

低抵抗・低コスト GaN トンネル接合を実現
～高効率 GaN レーザー実現のための基盤技術のひとつを確立～

名城大学 教授 竹内哲也

概要

名城大学の研究グループは、高効率 GaN レーザー実現に向けた基盤技術の一つである「低抵抗 GaN トンネル接合」を低コストで形成する技術を新たに開発致しました。この低抵抗・低コスト GaN トンネル接合実現により、省エネルギー社会が必要とする高効率・高品位光源実現にまた一步近づいたこととなります。

高効率青色 LED では高出力化のために高電流注入駆動（数 kA/cm^2 ）すると、その変換効率が著しく低下する課題（効率ドループ）が知られています。これを解決する手段として、半導体レーザーが注目されています。現在、青色を発する GaN レーザーのエネルギー変換効率は 50%未満ですが、赤外半導体レーザーでは 70%以上の値が報告され、高効率と高出力の両立がすでに実現しています。GaN レーザーの効率が低い理由の一つとして、高抵抗 p 型クラッド層による高い素子抵抗が挙げられます。

これを解決する手法の一つとして、トンネル接合の利用が提案されています。例えば、従来の 10 分の 1 の厚さしかない薄い p 型クラッド層上に GaN トンネル接合と厚い低抵抗 n 型クラッド層を設けた構造により高光閉じ込めと低抵抗を両立する高効率 GaN レーザーが実現します。そのためには、低抵抗で電流が流れる GaN トンネル接合が必要になります。これまでに、比較的low抵抗である GaN トンネル接合の形成には、その接合界面に酸化などの不安定な処理を行うとともに、その後のトンネル接合形成において、水素による悪影響を排除できるが生産性の低い分子線エピタキシー装置（MBE 装置）を用いる必要がありました。つまり、安定性や生産性など工業化に向けて解決すべき点が残されていました。

名城大学の研究グループは、トンネル接合内のアクセプタ Mg とドナー Si の濃度プロファイルに改めて着目し、様々な濃度プロファイルを有する GaN トンネル接合を、生産性の高い有機金属化合物成長装置（MOVPE 装置）のみで形成しました。従来、トンネル接合を形成するには、アクセプタを高濃度に含む p 層とドナーを高濃度に含む n 層を、アクセプタとドナーの効果が打ち消し合わないよう互いが極力混じらないように隣接かつ接合させることが唱えられてきました。しかしながら、名城大学が検討した結果、高濃度アクセプタ Mg 添加領域が高濃度ドナー Si 添加領域に完全に重なる、すなわち、従来の理論では到達し得ない濃度プロファイルにおいて、GaN トンネル接合が大幅に低抵抗化することを初めて見出しました。レーザーとして駆動するために必要な高い電流注入（ $\sim 10\text{kA/cm}^2$ ）時であっても、 $2.3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ という低い抵抗率が MOVPE 装置のみで得られることを実証致しました。

以上により、高効率 GaN レーザーを実現するための新しい基盤技術のひとつが確立されました。

*本研究内容は、特許出願（特願 2017-239235）済であり、第 65 回応用物理学会春季学術講演会（2018 年 3 月 19 日）でも発表致しました。

*本研究は、文部科学省の「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発（レーザーデバイス・システム領域）」の一環として行われました。

研究の背景

省エネルギー社会実現に向けて、高効率光源の実現が望まれています。2014年ノーベル物理学賞の受賞理由となった高効率青色LEDでは、80%を超えるエネルギー変換効率が実現しています。さらなる用途拡大に向け、高効率化に加えて高出力化も期待されています。しかしながら、この青色LEDを高電流注入駆動(数kA/cm²)すると、その変換効率が著しく低下する課題(効率ドループ)が知られています。これを解決する手段として、半導体レーザーが注目されています。この半導体レーザーの発光機構はLEDと異なる誘導放出であり、原理的に高電流注入時の高効率発光が可能です。現状、青色を発するGaNレーザーのエネルギー変換効率は50%未満ですが、赤外半導体レーザーでは70%以上の値が報告され、高効率と高出力の両立がすでに実現されています。このGaNレーザーの効率が低い理由の一つとして、その高い素子抵抗が挙げられます。半導体レーザーはその内部に光ファイバと同じ原理の光閉じ込め構造を有するため、比較的厚い(数100nm以上)p型クラッド層とn型クラッド層が必要です。そして発光層に電流を注入するために、各クラッド層にも電流が流れる必要があります。GaNレーザーの場合、p型クラッド層(AlGaNで構成)の抵抗はn型クラッド層の100倍も高く、このp型AlGaNによって素子抵抗が大幅に上昇します。ゆえに、p型AlGaNの抵抗を下げるのが効率改善に重要ですが、AlGaNのようなワイドバンドギャップ材料では、アクセプタのイオン化エネルギーが大きく、そのキャリア濃度は極めて低いため、高抵抗化してしまうという本質的な課題がありました。

