

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00872

研究課題名（和文）誘電体スロット層を用いた240GHz超高速ガラス・ポリマ光変調器の実証

研究課題名（英文）Demonstration of 240GHz ultra-fast glass/polymer optical modulator based on dielectric slot layer

研究代表者

榎波 康文（Enami, Yasufumi）

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：90377474

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,500,000円

研究成果の概要（和文）：代表者は上部電極に進行波型マイクロストリップ線型進行波電極を用いた超高速ガラス・ポリマ光変調器を作製し、110GHz光コンポーネントアナライザを用いて3dB減衰光変調帯域幅測定を行った。誘電体導波路を用いた光変調器に対して世界最大幅の帯域幅140GHzを実証するとともに、TiO₂薄膜を用いた帯域幅拡大のための計算及び詳細設計を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

申請者は20年以上有機材料を用いた光デバイス研究（光変調器）を行っている。現在米国グーグル、アマゾン、マイクロソフト等のGAFAMと呼ばれる巨大IT企業は米国にデータセンタを有し、世界中のクラウド顧客のデータ管理を行っている。これらのIT企業のデータセンタ内部やデータセンタ間の通信は光ファイバ通信が主になっており、そのために電気信号を高速で光信号に変換する光デバイス（光変調器）の高速化、低消費電力が必要である。光変調器の低消費電力化のためには材料の電気光学係数が高い材料が必要であり、そのためには電気光学係数の正確な測定が必要である。申請者は新規測定法を開発し問題を解決した。

研究成果の概要（英文）：The representative fabricated an ultra-high-speed glass-polymer optical modulator using a traveling wave microstrip line traveling wave electrode for the upper electrode. We measured the 3dB attenuation optical modulation bandwidth using a 110GHz optical component analyzer. They demonstrated a world-leading bandwidth of 140GHz for an optical modulator using a dielectric waveguide. Additionally, they performed calculations and detailed designs for bandwidth expansion using TiO₂ thin films.

研究分野：光科学

キーワード：光変調器 電気光学ポリマ 低電圧駆動 超高速光変調

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

AI、5G、6G の発展に伴い米国グーグル、アマゾン、MS、フェイスブック等 (GAFAM) の企業は大規模データセンタを増築し続けている。例えば MS はデータセンタへの投資額年間約 140 億ドル、1 時間に 200 台のサーバーを拡張し、日本を含めたほぼ全世界のクラウドサービスを行っている。そのため 2030 年までにデータセンタ通信の更なる低遅延化、低消費電力化、データセンタ間長距離光通信が必要であり、現状のシリコン光変調器のみでは対応が困難である。シリコン光変調器はデータセンタ内部での光通信には適しているが長距離通信や低消費電力化には適していない。光通信限界の現状打破のために、他の半導体光変調器 (InP) や近年では薄膜二オブ酸リチウム光変調器が研究されてきた。シリコン光変調器の帯域幅は一般に 30GHz 程度であるが、InP 光変調器は 70GHz 程度、近年薄膜二オブ酸リチウム光変調器は 100GHz 程度までの帯域を有している。半導体を用いた光変調器は材料特性と光変調を行うための物理特性によりその光変調波形が印加電位信号に比例しない (非ポッケルス効果) ため光ファイバ伝送時の光波形歪みが大きく 1km 以上の長距離光通信が困難である。

2. 研究の目的

110GHz ネットワークアナライザを用い 110GHz 帯域までの材料の誘電分散測定、電極帯域幅及び光変調帯域幅測定を行い、その結果を電極設計に反映した。光変調帯域幅制限の最も重要な要因はミリ波と光波に対する実効誘電率差に起因するミリ波と光波間の位相速度不整合である。したがって、実効誘電率を材料、デバイス構造及び電極設計により近接させ帯域幅拡大設計を行った。

3. 研究の方法

(1) 計算及び実験設備

ミリ波計算用ワークステーション 3 台及びミリ波計算用シミュレーションソフト Ansys 製 HFSS (有限要素法) 及びキーサイト製 EMpro (有限要素法) を用いてミリ波電極計算を行った。光導波路に対しては Rsoft 社製ソフト BeamPROP (BPM 法) 及び FullWAVE (FDTD 法) を使用して光導波路特性計算及び光導波路設計を行った。従来所有していたクリーンブース内部の微細加工装置、薄膜積層装置、ドライエッチング装置に加えて、当該助成事業で新たに導入した薄膜積層用ターゲット、フォトマスク、ミリ波測定用計測装置を用いて実験を行った。

(2) 計算及び実験手順

電極設計最適化

図 1 に示す進行波型電極を光変調器に用いることにより光波とミリ波の位相速度整合を二オブ酸リチウムや半導体光変調器より容易に達成でき光変調器の高速化に適している。半導体や二オブ酸リチウム光変調器はその薄膜化やデバイス構造の改良により高速化も行われているがポリマ光変調器の高速性能には及ばない。

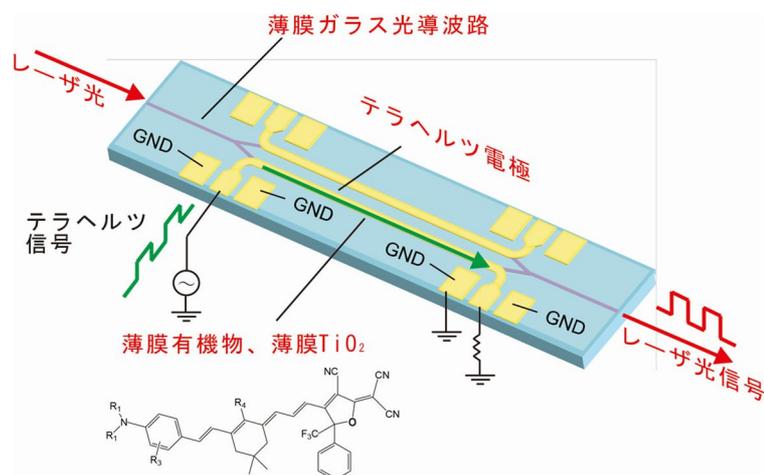


図 1 高速ポリマ・ガラス光変調器鳥瞰図

ポリマ光変調器は複雑なデバイス構造を使用する事なく簡単な構造で高速化が可能であるため最終的なデバイス作製コスト低減が容易である。本研究においては高速ポリマ・ゾルゲルシリカ光変調器を高速化するための実験及び計算を行った。

ハイブリッド型ガラス・ポリマ光変調器は低温においてガラス化可能でフォトレジストを使

用せず材料自体の特性（UV 照射によるガラス化）を用いた微細加工容易なゾルゲルガラスと電気光学ポリマ材料を融合した新規性の高い構造を有しており代表者が独自に考案したものである。

電分散測定用デバイス作製

ポリマ・ゾルゲルガラス光変調器の光変調帯域幅拡大のため図 3 に示す光変調器電極を作製した。ミリ波進行波型電極としてミリ波損失低減のため下部電極膜厚 $1\mu\text{m}$ 及び上部電極 $6\mu\text{m}$ を作製した。アクティブ領域ではマイクロストリップ線とし、ミリ波入出力部分では共平面型として作製した。ミリ波入力を行うため下部グランド電極と上部グランド電極パッド接続用 VIA を金メッキにより作製した。

電分散測定

下部電極、VIA 電極及び上部電極作製後上部電極パッド（GSG）へのミリ波入力を 110GHz ベクトルネットワークアナライザにより行い電極長の異なるサンプルに対する S_{21} パラメータ位相測定を行い次式から作製した誘電分散測定用デバイスに対する実効誘電 ϵ_{eff} 分散を求めた。

$$\Delta\phi_{s_{21}} = 2\pi\sqrt{\epsilon_{eff}}f \Delta L/c \quad (1)$$

ここで $\Delta\phi_{s_{21}}$ は測定した S_{21} パラメータ位相差、 L は電極長差、 f はミリ波周波数である。

4. 研究成果

今回の研究開発においては実際の光変調器と同じ進行波型マイクロストリップ線やミリ波入出力で用いた電極（GSG）パッドを用いて測定を行い従来方法と比べて高い精度で誘電分散を測定することができた。これは電気力線が上部電極と下部電極を垂直に走るため基板の影響を受けることなく理想的電気力線を得られたためであると考えられる。これらの測定結果から電極設計も容易となりさらなる帯域幅拡大のためのデバイス設計も可能となった。従来型電極のミリ波 110GHz に対する誘電率は 2.26 であった。

