste kaum beeinflusst.



Spätentsättigende MPT-IGBTs



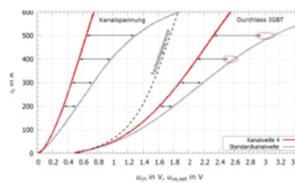
Eine weitere Möglichkeit, die Sättigungsspannung eines IGBTs zu reduzieren, liegt in der Erhöhung der Kanalweite. Auf diese Weise wird der Kanalspannungsabfall der Elektronen im Steuerkopf verringert, ohne dabei die Ladungsträgerverteilung in der Driftzone negativ zu beeinflussen. Dadurch kann die Sättigungsspannung weiter erniedrigt werden, ohne dabei die Ausschaltverluste zu erhöhen.



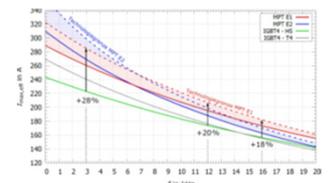
$$I_{desat} = \frac{i_c \cdot (u_{ge} - U_{th})}{2 \cdot (u_{ce,sat} - U_0 - u_{drift})}$$

Allerdings wird durch die erhöhte Kanalweite der Entsättigungsstrom des Transistors so stark erhöht, dass eine Kurzschlussüberwachung mit einer Entsättigungserkennung auf Grund der hohen Verluste nicht mehr möglich ist.

Leistungsfähigkeitssteigerung

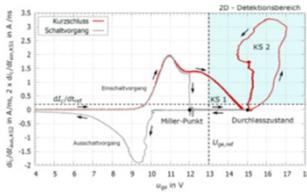


Mit einer speziellen Messmethode und einem Stromspiegel ist es möglich, nur den Kanalspannungsabfall in einem IGBT zu vermessen. So kann gezeigt werden, wie sich die Reduktion des Kanalwiderstands direkt auf die Sättigungsspannung auswirkt. Mit den untersuchten IGBT-Prototypen kann gezeigt werden, dass durch die Erhöhung der Kanalweite, der differentielle Widerstand des IGBTs um mehr als 36% reduziert werden kann.

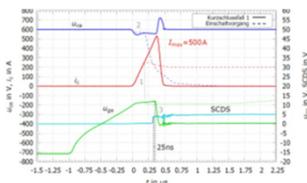


Die Kombination der MPT-Technologie mit einer erhöhten Kanalweite führt zu einer signifikanten Leistungsfähigkeitssteigerung der IGBTs. In der Anwendung eines Antriebswechsellrichters lässt sich, in Abhängigkeit der Schaltfrequenz, eine Erhöhung der Stromdichte von 14-20%, bei vernachlässigbarem Kanalwiderstand (Technologiegrenze) sogar von 18-28% erreichen. Allerdings muss für eine Kurzschlussfestigkeit des Wechsellrichters, eine neue und extrem schnelle Kurzschlusserkennungsmethode gefunden werden.

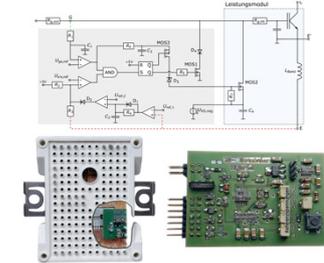
2D-Kurzschlusserkennung



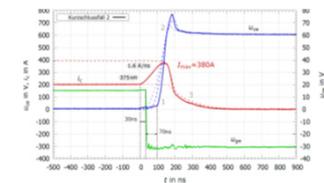
Die 2D-Kurzschlusserkennung basiert auf der simultanen Überwachung des Gatespannungs- und des di/dt-Verhaltens des Halbleiters. Im dazugehörigen Phasendiagramm kann gezeigt werden, dass auf diese Weise ein Kurzschlussfallereignis zum frühest möglichen Zeitpunkt detektiert werden kann.



Ein KS1-Ereignis wird von der 2D-Detektionsplatine bei einem durch den 2D-Detektionsbereich definierten Maximalstrom erfasst. Der zu detektierende Maximalstrom wird durch den Referenzwert der Gatespannung sowie der Transkonduktanz des Halbleiters bestimmt. Da sich der Transistor in diesem Betriebspunkt wie eine spannungsgesteuerte Stromquelle verhält, wählt die 2D-Detektionsplatine einen soft turn-off Prozess als Abschaltstrategie.



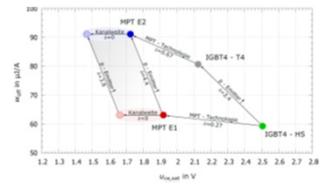
Die entsprechende Kurzschlusserkennungsschaltung überwacht den 2D-Detektionsbereich, ist störstresstolerant gegen Schaltungsoszillationen, unterscheidet KS1- und KS2-Ereignisse in Echtzeit und wählt eine dem detektierten Fehlertyp angepasste Abschaltstrategie für den zu schützenden IGBT aus.



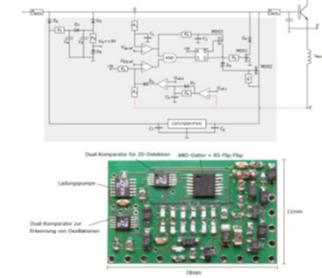
Ein KS2-Ereignis wird von der 2D-Detektionsplatine aufgrund der anliegenden, hohen Gatespannung bereits mit dem auftretenden, positiven di/dt-Verhalten des Fehlerstromes zum frühest möglichen Zeitpunkt, weit vor der Entsättigung des Halbleiters detektiert. Da der IGBT zu diesem Zeitpunkt bereits vollständig mit Ladungsträgern überschwemmt ist, wählt die 2D-Detektionsplatine einen hard turn-off Prozess als Abschaltstrategie, um ein intrinsisches Abschalten des IGBTs zu erzwingen.

Ergebnisse der Dissertation

Das u_{ce,sat}-Woff trade-off Diagramm zeigt, wie weit spätentsättigende MPT-IGBTs den IGBT-Varianten der vierten Generation im Technologiesprung überlegen sind. Ein Parameter, der das trade-off Verhalten zwischen der Sättigungsspannung und den spezifischen Ausschaltverlusten eines IGBTs beschreibt, ist die trade-off Konstante δ.



Da diese erhöhte Leistungsfähigkeit nur mit der 2D-Kurzschlusserkennungsmethode eine robuste und funktionierende Einheit bildet, ist eine 2D-Detektionsplatine entwickelt worden, welche ihre Versorgungsspannung aus der taktenden Gatespannung des zu schützenden IGBTs bezieht. Auf diese Weise ist möglich, das komplette 2D-Kurzschlussschutzsystem in ein Leistungshalbleitermodul zu integrieren.



Als Resultat kann durch die Kombination von spätentsättigenden MPT-IGBTs mit dem integrierten 2D-Kurzschlussschutz ein sich selbst schützendes IGBT-Hochleistungsmodul demonstriert werden.

