

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02634

研究課題名（和文）オンチップ光シンセサイザ

研究課題名（英文）On-chip optical synthesizer

研究代表者

北 智洋（Tomohiro, Kita）

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：40466537

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：微小なシリコンチップ内で光波の周波数、強度、位相を精密に制御する事が可能な光波制御チップと量子ドット光増幅器を結合する事で、複数の波長のレーザー光を出力可能なヘテロジニアス多波長レーザーを作製した。二波長可変ヘテロジニアスレーザーからの出力光をフォトディテクタによって電気信号に変換する事で20～400 GHzの非常に広い帯域のミリ波を出力できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果によってシリコンチップ内でレーザー光の周波数、位相、強度を自在に制御する光シンセサイザの要素技術を確立する事ができた。今後は、さらに出力光を多波長化していくことで時間的な強度形状を自在に制御した光シンセサイザが実現される。

本研究課題によって作製したRadio over Fiber光源は、次世代の移動体通信であるBeyond 5Gにおける超高周波電波の発生源として利用できる。

研究成果の概要（英文）：Heterogeneous multi-wavelength combining a quantum dot optical amplifier and a lightwave control silicon photonics chip was fabricated. It was shown that the output light from a two-wavelength tunable heterogeneous laser can be converted into an electrical signal by a photodetector to output millimeter waves in a very wide band of 20 to 400 GHz.

研究分野：半導体工学

キーワード：シリコンフォトリクス 量子ドット 半導体レーザー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、複数の光波の強度・波長・位相を自在に制御することが可能なシリコンフォトニクスチップと複数のモードでの安定したレーザ発振が可能な量子ドット光増幅器とを結合したレーザ光源を開発する。精密に制御された複数のモードを重ね合わせることで、任意のパルス形状のレーザ光を出力できるオンチップ光シンセサイザを実現できる。量子ドット光増幅器とシリコンフォトニクスチップの両者の長所を効果的に融合することで、微小なチップ内でレーザ光のパルス形状を自在に制御できるオンチップ光シンセサイザを開発するための基盤技術を確立する。

2. 研究の目的

近年急速に発展してきたシリコンフォトニクスの利用によって微小なシリコンフォトニクスチップ内で光波の位相、強度を高精度に制御する事が可能になりつつある。シリコンフォトニクスの長所の一つは、莫大な費用がかかる半導体製造装置を所有しなくともファウンダリーを利用することで高度な光デバイスを作製できる点にある。一方で化合物半導体モノリシックレーザは、高度に洗練された化合物半導体結晶成長技術とプロセス技術を駆使することで作製され、光通信を中心に様々な分野において実用化されている。本申請者は、両者の長所を併せ持つヘテロジニアス(異種材料集積)レーザを実現する事を目的に研究を行っている。本レーザは両者を組み合わせる事で、所望の機能を持つレーザ(機能性レーザ)をファブレスで実現でき、膨大なノウハウの蓄積が必要であった半導体レーザの研究開発期間を劇的に短縮する。しかしながらシリコンフォトニクスデバイスを用いた光波の波長・強度・位相制御のみでは、波長可変レーザといった従来の化合物半導体モノリシックレーザの機能性を本質的に上回る事はできなかった。本研究の目的は、図1に示すように量子ドット光増幅器とシリコンフォトニクスの両者が持つ長所を効果的に組み合わせる事でレーザ光のパルス形状を自在に制御できる1チップ光シンセサイザを実現する基盤技術を確立する事にある。

本研究の核心をなす問いは、微小なシリコンフォトニクスチップと量子ドット光増幅チップとを結合させたヘテロジニアスレーザにおいて、時間的な光の状態も含めた光波の究極的な制御は可能なのか？という点にある。本研究課題では、多波長のレーザ光を精密に制御することでサブTHzのビート信号を出力するRadio over Fiber (RoF)光源を開発した。

