



第3章 「ワイド・バンドギャップ」が  
いま注目の理由

# SiCにGaNに！ 次世代パワー半導体入門

白井 慎也 Shinya Shirai

本章では、パワー・デバイスの半導体材料として当初から広く使われてきたシリコン(Si、ケイ素)に代わるワイド・バンドギャップ半導体材料と、それを用いたパワー・デバイスについて解説します。

## ワイド・バンドギャップ半導体 デバイスとは

● これまで半導体材料の主流だったシリコンの限界  
MOSFETのような多数キャリア・デバイスのオン抵抗の大部分を占めるドリフト層の導通抵抗 $R_{on}$ は、不純物濃度 $N_d$ 、キャリア移動度とドリフト層厚さ $\omega_d$ 、ドリフト層面積 $A$ を用いて、近似的には次の式のように表されます。

$$R_{on} = \frac{\omega_d}{\mu e N_d A} = \frac{4V_{bd}^2}{\mu \epsilon_s A E_c^3} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $e$ は電気素量、 $V_{bd}$ は素子の耐圧、 $\epsilon_s$ は半導体の誘電率、 $E_c$ は半導体の絶縁破壊電界強度

耐圧 $V_{bd}$ は不純物濃度 $N_d$ に反比例するので、不純物濃度を小さくすると耐圧を高くできますが、式(1)より、オン抵抗 $R_{on}$ は反比例して大きくなります。

そのため、ドリフト層面積 $A$ と絶縁破壊電界強度 $E_c$ が同じ条件なら、耐圧 $V_{bd}$ の2乗に比例して導通抵抗 $R_{on}$ が大きくなる、というトレード・オフがあります。

このトレード・オフを改善するため、伝導度変調効

果を用いたIGBTや、スーパー・ジャンクション構造などの革新的技術が生まれ、シリコン材料の理論限界を越える性能が得られるようになりました。しかし、さらなるブレーク・スルーがない限り、現状からの大幅な特性改善は困難と考えられています。

また、近年はシステムの冷却構造の小型化要求が高まっていますが、シリコンのデバイスで175℃を超える温度での動作を保証することは非常に困難です。

● ワイド・バンドギャップ半導体への注目

式(1)より、導通抵抗 $R_{on}$ は、絶縁破壊電界強度 $E_c$ の3乗に反比例するので、絶縁破壊電界強度 $E_c$ の大きな半導体材料を使用すると、高耐圧化による導通抵抗 $R_{on}$ の増大を抑えられます。このことから、パワー素子の高性能化のために、シリコンに比べて絶縁破壊電界強度 $E_c$ の大きなワイド・バンドギャップ半導体材料が注目されています。

ワイド・バンドギャップ半導体材料にはさまざまな種類がありますが、とくに近年急速に普及が進んでいるのは炭化ケイ素(SiC: Silicon Carbide)と窒化ガリウム(GaN: Gallium Nitride)です。

酸化ガリウム(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Gallium Oxide)やダイヤモンドも次世代パワー半導体材料として研究が進められています。

表1に、シリコンおよび代表的なワイド・バンドギャップ半導体材料であるSiC、GaN、酸化ガリウムの物性値を示します。この物性値だけを見ても、パワー・デバイスに対してどの程度の効果があるかわかりにくいので、性能の目安としては、性能指数(Figure of merit)が用いられます。シリコン半導体を1として規

表1 ワイド・バンドギャップ半導体の物性値

項目	Si	GaN	4H-SiC	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
バンドギャップ $E_g$ [eV]	1.12	3.42	3.26	4.5
電子移動度 $\mu$ [cm <sup>2</sup> /Vs]	1,350	1,470	1,180	200
絶縁破壊電界強度 $E_c$ [MV/cm]	0.3	2.5 ~ 3.5	2.8	>7
飽和ドリフト速度 $v_{sat}$ [10 <sup>7</sup> cm/s]	1	2.4	2.2	1.5
熱伝導度 $\lambda$ [W/cm·K]	1.5	2	4.9	0.1 ~ 0.3
比誘電率 $\epsilon_r$	11.8	10.4	10.32	10.2 ~ 12.4

表2 ワイド・バンドギャップ半導体を性能指数で比較

性能指数	略称	Si	GaN	4H-SiC	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
バリガ指数	BFOM	1	1524	622	2952
ハン材料指数	HMFOM	1	12.2	8.7	10.3
ハン素子面積指数	HCAFOM	1	125	71	288
ハン温度指数	HTFOM	1	0.13	0.4	0.007