

光ファイバー無線用アンテナ集積型化合物半導体量子井戸光変調器

Antenna-Integrated Compound Semiconductor Quantum Well Optical Modulator for Radio-Over-Fiber Systems



荒川 太郎 (Taro ARAKAWA, Ph. D.)

横浜国立大学 大学院工学研究院/半導体・量子集積エレクトロニクス研究センター 教授

(Professor, Yokohama National University, Graduate School of Engineering)

応用物理学会 電子情報通信学会 IEEE 他

受賞: International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Young Researcher Award (1994 年), APEX/JJAP Editorial Contribution Award (2017 年)

研究専門分野: 光エレクトロニクス 半導体工学

あらまし

光ファイバー無線 (RoF) システムにおける 60GHz 帯ミリ波帯無線信号-光信号変換デバイスとして、アレイアンテナを集積した化合物半導体量子井戸光位相変調器を提案し、初めてその動作を実証した。光変調器は 5 種類の InGaAs 量子井戸と 2 素子のアレイアンテナで構成されている。量子井戸としては、大きな電気光学効果が得られる五層非対称結合量子井戸 (FACQW) を用いた。FACQW は、マイクロ波を受信したアンテナに誘起される小さな電界で、電界誘起屈折率変化が大きくなるように設計した。設計した光変調器を実際に作製し、その光変調特性を評価した。11 W/m² の電力密度で 45.9 dB という低い搬送波対信号比 (CSR) を得ることに成功した。これは 10.1 mrad の位相シフトに相当し、2 素子のアンテナを持つ変調器としてはかなり大きな値である。FACQW の電気光学係数は 36×10^{-11} m/V と見積もられたが、これは電気光学材料として広く用いられているニオブ酸リチウムの 10 倍である。さらに、60 GHz の無線搬送波を用いた位相偏移変調 (BPSK) 信号のデータ伝送を実証

した。提案された光変調器は、RoF システムにおける高効率な無線-光信号変換に大きく貢献すると期待される。

1. 研究の背景と目的

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[1]。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 用無線信号-光信号の変換デバイスとして、無線アンテナとニオブ酸リチウム (LN) マッハ・ツェンダー光干渉計を集積化した優れた光変調器がこれまで開発されている[2]。しかし、LN 光変調器はそのサイズが数センチと大きく、また、光信号の光源である半導体レーザーや半導体光増幅器とは材料が異なるため集積化が難しいため、大量生産やそれによるコストの抑制が難しい。今後のセル数の増大を考えれば、今後、より小型、低消費電力で量産可能で、信頼性の高い無機半導体の無線信号-光信号変換光集積デバイス (光変調器) の必要性がますます高まると予想される。しかし、従来の無機半導体光変調器を用いても駆動電力が大きくなってしまい、実用的な強度の受信無線電界での直接駆動は困難で、その重要性にもかかわらずほとんど研究・開発は進んでいない。

本研究では、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光ファイバー無線用アンテナ集積型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

光ファイバー無線用アンテナ集積型化合物半導体量子井戸光変調器

Antenna-Integrated Compound Semiconductor Quantum Well Optical Modulator for Radio-Over-Fiber Systems

信応用可能性を実証することを目的とした。これまで、我々はアンテナ集積型量子井戸光変調器を開発してきたが[3,4]、本研究では、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*1を用い、アンテナのアレイ化による高効率化を目指した。