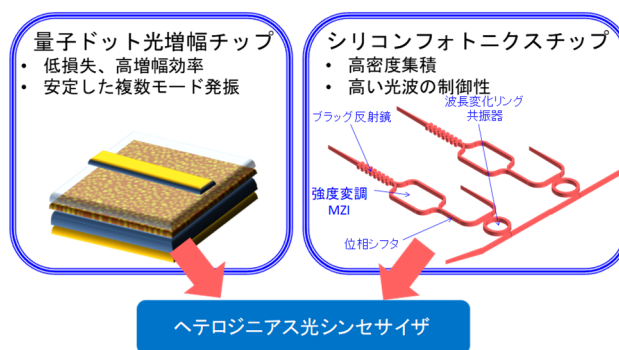


図1 量子ドット技術とシリコンフォトニクスの融合による光シンセサイザの実現

3. 研究の方法

図2に試作したRoF光源の構造模式図を示す。量子ドットSOA(QD-SOA)とシリコンフォトニクスチップは、スポットサイズコンバータを介して高効率に接続し、一つ目のリング共振器(Ring1)の共振波長がBragg反射鏡(DBR)へとドロップされる。ドロップされた複数の共振波長の光は狭帯域なDBRによって単一の共振波長が反射されレーザ発振をする。ここでRing1とRing2の共振波長をずらすことで、それぞれの共振波長の二波長で発振する二波長可変レーザとして動作する。ここでQD-SOAは、長距離光通信で使用される1.55 μm で増幅利得を持つInP基板を用いたInAs自己形成量子ドットを活性層としている。レーザ発振の波長を従来の1.2 μm 帯から1.55 μm に変更する事で、高周波特性に優れたサブTHzオーダーでの光電変換が可能な単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)の利用が可能になる。DBRを透過する二波長のポートの一方に光変調

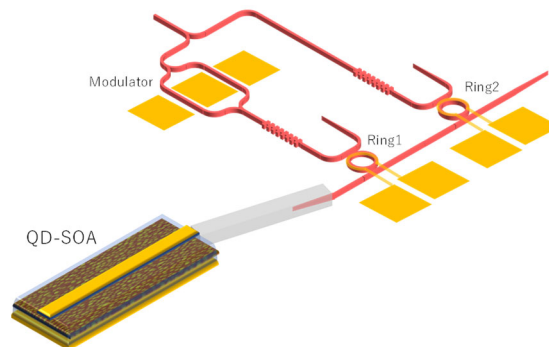


図2 ヘテロジニアス2波長可変レーザにシリコン光変調器を集積化したRoF光源の構造模式図

器を装荷する事で変調波を生成する事が可能である。本研究ではRoF トランスミッタに用いる高消光比なシリコン変調器を新たに設計、試作した。

4. 研究成果

2組のリング共振器とDBRを結合した2波長可変フィルタと1.55 μm で高い増幅利得を持つQD-SOAを結合させたヘテロジニアス二波長レーザの波長スペクトルのリング共振器(Ring2)ヒータ電力依存性を図3に示す。ここでQD-SOAの温度は20 $^{\circ}\text{C}$ 、注入電流は150 mAである。二つのリング共振器の共振波長が一致しているヒータ電力が0の時には、単一波長で発振しているのに対して、Ring2のリング共振器を加熱する事で共振波長が長波長側へシフトし二波長発振していることが確認できる。本構造において二波長発振の差周波数は、20~400 GHzの広い範囲で制御できる事を確認した。二波長の差周波数が約23.1 GHzとなる時のレーザ光の波長スペクトルを図4に示す。サイドモード抑圧比30 dB以上の明瞭な二波長発振が確認できる。二波長の出力光を高速フォトディテクタに入射する事で差周波数のビートを電気信号に変換した。スペクトルアナライザで評価した電気信号の周波数スペクトルを図5に示す。約23 GHzに現れている強く鋭いピークが二波長のビート信号であり、二つの発振モードの縦モードに対応する二つのピークが約11 GHzに確認できる。また、ビート信号と縦モードとの和周波成分が約35 GHzに確認できる。電気信号のサイドモード抑圧比は、25 dB程度であり高効率なミリ波の出力が得られた。図6にミリ波スペクトルの拡大図とローレンツ関数によってフィッティングした結果を示す。得られたミリ波の半値全幅は、23.9 MHzであった。Henryの式から見積もられる本ヘテロジニアス波長可変レーザの線幅は約100 kHzであることから、ミリ波の線幅を増大させている要因は発振周波数を制御しているヒータの電氣的なノイズによるものと考えている。適切な電気フィルタの装荷と遮蔽シールドの利用によってレーザ発振の線幅と同程度の100 kHz程度まで狭窄化できることが期待できる。

さらに本二波長レーザに集積化するシリコン光変調器の開発も並行して進めた。空乏型のPN位相変調器を装荷したマッハツェンダ干渉計(MZI)型変調器においては、パワーバランス調整用MZI及び周型偏光子を装荷する事で約50 dBの高消光比を実現した。さらに集積性と低損失性に優れたPIN位相変調器を用いた電流注入型光変調器においても同程度の高消光比が得られた。このように複数の波長のレーザ光の周波数、位相を制御する事で任意の周波数のビート信号を生成できることを実証した。

