



応用物理学会秋季学術講演会 注目講演プレスリリース

2023年 9月 11日

MBE法により成長したSiドーピング α - Al_2O_3 層の電気的特性評価

Si doping of α - Al_2O_3 grown by molecular beam epitaxy

サファイア半導体を実現か!?

酸化アルミニウム (Al_2O_3) の電気伝導に世界で初めて成功

筑波大学 数理物質系

奥村宏典

okumura.hironori.gm@u.tsukuba.ac.jp

【発表概要】

- ・ プラズマ援用MBE法を用いてシリコン (Si) をドーピングし、絶縁体である α 型酸化アルミニウム (α - Al_2O_3) すなわちサファイアの電気伝導に世界で初めて成功
- ・ シリコンをドーピングした590ナノメートル厚の酸化アルミニウムの薄膜に、30ボルト (V) の電圧をかけ、1ミリアンペア (mA) を導電
- ・ 室温での膜中の抵抗値は、半導体水準の166オームセンチメートル (Ωcm) を確認

筑波大学数理物質科学研究群の奥村宏典助教らによる研究グループは、プラズマ援用MBE法を用いてシリコン (Si) をドーピングすることで、絶縁体である α 型酸化アルミニウム (α - Al_2O_3) すなわちサファイアの室温での電気伝導に世界で初めて成功した。実験では、シリコンをドーピングした590ナノメートル厚の酸化アルミニウムの薄膜に、30ボルト (V) の電圧をかけ、1ミリアンペア (mA) の導電に成功した。サファイアは非常に大きなバンドギャップ (8.5エレクトロンボルト $\langle\text{eV}\rangle$ 以上) を持ち、低価格であることから、半導体として利用することができれば、EV (電気自動車) をはじめとするパワーデバイス用材料として高いポテンシャルを持つ。産業応用への期待が高まる研究成果だ。

【詳細】

パワー半導体は、電力の制御・変換を行う半導体だ。その応用は幅広く、スマートフォンの充電はもちろん、エアコンやEV（電気自動車）の電源回路にも使われている、まさに社会を支える半導体だ。企業や研究機関では現在、次世代のパワー半導体材料の開発が加速している。パワー半導体の性能が向上すれば、機器そのものを高性能化、省エネルギー化することが可能だ。たとえば高耐圧性能を持たせることができれば、導通損失の低減ができ、耐高温特性を持たせれば、冷却装置が不要となり機器の小型化が実現できる。たとえばEVでは、モーターと電気回路の電力変換部分にパワー半導体が使われている。高効率なパワー半導体によって導電損失やスイッチング損失を下げる事ができれば、燃費が下がり、高航続距離化することができる。

パワー半導体用材料には、バンドギャップ（※1）が大きいほど好ましい。現在、次世代のパワー半導体の材料として様々なワイドバンドギャップ半導体の利用が模索されており、炭化ケイ素（SiC、バンドギャップ 3.3 eV）、窒化ガリウム（GaN、バンドギャップ 3.4 eV）、酸化ガリウム（Ga₂O₃、バンドギャップ 4.7-5.2 eV）、ダイヤモンド（バンドギャップ 5.5 eV）、窒化アルミニウム（AlN、バンドギャップ 6.1 eV）などがその有力候補とされている。

「本研究はこれらワイドバンドギャップ半導体材料に、新しくα型酸化アルミニウム(α-Al₂O₃)、つまりサファイアを有力候補として加えられ得ることを、電気的特性評価によって示したものです。絶縁体として用いられているサファイアを半導体として使うことができれば、理論的な絶縁破壊電界強度が20 MV/cm程度の究極的な単結晶材料を開拓することが可能です」と奥村宏典氏は話す。

※1 バンドギャップ 結晶のバンド構造における、禁制帯のエネルギー幅のことを指す。物質は、このエネルギー幅の大きさによって、導体や絶縁体（または、その中間の性質を持つ半導体）になる。

サファイアは究極のパワーデバイスになる

奥村氏は、低価格でパワーデバイスを実現する方法を2つ挙げる。ひとつは既にパワーデバイス動作ができる材料を用いて、大量生産することで低価格化を実現するという、もうひとつは低価格の材料を用いて、パワーデバイス動作をさせる方法だ。そして現在のパワーデバイスの実現方法は前者が一般的だという。

ワイドバンドギャップ半導体材料でもっとも研究が進んでいるのは炭化ケイ素（SiC）であり、追隨して、研究が加速しているのは窒化ガリウム（GaN）や酸化ガリウム（Ga₂O₃）だという。「材料物性だけを見ると、ダイヤモンドがもっとも優れています。しかしこれらはどれも、非常に高価格であり、大量生産することで少しずつ価格が下がっている。最近になり、炭化ケイ素（SiC）の価格が下がってきたのも大量生産の恩恵によるところです。それでもシリコンと比べると、まだ決して安くはない。そこで私たちは、もともと低価格な材料でパワーデバイスを実現することを目指しました。注目したのが絶縁体のサファイアであり、研究を進めました」（奥村）

