

800°Cを超える高温環境で利用可能な半導体素子を開発

既存の Si（シリコン、ケイ素）半導体は、約 300°Cで動作に異常を来すため、用途が限られます。今回、窒化アルミニウム（AlN）半導体を用いることで、ダイオードを 827°Cまで、トランジスタを 727°Cまでの高温環境下で、安定に動作させることに成功しました。

Si（シリコン、ケイ素）半導体は、あらゆる機器に使われており、私たちの生活に欠かせないものになっています。しかし、Si 素子の動作可能温度は 300°C以下に限られることから、地下資源掘削や宇宙探索、エンジン周辺部といった 300°Cを超える環境での素子動作が求められています。

高温環境で動作する半導体素子を実現するには、絶縁体に近い材料を用いる必要があります。現在、窒化アルミニウム（AlN）結晶は、最も絶縁体に近い半導体の一つで、既に、AlN を使ったダイオードやトランジスタの動作報告例が数多くあります。また、AlN 素子が高温耐性に優れているという理論予測もあります。しかしながら、電気特性を調べる装置の性能上、素子動作が実証できるのは 500°C以下に限られていました。

本研究では、900°Cまで測定可能な電気特性の評価装置を用意し、優れた結晶品質を持つ独自の AlN 試料を用いてダイオードとトランジスタの作製および評価を行い、ダイオードは 827°C、トランジスタは 727°Cでの動作に成功しました。また、AlN 素子に対して、Ni（ニッケル）電極が 827°Cでも安定して利用可能であることが分かりました。低価格かつ大面積試料が入手可能なサファイア基板上 AlN 層を用いている点と、シンプルな構造の素子で耐熱性を実現した点で、この AlN 素子は、実用性にも優れていると言えます。

本研究成果により、800°Cを超える厳環境での半導体素子利用が可能になりました。この技術は、高温環境であるために制限されていた地下開発や鉄鋼、宇宙・航空産業への貢献が期待されます。

研究代表者

筑波大学数理物質系

奥村 宏典 助教

研究の背景

Si（シリコン、ケイ素）半導体は、家電やスマートフォン、自動車といった身近な製品だけでなく、産業機器や測定機器にも多く使われており、私たちの生活に欠かせないものとなりました。これは、Si 素子が、室温で素晴らしい性能を発揮できるためです。しかし、300°C付近まで温度が上がると誤動作を起こします。近年、石油やガスの地下資源に加え、超臨界地熱発電を含む深層を利用した地下開発が着目されていますが、地下数 km まで掘削する場合、掘削や検層の機器全体が 300°C以上の高温に曝されてしまうため、Si 素子を利用することが難しくなります。高温でも安定動作する半導体素子があれば、機器の小型軽量化や作業の高効率化だけでなく、機器の故障リスクが低減され、地下開発の作業コストを下げることができます。このような高温素子は、地下開発だけでなく、鉄鋼や宇宙・航空産業など幅広い分野への展開が期待できます。

熱に対する耐性に最も優れている半導体の一つが AlN（アルミニウムナイトライド、窒化アルミニウム）^{注1)}です。AlN は原子の結合が強く、熱エネルギーを与えても電流を担う粒子（電子、正孔）がほとんど増えないため、理論的には炭化ケイ素（SiC）やダイヤモンドよりも高温で安定動作が可能です（図1）。本研究グループはこれまでに、AlN をチャンネルとしたトランジスタと窒素極性面^{注2)} AlN をベースに用いた分極効果トランジスタ^{注3)}を世界に先駆けて動作実証してきました。これまでも AlN 素子の報告はありましたが、機器の測定限界により 500°C以下までしか動作報告はありませんでした。また、酸化ガリウム（ β -Ga₂O₃）ショットキー障壁ダイオード（SBD）^{注4)}やダイヤモンド SBD では、350°C付近から電気的特性が劣化する傾向にありました。そこで今回、独自の AlN 試料を作製し、室温から 827°C（1100 K）までの SBD の動作実証に成功しました。これは現在知られているダイオードとしては、最も高い動作温度です。

研究内容と成果

本研究では、高真空下で測定可能なプローバー（理工貿易社製）を導入するとともに、シンプルな構造を持つ AlN 素子として、SBD と電界効果トランジスタ（MESFET）^{注5)}を作製し（図2）、室温から 900°C までの電気的特性を調べました。

