

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15056

研究課題名（和文）新規構造半導体レーザの高温動作メカニズムの解明と光電子融合集積回路への応用

研究課題名（英文）Elucidation of High Temperature Operation Mechanism of Newly Structured Semiconductor Laser and Application for Opto-Electronic Integrated Circuits

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・ネットワーク研究所フォトニックICT研究センター・主任研究員

研究者番号：30580188

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ネットワークにおける通信速度・容量の増大と低消費電力、小型・低コスト化の要求を満たす光電子融合集積回路の実現を目指し、そのために必要不可欠な高温環境下においても良好な特性を有する光集積回路の開発を目標としており、実現できれば幅広い応用が期待できる。本研究では量子ドット構造の光素子に着目し、これまでに開発してきたInP基板上に量子ドット構造を有する複数の光素子を集積可能な独自技術であるIID-QDI技術を用いた半導体レーザを作製し、この半導体レーザが非常に良好な温度特性を有することを実証し、また温度特性向上の物理的要因の一端を解明することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、近い将来において問題になるネットワークにおける通信速度・容量の増大と低消費電力、小型・低コスト化に対応する光電子融合集積回路の実現と、さらにそのために必要不可欠な高温環境下においても良好な特性を有する光集積回路に向けて非常に有用な知見が得ることができた。これらの光電子融合集積回路や光集積回路が実現に至ることにより、ネットワークの諸問題に対応できるのみならず、幅広い応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aimed to realize opto-electronic integrated circuits that satisfies the demands for increased communication speeds and capacities in networks, lower power consumption, smaller size, and lower cost device. We also aimed to develop photonic integrated circuits with good characteristics even in high-temperature environments, which were indispensable for such integrated circuits. If realized, it is expected it can be used to a wide range of applications. We focused on optical devices with quantum dot structures and fabricated a semiconductor laser using IID-QDI technology, which was a distinctive technology, and by which it could be integrated with many kinds of photonic devices with quantum dot structures on an InP substrate. We verified that this semiconductor laser had excellent temperature characteristics and clarified some of the physical factors behind the improvement in temperature characteristics.

研究分野：半導体光デバイス

キーワード：半導体光デバイス 光集積回路 通信

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレット端末が急速に普及し、さらにモバイル通信の高速化や様々なサービスが広がることにより、通信容量が著しく増大している。ネットワークシステムにおいては、ビッグデータを用いたネットワーク・クラウドサービスが次第に普及しつつあり、一方、産業においては、産業機械同士で情報を共有する M2M (Machine to Machine) 技術、そして、それら産業機器・装置やセンサなど全ての機器をインターネットを介して、効率的に運用するような IoT (Internet of Things) やさらに IoT 機器をエッジルータでリアルタイムかつ瞬時に情報処理を行うエッジコンピューティング等が非常に重要な技術として注目されている。このような技術の確立には、図 1 の本研究の背景と将来像を示した概念図のように、アプリケーションやアーキテクチャなどの上位レイヤーの技術と同時に特に、アクセス系ネットワークやデータセンタネットワークにおいてさらなる高速大容量化が不可欠となる。

Cisco から報告されている Cisco Global Cloud Index によると、研究開始当初時点における 2020 年の世界のデータセンタトラフィック予測は 2015 年に対し、約 3 倍、年率約 27 % の増加量で、約 1000 EB/Month と見込まれており、その膨大なトラフィックの 75 % はデータセンタ内の通信トラフィックである。一方、Cisco Visual Networking Index によると、同様にアクセス系の世界の通信トラフィックは 2015 年に対し、2020 年になると約 2.5 倍の約 200 EB/month と予測されていた。特にモバイルの通信トラフィックは年率 50 % を超える増加率が見込まれていた。今日においてもそれは同様であり、今後、さらなる増大が予想され、このような観点から、データセンタ内、データセンタ間近距離通信、アクセス系ネットワークの光インタコネクタ化、光・無線の通信速度の高速化・大容量化の研究が世界的に行われている。また、総務省の情報通信白書によると、IoT、AI、ビッグデータなどの ICT 技術を上手く活用し、生産性向上や新たな価値の創出により、実質 GDP を 2020 年には約 33 兆円ほど押し上げる効果が見込まれていた (GDP 約 6%)。これらはさらなる通信トラフィックのさらなる増加に繋がると考えられる。このような近年の状況を念頭に入ると、低消費電力、トラフィックの低遅延性や、デバイス・通信機器のサイズ・コストなどに関しても非常に重要な要素であり、これらの要求を満たす ICT ハードウェアを用いた高速大容量通信技術が必要不可欠と考えられる。

一方、現在世界で注目されている研究として、Si フォトニクス (SiPh: Si Photonics) を用いた超微細光デバイス[1], [2]と、半導体レーザ(LD: Laser Diode)などの発光素子を異種材料集積 (ヘテロジニアス集積) した光集積回路 (PIC: Photonic Integrated Circuits) のデバイス技術[3], [4]がある。これらの研究は LSI の微細配線に用いられる CMOS 製造ラインと相互互換性が高く、極めて効率よく低コスト化が可能であり、LSI との集積も容易になると見込まれることから、超小型・低消費電力化、フォトニクスとエレクトロニクスの融合が可能となるという点で世界的に非常に重要な研究テーマと認識されている。世界最先端の国際会議である OFC や ECOC においても、SiPh 関連技術やヘテロジニアス集積技術、またそれら技術により作製されたデバイスを使った通信システムで高速・大容量通信の報告が非常に多くなされていた。すなわち、LD 等の発光素子と SiPh を元にしたヘテロジニアス集積 PIC を駆動回路・信号処理 LSI 等と集積した超小型な光電子融合集積回路が非常に重要なキーデバイスになるが、LSI の高性能化、動作速度の向上に伴って LSI からは非常に大きな熱が生じ、周辺温度は 80 ~ 100 程度まで上昇する。これが光電子融合集積回路における非常に重大な課題である (図 1 参照)。光デバイスは一般的に温度依存性が大きく、高温になると発光効率の減少や、発光波長の変化が顕著に現れるからである。超高速動作 (100 Gb/s~) 可能な光電子融合回路を実現させるためには、PIC と LSI を近接させることが必須である。現在、光デバイスでは一般的に TEC (Thermo-Electric Cooler) 素子による冷却機構の実装により温度制御しているものの、大きな消費電力が必要とされる。

化合物半導体の光デバイスでは、量子ドット (QD: Quantum dot) 構造が熱に対して非常に優れた特性を示すものとして期待されている。QD-LD では TEC 無しでも駆動電流が温度に対してほとんど変化しないなどの非常に良好な特性が報告されているものの、発振波長は温度とともに変化し