上記課題を解決する手法の一つとして、トンネル接合の利用が提案されています。このトンネル接合は、1973年に江崎氏がノーベル物理学賞を受賞した「半導体におけるトンネル効果」を発現する構造であり、通常のpn接合におけるアクセプタとドナーの濃度をそれぞれ100倍程度高めた構造です。このトンネル効果により、n層からp層へ低抵抗で電流を流すことができます。したがって、図1(b)の新規デバイス構造が示すように、厚い高抵抗p型AlGaNを用いる代わりに、例えば、10分の1の厚さのp型AlGaNを設け、その上にトンネル接合と厚い低抵抗n型AlGaNを設ければ、高光閉じ込めと低抵抗を両立する高効率GaNレーザーが実現します。そのためには、低抵抗で電流が流れるGaNトンネル接合が必要になります。これまでに報告されている比較的低抵抗なGaNトンネル接合は、トンネル接合形成中に一旦結晶成長装置から取り出して、その接合界面に酸化などの不安定な処理を行うとともに、残りのトンネル接合の形成は、水素による悪影響を排除できるが生産性の低い分子線エピタキシー装置(MBE装置)を用いる必要がありました。つまり、安定性や生産性など工業化に向けて解決すべき点が残されていました。

研究内容と成果

名城大学の研究グループは、生産性の高いMOVPE成長装置1台だけで、かつ成長を一旦中止し、接合界面に特別な処理を施すことなく、低抵抗GaNトンネル接合を実現する技術を新たに開発致しました。具体的には、トンネル接合内のアクセプタMgとドナーSiの濃度プロファイルに着目し、様々な濃度プロファイルを有するGaNトンネル接合をMOVPE装置のみで形成しました。実は、半導体工学の教科書には、低抵抗トンネル接合を形成するための最適な濃度プロファイルが記載されています。すなわち、図2(a)のように、アクセプタを高濃度に添加したp層とドナーを高濃度に添加したn層を、アクセプタとドナーの効果が打ち消し合わないよう互いが極力混じらないように隣接かつ接合させる、です。しかしながら、我々が検討した結果、アクセプタとドナーが明瞭に分離した図2(a)のようなプロファイルで

はなく、図 2(b)のように高濃度アクセプタ添加領域が高濃度ドナー添加領域に完全に重なる、すなわち、従来の理論では到達し得ない濃度プロファイルにおいて、GaN トンネル接合が大幅に低抵抗化することを初めて見出しました。

その実証例のひとつを以下に示します。図 3 のような、Mg と Si が重なった層を有する GaN トンネル接合を青色 LED 上に形成しました。Mg と Si の濃度プロファイルの重なり量が異なる試料を 3 種類用意し、図 4 に示すように SIMS 測定により評価しました。重なり量を数値化するために、Si 濃度のピーク位置と Mg 濃度のピーク位置の間隔を測定した結果、重なりが大きい試料から、2.5、4.3、そして 7.2 nm となりました。続いて、これらの試料構造の電流電圧特性を評価致しました。素子形成の際に、名城大が保有する Mg を横方向から活性化して水素の悪影響を除去する技術も併用しました。その結果を図 5 に示します。上記間隔が 2.5 nm、すなわち、高濃度 Mg 添加領域が完全に Si 添加領域と重なっている試料において最も低い駆動電圧が得られることを見出しました。この試料ではレーザーとして駆動する際に必要な高い電流密度 ($\sim 10\text{kA/cm}^2$) であっても、 $2.3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ という低い抵抗率が得られています。

