

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01841

研究課題名（和文）次世代光無線システムのための超低電力駆動アンテナ集積半導体光変調器の開発

研究課題名（英文）Development of ultra-low power consumption semiconductor optical modulator integrated with antenna for next-generation radio-over-fiber systems

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）：無給電、すなわちミリ波信号（60 GHz帯）の受信電界のみで駆動可能な金属アンテナを集積した化合物半導体量子井戸変調器を開発し、その光ファイバー無線通信応用可能性を実証することを目的とした。

光ファイバー無線用光変調器用に最適化した独自の半導体ポテンシャル制御量子井戸構造（五層非対称結合量子井戸）を設計、作製した。この量子井戸構造をコア層とする位相変調器を作製し、アレイ化したアルミニウム製アンテナ部と集積化して、高効率な光変調器を実現した。変調効率は、従来デバイスと比較して14dBの大幅な改善を達成した。さらに、60GHz無線信号の復調実験にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々が独自に開発してきた量子ナノ構造である五層非対称結合量子井戸を用いて初めて受信電界のみで動作する高効率アレイアンテナ集積半導体光変調器が実現できた点で、学術的意義を有する。

本研究により、小型、低消費電力で大量生産に対応できる無線信号-光信号変換半導体光変調器が実現できることが示された。次世代移動体通信ネットワークに必要な基地局の増大に対応でき、その発展に大いに貢献できる。さらに、本成果は今後の世代の光無線通信技術に広く応用することができ、第6世代以降の移動体通信技術の普及をはじめ、光と無線をシームレスにつなぐ各種システムの発展に貢献する。

研究成果の概要（英文）：The objective of this project is to develop a compound semiconductor quantum well optical modulator integrated with a metallic antenna that can be driven only by the receiving electric field of a millimeter wave signal (60 GHz band) without power supply, and to demonstrate its potential for radio-over-fiber (RoF) applications.

We have designed and fabricated a unique semiconductor potential-controlled quantum well structure (five-layer asymmetrically coupled quantum wells) optimized for RoF modulators. A phase modulator with this quantum well structure as the core layer was fabricated and integrated with an array of aluminum antennas to realize a highly efficient optical modulator. The modulation efficiency was significantly improved by 14 dB compared to conventional semiconductor RoF modulators. In addition, demodulation experiments of 60 GHz wireless signals were successfully conducted.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光変調器 半導体 光ファイバー無線 量子井戸 アンテナ

1. 研究開始当初の背景

第5世代移動通信システム(5G)のサービスが開始されその普及が始まっているが、第6世代システムの研究・開発も始められている。無線通信が高速化するほど、無線で送受信するエリアであるセルのサイズは小さくなり、多数のセルが必要となる。それに伴い、セルを支える基地局の数もさらに膨大となる。これらの基地局を結ぶネットワークの効率化は大きな課題である。従って、基地局で高周波無線信号(RF信号)をアナログ-デジタル変換なしに光信号に変換し、無線波形をそのまま光ファイバーネットワークで親局等へ伝送する光ファイバー無線(Radio over Fiber: RoF)技術は、次世代の高速有線・無線ネットワークシステムの発展に不可欠な技術である。また、RoF技術は、精密計測、分散ミリ波レーダー、ビッグサイエンス向け高精度基準信号の伝送など、様々な分野への応用も期待できる。RoF技術において、受信した電波信号を光信号に変換する光変調器がキーデバイスとなる。

2. 研究の目的

無給電、すなわちミリ波信号(60 GHz帯)の受信電界のみで駆動可能な金属アレイアンテナを集積した化合物半導体量子井戸光変調器を開発し、その光ファイバー無線通信応用可能性を実証する。光ファイバー無線用光変調器用に最適化した独自の半導体ポテンシャル制御量子井戸構造(五層非対称結合量子井戸)、金属アレイアンテナの融合によりこの課題の解決し、従来の素子と比較して、電界受信感度(光変調効率)は10~100倍に向上、素子サイズは1/10に小型化することを目指す。

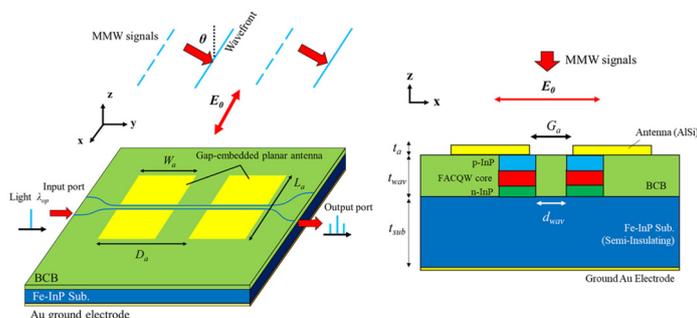


図1 提案するアレイアンテナ集積光変調器の概要

3. 研究の方法

本研究で提案する光変調器の概略図を図1に示す。光位相変調部となる量子井戸直線光導波路と2組のアルミニウムアンテナ(アレイアンテナ)が集積化される。直線光導波路のコア層には、InGaAs/InAlAs 五層非対称結合量子井戸(FACQW)を用いる。FACQWは大きな電界誘起屈折率変化特性を有するが、RoFシステム用に新たに設計を行う。

