

世界初の中波長紫外線（UV-B）領域の半導体レーザーを発明

名城大学の赤崎 勇 終身教授の研究グループの岩谷 素 准教授らは、三重大学、旭化成の共同研究により世界初の中波長紫外線（UV-B 波長領域）半導体レーザーを発明しました。

レーザー光はLED や太陽光など自然界に存在する光とは異なり波長・位相が制御された究極的な光源であり、医療・工業・家電・情報通信・計測などさまざまな産業に応用されています。既存のガスレーザーや固体レーザーの紫外領域の市場が1000億円／年以上あるとされていることから、優れた特性を持つ半導体レーザーでそれが実現できることから従来の市場価値に加えてイノベーションの創出が期待できます。

これまで赤外線・赤色・緑色・青色レーザーが実用化され社会実装されており、より波長が短くエネルギーの大きな紫外線（UV）領域のレーザーの実現が強く望まれていました。紫外線は長波長紫外線（UV-A：光の波長が380～320nm）、中波長紫外線（UV-B：320～280nm）、短波長紫外線（UV-C：280nm以下）の3種類に分類されます。

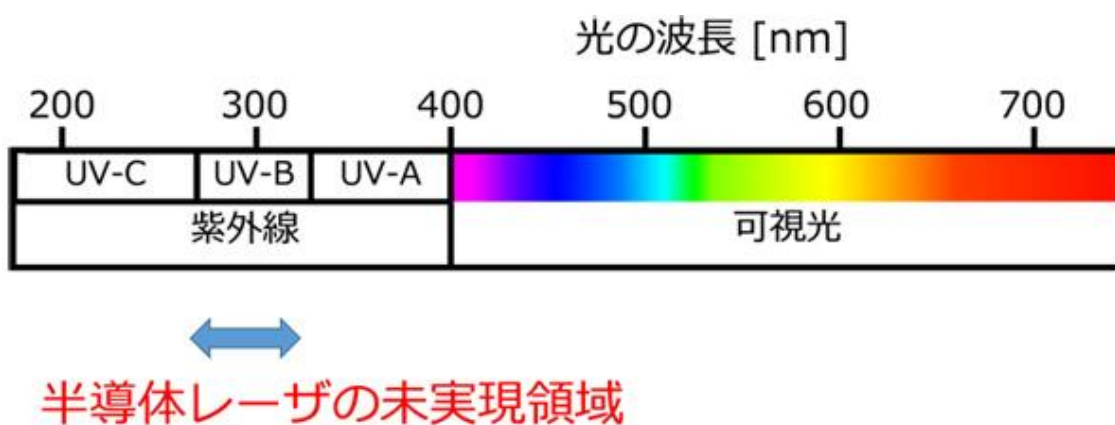


図1 光の種類と光の波長域の関係及び半導体レーザーの未実現領域

既に、名城大学や浜松ホトニクスなどのグループから長波長紫外線領域の半導体レーザーが、旭化成および名古屋大学のグループから短波長紫外線領域の半導体レーザーの実現が報告されていました。

中波長紫外線領域の半導体レーザーが実現できない理由はその領域の高品質な結晶が得られないことに起因していました。本グループでは、赤崎 勇 終身教授が青色LEDの発明でノーベル賞を受賞した窒化物半導体を用いました。基板にはサファイア基板を用い、三重大大学の三宅 秀人 教授が開発した高品質な窒化アルミニウム（AlN）テンプレート上に、

赤崎方式によって高品質かつ格子緩和した窒化アルミニウムガリウム (AlGaN) を開発しました。これは長波長紫外線や短波長紫外線領域のレーザとは異なる方法であり、本グループ独自の手法です。

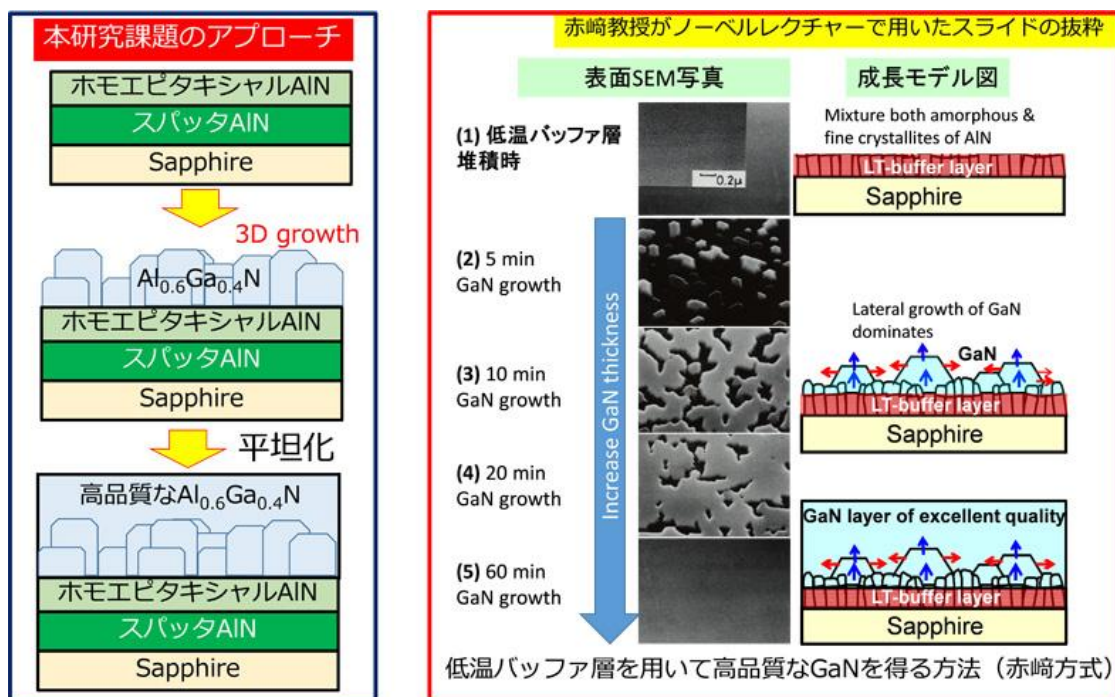


図2 高品質 AlGaN 結晶を得る方法の概略図

<研究の内容>

中波長紫外線領域のレーザを実現するためにはバンドギャップエネルギーが 3.8~4.4eV の半導体材料が必要であり、特に高品質な結晶が必要という課題があります。これまで青色よりも短波長な半導体レーザは、2014 年にノーベル物理学賞を受賞した「青色 LED」材料である窒化物半導体が用いられてきました。しかしながら、このバンドギャップエネルギーを用いた窒化物半導体は適切な基板がないため、高品質な結晶が得られないという課題がありました。また、半導体レーザを実現するためには、数 kA/cm² (キロアンペア毎平方センチメートル) 以上という大電流動作を実現させる必要があります。しかしながら、従来の電子物性工学ではバンドギャップエネルギーが 3eV を超える材料は絶縁性が高く、大電流注入が極めて困難であるという課題がありました。本グループでは、これらの課題に対して以下の 2 つのアプローチを適用することによって問題を解決しました。

まず三重大学の三宅 秀人 教授の研究グループが開発した手法であるサファイア基板上に、スパッタ法で作製した AlN テンプレート上に 3次元成長を用いることによってバンド

ギャップが 3.8~4.4eV の高品質 AlGaIn を実現しました。この方法は、高輝度青色 LED の発明で用いられているサファイア基板上への GaIn の作製法を踏襲することによって得られました。AlN とこのバンドギャップエネルギーを持つ AlGaIn の間には 1 パーセント以上の大きな格子不整合が存在します。従来の結晶工学では 1 パーセントを超える格子不整合を持つと高品質な結晶が得られませんでした。しかし青色 LED の発明時にそれを打ち破るために低温バッファ層を用いた手法（赤崎方式）が発明されました。その際に効果を発揮したのが 3 次元成長です。3 次元成長させることによって、成長層上部に高品質な GaIn を得ることができ、それが青色 LED の発明に直結しました。本研究グループでは、スパッタ法で作製した AlN 上に AlGaIn を成長させることによって 3 次元成長させることが可能であり、それによって高品質な AlGaIn を得ることが可能であることを見いだしました。

次に電流注入による手法においては、分極ドーピング法を適用しました。従来の半導体では不純物を添加することによって自由電子と自由正孔を形成し、電流注入する方法が広く用いられてきました。しかしながら、ワイドギャップ半導体である AlGaIn 材料では、この方法ではレーザー発振レベルの大電流注入は実現できませんでした。これは、従来の電子物性工学ではバンドギャップエネルギーが 3eV を超える材料は絶縁体（電流を流すことができない）とされていましたが、紫外領域の半導体レーザーを実現するためには、バンドギャップエネルギーは 5eV を超える材料を用いることが必須であることに起因しています。

本グループでは、米国ノートルダム大のグループが提案した分極ドーピング法を AlGaIn 材料に適用することによってレーザー発振が可能なレベルの電流注入を実現しました。ノートルダム大のグループは分極ドーピングを青色発光素子に適用しましたが、本グループでは紫外発光素子に対して有用であると考え研究を進めてきました。その結果、2019 年 5 月に Applied Physics Letters (<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5095149>) にレーザー発振レベルの大電流注入を実現できることを報告しました。

