

環境に優しい手法で SiC 半導体の性能倍増に成功

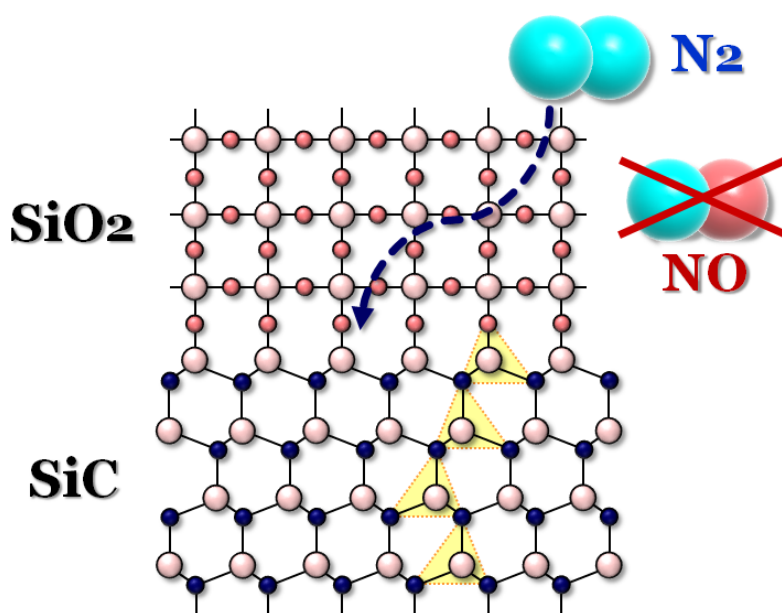
概要

京都大学大学院工学研究科の木本恒暢 教授、立木馨大 同博士後期課程学生らのグループは、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 年間、問題になっていた欠陥（半導体の不完全性）を環境に優しい手法で大幅に低減し、SiC トランジスタの性能を 2 倍に向上することに成功しました。

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。また、従来はこの欠陥を低減するために猛毒ガス（一酸化窒素）を使う必要がありました。本グループは、欠陥の主要因を突き止め、さらに窒素という大気中に存在する安全なガスを用いることによって、現在の世界標準に比べて 2 倍という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 9 月 10 日に第 81 回応用物理学会秋季学術講演会で発表されます。



窒素ガスを用いた SiO₂/SiC トランジスタの性能向上

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することが長年の問題となっており、SiCトランジスタの特性や信頼性を制限し、SiC本来の性能を發揮できない状況が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)。また、現在は酸化膜とSiCの界面欠陥を低減するために一酸化窒素(NO)という猛毒ガスが使用されており、そのガスの調達、排ガス処理、安全設備の維持などに多大な費用がかかっています。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(酸素雰囲気中で高温に加熱)することによって、Si表面に非常に良質の酸化膜(SiO₂)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SiO₂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。

今回、木本教授らは、「SiCを酸化せずに良質の酸化膜を形成すること」、「一酸化窒素(NO)という猛毒ガスから脱却すること」に着目して研究を行いました。学理に基づく思考と実験を重ねた結果、以下の3点が欠陥低減とSiCトランジスタの性能向上に有効であることを発見しました。

- (1) SiCウェハ製造やトランジスタ製造の工程において、必ずSiC表面の酸化（+薬液による酸化膜の除去）が行われますが、このSiCの酸化過程でSiC表面近傍に高密度の欠陥が導入されることに気づき、酸化膜を形成する前にこれを適切な方法（水素エッチング）で除去することが重要であることを見出しました。
- (2) 上記により高品質SiC表面を形成しても、SiCの酸化により酸化膜（ SiO_2 膜）を形成すると、新たに高密度の欠陥が発生することを確認しました。この問題を解決するために、酸化膜（薄膜）をSiC表面に堆積する手法により良質の酸化膜を形成しました。
- (3) 最後に、従来手法である猛毒の一酸化窒素(NO)による界面窒化処理ではなく、大気中に多量に存在する安全な窒素ガスを用いて界面窒化を行うと、酸化膜とSiC界面の欠陥が大幅に減少することを発見しました。さらに、この手法を用いてSiCトランジスタを試作したところ、電子による電気伝導を制御するn型トランジスタの性能で2倍、正孔（ホール）による電気伝導を制御するp型トランジスタで1.5倍の性能向上に成功しました。

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（「表面欠陥除去→酸化膜の堆積→ N_2 処理」）の手法を図1に示します。また、両者の手法で形成した SiO_2 /SiC界面欠陥密度の比較を図2、様々な手法を用いて作製したSiCトランジスタ(MOSFET)の性能比較を図3に示します。図に示すように、猛毒ガスを一切使用することなく、従来の世界標準（現在のベスト）に比べて、界面欠陥を約5分の1に低減し、トランジスタ性能については2倍の高性能化を達成しました。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、このような高品質の界面を形成できないことを確認しています。

上記のポイント(1)~(3)のうち、(2)あるいは(3)単独の試みは過去にもありましたが、優れた結果は得られていませんでした。今回、上記(1)~(3)のいずれか一つでも欠けると高品質界面が得られないことを実証し、当該分野20年に亘る技術課題を解決する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界面の欠陥を、猛毒ガスを一切使うことなく約1/5に低減し、SiCトランジスタの性能を約2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、むしろ従来多大なコストをかけていたNOガス使用に伴う安全性確保の問題から完全に脱却できますので、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。