サファイアの魅力は非常に低価格であるということだ。サファイアは青色LEDの窒化ガリウム（GaN）用基板などに使われている材料であり、すでに一定の市場がある。絶縁体として使われてい

ることもあり、そのバンドギャップは非常に大きい。もしもパワーデバイスとして動作することができれば、そのバンドギャップの大きさが、そのまま究極のパワーデバイスの性質になる。まさに従来の半導体の限界を突破するような、野心的な研究だと言えるだろう。

奥村氏は、サファイアを研究対象として選んだ理由に、価格だけでなく、その品質の高さを挙げる。「EVのような人の命に関わるデバイスには、価格が安く、高品質な半導体が必要です。まずシリコンが安価であり、品質の高さでもトップです。一方のサファイアはシリコンほど高品質ではないものの、炭化ケイ素以上の品質を持ちながら低価格であるということが特徴です。またサファイアはすでに8インチの基板が生産できることから、パワーデバイス化できれば、製造メーカーが量産化に向けた生産ラインを構築しやすいと言えます」（奥村）

絶縁体のサファイアに、電流が流れた

サファイアで半導体デバイスをつくるという先行研究はほとんどない。半導体デバイスをつくるためには、サファイアによる薄膜を作製する必要がある。さらに半導体の性質であるn型やp型を左右するドーパント（※2）、電気伝導、膜厚、エッチング、電極など細かな膜制御とデバイスプロセスが必要だ。サファイアを対象として、そうした薄膜の詳細な制御とプロセスを行っている報告もほとんどなく、奥村氏らの研究は文字通りゼロからのスタートだったという。

奥村氏らは、結晶成長の方法にプラズマを用いた「プラズマ援用分子線エピタキシー法（Plasma-assisted Molecular Beam Epitaxy）」を採用し、ドーパントにはシリコンを用いた。結晶の成長速度を測定すると、最高で1分で7ナノメートル（1ナノメートル=100万分の1ミリ）という速度だった。デバイス化には50ナノメートルは膜厚として必要であり、それも実用化には1時間以内で得たいとされるが、それを大きく上回った結果だ。また、シリコンのドーパント濃度については、 10^{18} から 10^{19} cm⁻³の制御が可能であり、一般的に半導体のチャンネルとして使用できる水準の濃度に達していた。

そして奥村氏らは、膜厚や熱処理時の雰囲気ガス、熱処理の温度など、さまざまな設定で導電率を測定した。その結果、シリコンを 4×10^{18} cm⁻³でドーピングし、膜厚は60ナノメートル、1400°Cの窒素雰囲気です30分間の熱処理したサファイア単結晶における導電率を測定したところ、サブミリアンペア（Sub mA）の電流が流れることが確認されたという。「サファイアには絶対に室温で電気は流れないと思われていたのですが、流れたのです。まだ原因は分かりませんが、窒素やアルゴン雰囲気で熱処理をするとより大きい電流が流れること、また、1300°C～1400°Cの熱処理が非常に効果的であることが分かりました。これだけの電流が流ればデバイスで使える可能性は出てきます。この研究成果はすでに特許を出願しています」（奥村）

※2 ドーパント 半導体に添加（ドーピング）される不純物のこと。添加する不純物の種類、濃度（ドーパント濃度）によって、半導体の性質が変化する。

サファイア半導体の誕生？

奥村氏らは電気が流れた背景でどのようなことが起きているか、すなわち本当に半導体なのかを調べていった。590ナノメートルの膜厚を持つ、シリコンをドーピングしたサファイア単結晶に電極をつけ、その導電性を調べた。すると10ボルトの印加でサブミリアンペア程度の電流が流れたのだ。さらに30ボルトの印加では1ミリアンペア (mA) 程度の電流が流れた。「画期的な結果でした。膜厚を厚くするほど、流れる電流が増えていることが測定できたことは、表面や欠陥などではなく、膜内を電流が流れていることを示唆します。さらに800°Cでも安定して電気が流れました (図1)。このデバイスは高温環境にも強いと言えます」 (奥村)