これらの手法を適用することによって、298nm 波長の電流注入による中波長紫外線領域のレーザーを発明しました。

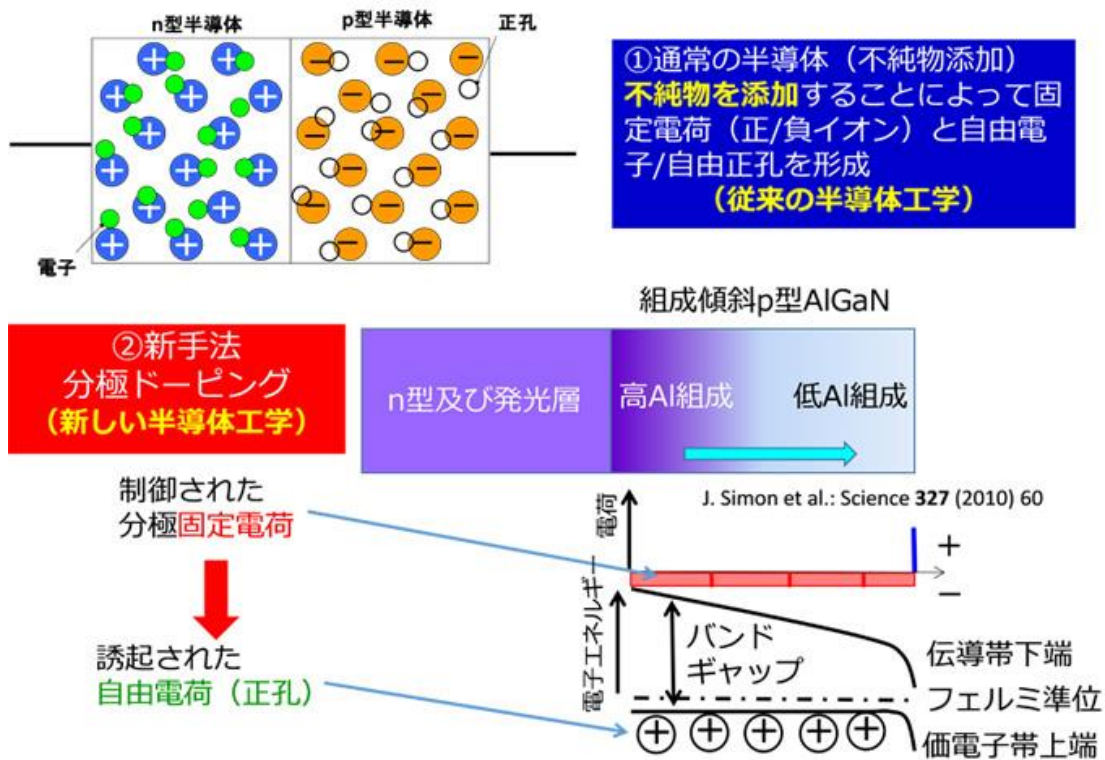
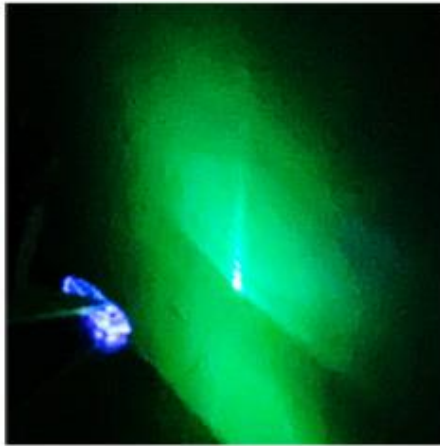
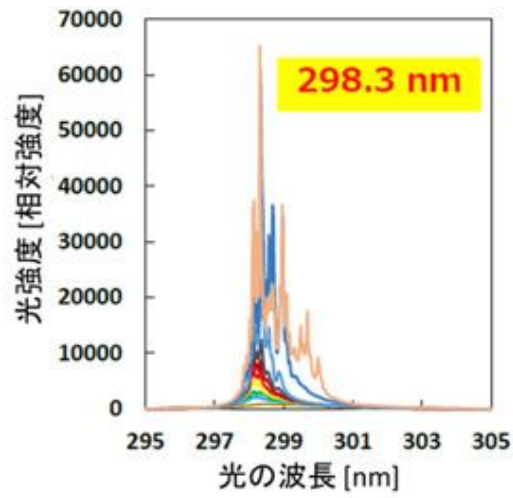


図3 本研究課題で開発した分極ドーピング法

作製した試料の構造を以下に示します。試料は上述のような方法で作製した高品質 AlGaN 上に一般的な半導体レーザで用いられている分離閉じ込めヘテロ構造によってデバイスを試作しました。デバイスプロセスを行い室温パルス下で電流を注入することによって評価を行いました。その結果、電流-光出力特性に明確な閾値が確認できたこと、自然放出スペクトルからレーザ発振特有の急峻な半値幅が極めて細いスペクトルが得られていること、明確な偏光特性が現れていることからレーザ発振に到達していることを確認し、本サンプルはレーザ発振に到達していると結論づけました。添付図はレーザ発振の様子とスペクトルを示しており、半導体レーザ特有の発光パターンやスペクトルが得られていることが確認されました。



UV-Bレーザーの発振の様子



UV-Bレーザーの発振の発光スペクトル

図4 UV-Bレーザーの物理特性



UV-Bレーザーの発振の様子
(目で見れない紫外線を目視するために紙に蛍光体を塗ってレーザー光を照射しています)

図5 UV-B レーザ発振光

論文情報

タイトル Room-temperature operation of AlGa_N ultraviolet-B laser diode at 298 nm on lattice-relaxed Al_{0.6}Ga_{0.4}N/AlN/sapphire

雑誌 Applied Physics Express

DOI : [10.35848/1882-0786/ab7711](https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab7711)

日文发布全文 <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200219/index.html>

文: JST 客观日本编辑部编译