

逆転の発想で SiC パワー半導体の高品質化に成功 —非酸化による酸化膜形成で高品質化 10 倍—

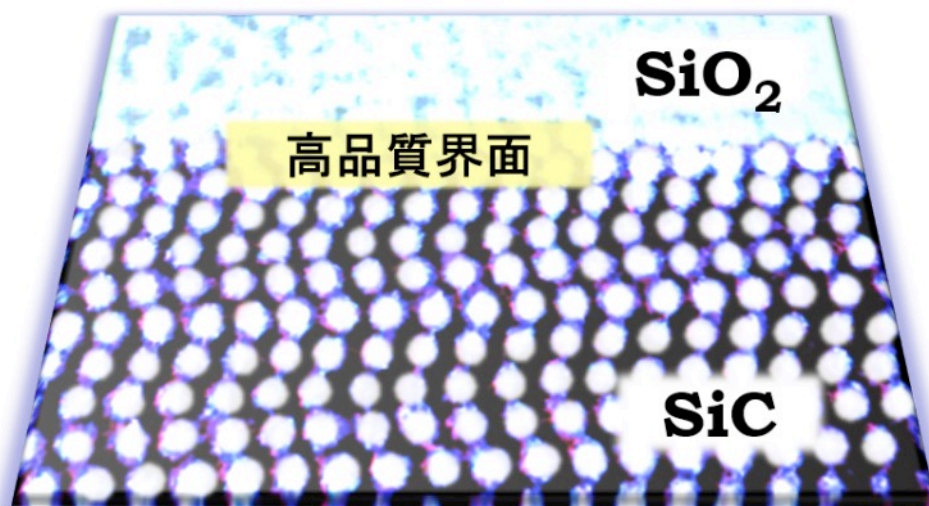
概要

京都大学大学院工学研究科の木本恒暢教授、東京工業大学科学技術創成研究院の松下雄一郎特任准教授、小林拓真博士研究員らのグループは、省エネの切り札と言われる SiC（シリコンカーバイド）半導体で 20 年以上にわたって大きな問題になっていた欠陥（半導体の不完全性）を一桁低減し、約 10 倍の高性能化に成功しました。

Si（シリコン）を中心とした半導体は、計算機のロジックやメモリだけでなく、電気自動車、電車のモータ制御、電源などに広く用いられていますが、消費電力（電力損失）が大きな問題となっています。近年、低損失化を目指して、Si よりも性質の優れた SiC によるトランジスタ開発が活発になり、実用化が始まりました。

しかしながら SiC トランジスタの心臓部となる酸化膜と SiC の境界部分（界面）に多くの欠陥が存在し、SiC 本来の性能を全く発揮できない状況が 20 年続いていました。本グループは、欠陥の主要因が SiC の酸化であることを突き止め、SiC を酸化せずに表面に酸化膜を形成することによって、現在の世界標準に比べて 10 倍という世界最高の特性を達成しました。今回の技術により、普及が進む電気自動車や産業機器などへの、低損失 SiC デバイス適用が急速に拡大し、エネルギー問題にも大きく貢献できます。

本成果は、2020 年 8 月 14 日に国際学術誌「Applied Physics Express」にオンライン掲載されました。



超高品質 SiO₂/SiC 界面の形成

1. 背景

エネルギー問題は今世紀の最重要課題の一つです。この問題を解決するためには、太陽光発電や風力発電など自然エネルギーの活用が重要ですが、それと同様にエネルギーを効率的に利用する技術（省エネルギー技術、高効率化・低損失化技術）が大変重要です。エネルギーには様々な形態がありますが、近年、オール電化住宅や電気自動車の台頭に見られるように電気エネルギーの占める割合が年々増大しており、電気エネルギーの有効利用の重要性はますます高まっています。

電気エネルギーの変換（電力変換）で鍵を握るのは、半導体パワーデバイス（ダイオードやトランジスタ）です。パソコンやデジタル家電の電源、冷蔵庫やエアコン、太陽光発電の電力調整器、電気自動車（ハイブリッド自動車、燃料電池自動車も含む）や鉄道車両の電力変換器など、身の周りのあらゆる所に半導体パワーデバイスが用いられています。

現在、半導体パワーデバイスには主に Si（シリコン、ケイ素）が使われていますが、長年の研究開発の結果、そのデバイス性能は、Si の理論限界に達しつつあり、画期的な性能向上を達成するためには、新しい半導体材料の利用が不可欠と考えられています。

その材料として最も有望なのが SiC（シリコンカーバイド、炭化ケイ素） です。SiC は絶縁破壊や熱に対する耐性が著しく優れており、高耐圧・低損失（高効率）パワーデバイス用材料として世界で研究開発競争が熾烈になっています。京都大学は SiC 半導体のパイオニアとして知られ、SiC の結晶成長、欠陥低減、物性解明から新構造デバイスの提案と原理実証などの研究に一貫して取り組み、当該分野の学術研究を牽引してきました。

