

平成 22 年 4 月 2 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19360166

研究課題名（和文） 緑色半導体レーザの研究

研究課題名（英文） Study on green semiconductor laser diodes

研究代表者

野村 一郎（NOMURA ICHIROU）

上智大学・理工学部機能創造理工学科・講師

研究者番号：00266074

研究成果の概要（和文）：緑色半導体レーザの開発を目指し InP 基板上の II-VI 族半導体材料の開拓を進めた。BeZnSeTe を活性層とするダブルヘテロ構造(DH)では室温において緑色～黄色光励起発振に成功し、BeZnSeTe が緑色～黄色レーザの活性層材料として高い性能を有していることを示した。BeZnSeTe を活性層とする DH レーザ構造を作製し、電流注入により評価したところ 550～560nm において黄緑色の発光が観測された。

研究成果の概要（英文）：We have developed II-VI compound semiconductors on InP substrates for green laser diodes (LDs). Green-to-yellow photopumped lasing emissions were successfully obtained at room temperature for the double hetero-structures (DHs) with a BeZnSeTe active layer, which shows a high possibility of BeZnSeTe as an active layer of green-to-yellow LDs. DH-LD structures with a BeZnSeTe active layer were fabricated and characterized by current injections, resulting in observing yellow green emissions in the wavelength range of 550 to 560 nm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2008年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：緑色半導体レーザ、光励起発振、ダブルヘテロ構造、II-VI族半導体、BeZnSeTe InP 基板、MgSe/BeZnTe 超格子、しきい値電流密度

## 1. 研究開始当初の背景

半導体レーザは光通信や光情報記録など多くの分野に応用され今日の情報化社会を支える基幹デバイスとなっている。その中

で可視光半導体レーザは、600nm帯赤色 AlGaInP レーザや III-V 族窒化物系による 400nm帯青色レーザがDVDやレーザポインターなど様々な分野へ応用され、益々その重要

性を増している。一方、赤と青の間の可視中域、即ち緑色域の半導体レーザーは、三原色半導体レーザー光源の実現や高精彩フルカラーディスプレイへの応用、また視認性の高いレーザーポインターへの応用など多くの需要が見込まれるが、現状では実用化はおろかその目処すらも立っていない。緑色半導体レーザーの開発がこのように遅れた原因は、レーザーを構成する適切な材料がこれまで見出されなかったことにある。これまでも既存の材料を用いて緑色レーザーの実現が試みられているが、何れも材料的、技術的な壁に阻まれ進展は得られていない。例えば、既存のAlGaInPレーザーや窒化物レーザーの発振波長を緑色域にシフトしようとするとしきい値電流が急激に増加してしまい、緑色発振には至っていない。

一方、過去にはGaAs基板上のZnSe系II-VI族半導体の研究開発が行われた。1991年にこの材料系による500nm帯青緑レーザー発振が報告され、その後精力的に研究が進められた。しかし、素子寿命が400時間を超えられず、それ以上の長寿命化が得られなかったため研究開発はその後中断されてしまった。その原因は結晶の脆弱性などこの材料系の本質的な問題であり、解決には新たな材料の開拓が必要不可欠であることが明らかとなった。

このような状況において研究代表者は緑色域の光デバイス材料としてInP基板上のII-VI族半導体という新規材料に着目し、緑色半導体レーザー材料として有望であることを示してきた。例えば、BeZnSeTeは黄色～緑色域で発光し、またBeを含むことから格子強化の効果が見込まれ、長寿命緑色域レーザーの活性層材料として有望である。実際に研究代表者はBeZnSeTeを活性層に用いた発光ダイオード(LED)を作製し、5000時間以上の長寿命動作を達成した。そこで本研究代表者は、当該材料の開拓を更に推し進めることで優れた特性を見出し、これを応用することで緑色半導体レーザーの実現により近づくと考え本課題の着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究ではInP基板上II-VI族半導体材料/デバイスにおけるこれまでの成果を更に発展させ、緑色半導体レーザー実現の可能性を探求することを目的とする。それには先ず活性層やクラッド層材料の特性評価及び改善が必要となる。活性層についてはBeZnSeTeの発光波長域やレーザー利得特性の評価及び高品質化を行う。クラッド層については従来のMgSe/ZnCdSe超格子やMgSe/BeZnTe超格子

の層厚比やドーピング条件を最適化し特性の改善を図ると共に他の材料の可能性についても検討する。これらの材料の最適な組み合わせを探索し、緑色レーザー実現の可能性を調べる。

## 3. 研究の方法

### (1) 活性層材料の特性評価と改善

BeZnSeTe活性層材料の特性評価としてこれまでのフォトルミネッセンス(PL)測定に加え、光励起によるレーザー発振特性の評価を行う。BeZnSeTe活性層をクラッド層で挟んだダブルヘテロ(DH)構造を作製し、強励起によるレーザー発振特性を調べる。また、バッファ層等の成長条件を改良し結晶性の改善を図る。