以上により、高効率 GaN レーザーを実現するための新しい基盤技術のひとつである「低抵抗・低コスト GaN トンネル接合」を形成する技術が確立されました。

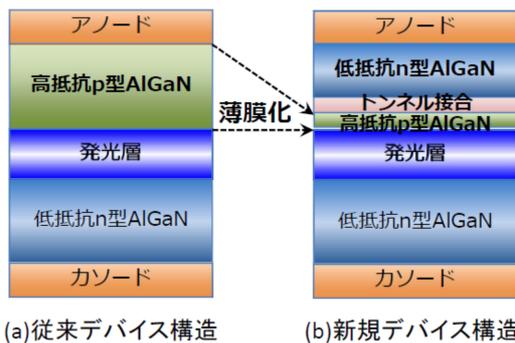


図 1 (a) 従来デバイス構造と (b) トンネル接合を有する新規デバイス構造

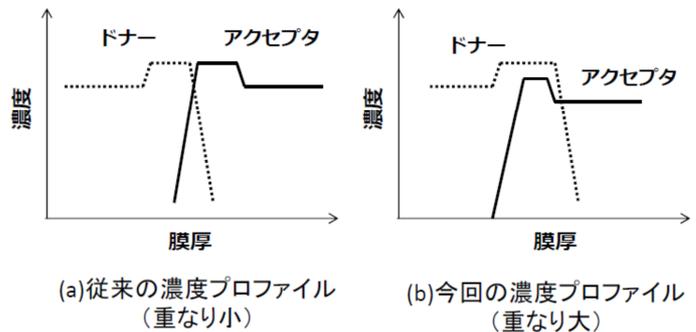


図 2 (a) 従来と (b) 今回の濃度プロファイルの違いの概念図

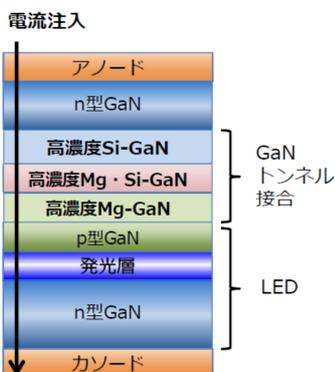


図 3 GaN トンネル接合を評価する構造

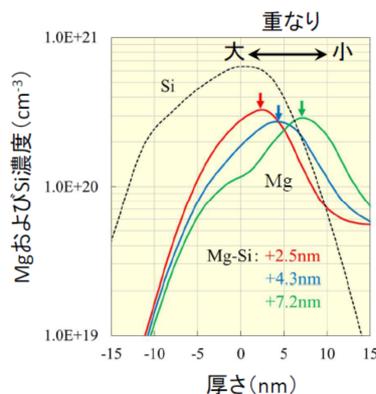


図 4 GaN トンネル接合の Mg・Si 濃度プロファイル (3 種類)

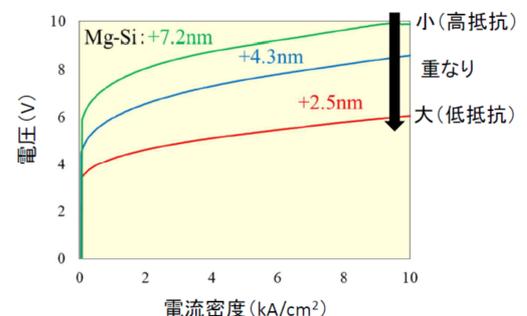


図 5 評価構造の電流電圧特性

今後の展開

今回実現した低抵抗 GaN トンネル接合を用いた GaN レーザーを実証します。さらに、このトンネル接合と並行して開発している、従来よりも大きな光閉じ込め係数を可能にする「量子殻活性層」や「低屈折率 AlInN クラッド層」と組み併せることで、従来よりも高い効率を有する GaN レーザーを実証していきます。一方で、この GaN トンネル接合では、従来とは異なる設計指針にて大幅な低抵抗化が得られました。この要因も明らかにし、新しい機構として理解することで、トンネル接合のさらなる低抵抗化も目指します。

学会発表

第 65 回応用物理学会 春季学術講演会 (2018 年 3 月 19 日)

[19a-E202-8] 「GaN トンネル接合の低抵抗化に向けた不純物プロファイルの最適化」、赤塚 泰斗、不破 綾太、岩山 章、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素頭、赤崎 勇

用語解説

(1) アクセプタ、ドナー

半導体に微量に添加することで、その添加濃度に応じた濃度の正孔（アクセプタの場合）あるいは電子（ドナーの場合）を供給する元素。これら元素濃度の制御により、半導体の抵抗を広い範囲で制御できる。

(2) イオン化エネルギー

上記アクセプタやドナーが正孔や電子などのキャリアを供給する際に必要なエネルギー。電荷を伴うキャリアを供給することから、アクセプタやドナーは逆符号にイオン化する。このエネルギーが大きいとアクセプタやドナーを添加しても正孔や電子が供給されにくい。

(3) クラッド層

光を中央に存在する発光層に閉じ込めるために必要な外側の層。この外側の層の屈折率を内側の発光層の屈折率よりも低く設定することで、その層界面での全反射により、光が内側に閉じ込められる。

(4) トンネル効果

電子を粒子として考えた場合には、乗り越えられないと思われるエネルギー障壁を乗り越えてしまう現象であり、波動性を考慮することで理解される量子力学的現象。

(5) 有機金属化合物気相成長 (MOVPE; Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy)

ガスにより原料を供給する気相成長法のひとつであり、その原料として有機金属化合物を用いている。LED や半導体レーザーの層構造を結晶成長する際に用いられる成長法であり、生産性が高い。一方で、水素や窒素などのキャリアガスを必要とする。

(6) 分子線エピタキシー (MBE; Molecular Beam Epitaxy)

真空中で原料を蒸発によって供給する成長法。供給された原料同士の反応過程が単純で、かつキャリアガスを必要としないことから、成長における反応過程の研究に良く用いられるが、一方で生産性が低く、デバイス層構造形成にはほとんど用いられていない。

本研究に関する問い合わせ先

- 研究内容に関すること

名城大学 工学部材料機能工学科 教授

竹内 哲也 (たけうち てつや)

E-mail: take@meijo-u.ac.jp

TEL: 052-838-2293

FAX: 052-832-1244

- 報道・広報に関すること

名城大学 渉外部広報課

〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口一丁目501番地

E-mail:kouhou@ccmails.meijo-u.ac.jp

TEL: 052-838-2006

FAX: 052-833-9494