

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360025

研究課題名(和文) 超低電力・多波長同時制御マイクロリング・マッハツェンダー光スイッチの開発

研究課題名(英文) Microring Resonator Loaded Mach-Zehnder Optical Path Switch for Ultralow Power Consumption and Multiple-Wavelength Operation

研究代表者

荒川 太郎 (Arakawa, Taro)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40293170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：大きな電界誘起屈折率変化特性を有するポテンシャル制御量子井戸，マイクロリング共振器(MRR)，マッハ・ツェンダー干渉計(MZI)を融合した，超低電力・多波長同時制御MRR装荷MZI光経路スイッチの提案と動作実証を目指した．各種素子パラメータと経路スイッチング特性との関係を明らかにし，その設計手法を確立した．さらに，設計した素子の試作を行った．まだ所望の経路スイッチング特性はまだ得られていないが，作製プロセスはほぼ確立し，素子実現の見通しがたった．さらに，シリコン細線導波路の熱光学効果を用いた同様の素子の試作も行い，低電圧動作と多波長同時スイッチ動作の実証に成功した．

研究成果の概要(英文)：We aimed to propose and demonstrate a microring-loaded Mach-Zehnder (MRR-MZ) 2 x 2 optical path switch with a potential-tailored quantum well structure for low power consumption and multi-wavelength path switching. We investigate the relation between various device parameters and switching characteristics, and proposed the method to design this device. We also fabricated the designed devices using photolithography and dry etching. Although designed operation has not been obtained yet, we almost established the fabrication process optimized for the proposed device. In addition, a device with similar structures using silicon wire waveguides were designed and fabricated. Low-voltage operation and multi-wavelength path switching were successfully demonstrated.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光スイッチ 量子井戸 微小共振器 マイクロリング共振器

1. 研究開始当初の背景

大容量光情報通信ネットワークの大容量化に伴い、光信号の経路の切り替えを行う光ルーターの消費電力の増大が極めて大きな問題となってきた。特に、最近のスマートフォン等の普及により、光ルーターを構成する光経路スイッチは、更なる高速化、小型化が要求されるとともに、低消費電力化も急務となっている。光スイッチは、その構成材料により、化合物半導体、シリコン系（シリコン、シリカ）、ポリマーなどに分類されるが、特に化合物半導体光スイッチは、低消費電力性、高速性、レーザー等の能動素子との集積性に優れている。シリコン系材料でも、シリカ平面光波回路による大規模スイッチやシリコン小型・高速な光変調器、スイッチも開発されているが、それぞれ高速化が困難、消費電力の増大などが問題となる。

化合物半導体光スイッチでは、マッハ・ツェンダー干渉計（MZI）が用いられ、化合物半導体量子井戸の電界誘起屈折率変化（位相変化）を利用してスイッチングを行う。しかし、従来の矩形量子井戸光変調器では、その屈折率変化量が小さく、素子の大型化、動作電圧の高電圧化、高い挿入損失など、解決すべき課題も多い。そこで、これらの課題に対し、応募者は巨大な電界誘起屈折率変化が期待される5層非対称結合量子井戸（FACQW）とその光制御デバイスへの応用について研究・開発を行ってきた。これまで、FACQW MZ 光変調器の試作と世界最高水準の低動作電圧化の実証等に成功した。

さらに、我々は、光制御素子を低消費電力化、小型化できる素子として、世界初の半導体量子井戸マイクロリング共振器（MRR）を有する波長可変フィルタや MZ 光変調器を提案し、開発を行ってきた。その結果、量子井戸の電界誘起屈折率変化を用いた単一 MRR 装荷 MZ 光変調器の試作に成功し、マイクロリング共振器における位相変化増強効果を利用することで、従来よりも動作電圧を 1/4 に低減できることを初めて実証した。

2. 研究の目的

これまでの我々の光変調器の研究成果を光スイッチに展開することで、高性能光スイッチも実現できると期待される。しかし、光スイッチには、偏光無依存性等の光スイッチ特有の要求があり、また、これまでの研究の結果、コア層に多重 FACQW を用いた場合、電界不均一性による電界誘起屈折率変化特性の劣化などの問題も明らかになってきた。

そこで、本研究では、上記の課題を解決し、超低電力・多波長同時制御 MRR 装荷 MZI 光スイッチを提案・開発し、その有用性を実証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) FACQW 導波路の電界誘起屈折率変化特性の向上（電界不均一性による特性劣化の抑制）と偏光無依存化の実現