1995 年頃から国内外の民間企業も SiC パワー半導体の研究開発に本格的に着手し、2001 年に SiC を用いたダイオード、2010 年には SiC トランジスタの量産が開始され、様々な機器への搭載が始まりました。最初はワークステーション等の電源に搭載され、その後、エアコン、太陽光発電用電力調整器、急速充電器、産業用モータ（工場のロボットなど）、電車、電気自動車などに搭載されています。いずれも SiC パワー半導体を用いることによって顕著な省エネ効果を実証されています。例えば、東京メトロ、JR 山手線（東京）、環状線（大阪）では、電車の走行電力が約 30%低減されたことは大きなニュースになりました。2020 年 7 月にデビューした新幹線の新モデル N700S も SiC パワー半導体によって駆動されています。また、SiC が搭載されたテスラ社の電気自動車 Model 3 は世界的なベストセラーとなっています。

しかしながら SiC トランジスタの心臓部とも言える酸化膜と SiC の境界部分（界面）に極めて多くの欠陥が存在し、SiC トランジスタの特性や信頼性を制限し、SiC 本来の性能を発揮できない状況が 20 年以上続いていました（既に Si デバイスより約 50 倍高性能ですが、本来なら 500 倍の性能が得られるはず）。本研究は、独自のアプローチによって、この SiC 半導体における最大の問題を解決したものです。

2. 研究手法・成果

Si 半導体において最も重要なトランジスタは、酸化膜と半導体の接合を利用した MOSFET（金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ） です。Si MOSFET は、コンピュータのロジック、メモリ、イメージセンサ、さらには電力用パワーデバイスなど、ほとんど全ての応用で最も重要かつ基本的なデバイスです。この Si MOSFET の心臓部は酸化膜と Si の接合界面です。Si MOSFET では Si を熱酸化（酸素雰囲気高温に加熱）することによって、Si 表面に非常に良質の酸化膜（ SiO_2 ）が形成されることを活用しています。

Si と同様に、SiC を熱酸化すると表面に SiO_2 膜が形成されるという性質があり、これが SiC の大きなメリットと認識されています。従来はこの手法を用いて酸化膜（ SiO_2 膜）と SiC の接合を形成し、SiC トランジス

タ (MOSFET) が作製されてきました。しかしながら、酸化膜/SiC の接合界面に極めて多くの欠陥 (Si の場合の 100 倍以上) が存在し、この界面欠陥が SiC トランジスタの性能を大きく制限していることが判明しました。従来は、この SiC の酸化条件を調整したり、熱酸化後に様々な条件で熱処理を施すことによって酸化膜と SiC の界面の欠陥を低減する試みがなされましたが、20 年以上にわたって顕著な進展はありませんでした。また、この酸化膜と SiC の界面欠陥の起源についても不明の状態、高品質化の指針 (ガイドライン) もないという状況が続いていました。

今回、松下特任准教授らのグループは、SiC を熱酸化すると、必ず界面に炭素原子に起因する欠陥が高密度に形成されることを第一原理計算により突き止めました。この計算結果を基にして、木本教授らは「SiC を酸化せずに良質の酸化膜を形成する = SiC を一層たりとも酸化させない手法で良質の酸化膜を形成する」という一見、矛盾する目標に向けて実験研究を行いました。学理に基づく思考と実験を重ねた結果、以下の 2 点が欠陥低減に有効であることを発見しました。

- (1) 清浄な SiC 表面に Si 薄膜を堆積し、これを低温で酸化することによって Si 薄膜を SiO₂ 膜に変換するというアイデアを着想し、この方法により高品質 SiO₂ 膜の形成に成功しました。Si の酸化開始温度は約 700°C、SiC の酸化開始温度は約 900°C ですので、この間の適切な温度を選択すれば、SiC を一切酸化させることなく、Si 薄膜を完全に SiO₂ 膜に変換可能です。
- (2) 上記の方法により SiC 表面に SiO₂ 膜を形成した後、界面への窒素原子導入による高品質化を達成しました。従来、一酸化窒素 (NO) ガスを用いた界面窒化による高品質化が SiC MOSFET の量産にも広く用いられていますが、NO ガスを用いると、界面への窒素原子導入と同時に、NO ガス分子中の酸素原子により SiC の酸化が進行し、新たに欠陥を生成します。また、NO ガスは猛毒ガスですので、大量生産の工場での使用は回避したいところです。そこで、木本教授らは高温の窒素 (N₂) ガス雰囲気での熱処理を行い、高品質界面を得ることに成功しました。