### (2) レーザー構造の検討

活性層にBeZnSeTe、バリア層にMgSe/BeZnSeTe超格子、nクラッド層にMgSe/ZnCdSe超格子、pクラッド層にMgSe/BeZnTe超格子を用いたレーザー構造において最適化を検討する。光励起発振で得られるデータを元にレーザー特性を予測し、構造の検討に応用する。

### (3) レーザー構造の作製と評価

実際にレーザー構造を作製し特性を評価する。電流注入における電圧電流特性や発光特性を評価し、問題点を抽出すると共に改善を図る。基本は(2)で述べた構造とするが、発振の見込みが立たない場合は別の材料の導入も検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 成長条件の検討とBeZnSeTeの特性評価

試料作製には分子線エピタキシー(MBE)法を用いた。ここで、成長条件の最適化を検討した結果以下の手順が確立された。

- ① III-V族成長室において基板の表面酸化膜除去及びInPバッファ層、InGaAsバッファ層成長。
- ② II-VI族成長室において基板温度 240°CでZn照射及びZnCdSe低温バッファ層(5nm)成長。
- ③ 基板温度 280°CにおいてZnCdSeバッファ層(300nm)成長。
- ④ 目的結晶の成長。

BeZnSeTe試料については、バッファ層上にBeZnSeTe層(600nm)及びZnTeキャップ層(10nm)を300°Cで成長させた。BeZnSeTe層については格子整合条件を保ちながら組成の異なる数種類の試料を作製した。作製した

試料の室温での PL 測定を行った。励起光源には He-Cd レーザ(325nm)を用いた。図 1 に PL スペクトルを示した。Be(x)Zn(1-x)Se(y)Te(1-y)において組成を  $x/y=0.075/0.41$  から  $0.17/0.32$  に変えることでピーク波長が 562nm から 520nm の良好な単峰性緑色域発光が得られた。半値幅は 66~79meV であった。また、発光強度は、先の II-VI 族レーザの活性層材料として実績のある ZnCdSe と比較して遜色のない特性が得られた。

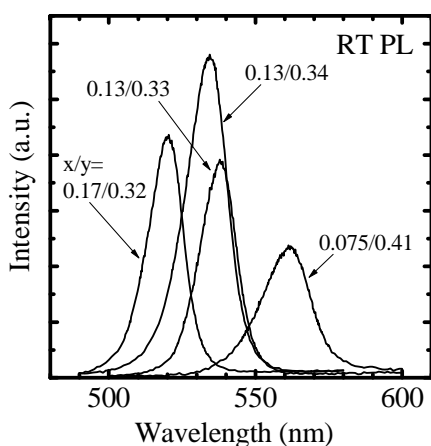


図 1 BeZnSeTe の室温 PL スペクトル。

## (2) BeZnSeTe DH の光励起発振特性の評価

BeZnSeTe のレーザの活性層としての特性を評価するために DH 構造を作製し、光励起によるレーザ発振特性を調べた。素子は 100nm 厚の BeZnSeTe 活性層を MgSe/BeZnTe 超格子(4 分子層/4 分子層)クラッド層で挟んだ構造とした。クラッド層の層厚は上部を  $0.2 \mu\text{m}$ 、下部を  $1 \mu\text{m}$  とした。成長方法は先の BeZnSeTe 試料と同様である。また、活性層の組成が異なる試料を数種類作製した。成長したウェハを光励起実験用に幅  $0.5\sim 2\text{mm}$  (共振器長)、長さ数 mm のバー状にヘキ開により切り出した。

光励起実験では Nd:YAG 固体パルスレーザの 3 倍波(355nm)を励起光源として用いた。励起レーザ光をシリンドリカルレンズにより帯状に絞って試料表面に照射し、端面からの発光を多チャンネル分光器により測定した。発振スペクトルを図 2 に示した。ピーク波長 538nm の緑色から 548nm 黄緑色、570nm の黄色においてレーザ発振が得られた。また、しきい値励起強度密度( $P_{\text{th}}$ )の発