3 μ m 厚の AlN 試料に Si イオン注入^{注6)}した後、熱処理することで n 型化（通常よりも電子を多く持つ）させ、電気伝導層として用いました。半導体素子は、温度を上げると OFF 時の電流が増え、ON 時の電流との差（on/off 比）が小さくなります。例えば、ダイヤモンド SBD では、200°Cで 10¹⁰の on/off 比が得られていても、800°Cで 10⁴以下になります。今回、AlN SBD では、827°Cでも on/off 比が 10⁴以上、AlN MESFET では、727°Cでも on/off 比が約 10³を維持できました。その理由として、高品質 AlN 層と Ni 電極が挙げられます。結晶欠陥を介して漏れ電流^{注7)}が生じますが、高品質膜を利用したことで、これを低く抑えることができました。また、ショットキー電極^{注8)}として用いた Ni は、827°Cでも AlN 表面と反応することなく、熱的に安定であること分かりました。今後、オーミック電極^{注9)}を改善することで、更なる特性向上が期待できます。

今後の展開

現在、AlN 半導体は、深紫外発光素子や高周波パワー素子分野での市場形成が進んでいます。今回、これらの素子よりも容易に作製できる構造で高温耐性を示せたことは特筆すべき点です。AlN は結晶成長により p 型と n 型の両方の伝導性を制御できる材料であり、高温動作に有望な、接合型電界効果トランジスタ（JFET）^{注10)}の作製も可能です。今後、より高温での安定動作を目指し、電極や素子構造の工夫による特性向上、および、高温における素子動作の基礎研究を進めていきます。

参考図

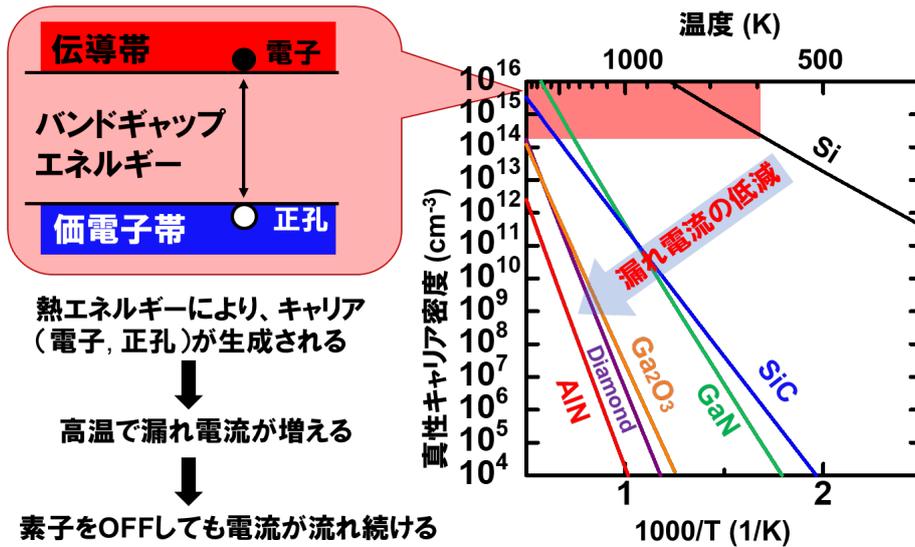


図1 各半導体材料の真性キャリア密度と温度の逆数との関係

固体材料によってバンドギャップエネルギーが異なる。バンドギャップエネルギーが大きい材料ほど、高温でも電子や正孔が生成されにくくなるため、素子をOFFした際に意図せず流れる電流（漏れ電流）を小さく抑えることができる。Siでは300°C（527K）程度でも大きな漏れ電流が生じるが、AlNはSiよりも真性キャリア密度が10桁以上小さく、727°C（1000K）以上でも漏れ電流を十分に抑制できる。