従来の世界標準の手法である「熱酸化→一酸化窒素(NO)ガス処理」と本研究 (「Si 堆積→Si 低温酸化による SiO₂ 膜形成→高温での N₂ ガスアニール」) の手法を図 1 に示します。また、両者の手法で形成した SiO₂/SiC 界面欠陥の比較を図 2 に示します。図に示すように、従来の世界標準 (現在のベスト) に比べて、10 倍の高性能化 (欠陥量 1/10) を達成しました。具体的には、従来法では $1.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 存在した欠陥密度を独自の手法により $1.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ にまで低減することに成功しました。なお、本研究では系統的な多くの実験を行い、わずかでも SiC 半導体表面を酸化した場合には、このような超高品質の界面を形成できないことを確認しています。

「SiC を酸化して表面に SiO₂ 膜を形成し、これを SiC トランジスタに使う」という従来の常識を打ち破り、「SiC を酸化せずに表面に良質の酸化膜を形成する」という「逆転の発想」により、当該分野 20 年に亘る技術課題を解決する大きなブレークスルーを達成することができました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、SiC パワー半導体で最も大きな問題とされてきた酸化膜と SiC 界面の特性を約 10 倍向上させたもので、SiC パワー半導体の実用化とそれを通じた省エネ効果を一気に加速することが期待されます。今回、提案する手法は、特殊な装置や特殊なガス・薬品が全く不要ですので、半導体デバイスを扱う企業であれば障壁なく採用できます。一酸化窒素という猛毒ガスから脱却できるという大きいメリットもあります。

本研究成果を SiC トランジスタ (MOSFET) に適用すれば、(1) トランジスタの大幅な高性能化、(2) チップ

面積縮小による大幅な低コスト化、(3)信頼性の大幅な向上を達成することができます。特に、(2)の低コスト化が進めば、現在、SiC トランジスタの採用を（コスト面の理由により）躊躇しているシステムへの搭載を大幅に加速できます。現在、SiC パワー半導体の市場は世界で約 700 億円ですが、5 年後には 2,000 億円を越えると予想されます。SiC パワー半導体搭載により、原子力発電所数基分の省エネが可能と試算されています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は科学技術振興機構(JST)から産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA プログラム) と JSPS 基盤研究(A)18H03770 の助成を受けたものです。また、本研究成果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」、東京大学物性研究所スーパーコンピュータ、筑波大学計算化学研究センターの学際共同利用プログラムを利用して得られたものです。

<研究者のコメント>

私は SiC 半導体の研究を始めて 30 年になりますが、当初から酸化膜と SiC の界面欠陥に悩まされてきました。様々なトライアルをしましたが失敗ばかり。今回、初めて本質が見え、根本的な解決ができたと考えています。これを契機に SiC パワー半導体の実用化が加速し、社会の省エネに大きく貢献することを期待しています。

<論文タイトルと著者>

タイトル: Design and formation of SiC (0001)/SiO₂ interfaces via Si deposition followed by low-temperature oxidation and high-temperature nitridation (Si 膜堆積、低温酸化、高温窒化による SiO₂/SiC 界面の設計と作製)

著者: Takuma Kobayashi, Takafumi Okuda, Keita Tachiki, Koji Ito, Yu-ichiro Matsushita, and Tsunenobu Kimoto (小林拓真、奥田貴史、立木馨大、伊藤滉二、松下雄一郎、木本恒暢)

掲載誌: Applied Physics Express (アプライド・フィジックス・エクスプレス)

DOI: <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ababed>

< 参考図表 >

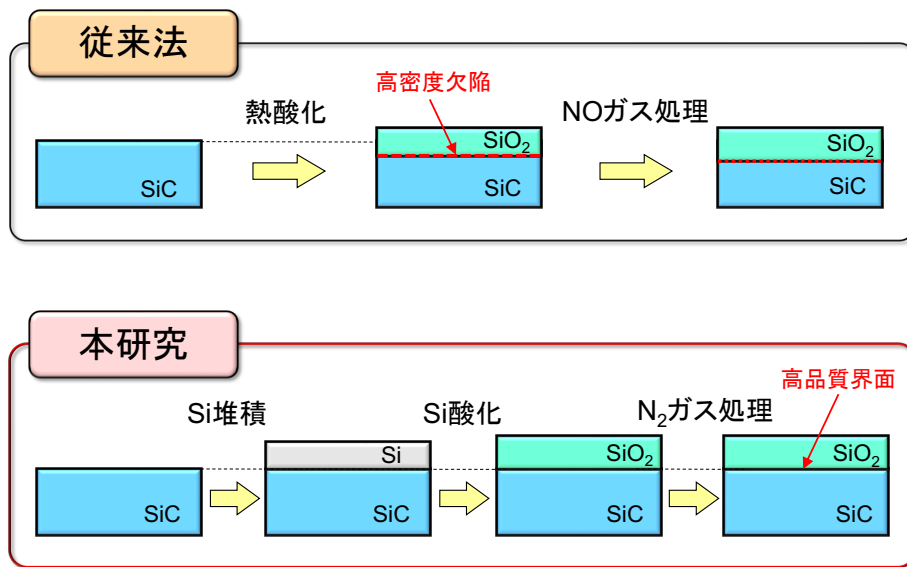


図1 SiO₂/SiC 構造を形成する方法の模式図 (上：従来法、下：本研究で提案する手法)

