

パワーデバイス特集①

SiC パワーデバイスにおける X 線・熱分析

河野 浩*, 表 和彦**, 平山 泰生***

1. はじめに

パワーデバイスは、スイッチを高速で繰り返し ON/OFF し、電力を変換・制御する単一機能デバイス（ディスクリットデバイス）である。パワーデバイスは、交流・直流変換、電圧変換、周波数変換など電力制御に関係する多くの分野で使われている。

現在、日本の半導体デバイスメーカーはメモリの分野において韓国・台湾メーカーに追い詰められ苦戦を強いられているが、パワーデバイスの分野では 50% 以上のシェアを保持し優位な立場にある。これはパワーデバイスの製造がアナログ的で DRAM やフラッシュメモリのように製造装置さえ購入すれば誰でも製造できるというデジタル的なデバイスとは性格が異なり、高度な微細加工技術を必要とするためである。

2011 年の見込みとして、Si 系を含んだパワーデバイス全体の市場規模は約 2 兆円と言われている。今後、パワーデバイスは幅広い産業で利用され、2020 年には 4 兆円に達するという予測もある。

2. SiC パワーデバイス

パワーデバイスがさらにその応用範囲を広げるためには、より高温・高耐圧の過酷な条件での動作が必要になる。Si パワーデバイスの動作温度は 150°C が最大である。真夏の自動車の温度は 80°C 近くに到達するため、最高動作温度近くには容易に到達してしまう。一方、SiC パワーデバイスの動作温度は 400°C 以上あり、高温下での安定動作が特長である。さらに高耐圧であることから、より大きな電流を取り扱うことも可能になる。また、動作時の電力損失を低減でき（理論的にはインバーターの消費電力で Si パワーデバイスの 1/10）、大幅な省エネルギー化を達成することができる。太陽光発電、風力発電、電気自動車、鉄道など

の技術を核とする低炭素社会を実現するためには、SiC パワーデバイスの量産化が必須であると言われている。

日本のデバイスメーカーにおいて SiC ウェーハを利用したパワーデバイスの量産が始まろうとしている。量産化にめどがたった理由として、SiC ウェーハを供給できるウェーハメーカーの増加、ウェーハの大口径化（4 インチ）そしてウェーハの品質向上があげられる。

SiC パワーデバイスの技術の多くが日本で開発されたもので、今後も日本がこの分野で主導権を握れば日本の半導体産業が復活に舵をきることも期待できる。

表 2 にシリコンと SiC の比較を示す。

3. SiC ウェーハの結晶欠陥評価

SiC は原子間の結合力が非常に強固で高温・高圧においても融液相を得ることが困難なため、現在では主に 2200°C ~ 2500°C もの高温において昇華再結晶法によって作られている。さらに、積層構造の異なった多くの結晶多形を持つため、成長時にこれらが現れて、積層欠陥を作りやすい。したがって、現状のウェーハ中にはデバイス特性に影響を与える恐れのある多くの転位などの結晶欠陥が含まれている。また、高温下のバルク成長では半導体素子として必須の p, n 両伝導性の精密制御も困難であった。このような問題点を克服するため、デバイスの活性領域はバルクウェーハ上にホモエピタキシャル成長させた膜上に形成する方法が開発され、大きなブレイクスルーとなった⁽³⁾。しかし、ウェーハ中の結晶欠陥の多くはエピタキシャル膜にも引き継がれ、それが素子特性や寿命に大きく影響を及ぼすことが懸念されている⁽⁴⁾。

X 線トポグラフは、このような結晶中に含まれる転位や積層欠陥を非破壊で測定することができるという特徴を持っている⁽⁵⁾。したがって、X 線によって結晶性を測定したその場所にデバイスを形成し、結晶欠陥とデバイス特性を直接比較検討することが可能にな

* 株式会社リガク X 線解析事業部 SBU 大阪薄膜デバイスグループ

** 株式会社リガク X 線研究所

*** 株式会社リガク 熱分析事業部

表1. パワーデバイスの市場規模⁽¹⁾

	2011 年見込	2010 年比	2020 年予測	2010 年比
パワー半導体 市場規模	2 兆 2,079 億円	106.80%	4 兆 4,837 億円	216.80%

表2. パワーデバイスの材料比較⁽²⁾

	Si	SiC	パワーデバイスとして利用したときの特長
バンドギャップ (eV)	1.10	3.36	バンドギャップが大きいと、オン抵抗を小さくできる バンドギャップが大きいと、高温での動作が可能になる
キャリア移動度 (cm ² /V・sec)	1350	1000	キャリア移動度が高いと、高速動作が可能になる
絶縁耐圧 (MV/cm)	0.3	3.0	絶縁耐圧が大きいと、オン抵抗を小さくしやすい
飽和電子移動度 (cm/sec)	1 × 10 ⁷	2 × 10 ⁷	飽和電子移動度が高いと、高速動作が可能になる
熱伝導度 (W/cm・K)	1.5	4.9	熱伝導度が大きいと、高温での動作が可能になる

