

## 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—

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。

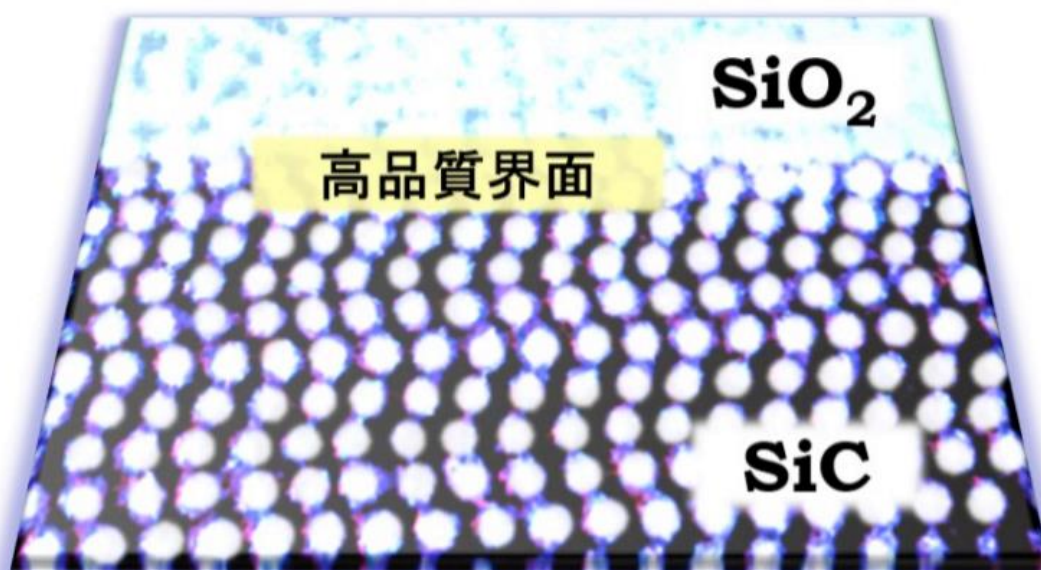
Siを中心とした半導体は、計算機のロジックやメモリだけでなく、電気自動車、電車のモータ制御、電源などに広く用いられていますが、消費電力（電力損失）が大きな問題となっています。近年、低損失化を目指して、Si よりも性質の優れた SiC によるトランジスタ開発が活発になり、実用化が始まりました。

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。



## 超高品質 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面の形成

### 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（SiO<sub>2</sub>）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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>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 SiO<sub>2</sub>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 SiO<sub>2</sub>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 SiO<sub>2</sub>膜に変換可能です。

2. 上記の方法により SiC 表面に SiO<sub>2</sub>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 (N<sub>2</sub>) 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SiO<sub>2</sub> 膜形成→高温での N<sub>2</sub> 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 SiO<sub>2</sub>/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。