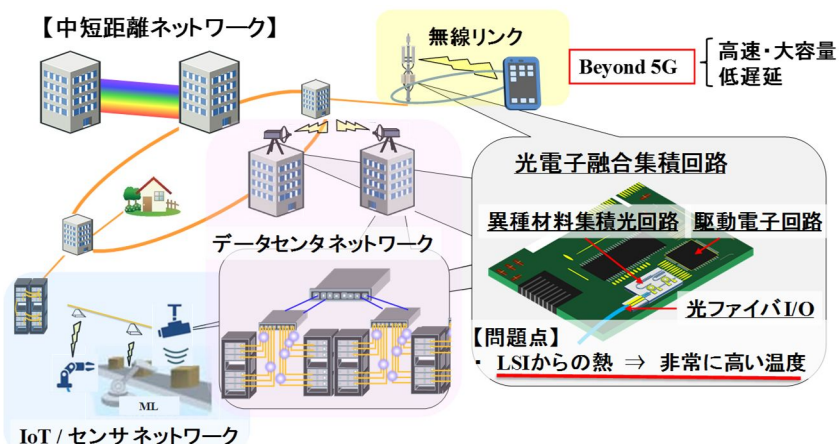


図 1 本研究の背景と将来像

てしまい、単なる QD 構造を LD に導入するだけでは不十分である。すなわち、どのようにすれば TEC フリーで駆動電流だけでなく、発振波長の変動も抑制した光電子融合回路が実現できるのか、という点が重要な課題であり、工学的な観点のみならず、QD の物理的な仕組みを明らかにした上でさらなる工夫を行うことで上述したような課題を解決しなくてはならない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、アクセス系ネットワーク、データセンタネットワークにおける通信速度・容量の増大と低消費電力、小型・低コスト化の要求を満たす光電子融合集積回路の実現を目指し、それに必要不可欠な高温環境下においても特性劣化を極力抑えられる、あるいは温度無依存な PIC の開発を目標とする。このような小型・高速・低消費電力で環境性能に優れた光電子融合集積回路を実現できれば、データセンタネットワーク、アクセスネットワークなどへの応用はもとより、小型な IoT デバイス等への展開ができ、幅広い影響が期待できる。特に QD 構造の光デバイスがその光電子融合集積回路を実現する重要なポイントであると考えている。これまでに QD を成長したウェハにイオン注入と急速加熱処理 (RTA: Rapid Thermal Annealing) を行うことにより、デバイス内の任意の領域のバンドギャップを制御できるという独自の技術 (IID-QDI: Ion-implantation Induced Disorder Quantum Dot Intermixing) [5]を用いて、InP 基板上に複数の QD 光素子をモノリシック集積 (同一材料のみによる集積) したユニークな素子を実証してきた。上述したように光電子融合集積回路の実現を目指すべく、この IID-QDI 技術を用いた QD-LD の温度特性向上の物理的な要因の一端を解明することを初期目標としつつ、その物理的メカニズムを踏まえた上で QD 構造の結晶成長技術に応用するなどして、上述したような光電子融合集積回路の実現、そして高速大容量なアクセス系ネットワークやデータセンタネットワークの実現を目指す。

3. 研究の方法

アクセス系ネットワーク、データセンタネットワークにおける通信速度・容量の増大と低消費電力、小型・低コスト化の要求を満たすような小型・高速、低コスト高環境耐性な光電子融合集積回路を実現することを目標として、IID-QDI 技術を用いた QD-LD の温度特性向上の物理的要因を解明するために、通常の QD を成長したウェハに IID-QDI プロセスを実施した LD サンプルをいくつかの条件で用意し、それらのレーザ特性を評価するとともに、TEM (透過電子顕微鏡) 観察や EDS (エネルギー分散型 X 線分光法) 二次元マッピングの分析を実施した。

4. 研究成果

InP(311)B 基板上に InAs QD / InGaAlAs ペアを 14 層積層した活性層と、p-InAlAs, n-InAlAs クラッド層、p⁺-InGaAs コンタクト層から成る結晶成長したウェハを作製し、イオン注入 (B または Ar) した後、620 °C の Rapid thermal annealing により組成混晶化させた。イオン注入の加速エネルギーは 120 keV、ドーズ量は $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ とした。このウェハを用いて幅 3 μm のリッジ構造の QD-LD を作製し、その断面を TEM で観察し、EDS により元素分布を評価した。図 2(a), (b) はそれぞれ未混晶化 QD と B イオンによる混晶化 QD の断面画像である。図 2 に示したように、未混晶化の状態では QD の界面は明瞭に観察されるが、B イオンにより混晶化させた QD の界面は不明瞭になっていることがわかる。この図 2(a), (b) のラインの部分における EDS による元素分布を図 3 (a), (b) にそれぞれ示す。未混晶 QD の In プロファイルの半値幅は約 3 nm であり、一方、混晶化 QD では最大で約 6 nm ほどになっており、組成混晶化により In が広く拡散していることがわかる。また Ga の組成比が未混晶の時よりも混晶化された時は 5% ほど増加し、QD 周辺から QD 内に Ga 元素が入り込んでいることも示唆される。このことから、B イオンを使った IID-QDI 技術はその組成混晶化によりバンドギャップを大きく変化させることができ、QDI プロセスの条件の変化によりバンドギャップの制御が可能のため、QD のモノリシック PIC への応用においても非常に有望であると期待される。