2. 研究の成果

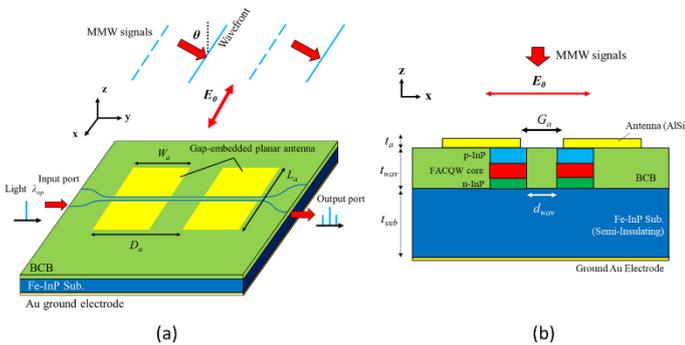


図1 開発したアンテナ集積型光変調器の全体図

図1に開発したアンテナ集積型光変調器の全体図を示す[5]。半絶縁性 InP 基板上に InP をベースとする PIN 構造 (p 型半導体/ノンドープ半導体/n 型半導体) を有するハイメサ光導波路構造 (幅 $1.45\mu\text{m}$ 、高さ $2.1\mu\text{m}$) が形成され、その上に金属 (AlSi) アンテナが装荷されている。P 層、N 層に InP、光導波路のコア層である I 層に InGaAs/InAlAs 多重量子井戸 (MQW) を用いており、光導波路は樹脂材料であるベンゾシクロブテン (BCB) で埋め込まれている。アンテナは、図のような導波路部に $3\mu\text{m}$ のギャップを有する方形のパッチアンテナで、 60GHz 帯マイクロ波を受信できるように設計されており、 $650\mu\text{m}\times 840\mu\text{m}$ の大きさとなっている。アンテナで受信したマイクロ波によって生じた電界がエッジの直下に強く印加される。我々は、光導波路に PIN 構造を用いることで、受信電界の約 600 倍に増強された電界が I 層に生じることを見いだした (図2)。

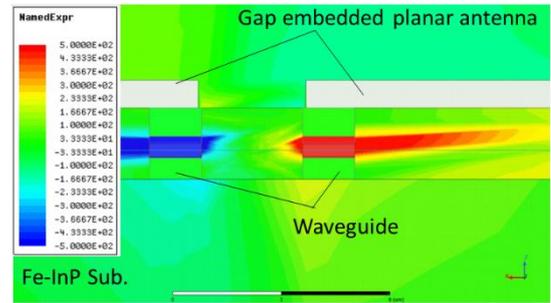


図2 PIN 構造における電界強度

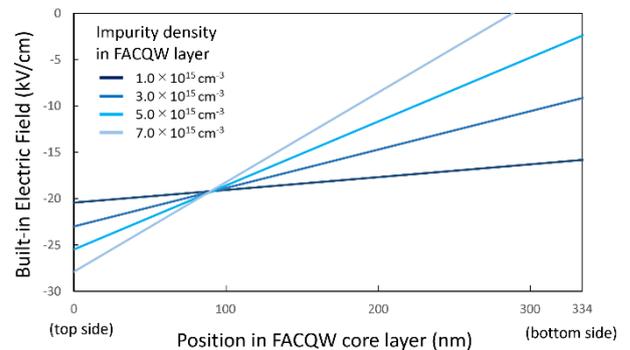


図3 多重五層非対称結合量子井戸層における内蔵電分布

InGaAs/InAlAs MQW には、我々がこれまで開発してきた五層非対称結合量子井戸 (FACQW) [6]を用いた。これは、精密にポテンシャル構造を制御することにより、通常の量子井戸より巨大な電気光学効果*2 (電界誘起屈折率変化) を生じさせる構造である。増強された受信電界がこの FACQW に印加され、屈折率変化が生じることにより光導波路を導波するレーザー光 (波長 $1.55\mu\text{m}$) が変調され、マイクロ波の信号が光信号に変換される。この光変調器自体は受信電界によって駆動されるため、外部電源が必要ないのが特長である。FACQW は大きな電界誘起屈折率を生じさせるが、その動作電界領域は狭いため、想定される動作電界領域に最適な設計が必要になる。特に提案するデバイス構造では、I 層内の電界が均一であるのが理想的であるが、実際には材料の不純物などにより p 型にドーピングされてしまう。そのため、空間電荷層が形成さ

光ファイバー無線用アンテナ集積型化合物半導体量子井戸光変調器

Antenna-Integrated Compound Semiconductor Quantum Well Optical Modulator for Radio-Over-Fiber Systems

れ、I層内に生じる電界は不均一となり、動作電界領域も一定でなくなる(図3)。そこで、I層内の場所によって FACQW の構造を最適設計して、6種類の FACQW 構造を組み合わせることで I層とした(図4)。図5にコア層内で生じる電界誘起屈折率変化特性の計算値を示す。コア層(I層)の不純物密度によるが、0~0.1 kV/cm という低電界で約 2×10^{-5} の屈折率変化が生じることがわかる。これは、電界誘起屈折率変化としてはきわめて大きな値である。

金属アンテナは、光変調効率を高めるため、アンテナ2素子を有するアレイアンテナを用いた。アレイアンテナでは、アンテナ本体のサイズはもとより、隣接するアンテナとの距離も重要であり、最適な値を用いないと、隣接するアンテナにおける位相変化が相殺されて光変調効率が大きく低下する。

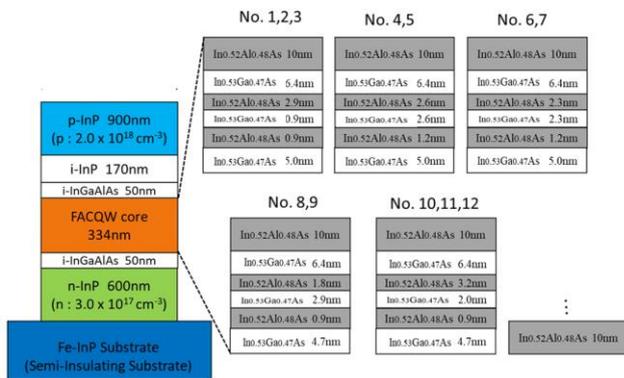


図4 本研究で用いた InGaAs 五層非対称結合量子井戸構造。(a)場所により異なる5種類の構造 (b)量子井戸のポテンシャル形状(1例)

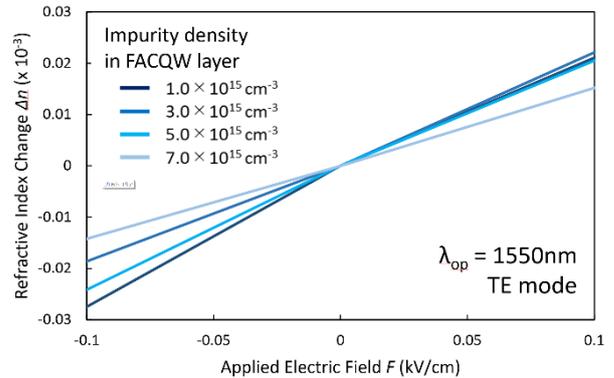


図5 InGaAs 五層非対称結合量子井戸コア層内で生じる電界誘起屈折率変化

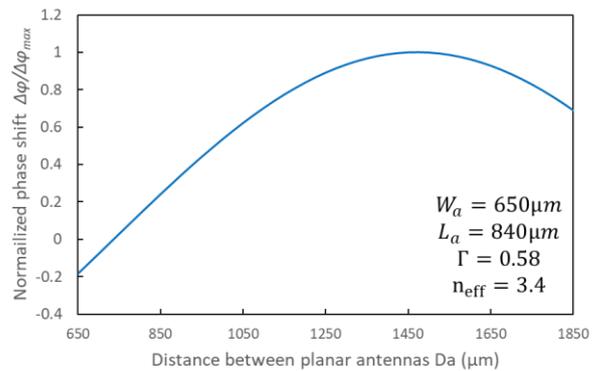


図6 2素子アレイアンテナ間の距離と五層非対称結合量子井戸コア層の位相変化(屈折率変化)の関係

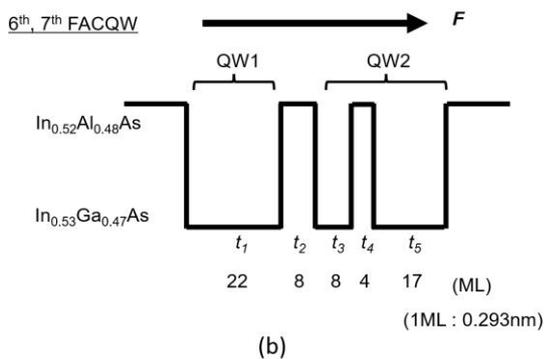


図7 作製したデバイスの上面写真(左)および光導波路断面の電子顕微鏡像(右)

図6に隣接するアンテナとの間隔に対する(コア層での)電界誘起位相変化量の計算値を示す。この結果から、アンテナ間隔は $1450 \mu\text{m}$ に設定した。

設計したデバイスを作製した。InP 基板上への光導

光ファイバー無線用アンテナ集積型化合物半導体量子井戸光変調器

Antenna-Integrated Compound Semiconductor Quantum Well Optical Modulator for Radio-Over-Fiber Systems

