

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 9 月 7 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820133

研究課題名(和文) ICP Ar Intermixing による量子ドットレーザ集積光デバイスの研究

研究課題名(英文) Study of quantum dot laser integrated optical device using ICP Ar Intermixing

研究代表者

松本 敦 (Matsumoto, Atsushi)

国立研究開発法人情報通信研究機構・光ネットワーク研究所 光通信基盤研究室・研究員

研究者番号：30580188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、量子ドット(QD)構造を用いた半導体レーザ(LD)の研究開発が進展し、その高い特性が注目されている。また、光デバイスは単一素子でなく、様々な要素素子を基板上に集積し、高機能・高付加価値を目指した研究がなされている。本研究では、Intermixingという技術を従来用いられなかった1550nm帯のQD構造に応用する技術を開発し、良好なQD-LD集積素子を実証した。Intermixingの物理現象についても学術的に考察し、そのメカニズムの一端を明らかにした。本研究は従来取られている方法に対し、より簡易で短時間に低コストで素子作製が可能であり、今後さらに実用に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：In recent years, researches of laser diodes used quantum dot (QD) structure have been progressed, and their high performances have been focused. Also, the researches of optical devices have been studied with the aim of high performance and high functionality, so the optical devices that are not just a single component but various components integrated in a substrate are important. In this study, we developed the intermixing technique, which is one of the integration technology and has not been utilized for the 1550 nm-band QD structure, and we indicated that fabricated QD-LD integrated device has good performances. Also, we clarified one of the physical mechanisms of QD intermixing. Features of this intermixing method are easy fabrication and low cost, and it is expected the intermixing technology is contributed to the various photonic integration devices.

研究分野：光機能デバイス

キーワード：Intermixing 量子ドット 半導体レーザ 光集積素子

### 1. 研究開始当初の背景

通常、半導体レーザ (LD) の構造は多重量子井戸 (MQW) 構造であるが、近年、量子ドット (QD) 構造を用いた LD の研究開発が進展し、特に温度特性や変調特性に優れており、注目されている。

また、近年のインターネットの普及や動画など大容量データ通信などにより通信トラフィックが増大しており、また今後もさらに増すものと推測されている。現在、ネットワークノード (基地局など通信路が多数集まるポイント) 等においては光信号が電気信号に変換され、情報の識別や経路切換えなどの処理が行われ、再度、光信号に変換されて信号が伝送されるようなルーティング処理がなされている。このような電子デバイスを用いた電気的処理では信号処理速度の限界や、各装置の消費電力急増が懸念されている。(ネットワーク機器の消費電力に関して、2030年には現在の国内総発電量に匹敵するだろうという報告もある。) このような問題に対し、光/電気変換を行わず光信号を処理可能な光素子、通信方式が研究されている。この際、光素子は単一の要素のみでなく、複数の要素を単一基板に集積した素子により効率的に複雑な処理を可能にさせるような研究が多くなされている。

他方、LD などの能動素子と導波路・フィルタなどの受動素子を集積する場合、能動素子領域を結晶成長・加工した後、再度受動素子領域において結晶再成長・加工というプロセスを踏むことになり、技術的に難しくなり、QD の集積素子の報告例はあまり多くないのが現状である。

そこで多重量子井戸構造 (MQW) において報告されている Intermixing と言われる組成混晶化技術を QD 構造に応用することで集積素子を作製しようとするものである。この技術により従来取られている方法に対し、より簡易で短時間に、低コストに素子作製が可能である点が大きな特徴である。

### 2. 研究の目的

本研究では上記研究背景を踏まえ、Intermixing という技術を用いて、量子ドット半導体レーザ (QD-LD) の集積素子などを試作し、実用化に寄与するような研究を行うことを目的とする。そして、Intermixing の物理的なメカニズムも検討し、学術的にもまだ明らかになっていない点の研究も行う。また、Intermixing 実施後の結晶状態、原子拡散の理論的考察と実験による検証を行う。従来取られている方法に対し、より簡易で短時間に、低コストに集積素子作製が可能である点が大きな特徴である。この研究により、光通信関連の半導体製品のみならず、LD を使用するディスプレイや民生品などにも広く応用可能であると考えられる。

### 3. 研究の方法

分子線エピタキシャル (MBE) 法により InP(311)B 基板上に歪み補償技術を用いて n-InAlAs のクラッド層、30 層の InAlGaAs/InAs QD 積層構造、p-InAlAs クラッド層、p+-InGaAs キャップ層を成長した。この基板を用いて、まず QDI (QD Intermixing) プロセスとして、受動素子を作製する領域にのみ選択的なイオン注入を行った。その後熱処理を行うことで Intermixing を行った。次に、フォトリソグラフィ、エッチングなどのプロセスを経て能動 (QD) 領域・受動 (QDI) 領域側ともに所望の導波路パターンを作製した。

その後、電極形成などを行い、量子ドット集積素子を作製した。作製した素子を評価するにあたり、PL (フォトルミネッセンス) による発光波長の評価や、SEM, STEM による断面観察、EDS (Energy Dispersion Spectroscopy) や SIMS (二次イオン質量分析) による元素分析、X 線回折による結晶性評価、そして電流注入を行い、出力光の注入電流依存性や、出力光スペクトルなどを調べた。

### 4. 研究成果

作製した素子の顕微鏡写真と断面 SEM 画像を図 1 に示す。本技術により各部ともに非常に良好な形状で光集積素子が作製されていることがわかる。

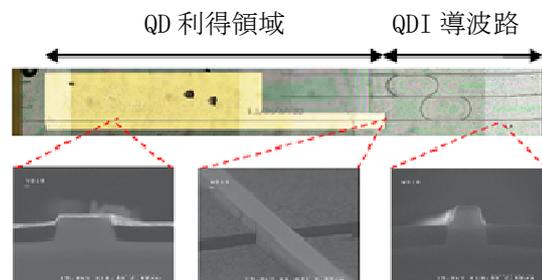


図 1 QDI 技術により作製した光集積素子の顕微鏡写真と各部の SEM 画像

そして、次に QD 領域と QDI による受動領域における PL スペクトルの結果を図 2 に示す。QDI を行った領域の発光波長は、それを行っていない元の QD 領域の発光波長に対し、約 190 nm ほど短波長にシフトしていることがわかる。すなわち、動作波長の 1.5 $\mu$ m 帯では QDI を行った領域において光吸収は生じず、十分に透明となっていることが示されている。図 3 に Intermixing の有無による QD の形状を STEM により観察した画像を示す。Intermixing により、QD の界面が不明瞭化していることがわかる。イオン注入により、表面近傍に生成された点欠陥 (原子空孔) が熱処理により拡散され、量子ドットの活性層近傍まで至ることにより、InAs 量子ドットと周囲埋め込み層である InGaAlAs の元素とお互いに混晶化したことがその原因であると考

えられ、そのため、このように界面が不明瞭化したと推測される。

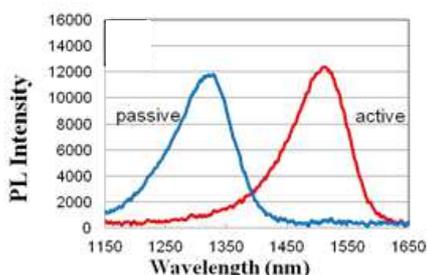


図2 QD領域とQDIによる受動領域におけるPLスペクトル

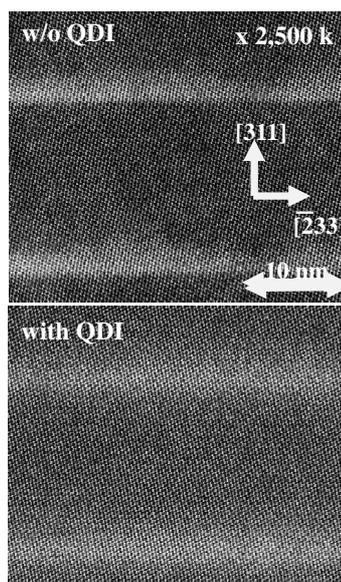


図3 Intermixing 前後による QD 近傍の STEM 画像

次に作製した光集積素子に電流を注入した際の光出力強度の注入電流依存性の特性を図4に示す。閾値が高くパルス駆動ではあるものの、レーザ発振動作が確認された。QDIによる受動導波路の伝搬損失は2 dB/mmであり、また、リング共振器の結合定数が設計どおりになっていないため、このように高い閾値になったと考えられる。

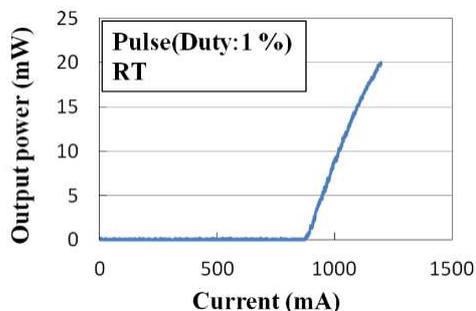


図4 光集積素子の光出力特性

これらの示した結果から、本研究で行ってきたQDI技術により、高い技術が必要とされ

る結晶再成長を用いることなく、より簡単に光集積素子を作製することが出来ることを実証した。またこの技術は1.55 $\mu\text{m}$ 帯における量子ドット構造を用いたものでは従来には行われていない技術であり、その意義は大きいと考えられる。エッチングなどデバイス作製技術が十分ではないことが要因で、QDIにより受動化した導波路の伝搬損失が不十分であると考えられるが、改善することにより、更なる低損失化と性能向上が見込めると考えられる。今後、この技術を用いることで、従来取られている方法に対し、より簡易で短時間に、低コストに素子作製が可能になり、高機能の光集積素子の開発が可能になると期待される。

#### 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 1 件)

- ① A. Matsumoto, Y. Takei, A. Matsushita, K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, K. Utaka, "Gain characteristics and femto-second optical pulse response of 1550 nm-band multi-stacked QD-SOA grown on InP(311)B substrate", *Optics Communications*, Vol. 344, pp. 51-54, (2015). 査読有り、DOI:10.1016

[学会発表] (計 14 件)

- ① A. Matsumoto, Y. Takei, K. Akahane, S. Matsui, T. Umezawa, N. Yamamoto, Y. Matsushima, and K. Utaka, "Ar Implantation-Induced Quantum Dot Intermixing Technique for 1550 nm-Band Highly Stacked QD Photonic Integrated Circuit", *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics 2016, SM4R.5*, 2016/6/6. アメリカ、サンノゼ。
- ② 武井 勇樹、松井 信衛、松本 敦、赤羽 浩一、松島 裕一、石川 浩、宇高 勝之、「イオン注入と熱処理による多重積層量子ドット組成混晶の集積素子への応用の検討」、第63回応用物理学会春季学術講演会、21p-P2-4, 2016/3/21. 東京都目黒区、東京工業大学。
- ③ 松井 信衛、武井 勇樹、松本 敦、赤羽 浩一、松島 裕一、石川 浩、宇高 勝之、「イオン注入を用いた多重積層量子ドット構造の混晶化の検討」、第63回応用物理学会春季学術講演会、21p-P2-3, 2016/3/21. 東京都目黒区、東京工業大学。
- ④ 松本 敦、赤羽 浩一、坂本 高秀、梅沢 俊匡、菅野 敦史、山本 直克、「光周波数コムを用いた歪補償多重積層 InAsQD-SOA のパルス応答特性評価」、第63回応用物理学会春季学術講演会、

- 20p-S321-6, 2016/3/20. 東京都目黒区、東京工業大学。
- ⑤ 【招待講演】A. Matsumoto, Y. Takei, K. Akahane, T. Umezawa, N. Yamamoto, Y. Matsushima, and K. Utaka, “Femto-Second Optical Pulse Response of 1550nm-band Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier Grown on InP(311)B Substrate”, Proceeding of EMN Ultrafast Meeting, B09, 2015/11/17. アメリカ、ラスベガス。
- ⑥ Y. Takei, A. Matsumoto, K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, and K. Utaka, “QD Intermixed Waveguide Devices for Integrated All-Optical Logic Gate Devices”, Proceeding of the 7th International Symposium on Ultrafast Photonic Technologies (ISUPT2015) and International Symposium on extremely advanced transmission technology (EXAT 2015), P-46, 2015/7/13. 京都府、京都市、Hotel CO-OP INN KYOTO.
- ⑦ A. Matsumoto, Y. Takei, T. Ozaki, K. Akahane, N. Yamamoto, T. Umezawa, T. Kawanishi, Y. Matsushima, and K. Utaka, “Ar Implantation Induced QD Intermixing for 1550nm-Band Highly-Stacked QD Photonic Integrated Devices”, Proceeding of the 27th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2015), pp.473-474, 2015/7/2. アメリカ、サンタバーバラ。
- ⑧ 松本 敦、武井 勇樹、赤羽 浩一、山本 直克、川西 哲也、石川 浩、松島 裕一、宇高 勝之、「Ar イオン注入を用いた 1550nm 帯多重積層 QD 構造の組成混晶化と光集積素子への応用」、電子情報通信学会 OPE 研究会、信学技報 Vol. 115, No. 107, pp. 9-13, 2015/6/19. 東京都港区、機械振興会館。
- ⑨ 武井 勇樹、尾崎 太齋、松本 敦、赤羽 浩一、松島 裕一、石川 浩、宇高 勝之、「全光論理ゲート素子に向けた多重積層量子ドットのイオン注入と熱処理による組成拡散の検討」、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、13a-P7-6, 2015/3/13. 神奈川県平塚市、東海大学。
- ⑩ A. Matsumoto, Y. Takei, K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, and K. Utaka, “Femto-Second Optical Pulse Response of 1550nm-Band QD-SOA for Ultra-Fast All-Optical Logic Gate Devices”, Proceeding of 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence, P-46, 2014/11/18. 東京都目黒区、東京大学。
- ⑪ Y. Takei, T. Ozaki, A. Matsumoto, K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, and K. Utaka, “Highly-Stacked Quantum Dot Intermixed Waveguide for All-Optical Logic Gate Devices”, Proceeding of 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence, P-45, 2014/11/18. 東京都目黒区、東京大学。
- ⑫ 【招待講演】松本 敦、宇高 勝之、「1550 nm 帯量子ドット半導体光増幅器の高速応答特性」、第 6 回超高速フォトニクスシンポジウム、pp.23-27, 2014/11/6. 宮城県仙台市、東北大学。
- ⑬ 松本 敦、武井 勇樹、松下 明日香、赤羽 浩一、松島 裕一、宇高 勝之、「超高速全光論理ゲート素子に向けた InP(311)B 基板に成長させた 1550 nm 帯 QD-SOA の利得特性とピエゾ効果の検討」、電子情報通信学会光通信システム研究会、信学技報、pp. 87-91, 2014/10/30. 長崎県長崎市、長崎歴史文化博物館。
- ⑭ A. Matsumoto, Y. Takei, A. Matsushita, K. Akahane, Y. Matsushima, and K. Utaka, “Experimental and Calculated Gain Characteristics of 1550nm-Band QD-SOA Grown on InP(311)B Substrate for Ultra-Fast All-Optical Logic Gate Devices”, Proceeding of the OptoElectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology (OECC/ACOFT 2014), WE9D, 2014/7/9. オーストラリア、メルボルン。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 敦 (Matsumoto Atsushi)

国立研究開発法人 情報通信研究機構・

光ネットワーク研究所・

光通信基盤研究室・研究員

研究者番号：30580188