

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420312

研究課題名(和文)次世代光通信方式のためのシリコンフォトニクス波長可変レーザーの研究

研究課題名(英文)Silicon photonic wavelength tunable laser diode for next generation optical communication systems

研究代表者

北 智洋(Kita, Tomohiro)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40466537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンフォトニクスを用いて作製した波長可変フィルタチップと化合物半導体光増幅器とを効果的に組み合わせることで、超小型シリコンフォトニクス波長可変レーザーを開発した。1. 光通信におけるC帯及びL帯をカバーする99 nmの波長可変範囲を達成。2. 外部共振器を長尺化することで約15 kHzの狭線幅発振が可能な波長可変レーザーを開発。3. 高出力時のレーザー発振の不安定化の原因がシリコンの非線形光学効果に起因していることを見出し、40 mW以上の高出力が可能なフィルタ構造を開発。4. 量子ドットSOAを用いた1.2 μm帯波長可変レーザーを開発し、44 nmの波長可変動作に成功した。

研究成果の概要(英文)：Ultra compact wavelength tunable laser diode with a semiconductor optical amplifier and a silicon photonics wavelength tunable filter was developed. A 99 nm wide wavelength tunable range, less than 15 kHz narrow spectral linewidth and more than 40 mW high output power were respectively achieved. The 1.2 μm wavelength tunable laser with quantum dot optical amplifier was also developed.

研究分野：半導体工学

キーワード：波長可変レーザー シリコンフォトニクス 狭線幅レーザー リング共振器 量子ドット 非線形光学効果

### 1. 研究開始当初の背景

光波の振幅と位相の双方に情報を載せることにより、伝送容量や周波数利用効率、伝送距離を飛躍的に拡大できる次世代の光通信方式としてデジタル・コヒーレント光通信方式の普及が始まっている。デジタル・コヒーレント光通信方式では、光波同士を干渉させて光の位相差を検出するコヒーレントレーザや、光の位相雑音が少なく高安定なレーザ光源が求められる。このような従来の光デバイスとは異なる機能が必要なデジタル・コヒーレント光通信用デバイスを省スペース、低コスト、低消費電力で実現するためにシリコンフォトニクスを用いるという試みが国内外において盛んに行われている。コヒーレント光通信用の低位相雑音な光源は、これまで主に大型で消費電力の大きなファイバーレーザーなどが用いられており、光源の小型化、低消費電力化が急務となっている。本申請者のグループでは、シリコン細線光導波路リング共振器フィルターを用いた波長可変レーザーにおいて 100 kHz 以下の狭線幅動作と L 帯をカバーする波長可変動作を世界に先駆けて実証しており、更なる狭線幅化、広波長帯域化が求められている。

### 2. 研究の目的

本提案では、これまでの研究においてデバイスの小型化、狭線幅動作に関して有利性を示してきたシリコン細線波長可変レーザーの可能性を広げるために、更なる狭線幅化、広波長帯域化を目的として研究を行う。具体的な研究項目と目的を以下に示す。

(1) 共振器の長尺化により FP 共振器の Q 値を高め、シリコン細線導波路に位相調整機能を付加する事によって 30 kHz 以下の安定した狭線幅動作が可能な波長可変レーザーを実現する。

(2) 光通信における C 帯 (1530-1565 nm) 及び L 帯 (1565-1625 nm) をカバーする 100 nm 以上の広帯域波長可変動作、十分な SMSR を確保するためにマッハ・ツェンダ干渉計を付加した構造を設計、試作する。

(3) 1260 ~ 1320 nm 程度の波長領域で光学利得を持ち、非常に小さな線幅増大係数を持つ事が期待される InAs 量子ドット SOA とシリコン細線リング共振器フィルターを組み合わせることで 1.2  $\mu\text{m}$  帯において使用できる超狭線幅波長可変レーザー実現のための基礎検討を行う。

### 3. 研究の方法

本研究において開発したシリコンフォトニクス波長可変レーザーの基本構造を図 1 に示す。本レーザーは、シリコンフォトニクスを用いて作製した超小型の波長可変フィルタチップと光の増幅機能を持つ化合物半導体 SOA チップとを端面結合させた構造を持つ。SOA チップからの光は、適切に設計されたスポットサイズコンバータを介してシリコンフォ