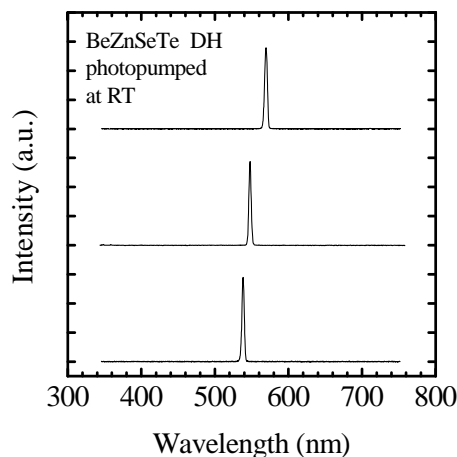


図 2 BeZnSeTe DH の発振スペクトル。

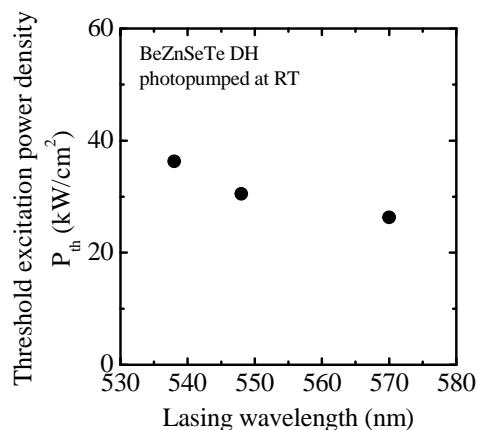


図 3 BeZnSeTe DH におけるしきい値励起強度密度の発振波長依存性。

振波長依存性を図 3 に示した。波長が 538nm から 570nm に長波化するにつれて  $P_{\text{th}}$  は  $36\text{kW}/\text{cm}^2$  から  $26\text{kW}/\text{cm}^2$  に低減した。

次に、 $P_{\text{th}}$  より励起されたキャリア濃度を見積もることでしきい値キャリア濃度( $N_{\text{th}}$ )を求めた。更にレーザの導波路解析によりしきい値利得を見積り、これと  $N_{\text{th}}$  により電流注入におけるレーザのしきい値電流密度( $J_{\text{th}}$ )を求めた。レーザ構造は、活性層に BeZnSeTe、バリア層に MgSe/BeZnSeTe 超格子、n クラッド層に MgSe/ZnCdSe 超格子、p クラッド層に MgSe/BeZnTe 超格子を用いた量子井戸レーザとした。波長 538nm において  $0.83\text{kA}/\text{cm}^2$ 、548nm において  $0.74 \text{kA}/\text{cm}^2$ 、570nm において  $0.61 \text{kA}/\text{cm}^2$  が求められた。これより、緑色~黄色域において低しきい値レーザが得られることが予測された。

(3) レーザ構造の作製と評価

光励起実験で用いた DH 構造を元に、レーザ構造を作製した。構造は MgSe/ZnCdSe 超格子 n クラッド層、MgSe/BeZnTe 超格子バリア層、BeZnSeTe 活性層、MgSe/BeZnTe 超格子 p クラッド層とした。作製した素子に室温において電流を注入したところ 550~560nm 帯において黄緑色の発光が観測された。しかし、抵抗が高く流せる電流も数 A/cm<sup>2</sup> 程度であったためレーザ発振には至らなかった。高抵抗の原因の一つは InP 基板とクラッド層との間のバッファ層であることが分かり、これは成長条件等を改良することで解決できることが分かった。

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 3 件)

- ① Ichirou Nomura, Katsumi Kishino, Tomoya Ebisawa, Yutaka Sawafuji, Rieko Ujihara, Kunihiko Tasai, Hitoshi Nakamura, Tsunenori Asatsuma, and Hiroshi Nakajima, Photopumped green lasing on BeZnSeTe double heterostructures grown on InP substrates, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 94, 2009, 021104.
- ② Tomoya Ebisawa, Ichirou Nomura, Katsumi Kishino, Kunihiko Tasai, Hitoshi Nakamura, Tsunenori Asatsuma, and Hiroshi Nakajima, First photopumped yellow-green lasing operation of BeZnSeTe/(MgSe/BeZnTe) doublehetero structures (DHs) grown on InP substrates, Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol. 311, 2009, pp. 2291-2293.
- ③ Ichirou Nomura, Tomohiro Yamazaki, Hiroaki Hayashi, Koichi Hayami, Masaki Kato, and Katsumi Kishino, Zn irradiation effects in MBE growth of MgSe/BeZnSeTe II-VI compound superlattices on InP substrates, Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol. 301-302, 2007, pp. 273-276.

[学会発表] (計 16 件)

- ① 澤藤豊, 野村一郎, 岸野克巳, InP 基板上 BeZnSeTe ダブルヘテロ構造における緑色域光励起発振特性の評価, 第 70 回応用物理学学会学術講演会, 2009 年 9 月 8 日, 富山.
- ② Katsumi Kishino and Ichirou Nomura, Green to yellow light emitters with II-VI semiconductors, 14th International Conference on II-VI Compounds, August 28th 2009, St. Petersburg, Russia (Invited).

