

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02019

研究課題名(和文)電子線励起・深紫外窒化物半導体レーザー

研究課題名(英文)Electron beam excited nitride-based UV laser

研究代表者

岩谷 素顕 (Iwaya, Motoaki)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：40367735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では医療・バイオ・微細加工など広く応用分野があると考えられる電子線励起によるAlGa<sub>N</sub>系紫外レーザーの実現を目指して研究を行った。レーザー発信可能な電子線源を組み込んだ装置がないことから装置開発からはじめ、電子線シミュレータを活用することによって電子線励起特有の問題があることを明らかにした。さらにデバイスシミュレータを活用することによって、最適な構造を明らかにし、最終的にAlGa<sub>N</sub>系電子線励起レーザーを実現した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we aimed at realization of AlGa<sub>N</sub>-based ultraviolet laser by electron beam excitation which have widely applied fields such as medical, biotechnology and microfabrication. Since there is no device incorporating a laser emittable electron beam source, we started with the development of the device, and revealed that there is a problem peculiar to the electron beam excitation by utilizing an electron beam simulators. Furthermore, by utilizing a device simulator, the optimum structure was clarified and finally AlGa<sub>N</sub> electron beam excited laser was realized.

研究分野：半導体工学

キーワード：窒化物半導体 レーザ 電子線励起

### 1. 研究開始当初の背景

紫外レーザーは医療、環境分野、殺菌、化学分析や3Dプリンター等の工業的な応用も期待でき実現できれば学術的および産業的な価値は極めて大きい。本研究グループは2000年前後から電流注入型・紫外半導体レーザーの検討を進めてきており、発振波長が350nmの紫外線レーザーの発振実績を持っている。その一方で、高い自由正孔濃度を持つp型AlGaInの実現が現状されていないことから、発振波長の短波長化が困難な状況となってきた。さらにもう1つの課題があり、電流注入型のレーザーにおいては光出力が未だ低いという課題が存在する。これはワイドバンドギャップ化に伴い半導体層自体の抵抗率が向上することに加え、電極である金属と半導体層の接触抵抗の増大など様々な点で大電流動作が厳しくなると考えられる。

実際その傾向は強く現れていた。図1は当時発表されていた紫外線レーザーの波長と光出力をまとめたものである。各応用分野においてどの程度の波長域・出力が必要かをまとめたものである。これを見ると分かるように電流注入型の紫外線レーザーにこだわっている限りその応用分野の拡大には大きな課題が残されていると考えられる。

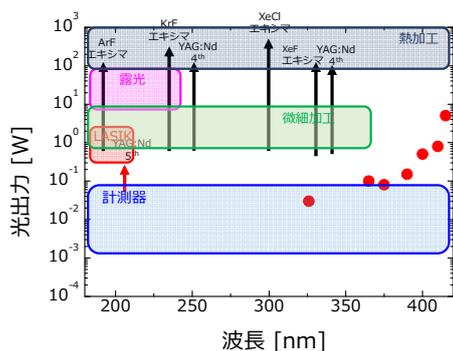


図1 紫外線レーザーの実現領域と応用分野に必要な波長・光出力の関係

### 2. 研究の目的

そのような課題を解決するために、本研究課題では電子線励起によるAlGaIn系のレーザー

の実現を目指し検討を進めた。電子線励起は、電子線によって非弾性散乱を起こさせ、それによって発生した電子正孔対を再結合させることによって利得を得てレーザー発振させる方法であり、高出力化および短波長化に有利な特徴を有している。その一方で、AlGaIn系材料を用いた電子線励起レーザーは報告がなく、その実現は学術的に高い価値があると考えられる。さらに、高出力化が達成できれば医療、環境分野、殺菌、化学分析や3Dプリンター等の工業的な応用も期待でき実現できれば学術的および産業的な価値は極めて大きい。以上から本研究課題では、AlGaIn系材料では未踏であった波長域の電子線励起レーザーの実現が本研究課題の目的である。また、学術的な価値を高めるために、どのような構造を用いれば高性能な電子線励起レーザーが実現できるかもあわせて検討した。