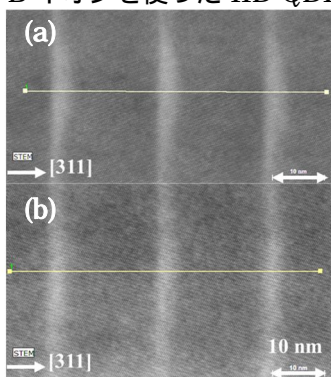


図 2 (a) 未混晶 QD と (b) 組成混晶化した QD の TEM 画像。

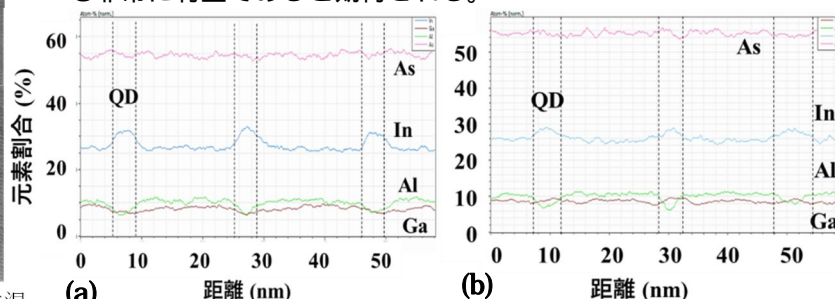


図 3 図 2 (a), (b) のラインの部分における EDS による元素分布。

また作製したリッジ構造の QD-LD に関して、その光学特性を評価した。図 4 に作製した 3 種類 (B-QDI, Ar-QDI, w/o QDI) の QD-LD においてパルス電流で駆動した時の閾値電流密度の温度依存性を示す。通常の QD-LD や Ar-QDI-LD では 30 までの比較的低い温度において特性温度 T_0 がそれぞれ 864 K, 906 K と非常に高い値であったが、B-QDI-LD は 50 までのより広い温度範囲において特性温度 T_0 はさらに高い 972 K であった。以前の我々の報告では QDI を実施した LD は特に高温領域において特性温度 T_0 が高い結果であったが、今回の素子はそれらと異なり低い温度で T_0 が高い結果となった。図 5 は発振時のスペクトルピーク波長の温度依存性である。図 5 に示したように B-QDI では約 150 nm, Ar-QDI では約 100 nm のピーク波長のブルーシフトが得られた。温度上昇によるピーク波長のシフト量は QDI を実施した方が抑制でき、QDI 未実施の素子では $d\lambda/dT = 0.54 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ であったのに対し、Ar-QDI と B-QDI ではそれぞれ、 $d\lambda/dT = 0.46 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $0.41 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ であった。以前の結果と傾向が少し異なる要因は明らかになっていないが、QD の積層数やイオン注入・アニール等のプロセスの要因等の可能性があると思われる。B イオンを使った IID-QDI 技術はバンドギャップを大きく変化させ、制御できるだけでなく、LD として応用した場合も非常に良好な温度特性を有し、PIC への応用においても非常に有望であると期待される。