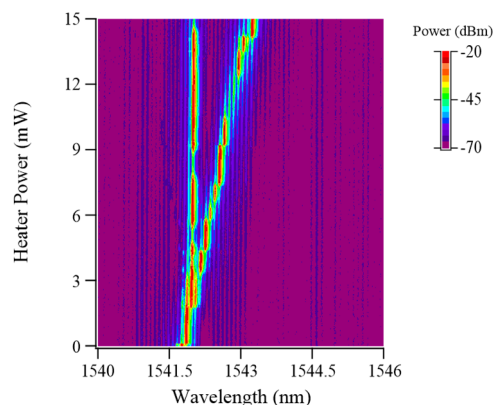


図3 二波長レーザの波長スペクトル

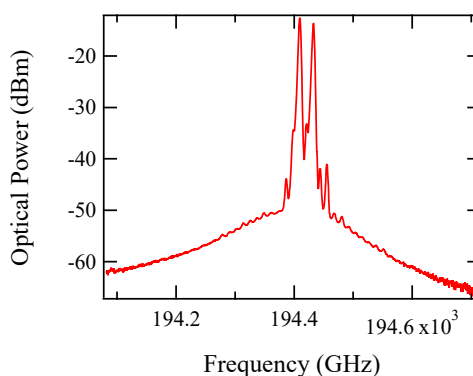


図4 差周波数 23.1 GHz の光スペクトル

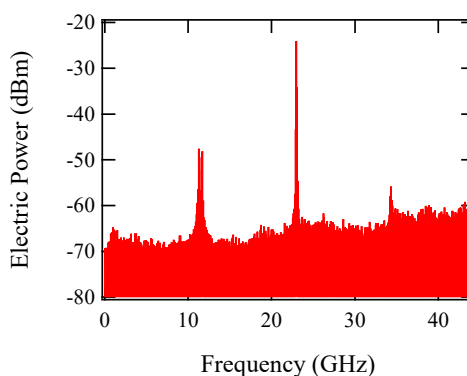


図5 二波長レーザ光から生成したミリ波の周波数スペクトル

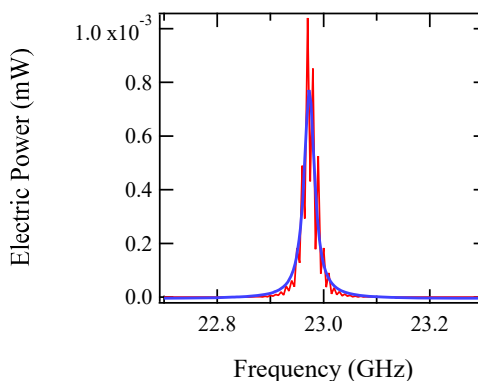


図6 ミリ波の周波数スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 5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 Masaki Okamoto, Manuel Mendez-Astudillo, and Tomohiro Kita	4. 巻 59
2. 論文標題 Thermo-optic phase shifter with sub-microsecond switching time and low power	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S00A03-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9c42	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 -

1. 著者名 北 智洋, メンデス アストゥディージョ マヌエル	4. 巻 vol. J103-C
2. 論文標題 シリコンフォトニクスハイブリッドレーザの高速波長切り替え動作	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 428-433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 小松原 樹, 岡地 俊明, 横田 信英, 八坂 洋, 北 智洋	4. 巻 vol. 120, no. 244, LQE2020-51
2. 論文標題 光負帰還回路装荷によるハイブリッド波長可変レーザ狭線幅化の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 技術研究報告	6. 最初と最後の頁 129-132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 小島 大輝, 藤方 潤一, 北 智洋	4. 巻 vol. 120, no. 243, OPE2020-70
2. 論文標題 Si光変調器の高消光比	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 技術研究報告	6. 最初と最後の頁 125-128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Masaki Okamoto , Manuel Mendez-Astudillo, Tomohiro Kita	4. 巻 -
2. 論文標題 Thermo-optic Phase Shifter with Sub-microseconds Switching Time and Low Power Consumption	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Tomohiro Kita, Manuel Mendez-Astudillo	4. 巻 39
2. 論文標題 Ultrafast silicon MZI optical switch with periodic electrodes and integrated heat sink	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 5054-5060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2021.3082634	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 -

1. 著者名 Hiroki Kojima, Junichi Fujikata, and Tomohiro Kita	4. 巻 -
2. 論文標題 High-extinction-ratio Si optical modulator loaded with integrated polarizer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5a2b	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 -