### 3. 研究の方法

本研究を開始の時点で、レーザー発振可能な電子線源というものがそもそも存在しなかったことから、その開発から研究をスタートさせた。まず電子線源の選択からスタートさせた。図2は日本電子 (JEOL) のHPに記載されている市販されている電子線源の輝度とスポットサイズの典型値をまとめたものおよび、最終的に実現させるレーザーの概略図である。一般的にレーザー発振を実現させるためには、 $10^{19} \text{cm}^{-3}$  を超える電子正孔対を発生させる必要があることから、電子線の輝度は高ければ高いほど良いと考えられる。したがって一見すると、Field electron タイプの電子線源やSchottky タイプの電子線源が好ましいように感じられるが、このタイプの電子線源は原理的にスポットサイズが大きくできないという課題があった。また、トータルの出力という観点からも面積が小さい分、最終的な目的である高出力化において不利であるということから、本研究課題ではLaB<sub>6</sub>を電子線源として

用いることに決めた。

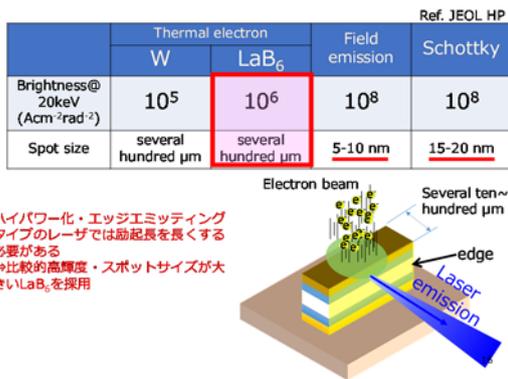


図 2 市販の電子線源及び最終的に実現を目指す紫外線レーザーの概略図

また、電子線は図 3 のように電子線源をスキャンさせ、さらにアパーチャーと呼ばれる間隔を設けることによって、擬似的なパルス電子線源にして実験を行った。実際に、ファラデーカップとオシロスコープを用いて、その電子線形状を確認したが、20ns 程度の良好なパルス波形を確認しており、作製した電子線励起装置は高い効率のパルス照射可能な条件を構築できることが確認された。

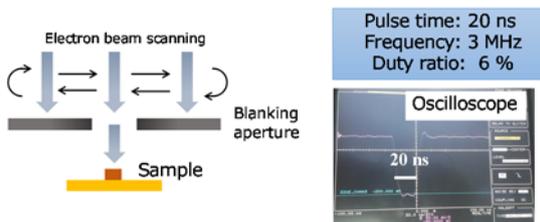


図 3 電子線源のパルス化の検討結果

#### 4. 研究成果

3 で述べたような電子線源を用いて本研究では、AlGaIn 材料系の電子線励起レーザーを検討した。まず最適な試料構造についてデバイスシミュレータ及び電子線シミュレータを用いて検討を開始した。電子線注入の場合、注入できるエネルギーは加速電圧とエミッション電流によって決定される。実際にスポット径を 100 ミクロンおよび 200 ミクロンに設定した時に加速電圧を変化させた時にどのように励起パワー密度が変化するかを検討した結果

を図 4 に示す。これを見ると電子線源のスポット径を 100 ミクロン、加速電圧を大きくすることによって高い励起パワー密度が実現できることが確認される。その一方で電子線シミュレータを用いると大きな課題があることが示唆された。

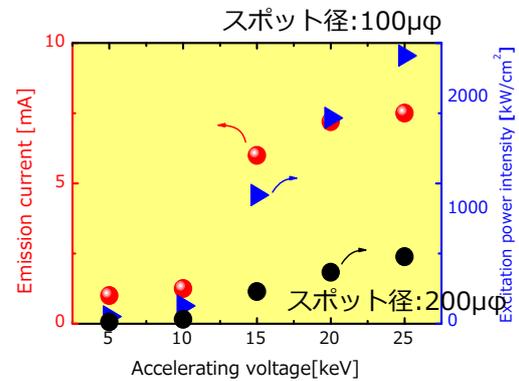


図 4 加速電圧と照射電流及び照射パワー密度の依存性を測定した結果

図 5 は代表的な電子線励起状態における電子線の軌跡のシミュレーション結果である。このシミュレーションは市販の CASINO というソフトウェアを用いて加速電圧の違いによって左図のような構造の直上から電子線の軌跡がどのように変化するかを解析したものである。

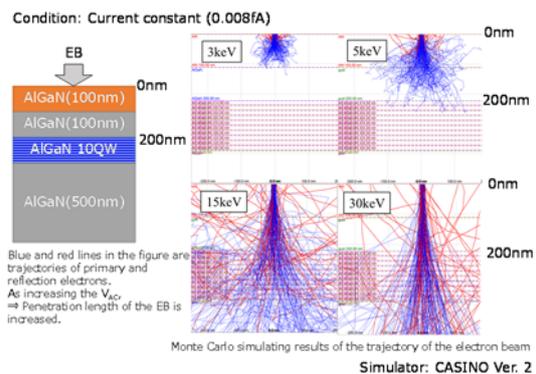


図 5 電子線シミュレータを用いて解析した結果

図 5 の結果から、加速電圧が低いときには表面付近しか励起されていないのに対して、加速電圧を増大すると励起される深さ方向の広がりが増大してしまっていることが確認され

た。先にも記載したようにレーザ発振においては励起パワー密度を高めることが重要であることから、電子線が深さ方向に広がるのは決して好ましいことではないことが示唆される結果となった。そこで、この結果を横軸深さ方向、縦軸各深さ方向において吸収されるエネルギーを算出したグラフにまとめたものが図6である。

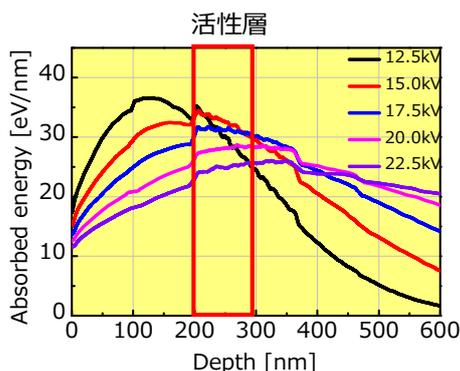


図6 図5の結果を深さ方向に対して検討した結果である。

この図から分かるように、加速電圧が低いときには加速電圧を増大させることによって試料で吸収させることが可能なエネルギーの増大が可能であるが、一方である程度の加速電圧になるとパワー密度のピーク値は下がってしまうことが確認された。また、活性層をピーク値に持っていくのが最もレーザ発振に近づけることが可能であること、図4の結果をあわせて本研究では試料表面からこの深さ方向に対して活性層を設置するような構造でデバイスを作製した。さらにこの構造で最もレーザ発振が用意になる構造をデバイスシミュレータである SiLENSe を用いて解析を行い、図7のようなテストサンプルを試作した。

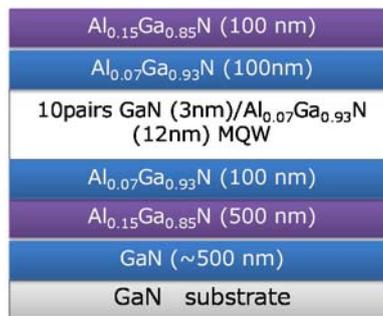


図7 試作した試料構造

この試料を電子線励起用に端面にミラーを形成させる方法を適用して検討を行った。本研究では共振器長には 100 ミクロンという比較的短い端面を形成させる必要があったことから、従来の端面型レーザで光共振器として適用されていたへき開法によるレーザでは作製が困難であったことから反応性プラズマ (ICP) エッチング法及びテトラメチルアンモニウム水溶液を用いたウェットエッチング法を用いて検討を行った。

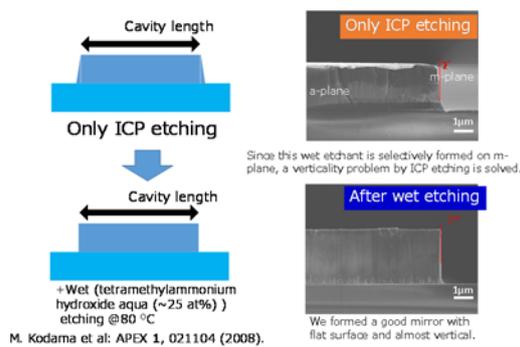


図7 端面加工の結果、ICP エッチングを行ったあとにウェットエッチングをすることによって垂直な端面が形成できていることが確認できた

このように作製した試料を、電子線を用いて評価した。その評価結果の代表的な例を図8に示す。図8 (a) - (c)はそれぞれ、電子線の励起パワー密度を変化させたときのスペクトル、発光強度の電子線パワー密度依存性および、照射パワー密度 280kW/cm<sup>2</sup>時における偏光特性を測定した結果である。

