

SiC デバイスの応用が期待される分野（電化社会、電力安定制御への対応）

低損失パワー半導体材料を開発

——低炭素社会に向けて燃焼から SiC を用いる電化へ——

- 高機能で省エネの半導体
- 高速成膜と結晶欠陥の低減
- 本格的な普及を目指して

● ひとつこと 材料科学研究所 先進機能材料領域 上席研究員 土田 秀一

高機能で省エネの半導体

再生可能エネルギーや電力貯蔵装置の最大利用を図りつつ、安定な電力供給を行うためには、半導体電力変換による交流一直流変換技術や、電圧・電流制御技術が求められます。また、表紙図にあるように、今後将来的に化石エネルギーを直接利用していた分野が電気エネルギーを利用するように移行していった際には、その利用にあたってはほぼ100%、半導体を用いた電力変換技術が用いられることになり、半導体電力変換はいわば「燃焼」に相当するような共通技術となります。

このように、電化の推進や電力安定供給を実現する上では、半導体電力変換を用いた様々な電化機器や電力制御機器の開発と、これらの機器の高効率化が要求されます。このため、個々の機器の最適化に加え、高効率化のための共通基盤技術となる半導体電力変換に関する技術を強化していく必要があります。このような背景から、電力中央研究所では、次世代の電力変換技術として、シリコンカーバイド(SiC) 単結晶を用いた超低損失パワー半導体に関する研究を進めています。

■ 「シリコン」から「シリコンカーバイド」へ

シリコンカーバイド(以下 SiC) 単結晶は、従来よりパワー半導体の材料として用いられているシリコン(以下 Si) 単結晶に比べて、絶縁破壊に至る電界の強さが約10倍も大きいという優れた性質を有しています。このため、SiC 単結晶を半導体素子に適用することで、より薄い厚さで高い耐電圧が得られることから、通電時の電力損失を大幅に少なくすることができます(図1)。すなわち、SiC パワー半導体を使うことにより、インバータに代表される半導体電力変換装置の電力損失を、現状の1/3～1/5に少なくできると考えられています。この損失低減効果は極めて大きく、国の「省エネルギー技術戦略2007」では、SiC 半導体によるインバータの高効率化による省エネ効果は、2030年において原油換算で2634～4466万kリットル(電力換算で約1000～2000億kWh、CO₂換算で0.4～0.7億トン)の削減になると見込まれています。

■ 鍵となる結晶成長技術

最近では、多くの企業においてSiCダイオードやトランジスタの開発が進められ、各種のSiCインバータの試作、低損失動作の実証の報告が相次いでいます。SiCはSiよりも低損失で優位性があることは既に証明できたとも言えますが、その普及に対する最大の課題は、低欠陥のSiC単結晶を低コストで供給出来るようにすることです。また、低損失な電力安定制御技術に向けては、数kV以上の高い耐電圧を得るために厚い膜で、かつ高純度なSiC単結晶層を得るための特別な結晶技術を開発する必要があります。

SiC単結晶の製造においては、一般に、基板を作成する工程と、その基板の上に素子を作り込む層となる精密なSiC単結晶膜を結晶成長する工程の2段階で行われます。当研究所では、特に後者の「エピタキシャル成長技術」の高度化に取り組み、結晶成長の高速化、厚膜化、低欠陥化に関する技術開発を進めてきました。

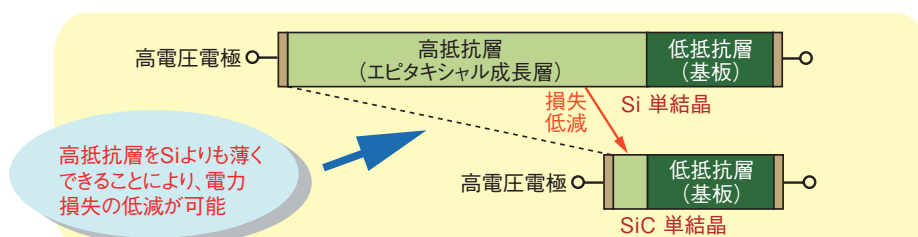


図1 Si単結晶とSiC単結晶を用いたパワー半導体の比較（模式図）

高速成膜と結晶欠陥の低減

■結晶の高速成長を可能に

SiC 普及のキーとなる結晶成長技術の高度化に取り組むにあたり、当研究所では SiC エピタキシャル結晶成長炉を独自に開発しました（図 2）。この炉では周囲の高周波加熱コイルにより高温壁が加熱され、高温壁からの輻射熱により炉内全体が加熱される構造になっています。

そして試行錯誤の結果、本装置においては小型試験片であれば、最大成膜速度として $250 \mu\text{m/h}$ を得ることができました。これは、SiC エピタキシャル成膜速度としては世界で最も高い値で、従来の 20 倍以上に相当します。これにより、例えば耐電圧が 1kV 級の素子用では、従来は 1～2 時間かかっていたものが数分以内、耐電圧が 30kV 級の素子用では、従来は 1～2 日かかっていたものが、約 1 時間で成膜できる見込みが得られました。

さらに、SiC ウェハの大口径化を考慮して炉内構造を工夫した結果、実用的な直径 5 インチ相当の面積のウェハにおいても、平均成膜速度 $79 \mu\text{m/h}$ を達成しつつ、膜厚や不純物ドーピング濃度の分布が面内で均一な、実用レベルの高い性能を得ることに成功しました。