- ③ Yutaka Sawafuji, Ichirou Nomura, Tomoya Ebisawa, Shun Kushida, and Katsumi Kishino, Photopumped lasing characteristics of yellow-green BeZnSeTe double-heterostructures grown on InP substrates, 14th International Conference on II-VI Compounds, August 24th 2009, St. Petersburg, Russia.
- ④ 澤藤豊, 野村一郎, 蛭沢智也, 櫛田俊, 岸野克巳, InP 基板上 BeZnSeTe ダブルヘテロ (DH) 構造における黄色-緑色域光励起発振特性, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 30 日, 茨城.
- ⑤ 野村一郎, 岸野克巳, 蛭沢智也, 櫛田俊, 田才邦彦, 中村均, 朝妻庸紀, 中島博, 緑色半導体レーザに向けた InP 基板上 II-VI 族材料の開拓, 電子情報通信学会, レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 2008 年 12 月 12 日, 東京.
- ⑥ Ichirou Nomura, Katsumi Kishino, Tomoya Ebisawa, Shun Kushida, Jun Uota, Kunihiko Tasai, Hitoshi Nakamura, Tsunenori Asatsuma, and Hiroshi Nakajima, Proposal of BeZnSeTe/MgZnCdSe II-VI compound semiconductors on InP substrates for green laser diodes, 2008 International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2008), September 18th 2008, Sorrento, Italy.
- ⑦ 蛭沢智也, 野村一郎, 岸野克巳, 田才邦彦, 中村均, 朝妻庸紀, 中島博, InP 基板 BeZnSeTe/(MgSe/BeZnTe) DH 構造における光励起緑色発振, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 4 日, 愛知.
- ⑧ Tomoya Ebisawa, Ichirou Nomura, Katsumi Kishino, Kunihiko Tasai, Hitoshi Nakamura, Tsunenori Asatsuma, and Hiroshi Nakajima, First photo-pumped yellow-green lasing operation of BeZnSeTe/(MgSe/BeZnTe) double-hetero (DH) structures grown on InP substrates, 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2008), August 8th 2008, Vancouver, Canada.
- ⑨ Ichirou Nomura, Tomoya Ebisawa, Shun Kushida, Kazuki Toyama, Soh Kuroiwa, and Katsumi Kishino, High reliable BeZnSeTe/MgZnCdSe II-VI compound green light emitting devices on InP substrates, The International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED2008), May 2nd 2008, Phoenix, Arizona, USA.
- ⑩ 蛭沢智也, 野村一郎, 遠山和樹, 黒岩創, 岸野克巳, InP 基板上 BeZnSeTe II - VI 族半導体の発光特性における Be 組成依存性, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 29 日, 千葉.

- ⑪ 黒岩創, 野村一郎, 加藤昌己, 蛭沢智也, 岸野克巳, n クラッド層材料としての InP 基板上 MgZnSeTe II-VI 族半導体の作製と評価, 応用物理学会結晶工学科会年末講演会「結晶から広がる科学」, 2007 年 12 月 14 日, 東京.
- ⑫ 蛭沢智也, 野村一郎, 加藤昌己, 黒岩創, 岸野克巳, InP 基板上 BeZnCdSe II-VI 族半導体の結晶成長と特性評価, 応用物理学会結晶工学科会年末講演会「結晶から広がる科学」, 2007 年 12 月 14 日, 東京.
- ⑬ Masaki Kato, Ichirou Nomura, Hiroaki Hayashi, Soh Kuroiwa, and Katsumi Kishino, Design and fabrication of BeZnSeTe/MgZnCdSe II-VI green light emitting devices on InP substrates, The 13th International Conference on II-VI Compounds, September 13th 2007, Jeju, Korea.
- ⑭ 蛭沢智也, 野村一郎, 加藤昌己, 黒岩創, 岸野克巳, InP 基板上 BeZnCdSe II-VI 族半導体の発光特性, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007 年 9 月 5 日, 札幌.
- ⑮ 加藤昌己, 野村一郎, 黒岩創, 蛭沢智也, 岸野克巳, InP 基板上 BeZnSeTe 緑色半導体レーザ構造の検討, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007 年 9 月 5 日, 札幌.
- ⑯ 黒岩創, 野村一郎, 加藤昌己, 蛭沢智也, 岸野克巳, InP 基板上 II-VI 族発光デバイスに向けた MgZnSeTe n クラッド層の検討, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007 年 9 月 5 日, 札幌.

[図書] (計 1 件)

- ① Ichirou Nomura et al, Springer, Wide Bandgap Semiconductors, Fundamental Properties and Modern Photonic and Electronic Devices, 2007, 120-123

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野村 一郎 (NOMURA ICHIROU)  
 上智大学・理工学部・講師  
 研究者番号：00266074

### (2) 研究分担者

岸野 克巳 (KISHINO KATSUMI)  
 上智大学・理工学部・教授  
 研究者番号：90134824