

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月22日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360030

研究課題名（和文） 半導体マイクロリング共振器を有する超低電圧動作マッハ・ツェンダー光制御素子の開発

研究課題名（英文） Development of Low-Voltage Semiconductor Mach-Zehnder modulator with single Microring resonator

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

研究成果の概要（和文）：特殊な半導体超薄膜構造における巨大な電界誘起屈折率変化効果，マイクロリング共振器における位相変化増大効果，マッハ・ツェンダー干渉計の3つを融合した新しい光変調素子の提案・開発を行った．その結果，上記2つの効果の相乗作用により，動作電圧を従来構造のマッハ・ツェンダー干渉計型変調器よりも動作電圧を10分の1以下に低減することに成功した．本成果は，ますます高度化する光通信ネットワークにおける消費電力低減に大いに貢献するものである．

研究成果の概要（英文）：We have proposed and developed a novel Mach-Zehnder optical modulator using a large electric field induced refractive index change in special ultrathin semiconductor films and a phase shift enhancement effect in microring resonators. As a result, we succeeded in realizing a very low driving voltage optical modulator due to the synergy between the above two effects.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，応用光学・量子光工学

キーワード：光変調器，量子井戸，マイクロリング共振器，化合物半導体，マッハ・ツェンダー干渉計

1. 研究開始当初の背景

近年の大容量光情報通信の進展に伴い，光変調，光スイッチなど光制御デバイスの機能への要求は急速に高度化している．半導体光変調素子では，量子井戸の電界吸収効果が多用されているが，動作速度や許容入力光強度，動作電圧等の限界に近づきつつある．一方，ニオブ酸リチウム(LN)では，その大きな電気光学効果(位相変化)を利用し，DQPSK(差動四相位相偏変調)による伝送シンボルの

多値化などの高速化・高機能化が進んでいるが，小型化が望めない．

上記のことから，量子井戸における電界吸収効果(吸収変化)ではなく，電界誘起屈折率効果(位相変化)を利用できれば非常に有益である．しかし，従来用いられてきた矩形ポテンシャル量子井戸の電界誘起屈折率変化(位相変化)は小さいため，デバイスの動作電圧が高く(3～5V)，そのサイズが大幅に増加(位相変調部だけで2～4mm)してしまう

という問題がある。

上記の問題を解決する技術として、我々は巨大な電界誘起屈折率効果が期待される5層非対称結合量子井戸 (Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well, FACQW) について研究を行ってきた。低動作電界領域における巨大な電界誘起効果の実証、InGaAs/InAlAs FACQW マッハ・ツェンダー干渉計型光変調器の試作と低電圧動作の実証などを行ってきた。一方、マイクロリング共振器は、主に誘電体を用いた波長フィルタ等の優れた機能を有するデバイスが提案され、その有用性が実証されてきた。このマイクロリング共振器デバイスの第一人者である國分泰雄・横国大教授との検討を進めていく中で、半導体マイクロリング共振器とマッハ・ツェンダー干渉計との組み合わせにより、新機能が実現できる可能性につき検討を進め、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

特殊な量子井戸構造を有する非対称結合量子井戸の巨大な電界誘起屈折率効果、半導体マイクロリング共振器、マッハ・ツェンダー干渉計の3つを融合した新しい光変調デバイスの提案・開発を目的とする。本デバイスの有する高機能性、超低消費電力性、超低電圧性を実証できれば、超高速光通信ネットワーク、光集積回路のほか、スパコン等の光インターコネクションなどへ大きなインパクトを与える。

3. 研究の方法

(1) 提案するデバイスの動作特性の理論検討

本研究で提案するデバイスについて、その動作特性について検討を行った。光導波路部のコアに用いる InGaAs/InAlAs FACQW (動作波長 1.55 ミクロン帯) については、電界誘起屈折率変化特性を解析するため、 $k \cdot p$ 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理論計算を行い、本デバイスに適する構造の最適化と詳細な特性解析を行う。FACQW はその構造を若干変更することで、動作する電界領域を調整することができる。