本研究成果を電力用SiCトランジスタ（MOSFET）に適用すれば、(1)チップ面積縮小による低コスト化、(2)信頼性の向上を達成することができます。特に、(1)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) の助成を受けたものです。

<研究者のコメント>

8 月 21 日にも同様の課題解決に関するプレス発表をさせていただきましたが、今回は前回のプレス発表とも異なるアプローチで、20 年来の問題を解決することに成功しました。前回とは異なる手法と成果ですが、科学の目で見ると共通点が多く、SiC 半導体特有の物理・化学現象の本質が見えたような気がしています。これを契機に SiC パワー半導体の実用化がさらに加速し、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：酸化過程排除プロセスによる高品質 4H-SiC/SiO₂ 界面の形成

著 者：立木馨大、金子光顕、小林拓真、木本恒暢

掲 載 誌：第 81 回応用物理学会秋季学術講演会 10p-Z23-13

<参考図表>

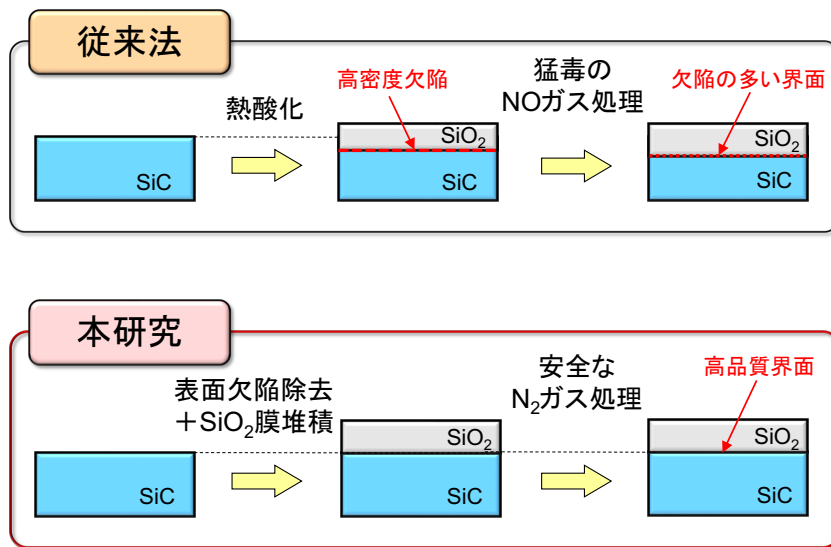


図1 SiO₂/SiC 構造を形成する方法の模式図 (上：従来法、下：本研究で提案する手法)

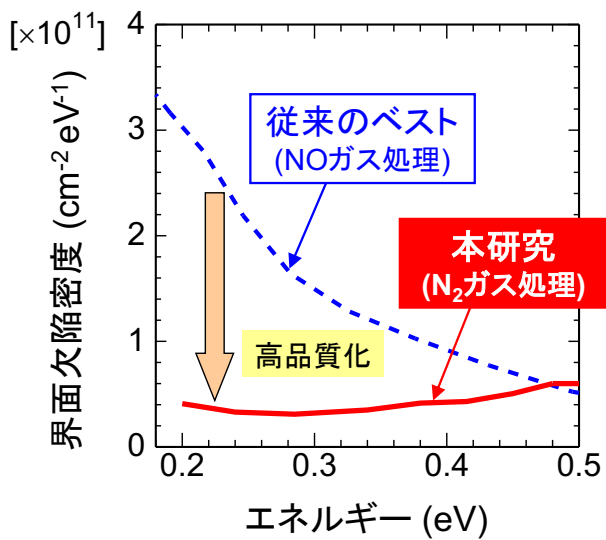


図2 SiO₂/SiC 界面欠陥の大幅な低減

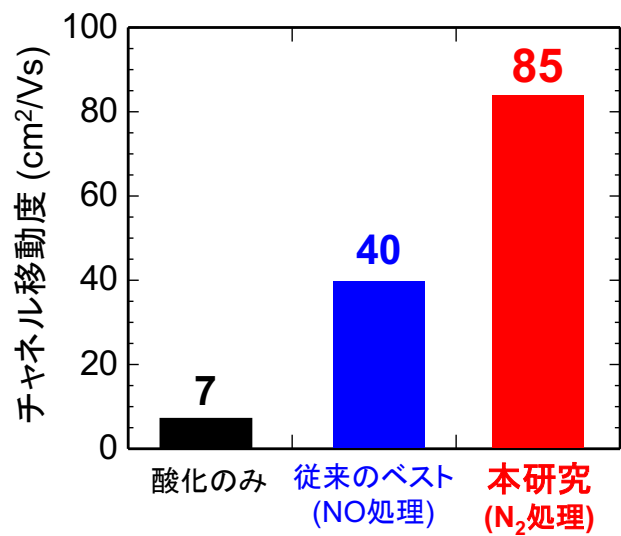


図3 SiC トランジスタの性能向上

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/>

<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。