

# Commutazioni più efficienti e affidabili con i nuovi JFET SiC da 1200V

Wolfgang Bergner  
Fanny Bjoerk  
Daniel Domes  
Gerald Deboy

Infineon Technologies Austria

La tecnologia Infineon JFET in silicio carbonio è uscita dalla fase sperimentale e consente di fabbricare transistor robusti ed efficienti, ottimi per la realizzazione degli inverter di potenza

Dopo circa dieci anni di sviluppo e produzione di diodi in SiC, Infineon considera matura questa tecnologia e introduce il primo modulo di commutazione realizzato integralmente in SiC. Le proprietà uniche di questo materiale a livello fisico consentono di disegnare dispositivi di commutazione a elevato voltaggio, migliori rispetto ai transistor IGBT e ai transistor di silicio a super-giunzione nonché particolarmente efficienti dal punto di vista energetico. Le bassissime perdite statiche e dinamiche sono le caratteristiche chiave di questa tecnologia, che consente di integrare insieme ai dispositivi di commutazione anche i diodi accessori che servono alla polarizzazione del dispositivo, facendo in modo di assicurare le migliori prestazioni esattamente alla sua frequenza di risonanza.

## La criticità delle prestazioni

La scelta dei dispositivi nei circuiti è sempre più strategica per poter offrire le migliori prestazioni in ogni applicazione. I transistor Mosfet e JFET possono migliorare nettamente le proprie caratteristiche operative se realizzati in silicio carbonio perché così riescono a fornire la massima velocità di commutazione tipica delle "super-giunzioni" disponibili su molti transistor Mosfet di silicio con tensione di lavoro sul migliaio di volt. La tecnologia dei transistor in SiC Mosfet e JFET è ormai diventata matura e offre vantaggi per entrambi i tipi di componenti.

L'obiettivo principale dei ricercatori nei laboratori austriaci Infineon è stato quello di sfruttare la comprovata efficienza della linea di produzione dei propri diodi in SiC per realizzare dispositivi e circuiti con funzionalità più sofisticate. Per i Mosfet, tuttavia, l'utilizzo del SiC comporta difficoltà

legate al processo di ossidazione dei gate causate dalla densità relativamente alta dei difetti molecolari in superficie che aumentano il rischio di errori ed è perciò necessario impiegare strategie di screening capaci di monitorare la qualità superficiale dei semiconduttori e migliorare la qualità operativa dei dispositivi. Dunque, considerando gli attuali processi per la fabbricazione dei diodi in SiC i ricercatori austriaci hanno preferito sperimentare e realizzare transistor in SiC di tipo JFET.

I transistor JFET verticali hanno il relativo vantaggio di essere normalmente interdetti ma hanno anche lo svantaggio di richiedere un circuito di polarizzazione custom con una tensione di accensione negativa generata da un bipolare con elevato consumo di corrente. Ciò significa che per determinare la soglia di tensione operativa occorre tenere presente l'effetto di Drain Induced Barrier Lowering (DIBL) che avvicina pericolosamente la tensione di rottura alla tensione operativa rendendo più critico il processo di fabbricazione. È dunque necessario implementare tecniche di litografia molto precise e per di più ciò rende impossibile l'integrazione nelle strutture VJFET dei diodi accessori a causa dell'accoppiamento capacitivo relativamente alto fra la base e il collettore.

Per questi motivi, in laboratorio il team di ricerca ha scelto la

struttura JFET a canale orizzontale che si vede nella figura 1 dove la soglia può essere determinata e controllata accuratamente e, inoltre, la tecnica di processo permette di conseguire un'ottimale valore per la resistenza di conduzione  $R_{on}$ . Il team ha intenzionalmente scelto di realizzare un transistor che sia normalmente in conduzione perché ciò comporta il vantaggio di una più ampia finestra di scelta fra la soglia

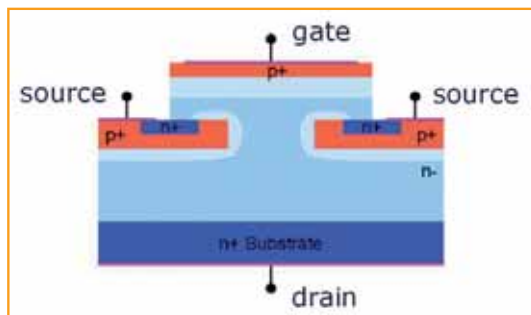


Fig. 1 – Schema della struttura di un transistor JFET in SiC

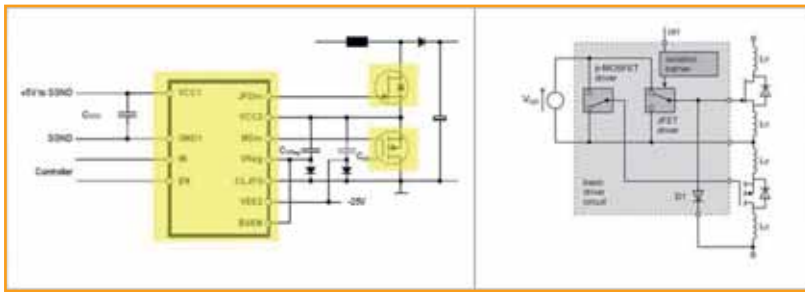


Fig. 2 – Controllo di un JFET SiC normalmente in conduzione tramite un driver dedicato (a sinistra) e un circuito di polarizzazione interno (a destra)

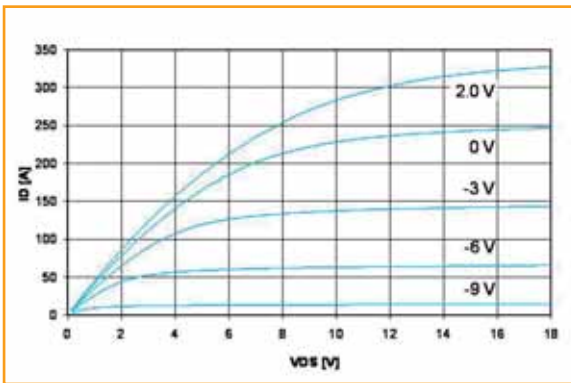


Fig. 3 – Tipiche caratteristiche d'uscita a 25 °C per un JFET da 1200 V con  $R_{on}$  di 35 mOhm, parametrizzate sulla tensione base-emettitore

della tensione di accensione e la tensione massima di conduzione. Si semplifica notevolmente il disegno del circuito di polarizzazione agli alti voltaggi ottenendo migliori margini di scelta e minori perdite nelle commutazioni di accensione e spegnimento. Nel caso di funzionalità normalmente OFF, invece, occorre che le commutazioni avvengano in polarizzazione "Direct Driven JFET" e, per esempio, in una configurazione cascode con un transistor MOS normalmente chiuso in serie al JFET SiC. Come si vede nella figura 2 è necessario impiegare a tal scopo un MOS a canale P perché così si può applicare lo stesso potenziale a entrambi i transistor e, inoltre, il MOS contribuisce meno alla resistenza di conduzione risultante. Per di più, in fase di start-up o in caso di malfunzionamento il MOS normalmente chiuso va in interdizione e costringe il JFET a potenziale positivo rispetto alla sua base inducendolo a sua volta in una condizione d'interdizione di sicurezza. Questo concetto è stato già dimostrato in altri circuiti di potenza come ad esempio negli inverter per i moduli di comando dei pannelli fotovoltaici ed è efficace contro un'ampia tipologia di guasti e malfunzionamenti.