設計に基づいて素子作製を行い、そのミリ波受信特性および光変調特性を評価する。

4. 研究成果

(1)低電圧で動作するポテンシャル制御量子井戸導波路の設計

受信する電波の電界強度に合わせて、0.1 kV/cm以下の低電界領域で、大きな電界誘起屈折率変化を生じさせるInGaAs/InAlAs FACQWを設計した(図2)。導波路は多重FACQWをコア層とするPIN構造となるが、I層(ノンドープ層)の残留不純物による電界不均一性がFACQWの特性に大きく影響するため、それを考慮して、コア層内の位置によって構造を最適化した。これにより、I層の残留不純物密度が変動しても、大きな電界誘起屈折率変化が得ることを可能とした(図3)。

(2)デバイス作製

(1)で設計したFACQWをコア層とする直線導波路型位相変調器を作製した(図4)。導波路作製には、電子ビーム露光装置、塩素系誘導結合プラズマドライエッチング装置、マグネトロンスパッタ装置などを用いた。位相変調器はポリマー材料で埋め込み、その上にアルミニウムアレイ電極を形成した。

(3)高効率光変調動作の実証

(2)で作製した光変調器の光変調特性を評価した。図5(a)に示す通り、60GHz帯のミリ波を受信し、光変調効率(CSR)は約46 dBが得られた。従来の我々の半導体光変調器と比較して15 dB(20倍以上)の高効率化に成功した。これは、FACQW構造の改良とアンテナのアレイ化によるものと考えられ、目標を達成したと言える。また、60GHzにおける無線信号の光ファイバー伝送復調実験にも成功した(図5(b))。これにより、本変調器が、RoF変調器として有望であるこ

とを示したといえる。

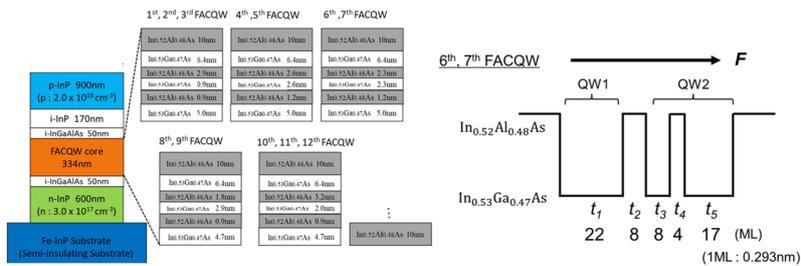


図2 設計した五層非対称結合量子井戸の構造

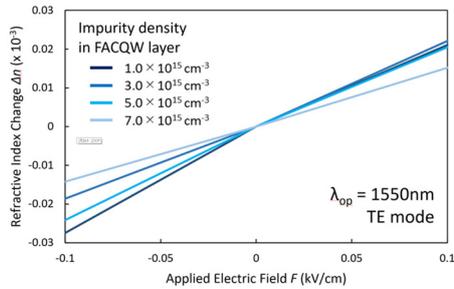


図3 設計した五層非対称結合量子井戸の電界誘起屈折率変化特性

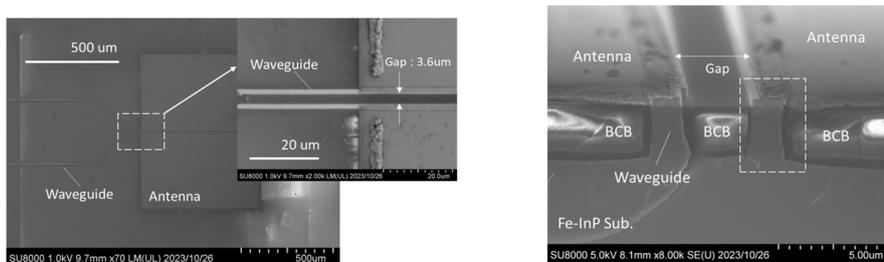
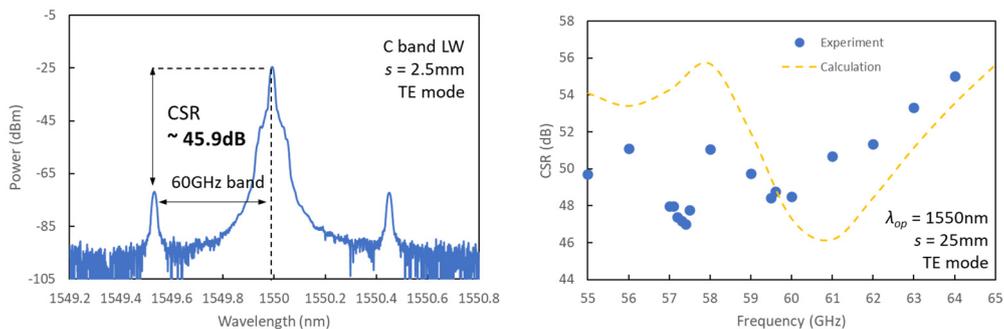
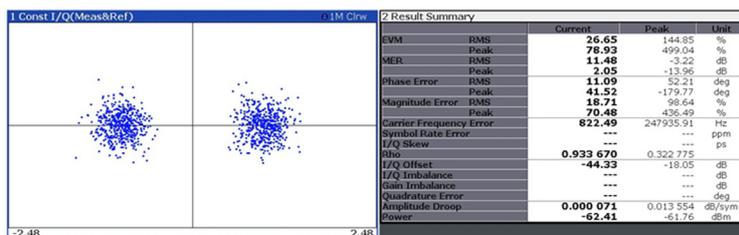