また、マイクロリング共振器部については、マイクロリング、およびバスラインとマイクロリングの結合部の設計を行う。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構造を用い、結合率の制御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した。

(2) 分子線エピタキシー法による多重量子井戸ウエハの作製と評価

(1) の構造設計の結果を踏まえ、実際に分

子線エピタキシー法 (MBE) による五層非対称結合量子井戸 (FACQW) ウエハの作製とデバイス化の試作を行った。FACQW が理論的に予測される優れた特性を示すためには、分子層のレベルで FACQW 内の各層の厚さを精密に制御すると共に、界面の平坦性、急峻性を確保し、さらに多重 FACQW の各セット間の厚さ、組成の均一性も確保する必要がある。これまでの研究で、層厚誤差を 1~2 分子層程度以内に抑えた InGaAs/InAlAs FACQW 構造の作製は見通しがついているので、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。

導波路構造の作製は ICP ドライエッチング装置を用いて行う。直線導波路およびリング導波路単体の導波特性の評価を行い、塩素およびメタンの混合ガスを用いて低温で再現性の良いエッチング条件の最適化を行っていく。

(3) 片アームにマイクロリング共振器を有するマッハ・ツェンダー光変調器の設計と試作

アーム部にマイクロリング共振器を連結させたマッハ・ツェンダー干渉計型 (MRE-MZ) 光変調器は、マイクロリング共振器の位相変化の増大効果により動作電圧の大幅な低減が期待できる。多重 FACQW を光導波路に用いた MRE-MZ の特性の理論解析とデバイスの試作を行った。光導波路のコア層には、これまで開発してきた、透明波長領域で大きな電界誘起屈折率変化が期待される InGaAs/InAlAs 五層非対称結合量子井戸を用いることとした。まずは、マッハ・ツェンダー干渉計の片側アームにマイクロリングを設けた MRE-MZ 光変調器の特性の理論解析を行い、デバイス設計を行った。この設計に基づき、MRE-MZ 光変調器を試作した。層構造は分子線エピタキシー法により成長し、ドライエッチング法によりハイメサ導波路を製作した。InP をクラッド層とする pn 接合となっており、電圧印加によりマイクロリング共振器部のみの位相を変化させる構造とした。

(4) 片アームにマイクロリング共振器を有するマッハ・ツェンダー光変調器の特性改善

提案する光変調器の低動作電圧化をさらに図る方法として、コア層残留キャリアによって生じる電界不均一性があることを前提に、五層非対称結合量子井戸の構造最適化を行った。電界不均一性は、五層非対称結合量子井戸の電界誘起屈折率変化特性を劣化させることがわかっているが、コア層の場所にその構造を最適化することにより、特性劣化を抑制する。また、消光比の改善については、マッハ・ツェンダー干渉計の両アームの光電力分岐比を最適化するとともに、アーム長を調整することにより、消光比および動作電圧の低減を目指した。

(5) 両アームにマイクロリングを有する光

変調器の設計砥試作

(4)では、片側アームにのみマイクロリングを有していたが、両アームにマイクロリングを設けることで、プッシュ・プル動作によるさらなる低動作電圧化またはコンパクト化を図る。両アームの対称性が良いことから、消光比の更なる向上（目標 20dB 以上）を目指した。

4. 研究成果

(1) マッハ・ツェンダー干渉計の片側アームにマイクロリングを設けた MRE-MZ 光変調器の特性の理論解析を行い、周長 500 ミクロンのマイクロリングを用いた場合、約 0.2V まで動作電圧を低減できる可能性を示した。これは、従来の位相変調部長 500 ミクロンの通常のマッハ・ツェンダー干渉計型光変調器と比較して、動作電圧が 6 分の 1 程度に低減されることを意味する。

(2) 設計した MRE-MZ 光変調器を試作した。層構造は分子線エピタキシー法により成長し、ドライエッチング法によりハイメサ導波路を製作した。InP をクラッド層とする pn 接合となっており、電圧印加によりマイクロリング共振器部のみの位相を変化させる構造とした。試作した MRE-MZ 光変調器の DC 変調特性を測定したところ、約 2 倍の位相増大効果を確認することに成功した。ただし、消光比が約 4dB と悪い結果となったが、これらマイクロリング共振器との結合部での損失が大きく、両アームの光電力のバランスが悪かったことが原因と考えられる。