トニクスチップ内に低損失・低反射に導波される。シリコンフォトニクスチップには、シリコン細線光導波路によって構成された二つのリング共振器が配置されており、それぞれのリング共振器によってドロップされた光のみが SOA へと反射される。この時二つのリング共振器の FSR を適切に設計する事で、両者のバーニア効果によって単一の波長のみが選択される。広い波長範囲で安定した波長可変動作を行うためにはリング共振器や補助的に装荷したマッハツェンダ干渉計を用いる事で、大きなモード利得差を持つ即ち波長選択性に優れた波長可変フィルタが必要である。また発振線幅は、SOA と外部共振器である波長可変フィルタとを含めたレーザ共振器全体の縦モードの Q 値を高める事が重要である。本研究では、リング共振器及びマッハツェンダ干渉計を適切に設計、配置することで目的とする狭線幅、広波長帯域可変レーザを作製した。また活性層内に InAs 自己形成量子ドットを内包した SOA を光増幅器として用いる事で 1.2  $\mu\text{m}$  で動作するシリコンフォトニクス波長可変レーザーの開発を試みた。

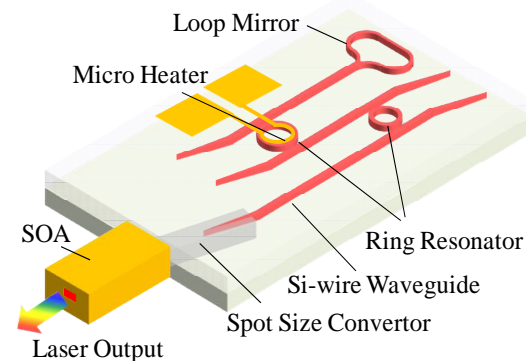


図 1 シリコンフォトニクス波長可変レーザーの構造

### 4. 研究成果

以下に本研究によって開発した様々なシリコンフォトニクス波長可変レーザーの特性について述べる。

#### (1) 広波長帯域可変レーザ

波長可変フィルタのモード利得差と波長可変が可能な波長範囲の間にはトレードオフの関係があり、広波長帯域に対応する波長可変フィルタでは、十分なモード利得差が得られず安定した波長可変動作が難しいという問題があった。これを解決するためにリング共振器の FSR の約 2 倍の FSR を持つマッハツェンダ干渉計をフィルタ内に装荷する事で、モード利得差を増加させるフィルタ構造を設計した。図 2 に広波長帯域可変レーザーの発振波長を変化させた時のスペクトルの重ね合わせを示す。光通信における C 帯及び L 帯をカバーする 99 nm の波長可変動作に成功した。(関連する成果\_雑誌論文、)

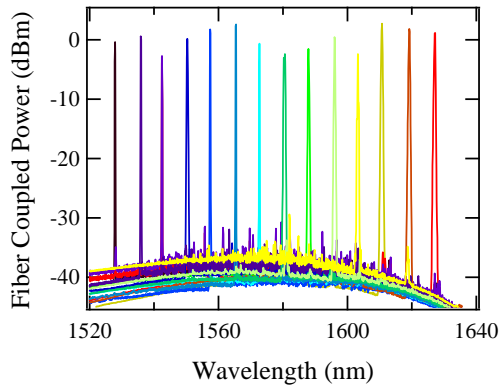


図2 C帯及びL帯をカバーする広波長帯域可変レーザの発振スペクトル

(2) 狭線幅波長可変レーザ

狭線幅なレーザ発振を可能にする高Q値のFP共振器を実現するためには、シリコンフォトニクスチップとSOAとの接続損失やシリコン細線光導波路の導波損失に起因した共振器の内部損失を低減する手法と外部共振器を長尺化する手法の二つがある。本研究では、主に後者の共振器を長尺化する手法を用いて狭線幅レーザを開発した。図3に外部共振器を長尺化した時の発振線幅の変化の計算結果と実験結果を示す。長尺化する事で狭線幅化が実現されており、出力9 mWでは70kHz程度まで狭線幅化している事が確認できる。

しかしながら外部共振器を長尺化すると縦モード間のモード利得差が低下し縦多モード発振が生じやすくなるといった問題が発生するために、これ以上の長尺化は難しい。この問題を解決するために非常に長い経路長差を有する高非対称マツハツェンダ干渉計を装荷する事で、縦モードの安定化を図った。本狭線幅レーザの発振線幅の出力光強度依存性を図4に示す。高非対称マツハツェンダ干渉計装荷構造を用いる事で、15 kHz以下の狭線幅レーザ発振に成功した。

(関連する成果\_雑誌論文、 )

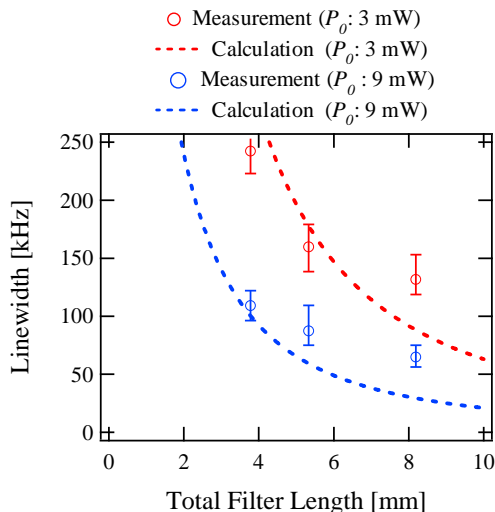


図3 発振線幅の共振器長依存性

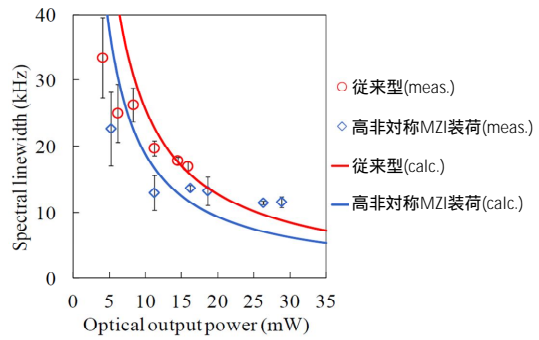


図4 発振線幅の出力光強度依存性

(3) 高出力波長可変レーザ

シリコン細線光導波路を外部共振器に用いる本レーザにおいては、高出力時にレーザ発振が不安定化する事がこれまでの研究によって確認されていた。シリコン細線光導波路において生じる大きな非線形光学効果がレーザ特性に与える影響を理論と実験の両面から検証した。シリコンの二光子吸収によって生じる温度とキャリア密度の変化からシリコンの屈折率の時間変化を詳細に検討し、外部共振器波長可変レーザの発振波長と出力光強度の時間変化を試算した結果を図5に示す。リング共振器内部の光強度が40 mW程度の閾値に達するとシリコンの非線形光学効果に起因したレーザ発振波長及び強度の振動現象が生じる事が明らかになった。シリコンの非線形光学効果の影響を低減するようにリング共振器の配置を工夫する事で、最大42.2 mWの出力光強度を実現した。

(関連する成果\_雑誌論文、 )

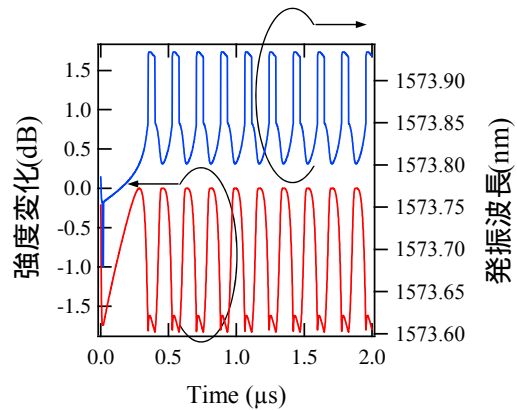


図5 光強度と発振波長の時間変化の計算結果

(4) 量子ドット波長可変レーザ

自己形成 InAs 量子ドットを活性層に内包するSOAは、広い増幅波長帯域と温度耐性を持つことから短距離の光通信用光源としての応用が期待されている。本研究では、シリコンフォトニクスチップと量子ドットSOAとを効率的に結合する事で1.2 μm帯波長可変レーザの開発に成功した。試作した量子ドット/シリコンフォトニクス-ヘテロジニアスレーザを図6に示す。さらに量子ドットSOA用に外部共振器の構造を最適化する事で、図

7 に示すように 44.0 nm(周波数に換算すると 8.8 THz)の波長可変動作に成功し、量子ドット SOA の持つ広い増幅波長帯域を有効に活用できる事が示された。

(関連する成果\_雑誌論文、 )

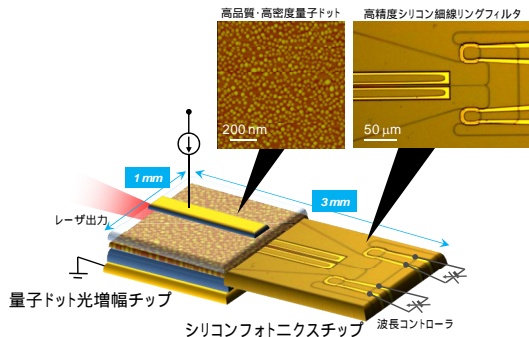


図 6 量子ドット/シリコンフォトニクス-ヘテロジニアス波長可変レーザー

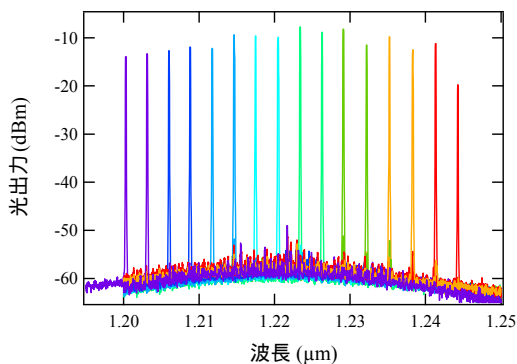


図 7 1.2 μm 帯波長可変レーザーの発振スペクトル

## 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 8 件)

Tomohiro Kita, Rui Tang, and Hirohito Yamada, Narrow Spectral Linewidth Silicon Photonic Wavelength Tunable Laser Diode for Digital Coherent Communication System, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 査読あり、22 巻 2016 年、印刷中

Tomohiro Kita, Naokatsu Yamamoto, Atsushi Matsumoto, Tetsuya Kawanishi, and Hirohito Yamada, Heterogeneous quantum dot/silicon photonics-based wavelength-tunable laser diode with a 44 nm wavelength-tuning range, Japanese Journal of Applied Physics, 査読あり、55 巻、2016 年、04EH11-1-4

<http://doi.org/10.7567/JJAP.55.04EH11>

Tomohiro Kita, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, and Hirohito Yamada, Ultra-compact Wavelength-Tunable Quantum-Dot Laser with Silicon-Photonics Double Ring Filter, Applied Physics Express, 査読あり、8 巻、2015 年、062701-1-4

<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.8.062701>

Rui Tang, Tomohiro Kita, and Hirohito Yamada, Narrow-Spectral-Linewidth Silicon Photonic Wavelength-Tunable Laser with Highly Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer, Optics Letters, 査読あり、40 巻、2015 年、1504-1507

<http://dx.doi.org/10.1364/OL.40.001504>

Tomohiro Kita, Rui Tang, and Hirohito Yamada, Compact Silicon Photonic Wavelength-tunable Laser Diode with Ultra-wide Wavelength Tuning Range, Applied Physics Letters, 査読あり、106 巻、2015 年、111104-1-4

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4915306>

Munetoshi Soma, Tomohiro Kita, Yuichiro Tanushi, Munehiro Toyama, Miyoshi Seki, Nobuyuki Yokoyama, Minoru Ohtsuka, and Hirohito Yamada, Optimum waveguide-core size for reducing device property distribution of Si-waive waveguide devices, Japanese Journal of Applied Physics, 査読あり、54 巻、2015 年、04DG03-1-5

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.04DG03>

Tomohiro Kita, Keita Nemoto, and Hirohito Yamada, Silicon Photonic Wavelength-Tunable Laser Diode with Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 査読あり、20 巻、2014 年、344-349

