



第71回 応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2024年 3月 18日

分布型分極ドーピングによるAlN系縦型p-nダイオードの実証

Demonstration of AlN-Based Vertical p-n Diodes with Distributed Polarization Doping

UWBG半導体の有力候補材料・窒化アルミニウム（AlN）で 世界初のp-nダイオードを作製、理想的な電気特性を実証

名大院工¹, 旭化成², 名大 IMaSS³, 名大 D センター⁴, 名大 IAR⁵

○隈部 岳瑠¹, 吉川 陽^{2,3}, 川崎 晟也¹, 久志本 真希¹, 本田 善央^{3,4,5}, 新井 学³, 須田 淳^{1,3}, 天野 浩^{3,4,5}

E-mail: kumabe@nagoya-u.jp

【発表概要】

- ・ 窒化アルミニウム（AlN）や、高Al組成AlGaNは、超ワイドバンドギャップ半導体（UWBG半導体）への応用が期待されている。
- ・ 分布型分極ドーピングによって、窒化アルミニウム（AlN）において、電子デバイスの基本構造である縦型p-nダイオードを作製し、その性能を実証した。
- ・ トランジスタなども理論上は実現可能であり、AlN系材料の導電性制御という長年の課題を克服する成果

名古屋大学の隈部岳瑠（博士課程）ら、および旭化成株式会社による研究グループは、超ワイドバンドギャップ半導体（UWBG半導体）において有力な候補材料の一つとされている窒化アルミニウム（AlN）において、電子デバイスの基本構造であるp-n接合（ダイオード）を作製し、理想的な電気特性を実証することに世界で初めて成功した。この成果は、AlN系材料のデバイス応用においてボトルネックとなっていた伝導性制御を、分布型分極ドーピング技術を用いることによって成し遂げた。同研究グループが有する、高度な薄膜結晶成長技術および高品質AlN単結晶基板が相まって達成された成果である。同研究はAlNの電子デバイス応用のための基幹となる技術開発であり、次世代パワーデバイス、高周波デバイスの開発などへの扉を開く成果である。

【詳細】

窒化アルミニウムの伝導性制御への課題

バンドギャップ（※1）が非常に大きい半導体は「超ワイドバンドギャップ半導体（UWBG半導体）」と呼ばれる。バンドギャップが約5eV（エレクトロンボルト）以上のものを指し、候補材料にはダイヤモンド（バンドギャップ5.5eV）、酸化ガリウム（Ga₂O₃、バンドギャップ4.8 eV）、などに続き、窒化アルミニウム（AlN、バンドギャップ6.0eV）がある。UWBG半導体は、その広いバンドギャップによって高電圧や高温への耐性、優れた高周波特性を持ち合わせることから、次世代のパワーデバイスや高周波デバイスへの応用が模索されている。しかし、AlNをはじめとするUWBG半導体材料はその伝導性制御が確立されておらず、デバイス応用のボトルネックとなってきた。

半導体材料の伝導性制御において「不純物ドーピング」は一般的な手法である。半導体材料に特定の不純物原子を添加し、その電気伝導特性をコントロールすることができる。半導体の電気伝導特性を決定づける要素は「キャリア」の密度と移動度だ。電流の“運び屋”を意味するキャリアとは、「伝導電子」と「正孔」である。ドーピングされる不純物は「ドープアント」と呼ばれ、伝導電子密度を増加するための「ドナー」と、正孔密度を増加するための「アクセプタ」があり、これらがイオン化することで、伝導電子がドナーから放出されたり、アクセプタが電子を捕獲したりすることによって、キャリアが生成される。しかし、UWBG半導体材料はバンドギャップが大きい分、ドナーやアクセプタを機能させる（イオン化）ためのエネルギーが大きいという特徴を持つ。とくに室温では不純物ドーピングの効果が得られない。これらの特徴から、UWBG半導体材料は不純物ドーピングによる伝導性制御が困難であり、その代替手法の研究が行われてきた。

※1 **バンドギャップ** 半導体中において、電子と正孔の対を生成する上で必要なエネルギーを指す。禁制帯幅。

ボトルネックを克服する分布型分極ドーピング

「いわゆるUWBG半導体と言われているAlNなどの材料は、室温から得られるエネルギーではほぼn型にもp型にもならないため、半導体として利用することが困難でした。そこで本研究では、不純物を入れても（不純物ドーピング）n型にもp型にもならないのであれば、別の方法でドーピングと同じような状態を作れないか、というアプローチをとりました。つまり従来の不純物ドーピングではなく、材料の特性を生かした手法である『分布型分極ドーピング（※2）』を用いることで、AlNの室温で伝導性制御を試みたのです」と隈部岳瑠氏は話す。

分極ドーピングの理論は約20年前に、現コーネル大学のDebdeep JenaとHuili Xingらによって提案されたという。「AlNや窒化ガリウム（GaN）は、電荷が偏りやすい性質『分極』を持ちます。分極の性質を活用し、ドーピングされたような状態にする手法が、分極ドーピングです。これら

の分極は基本的には2次元上にしか起きないのですが、三次元空間上に分極することを実現したのが、分布型分極ドーピングです」（隈部）

また、今回の応用を実現した背景には、20年間のうちに大きく進展した高品質AlN単結晶基板の作製技術やエピタキシャル成長技術、さらにデバイス作製技術があるという。「さらにシリコンに代わるパワーデバイス材料に、ガリウムナイトライド（GaN）やシリコンカーバイド（SiC）が実用化の段階に入ってきました。その次に模索されているのがAlNです。AlNの高いポテンシャルに分極ドーピングを組み合わせたら高性能のデバイスができるのではないか、というのが研究のモチベーションでした」（隈部）

実際の実験では、「有機金属気相エピタキシャル成長（MOVPE）法」を使用し、AlN基板上に作製されたp-n接合デバイス（ダイオード）で行われた（図1）。p-n接合部分は分布型分極ドーピングによって形成された。分布型分極ドーピングは、アルミニウム（Al）の含有量を70%から95%まで一定の割合で増加させたアルミニウムガリウム窒化物（AlGa_xN）を使用した。この方法で、p⁺領域とn領域のそれぞれにおける空間の電荷密度を約 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ と $3 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ に調整し、適切な膜の厚さ（組成の変化率）を設計。次に、ドライエッチング（乾式エッチング）を用いて、デバイスの垂直方向の構造（メサ）を形成し、n⁺型の-Al_{0.7}Ga_{0.3}N:Si接触層を露出させている。メサの周辺部（n型領域）にはバナジウム/アルミニウム/ニッケル/金（V/Al/Ni/Au）のオーミック電極を、メサの上部（p型領域）にはニッケル/金（Ni/Au）のオーミック電極を形成した。最後に、デバイスの表面を二酸化ケイ素（SiO₂）とポリイミドで覆うことで、縦型のダイオードを構成している。

