

SiC レクチャーシリーズ

4. SiC の物理的性質

SiC の物理的性質

SiC はパワーデバイスの半導体材料として多くの優れた性質を有しています。パワーデバイスの特性にかかわる 4H 型 SiC の物性を Si および GaN と比較して表 1 にまとめています。Si と比較した場合、4H 型 SiC は 10 倍の絶縁破壊電界強度を有しており高耐圧化において有利です。他のワイドバンドギャップ半導体の GaN と比較した場合、物性値は同様の値であるものの、p 型の伝導性制御や熱酸化プロセスによるゲート酸化膜形成の可否に大きな違いがあり、多くの用途で用いられるパワー MOS トランジスタの作製において 4H SiC が有利です。また GaN は、直接遷移型の半導体であるため少数キャリアの寿命が短く、そして伝導度変調によるデバイスの低抵抗化が不十分です。

表 1 SiC、Si、GaN の物性比較

	4H SiC	Si	GaN
エネルギーギャップ	3.26 eV	1.12 eV	3.42 eV
バンド構造	間接遷移型	間接遷移型	直接遷移型
絶縁破壊電界	3 MV/cm (c軸方向)	0.3 MV/cm	3 MV/cm
電子移動度	1200 cm ² /Vs (c軸方向)	1500 cm ² /Vs	1500 cm ² /Vs
正孔移動度	120 cm ² /Vs	450 cm ² /Vs	20 cm ² /Vs
比誘電率	10	12	10
pn伝導性制御	可能	可能	低抵抗p型困難
熱伝導率	4.9 W/cmK	1.5 W/cmK	1.3 W/cmK
熱酸化ゲート形成	可能	可能	不可
BFOM (Si比)	667	1	833

パワーデバイスの性能を材料間で比較する際に用いられる性能指数に BFOM (Baliga's Figure of merit) があります。BFOM は理想的なユニポーラ型デバイスを作製した場合のデバイスの抵抗値の逆数に比例する値であり、以下の式で計算できます。

$$BFOM = \epsilon\mu E_{BD}^3 \quad (eq.1)$$

$$R \propto V_{BD}^2 / BFOM \quad (eq.2)$$

ただし、 ϵ : 誘電率、 μ : 移動度、 E_{BD} : 絶縁破壊電界強度、 R : デバイスの抵抗値、 V_{BD} : デバイスの破壊電圧としています。

BFOM は絶縁破壊電界強度の 3 乗に比例するため、SiC が Si の 10 倍の値を持つことはユニポーラデバイスの低抵抗化に対して決定的に有利に働きます。表 1 の記載値から SiC のユニポーラデバイスの抵抗値は Si と比較して 1/667 に低減できる可能性を持ちます。また、抵抗値はデバイスの破壊電圧の 2 乗に比例するため、耐圧(定格電圧)を上げることで急激にユニポーラデバイスの抵抗値は増加します。Si を用いた場合、キロボルト級の耐圧を持つユニポーラデバイスは抵抗値が大きくなり過ぎて現実的ではありませんが、SiC を用いることにより実現可能となります。SiC デバイスの第一のターゲットはこの耐圧領域にあり、三菱電機は先駆的に SiC によるキロボルト級のユニポーラデバイスを実現して、電鉄の駆動システムなどの多くのパワーエレクトロニクスシステムに革新をもたらしてきました。

SiC の物性の異方性についてはデバイス作製の際に配慮すべき事項がいくつか存在します。4H 型 SiC の絶縁破壊電界強度は<0001>方向(基板の厚さ方向)の値が他の方向に比べて大きいです。また、バルクの電子移動度についても<0001>方向が他の方向に比べて大きいです。一方、SiC の各結晶面を用いて作製した MOS 構造のチャネル移動度を比較した場合、(0001)面の値が小さく、(0001)面に垂直な面の値が大きいです。これは、MOS 界面に形成される電子の捕獲準位の密度が、(0001)面の方が大きいことで理解されており、(0001)面に作製されるプレーナ MOS と比較し、トレンチ MOS の方がチャネル部の抵抗が低いことを意味しています。

SiC の MOS 界面に存在するキャリアの捕獲準位については SiC MOSFET の特性の不安定性や経時変化の原因であり、改善の取り組みが継続中です。三菱電機では特性の安定性を向上する MOS 界面の形成法を開発しており、トップクラスの MOS 特性の安定性を実現しています。

熱酸化膜の成長速度も結晶面による大きな違いがあり、例えば(000-1)面の酸化速度は(0001)面のその約 10 倍大きいです。この酸化速度の異方性はデバイスの作製プロセスにおいて考慮が必要であり、構造に応じたプロセス上の配慮が必要です。

ワイドバンドギャップ半導体は、概して、p 型、もしくは、n 型の伝導性制御が困難であるものが多いです。SiC はワイドバンドギャップ半導体にもかかわらず、p 型、n 型ともに高キャリア濃度まで作製が可能な数少ない材料の一つです。通常、n 型の伝導性制御のドーパントには V 族元素の窒素やリンが用いられ、p 型の伝導性制御のドーパントには III 族元素のアルミニウムやボロンが用いられます。ボロンについては、アクセプター準位が深いいため低抵抗な p 型が得られず、耐圧保持のためのデバイス終端領域の形成などに使用されます。なお、Si などと比較し、SiC は結晶構造が複雑なため、ドーパント原子が置換するサイトにより、形成するエネルギー準位に違いが生じます。キャリアの移動度の導出や抵抗値の温度依存性の見積もりなどの際は、厳密にはこのことを考慮する必要があるものの、デバイス特性の見積もりでは平均化した値を用いて特に問題はありません。

他に、SiC がパワーデバイス用材料として優れている点として、Si の約 3 倍と熱伝導率が大きいことがあげられます。この利点は、SiC は原子間の結合距離が短く、結合力が強いことに起因しており、デバイス動作時の最高温度を抑える上で大いに役立ちます。加えて SiC は 800°C の高温でも半導体としての性質を保つことが出来ます。現状は SiC 以外の材料により、使用温度の上限が制限されており、開発が続けられています。

また、チップのパワーモジュールへの適用時に配慮が必要な SiC の性質として、ヤング率が Si の約 3 倍と大きいことがあります。SiC は非常に硬い材料であるため、温度サイクルなどにより加わる応力が非常に大きくなり、モジュールの寿命を決める要因となることがあります。

以上
2025 年 1 月