<http://dx.doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2295712>

Tomohiro Kita, Keita Nemoto, and Hirohito Yamada, Long external cavity Si photonic wavelength tunable laser diode, Japanese Journal of Applied Physics, 査読あり、53 巻、2014 年、04EG04-1-4

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.04EG04>

[学会発表](計 14 件)

北 智洋、松本 敦、山本 直克、川西 哲也、山田 博仁、シリコンフォトニクス-量子ドット波長可変レーザー、電子情報通信学会 LQE 研究会、2016 年 1 月 28 日、神戸市産業振興センター(神戸)

北 智洋、シリコン細線リング共振器を用いた量子ドット波長可変レーザーの開発、電子情報通信学会シリコンフォトニクス研究会、2015 年 12 月 10 日、石川県政記念しいのき迎賓館(金沢)

Tomohiro Kita, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, and Hirohito Yamada, Heterogeneous Quantum Dots/Silicon Photonics Wavelength Tunable Laser Diode, Solid State Device and Materials 2015, 2015 年 9 月 30 日、札幌コンベンションセンター

(日本)

Tomohiro Kita, and Hirohito Yamada, Heterogeneous Silicon Photonics Wavelength Tunable Laser Diodes、5th RLE-RIEC meeting on Research Collaboration in Photonics、2015年7月1日、ケンブリッジ(米国)

Tomohiro Kita, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, and Hirohito Yamada, Ultra-compact Wavelength Tunable Quantum Dot Laser with Silicon Photonic External Cavity、CLEO2015、2015年5月13日、サンノゼ(米国)

北 智洋、山本 直克、川西 哲也、山田 博仁、InAs 量子ドット光増幅器を用いた1.2 $\mu$ m 帯シリコンフォトニック波長可変レーザ、応用物理学会春季学術講演会、2015年3月12日、東海大学(神奈川)

Tomohiro Kita, Silicon Photonic Devices for a Large Capacity Optical Communication System、The 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence、2014年11月19日、東京大学(東京)

北 智洋、唐 睿、山田 博仁、狭線幅・高出力シリコンフォトニック波長可変レーザ、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2014年9月24日、徳島大学(徳島)

Tomohiro Kita, Tang Rui, and Hirohito Yamada、Wide-band Wavelength Tunable Laser Diode with Si Photonic Filter、IEEE International Conference of Semiconductor Laser、2014年9月8日 マヨルカ(スペイン)

北 智洋、山田 博仁、デジタルコヒーレント光通信用シリコンフォトニック波長可変レーザ、フォトニックデバイス・応用技術研究会、2014年5月28日、機械振興会館(東京)

北 智洋、唐 睿、根本 景太、山田 博仁、シリコンフォトニック波長可変レーザ、電子情報通信学会総合大会、2014年3月18日、新潟大学(新潟)

Tomohiro Kita, Keita Nemoto, and Hirohito Yamada、Highly-stabilized operation of Si photonics wavelength tunable laser diode、Solid State Device and Materials2013、2013年9月27日、ヒルトン福岡シーホーク(福岡)

Tomohiro Kita, Keita Nemoto, and Hirohito Yamada, Narrow spectral linewidth and high output power Si photonic wavelength tunable laser diode、IEEE Group Photonics、2013年8月30日、ソウル(韓国)

Tomohiro Kita, Keita Nemoto, and Hirohito Yamada、Si Photonic Wavelength Tunable Laser Diode for Digital Coherent Optical Communication、The 18th OptoElectronics and Communications Conference、2013年7月3日、京都国際会議場(京都)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 1件)

名称：波長フィルタ及びレーザ  
発明者：北 智洋,根本 景太,山田 博仁  
権利者：同上  
種類：特許  
番号：特願 2014-029699  
出願年月日：平成 26 年 2 月 19 日  
国内外の別：国内

取得状況(計 0件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/yamadablab/Kita.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北 智洋(KITA, TOMOHIRO)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：40466537

### (2) 研究分担者

田主 裕一郎(TANUSHI, YUICHIRO)  
東北大学・未来科学技術共同研究センター・助教  
研究者番号：90397985