

窒化アルミニウム系ショットキーバリアダイオードの電流輸送機構を解明 ～低炭素社会に寄与する新しいパワー半導体デバイスの実現に向け大きく前進～

NTTは、AlN系半導体^{※1}の結晶成長・デバイス技術の開発により、ほぼ理想的な特性を示すAlN系ショットキーバリアダイオード（SBD^{※2}）の作製に成功しました。東京大学は、この理想的なAlN系SBDの電流輸送機構がトンネル効果に起因した熱電子電界放出^{※3}であることを解明し、その理解に基づいた解析からショットキー接觸の特性を決定する最重要物性値である障壁高さとその温度依存性を明らかにしました。

ショットキー接觸の電流輸送機構の解明と物性値の決定はデバイス設計に不可欠であり、本成果はAlN系デバイスの実用化に向けた重要な知見といえます。



図：AlN系SBDの電気的特性の測定の様子

研究の成果

NTTはAlNトランジスタ作製で培ったSiドープ組成傾斜窒化アルミニウムガリウム（AlGaN）^{※4}層を利用する低抵抗オーミック電極形成技術を発展させ、接触抵抗を従来の10分の1以下に低減しました。さらに、AlN系半導体のドライエッティング時のプラズマダメージを軽減することで、AlNとショットキー電極間のリーカ電流を抑制した結果、これまで最も急峻な電流立ち上がり特性を示し、優れた整流性を有するAlN系SBDの作製に成功しました（図）。

東京大学は、上記のAlN系SBDの電気的特性を詳細かつ系統的に評価し、半導体物理に基づいて正確な実効ドナー密度および拡散電位・障壁高さを得ることに成功しました。また、この電流輸送機構について、高い実効ドナー密度と大きな拡散電位によってショットキー界面に高電界が生じ、ポテンシャル障壁が薄くなることから、トンネル効果に起因した熱電子電界放出が発現していると考察しました。理論計算により熱電子電界放出による電流値を求めたところ、容量-電圧測定で得られた障壁高さとほぼ同様の値を用いることで実験値と一致することを確認し、電流輸送機構が熱電子電界放出であることを解明しました。さらに、室

温から300°Cの広い温度領域で電流-電圧特性を測定・解析し、障壁高さの温度依存性を明らかにしました。これらは、ほぼ理想的な電流立ち上がり特性を示すAlN系SBDを利用し、緻密な測定・解析を行ったことで初めて得られた成果です。

今後の展開

ショットキー接觸は電子デバイスの根幹をなす基本構造であり、特に障壁高さはSBDの順方向立ち上がり電圧や逆方向リーカ電流を決定する最重要物性値です。本研究によって、ほぼ理想的な特性のAlN系SBDが得られたこと、この理想に近いAlN系SBDを用いて電流輸送機構と障壁高さの温度依存性を解明したことは、AlN系半導体デバイスの発展に大きく貢献します。今後、AlN系半導体を用いた低損失なパワーデバイスを実現することで、低炭素社会実現への貢献が期待されます。

【用語解説】

- ※1 窒化アルミニウム（AlN）系半導体：AlNはバンドギャップエネルギー^{※5}が6.0eVと極めて大きく、ウルトラワイドギャップ（Ultrawide bandgap, UWBG）半導体として注目を集めている。深紫外光デバイスとしての応用に加え、近年では、高い絶縁破壊電界を示すことからパワーデバイスや高周波デバイスとしての応用も期待されている。また、バンドギャップエネルギーが極めて大きいため、真性キャリア密度が桁違いに低く、高温動作可能な半導体デバイスとしての応用も期待されている。また、GaNやInNなどの窒化物半導体と混晶やヘテロ接合を形成することができるため、エネルギー・バンド構造の変調や分極誘起ドーピングの活用が可能である。
- ※2 ショットキー接觸・ショットキーバリアダイオード（SBD）：金属と半導体により接合を形成した際、金属の仕事関数と半導体の電子親和力の差に応じて半導体側から金属側へ電子が拡散し、エネルギー障壁と内部電界を有する空乏領域が形成される。このような接合をショットキー接觸と呼ぶ。半導体側のポテンシャルを外部電圧によって変化させ、半導体側から金属側へ電流を流すことができる。すなわち、ダイオード特性（整流性）を示す。
- ※3 热電子電界放出：ショットキー接觸界面に高電界が印加される際に熱分布する電子がエネルギー障壁をトンネルすることにより電流が生じる。これを熱電子電界放出（Thermionic Field Emission, TFE）と呼ぶ。特にワイドギャップ半導体は絶縁破壊電界が高く、高電界を印加することができるため、GaNやSiCなどのSBDに大きな逆バイアス電圧を印加した際に生じるリーカ電流を支配する電流輸送機構として知られている。また、高濃度にドーピングした半導体においては順方向特性においても熱電子電界放出が見られることが知られている。
- ※4 組成傾斜窒化アルミニウムガリウム（AlGaN）：AlGaNはAlNとGaNの混晶であり、AlとGaの組成比を変えることでバンドギャップエネルギーを変調させることができる。Al組成を低くすることで、障壁高さを低くすることができる。h型AlN上に高Al組成から低Al組成に連続的に変化させた組成傾斜AlGaNを形成することで良好なオーミック接觸を実現した。ただし、窒化物半導体は、金属原子と窒素原子の電気陰性度が異なることに起因して強い分極を有しており、組成比を変えることで分極が変化する。本研究での成長方向（metal極性、<0001>軸方向）に対してAl組成が減少するように組成傾斜させている場合、分極誘起ドーピングによって負の固定電荷（分極電荷）とそれに応じて正孔が誘起され、その正孔濃度を十分上回る量のSiドーピングを行うことでn型組成傾斜AlGaN層を形成している。
- ※5 バンドギャップエネルギー：半導体や絶縁体などの固体材料においては、価電子帯と伝導帯の間にエネルギー差（ギャップ）が存在する。原子間の結合の強さに概ね相当し、バンドギャップエネルギーが大きいほど物理・化学的に堅牢強固であり、特に高電界に耐えられるようになることが高耐圧デバイス応用上で有利である。