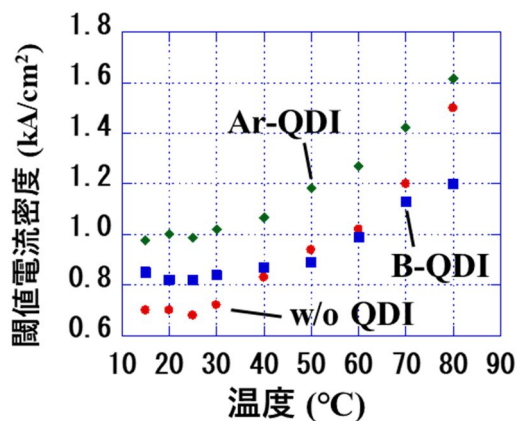


図 4 未混晶 QD, Ar-QDI, B-QDI による LD の 閾値電流密度の温度依存性。

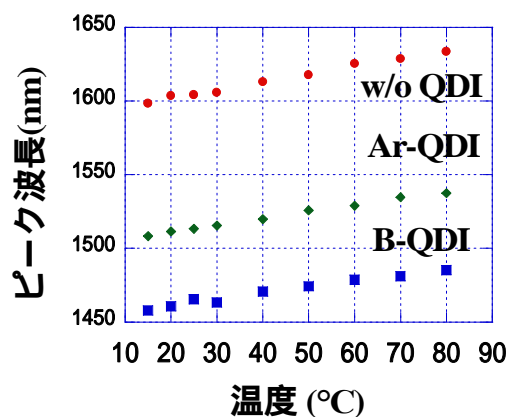


図 5 未混晶 QD, Ar-QDI, B-QDI による各 LD の発振ピーク波長の温度依存性。

参考文献

- [1] K. Suzuki, R. Konoike, N. Yokoyama, M. Seki, M. Ohtsuka, S. Saitoh, S. Suda, H. Matsuura, K. Yamada, S. Namiki, H. Kawashima, and K. Ikeda, "Nonduplicate Polarization-Diversity 32×32 Silicon Photonics Switch Based on a SiN/Si Double-Layer Platform", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 38, No. 2, pp. 226-232 (2020).
- [2] A. Malik, J. Guo, M. A. Tran, G. Kurczveil, D. Liang, J. E. Bowers, "Widely tunable heterogeneously integrated quantum-dot O-band lasers on silicon", *Photon. Research*, Vol. 8, No. 10, pp. 1551-1557 (2020).
- [3] G. D. Valicourt, C. M. Chang, J. Lee, M. S. Eggleston, C. Zhu, J. H. Sinsky, K. Kim, P. Dong, A. Maho, R. Brenot, Y. K. Chen, "Integrated Hybrid Wavelength-Tunable III-V/Silicon Transmitter Based on a Ring-Assisted Mach-Zehnder Interferometer Modulator", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 36, No. 2, pp. 204-209 (2018).
- [4] M. L. Davenport, S. Skendžić, N. Volet, J. C. Hulme, M. J. R. Heck, and J. E. Bowers, "Heterogeneous Silicon/III-V Semiconductor Optical Amplifiers", *IEEE J. SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, VOL. 22, NO. 6, 3100111, (2016).
- [5] A. Matsumoto, et al., "Ar Implantation-Induced Quantum Dot Intermixing Technique for 1550 nm-Band Highly Stacked QD Photonic Integrated Circuit", *Proceeding of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2016), SM4R.5*, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------------------|
| 1. 著者名 Matsumoto Atsushi, Akahane Kouichi, Umezawa Toshimasa, Nakajima Shinya, Yamamoto Naokatsu, Kanno Atsushi | 4. 巻 219 |
| 2. 論文標題 Laser Characteristic and Strain Distribution Dependence on Embedding Layer Thickness of Quantum Dots Laser Diodes Grown on InP(311)B Substrate | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 physica status solidi (a) | 6. 最初と最後の頁 2100466 ~ 2100466 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/pssa.202100466 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 松本敦, 益田航, 赤羽浩一, 梅沢俊匡, 中島慎也, 山本直克, 北智洋 |
| 2. 発表標題 1.55 μm QD-RSOAとシリコンリングフィルタによる異種材料集積波長可変レーザー |
| 3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 R. Kaneko, S. Isawa, R. Morita, H. Okada, A. Matsumoto, K. Akahane, Y. Matsushima, H. Ishikawa, and K. Utaka, |
| 2. 発表標題 CW operation and performances of 1550nm-band InAs quantum-dot monolithically-integrated lasers with quantum-dot intermixed regions |
| 3. 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference(OECC2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Matsumoto, Y. Akashi, S. Isawa, T. Umezawa, Y. Matsushima, and K. Utaka |
| 2. 発表標題 Theoretical and experimental analysis on Ar Implantation-Induced Quantum Dot Intermixing for 1550 nm-Band Photonic Integrated Circuit |
| 3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 松本敦, 赤羽浩一, 伊澤昌平, 金子瑠那, 松島裕一, 宇高勝之 |
| 2. 発表標題 組成混晶化量子ドットLDの注入イオンの違いによる温度特性の比較 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Matsumoto, K. Akahane, T. Umezawa, S. Nakajima, N. Yamamoto, and, A. Kanno |
| 2. 発表標題 Improvement of Self-Heating in Quantum Dot Reflective Semiconductor Optical Amplifier for SS-OCT Application |
| 3. 学会等名 The International Electrical Engineering Congress (IEECON2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Matsumoto, K. Akahane, T. Umezawa, S. Nakajima, and N. Yamamoto |
| 2. 発表標題 Optimization of Thickness of InGaAlAs Embedded Layers in 1.5-um-Band QD-LD |
| 3. 学会等名 Compound Semiconductor Week (CSW2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Matsumoto, W. Masuda, K. Akahane, T. Umezawa, N. Yamamoto, and T. Kita |
| 2. 発表標題 1.55-um Si-Photonics-Based Heterogeneous Tunable Laser Integrated with Highly Stacked QD-RSOA |
| 3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro Optics (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 松本 敦, 金子 瑠那, 赤羽 浩一, 勝原 龍海, 矢吹 諒太, 山本 直克, 松島 裕一, 菅野 敦史, 宇高 勝之 |
| 2. 発表標題 組成混晶量子ドットレーザの断面TEM/EDS分析 |
| 3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 松本敦, 赤羽 浩一, 金子瑠那, 勝原龍海, 矢吹 諒太, 松島裕一, 宇高勝之 |
| 2. 発表標題 組成混晶リッジ型量子ドットレーザの温度特性 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |