界面の高品質化と平坦性向上により SiC 半導体の性能を 6～80 倍向上

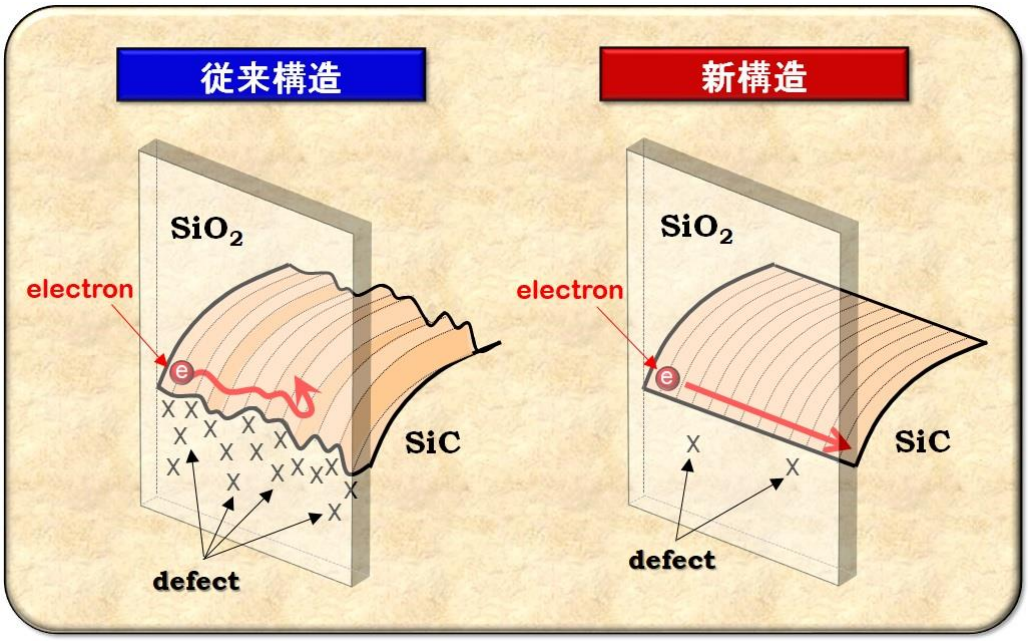
概要

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）半導体で問題になっていた欠陥（不完全性）を独自の手法で大幅に低減し、実用的な構造で SiC トランジスタの性能を 6 倍以上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 本来の性能を発揮できない状況が 20 年以上続いていました。本グループは、昨年、物理的考察に基づく独自の手法により界面の欠陥を大幅に低減し、SiC トランジスタの性能を 2 倍向上することを報告しました。今回、この研究をさらに発展させ、実用的に重要な構造において SiC トランジスタの性能を 6～80 倍向上させることに成功しました。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、2021 年 10 月 26 日に SiC 半導体に関するヨーロッパ会議(ECSCRM)で発表されます。



界面欠陥低減および平坦性改善による SiC トランジスタ性能の大幅向上

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有効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、物性解明からデバイス作製技術の確立、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が実証されています。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）。

本グループは、昨年、物理的考察に基づく独自の手法により、酸化膜と SiC の界面欠陥を大幅に低減し、SiC トランジスタの性能を 2 倍向上することを報告しました。今回、この研究をさらに発展させ、実用的に重要な構造において SiC トランジスタの性能を 6～80 倍向上させることに成功しました。本成果は、SiC パワー半導体の高性能化と低コスト化に大きく貢献し、SiC 半導体の普及と省エネ効果の加速に直接的に貢献します。

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（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きました。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。

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」に着目して研究を行い、昨年、(i) 高温の水素処理により SiC 表面を清浄化、(ii) 酸化膜（SiO_2 薄膜）を酸化ではなく堆積法により形成、(iii) 一酸化窒素による界面窒化 の 3 つの技術を組み合わせることによって、界面欠陥を大幅に低減し、SiC トランジスタの性能を 2 倍に向上できることを報告しました。

今回、木本教授と立木氏は、上記の研究を発展させ、実用上重要なトランジスタ構造（結晶面、不純物密度）で画期的な性能向上を達成しました。そのポイントは以下の通りです。