光スイッチにおいては、光変調器とは異なり、偏光方向がランダムな光信号をスイッチングする必要があるため、光電界の偏光方向によらずスイッチングを行える偏光無依存化が望ましい。また、これまでの研究で5層非対称結合量子井戸（FACQW）の優れた電界誘起屈折率変化特性を実証できたが、FACQW は電界強度やその変化に敏感であるため、実際の光変調器のコア層で用いる多重 FACQW においては、残留不純物イオンで形成された空間電荷層による電界強度の場所依存性により総合的な電界誘起屈折率特性が大きく劣化してしまう場合があることがわかった。特に、コア層上部と下部の電界誘起屈折率変化が相殺し、トータルの屈折率変化が小さくなってしまいう問題が生じる。

そこで、FACQW 構造を最適化することにより上記の2つの問題の解決を図る。まず偏光無依存化は、FACQW の井戸層に伸張歪みを導入し、TE 波、TM 波に対する応答を調整する。すなわち、バンドエンジニアリングにより価電子帯分散構造や重い正孔、軽い正孔の相対位置を調整する。導波路断面形状の異方性も考慮に入れて歪み量の調整を行うことで、FACQW 導波路の偏光無依存化を実現する。伸張歪 FACQW 構造設計は、 $k \cdot p$ 摂動法によりバンド構造を計算し、価電子帯・伝導帯の非放物線性を考慮しつつ詳細な理論計算を行う。

次に、特性劣化の抑制については、コア層の場所毎に FACQW の構造を変え、動作電界領域を変化させたものを組み合わせることで本問題を解決でき、また、電界強度の変化に対するトレンスも改善できることが現在までの準備的研究で明らかになったので、その有効性を実証する。これまでの研究で、MBE 法では、層厚誤差を 1~2 分子層程度以内に抑えた InGaAs/InAlAs FACQW 構造の作製が可能となっているので、この結果を用いて本デバイスに最適化した FACQW ウエハを作製し、構造的および光学的評価を行う。

(2) マイクロリング共振器の構造最適化による位相変化増大効果の特性向上

マイクロリング共振器部における位相変化増大効果は、理論的には増大率 10 倍以上となると期待されるが、現時点では 4 倍にとどまっている。位相変化増大率は、マイクロリング共振器 1 周当たりの損失が小さいほど大きくすることができる。この損失は、共振器導波路の導波損失と、バスライン-リング共振器の光結合部における損失が主な要因であるため、それらを以下に下げることが課題である。

そこで、吸収損失の多い上部クラッド層（p ドープ層）にノンドープ層を導入し、その膜厚を最適化する。光結合部については、多モード干渉計の中央部に溝を切った二段階スイッチング構造を用い、溝幅および溝深さを最適化し、結合率の制御容易性と低損失性を確

保する。解析には、ビーム伝搬法 (BPM) および有限差分時間領域法 (FDTD) を用い、実際のデバイスにおける位相変化増強効果を定量的に検討する。3次元 FDTD 法は計算に極めて長時間を要するので、新たにシミュレーション用ワークステーションを導入し、設計の効率化を図りたい。

上記の設計を基に、単一マイクロリング素子を試作して導波損失を評価する。光結合部は、電子ビーム露光、そのほかの導波路構造はフォトリソグラフィによりパターン描画する。導波路構造の製作には、これまでに確立した Cl_2 および CH_4 の混合ガスを用いた誘導結合プラズマ (ICP) ドライエッチングを行う。エッチング条件の最適化により、リング共振器側壁粗さの低減も行い、位相変化増大効果を 10 倍まで改善することを目指す。

(3) 両アームにリング共振器を配したダブルマイクロリング構造による差動動作等の実現

これまでの研究では、作製の容易性を優先して、片側にのみマイクロリング共振器を備えた MZ 光変調器について主に研究を行ってきた。しかし、光スイッチの場合は、光変調器と異なりパルス信号を扱うため、干渉計の両アームの実効的な光路長を等しくする必要があるのである。そのため、これまでの片側にのみマイクロリング共振器を備えた MZ 光変調器と同様の構造では、DC または低速動作でしか用いることができない。