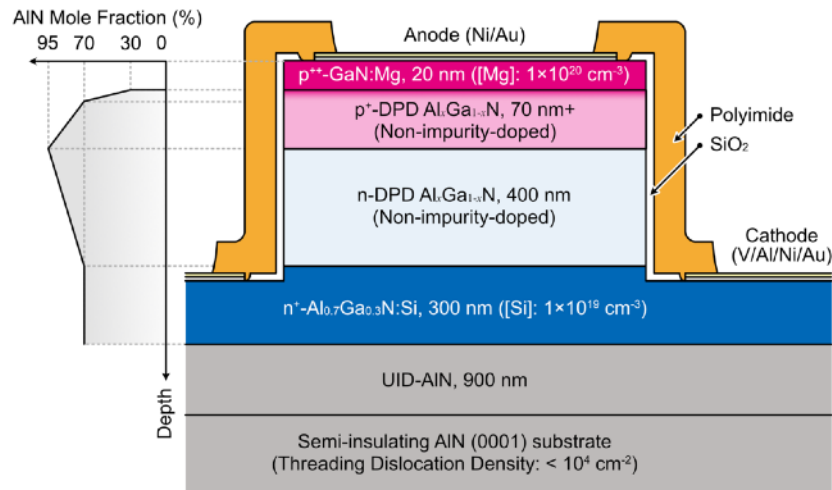


図1: 作製されたAlNによるp-nダイオード

※2 **分布型分極ドーピング** III族窒化物半導体、特にGaNやAlNはその特有のイオン結合の強さから大きな分極を持つことが知られる。通常、このような分極は半導体の表面や裏面に現れる。しかし、GaNとAlNを特定の比率で混合したAl_xGa_{1-x}Nの混晶半導体では、組成比xの変化に伴い、内部に正または負の分極電荷が発生する。これはGaNとAlNの分極の差異に由来し、内部での分極電荷の形成は、電子や正孔を引き寄せることから、結果的に不純物ドーピングと同じような効果をもたらす。

理論上はトランジスタも構成可能

実験の結果としては、まずダイオードとしての性能を持っているかを実証するため、電流電圧特性が調べられた（図2）。すると電流が一方向にしか流れない「整流作用」がはっきりと観察され、順方向には電流を通し、逆方向には電流をほとんど通さないというダイオードの基本的な性質を持っていることが証明された。また、ダイオードの伝導機構は、広い温度範囲（300°C以下）で、電子と正孔の再結合による電流（再結合電流）が理想係数($n=2$)という非常に高性能を示す値で説明できることがわかったという（※3）。

※3 理想係数 (n) は、半導体デバイスの電流-電圧 (I - V) 特性を表す際に用いられるパラメータ。この係数は、ダイオードの実際の I - V 曲線が理想的なダイオードの挙動、すなわち理想的な指数関数的な電流の増加からどの程度逸脱しているかを示す。理想的な"p-n接合"ダイオードでは、理想係数(n)が1~2の範囲内になる。電流電圧特性が拡散電流($n=1$)と再結合電流($n=2$)と、2つの伝導機構で説明されるからである。p-n接合ダイオードの特性が悪化すると理想係数は2よりも大きくなる。今回作製したダイオードは理想係数が最低で1.8であり、この範囲内に入っているため、"理想的な"p-nダイオードと考えられる。

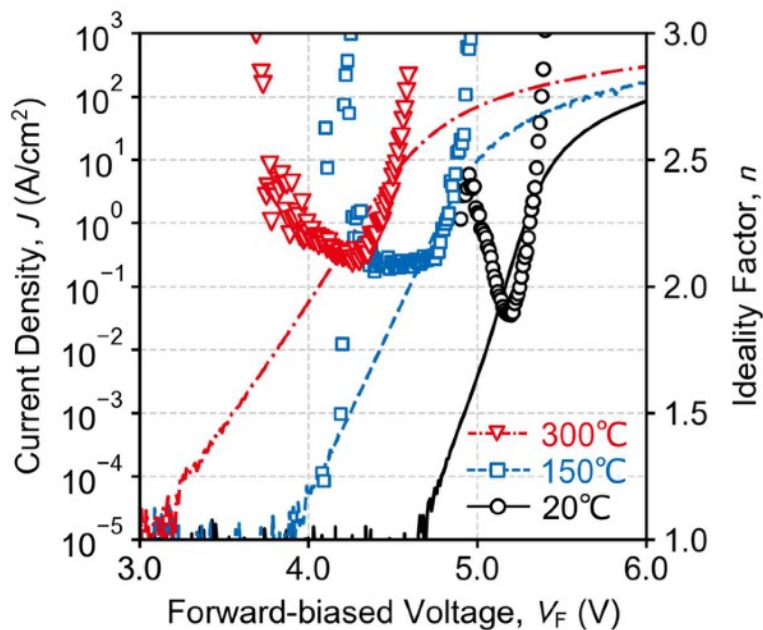


図2: 作製したダイオードの順方向電流（左軸）電圧（横軸）特性と理想係数(右軸)。印は理想係数（右軸）を示す。

さらに、ダイオードに電流を流すと、約240nm（ナノメートル）の波長で光が発生することも観測されたという。この発光現象は、作製したデバイスがp-n接合のダイオードであることをさらに裏付けている。

逆方向電流電圧特性（図3）では、ダイオードは283V（ボルト）で不可逆的に破壊されることがわかった。また耐電圧性能の指標となる絶縁破壊電界を測定したところ、高い耐電圧性能を示すことが明らかになった。破壊電界は、p+層とn層の空間電荷密度を考慮して計算され、7.3MV（メガボルト）/cmだったという。この値は、半導体材料として幅広く用いられているシリコン

(Si) の25倍、同じドーピング濃度を持ち、ワイドバンドギャップ (WBG) 半導体のガリウム窒化物 (GaN) の絶縁破壊電界の約2倍に相当する。そして、AlN系p-n接合における絶縁破壊電界強度実測値では、世界最高のものとなる。

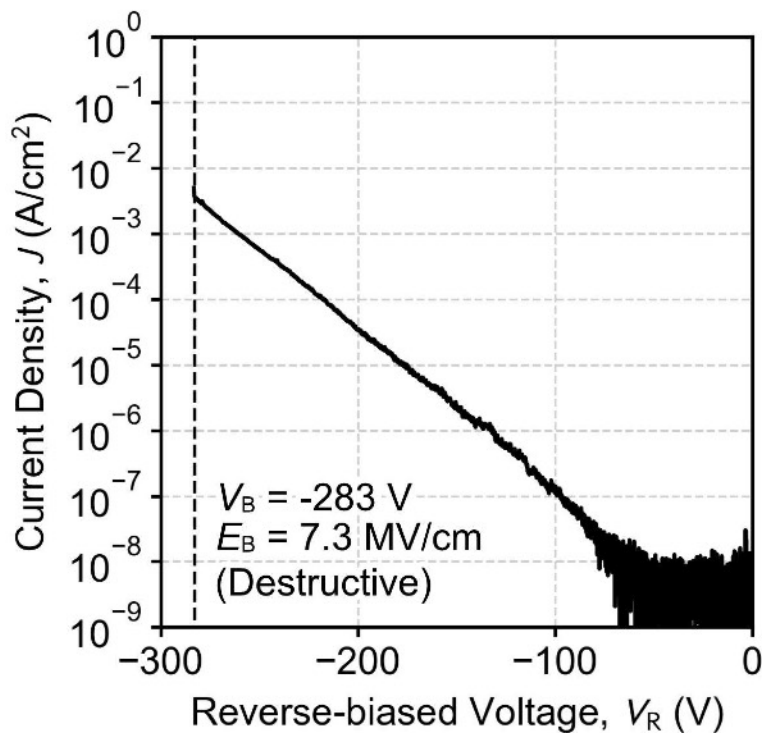


図3: 作製したダイオードの逆方向電流電圧特性

これらの結果は、分布型分極ドーピングを用いることで、アルミニウム窒化物 (AlN) 系材料において優れた電気特性を持つ縦型p-nダイオードを作製できることを実証している。

「今回作製した縦型p-nダイオードは、あくまで理論の実証と性能を評価するための基本構造です。理論上は、より高度なデバイスも作製できると考えています。今後は、トランジスタなどへも応用を広げていきたいと思っています」と隈部氏は、AlNのUWBG半導体への応用への扉を開いた画期的な研究の展望を語った。応用物理学会の注目講演では、より詳細な測定結果等が報告される。