(1) SiC トランジスタの究極的な高性能化には、「トレンチ型」と言われる MOSFET が最も有望であることがわかっています。このトレンチ型 MOSFET では、心臓部である酸化膜/SiC 界面が SiC ウェハ表面（「Si 面」と呼ばれる）ではなく、ウェハ表面に直交する面（「A 面」、「M 面」）に形成されます。今回、この A 面および M 面基板を準備し、上記の独自手法を用いて SiC MOSFET を作製した結果、従来の Si 面上 MOSFET（従来の酸化膜形成法を採用）に比べて 6~7 倍の性能向上を達成しました。

(2) さらに、実際に製造される SiC トランジスタでは、トランジスタの耐電圧の増大や信頼性向上のために、比較的高濃度の不純物（アクセプタ型不純物：アルミニウム）を添加した p 型領域の上に MOS 構造を形成する必要があります。今回、製造に用いられる高濃度 p 型 SiC を用いて A 面、M 面上 MOSFET を作製した結果、従来技術による A 面、M 面上 MOSFET に比べて 6～80 倍の性能向上を達成しました。

従来の世界標準の酸化膜形成法である「熱酸化→一酸化窒素(NO)ガス処理」と本研究の酸化膜形成法である（「高温水素処理→酸化膜の堆積→NO 処理」）を図 1 に示します。従来の手法（世界標準）により作製した Si 面上 SiC トランジスタ(MOSFET)および本グループで提案する独自手法により作製した A 面上 SiC MOSFET の性能（電子の移動度）比較を図 2 に示します。従来法による Si 面上 MOSFET の移動度が 21 cm^2/Vs、本研究による A 面上 MOSFET の移動度が 131 cm^2/Vs であり、6 倍以上の性能向上に成功しました。また、従来手法および本グループ提案手法により作製した M 面上高濃度 SiC MOSFET の性能比較を図 3 に示します。$5x10^{18}$ cm^{-3} という高濃度にアルミニウムを添加した SiC 上の M 面 MOSFET では、従来法では移動度が約 1 cm^2/Vs、本研究では 80 cm^2/Vs であり、80 倍の性能向上となっています。なお、本グループで提案する手法により形成した酸化膜と A 面、M 面 SiC の界面欠陥の密度が、従来手法・構造に比べて大幅に低減できていることは確認できており、これがトランジスタの性能向上に直結したと解釈できます。また、高濃度にアルミニウムを添加した SiC の場合に、本提案手法の効果が一層大きくなるのは、酸化膜と SiC 界面の平坦性が優れており、電子の散乱（走行の阻害）が著しく減少したためであると考えられます。

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 界面の欠陥を大幅に低減し、実用

上重要な構造（結晶面、不純物密度）で SiC トランジスタの性能を 6～80 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、SiC パワー半導体の製造を行っている企業であれば、新たな特殊装置や高コストのプロセス導入は不要ですので、問題なく SiC トランジスタの量産に採用できます。

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と（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

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構(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）および日本学術振興会から科学研究費補助金（21H05003）の助成を受けて実施されました。

＜研究者のコメント＞

従来、SiC の Si 面 MOS 構造の欠陥低減に有効な手法を見出しても、実用上重要な A 面、M 面で欠陥低減効果が得られるとは限らないことをしばしば経験してきました。今回、Si 面（昨年発表）に加えて、実用上最も重要な A 面、M 面でも顕著な欠陥低減を達成し、SiC トランジスタの大幅な高性能化に成功したことに喜び、かつ驚いています。SiC 半導体特有の物理・化学現象の理解に努め、原点に立ち戻ったアプローチを行ったことが功を奏したのではないかと考えています。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：Mobility improvement in 4H-SiC MOSFETs by H_2 etching before SiO_2 deposition and interface nitridation (招待講演)

著　　者：立木 馨大、伊藤 滉二、金子 光顕、木本 恒暢

国際会議：13th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (Tours, France), Tu-1B-Inv.