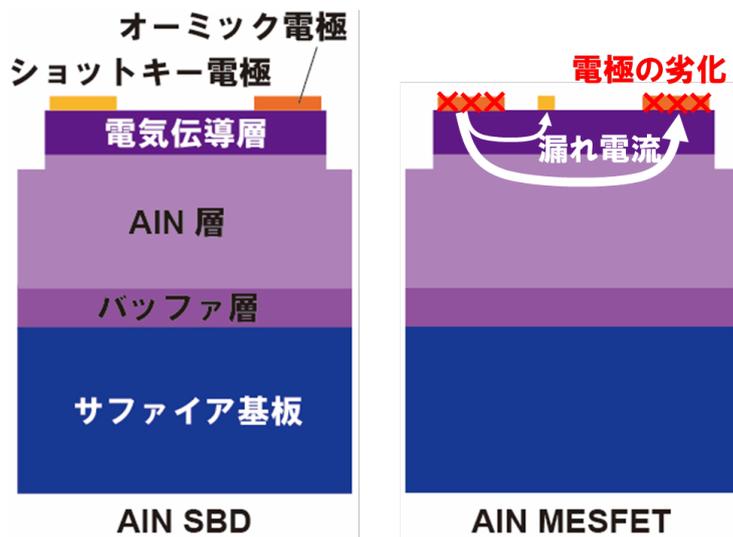


図2 今回作製したAlN SBDとAlN MESFETの構造

Siイオン注入したAlN層を電気伝導層として用いた。ショットキー電極としてNi/Au、オーミック電極として窒素雰囲気下950°Cで1分間加熱したTi/Al/Ni/Auを用いた。素子の外側から回り込む電流を低減するため、電極の外側をエッチングした。SBDでは、オーミック電極が877°Cで劣化した。MESFETでは、高温時に下地層からの漏れ電流が大きくなり、727°C動作が最高値となった。

用語解説

注1) AlN (Aluminum Nitride)

アルミニウムと窒素の1:1の化合物。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。深紫外発光素子や高性能な高周波パワー素子（通信用半導体素子）を実現できると期待される。

注2) 窒素極性面 (Nitrogen-polar plane)

AlNを含む六方晶ウルツ鉱型の窒化物半導体は、c軸方向に反転対称性を持たないため、金属極性面とN極性面の2種類の結晶方向が存在する。高品質結晶が得られる金属極性面での結晶成長が主流だが、N極性面は高周波パワー素子で更なる高性能化が期待できる。

注3) 分極効果トランジスタ (Polarization Field-Effect Transistor: PoFET)

チャンネル層にドーピングをせずに動作する、電界効果トランジスタの一種。ヘテロ接合により、自発分極とピエゾ分極によってキャリアを誘起することチャンネルを形成する。

注4) ショットキー障壁ダイオード (Schottky Barrier Diode: SBD)

半導体と金属を接合させたときに、電流が一方向にしか流れない整流性を利用したダイオード。PN接合ダイオードと比べて、スイッチング損失が小さい。

注5) 電界効果トランジスタ (Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor: MESFET)

ショットキー接合性の金属をゲートとした構造を持つ、電界効果トランジスタの一種。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半導体内に空乏層が拡がり、電気の通り道が遮断され、ドレイン端子とソース端子間に電気が流れなくなる。

注6) イオン注入 (Implantation)

イオン化した原子または分子を高速に加速し半導体に衝突させることで異種原子を半導体内部に埋め込む方法。母材となる半導体と異なる原子が存在することで、n型とp型半導体が形成される。

注7) 漏れ電流 (Leakage current)

半導体素子において、本来電流が流れない箇所で意図せず流れる電流。小さいほど好ましい。

注8) ショットキー電極 (Schottky contact)

整流性の電気特性を示す、半導体と接触する電極。

注9) オーミック電極 (Ohmic contact)

電圧に対して電流が線形に変化するような電気特性を示す、半導体と接触する電極。

注10) 接合型電界効果トランジスタ (Junction Field-Effect-Transistor: JFET)

半導体中のpn接合を用いた、電界効果トランジスタの一種。pn接合は、p型半導体とn型半導体が接している面のことで、接合面付近に電気を流さない領域を形成する。ドレイン、ソース、ゲートの3端子からなり、ゲート端子に電圧を印可することでpn接合により塞がれていた電気の通り道を開くことでドレイン端子、ソース端子間が導通する。高温時でも、ゲート電極の劣化の影響が小さく、下地層側からの漏れ電流にも強い。

研究資金

本研究は、日本学術振興会科学研究費（23H01863、19H02166）およびDOWAテクノファンド (<http://www.dowa-technofund.jp/jp/>) を中心とした研究プロジェクトの一環として、DOWAエレクトロニクス株式会社との共同研究契約に基づいて実施されました。また、文部科学省「世界で活躍できる研究者戦略育成事業」として実施する「世界で活躍できる研究者戦略育成事業大学×国研×企業連携によるトップランナー育成プログラム (TRiSTARプログラム)」による支援を一部受けました。

掲載論文

【題 名】 Temperature dependence of electrical characteristics of Si-implanted AlN layers on sapphire substrates

(サファイア基板上 AlN 層の電気的特性の温度依存性)

【著者名】 H. Okumura, Y. Watanabe, and T. Shibata

【掲載誌】 *Applied Physics Express*

【掲載日】 2023 年 6 月 26 日

【DOI】 10.35848/1882-0786/acdcde

問合わせ先

【研究に関すること】

奥村 宏典 (おくむら ひろのり)

筑波大学 数理物質系 助教

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

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000003716>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp