

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289092

研究課題名(和文) Beカルコゲナイドを用いた高信頼性緑色～黄色半導体レーザの実現

研究課題名(英文) Development of green-to-yellow semiconductor laser of high reliability using beryllium chalcogenide

研究代表者

秋本 良一 (AKIMOTO, RYOICHI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号：30356349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：BeZnCdSe量子井戸を活性とし、新規な電流狭窄構造をもった緑～黄色波長域の半導体レーザー素子を実現した。ディープエッチングによるリッジ構造の形成と、SiO₂絶縁膜への埋め込み・平坦化プロセスを開発した。素子表面の平坦化プロセスにおいては、化学機械研磨と反応性イオンエッチングを組み合わせることにより、精密に膜厚を制御しながらSiO₂の平坦化および上部素子電極の精密な頭出しが可能となった。作製した素子のしきい電流値は10mA以下と極めて低くなり、従来構造の約1/10から1/5程度に抑制することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Low threshold current green-to-yellow BeZnCdSe single quantum-well (SQW) laser diodes (LDs) have been developed. The waveguide was formed of a ridge structure with etching away the top p-type BeMgZnSe/ZnSe:N short-period superlattice cladding layer, and then covered with a thick SiO₂ layer and planarized with chemical-mechanical polishing and reactive ion etching process. A 535-nm green laser with 7-nm-thick SQW showed a threshold current and voltage of 7.07 mA and 7.89 V for a cavity width of 4 μm and length of 300 μm. A 563-nm yellow LD with 4-nm-thick SQW was also developed with 7.4-mA and 8.48-V threshold current and voltage for a 3-μm-wide, 300-μm-long cavity. The threshold current in these devices was decreased to 1/10 to 1/5, compared with our previous devices. Thus the device performance can be significantly improved with much lower power consumption.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザー 量子井戸 II-VI族半導体 ベリリウムカルコゲナイド

1. 研究開始当初の背景

半導体発光素子を光源に用いた手のひらサイズ以下の超小型プロジェクト、いわゆるピコプロジェクトの研究が活発化している。半導体光源としては発光ダイオード(LED)と半導体レーザーがあり、レーザーの方が高効率であり純色性も高いという利点があるものの、実用化ではLEDを光源に用いたものの方が一歩先んでいる状況である。ディスプレイ用の半導体レーザーがLEDに遅れをとっている原因の一つは、波長530nm~540nmの緑色の半導体レーザーがいまだ実用化されていないことである。一方、黄色半導体レーザーについては、医療応用やバイオ材料の蛍光分析等の分析機器への応用が期待されているが、これもまだ実現されていない。

緑色半導体レーザーの実用化に向けては、青紫色レーザーで実績のあるIII-V族窒化物半導体であるInGaN系材料を用いた検討が活発である。しかし、発振波長が青色から緑色に長波長化するに従ってレーザーの閾電流密度が上昇し実用的な特性はいまだ得られていない。InGaN系半導体レーザーの閾電流密度は、発振波長が530nm台に近づくにしたがって急激に上昇する。窒化物半導体は、長波長化に伴ってGaN基板との格子不整合、非混和性、圧電分極等の問題が顕在化し、緑色レーザー実用化にはもう一段のブレークスルーを必要とする状況にある。

一方、本研究代表者らは、緑および黄色半導体レーザー実現のために別の材料によるアプローチ、つまりBeZnCdSe系II-VI族材料に着目し、2008年より研究を進めてきた。ZnSe系材料レーザーは、1990年代の青色レーザー開発競争において、より信頼性の高いGaNレーザーの登場によりの研究が衰退してしまっていた。しかし我々は上記の窒化物系の状況を鑑みて、II-VI族系は緑および黄色波長域へのLD応用に向けてもう一度検討に値する材料であると考えた。特にBeと混晶化させることにより共有結合性が強くなり、結晶結合あたりの凝集エネルギーが青紫色レーザーで実績のあるGaN系材料に近くなるなどの試算がある。これによりBe系II-VI族化合物半導体材料を用いることにより、従来の課題であった信頼性も確保できると期待できる。

2. 研究の目的

これまで我々が研究開発を行ってきた緑~黄色半導体レーザー素子では、レーザー発振中の劣化が実用化を阻害する要因となっていた。本研究開発では、信頼性向上に有効と考えられる低消費電力動作化の技術を確認することを目的とする。具体的には、従来の利得ガイド型レーザーにおける注入電流の横方向への拡散を抑制するために、新規な電流狭窄構造を有するレーザー素子を作製し低電力動作化の効果を確認し、実用化への道筋を確立する。

3. 研究の方法

図1(上)に作製した利得ガイド型のレーザー素子の構造を示す。結晶成長は分子線エピタキシー法により行い、III-V成長室とII-VI成長室が超高真空搬送室で接続された構成をもつ成長装置を用いた。まず(001)面n-GaAs基板にn-GaAsバッファ層を成長し原子レベルで表面を平坦化した後、基板をII-VI成長室へ搬送し、レーザー層構造の結晶成長を行った。P型ドーピングは、窒素プラズマ源による窒素ドーピングを行い、n型ドーピングはZnCl₂を用いて塩素をドーピングした。

レーザー構造は、BeZnCdSe量子井戸をBeZnSeガイド層で挟んだ分離閉じ込めヘテロ(SCH)構造とした。n型クラッド層はBeMgZnSe:Cl(E_g=2.85eV)を採用した。窒素ドープしたBeMgZnSeはキャリア活性率が低く10¹⁶/cm³台前半のキャリア濃度しか得られないことが判明したため、BeMgZnSe/ZnSe短周期超格子構造(SPSL)を採用した。SPSL層では、比較的高いキャリア濃度(~1x10¹⁸/cm³)が得られるZnSe層に変調窒素ドープを施している。SPSL層のキャリア濃度は2x10¹⁷/cm³、E_gは2.79eVであり、p型クラッド層として必要十分な特性を持つ。p型オーム電極層として、10¹⁹~10²⁰/cm³の高濃度p型ドープが可能なBeTe層を最上部に配置し、p⁺-BeTeオーム電極層とBeZnMgSeクラッド層の価電子帯を連続的に接続するために、ZnSe/BeTe疑似組成傾斜超格子によるpコンタクト層を導入した。

レーザー素子に注入された電流の横方向への広がりを抑制するために、p型コンタクト層、p型SPSLクラッド層をストライプ状

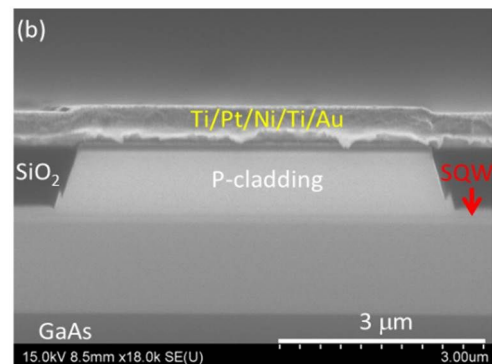
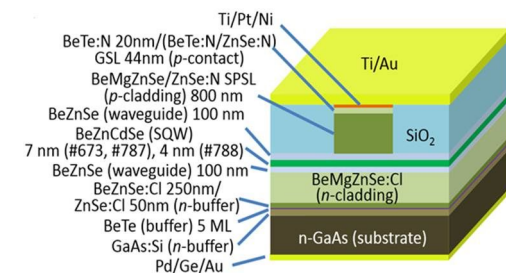


図1 上：作製した素子の模式図。下：作製した素子の断面電子顕微鏡写真。

にドライエッチングエッチングし、リッジ型導波路を形成した。その後、絶縁膜として厚み $2\mu\text{m}$ の SiO_2 膜を化学気相法で堆積した。次に、化学機械研磨で SiO_2 膜表面を平坦化した。ドライエッチングによりさらに SiO_2 膜をエッチングし、エッチングの選択性を利用してリッジの上部が露出した直後でエッチングを停止した。その後、電極用金属膜を成膜した。リッジ幅は $2\sim 20\mu\text{m}$ で変化させた素子を作製した。裏面に n 型電極を形成した。ヘキカイにより素子を切り出し、端面に高反射膜を形成した。図 1 (下) は、すべての工程を終えた後の、素子の断面を走査電子顕微鏡で観察した写真である。

4. 研究成果

図 2 は、異なる条件で結晶成長した 3 種類のウエハ(#673, #787, #788)から作製したレーザー素子の発振時のスペクトル(左)および発振時の写真(#673, 右)である。測定は素子ヒートシンクの温度を 25 に設定して行った。発振波長はそれぞれ 535nm , 567nm , 563nm である。#787, #788 に関しては、ほぼ黄色のレーザー発振光を肉眼で確認することができた。

次に黄色波長で発振する#787(ストライプ幅 $7\mu\text{m}$)と#788(ストライプ幅 $3\mu\text{m}$)の素子について、さらに詳細にレーザー素子について連続発振の条件で測定を行った。図 3 は、素子の共振器長を変化させたときの、電流 光出力(I-L)と電流 電圧(I-V)特性を測定し

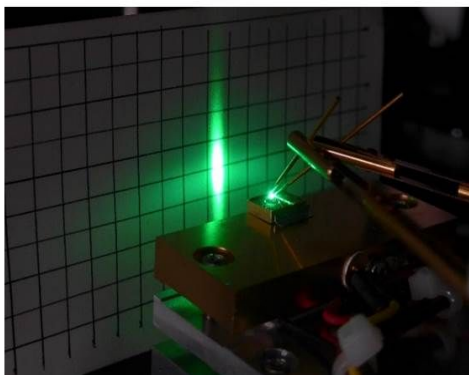
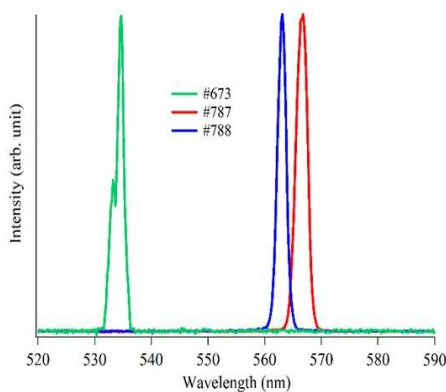


図 2 上: 作製した 3 種類のレーザー素子の発振スペクトル、下: ウエハ#673 のレーザー発振時の様子

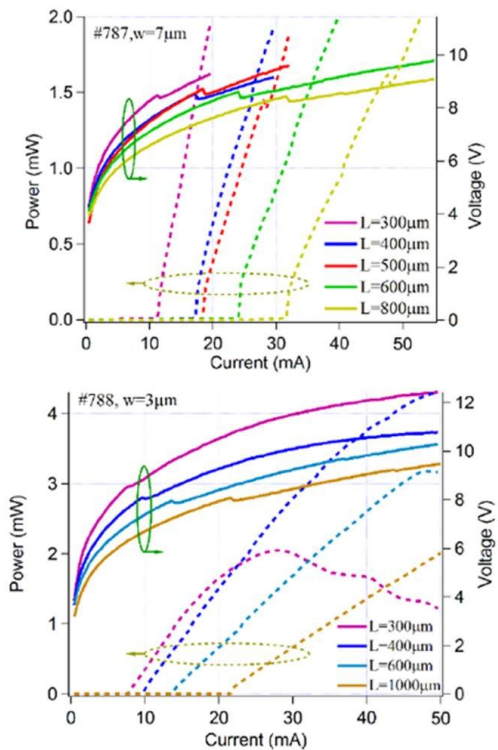


図 3 黄色波長域で発振するレーザー素子(上: #787, 下: #788)の光出力・電圧の電流依存性

た結果である。最も特性が良好な素子は、#787 素子では、共振器長 $300\mu\text{m}$ においてしきい値電流と電圧は、それぞれ 10.8mA と 8.4V が得られた。以前作製した利得ガイド型の黄色波長で発振する素子(メサ幅 $10\mu\text{m}$ 、共振器長 $800\mu\text{m}$)では、しきい値電流と電圧がそれぞれ 94mA と 9.6V であるので、しきい値電流に関しては大幅な低減が実現されていることが確認できた。しきい値電流密度で比較すると、今回の素子が $0.51\text{kA}/\text{cm}^2$ に対して、従来の素子が $1.175\text{kA}/\text{cm}^2$ であり、約 50% 減少している。これは今回の素子で導入したメサ構造による電流狭窄効果により、しきい値電流密度が減少したと考えられる。上部クラッド層をガイド層直上までエッチングすることにより、従来の利得ガイド型の構造のときに示唆された注入電流の横方向の広がりが抑制されたためと推定される。

以上、新規な電流狭窄構造をもったレーザー素子を開発した。具体的には、ディープエッチングによるリッジ構造の形成と、その SiO_2 埋め込み平坦化プロセスを開発した。素子表面の平坦化プロセスにおいては、化学機械研磨と反応性イオンエッチングを組み合わせることにより、精密に膜厚を制御しながら SiO_2 の平坦化および上部素子電極の精密な頭出しが可能となった。作製した素子のしきい電流値は 10mA 以下と極めて低くなり、従来構造の約 $1/10$ から $1/5$ 程度に抑制することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

S. Tanaka, J. Kasai, S. Fujisaki, S. Tsuji, R. Akimoto, T. Hasama, and H. Ishikawa, Progress of Be-Based II-VI Green to Yellow Laser Diodes, 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 査読有, 2013, MH2-2
DOI: 10.1109/CLEOPR.2013.6599924

Ryoichi Akimoto, A ZnSe/BeTe p-grading superlattice with a low voltage drop for efficient hole injection in green-yellow BeZnCdSe quantum well laser, Proc. of SPIE, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIV, 査読有, Vol.9382, 2015, 93821T-1~8
DOI: 10.1117/12.2078174

秋本 良一、葛西 淳一、藤崎 寿美子、田中 滋久、辻 伸二、挟間 壽文、石川浩 BeZnCdSe 量子井戸による緑・黄色レーザ, 電気学会研究会資料 光・量子デバイス研究会, 査読無, Vol.QQD14, 2014, 11~16

Feng Jijun, Ryoichi Akimoto, Low threshold current yellow BeZnCdSe quantum-well ridge-waveguide laser diodes under continuous-wave room-temperature operation, APPLIED PHYSICS LETTERS, 査読有, Vol.107, 2015, 161101
DOI: 10.1063/1.4934359

Feng Jijun, Ryoichi Akimoto, Low threshold current yellow BeZnCdSe quantum-well ridge-waveguide laser diodes under continuous-wave room-temperature operation, APPLIED PHYSICS EXPRESS, 査読有, Vol.9, 2016, 012101
DOI: 10.7567/APEX.9.012101

Feng Jijun, Ryoichi Akimoto, Room-Temperature Continuous-Wave Operation of BeZnCdSe Quantum-Well Green-to-Yellow Laser Diodes with sub-10 mA Threshold Current, Proc. of SPIE, 査読有, Vol.9767, 2016, 97670C-1~8
DOI: 10.1117/12.2211916

〔学会発表〕(計4件)

S. Tanaka, J. Kasai, S. Fujisaki, S. Tsuji, R. Akimoto, T. Hasama, and H. Ishikawa, Progress of Be-Based II-VI Green to Yellow Laser Diodes, 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2013年06月30日, 京都国際会議場(京都市)

Ryoichi Akimoto, A ZnSe/BeTe p-grading superlattice with a low voltage drop for

efficient hole injection in green-yellow BeZnCdSe quantum well laser, Photonics West 2015 Optoelectronic Devices and Materials, 2015年02月11日, San Francisco, California (USA)

秋本 良一、葛西 淳一、藤崎 寿美子、田中 滋久、辻 伸二、挟間 壽文、石川浩, BeZnCdSe 量子井戸による緑・黄色レーザ, 電気学会研究会(光・量子デバイス研究会), 2014年06月30日, 東京工業大学(東京都)

Feng Jijun, Ryoichi Akimoto, Room-Temperature Continuous-Wave Operation of BeZnCdSe Quantum-Well Green-to-Yellow, Laser Diodes with sub-10 mA Threshold Current, Photonics West 2016, 2016年02月15日, San Francisco (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋本 良一 (AKIMOTO Ryoichi)
研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・上級主任研究員
研究者番号: 30356349

(2) 研究協力者

フェン ジジュン (FENG Jijun)
University of Shanghai for Science and Technology・School of Optical-Electrical and Computer Engineering・教授