図4 作製したアレイアンテナ集積光変調器の電子顕微鏡像（左：全体上面像、右：導波路断面像）



(a)



(b)

図5 (a)60 GHz 帯ミリ波受信による変調特性 (b)光ファイバー伝送による復調実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yudai Udagawa and Taro Arakawa	4. 巻 61
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 SK1014
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 Yuhei Kanesaka and Taro Arakawa	4. 巻 61
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 SK1018
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 Akio Higo, Tomoki Sawamura, Makoto Fujiwara, Ayako Mizushima, Yukinori Ochai, Taro Arakawa, Yoshio Mita	4. 巻 142
2. 論文標題 Edge Quality Control of an Optical Racetrack Resonator by Character Projection/Variable-shaped Beam Method to Optimize Pattern Approximation in F7000S-VD02	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 230-234
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejsmas.142.230	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 Yudai Udagawa and Taro Arakawa	4. 巻 61
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 SK1014
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 Zhifeng Peng and Taro Arakawa	4. 巻 10
2. 論文標題 Tunable Vernier Series-Coupled Microring Resonator Filters Based on InGaAs/InAlAs Multiple Quantum-Well Waveguide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 1256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/photonics10111256	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 Gaku Sekiguchi, Ryotaro Nakazawa, Yui Otagaki, Hiroshi Murata, Atsushi, Matsumoto, and Taro Arakawa	4. 巻 32
2. 論文標題 Planar array antenna coupled InGaAs/InAlAs multi-quantum well optical modulator for 60 GHz band millimeter wave signals	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 18441--18745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.525299	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

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 Radio-over-Fiber
3. 学会等名 27th Optoelectron. Comm. Conf./Int. Conf. Photon. Switching and Computing (OECC/PSC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Reimi Kaseda and Taro Arakawa
2. 発表標題 Design of High-Extinction-Ratio Multimode Interference Optical Modulator Using Machine Learning
3. 学会等名 Microoptics Conf. (MOC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gaku Sekiguchi, Ryotaro Nakazawa, and Taro Arakawa
2. 発表標題 Improvement of Modulation Efficiency in Patch Antenna-Integrated Quantum Well Phase Modulator for 60 GHz Millimeter-Wave signals
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Sekiguchi, R. Nakazawa, S. Nakamori, T. Mori, K. Yamada, Y. Otagaki, H. Murata, K. Akahane, and T. Arakawa
2. 発表標題 Development of planar antennas integrated quantum well phase modulator for 60GHz band signals
3. 学会等名 URSI General Assembly and Scientific Symposium (GASS) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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 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 Microoptics Conference (MOC) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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

1. 発表者名 根本匠, 荒川太郎
2. 発表標題 60 GHz帯ミリ波アンテナ集積量子井戸位相変調器の実現に向けたボウタイアンテナの設計
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 根本匠, 荒川太郎
2. 発表標題 60GHz帯ミリ波アンテナ集積光変調器の開発に向けたボウタイアンテナの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Nakazawa, G. Sekiguchi, and T. Arakawa
2. 発表標題 Investigation of Planar Antennas for Improving Modulation Characteristics of Quantum Well Optical Phase Modulators for Radio-over-fiber System
3. 学会等名 Microoptics Conf. (MOC) 23 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Aomi, Y. Kokubun, and T. Arakawa,
2. 発表標題 Proposal of Ultralow-Driving-Voltage Microring Resonator Electroabsorption Modulator for Cryogenic Operation
3. 学会等名 Microoptics Conf. (MOC) 23 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光変調器、通信システム、および処理方法	発明者 中澤遼太郎、荒川太郎	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、日本特願2023-155610	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	村田 博司 (Murata Hiroshi) (20239528)	三重大学・工学研究科・教授 (14101)	
研究 分 担 者	國分 泰雄 (Kokubun Yasuo) (60134839)	ものつくり大学・その他の部局・学長 (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