

注目のパワー・デバイスを  
電源回路に組み込んで評価！

## 高効率パワー素子 SiC と CoolMOS の実力を見る

馬場 清太郎  
Seitaro Baba

電子機器に対する省エネ要求は一段と厳しくなってきました。パワー半導体も高効率化を目指して技術開発が行われており、高速スイッチングが得意なダイオードである SiC-SBD(シリコン・カーバイド・ショットキー・バリア・ダイオード)や、ON 抵抗の低いパワー MOSFET である CoolMOS(クールモス)が注目を集めています。

そこで、すでに市販されている SiC-SBD と CoolMOS は、従来型パワー半導体に比べてどの程度優れているのか、PFC 回路に組み込んで比較しました。

### パワー半導体の新しい流れ… SiC とは

#### ■ パワー・デバイスの材料として どのように優れているのか

##### ● 上限温度が高く定常損失が小さい

SiCつまりシリコン・カーバイド(炭化珪素)と従来

型パワー半導体に使われる Si(シリコン)の比較を表 1 に示します。

表中で 4H-SiC は SiC の結晶構造に付けられた名称です。SiC の結晶構造は 200 種類もありますが、市販の SiC-SBD に使用されている結晶構造は 4H-SiC です。

表 1 を見ると、SiC は Si に比べ禁制帯幅(バンド・ギャップ)が約 3 倍、絶縁破壊電界が 10 倍、熱伝導率が 3.3 倍と優れています。禁制帯幅が Si よりも広いことから、動作時の上限温度も高くなります。

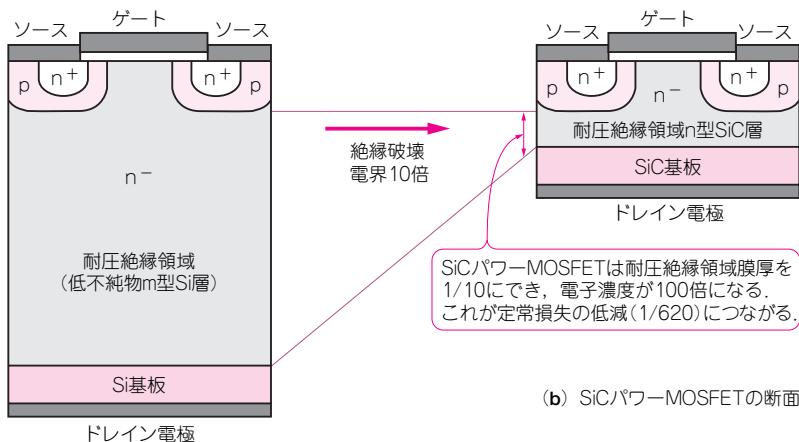
図 1 に示すパワー MOSFET で比較しますと、絶縁破壊電界が 10 倍ですから、耐圧絶縁領域 n<sup>-</sup> を Si に比べ 1/10 の厚さにできます。

図 1 の厚み方向に対する電界分布の傾きでキャリア濃度は決定されます。SiC は伝導に寄与するキャリアが Si の 100 倍も高濃度になって、耐圧絶縁領域の薄さと合わせて、定常損失は Si に比べ 1/620 になります。

材料	禁制帯幅 $E_g$ [eV]	比誘電率 $\epsilon$	電子移動度 $\mu$ [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	絶縁破壊電界 $E_b$ [V/cm]	熱伝導度 $\lambda$	BFOM <sup>(注)</sup> $\epsilon \mu E_b^3$
Si	1.11	11.8	1500	$3 \times 10^5$	1.5	1
4H-SiC	3.26	9.6	1140	$3 \times 10^6$	4.9	620
物性比 (4H-SiC/Si)	2.9 倍	0.81 倍	0.75 倍	10 倍	3.3 倍	620 倍

表 1<sup>(1)</sup>  
Si と SiC の物性比較

注▶ BFOM(Baliga's Figure of Merit) は IGBT の発明者バリガ氏が提唱した性能指数



(b) SiC パワー MOSFET の断面

図 1<sup>(1)</sup>  
SiC と Si を比較

● Siよりバンド・ギャップの広い半導体はSiCだけではない

Siに比べて優れた特性を示す半導体は、4H-SiC以外にも結晶構造の違う他種のSiCや青色LEDに使われているGaNなどいろいろあり、バンド・ギャップがSiよりも広いことから**ワイド・ギャップ半導体**と呼ばれています。残念ながらSiCパワーMOSFETは研究レベルで、その優れた性能が発表されているだけで、現在は商品として市販されていません。

■ SiCとSiで作られたダイオードの性能比較

● Si-SBDの耐圧は200V以下

低圧で優れた特性を示すダイオードにSi-SBD (Schottky Barrier Diode: ショットキー・バリア・ダイオード)がありますが、市販されているSi-SBDの耐圧は200V以下です。しかも、100V以上のSi-SBDは同程度の耐圧のSi-FRD (Fast Recovery Diode: ファスト・リカバリ・ダイオード)に比べて優れた特性とはいえません。

● SiC-SBDの利点

▶ Si-FRDと比べ高速スイッチングが可能

SiCの優れた特性をSBDに適用したのがSiC-SBDです。SiC-SBDはパワーMOSFETではないため、Si-SBDより620倍も優れているとはいえませんが、Si-SBDに比べ圧倒的に優れているはずですが、高耐圧Si-SBDはあまりにも性能が悪くて作られていないため比較できません。

Siで作られているのは高耐圧Si-FRDです。高耐圧Si-FRDは、高耐圧Si-SBDに比べON抵抗が小さく、SiC-SBDに対しても遜色ありませんが、ON抵抗を低下するために注入された余剰キャリアの逆回復特性がスイッチング損失を増加させ、スイッチング速度を低下させています。

これに対し、**SiC-SBDは逆回復現象がないためスイッチング損失が少なく、超高速スイッチングが可能**

表2 Si-FRDとSiC-SBDの仕様比較

項目	記号	Si-FRD	SiC-SBD
型名		<b>SF10L60U</b>	<b>SDT06S60</b>
せん頭逆電圧 [V]	$V_{RM}$	600	600
出力電流 [A]	$I_O$	10	6
せん頭サージ電流 [A]	$I_{FSM}$	120	21.5
順電圧 [V]	$V_F$	3	1.7
逆電流 [ $\mu$ A]	$I_R$	25	200
接合容量 [pF]	$C_j$	55	300
逆回復時間 [ns]	$t_{rr}$	25	-
形状		TO-220FM	TO-220

となっています。この特徴を活かしてスイッチング周波数を上げれば、インダクタ、トランスの大きくて重い巻き線部品を小型軽量化できます。

SiC-SBDは、インフィニオンテクノロジーズにより2001年2月に商品化されました。表2に実験に使用した600V耐圧のインフィニオンテクノロジーズ製SiC-SBDと、同じ600V耐圧の新電元製Si-FRDとの比較を示します。新電元製は入手可能なSi-FRDの中で最も優れたものの一つです。

▶ 高温時のON抵抗が高く並列接続が可能

表2を見てわかる大きな違いは、**SiC-SBDには逆回復時間がないことと、せん頭サージ電流許容値が小さいこと**です。このため、サージ電流が流れる回路では対策が必要不可欠となっています。

図2にSiC-SBDとSi-FRDの順方向特性を示します。25℃ではそれほど違いませんが、高温になるとまったく正反対の特性を示します。**SiC-SBDは高温時のON抵抗が高くなり、並列接続が可能になっています。Si-FRDは高温時順方向電圧が低くなり、並列接続すると最も順方向電圧が低い素子の負担が大きくなって熱暴走の可能性があります。**

● SiC-SBDの欠点

▶ Si-FRDに比べ価格が高い

SiCは、Siのような単一元素による結晶から作られる半導体と違い、二つの元素による結晶ですから、どうしても結晶欠陥が出やすく、歩留まりの低下により高価になってしまいます。どの程度高価かという点、実験で使用したPFC回路をSi-FRDで構成すると、全回路の部品代が1本のSiC-SBDよりも安くなります。

低ON抵抗MOSFET CoolMOS

CoolMOSは、1998年にドイツのシーメンス(現インフィニオンテクノロジーズ)が発表したパワーMOSFETです。シリコン限界を越える低ON抵抗を

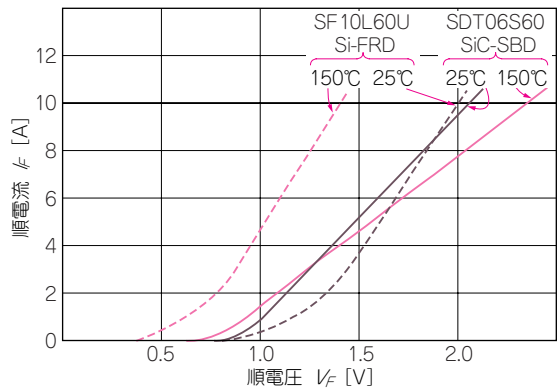


図2 SiC-SBDとSi-FRDの順方向特性