

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01897

研究課題名(和文)超伝導集積回路光インターコネクションを実現する超低電圧光変調器の開発

研究課題名(英文)Ultralow-voltage optical modulator for optical interconnection of superconductor integrated circuits

研究代表者

荒川 太郎 (Arakawa, Taro)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40293170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導集積回路と従来のCMOSメモリを接続する光インターコネクションのために、超低電圧で駆動できる光変調器を提案、開発を目指した。超伝導集積回路は出力電圧がmVレベルと低く、CMOS回路等との融合や集積のボトルネックとなってきた。そこで本研究では、半導体ポテンシャル制御量子井戸マイクロリング共振器装荷マッハ・ツェンダー型光変調器を用いて課題を解決する。研究の結果、超伝導集積回路が動作する極低温において、約0.4 mVという従来の光変調器よりも1/5000程度の電圧で動作する可能性を示した。また、提案する光変調器の作製技術の確立、極低温の液体ヘリウム下での測定技術を確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極低温における半導体電界誘起屈折率変化の特性に関する研究はこれまで行われておらず未解明であった。また、これらと光変調器のデバイス構造の工夫により、動作電圧を従来の1/1000以下という極限にまで低減し、超伝導集積回路により直接駆動するという独自性の高い研究であり、過去に例はない。本研究で提案するように、FACQWの巨大な電界誘起屈折率変化とその極低温における飛躍的向上等を融合することにより初めて実現の可能性があり、学術的に独自性の高い研究である。本研究の成果により、従来のスーパーコンピュータを凌駕する超高速超伝導スーパーコンピュータシステムの実現に向けたブレークスルーとなる。

研究成果の概要(英文)：For optical interconnection between superconducting integrated circuits and CMOS memory integrated circuits, we proposed and developed an optical modulator that can be driven by ultra-low voltage. In this study, we solve this problem by using a Mach-Zehnder optical modulator with semiconductor potential-tailored quantum well microring resonators.

Our research results show that at cryogenic temperatures, where superconducting integrated circuits operate, the proposed modulator has the potential to operate at a voltage of 0.4 mV, which is approximately 1/5000 of that of conventional optical modulators. We also established fabrication techniques for the proposed optical modulators and measurement techniques under liquid helium at cryogenic temperatures. This will enable direct reading of the output from superconducting integrated circuits via optical interconnection, and is expected to lead to integration and fusion with CMOS circuits that do not require a voltage booster circuit.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光変調器 光インターコネクション 超伝導集積回路 極低温

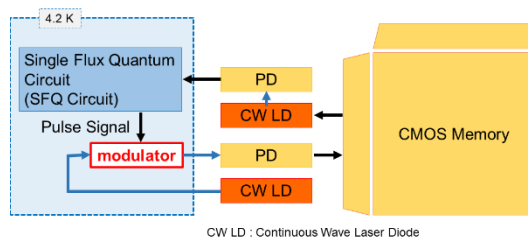
1. 研究開始当初の背景

超伝導集積回路は、100 GHz を超える演算の超高速性、半導体より 3 桁以上優れた超低消費電力性などの特長を有しており、次世代スーパーコンピュータを実現する技術として注目されている。演算やキャッシュメモリには超伝導回路を、メインメモリには従来のシリコン CMOS デバイスを用い、両者を融合することでシステムが構成されるため、CMOS 回路とのインターコネクションは極めて重要である。

しかし、超伝導集積回路は mV 程度の単一磁束量子 (SFQ) のパルス電圧出力のため、CMOS 回路と融合する際、昇圧回路が必要となる。昇圧回路は超伝導集積回路を複雑化し、集積性の悪化、消費電力の増大を招くとともに、超伝導集積システムを制限するボトルネックの一つとなっている。この問題の解決方法として、電気配線よりも高速にデータ伝送できる光インターコネクションがある。しかし、上記の超伝導集積回路の低い出力電圧がネックとなり、超伝導回路における光インターコネクションの研究は、その重要性にもかかわらずほとんど進んでいない。

2. 研究の目的

超伝導集積回路と従来の CMOS 集積回路を接続する光インターコネクション (図 1) のために、極低温下において超低電圧で駆動できる光変調器を開発し、超伝導集積回路に適用してその有用性を実証することを目的とする。光変調器のコア層には我々が独自に開発してきたポテンシャル制御量子井戸構造である五層非対称結合量子井戸 (FACQW) を用いる。FACQW は、室温で大きな電界誘起屈折率変化を発現する優れた特性を有する。本申請では、超伝導回路が動作する極低温 (4.2 K) での FACQW の電界誘起屈折率変化の飛躍的特性向上、マッハ・ツェンダー干渉計の高消光比化、マイクロリング光共振器 (MRR) による位相変化の増大を図る。これらの相乗効果により、従来の光変調器の動作電圧の 1/1000 以下まで動作電圧を低減させ、mV オーダーである超伝導集積回路のパルス電圧出力で直接駆動できる光変調器の実現を目指した。



CW LD : Continuous Wave Laser Diode

図 1 提案する超伝導集積回路用光インターコネクションシステム

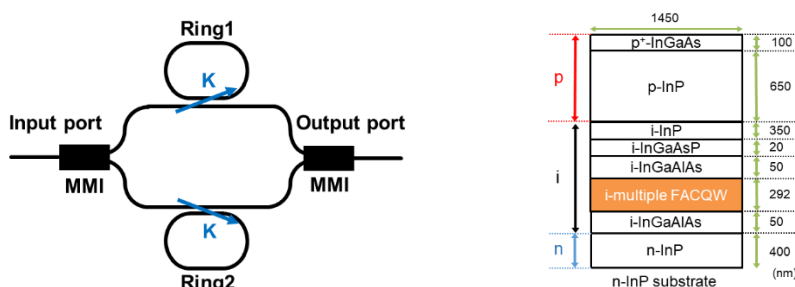


図 2 提案する非対称結合量子井戸微小リング共振器装荷光変調器の概略図 (左) と光導波路断面模式図

3. 研究の方法

本研究で提案する超伝導集積回路用光インターコネクション光変調器の概略図をそれぞれ図 2 に示す。光変調器は、マッハ・ツェンダー干渉計 (MZI) と呼ばれる光干渉計の両アーム部に化合物半導体 MRR (周回長 100 μm 程度) のペアを装荷し、差動 (プッシュ・プル) 式で電圧を印加する。MRR には、これまで申請者らが研究・開発を行ってきた InGaAs/InAlAs FACQW を用いる。FACQW は大きな電界誘起屈折率変化特性を有しており、超伝導回路の出力電圧パルスを印加することで、MRR コア層の等価屈折率変化を生じさせる。低温では、量子ナノ構造において、キャリアの基底準位への局在による発光・吸収ピークの先鋭化、励起子 (伝導電子・正孔ペア) が安定に存在し、また非発光再結合が抑制されるなどの効果により、量子ナノ構造での発光・吸収が室温と比較して 1 ~ 2 桁増大すると期待される。また、MRR は、共振

器内を何度も光が周回することで、微小な屈折率変化でも大きな実効的屈折率変化が得られる。

上記の効果の相乗効果により、従来の光変調器の動作電圧の 1/1000 以下である mV オーダーに低減し、超伝導回路用光インターコネクションを実現する。

4. 研究成果

(1) 極低温超低電圧動作量子井戸構造の提案

図 3 に、設計・提案した InGaAs/InAlAs FACQW のバンド構造を示す。12 分子層の $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ QW 層 (QW1) と 25 分子層の $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ QW 層にポテンシャル変調用の 9 分子層の $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 障壁層 (QW2) から成る。InGaAs 層には 0.5% の圧縮歪みが導入されているが、InAlAs 層は InP 基板に格子整合している。この FACQW の電界吸収スペクトルは、電界を -11 kV/cm から -12 kV/cm までわずか 1.0 kV/cm だけ変化させた場合に大きな吸収の変化が生じる。これは、提案した独特な結合量子井戸における正孔第 1 準位および第 2 準位の波動関数の大きな変化に起因する。本構造における電界誘起屈折率変化特性を図 4 に示す。印加電界を -11 ~ -12 kV/cm に変化させたときの屈折率変化が極めて大きく、しかも広い波長に渡って変化することがわかる。

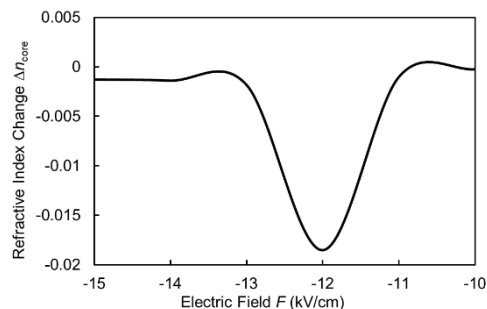
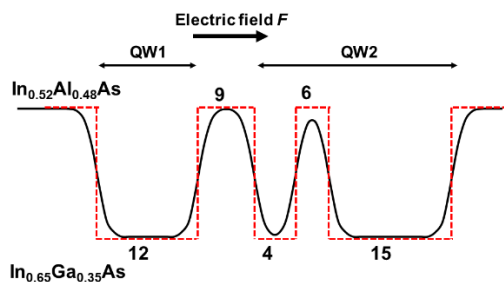


図 3 設計した非対称結合量子井戸 (FACQW) 図 4 設計した FACQW の電界誘起屈折率変化

この特性は、屈折率変化を利用した光変調器の低電圧化に極めて有用であり、動作の広波長域にも有利であり、波長多重通信を用いた高速化が可能となる。電界誘起屈折率変化が大きい主な理由は以下の通りであることを明らかにした。

- 4.2K では吸収のピークが鋭いため、バンド端に近い波長に動作波長を設定することができ、室温の場合よりも大きな屈折率変化が得られる。
- 電子ではなく、共鳴トンネルによる重い正孔の波動関数分布の変化を利用することで、印加電界の変化に対する吸収変化の感度が大幅に増幅される。
- FACQW の圧縮歪みは、正孔のバンド構造を変化させ、吸収変化の全吸収変化への寄与を増大させる。

(2) 量子井戸微小リング共振器装荷マッハ・ツェンダー光変調器の提案

InGaAs/InAlAs FACQW MRR 装荷 MZI を用いた極低温動作超低電圧光変調器を設計、提案した。設計パラメータを表 1 に示す。の高速動作を優先した設計 (変調器 1) および超低電圧化 (変調器 2) を優先した構造を提案した。それぞれに光変調動作を図 6 に示す。変調器 1 では、変調周波数 10 GHz、動作電圧は約 0.9 mV、変調器 2 では、それぞれ 2.2 GHz、0.42 mV が期待できる。これは、従来の光変調器の動作電圧 (例えば 3 V) の 1/3000 ~ 1/5000 の超動作電圧が期待できることを表す。

表 1 提案する微小リング装荷光変調器のデバイスパラメータ

デバイスパラメータ	変調器 1	変調器 2
微小リング共振器周回長 L (μm)	280	300
方向性結合器の光電力結合率 K	0.20	0.027
微小リング共振器 Q 値	19300	86200
変調周波数 f (GHz)	10	2.2
動作電圧 V (mV)	0.93	0.42

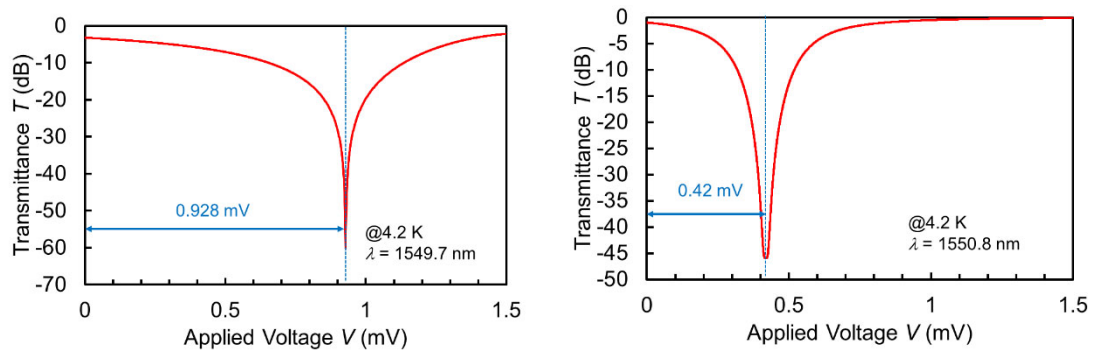


図6 設計した光変調器1（左）および光変調器2（右）のDC変調特性の計算値

(3) デバイス作製技術と極低温測定技術の確立

(2)、(3)で設計、提案した光変調器の作製技術を確立した。作製については、電子ビーム描画法、結合誘導プラズマドライエッチング法、マグネトロンスパッタ法等を用いた。作製例を図7に示す。

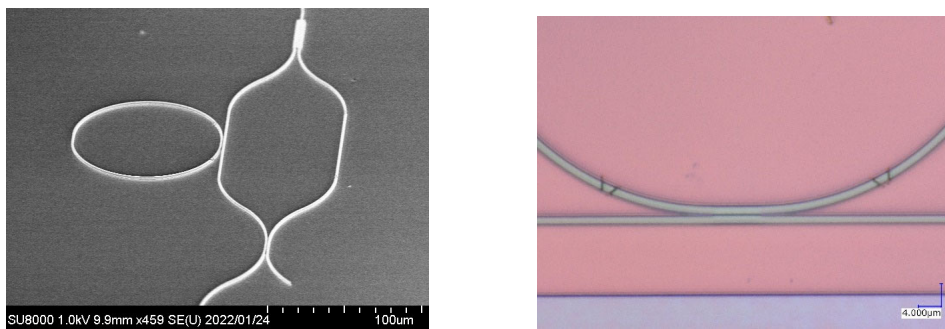


図7 作製した光変調器の電子顕微鏡像（左）と方向性結合器の拡大光学顕微鏡像（右）

また、極低温測定では、液体ヘリウムにデバイスを浸して測定する必要があるが、光ファイバとの光軸ずれが必ず生じるため、光軸合わせが極めて困難である。そこで、垂直入射型グレーティングカップラを設計、作製するとともに、専用の測定治具を開発し、極低温測定を可能にした(図8)。

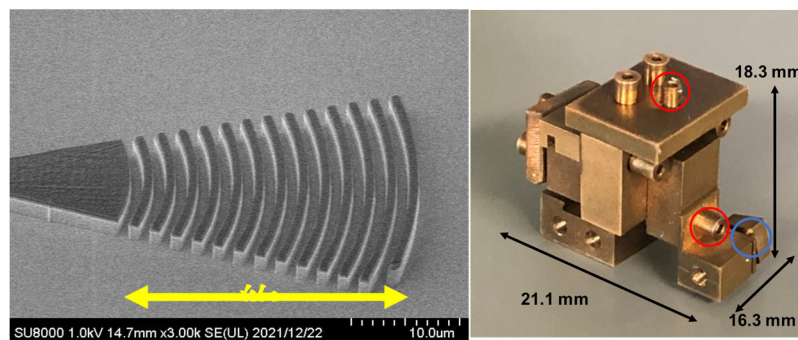


図8 作製した光ファイバ垂直入射用グレーティングカップラ（左）と開発した極低温測定用光ファイバ固定治具（右）

以上により、提案する光変調器の作製および測定・評価が可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yusuke Miyazeki and Taro Arakawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Proposal of InGaAs/InAlAs multiple quantum well Mach-Zehnder modulator integrated with array of planar antennas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SJJE05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab27b3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kota Sakai, Seiji Kato, Nobuyuki Yoshikawa, Yasuo Kokubun, and Taro Arakawa	4. 巻 59
2. 論文標題 Proposal of ultra-low voltage quantum well optical modulator for optical interconnection in superconducting integrated circuit systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S00B01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab8284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yusuke Miyazeki, Hiroto Yokohashi, Shotaro Kodama, Hiroshi Murata, and Taro Arakawa	4. 巻 28
2. 論文標題 InGaAs/InAlAs multiple-quantum-well optical modulator integrated with planar antenna for millimeter-wave radio-over-fiber system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 11583-11596
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.389574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yabushita Yuki, Takazawa Hiroki, Kokubun Yasuo, Arakawa Taro	4. 巻 57
2. 論文標題 32-Gbps single silicon microring resonator-loaded Mach-Zehnder modulator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 08PC05 ~ 08PC05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/JJAP.57.08PC05	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Yamashina and T. Arakawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Proposal and simulated characteristics of high-extinction-ratio electroabsorption modulator based on multimode interference waveguide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 042003 ~ 042003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab090f	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 Kanesaka Yuhei, ARAKAWA Taro	4. 巻 未定
2. 論文標題 Proposal of compact multimode interference optical modulator with high extinction ratio	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac6f41	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 Peng Zhifeng, Komatsubara Takuya, Yamauchi Mao, Arakawa Taro	4. 巻 38
2. 論文標題 Design of a series-coupled microring resonator wavelength filter using the digital filter design method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 2837 ~ 2837
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.437989	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 Udagawa Yudai, ARAKAWA Taro	4. 巻 未定
2. 論文標題 Design of high-order series-coupled microring resonator wavelength filter with differential evolution method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac692f	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 Kamada Hiro, Arakawa Taro	4. 巻 8
2. 論文標題 Proposal of Highly Efficient Quantum Well Microring Resonator-Loaded Optical Phase Modulator Integrated with Antenna-Coupled Electrodes for Radio-over-Fiber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 37~37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/photonics8020037	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23件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Yusuke Miyazeki and Taro Arakawa
2. 発表標題 InP-Based Mach-Zehnder Modulator Using Gap-Embedded Planar Antennas for Wireless Millimeter-Wave Communication Systems
3. 学会等名 24th Optoelectron. and Commun. Conf./Intern'l Conf. Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC)2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taro Arakawa
2. 発表標題 Multiple quantum-well electroabsorption modulator based on multimode interference waveguide for high extinction ratio
3. 学会等名 Korea-Japan Joint Session, 2019 The Korean Physical Society (KPS) Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Yamashina, Koya Saito, Yuhei Kanesaka, and Taro Arakawa
2. 発表標題 High-Extinction-Ratio Multiple Quantum Well Modulator Based on Multimode Interference Waveguide
3. 学会等名 24th Microoptics Conference (MOC) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Miyazeki and Taro Arakawa
2. 発表標題 InGaAs/InAlAs multiple quantum well Mach-Zehnder modulator integrated with planar antennas