**Caratteristiche ottime**

Il transistor JFET SiC normalmente ON offre le migliori caratteristiche funzionali con un controllo della polarizzazione sulla base accurato e veloce che

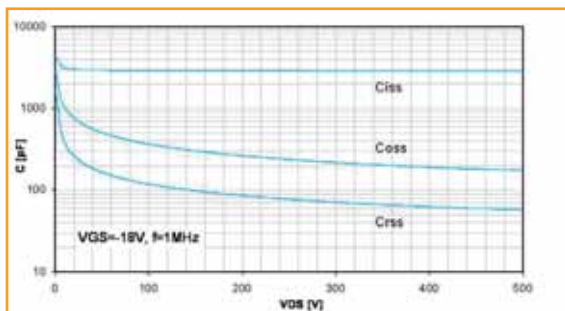


Fig. 4 – Curve delle capacità  $C_{iss}$ ,  $C_{oss}$  e  $C_{rss}$  nel JFET in funzione della tensione collettore-emettitore  $V_{ds}$  con  $V_{gs} = -19V$ ,  $f = 1MHz$  e  $R_{on} = 35mOhm$

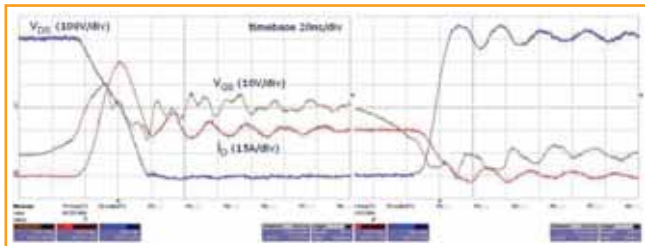


Fig. 5 – Forme d'onda di commutazione per il modulo JFET 1B Direct Driven con  $V_{dc}=600V$ ,  $I_d=30A$  e  $T_j=125^\circ C$



Fig. 6 – Confronto con  $V_{ds}=800V$ ,  $T_j=75^\circ C$  e  $R_g=3\Omega$  fra le perdite di commutazione in accensione e in spegnimento di un JFET SiC da 1200V e 50 mOhm in confronto a un IGBT con diodo Schottky SiC integrato e a un IGBT con diodo Si ad alta velocità

consente di erogare elevate correnti impulsive. La figura 3 mostra i risultati di quest'approccio. Il segreto per riuscire a progettare sistemi più compatti con frequenza di commutazione più elevata è la riduzione delle perdite dinamiche in tutti gli elementi circuitali. Grazie alle proprietà del silicio carbonio i dispositivi realizzati mostrano tutte bassissime capacità parassite e un ulteriore importante vantaggio delle strutture JFET SiC consiste nel netto disaccoppiamento fra la base e il collettore che garantisce misure sperimentali lineari e molto vicine alle caratteristiche ideali di questi componenti.

Tutto ciò si riflette in caratteristiche di carica in base molto favorevoli con una polarizzazione di Miller che avviene a -7 V ossia circa a metà fra le soglie di tensione in accensione e in spegnimento con un netto miglioramento della velocità di commutazione risultante. La sperimentazione in laboratorio sul JFET SiC è stata fatta utilizzando differenti configurazioni circuitali e i risultati delle curve di accensione e spegnimento per la struttura definitiva Easy 1B Module da 30 A e 1200 V sono riportati nella figura 5.

Precisamente, si vedono le forme d'onda della corrente di commutazione fra la parte bassa e la parte alta delle giunzioni

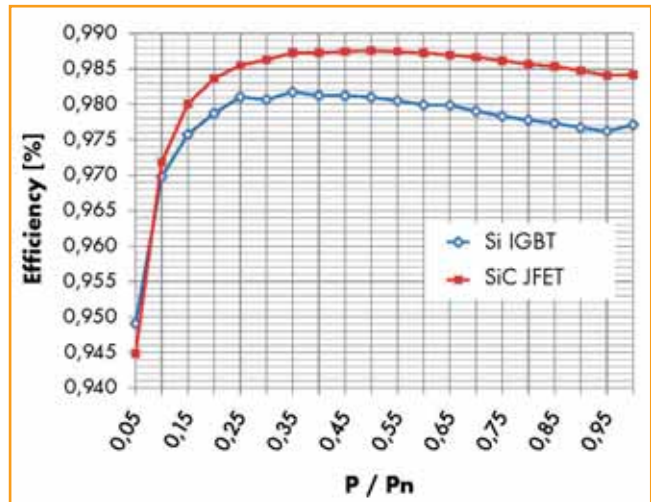


Fig. 7 – Confronto fra l'efficienza di un inverter trifase da 17 kW equipaggiato con tre transistor JFET SiC da 1200 V e 100 mOhm e l'efficienza dello stesso modulo realizzato con due IGBT TrenchStop da 1200V e 40A