波路層は分子線エピタキシー法を用いて結晶成長し、量子井戸の層厚を精密に制御した。光導波路やアンテナ形状のパターニングには電子ビーム露光法を用いた。光導波路の形成には誘導結合プラズマドライエッチング法、AlSi アンテナ層の製膜にはマグネトロンスパッタ法を用いた。図7に作製したデバイスの写真および走査型電子顕微鏡像を示す。ほぼ設計通りのデバイスが作製できていることがわかる。

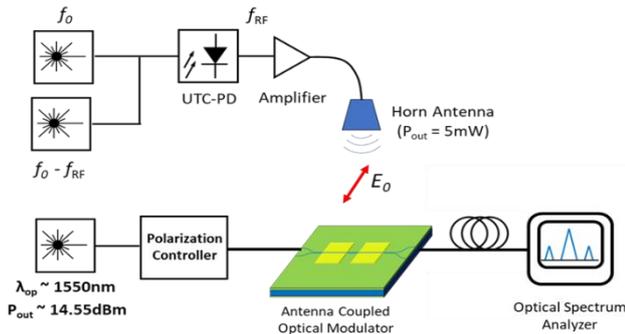
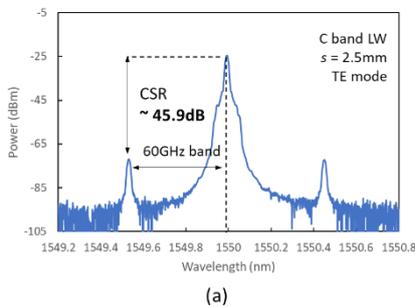


図8 60 GHz 帯マイクロ波の受信・光変調実験系



(a)

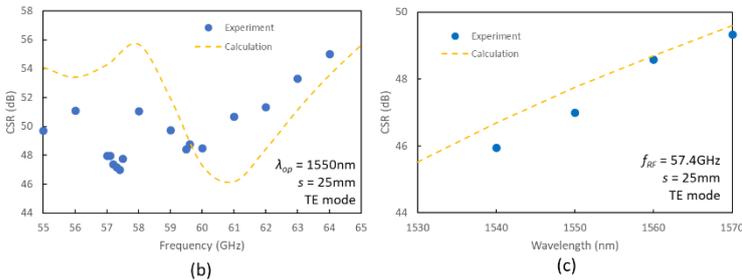


図9 60 GHz 帯マイクロ波の受信・光変調実験結果 (a) 光スペクトル (b) 搬送波対信号比 (CSR) のマイクロ波周波数依存性 (c) CSR の光波長依存性

作製した光変調器の動作特性を評価した。測定系を図8に示す。まず、レーザー光をミリ波変調し、バ

イアス電圧で搬送波成分を抑圧して側波のみとする(光ツートーン技術)。この成分をフォドダイオード(UTC-PD)で電気信号に変換し、増幅器で増幅し、利得20 dBのホーンアンテナを介して測定デバイスへ照射する。ホーンアンテナへの入力電力は-3 dBm、ホーンアンテナからの出力電力は約50 mWである。

また、測定デバイスに対して、波長可変レーザーから発生させたレーザー光(1550 nm、9 dBm)を偏光コントローラーに通し、TEモードで入射させる。測定デバイスからの出射光は光ファイバーに通され、光スペクトラムアナライザで観測され、観測光は変調によってキャリア成分の両側にサイドバンド成分を持つ。キャリア強度とサイドバンド強度の比は、搬送波対信号比(CSR)と定義され、CSRが小さいほど変調効率が高いことを表す。

図9に作製したデバイスの変調特性の実測値および理論特性を示す。図9(a)に60 GHz帯の電波を照射した場合の光変調器からの出力の光スペクトルの一例を示す。ホーンアンテナと作製デバイス間の距離を25 mm、デバイスに入力されるRF電力密度を $P \sim 11 \text{ W/m}^2$ とした条件で、CSRが45.9 dB(光波長1540 nm)と最小のサイドバンド信号が観測されている。45.9 dBのCSRは、10.1 mradの位相シフト量に相当する。図9(b)にCSRの60 GHz帯無線周波数依存性を示す。帯では約45~55 dBのCSRが観測された。図9(c)にCSRの光波長依存性を示す。波長が長くなるにつれてCSRは減少している。これはFACQWの電界誘起屈折率変化が長波長になるほど小さくなるためである。今回作製した2つのアンテナ素子を持つ光変調器で得られたCSRは、ギャップの小さい矩形アンテナを使用する他の類似の変調器と比較して大きい値となっている(例えば、9素子を持つLNベースのデバイス[7]で50 dB、10素子を持つ電気光学ポリマーベースのデバイス[8]で42 dB)。したがって、この実験結果は、提案した光変調器の優位性を示している。推定された無線信号の照射電力と電界増強係数から、電気光学係数は $36 \times 10^{-11} \text{ m/V}$ と推定された。この値は、LNの約10倍という高い値である。