3. 学会等名 3rd Int. Workshop on Photonics Applied to Electromagnetic Measurements (PEM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yamauchi, Y. Kokubun, and T. Arakawa
2. 発表標題 Design of high-order microring resonator-based Chebyshev wavelength filter using digital filter design method
3. 学会等名 24th Microoptics Conference (MOC) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sakai, S. Kato, N. Yoshikawa, Y. Kokubun, and T. Arakawa
2. 発表標題 Investigation on ultra-low voltage quantum well optical modulator for optical interconnection for superconducting integrated circuits
3. 学会等名 24th Microoptics Conference (MOC) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮関勇輔, 荒川太郎
2. 発表標題 コア層構造の最適化による平面アンテナ集積型InPマッハ・ツェンダー光変調器の性能向上
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田大, 荒川太郎
2. 発表標題 アンテナ結合共振電極を有する量子井戸微小リング共振器位相変調器の提案
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 宮関勇輔, 横橋裕斗, 児玉将太郎, 村田博司, 荒川太郎
2. 発表標題 ンテナ結合共振電極を有する量子井戸微小リング共振器位相変調器の提案
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 R. Aoki, N. Kobayashi, Y. Kawamura, T. Arakawa, and Y. Kokubun
2. 発表標題 Demonstration of Switchable All-Optical Flip-flop and Inverter Operations in Semiconductor Microring Laser
3. 学会等名 26th Int'l Semiconductor Laser Conf. (ISLC) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Miyazeki, Joo-Hyong Noh, and Taro Arakawa
2. 発表標題 Design of InP-Based Mach-Zehnder Modulator Integrated with Planar Antenna for 60-GHz-Band Radio over Fiber System
3. 学会等名 23rd Microoptics Conf. (MOC) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taro Arakawa and Yasuo Kokubun
2. 発表標題 Semiconductor Microring Resonator-Based Photonic Devices
3. 学会等名 Energy Materials Nanotechnology (EMN) Meeting on Photonics 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒川太郎, 國分泰雄
2. 発表標題 半導体マイクロリング共振器とその応用展開
3. 学会等名 日本セラミックス協会第31回秋季シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Yabushita, Yasuo Kokubun, and Taro Arakawa
2. 発表標題 Design and High-Frequency Modulation Characteristics of Silicon Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Modulator
3. 学会等名 7th Int. Symp. Material Sci. Technol. (MSST) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryosuke Aoki, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun
2. 発表標題 Experimental and Theoretical Analysis of All-Optical Flip-flop and Inverter Operations in Semiconductor Microring Laser
3. 学会等名 7th Int. Symp. Material Sci. Technol. (MSST) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Yamashina, Joo-Hyong Noh, and Taro Arakawa
2. 発表標題 Development of high-extinction-ratio electroabsorption modulator based on multimode interference waveguide
3. 学会等名 7th Int. Symp. Material Sci. Technol. (MSST) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阪井康太、加藤誠二、國分泰雄、吉川信行、荒川太郎
2. 発表標題 超伝導集積回路光インターコネクションのための量子井戸光変調器の超低電圧化の検討
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Udagawa and T. Arakawa
2. 発表標題 Design of high-order series-coupled microring resonator wavelength filter with differential evolution method
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (MOC) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kanesaka and T. Arakawa
2. 発表標題 Compact high-extinction-ratio multimode interference electroabsorption modulator
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (MOC) 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 兼古雄太, 吉川信行, 荒川太郎
2. 発表標題 超伝導集積回路光インターコネクションのための量子井戸微小リング光変調器の超低電圧化の設計と作製
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 Yoshitaka Yamato and Taro Arakawa
2. 発表標題 Design of Silicon Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Modulator for Cryogenic Operation
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Nemoto, Gaku Sekiguchi, and Taro Arakawa
2. 発表標題 Proposal of Bow-Tie Antenna Integrated Quantum Well Phase Modulator for 60 GHz Millimeter-Wave
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhifeng Peng and Taro Arakawa
2. 発表標題 Tunable Fourth-order Series-coupled Resonator Filter with Vernier Effect Using Multiple-quantum-well Waveguides
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

横浜国立大学 荒川研究室
http://www.arakawa-lab.ynu.ac.jp/

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	吉川 信行 (Yoshikawa Nobuyuki) (70202398)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	
研究分担者	國分 泰雄 (Kokubun Yasuo) (60134839)	ものづくり大学・その他の部局・学長、教授 (32422)	

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