(3) 両アームの光パワーのバランスをとるためにリング共振器部での損失を考慮して入力側は非対称分岐として（分岐比 0.84:0.16）、消光比の改善を図った。その結果、波長 1550.1nm において、半波長電圧 3.5V、消光比 27dB を得られた。同じ位相変調部長をもつ通常のマッハ・ツェンダー変調器と比較して 5 倍の変調効率が得られ、消光比と位相変化増強効果の大幅な改善に成功した。これは、従来の矩形量子井戸を用いた従来型マッハ・ツェンダー干渉計型光変調器よりも動作電圧を 1/10 以下に低減できたことを意味する。さらに、高周波変調特性の測定を行い、約 4GHz までの動作が可能であることを確認した。この動作速度は、電気回路の容量・抵抗積で決まる時定数で律速されており、更なる高速化が可能である。

また、コア層残留キャリアによって生じる電界不均一性による量子井戸の電界誘起屈折率変化特性の劣化を抑制するため、多重五層非対称結合量子井戸の構造最適化について検討、試作を行った。その結果、電界誘起屈折率変化量はそれほど改善しなかったものの、残留不純物濃度の悪化によるトレランスの向上をできることを明らかにした。

(4) 両アームにマイクロリングを有する光変調器の特性の理論的検討を行い、また分子線エピタキシー法により結晶成長したウェハを用いてデバイス試作を行い、その変調特性を評価した。その結果、電界印加時のリング共振器における吸収増加により動作条件が悪化し、理論的に期待された特性は得られなかったが、消光比 5dB の動作およびプッシュ・プル動作が可能であることを実験的に示した。

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 7 件）

- ① 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, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51 no. 4, 論文番号:042203 (6 pages), 2012, DOI: 10.1143/JJAP.51.042203
- ② H. Kaneshige, Y. Ueyama, H. Yamada, H. Yajima, T. Arakawa, and Y. Kokubun, InGaAs/InAlAs Multiple Quantum Well Mach-Zehnder Modulator with Single Microring Resonator, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51, no. 2, 2012, 論文番号:02BG01 (6 pages), DOI: 10.1143/JJAP.51.02BG01
- ③ T. Makino, T. Gotoh, R. Hasegawa, T. Arakawa, and Y. Kokubun, Microring Resonator Wavelength Tunable Filter Using Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well, 査読有, J. Lightwave Technol. vol. 26, no. 16, 2011, pp. 2387-2393, DOI: 10.1109/JLT.2011.2159775
- ④ Y. Iseri, H. Yamada, Y. Goda, T. Arakawa, K. Tada, and N. Haneji, Analysis of electrorefractive index change in Ge/SiGe coupled quantum well for low-voltage silicon-based optical modulators, 査読有, Physica E, vol. 43, 2011, pp. 1433-1438, DOI: 10.1016/j.physe.2011.03.021
- ⑤ T. Arakawa, T. Toya, M. Ushigome, K. Yamaguchi, T. Ide and K. Tada, InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well Exhibiting Giant Electrorefractive Index Change, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 50, no. 3, 2011, 論文番号:032204, DOI: 10.1143/JJAP.50.032204
- ⑥ Y. Iseri, T. Arakawa, K. Tada, and N.

- Haneji, Influence of Heterointerface Abruptness on Electrorefractive Effect in InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 49 no. 4, 2010, 論文番号:4DG04(4 pages), DOI: 10.1143/JJAP.49.04DG04
- ⑦ M. Fukuoka, T. Toya, Y. Sawai, T. Arakawa, and K. Tada, Electrorefractive Effect in GaInNAs/GaAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 48, no.4, 2009, 論文番号:C154 (3 pages), DOI: 10.1143/JJAP.48.04C154
- [学会発表] (計16件)
(国際会議および国内招待講演のみ)
- ① 荒川太郎, 國分泰雄, 量子井戸マイクロリングマッハ・ツェンダー変調器の設計と試作 (依頼講演), 2012年電子情報通信学会総合大会, CI-1-3, 2012年3月20日, 岡山大学
- ② H. Yamada, Y. Ueyama, T. Arakawa, and Y. Kokubun, Theoretical Analysis of Semiconductor Double Microring Mach-Zehnder Modulator, 17th Microoptics Conference (MOC' 11), Nov. 1, 2011, Sendai
- ③ H. Kaneshige, Y. Ueyama, H. Yamada, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Quantum Well Mach-Zehnder Modulator with Single Microring Resonator and Optimized Arm Length", 17th Microoptics Conference (MOC' 11), Nov. 1, 2011, Sendai
- ④ H. Kaneshige, Y. Ueyama, H. Yamada, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Low Voltage InGaAs/InAlAs Quantum Well Mach-Zehnder Modulator with Single Microring Resonator", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 28, 2011, Nagoya
- ⑤ Y. Amma and T. Arakawa, Fabrication and Characterization of InGaAs/InAlAs Multiple FACQW Structures with Larger Tolerance to Impurity in Intrinsic Layer, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 29, 2011, Nagoya
- ⑥ T. Arakawa and K. Tada, InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well for Low Voltage Optical Modulators (Invited), International Conference on Nanoscience, Engineering and Advanced Computing (ICNEAC 2011), July 8, 2011, Narsapur, India
- ⑦ K. Tada and T. Arakawa, Low-Voltage Optical Modulators Based on Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well (Invited), Book of Abstract of Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials, March 17, 2011, Granada, Spain
- ⑧ Y. Amma, K. Ema, and T. Arakawa, Influence of Intrinsic Layer Impurity in InGaAs/InAlAs Asymmetric Triple Coupled Quantum Well on Its Electrorefractive Index Change, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 23, 2010, Tokyo
- ⑨ H. Yamada, Y. Iseri, and T. Arakawa, Modification of Material Parameters for InGaAs/InAlAs Quantum Wells, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 23, 2010, Tokyo
- ⑩ T. Wajima, T. Arakawa, and K. Tada, Electrorefractive Effect in Strained InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 23, 2010, Tokyo
- ⑪ Y. Iseri, H. Yamada, T. Arakawa, K. Tada, and N. Haneji, Analysis of the Electrorefractive Effect in Ge/SiGe Coupled Quantum Well for Silicon Based Optical Modulators, The 15th OptoElectronics and Communication Conference (OECC2010), Jul. 8, 2010, Sapporo
- ⑫ Y. Iseri, T. Arakawa, K. Tada, and N. Haneji, Influence of Heterointerface Abruptness on Electrorefractive Effect in InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well (FACQW), 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Oct. 8, 2009, Sendai
- ⑬ K. Ema, W. Endo, T. Arakawa, and K. Tada, Electrorefractive Effect in Asymmetric Triple Coupled Quantum Well, 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Oct. 8, 2009, Sendai
- ⑭ T. Makino, R. Hasegawa, T. Arakawa, and Y. Kokubun, Fabrication of Microring Resonator Tunable Wavelength Filter Using Five-layer Asymmetric Coupled Quantum Well, 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Oct. 7,

- 2009, Belek-Antalya, Turkey
- ⑮ M. Ushigome, M. Fukuoka, T. Arakawa, and K. Tada, Low Voltage Mach-Zehnder Modulator with InGaAs/InAlAs Five Layer Asymmetric Coupled Quantum Wells, 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Oct. 7, 2009, Belek-Antalya, Turkey.
- ⑯ Y. Iseri, T. Arakawa, K. Tada, and N. Haneji, Proposal of Ge/SiGe Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well for Mach-Zehnder Modulators, 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Oct. 6, 2009, Belek-Antalya, Turkey

[図書] (計1件)

日本学術振興会光エレクトロニクス第130委員会編, オーム社, 光エレクトロニクスとその応用, 2011年5月, 分担執筆 (6.3.1節 (pp. 272-273), 6.3.2節 (pp. 274-281), 7.3.6節 (pp. 489-496))

[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・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

多田 邦雄 (TADA KUNIO)

金沢工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 00010710