そこで、両アームに 1 組のマイクロリング共振器を有する MZ 光変調器 (ダブルマイクロリング MZ 変調器) を設計、試作し、その有用性を実証する。両アームのマイクロリング共振器の共振波長を少しずらしておくことにより、差動動作 (プッシュ・プル動作) を行う。このダブルリング構造の導入は、パルス信号のスイッチングを行う上で必要だけでなく、その他のメリットも多い。差動動作により、動作電圧が $1/2$ に低減でき、また、両アームのチャージングが相殺されるため、原理的にはゼロチャージ動作が可能となる。また、両アームが対称構造となっているため、両アームの光パワーのバランスがとれるため、片側にのみマイクロリング共振器を備えた MZ 光変調器で消光比向上のために必要であった非対称分岐を導入する必要がない。さらに、マイクロリング共振器のフィルタ効果により、通常の MZ 光スイッチよりも 15dB のクロストークの低減が期待できる。これにより、素子の作製誤差によるトレランスも大きく向上する。

さらに、FACQW の特性向上およびリング共振器の位相変化増大効果の改善の成果を基に、ダブルリング MZ 変調器のリング周長、光結合における結合率、動作電圧点等の設計、動作の理論解析を詳細に行う。後半は、実際にダブルマイクロリング MZ 変調器を試作し、リング部に電圧を印加し、光波長と印加電界

強度の関数として、その動作の静特性を評価する。動作は、両アームのリング部に同じバイアス電圧を印加しておき、それぞれ反対方向に電圧を印加する差動動作を行う。

(4) 複数のマイクロリング共振器ペアを配した素子による多波長同時制御動作の実証

上記の踏まえ、マイクロリング共振器ペアを複数に増やしてカスケード化し、多波長同時制御光変調器の設計および試作を行う。これにより、多波長同時独立光経路スイッチ動作を実証する。

1つのマイクロリング共振器ペアの光スイッチでは、(マイクロリング共振器の周長で決まる波長間隔で飛び飛びの) ある特定波長のみが変調される。この特性を積極的に利用したそれぞれのマイクロリングペアの動作波長を少しずつずらし、異なる電圧信号を入力することで、ペア数分の波長を同時に独立スイッチングできる。

4. 研究成果

(1) 五層非対称結合量子井戸 (FACQW) の多重構造について、残留空間電荷による電界不均一性を原因とする特性劣化の抑制について、コア層の場所毎に FACQW の構造を変え、動作電界領域を変化させたものを組み合わせた構造を設計し、有機金属気相成長法で作製した。作製した多重 FACQW 構造の電界誘起屈折率変化を、マイクロリング共振器を用いて測定したところ、その共振波長シフト量から、屈折率変化量が従来の多重 FACQW よりも低電界領域で約 2 倍量子井戸になることを実証した。これは、FACQW をコア層とする位相変調器の低消費電力化に大きく寄与するものである。

なお、偏光無依存化については、上記の組み合わせ構造ではまだ実現できておらず、さらなる検討が必要となる。

(2) マイクロリング共振器を両側アームに装荷し、プッシュ・プル駆動によって低動作電圧化が期待できる 2×2 MRR 装荷 MZI 光スイッチの設計と、その光スイッチング特性の理論解析を行った。コア層は多重 FACQW を用いることを想定し、量子閉じ込めシュタルク効果 (QCSE) によってマイクロリング共振器の位相変調するものとした。今回設計した MRR-MZ 光スイッチについて理論透過特性及びスイッチング特性の解析を行い、リング共振器の周回長約 480 ミクロンの素子において駆動電圧 0.24 V というこれまでにない低電圧動作が可能であることを示した。

(3) MZI のクロストーク (消光比) 特性の向上を図るため、多モード干渉素子 (MMI) における分岐比の動的制御について検討を行った。その結果、1 入力 2 出力ではあるが、MMI 長が 100 ミクロン以下のもので、20% 程度の光出力の分岐比を制御できる構造を見だし、BPM および FDTD によりその特性を明らかにした。これにより、作製誤差等により制限されていたクロストークが大幅に

改善することが可能になった。

(4) 2×2 MRR 装荷 MZI 光スイッチを試作した。エピタキシャル層構造は有機金属気相成長法を用いて作製し、縮小投影露光法を用いて導波路および電極構造のパターニングを行った。導波路形成は、塩素系ガスを用いた ICP ドライエッチングを用いた。素子作製後、その動作特性の評価を行った。その結果、片側 MRR による光スイッチング動作は確認できたが、所望のプッシュ・プル駆動は実現できなかった。原因を調査したところ、導波路構造の一部が設計通り作られておらず、また、導波路埋め込みに用いた BCB(ベンゾシクロブテン)樹脂膜の膜厚不均一性のため、一部、電極の導通が不十分であることが明らかになった。これらは、作製条件をさらに詰めることで解決可能であり、ほぼ、作製プロセスの確立が行えたと考えている。

(5) 2×2 MRR 装荷 MZI 光スイッチについて、その有用性を別の材料でも実証するため、シリコン細線光導波路を用いた素子を作製した。MRR の周回長は約 56 ミクロンで、MRR ペアを 2 つ備えた。位相変調にはシリコンの熱光学効果を用いた。その結果、動作電力 0.4 mW、動作電圧 120 mV のプッシュ・プル動作と多波長同時(独立)変調動作を達成することに成功した。31 kHz の(熱光学効果を用いたデバイスとしては)高速動作も実証した。

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 9 件)

- (1) T. Miyamoto, S. Umehara, H. Kobayashi, R. Taniguchi, R. Katouf, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "All optical Flip-Flop and Inverter Using Adjacent Lasing Wavelengths by Semiconductor Microring Laser," Jpn. J. Appl. Phys., vol.53, paper no.08MB04 (6 pages) (2014).
- (2) R. Gautam, H. Kaneshige, H. Yamada, R. Katouf, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Therm-Optically-Driven Silicon Microring-Resonator-Loaded Mach-Zehnder Modulator for Low-Power Consumption and Multiple-Wavelength Modulation," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 53, 022201 (2014).[7 pages]
- (3) H. Kamiya, T. Goto, H. Ikehara, R. Katouf, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Hitless wavelength-selective switch with quadruple series-coupled microring resonators using multiple-quantum-well waveguides," Opt. Express, vol. 21, no. 18, pp.20837–20850 (2013).
- (4) H. Kaneshige, R. Gautam, Y. Ueyama, R. Katouf, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Low-voltage quantum well microring-enhanced Mach-Zehnder modulator," Opt. Express, vol. 21, no. 14, pp.16888–16900 (2013).
- (5) H. Ikehara, T. Goto, H. Kamiya, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Hitless wavelength-selective switch based on quantum well second-order series-coupled microring resonators," Opt. Express, vol. 21, Iss. 5, pp. 6377–6390 (March 2013).
- (6) S. Kashima, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Proposal of Compact Tunable 1×2 Multimode Interference Splitter Based on Multiple Quantum Well", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 52, 04CG02 (2013).(5 pages)
- (7) H. Kamiya, T. Nagata, Y. Ueyama, T. Makino, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Coherent Coupling in High-Mesa Semiconductor Directional Coupler," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 52, 022502 (2013).(6 pages)
- (8) H. Yajima, M. Nishimura, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Proposal of All-Optical Active Microring Logic Gate for Microring Processor," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51, 122201(9 pages) (2012).
- (9) T. Arakawa, T. Hariki, Y. Amma, M. Fukuoka, M. Ushigome, and K. Tada, "Low-Voltage Mach-Zehnder Modulator with InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51 no. 4, 042203 (6 pages) (2012).

〔学会発表〕(計 34 件)

(国際会議および国内招待講演のみ)

- (1) S. Ishihara, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Design of Silicon Microring-Enhanced Mach-Zehnder Interferometer Biosensor," International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) 2014, PB06, Kanto Gakuin Univ. (Nov. 18, 2014).
- (2) K. Hori, S. Inoue, M. Nishimura, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Design of Low-Voltage Double Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Optical Switch," International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) 2014, PB05, Kanto Gakuin Univ. (Nov. 18, 2014).
- (3) N. Hayasaka, H. Ikehara, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Design of Quadruple Series-Coupled Quantum Well Microring Wavelength-Selective Switch Considering Chebyshev Condition for Optical Communications," International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) 2014, PB04, Kanto Gakuin Univ. (Nov. 18, 2014).
- (4) M. Kaneko, N. Kawasaki, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Compact Tunable 1×2 Optical Multi-Mode Interference 3 dB Coupler Using Tapered Structure," International Symposium on Materials Science and

- Surface Technology (MSST) 2014, PB03, Kanto Gakuin Univ. (Nov. 18, 2014).
- (5) H. Honma, R. Gautam, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Theoretical Analysis of Silicon Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Optical Modulator with Interleaved PN Junctions," International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) 2014, PB02, Kanto Gakuin Univ. (Nov. 18, 2014).
 - (6) T. Ushiyama, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Compact Polarization Beam Splitter Based on Multi-Width Multimode Interference Device," The 6th PCGMR-NCKU Symp. Nano-Technology/-Materials for Future Devices and Bio/Medical Applications, P-48, National Cheng Kung University, Taiwan (Sep.3, 2014).
 - (7) N. Kawasaki, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Electro-Optic Tunable Quantum Well Multimode Interference 3-dB Splitter for High-Extinction-Ratio Mach-Zehnder Modulators," The 6th PCGMR-NCKU Symp. Nano-Technology/-Materials for Future Devices and Bio/Medical Applications, P-41, National Cheng Kung University, Taiwan (Sep.3, 2014).
 - (8) T. Ushiyama, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Proposal of Compact Polarization Beam Splitter Based on Semiconductor Multimode Interference Device," The 15th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), D7-O28-004, Fukuoka University (August, 2014).
 - (9) N. Kawasaki, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Electro-Optic Tunable Quantum Well Multimode Interference 3-dB Splitter for High-Extinction-Ratio Mach-Zehnder Modulators," The 15th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), D7-O28-003, Fukuoka University (August, 2014).
 - (10) N. Kawasaki, M. Kaneko, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Tunable Multimode Interference Coupler Based on Electrorefractive Index Change in Multiple Quantum Well," International Symposium on Highly-Controlled Nano- and Micro-Scale Functional Surface Structures for Frontier Smart Materials 2014, PB06, Kanto Gakuin University (May 17, 2014).
 - (11) T. Ushiyama, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Design of Compact Polarization Beam Splitter Based on Semiconductor Multi-Width Multimode Interference Device," International Symposium on Highly-Controlled Nano- and Micro-Scale Functional Surface Structures for Frontier Smart Materials 2014, PB05, Kanto Gakuin University (May 17, 2014).
 - (12) R. Gautam, S. Ishihara, H. Homma, R. Katouf, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Thermo-Optic Silicon Microring-Enhanced Mach-Zehnder Switch," International Symp. Highly-Controlled Nano- and Micro-Scale Functional Surface Structures for Frontier Smart Materials 2014, PB04, Kanto Gakuin University (May 17, 2014).
 - (13) T. Sakamoto, R. Gautam, S. Ishihara, S. Kita, T. Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Proposal of Ion Sensor Based on Compound Semiconductor Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Interferometer," Int. Symp. Materials Science and Surface Technology 2013 (MSST2013), PB21 (Nov. 29, 2013).
 - (14) N. Kawasaki, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Fabrication of Electro-Optic Tunable 1×2 Multimode Interference Splitter," Int. Symp. Materials Science and Surface Technology 2013 (MSST2013), PB19 (Nov. 29, 2013).
 - (15) M. Nishimura, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Design of Low-Voltage 2×2 Optical Switch Based on Quantum Well Microring-Enhanced Mach-Zehnder Interferometer," Int. Symp. Materials Science and Surface Technology 2013 (MSST2013), PB13 (Nov. 29, 2013).
 - (16) H. Ikehara, H. Kamiya, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Improvement of Extinction Ratio of Wavelength-Selective Switch Using Quantum Well Double-Series-Coupled Microring Resonators," Int. Symp. Materials Science and Surface Technology 2013 (MSST2013), PB12 (Nov. 29, 2013).
 - (17) H. Tominaga, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Potential-Tailored Strained InGaAs Quantum Well for Polarization-Independent 2×2 Optical Switch," Int. Symp. Materials Science and Surface Technology 2013 (MSST2013), PB11 (Nov. 29, 2013).
 - (18) T. Sekiguchi, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Composite Structure of InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well for High-Performance Phase Modulator," Int. Symp. Materials Science and Surface Technology 2013 (MSST2013), PB10 (Nov. 29, 2013).
 - (19) R. Gautam, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Mach-Zehnder Optical Switch Thermo-Optically Controlled Silicon Microring Resonator Mach-Zehnder Modulator for Low Power Operation on Cascaded and Push-Pull Microring Design," Int. Symp. Materials Science and Surface Technology 2013 (MSST2013), PB01 (Nov. 29, 2013).
 - (20) T. Miyamoto, S. Umehara, H. Kobayashi, R. Taniguchi, R. Katouf, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "All optical flip-flop and inverter