＜参考図表＞

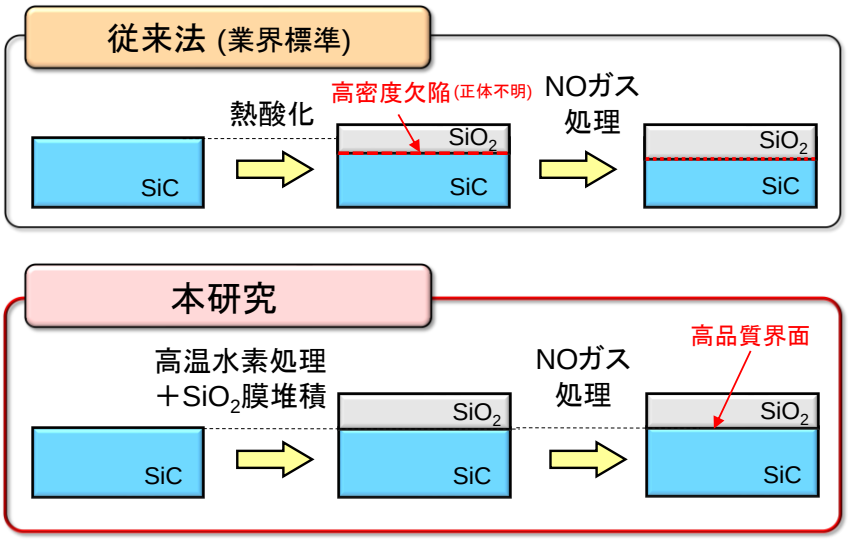


図１　SiO_2/SiC 構造を形成する方法の模式図（上：従来法、下：本研究で提案する手法）

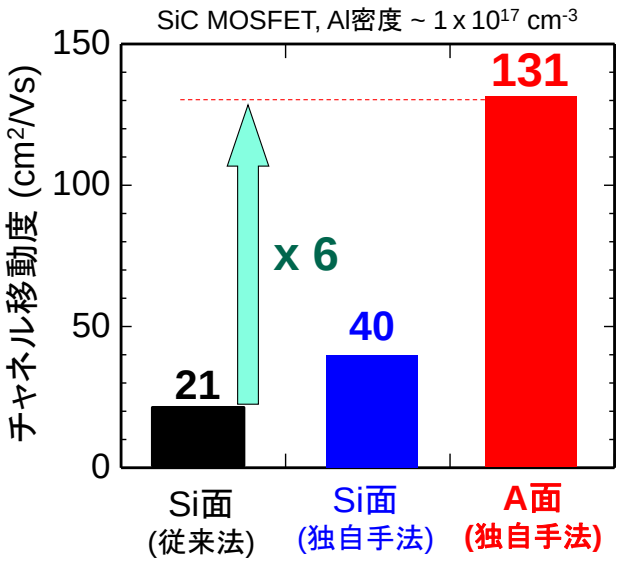


図２　Si 面上 SiC トランジスタ（従来、独自手法）手法と A 面上 SiC トランジスタ（独自手法）の性能（電子移動度）比較

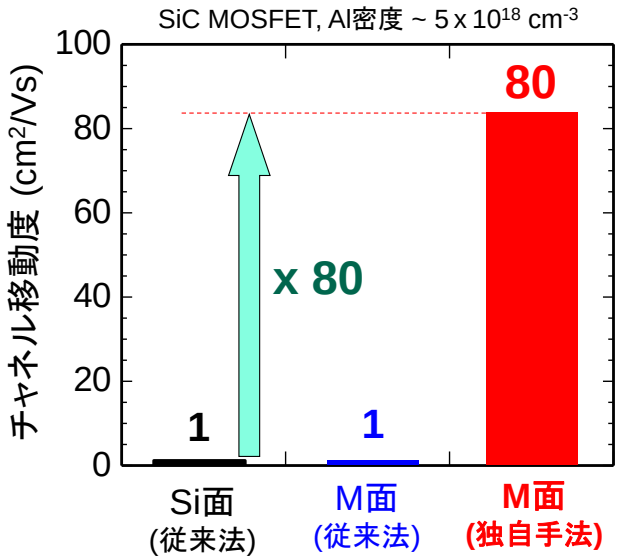


図３　高濃度にアルミニウムを添加した SiC を用いた Si 面および M 面上トランジスタの性能（電子移動度）比較

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るなど、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。

トレンチ型 MOSFET

電力用のトランジスタでは、電流を縦方向（ウェハの表裏方向）に流す構造が基本となる。トランジスタを MOS 型（MOSFET）で作製する場合、その心臓部となるゲート電極/酸化膜/半導体の三層構造（MOS 構造）を表面に形成する「プレーナ型」と、微細な垂直溝を形成してその側壁に MOS 構造を形成する「トレンチ型」に分類される。トレンチ型では、作製プロセスがやや複雑になるものの、微細化によって著しく性能を向上できるので、Si、SiC トランジスタ共にトレンチ型が主流になっている。SiC トレンチ型 MOSFET の場合、MOS 構造を形成するのはウェハ表面に直交する側壁面になり、結晶学的には A 面、M 面と呼ばれる面となる。

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。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。