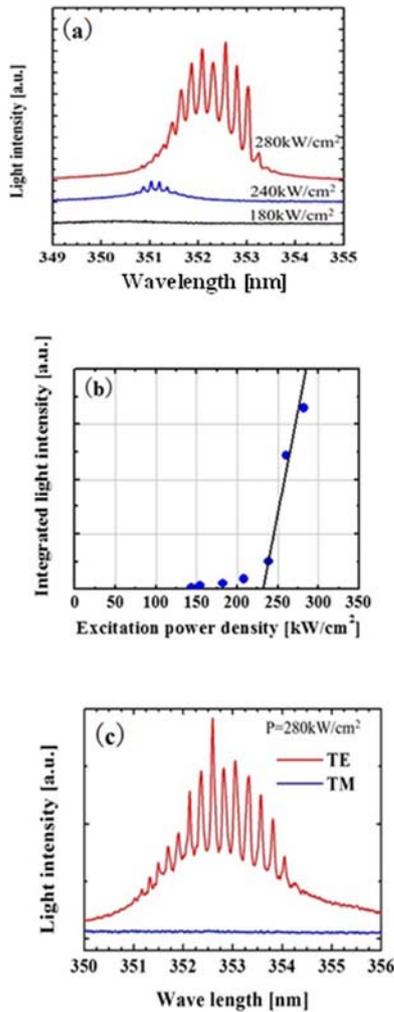


図 8 測定結果の例。(a) 励起パワー密度をへんかさせた時の発光スペクトル、(b) 発光強度の励起パワー密度依存性、(c) 偏光特性

図 8 の結果を考察すると、(a) から励起パワー密度を増大させることによって自然放出から誘導放出への変化の確認できたこと、また  $280\text{ kW/cm}^2$  時のスペクトルのピーク波長間隔は約  $0.25\text{ nm}$  であったことから、共振器長から見積もられる縦モード間隔とよく一致すること、さらに  $211\text{ kW/cm}^2$  付近に明確な閾値パワー密度があることが確認できること、明確な TE モード偏光特性が現れていることから、レーザー発振に至っていると結論付けられる成果を得た。

さらに、加速電圧を変化させた時にレーザー発振に必要な閾値パワー密度の依存性を検討しその結果を図 9 にまとめた。結果として、加速電圧には最適な値があり、これは先述の電子線シミュレータの結果とほぼ一致する結果であると結論付けられた。また、パワーに関しても測定してみたところ数 mW 以上の出力が得られており、今後構造の最適化によってワットクラスの電子線励起レーザーの実現が期待できる。

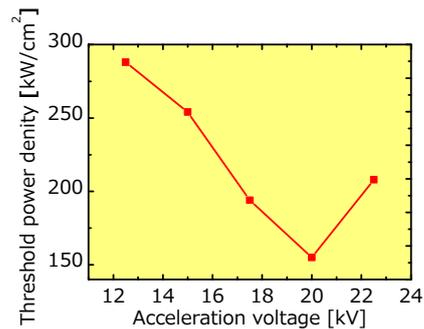


図 9 レーザ発振に必要な閾値パワー密度の加速電圧依存性

以上から、本研究課題では、電子線励起装置の開発からレーザー発振に至るなど高い学術的な成果を残したと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

以下に代表的な成果を記載する。

1. “Demonstration of electron beam laser excitation in the UV range using a GaN/AlGaIn multiquantum well active layer”, Takafumi Hayashi, Yuta Kawase, Noriaki Nagata, Takashi Senga, Sho Iwayama, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, Takahiro Matsumoto: Scientific Reports 7, 2944 (2017).
2. Kazuki Ikeyama, Yugo Kozuka, Kenjo

Matsui, Shotaro Yoshida, Takanobu Akagi, Yasuto Akatsuka, Norikatsu Koide, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, Isamu Akasaki: “Room-temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface emitting lasers with n-type conducting AlInN/GaN distributed Bragg reflectors” Applied Physics Express 9 (2016)102101.

[学会発表] (計 83 件)

以下に代表例を記載する。

1. Motoaki Iwaya, Takafumi Hayashi, Noriaki Nagata, Takashi Senga, Sho Iwayama, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, and Takahiro Matsumoto: Realization of electron beam excitation of UV laser using a AlGaIn/GaN multi quantum well active layer, European Material Research Society Symposium Fall meeting (2017) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 8 件)

以下に代表例を記載する。

名称：窒化物半導体 AlGaIn 系紫外半導体レーザ

発明者：岩谷素顕、竹内哲也、上山智、赤崎勇、川瀬雄太、安田俊樹

権利者：名城大学

種類：特許

番号：特願 2016-242891

出願年月日：2016 年 12 月 15 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩谷 素顕 (Motoaki Iwaya)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：40367735

### (2) 研究分担者

上山 智 (Satoshi Kamiyama)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：10340291

竹内 哲也 (Tetsuya Takeuchi)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：10583817

松本 貴裕 (Takahiro Matsumoto)

名古屋市立大学大学院・芸術工学研究科・教授

研究者番号：10422742