- using adjacent lasing wavelengths emitting from semiconductor microring laser," 18th Microoptics Conference (MOC'13), G4, Tokyo (Oct. 29, 2013).
- (21) R. Gautam, S. Ishihara, H. Kaneshige, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Low Driving Power Push-Pull Modulator for Multi-Wavelength Modulation and 4×4 Switch Using Silicon Microring Resonator Loaded Mach-Zehnder Interferometers by Thermo-Optic Effect", 18th Microoptics Conference (MOC'13), B5, Tokyo (Oct. 28, 2013).
- (22) H. Tominaga, J.-H. Noh, and T. Arakawa, "Potential-Tailored Strained InGaAs Quantum Well for Polarization-Dependent Optical Switch," 18th OptoElectronics and Communications Conf. 2013 (OECC2013), ThL3-7, Kyoto (July 4, 2013).
- (23) H. Ikehara, H. Kamiya, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Improvement of Extinction Ratio of Wavelength-Selective Switch Using Quantum Well Double-Series-Coupled Microring Resonators," 18th Opto Electronics and Communications Conf. 2013 (OECC2013), TuT4-6, Kyoto (July 2, 2013).
- (24) R. Gautam, S. Ishihara, H. Kaneshige, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Thermo-Optically Controlled Silicon Microring Resonator Mach-Zehnder Modulator with Cascaded and Push-Pull Microring Configuration," 18th OptoElectronics and Communications Conf. 2013 (OECC2013), WM2-5, Kyoto (July 3, 2013).
- (25) H. Kamiya, T. Goto, K. Redouane, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "First Demonstration of Hitless Wavelength Selective Switch Based on Quadruple Series Coupled Multiple Quantum Well Microring Resonator," Optical Fiber Communication Conference and Exposition/The National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) (OFC/NOOEC 2013), OW1C.5, Anaheim, USA (March 2013).
- (26) R. Gautam, H. Kaneshige, H. Yamada, K. Redouane, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Silicon Microring Resonator Mach-Zehnder Modulator with Low-Power Consumption Using Thermo-Optic Effect," IEEE Photon. Conf., ThQ2, Burlingame, California (Sep.27, 2012).
- (27) H. Kamiya, T. Nagata, Y. Ueyama, T. Makino, T. Arakawa and Y. Kokubun, "Analysis of Coherent Coupling in High-Mesa Directional Coupler," 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), PS-7-20, Kyoto (Sep. 26, 2012).
- (28) H. Yajima, M. Nishimura, T. Arakawa and Y. Kokubun, "Proposal of All-Optical Active Microring Logic Gate," 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), PS-7-7, Kyoto (Sep. 26, 2012).
- (29) S. Kashima and T. Arakawa, "Proposal of Electro-Optic Tunable 1x2 Multimode Interference Splitter Based on Multiple Quantum Well," 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), PS-7-5, Kyoto (Sep. 26, 2012).
- (30) H. Ikehara, T. Goto, H. Kamiya, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Demonstration of Hitless Wavelength-Selective Switch Based on InGaAs Quantum Well Microring Resonators," Triangle Symposium on Advanced ICT (TriSAI) 2012, R-3-2, Univ. Electro-Communications, Tokyo (Sep. 19, 2012).
- (31) H. Ikehara, T. Goto, H. Kamiya, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Hitless wavelength-selective switch using multiple quantum well second-order series coupled microring resonators," Photonics in Switching (PS) 2012, Th-S23-O07, Ajaccio, Corsica, France (Sep.13, 2012).
- (32) 荒川太郎, 國分泰雄, "半導体微小リング共振器装荷マッハ・ツェンダー干渉計光制御デバイス"(招待講演)電子情報通信学会超高速光エレクトロニクス研究会(UFO)第1回研究会,東京(2015年7月22日発表予定)
- (33) 荒川太郎, "InGaAs/InAlAs 量子井戸マッハ・ツェンダー光変調器"(招待講演), 電子情報通信学会集積光デバイスと応用技術時限研究専門委員会(IPDA)シンポジウム, CI-5-2, 富山(2012年9月11日)
- (34) 荒川太郎, 國分泰雄, "InGaAs ポテンシャル制御量子井戸マッハ・ツェンダー光変調器"(招待講演), 電子情報通信学会マイクロ波・ミリ波フォトンクス研究会, MWP2012-5, 東京(2012年4月6日)
- 〔図書〕(計0件)
 〔産業財産権〕なし.
 〔その他〕
 ホームページ
<http://www.arakawa-lab.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒川 太郎 (ARAKAWA TARO)
 横浜国立大学・工学研究院・准教授
 研究者番号：40293170

(2) 研究分担者

國分 泰雄 (KOKUBUN YASUO)
 横浜国立大学・工学研究院・教授
 研究者番号：60134839