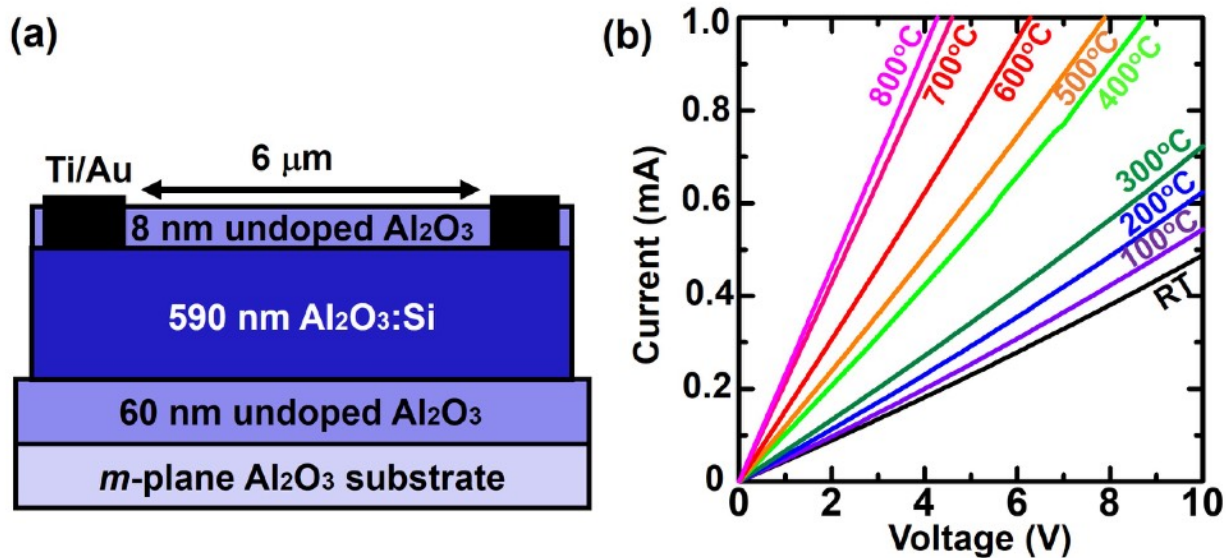


図1： (a) 膜厚590nm、m面、Al₂O₃チャネル層 ([Si]=8×10¹⁸cm⁻³) の概略構造。 (b) 室温から800°Cまでの測定温度において、N₂中1400°Cでアニール処理した後のAl₂O₃:Si層のI-V特性。

続いて奥村氏らは、膜の抵抗率 (Layer Resistivity) についても調べた (図2)。絶縁体などの性質を判断する際、極低温状態からどのように電気伝導に変化があるかを測定する方法がある。もしも欠陥を介して電流が流れていれば、温度を上げてても低温の時と電気伝導の変化が小さい。「測定の結果、温度が高い状態では急激に膜の抵抗率が下がっていることが分かりました。これは半導体の教科書的な性質であり、まだ結論づけられないものの、半導体のように扱える可能性があることを示しています」と奥村氏は語る。

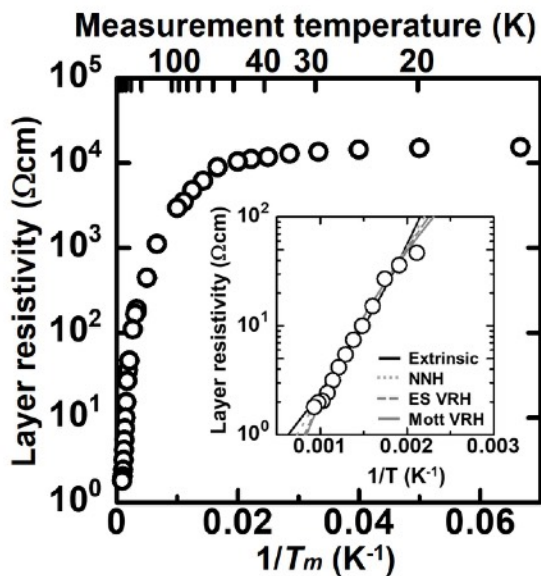


図2: $[\text{Si}] = 8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の厚さ590 nmの Al_2O_3 層を1400 °Cで熱処理した後の膜の抵抗率の温度依存性。100K以下の温度では膜中の抵抗率に大きな変化は見られないが、100K以上の温度では急激に低下する。抵抗率データは、外因性キャリア伝導の仮定（黒実線）およびホッピング伝導の仮定（灰色線）の下で、523-1073 Kの測定温度範囲でフィッティングされている。（灰色実線：モット可変範囲ホッピング、灰色破線：エフロシュクロフスキーの可変範囲ホッピング、灰色点線：最近接ホッピング）

「結論として、サファイア単結晶中にシリコンを高濃度ドーピングして熱処理をすると電気が流れるということがわかりました。特筆すべきは室温での膜中の抵抗値で、166オームセンチメートル（ Ωcm ）でした。固体物理の教科書では、 $\sim 10^7$ オームセンチメートルよりも小さいければ半導体と定義される場合があります。この計測値はそれよりも数桁低いことから、抵抗率の観点で言えばこれは100%半導体だと言えるでしょう」（奥村）

実際に半導体デバイスとしての実用化には課題が残るといふ。「実際にデバイス応用するにはショットキー電極が必要となり、低濃度のドーピングが必要になる。しかし現状では、ドーピングを低濃度にすると一気に電気が流れなくなるため、まだ半導体デバイスとして使えるかはわかりません。ホール効果測定でも信頼できる結果が得られていません。今後はこうした課題を克服する研究を進めていきたいと思っています」（奥村）

奥村氏は今後、EVなどの主要なパワーデバイスには炭化ケイ素（SiC）の導入が進むと考えている。しかし炭化ケイ素（SiC）は高価なため、サファイアのパワーデバイスが実現し、シェアを獲得するとすれば、エアコンなどの家庭用品や医療機器が潜在的な市場になるだろうと予測している。