del JFET. Durante la commutazione in accensione le curve mostrano la variazione della corrente prodotta dalla caduta di tensione applicata fra collettore ed emettitore e si evince che la maggior parte della corrente inversa generata è di natura capacitiva. Inoltre, la commutazione dei diodi integrati nel JFET può essere comparabile con quella dei diodi Schottky proprio per le basse perdite tipiche di entrambi. Nella figura 6 si vede come le caratteristiche dei JFET SiC in termini di perdite di commutazione offrano prestazioni almeno due volte migliori rispetto all'ultima generazione dei transistor IGBT Infineon e superiori di addirittura un ordine di grandezza rispetto ai transistor IGBT TrenchStop.

### Le conferme sperimentali

Per la convalida sperimentale del nuovo dispositivo e il test delle prestazioni sul campo si è scelto come applicazione di riferimento un inverter trifase da 17 kW con topologia bilanciata e commutazione bipolare. Al modulo sono stati smontati

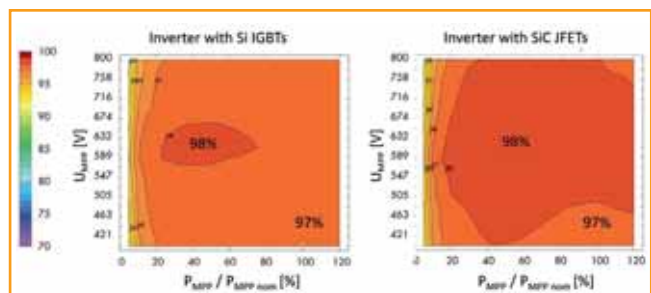


Fig. 8 – L'efficienza dei due inverter con IGBT di silicio e JFET SiC misurata in diversi livelli di tensione di ingresso da 400 fino a 800 V

i due transistor IGBT TrenchStop da 1200 V e 40 A caratterizzati da un'elevata frequenza di commutazione per fase e al posto di ciascuno dei due sono stati installati tre JFET SiC da 1200 V e 100 mOhm integrati insieme ai rispettivi diodi a canale P da 30 V.

La figura 7 mostra l'efficienza dell'inverter nelle condizioni di funzionamento ottimali per diversi livelli di potenza di uscita e si nota una significativa differenza fra le varie curve riportate nel grafico. In particolare, l'efficienza massima per l'inverter equipaggiato con i transistor IGBT di silicio non arriva che al 98,2%, mentre nell'inverter realizzato con i JFET SiC si ottiene il 98,8% anche in presenza di consistenti interferenze elettromagnetiche EMI. L'efficienza in funzione della tensione di ingresso e del carico è misurata con i test PHOTON e viene illustrata nel grafico di figura 8. Anche qui si vede che l'efficienza dell'inverter in SiC è sempre superiore al 98% in un range di tensione molto più ampio rispetto a quanto offerto dall'inverter in silicio.

In definitiva, i transistor SiC JFET da 1200V normalmente in conduzione sono quelli che mostrano le migliori prestazioni di commutazione grazie all'elevata efficienza delle giunzioni che lo costituiscono. Scegliere un JFET SiC per realizzare un inverter, dunque, è vantaggioso anche per evitare la criticità di ossidazione della base in fase di fabbricazione e ottenere dispositivi più efficienti agli elevati voltaggi e più affidabili nelle applicazioni dove occorre maggior robustez-

za funzionale come, ad esempio, nel comando dei pannelli per la conversione dell'energia fotovoltaica. Le migliori prestazioni in termini di robustezza, affidabilità e velocità di commutazione consentono, inoltre, di progettare componenti più compatti e privi di rischi in fase d'installazione e ciò si ripercuote in un miglior rapporto prestazioni/costo. ■