る。また、製造工程におけるウェーハ品質の管理ツールとしても有効であると考えられる。

4. SiC パワーデバイスの金属汚染評価

SiC ウェーハは、先に述べたように2000℃以上という、Si（約1000℃～1500℃）よりも遥かに高い温度でバルク結晶成長やエピタキシャル膜成長が行われている。このような高温プロセスにおいて、金属不純物の制御は極めて困難で、SiC ウェーハは製造過程においてつねに金属汚染の機会にさらされている。さらに、ダイヤモンドに次ぐ硬さと化学的安定性の高さが災いして、ウェーハ加工や表面処理プロセスも容易ではなく、これらのプロセスにおいても、金属汚染のリスクを伴っている。一方、高性能で安定動作が要求されるこれからのSiCパワーデバイスでは、Si ウェーハと同等の清浄度が要求され始めている。このためSiC ウェーハの金属汚染評価は極めて重要な課題である。しかし、SiC ウェーハは化学的に非常に安定しており、薬液を使った表面汚染回収（VPD：気相分解処理）が困難であるためICP-MSによる金属汚染分析も一般的には行われてきていない。そのような状況から、非破壊・高感度で手軽に金属汚染分析が可能なTXRFに注目が集まってきている。

5. SiC パワーデバイスの熱分析による評価

自動車関連に採用されるデバイスはもとより、特に航空宇宙産業や原子力関連では、過酷な環境の中でも誤動作をおこすことのない信頼性の確保が重要となっている。SiCに代表されるパワーデバイス関連では、

長期にわたるヒートサイクル試験や耐放射線試験等をおこない、製造時に生じた欠陥に加えて、どのような新たな欠陥が生じているかを評価することが研究開発のテーマとなっている^{(6),(7)}。

これら半導体における禁制帯中の欠陥準位を評価する手段として、熱刺激電流（Thermally Stimulated Current, 以下TSCと略す）測定法やDLTS（Deep Level Transient Spectroscopy）測定法などが知られている。特にTSCはワイドバンドギャップで欠陥の少ない半絶縁性SiCの評価に適しており、DLTSでは評価の難しい絶縁性の高い試料でも対応可能である。

TSC法は、試料に電界を加えることにより試料内部に分極や電荷トラップを生じさせ、主に昇温過程での脱分極現象や脱トラップ現象を電流として観測する方法である⁽⁸⁾⁻⁽¹²⁾。TSC法にて評価できる電荷現象には、大きく分けると分極とトラップ電荷という2つの項目に分けられる⁽⁸⁾。前者は、高分子材料のガラス転移現象をはじめとする様々な緩和現象を高精度に評価する手法としてJIS化⁽¹⁰⁾されており、後者は誘電・絶縁などの電気的特性をはじめ、半導体電子材料における励起トラップ電子（正孔）のトラップエネルギーの深さと分布およびトラップにおける電子（正孔）の寿命が評価の対象となる⁽⁸⁾。また注入トラップ電子（正孔）やトラップイオンにおいては、トラップによる空間電荷量、トラップ電荷による電極面電界、トラップ電荷の平均注入距離、トラップエネルギーの深さ、トラップにおける電子（正孔）の寿命、トラップ電荷の極性および界面トラップなども評価の対象となっている⁽⁸⁾。

半導体メーカーにおいて、量産化前の生産技術的な諸条件を決定する評価手段としても使用されており、半導体プロセスにおける熱処理（温度・時間・雰囲気）の最適化をはじめ、目的にあった不純物の種類やドーパ量などの絞込みにも応用され、研究開発期間の短縮や歩留まりの向上にさらに貢献することが期待されている。

6. パワーデバイスの開発・製造とX線・熱分析

以上述べてきたように、今後、大きな成長が期待されるパワーデバイスの開発や品質管理においてX線分析が果たすことのできる役割は非常に大きいと考えられる。そこで、本特集では、SiCデバイス評価における全反射蛍光X線分析およびX線トポグラフィの役割に関し、それぞれ詳しく述べる^{(5),(13)}。今後のパワーデバイス市場の成長に伴って、X線分析の重要性がさらに高まることを期待するとともに、今後は、熱分析による評価例の広がりにも注目していきたい。

参考文献

(1) 株式会社富士経済：<https://www.fuji-keizai.co.jp/>

- market/11081.html, (2011).
- (2) 佐藤淳一：図解入門 よくわかる最新パワー半導体の基本と仕組み，秀和システム，(2011).
- (3) 木本恒暢，須田 淳：*J. Vac. Soc. Jpn.*, **54** (2011), 362–368.
- (4) 土田 秀一，鎌田功穂，長野正裕：*J. Vac. Soc. Jpn.*, **54** (2011), 353–361.
- (5) 表 和彦：リガクジャーナル，**43** (2012), No. 2, 12–18.
- (6) Z.-Q. Fang, B. Claflin, D. C. Look, L. Polenta and W. C. Mitchel: *Journal of Electronic Materials*, **34** (2005), 336–340.
- (7) Z.-Q. Fang, B. Claflin, D. C. Look and G. C. Farlow: *Journal of Electronic Materials*, **36** (2007), 307–311.
- (8) 電気学会技術報告 (II部) 第194号 (1985).
- (9) 池崎和男：静電気学会誌，**24** (2000), 193–200.
- (10) 清水 博：理学電機ジャーナル，**24** (1993), No. 2, 29–38.
- (11) JIS K7131 (1994).
- (12) 平山泰生：リガクジャーナル，**40** (2009), No. 1, 1–13.
- (13) 河野 浩：リガクジャーナル，**43** (2012), No. 2, 6–11.