

酸化過程排除による SiC/酸化膜界面の高品質化

1. 研究背景

エネルギー問題は今世紀最重要課題の一つとされています。この問題を解決するには、太陽光や風力発電といった自然エネルギーの活用と同様に、エネルギーを高効率的に利用する技術が重要です。電力エネルギー変換を担うのは、半導体パワーデバイス（ダイオードやトランジスタ）であり、これらの高性能化（通電損失の低減）が電力の高効率利用の鍵になります。現在電力変換用トランジスタの材料としてシリコン（Si）が広く用いられていますが、その性能は長年の研究開発の結果、Si の物性値から決まる理論限界に達しつつあります。そこで、Si を用いたトランジスタの限界を打破し、飛躍的な低損失化を実現するトランジスタ材料として炭化ケイ素（SiC）に注目が集まっています。SiC は絶縁破壊に対する耐性（電力損失の低減に重要な物性値）が著しく優れています。SiC を用いた MOS 型トランジスタは同耐圧の Si トランジスタに対し、理論上通電損失を約 1/500 に低減可能です。したがって、Si トランジスタを SiC に置換することができれば、電力の大幅な削減が実現されます。

SiC トランジスタは 2010 年頃から量産が開始しています。現在ではエアコン、太陽光発電用電力調整器、産業用モータ、電車、電気自動車へ搭載されています（図 1）。そして、いずれも SiC パワー半導体を用いることによって大幅な省エネ効果が実証されています。しかしながら、現状、SiC MOS 型トランジスタのオン抵抗（通電損失）は Si の場合の約 1/50 程度であり、SiC の物性から期待される性能からは程遠くなっています。その高いオン抵抗は、SiC/酸化膜（SiO₂）界面に高密度に存在する欠陥に由来します。MOS 型トランジスタでは、チャンネルと呼ばれる部分である、半導体/酸化膜界面を電子が流れます。しかし、欠陥が高密度に存在する場合、電流輸送を担っている電子が捕獲されることで、流れる電流が少なくなり、チャンネル部の抵抗値が大きくなります。SiC MOS 型トランジスタでは、チャンネル抵抗がオン抵抗の大半を占めています（図 2）。これが長年の問題となっており、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。

2. 実験および結果

SiC には、熱酸化すると良質な SiO₂ 膜が形成されるという性質があります。これは大きなメリットであり、従来はこの手法を用いて SiC/酸化膜界面を形成し、SiC MOS 型トランジスタが作製されてきました。しかしながら、前述の通り、形成された SiC/酸化膜界面には極めて多くの欠陥が存在します。欠陥を低減するため、SiC の酸化条件の調整や酸化膜形成後の熱処理が行われてきましたが、20 年間にわたり顕著な進歩はありませんでした。

ここで、一度基本に立ち返り、SiC/酸化膜界面に存在する欠陥が熱酸化により形成されるという仮説を立て、SiC/酸化膜構造を形成する段階での酸化抑制、および酸化膜形成前の SiC 表面欠陥の除去が、界面欠陥を減らす鍵になると考えて研究を行いました。この過程で、①水素エッチングによる SiC 表面処理、②SiC を酸化させない SiO₂ の形成、③窒素処理の 3 つが、低い界面準位を得る重要なポイントであることを発見しました。図 3 には従来の世界標準プロセスである「熱酸化→酸化窒素処理（NO 処理）」と本研究のプロセス「表面欠陥除去→酸化膜の堆積→窒素処理（H₂-CVD-N₂ プロセス）」の比較を示します。また、図 4 には両者の手法で作製した SiC MOS 型トランジスタの電流-電圧特性を示します。業界標準である NO 処理で酸化膜を形成した場合と比較し、H₂-CVD-N₂ プロセスで酸化膜を形成したトランジスタの電流は大幅に増加しています。また、トランジスタ性能（チャンネル移動度）を評価したところ、従来と比較して 2 倍以上（2 倍の性能向上）になりました。なお、本研究では系統的な多くの実験を行い、表面欠陥を除去した後に SiC 半導体表面を酸化した場合には、このような高品質界面が形成できないことを確認しています。

上記ポイント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、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ています。本成果は、機器の省エネ化や小型化が期待されるなど、産業的な波及効果も非常に高く、当該分野において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。