1. 著者名 飯野 航平、北 智洋	4. 巻 121(377)
2. 論文標題 差動制御方式を用いたSi熱光学式光スイッチの超高速動作	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 技術研究報告	6. 最初と最後の頁 31-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 三杉大和、岡山秀彰、北 智洋	4. 巻 121(377)
2. 論文標題 波長掃引型光フェーズドアレイの大規模化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 技術研究報告	6. 最初と最後の頁 27-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 岩永吉祥、益田 航、松本 敦、山本直克、北 智洋	4. 巻 121(377)
2. 論文標題 量子ドット1.55 μm ヘテロジニアス波長可変レーザの高温動作特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 技術研究報告	6. 最初と最後の頁 98-102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 川名理緒、北 智洋	4. 巻 121(377)
2. 論文標題 シリコンフォトンクスハイブリッドレーザの位相変調を用いたFMCW計測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 技術研究報告	6. 最初と最後の頁 103-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 北 智洋, メンデス アストゥディージョ マヌエル
2. 発表標題 高速MZI光スイッチ
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島 大輝、藤方 潤一、北 智洋
2. 発表標題 50 dB以上の高消光比Si光変調器
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木彩斗、岡山秀彰、北智洋
2. 発表標題 光フェーズドアレイを用いたレーザービームスキャナ
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Okamoto, M. Mendez-Astudillo, and T. Kita
2. 発表標題 High Speed and Low Power Consumption, Thermo-optic Phase Shifter
3. 学会等名 MOC 2019 24th Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ito, M. Mendez-Astudillo, and T. Kita
2. 発表標題 Wavelength Tunable filter with Curved Directional Coupler
3. 学会等名 MOC 2019 24th Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kita, M. Mendez-Astudillo, M. Masaka, F. Tan, and O. Sugihara
2. 発表標題 Athermal Silicon Ring Resonators with TiO ₂ Hybrid-Polymer Claddings
3. 学会等名 MOC 2019 24th Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Kita
2. 発表標題 Tunable light source with silicon photonic external cavity
3. 学会等名 International Conference on Photonic Solution (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C. Yatabe, M. Mendez-Astudillo, and T. Kita
2. 発表標題 Automatic Probing Station for Silicon Photonic Devices
3. 学会等名 Photonic Device Workshop 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 将樹, Manuel Mendez-Astudillo, 北 智洋
2. 発表標題 MMI熱光学位相シフトの波長依存性の低減
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 Hiroki Kojima, Jun-ichi Fujikata, and Tomohiro Kita
2. 発表標題 High extinction ratio Si optical modulator loaded with integrated polarizer
3. 学会等名 Microoptics Conference (MOC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wataru Masuda, Kissho Iwanaga, Atsushi Matsumoto, and Tomohiro Kita
2. 発表標題 C-band Tunable Dual-Wavelength Laser with a Quantum Dot SOA
3. 学会等名 International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小島 大輝、北 智洋
2. 発表標題 50 dB以上の高消光比Si光変調器
3. 学会等名 電子情報通信学会(IEICE)総合大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 彩斗、岡山 秀彰、北 智洋
2. 発表標題 AWGを用いた光フェーズドアレイによる波長掃引2次元ビームステアリング
3. 学会等名 電子情報通信学会(IEICE)総合大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三杉 大和、岡山 秀彰、北 智洋
2. 発表標題 1チップ二次元ビームスキャナ
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯野 航平、北 智洋
2. 発表標題 アシストパルスを用いたSi熱光学式光スイッチの高速動作
3. 学会等名 電子情報通信学会(IEICE)ソサイエティ大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小柳 和輝、北 智洋
2. 発表標題 ファイバ・ファブリ・ペロー共振器を用いた自己注入同期によるハイブリッド波長可変レーザーの線幅狭窄化
3. 学会等名 電子情報通信学会(IEICE) Photonic Device Workshop 2021(PDW2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川名 理緒、北 智洋
2. 発表標題 ハイブリッド波長可変レーザーの直接位相変調を用いた距離計測の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会(IEICE) Photonic Device Workshop 2021(PDW2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩永 吉祥, 益田 航, 松本 敦, 北 智洋
2. 発表標題 1.5 μm帯量子ドット/シリコンフォトニクス-ハイブリッド波長可変レーザの無温調動作
3. 学会等名 電子情報通信学会(IEICE) Photonic Device Workshop 2021(PDW2021)
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
研究分担者	藤方 潤一 (Fujikata Junichi) (00869159)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授 (16101)	
研究分担者	MENDEZ MANUEL (Mendez Manuel) (20822430)	早稲田大学・理工学術院・講師(任期付) (32689)	

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
---------	---------