

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03994

研究課題名(和文)メタマテリアル構造を用いたTHz帯光変調デバイスの開発

研究課題名(英文)Development of optical modulation devices operating in THz-band using meta-material structures

研究代表者

村田 博司 (Murata, Hiroshi)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：20239528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波・ミリ波からTHz帯で動作するメタマテリアル構造を用いて、無線信号で光を変調する高速光変調デバイスの解析・設計・試作・評価実験を行った。基板には z-cut ニオブ酸リチウムを用いた。光導波路の作製にはアニールプロトン交換法を、金属パターン作製には蒸着・リフトオフ法を、3次元メタマテリアル構造の作製には基板貼合法を用いた。試作したメタマテリアル構造光変調デバイスの光導波路に1550nm帯のレーザー光を入射した状態で上部から無線信号を照射したところ、無線信号によって生成された光変調サイドバンドを確認した。新しい3次元メタマテリアル構造光変調デバイスの基本動作実験に成功した。

研究成果の概要(英文)：Utilizing meta-material structures operating in microwave to THz-wave ranges, new high-speed optical modulation devices for converting wireless signals to optical signals are analyzed, designed and fabricated. For the fabrication of the designed device, z-cut LiNbO3 was used as a substrate. The optical waveguides, metal patterns and three-dimensional structures were fabricated by use of the annealed-proton-exchange method, the lift-off technique with vapor film depositions, and substrate bonding with a UV adhesive, respectively. The fabricated modulation devices were tested by use of a laser beam with a 1550-nm wavelength and wireless signals. As a result, clear optical modulation sidebands were observed and the basic performances were verified successfully.

研究分野：マイクロ波フォトニクス

キーワード：高速光変調 メタマテリアル 電気光学効果 マイクロ波フォトニクス 走行時間効果

1. 研究開始当初の背景

高速光変調デバイスは、光通信、光計測、光信号処理において、信号変換・制御を担う基本的かつ重要なデバイスである。現在では、10Gbps/40Gbps で動作する高速変調デバイスが市販されており、長距離光ファイバー通信システムにおいて広く利用されている。しかし、100GHz を超える超高周波数帯においては、給電回路における変調信号の損失や誘導が問題となり、現行の進行波型電極光変調デバイスでは効率の良い動作が困難である。その一方で、100G~THz の周波数は、数 10Gbps 級のブロードバンド無線通信やイメージング等における有用性・有効性が実証され、これらの帯域の信号を光ファイバー通信網で伝送・処理するための超高速光制御技術のニーズが高まっている。100G~THz 帯の超高速光変調デバイス・機能デバイスを追求することは重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者がかねてから研究を進めてきた“高速電気光学変調デバイス”にメタマテリアル構造を導入して、これを空間結合・給電タイプの共振器アレイ型変調電極として用いることにより、100GHz を超えるミリ波・テラヘルツ波帯で動作する新しい超高速光変調デバイスを追求することを目的とする。電気光学結晶基板表面に 2 次元あるいは 3 次元メタマテリアル構造と光導波路を作製して、メタマテリアル構造における金属ギャップ部近傍に光導波路を配置する。このデバイスの上部から 100G~THz 帯無線信号を照射すると 0 次共振モード (すべての共振素子が強結合して同相で振動) が励振される。この 0 次共振モードにおいて共振素子のギャップ部分に誘起された強い 100G~THz 帯電界で光導波路中の光波を変調する。このデバイスは以下に示す特長を持っている。

- i) 通常の光変調器における給電線路・給電回路が不要。給電部における信号損失・誘導がないため、100GHz を超える超高周波での高効率光信号変換が可能。
- ii) メタマテリアル構造を利用するために、通常の平面アンテナ電極を用いた場合に比べてアレイ間隔が小さくなり、単位長さあたりの変調能率が高い。
- iii) 光波走行時間効果の補償には分極反転構造による擬位相整合を用いる。これにより、任意のメタマテリアル構造、動作周波数においても効率の良い信号変換を実現可能。アレイ数を増やすことでさらなる高効率化や高機能化も可能。
- iv) 複数の光導波路を作製して、導波路毎に位相補償のための分極反転パターンを調節することで、THz 帯信号を IQ 成分に分けて光信号変換することも可能。
- v) IQ 分離・光変換された信号の大きさと位相を詳細に調べることで、THz 帯の電磁界の振幅・位相を低擾乱で測定、評価

することも可能。

このような特長を持つ超高速光変調デバイスは、他に例を見ないものであり、THz 帯メタマテリアルと超高速フォトンクス双方の特長を活かした新技術と考えられる。

3 年間の研究において、デバイスの動作解析・設計・試作実験を行い、その有用性を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題においては、

- (I) 2 次元メタマテリアル構造を用いた光変調デバイスの解析・設計
- (II) 100GHz 帯光変調デバイスの試作実験
- (III) 3 次元メタマテリアル構造光変調デバイスの設計・試作・実験

の 3 点について研究を進めた。基板材料には、高速光変調器のための電気光学結晶として広く用いられているニオブ酸リチウム (LiNbO₃) を用いることとした。動作光波長は、光ファイバー通信において最も良く用いられている 1.55μm 帯 (C-band) とした。変調信号は、アンテナを介して無線信号としてデバイスに照射されるものとし、無線信号を直接光信号に変換することができる光変調デバイスの実現を追究した。

4. 研究成果

(I) 2 次元メタマテリアル構造を用いた光変調デバイスの動作解析・設計

新たに提案した 2 次元メタマテリアル構造光変調デバイスの基本構成を図 1 に示す。基板には、厚さ 0.3 mm 程度の z-cut LiNbO₃ を用いる。基板表面には光導波路が作製されており、その直上に光学バッファ層を介して長方形形状の 2 次元メタマテリアル構造を形成する。光導波路はメタマテリアル構造において電界が集中する場所 (たとえば、スプリットリングのギャップ部) の直下に作製する。このデバイスでは 2 次元メタマテリアル構造がアンテナと変調電極両方の役割を担っている。さらに、共振器である基本メタマテリアル素子を敷き詰めた構造を用いることで、大きな相互作用長が得られ、効率の良い無線・光信号変換が期待できる。

高周波光変調においては、光波走行時間効果を補償する必要がある。従来型のデバイスでは、強誘電性光学結晶の自発分極反転技術を用いていたが、本研究では、新しい補償技術として、メタマテリアル構造のギャップ部分をずらせた meandering gap 構造を用いることで走行時間効果補償を実現している。このときの位相変調指数は次式で表される。

$$\theta = \sum_m \int_{gap} \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} E_z \Gamma f_{shift}(y) dy \quad (1)$$

ここで、 m は光導波路上のメタマテリアル構造基本素子の数、 λ は真空中での光波長、 n_e は LiNbO₃ 結晶の異常光屈折率、 r_{33} はポッケ

ル係数、 Γ は導波光と変調電界の重なりを表す係数である。 f_{shift} はギャップ位置がずれている領域では +1, ずれていない領域では -1 である。

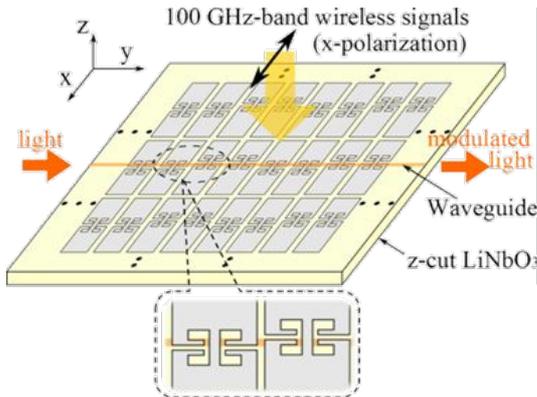


図1 2次元メタ材料構造を用いた光変調デバイスの基本構造

3次元電磁界シミュレータ HFSS を用いて2次元メタ材料を解析して、デバイスを設計した。動作周波数は 100 GHz とした。解析の結果、本デバイスは、スプリットリング型メタ材料を用いたデバイスに比べ 7 倍の変調指数が得られることがわかった。

(II) 100GHz 帯光変調デバイスの試作・実験

設計したデバイスを試作した。基板には 0.3 mm 厚の z-cut LiNbO₃ 結晶を用いた。光導波路の作製にはアニールプロトン交換法を、メタ材料構造の作製には Al 蒸着とフォトリソグラフィを用いた。光学バッファ層は、SiO₂ を RF スパッタリングすることで作製した。試作した 100GHz 帯光変調デバイスの写真を図 2 に示す。

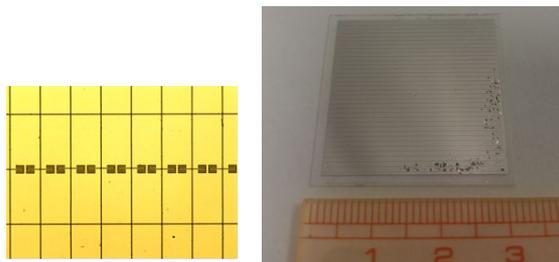


図2 試作デバイスの写真 (左: 拡大図、右: 全体図)

試作デバイスの評価実験を行った。実験系を図 3 に示す。試作デバイスに C 帯の DFB レーザ光を入力した状態で、デバイスに上部から 100GHz 帯無線信号を照射した。100GHz 信号の照射電力は +5 dBm 程度である。このときに観測された出力光スペクトルの一例を図 4 に示す。変調周波数に対応する光変調サイドバンドを観測することに成功した。光スペクトルより求めた位相変調指数の周波数特性を図 5 に示す。3 dB 帯域は 0.4 GHz 程度であった。

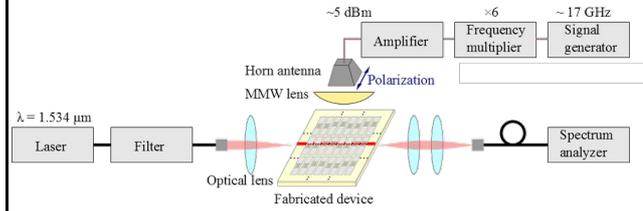


図3 変調実験系

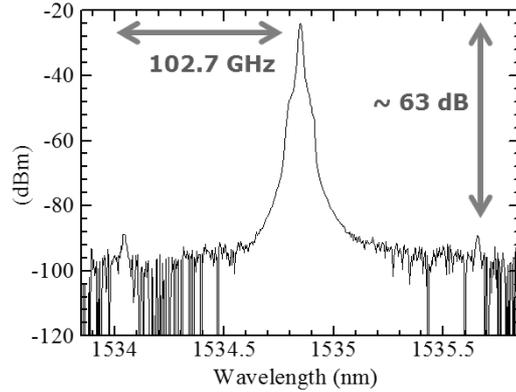


図4 変調光スペクトル

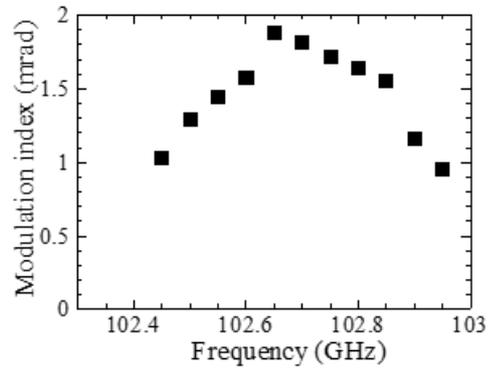


図5 変調周波数特性

(III) 3次元メタ材料構造光変調デバイスの設計・試作・実験

さらに、3次元メタ材料構造を用いた新しい変調デバイスの可能性を追究した。

新デバイスの構造を図 6 に示す。3次元メタ材料構造としては、基板の表面と裏面に金属パターンを配置した右手系・左手系複合線路構造を用いることにした。この構造を用いることにより、さらなる設計の自由度の増大とともに、光変調のための電界増強が期待できる。この線路は、漏れ波線路構造であるために、周波数によって放射する方向が変わるアンテナとして動作する。

2次元メタ材料の場合と同様に3次元電磁界シミュレータ HFSS を用いて3次元メタ材料の解析を行い、プロトタイプデバイスを設計した。動作周波数は 30 GHz とした。

設計したデバイスを試作した。基板として

は、0.25 mm 厚の z-cut LiNbO₃ 結晶と 0.25 mm 厚の SiO₂ ガラス基板を UV 硬化樹脂で貼り合せた複合基板を用いた。光導波路は z-cut LiNbO₃ 結晶基板の表面にアニールプロトン交換法を用いて作製した。3 次元メタマテリアル構造は、z-cut LiNbO₃ 結晶基板および SiO₂ 基板それぞれの表面に金属パターンを形成してから両基板を貼り合わせることで作製した。金属パターンは Al 蒸着とフォトリソグラフィを用いて作製した。試作したデバイスの写真を図 7 に示す。

試作デバイスに C バンドの DFB レーザ光を入力した状態で、デバイスに上部から 30GHz 帯無線信号を照射した。30GHz 帯無線信号の照射電力は +20 dBm 程度である。このときに観測された出力光スペクトルの一例を図 8 に示す。変調周波数に対応する光変調サイドバンドを観測することに成功した。光スペクトルより求めた変調周波数特性を図 9 に示す。得られた変調深さは設計よりも小さなものになったが、3 次元メタマテリアル構造の作製条件を最適化することで、かなりの性能向上（変調効率 10 倍程度）が期待できる。

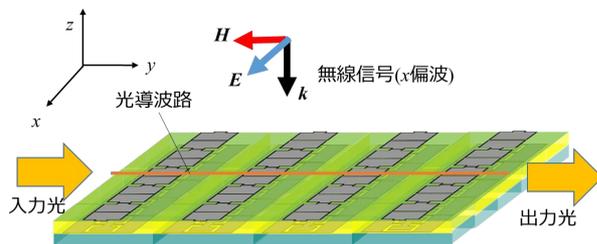


図 6 3 次元メタマテリアル構造を用いた光変調デバイスの基本構造

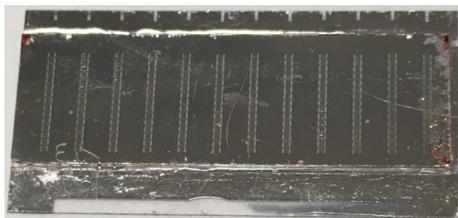


図 7 試作デバイスの写真

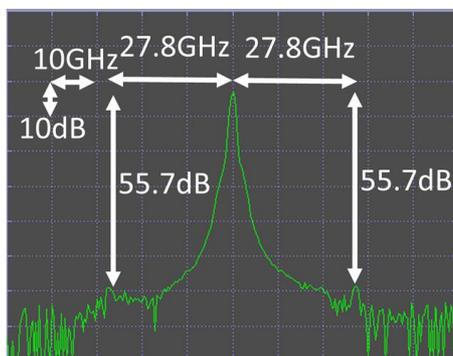


図 8 変調光スペクトル

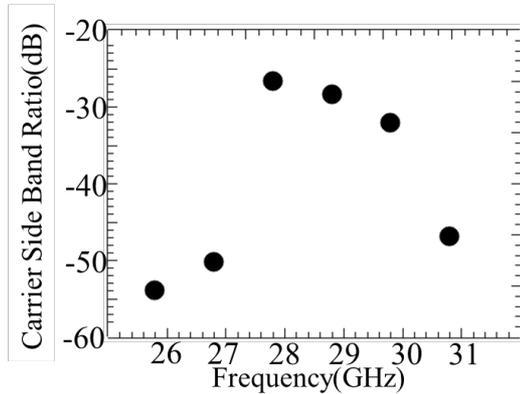


図 9 変調周波数特性

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 2 件)

Hiroshi Murata, Tomohiro Ohno, Takayuki Mitsubo, and Atsushi Sanada, "Pre-Equalizing Electro-Optic Modulator Utilizing Polarization-Reversed Structures of Ferro-Electric Crystal," IEICE Trans on Electronics, 査読有, Vol.E101-C, 2018. 印刷中.

Hiroshi Murata, Toshiyuki Inoue, Yuuki Matsukawa, Hironori Aya, Takashi Ikeda, and Yasuyuki Okamura, "Array-antenna-electrode electro-optic modulators for millimeter-wave radio-over-fiber systems," Proceedings of SPIE 10128, Broadband Access Communication Technologies XI, 査読有, 1012809 (2017). doi:10.1117/12.2253586.

〔学会発表〕(計 5 件)

Hiroshi Murata, "Advanced Photonic Devices for Next Generation Millimeter-Wave Wireless Network in Dense User Environment," (Invited Talk) CLEO-PR/OECC/PSG 2017, 3-2L-6, 31 July-4 August 2017, Singapore, Singapore.

Yuuki Matsukawa, Toshiyuki Inoue, Hiroshi Murata, Atsushi Sanada, "Millimeter-Wave-Band Optical Single-Sideband Modulator Using Array-Antenna-Electrode and Polarization-Reversed Structures," CLEO-PR/OECC/PSG 2017, 3-2S-4, 31 July-4 August 2017, Singapore, Singapore.

Hiroshi Murata, Toshiyuki Inoue, Yuuki Matsukawa, Hironori Aya, Takashi Ikeda, and Yasuyuki Okamura, "Array-Antenna-Electrode Electro-Optic Modulators for Millimeter-Wave Radio-Over-Fiber Systems," Photonics WEST OPTO 2017, 28

January - 2 February 2017, San Francisco, CA, USA.

未成信宏, 村田博司, 岡村康行, “メタサーフェス構造を用いた 100 GHz 帯電気光学無線-光変換デバイス”, 2016 年 (平成 28 年) 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 21p-S321-9, 東京工業大学, 東京都目黒区 (2016 年 3 月 19-22 日)

Nobuhiro Suenari, Hiroshi Murata, Yasuyuki Okamura, “Electro-Optic Modulator Using Meta-Surface Structure for 100 GHz-Band Wireless Signals,” The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015), 27J2-3, August 24-28, 2015, Busan, Korea.

〔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.ec.ee.es.osaka-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

村田 博司 (MURATA, Hiroshi)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号 : 20239528

(2)研究分担者

塩見 英久 (SHIOMI, Hidehisa)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号 : 00324822