

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03577

研究課題名(和文) 偏波を自在に制御する半導体マイクロリング偏光スイッチの開発

研究課題名(英文) Development of Semiconductor Microring Resonator-Based Polarization Switch

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・准教授

研究者番号：40293170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：申請者らは、半導体における位相(屈折率)変化を用いた光変調器、光スイッチの高速化、低動作電圧化、高機能化に取り組み、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)とマイクロリング共振器(MRR)をベースに、その光制御デバイスへの応用の研究を行ってきた。そこで、上記の大きな電界誘起屈折率変化を有するFACQWとMRRの位相変化増大効果を活用した光変調器・光スイッチの研究成果を偏光制御へ展開することで、次世代光通信のための半導体偏光制御スイッチを実現すべく、本研究を開始するに至った。

研究成果の概要(英文)：We proposed and developed two types of quantum well microring-resonator (MRR)-based polarization control devices. A five-layer asymmetric coupled quantum well (FACQW) is used in a core layer as the quantum well. One is an MRR TE-TM polarization switch with an L-shaped asymmetric waveguide. It was shown that using the combination of the large electric-field-induced refractive index change in the quantum well and filtering characteristics of the MRR, low-voltage polarization switch can be realized. The other one is a Stokes Vector modulator. The device is composed of an intensity modulator based on a Mach-Zehnder interferometer and double MRR phase shifters. Owing to an enhanced phase shift in the FACQW double MRR, the size of the device can be significantly reduced and can be driven by low voltage.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：応用光学 光スイッチ 微小共振器 偏光 量子井戸 半導体

1. 研究開始当初の背景

光情報通信ネットワークの大容量化に伴い、時分割多重、波長分割多重を経て、デジタルコヒーレント通信が登場し、振幅、位相、直交2偏波を活用した四位相偏移変調(QPSK)や偏波多重QPSK方式などが実用化されている。さらに、次世代信号変調方式として、光の偏波状態を高速に変調する4次元信号変調方式が提案されており、今後、光送信機側での偏光制御の重要性が増していくと予想される。TE偏光をTM偏光(またはその逆)に変換する固定の偏光変換器は、化合物半導体やシリコンなどで多くのものが既に提案、実用化されているが、偏光変換を自在に切替えられる偏光変調器に関して、NTTからLiNbO₃変調器をベースとする3次元シンプレックス変調器)や、東大からInP系モノリシック偏光変調器などの優れた提案が出始めたに過ぎない。いずれも数mm以上と素子サイズが大きく、駆動電圧も大きいという問題があり、また、前者は半導体レーザを含む他の半導体素子との集積化も困難である。

これまで、申請者らは、半導体における位相(屈折率)変化を用いた光変調器、光スイッチの高速化、低動作電圧化、高機能化に取り組み、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)とマイクロリング共振器(MRR)をベースに、その光制御デバイスへの応用の研究を行ってきた。

そこで、上記の大きな電界誘起屈折率変化を有するFACQWとMRRの位相変化増大効果を活用した光変調器・光スイッチの研究結果を偏光制御へ展開することで、次世代光通信のための半導体偏光制御スイッチを実現すべく、本研究を開始するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、非対称光導波路を有する量子井戸MRR偏光スイッチ(MRR-PS)を提案・開発してその有用性を実証するとともに、本デバイスを基本要素とする高機能デバイスへの応用可能性を示すことを目的とする。具体的には、素子サイズを100 μm 以下、動作電圧を2V以下、スイッチング作速度は数ナノ秒以下というこれまでにない小型化、低電圧化の実現を目標とする。さらに、本素子と申請者らがこれまで開発してきたMRR波長可変フィルタを融合した、小型・高速MRR波長可変偏光スイッチの実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) マイクロリング共振器偏波スイッチの開発

MRR内における偏光回転についてはこれまで研究例がないため、偏光回転制御に最適なMRR導波路構造を探索、設計するととも

に、理論計算により上記の基本動作原理を探索する。偏光回転を行うには、FACQWの等価屈折率変化量のTE/TM偏光無依存化が望ましいので、量子井戸構造の設計と、それを組み込んだバイスレベルでの設計を行う。MRRとバスラインの間の結合導波路も偏光無依存化も必須なので、その最適設計も行う。(2) マイクロリング共振器を用いたストークスベクトル変調器の開発

提案したTE/TM偏波スイッチよりもさらに偏波利用の自由度と高めるため、ストークスベクトル変調デバイスに着目し、FACQWをコア層に適用し、低消費電力で大きな屈折率変化を与えることが可能なマイクロリング共振器を融合したストークスベクトル変調器を提案、設計を行う。

(3) 可変成形ビーム型電子ビーム露光装置による素子作製と動作特性評価

上記(1)、(2)で提案、設計した素子の作製プロセスを開発する。特に、高速な描画が可能な可変成形ビーム型電子ビーム露光装置を全てのパターン描画に利用する。光導波路の形成には誘導結合プラズマ反応性イオンエッチング(ICP-RIE)法を用いた精度の高い2段階エッチングプロセスの確立し、試作を行う。作製したデバイスの動作特性を評価し、設計にフィードバックする。

4. 研究成果

(1) マイクロリング共振器偏波スイッチの提案

本研究では、研究目的で述べた非対称光導波路を有するMRR型TE/TM偏波スイッチの提案と設計を行った。

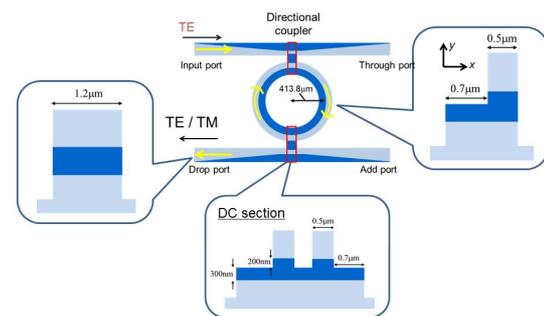


図1. 提案するマイクロリング共振器偏波スイッチの全体図

図1に提案するデバイス全体図を示す。MRRは、非対称構造光導波路(L字型導波路)を用い、バスライン導波路との結合部(方向性結合器)は、構造が光の進行方向に対し対称となっており、偏波無依存性を有する構造となっている。コア層にはFACQWを用いた。FACQWは、図2のような屈折率変化特性を有し、低電圧でTEモード光のみを選択的に位相を変化させることができる。これにより、伝搬に伴う2つのモード間の位相差を制御でき、TEモード光の変換部長が変化するので

出力されるモードを制御できる．すなわち，モード変換機能を有するL字型導波路での位相回転量を電圧制御できる．

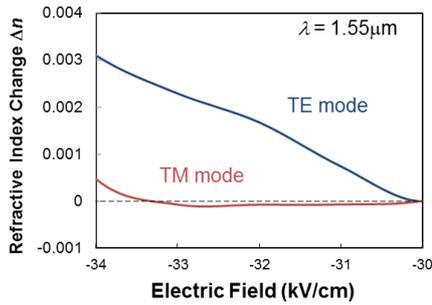


図2 .FACQW の電界誘起屈折率変化特性

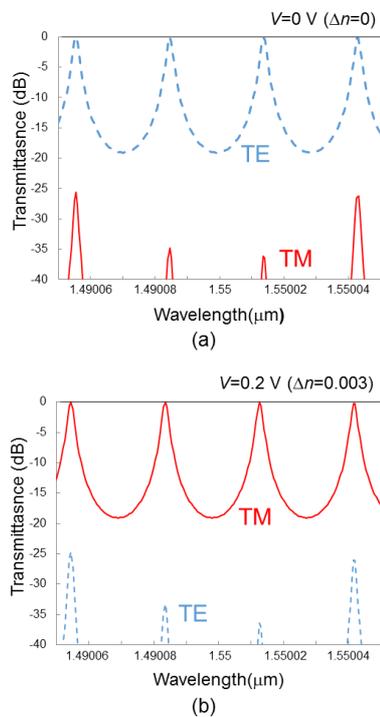


図3 .偏波スイッチのスイッチング特性(ドロップポートからみた光透過特性). (a)電圧印加前, (b)電圧印加後.

本デバイスの設計にあたって，特性の計算方法の確立も行った．偏波状態が変化する光学素子の計算に有効なジョーンズ法と，MRR波長選択スイッチの設計などの際に用いる伝搬行列を組み合わせることで偏波状態の変化を含む伝達関数を導出した．

図3に，ドロップポートから見た本デバイスの光透過特性計算結果を示す．FACQW コア層に0.003の屈折率変化を与えると，出力光がTE偏波からTM偏波に切り替わることがわかる．クロストークは-25dB以下と良好である．動作電圧は0.2Vに相当する．L字型導波路を有するMRRという比較的単純な構造のデバイスで，低電圧で偏波スイッチングが可能であることを明かにした．

(2) マイクロリング共振器を用いたストークスペクトル変調器の提案

(1)で提案したTE/TM偏波スイッチよりもさらに偏波利用の自由度と高めるため，ストークスペクトル変調デバイスに着目した．ストークスペクトル変調方式により，データ伝送の更なる高効率化・高速化を実現することができる．

本研究では(1)でも用いたFACQWをコア層に適用し，低消費電力で大きな屈折率変化を与えることが可能なマイクロリング共振器を融合したストークスペクトル変調器を提案し，その特性を検討した．

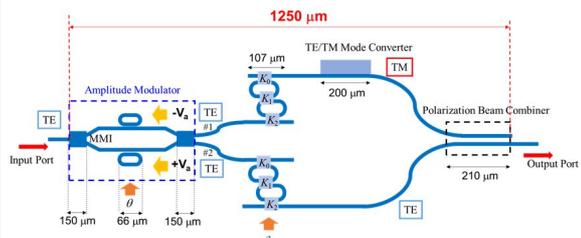


図4 . 提案するストークスペクトル変調器の全体図

図4に提案するデバイスの構造を示す．入力部には入力したTE偏波光を任意の比率に分岐できるマッハ・ツェンダー強度カプラを設ける．その後，ダブルMRR位相変調器を設け，分岐した2つのTE光の位相を変化させ，そのうち片方をTMに偏光した後，両導波光を合波する．これにより，入力TE偏波光をポアンカレ球上の任意の点に変換することができる．ダブルMRR位相変調器における光透過特性を図5に示す．フラットトップな透過帯域を有し，位相増大係数は約5.7が得られた．すなわち，動作電圧または位相変調部長を約1/6にできることを示しており，大幅な低電圧動作化，または小型化ができることができる．

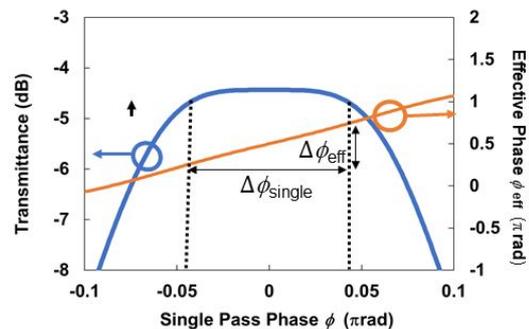


図5 . ダブルMRR位相変調器における光透過特性．

電界誘起屈折率変化の大きなFACQWおよび位相変化増大効果を有するMRR(周回長283 μm)を融合することにより，動作電

圧約 1.5 V, 全長約 1.2 mm, 動作速度約 12 GHz の小型ストークスベクトル変調器が実現できることを明らかにした。

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 6 件)

Nobuyuki Hayasaka, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Design of Fourth-Order Series Coupled Microring Filter on Chebyshev Filter Condition," *IEICE Trans. Electron.*, 査読有, vol. E99-C, no. 2, 235-241 (Feb. 2016).
10.1587/transele.E99.C.235

Soichiro Yoshida, Shintaro Ishihara, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Highly sensitive optical biosensor based on silicon-microring-resonator-loaded Mach-Zehnder interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 56, no. 4S, 04CH08 (Apr. 2017).
10.7567/JJAP.56.04CH08

庄原大祐, 盧柱享, 荒川太郎, "構造的複屈折を考慮した多幅多モード干渉計型偏波分離器の設計", *電子情報通信学会和文論文誌*, 査読有, vol. J100-C, no.5, pp. 259-260 (May 2017).

Soichiro Yoshida, Shintaro Ishihara, Yoshiaki Nishijima, Yasuo Kokubun, and Taro Arakawa, "Improved Sensitivity of Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Interferometer Biosensor," *Sensors and Materials*, 査読有, vol. 29, no. 9, pp. 1241-1246 (Sep. 2017).

10.18494/SAM.2017.1587

Keita Suzuki, Tomoki Hirayama, Yasuo Kokubun, and Taro Arakawa, "Proposal of Waveguide-Type Polarization Switch Based on Microring Resonator," *IEICE Trans. Electron.*, 査読有, vol. E100-C, no. 10, pp. 767-774 (Oct. 2017).
10.1587/transele.E100.C.767

Yuki Yabushita, Hiroki Takazawa, Yasuo Kokubun, and Taro Arakawa, "32-Gbps single silicon microring resonator-loaded Mach-Zehnder modulator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有 (2018) (in press).

[学会発表](計 31 件)

Taro Arakawa, "Potential Tailored Quantum Wells and Their Application to Photonic Devices," (Invited) 4th International Symp. Materials Science and Surface Technol. (MSST) 2015, PL09, Yokohama (Aug. 6, 2015).

H. Homma, R. Gautam, T. Arakawa, and Y.

Kokubun, "Silicon microring resonator-loaded Mach-Zehnder modulator with interleaved pn junction," 20th Microoptics Conference 2015 (MOC '15), G2, Fukuoka (Oct. 27, 2015).

T. Arakawa, H. Homma, R. Gautam, and Y. Kokubun, "Silicon microring resonator-loaded Mach-Zehnder modulator," (Invited) Energy Materials Nanotechnol. (EMN) Meet. Optoelectron. 2016, B10, Thailand (Apr. 12, 2016).

Naoki Kawaguchi, Kento Hori, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Design for High Speed Operation of Double Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder 2x2 Quantum Well Optical Switch," 21st Optoelectron. Com. Conf./Int'l. Conf. Photonics in Switching 2016 (OECC/PS 2016), ThD3, Nigata (Jul. 7, 2016).

Keita Suzuki, Tomoki Hirayama, and Taro Arakawa, "Proposal of Compact TE/TM Polarization Switch Based on Microring Resonator," 21st Optoelectron. Com. Conf./Int'l. Conf. Photonics in Switching 2016 (OECC/PS 2016), WD4, Nigata (Jul. 6, 2016).

Soichiro Yoshida, Shintaro Ishihara, Taro Arakawa and Yasuo Kokubun, "Highly-Sensitive Optical Biosensor Based on Si Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Interferometer," International Conf. Solid State Device and Materials (SSDM) 2016, C-1-06, Tsukuba (Sep. 27, 2016).

Daisuke Okitsu, Yu Yamano, Joo-Hyong Noh, and Taro Arakawa, "Proposal of High-Extinction-Ratio Multimode Interference Electroabsorption Optical Modulator," The 24th Congress of Int'l Commission for Optics (ICO-24), Th1J-03, Tokyo (Aug. 24, 2017).

Takuya Komatsubara, Yasuo Kokubun, and Taro Arakawa, "Design of Wavelength Filter Based on Fourth-Order Microring Resonators with Different Radii Using Digital Filter Design Method," The 24th Congress of Int'l Commission for Optics (ICO-24), W1J-06, Tokyo (Aug. 23, 2017).

S. Yoshida, Y. Nishijima, Y. Kokubun, and T. Arakawa, "Improvement of Sensitivity of Biosensor Based on Si Microring-Enhanced Mach-Zehnder Interferometer," The 24th Congress of Int'l Commission for Optics (ICO-24), P6-01, Tokyo (Aug. 22, 2017).

Yuki Yabushita, Hiroki Takazawa, Yasuo

Kokubun, and Taro Arakawa, "32-Gbps Modulation of Single Silicon Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Modulator," 22nd Microoptics Conf. (MOC) 2017, A-4, Tokyo (Nov. 20, 2017).
 Tomoki Hirayama, Keita Suzuki, Yasuo Kokubun, and Taro Arakawa, "Proposal of Quantum Well Polarization Modulator Based on Double Microring Resonator for Stokes Vector Modulation," 22nd Microoptics Conf. (MOC) 2017, P-80, Tokyo (Nov. 21, 2017).
 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), 東京大学(2015年7月22日)
 吉田草一郎, 石原慎太郎, 荒川太郎, 國分泰雄, "シリコンマイクロリング装荷型マッハ・ツェンダー干渉計バイオセンサーのセンシング評価", 電子情報通信学会研究会, OPE2015-70, 青森(2015年8月27日)
 吉田草一郎, 石原慎太郎, 荒川太郎, 國分泰雄, "シリコンマイクロリング装荷型マッハ・ツェンダー干渉計バイオセンサーの特性評価", 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 13a-2B-7, 名古屋(2015年9月13日)
 本間洋行, ゴータム ラジディープ, 荒川太郎, 國分泰雄, "インターリーブ型PN接合を有するシリコンマイクロリング装荷型マッハ・ツェンダー光変調器", 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-2S-4, 名古屋(2015年9月13日)
 早坂伸之, 池原広樹, 荒川太郎, 國分泰雄, "4次直列結合異径リング波長選択スイッチにおける損失を考慮したチェビシェフフィルタ特性の解析", 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-2F-9, 名古屋(2015年9月16日)
 本間洋行, ラジディープ・ゴータム, 荒川太郎, 國分泰雄, "インターリーブ型PN接合を有するシリコン微小リング装荷マッハ・ツェンダー光変調器の動作特性", 第3回集積光デバイスと応用技術研究会(IPDA), P05, 三島(2016年3月3日)
 川口直輝, 堀健人, 荒川太郎, 國分泰雄, "ダブル微小リング共振器装荷型マッハ・ツェンダー2x2量子井戸光スイッチの高速化の検討", 第3回集積光デバイスと応用技術研究会(IPDA), P04, 三島(2016年3月3日)
 川口直輝, 堀健人, 荒川太郎, 國分泰雄, "マイクロリング共振器装荷型マッハ・ツェンダー2x2光スイッチの高速化に関する検討", 第63回応用物理学会春季学術講演会, 20p-S321-15, 東京, 2016年3月20日
 早坂伸之, 荒川太郎, 國分泰雄, "高次直

列量子井戸マイクロリング波長選択フィルタの損失を考慮した伝搬行列法による設計と解析"第63回応用物理学会春季学術講演会, 21a-S321-9, 東京, 2016年3月21日

- ②① 鈴木啓大, 平山智輝, 荒川太郎, 國分泰雄, "構造的複屈折を考慮した量子井戸光偏波スイッチの設計", 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 15a-P7-4, 新潟(2016年9月15日)
- ②② 植山翔太, 川崎直道, 盧柱亨, 荒川太郎, "電界制御型多モード干渉カブラの分岐比・位相調整特性", 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 15a-P7-3, 新潟(2016年9月15日)
- ②③ 沖津大輔, 山野祐, 盧柱亨, 荒川太郎, "高消光比を有する多モード干渉計型電界吸収型光変調器の提案", 電子情報通信学会研究会, OPE2016-113, 沖縄(2016年12月9日)
- ②④ 河村雄作, 青木椋祐, 荒川太郎, 國分泰雄, "非対称方向性発振マイクロリングレーザのための帰還光位相制御特性の測定", 第64回応用物理学会春季学術講演会, 15p-422-15, 横浜(2017年3月15日)
- ②⑤ 沖津大輔, 山野祐, 盧柱亨, 荒川太郎, "多モード干渉計を有する高消光比電界吸収型光変調器の提案", 第64回応用物理学会春季学術講演会, 16a-422-1, 横浜(2017年3月16日)
- ②⑥ 小松原拓也, 荒川太郎, 國分泰雄, "デジタルフィルタ設計手法を用いた異径直列結合マイクロリング共振器波長フィルタの設計と解析", 第64回応用物理学会春季学術講演会, 16a-316-8, 横浜(2017年3月16日)
- ②⑦ 高澤弘樹, 本間洋行, 荒川太郎, 國分泰雄, "単一シリコンマイクロリング装荷型マッハ・ツェンダー光変調器の高速変調特性", 第64回応用物理学会春季学術講演会, 17p-F204-6, 横浜(2017年3月17日)
- ②⑧ 平山智輝, 荒川太郎, "オールパス型マイクロリング共振器偏波制御デバイスのための基礎検討", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, P1-10, 熱海(2017年4月20日)
- ②⑨ 高澤弘樹, 藪下裕貴, 國分泰雄, 荒川太郎, "シリコンマイクロリング装荷型マッハ・ツェンダー光変調器の設計と高速変調" 電子情報通信学会研究会, レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE), 金沢(2017年5月25日)
- ③⑩ 小松原拓也, 國分泰雄, 荒川太郎, "導波損失を考慮した異径直列結合マイクロリング共振器波長フィルタのデジタルフィルタ設計手法", 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 7p-C14-7, 福岡

(2017年9月7日)

- ③1 青木 椋祐, 小林 直樹, 河村 雄作, 荒川 太郎, 國分 泰雄 “半導体マイクロリングレーザを用いた全光フリップフロップおよびインバータ動作の切り替わり条件の実験的検討”第65回応用物理学会春季学術講演会, 18p-B203-3, 2018年3月18日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<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・大学院工学研究院・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・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 60134839

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

青木 椋祐 (AOKI, Ryosuke)
池原 広樹 (IKEHARA, Hiroki)
植山 翔太 (UEYAMA, Shota)
沖津 大輔 (OKITSU, Daisuke)
川口 直輝 (KAWAGUCHI, Naoki)
川崎 直道 (KAWASAKI, Naomichi)
河村 雄作 (KAWAMURA, Yusaku)
ラジディーブ・ゴータム (Rajdeep, GAUTAM)
小林 直樹 (KOBAYASHI, Naoki)
小松原 拓也 (KOMATSUBARA, Takuya)
高澤 弘樹 (TAKAZAWA, Hiroki)
盧 柱亨 (NOH, Ryosuke)
早坂 伸之 (HAYASAKA, Nobuyuki)
平山 智輝 (HIRAYAMA, Tomoki)
堀 健人 (HORI, Kento)
本間 洋行 (HOMMA, Hiroyuki)
藪下 裕貴 (YABUSHITA, Yuki)
山野 祐 (YAMANO, YU)