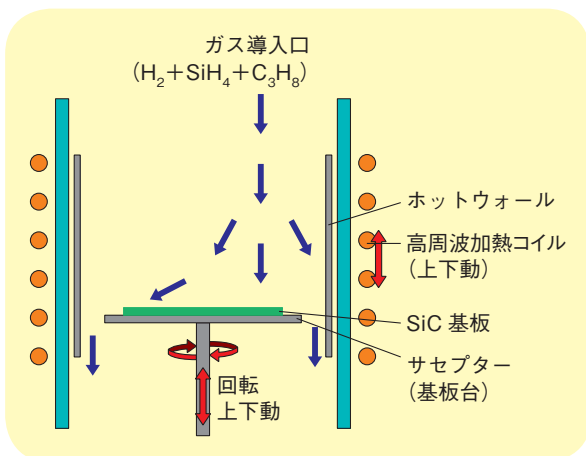


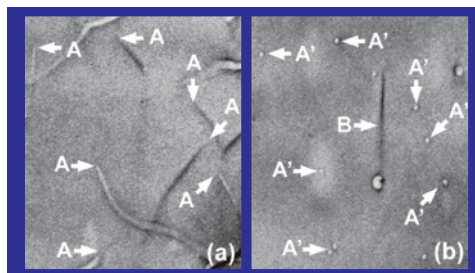
図 2 SiC エピタキシャル成長装置の断面模式図

■結晶欠陥の低減

SiC 単結晶を用いてパワー半導体素子を製作する際に、結晶に欠陥（結晶欠陥）があると素子の性能や歩留まり、信頼性を低下させる要因となります。このことは、高い電圧や大きな電流を取り扱う電力安定制御への応用を図る上で特に重要となるため、当研究所ではこれらの結晶欠陥の低減技術の開発を進めています。

図 3 は、大型放射光施設・SPring-8 にて観察した SiC 結晶内の結晶欠陥（転位）の解析画像（X 線トポグラフィ像）です。点状や線状に観測されるコントラストは、結晶成長後はそれぞれ別の種類の結晶欠陥に変容しています。このような高度な分析と結晶成長実験を通じ、これまでに SiC エピタキシャル成長前後で、どのようにして結晶欠陥が基板から伝播するか、あるいはどのような結晶欠陥が生成されるかを突き止め、一部の結晶欠陥についてはその制御方法を得ることに成功しました。さらに、高電圧 SiC 素子の通電損失を増大させる働きをする結晶欠陥（点欠陥）については、当研究所独自の方法（イオン注入／熱拡散処理法）により、その密度を検出限界以下に低減することに世界で初めて成功しました。

(A → A'、または新規 B のように、結晶欠陥が結晶成長前後で異なっていることがわかる)



(a) 基板表面付近 (エピタキシャル成長前) (b) 成長膜表面付近 (エピタキシャル成長後)

図 3 SiC エピタキシャル成長前後における結晶欠陥 (転位) の観察像 (放射光トポグラフィ像)

本格的な普及を目指して

■ 実用化に向けた実証研究

当研究所では、平成17年度から(独)産業技術総合研究所、(株)昭和電工と共同で、直径3インチ以上の大口径ウェハを複数枚同時処理可能な実用機での実証研究を進めてきました。図4は、この3者の共同研究成果と、これまでの各機関の独自研究成果を合わせて活用し、生産された高品質SiCエピタキシャルウェハです。生産された製品は、SiCインバータに関するNEDOプロジェクトや産業界に供給され、国内のSiCパワー半導体素子や応用機器の開発に役立っています。(生産は技術移転先である有限責任事業組合エシキャット・ジャパンにて実施。なお、エシキャット・ジャパンでは、2008年度末までに(株)昭和電工にパワー半導体用SiCエピタキシャルウェハ事業を譲渡予定です。)

さらに当研究所では、これまでに得られた高速成膜技術を用いて、厚膜かつ高純度なエピタキシャル膜を作成し、電力安定制御用の高電圧SiCパワー半導体素子の開発を進めています。



図4 技術移転先にて生産されたSiCエピタキシャルウェハ

■ 次世代の切り札

SiCは、次世代の超低損失パワー半導体の切り札として期待が高まっており、一部市販化が進められているものの、高品質ウェハの大量生産・供給体制がまだ確立されていないこと、現有のSi単結晶にくらべて高価であることから、その普及が制限されています。しかし、将来の社会を見通した場合、SiC半導体の持つ省エネポテンシャルは非常に大きく、その活用を図っていくことが不可欠です。また、電力安定供給の面において、高電圧で作動しかつ低損失なSiC半導体の果たすべき役割は極めて大きいものがあります。このため当研究所では、引き続き電力安定供給技術の向上や電化促進に向けて、これまでに開発した結晶成長技術の民生・産業用途での実用化展開を進めるとともに、大電力用のSiC半導体の開発に取り組んでいきます。

● ひとこと



材料科学研究所
先進機能材料領域
上席研究員
土田 秀一

今後の社会発展のためには、電力化率向上による省エネ・CO₂排出量削減、原子力・再生エネルギーの最大利用を伴った電力安定供給の達成が重要なキーとなります。ここでのSiC半導体に課される期待は甚大で、その普及や用途拡大に向けての技術開発は、我々研究者の果たすべき社会的使命と考えます。

■ 既刊「電中研ニュース」ご案内

No.454 チタンを超えた新しいチタンを生む技術フレッシュグリーン
No.453 ライフスタイルにあった省エネ行動をしよう!

No.452 飛来する海塩粒子の量を推定する
No.451 低線量放射線の影響解明に挑む