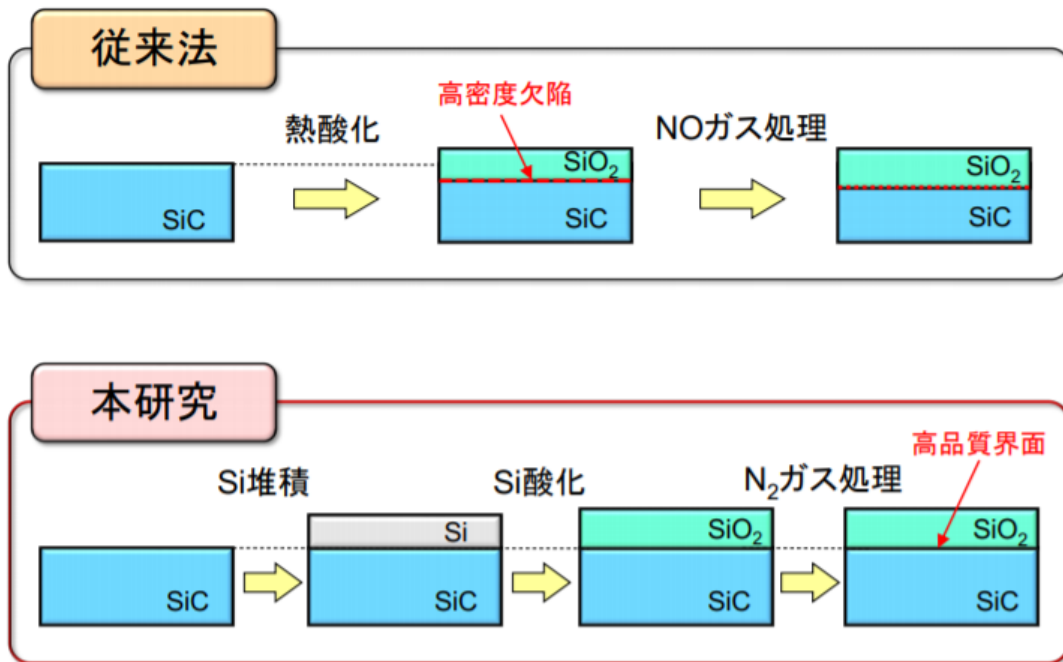


図1 SiO<sub>2</sub>/SiC 構造を形成する方法の模式図 (上：従来法、下：本研究で提案する手法)

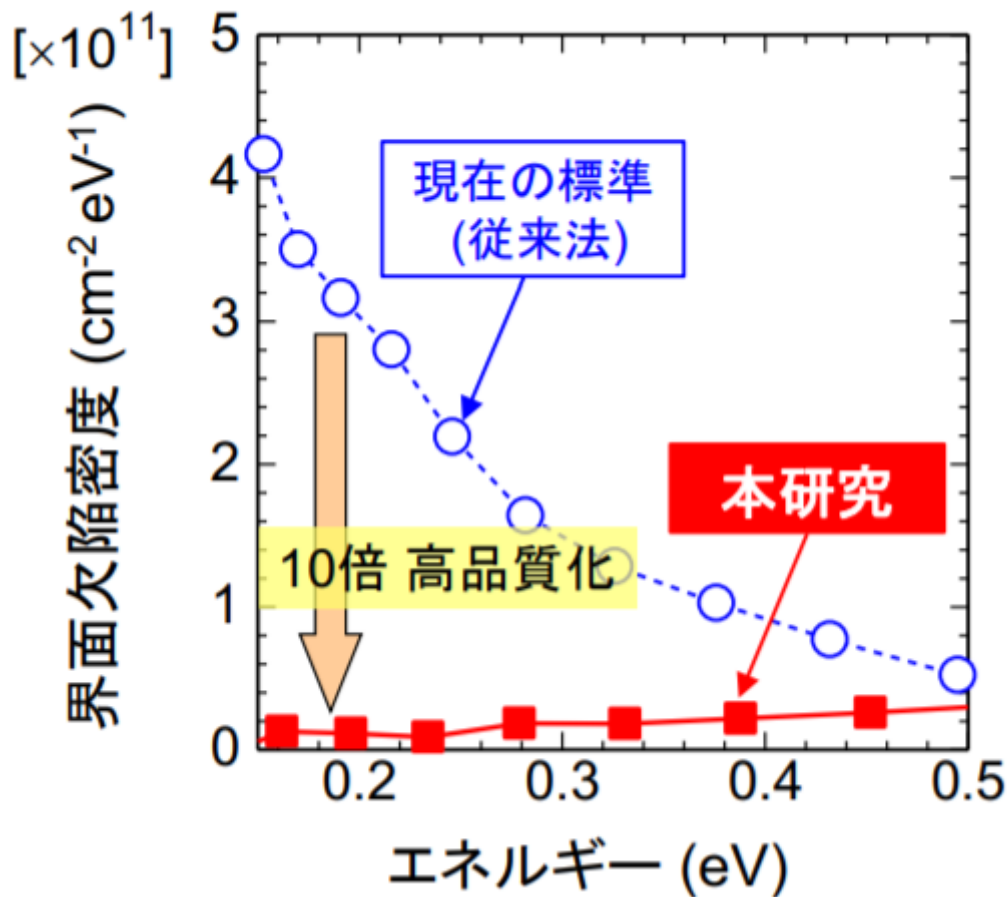


図 2 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面欠陥の低減を示す実験データ

「SiC を酸化して表面に SiO<sub>2</sub>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。

#### 論文情報

タイトル: Design and formation of SiC (0001)/SiO<sub>2</sub> interfaces via Si deposition followed by low-temperature oxidation and high-temperature

nitridation

雑誌 Applied Physics Express

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

日本語原文

[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2020/200821\\_1.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2020/200821_1.html)

文 JST 客観日本編集部