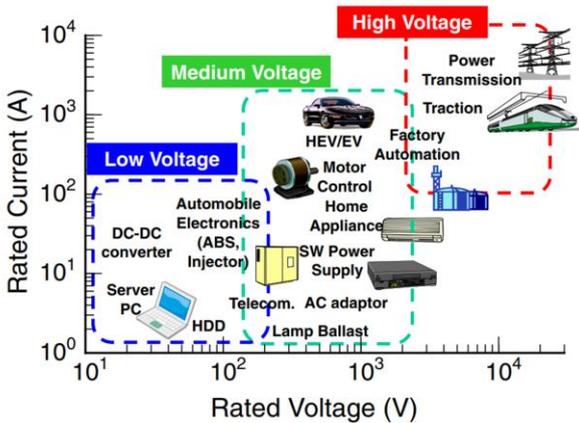


図1 半導体スイッチングデバイスの応用範囲。使用される電圧電流によって低耐圧から高耐圧に分類される。

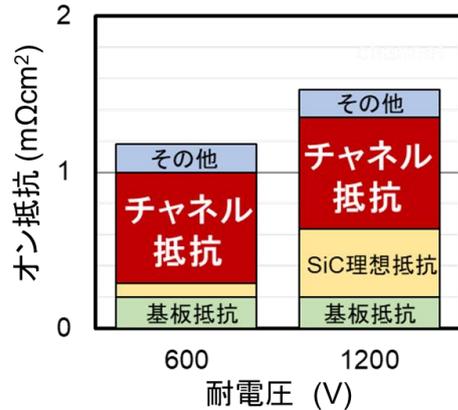


図2 SiC MOS型トランジスタにおけるオン抵抗の内訳。SiC MOS型トランジスタでは、チャンネル抵抗がオン抵抗の大半を占めている。

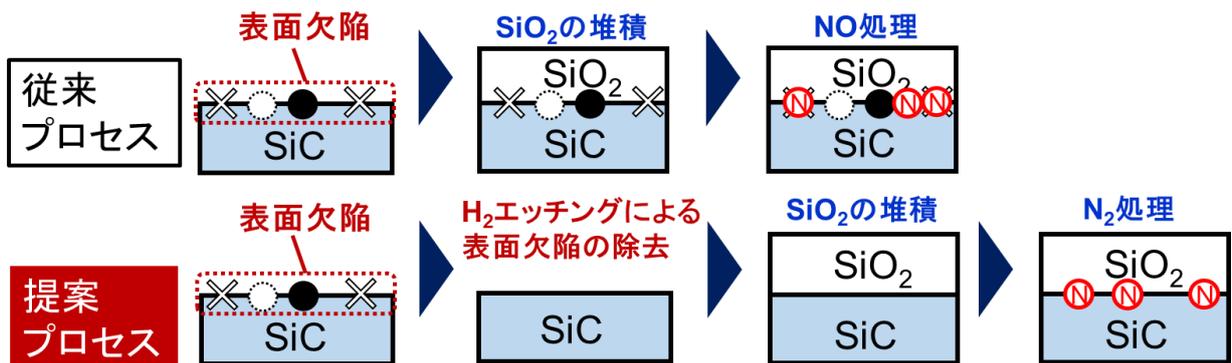


図3 従来のSiC/SiO₂構造形成プロセスと本研究で提案する新たなSiC/SiO₂構造の形成プロセス

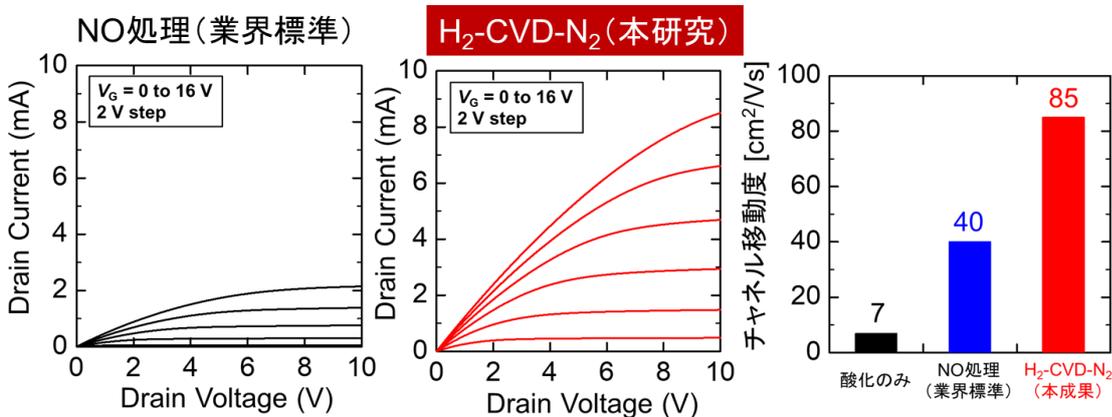


図4 本研究で作製したMOS型トランジスタの動作特性、およびチャンネル移動度の比較。本研究で確立した新手法を用いて作製したトランジスタは、業界標準の場合と比較して2倍の性能向上を示した。