作製した光変調器について、データ伝送・復調実験も行った。測定には、製作したデバイスの出力ポート

光ファイバー無線用アンテナ集積型化合物半導体量子井戸光変調器

Antenna-Integrated Compound Semiconductor Quantum Well Optical Modulator for Radio-Over-Fiber Systems

に長さ 1 km の光ファイバーを接続し、この光ファイバーの波長分散を利用して、位相変調信号を強度変調信号に変換する [9]。信号変換後、エルビウム添加ファイバー増幅器 (EDFA) を用いて信号を増幅する。この信号を UTC-PD で 60GHz 帯の電気信号に復調し、光スペクトラムアナライザで観測した。60 GHz 帯無線搬送波のデータ変調は、デジタル RF 信号発生器で生成した 2 GHz 帯位相偏移変調 (BPSK) デジタル信号 (シンボルレート : 1 Mbps) で行った。

られるものの、BPSK 信号で伝送されたことがわかる。

3. 将来展望

2 素子を有するアレイアンテナ集積光変調器により約 46 dB の CSR が得られたが、実用化のためには更なる変調効率の向上が必要である。そのためには、アンテナ数を 6 素子まで増やしたい。さらに、量子井戸構造をさらに最適化し、電界誘起屈折率変化特性を改善する。また、円形パッチアンテナの採用により、受信マイクロ波の偏波無依存性を図る。

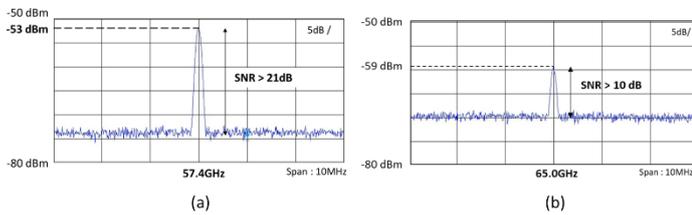


図 10 信号復調実験結果 57.4 GHz (左)、65 GHz (右)

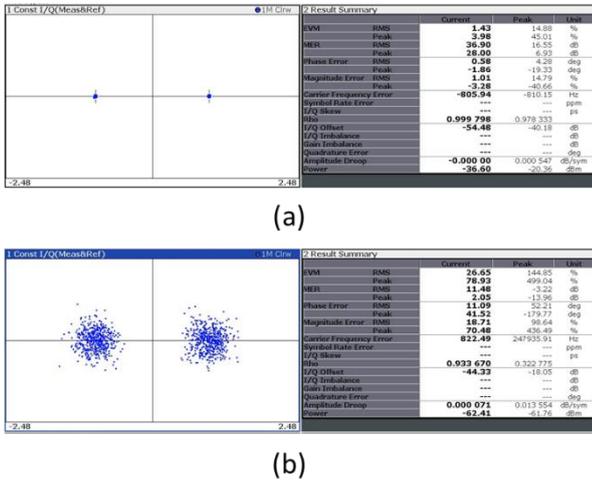


図 11 BPSK 信号データ伝送測定結果
(a)送信信号 (b)受信信号

57.4 GHz と 65.0 GHz の無線搬送波信号の復調スペクトルをそれぞれ図 10 (a) と (b) に示す。最大 -53 dBm の電気信号が、21 dB の信号対雑音比 (SNR) で観測された。図 11(a)は作製したデバイスに照射した送信データ信号、図 11(b)はデバイスと長さ 1 km のファイバーを通過した後に復調した受信データ信号である。受信信号は送信信号と比較して若干のデータ分散が見

おわりに

RoF システムにおける 60 GHz 帯ミリ波帯無線信号-光信号変換デバイスとして、アレイアンテナを集積した化合物半導体量子井戸光位相変調器を提案し、初めてその動作を実証した。量子井戸には独自開発した FACQW を用い、マイクロ波を受信したアンテナに誘起される小さな電界で、電界誘起屈折率変化が大きくなるように設計した。設計した光変調器を実際に作製し、高い光変調効率を得ることに成功した。FACQW の電気光学係数も LN の 10 倍の値が得られた。さらに、60 GHz の無線搬送波を用いた BPSK 信号のデータ伝送を実証した。本研究で開発した光変調器は、小型で半導体レーザーとの一体集積化が容易で、更なる高周波数帯無線にも対応可能であるため、将来の高速無線通信の発展に大きく貢献するものと期待できる。

用語解説

*1 量子井戸

バンドギャップの小さい半導体 (量子井戸層) をバンドギャップの大きい半導体 (障壁層) で挟んだ構造で、前者の厚さは 10nm 以下である。半導体レーザーや半導体光変調器などに用いられる。本研究では、これを発展させ、複数の量子井戸層と障壁層を用いてバンド構造を制御した量子井戸構造を用いている。

*2 電気光学効果

材料に電界を印加すると、その屈折率が変化する物理効果。特に、1 次電気光学効果 (ポッケルス効果) は、屈折率変化量が電界に比例し、高速光変調器などに用いられる。その比例係数を電気光学定数と呼ぶ。

光ファイバー無線用アンテナ集積型化合物半導体量子井戸光変調器

Antenna-Integrated Compound Semiconductor Quantum Well Optical Modulator for Radio-Over-Fiber Systems

ニオブ酸リチウム (LN) は大きな 1 次電気光学効果が生じる材料として知られている。

参考文献

- [1] Y. Salamin, B. Baeuerle, W. Heni *et al.*, "Microwave plasmonic mixer in a transparent fibre-wireless link," *Nat. Photonics* **12**, 749 (2018).
- [2] H. Murata, "Millimeter-wave-band electrooptic modulators using antenna-coupled electrodes for microwave photonic applications," *J. Lightwave Technol.* **38**, 5485 (2020).
- [3] Y. Miyazeki and T. Arakawa, "Proposal of InGaAs/InAlAs multiple quantum well Mach-Zehnder modulator integrated with array of planar antennas," *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, SJJE05 (2019).
- [4] Y. Miyazeki, H. Yokohashi, S. Kodama, Hiroshi Murata, and Taro Arakawa, "InGaAs/InAlAs multiple-quantum-well optical modulator integrated with planar antenna for millimeter-wave radio-over-fiber system," *Opt. Express* **28**, 11583 (2020).
- [5] G. Sekiguchi, R. Nakazawa, Y. Otagaki, H. Murata, A. Matsumoto, and T. Arakawa, "Planar array antenna coupled InGaAs/InAlAs multi-quantum well optical modulator for 60 GHz band millimeter wave signals," *Opt. Express* **32**, 18441 (2024).
- [6] T. Arakawa, T. Toya, M. Ushigome, et al., "InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well Exhibiting Giant Electrorefractive Index Change," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 032204 (2011).
- [7] Y. N. Wijayanto, H. Murata, and Y. Okamura, "Electrooptic Millimeter-Wave-Lightwave Signal Converters Suspended to Gap-Embedded Patch Antennas on Low-k Dielectric Materials," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19**, 3400709 (2013).

[8] T. Kaji, I. Morohashi, Y. Tomonari, et al., "D-band optical modulators using electrooptic polymer waveguides and non-coplanar patch antennas," *Opt. Express* **31**, 17112 (2023).

[9] K. Takaba and H. Murata, "Microwave/millimeter-wave signal control using high-speed optical modulator and optical fiber dispersion effect," *IEICE Tech. Rep.* **121**, 91 (2022).

謝辞

化合物半導体エピウエハを成長していただいた情報通信研究機構・松本敦博士、無線信号受信実験を行っていただいた三重大学・村田博司教授、大田垣祐衣助教に感謝する。また、アンテナ特性解析にご協力いただいた関東学院大学・盧柱亨教授に感謝する。

この研究は、令和 2 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 3 ~ 5 年度に実施されたものです。