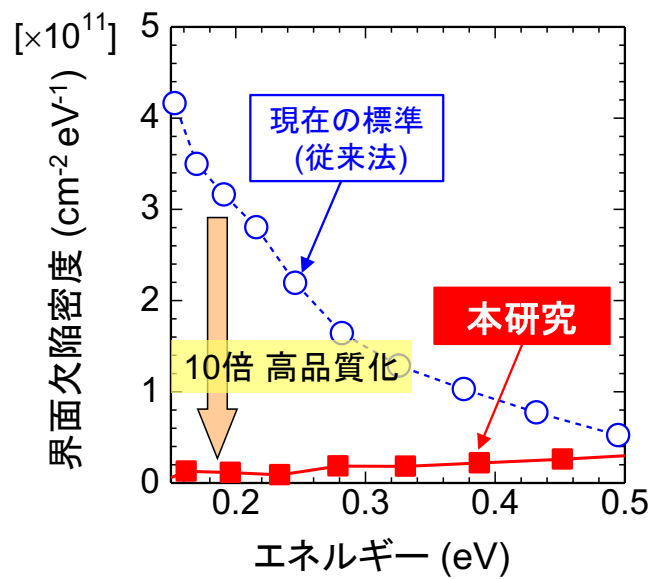


図2 SiO₂/SiC 界面欠陥の低減を示す実験データ

参考リンク：

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻・半導体物性工学分野ホームページ
<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所 松下研究室ホームページ
<https://www.msl.titech.ac.jp/~matsushita/>

<用語解説>

SiC（シリコンカーバイド、炭化珪素）

シリコン（ケイ素）と炭素（ダイヤモンド）の1：1の化合物である。原子間の結合力が強く、絶縁破壊や高温に強い半導体材料である。その優れた性質を活かせば、革新的な高性能パワーデバイス（電力用半導体素子）を実現できると期待され、日米欧で研究開発が活発化している。近年の研究開発の進展により、600～3300ボルト級の素子の実用化が始まり、顕著な省エネ効果を実証している。我が国においても、内閣府が主導した「最先端研究開発支援（FIRST）プログラム」30課題の内の一つに選ばれ、戦略材料と位置づけられている。

MOSFET（金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ）

金属と絶縁性酸化膜（一般には SiO_2 ）と半導体の積層構造を用いたトランジスタ。ドレイン、ソース、ゲートの3端子から成り、ゲート端子に電圧を印加することで酸化膜と半導体の境界部（界面）に電気の通り道が形成され、ドレイン端子、ソース端子間が導通する。つまり、ゲート端子の電圧で、回路をオン・オフできる素子である。情報を処理する集積回路はSi MOSFETで構築されている。数百V以上の応用では、SiC MOSFETが最も有望と考えられている。

欠陥

固体結晶において、規則的な原子配列や化学結合を乱す不完全性を総称して欠陥と呼ぶ。半導体の性質は欠陥や不純物に対して極めて敏感であり、非常に高い精度で（構成原子に対して百万～一億分の一以下）欠陥の低減や制御を行う必要がある。特にMOSFETの性能や信頼性は、酸化膜と半導体の境界（界面）に存在する欠陥（界面欠陥と呼ぶ）の影響を大きく受ける。SiC半導体を用いたMOSFETでは、この界面欠陥が特に多く、SiC MOSFETの特性を大きく制限していた。

電力変換

交流→直流変換、直流→交流変換、周波数変換、電圧変換など、電気信号の形態を変換する操作を電力変換と呼ぶ。なお、直流から任意の周波数の交流を発生する回路を逆変換器、インバータと呼ぶ（昔からあった交流を直流に変換する装置の反対なので逆変換器）。また、このように電力を自在な形態に操り、負荷（モータ、電源など）に最適な電力を供給する工学をパワーエレクトロニクスと呼ぶ。このような電力変換を行う装置（電力変換器）は、比較的大電流、高電圧の電気信号を扱うことのできる半導体素子、コンデンサ、コイルなどからなる電気回路で構成されている。変換器の性能は、これに搭載される半導体素子（電力用半導体素子、あるいはパワーデバイス）で決まると言って過言ではない。電力変換時の変換効率（出力電力／入力電力）は、現在85～95%程度であり、電力変換の度に約10%の電力が熱として捨てられている。この変換効率を限りなく100%に近づける切り札として注目されているのが、SiCを用いた電力用半導体素子（パワーデバイス）である。