従来型電極設計を用いた場合の光変調器帯域幅は 110GHz 光コンポーネントアナライザを用いてその電気光学信号(EOS S_{21})の周波数増大に対する 3dB 減衰から測定した（図 2 参照）。

誘電率が 2.26 の場合においても図 2 に示すように 3dB 光変調帯域幅は 100GHz であった。今回の研究開発による設計電極を用いた光変調器に対する実効誘電率は 40 - 110GHz に亘り 2.4-2.5 程度にまで増加させることができた。この結果に基づき光変調帯域幅(Δf)電極長(L)積 ΔfL を光変調帯域幅 150GHzcm まで増加可能とできることが見積もられた(5mm 電極長に対する光変調帯域幅 300GHz)。

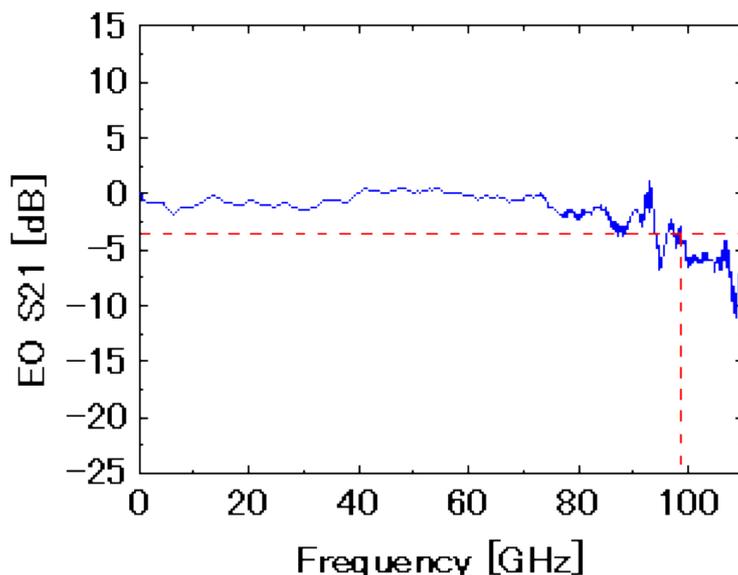


図 2 110GHz 光コンポーネントアナライザを用いたハイブリッド型ガラス・ポリマ光変調帯域幅測定結果（RF プロブによる高周波信号入力）、3dB 光変調減衰に対する 100GHz 帯域幅実証の一例（未発表）

TiO₂ 薄膜を用いた誘電率制御についても電磁界シミュレータを用いた計算し、角膜圧に対して実効誘電率計算を終了した。本成果に基づき光変調器作製及び帯域幅測定を実施する。研究拠点を長崎大学に変更のため長崎大学に2020年度着任した。本大学にはクリーンルームやその内部装置を共同利用施設として有していないため、他大学(京大、アリゾナ大学等)のクリーンルーム及びクリーンルーム内微細加工装置利用が必須であった。しかしながら、行動制限により必要なプロセスを十分に行うことができなかった。

参考文献

- [1] Y. Enami et al. *Applied Physics Letters*, 91, 203507(2007).
- [2] Y. Enami et al. *Nature Photonics* 1, 180 (2007).
- [3] Y. Enami et al. *Applied Physics Letters*, 92, 193502, (2008).
- [4] Y. Enami et al. *Applied Physics Letters*, 94, 213513, (2009).
- [5] Y. Enami et al. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1 23, 1508-1510 (2011).
- [6] Y. Enami et. *J of Lightwave Technology*, 36,4181, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Enami Yasufumi | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Demonstration of >100GHz ultra-high speed glass-polymer optical modulator using dielectric layer | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Impact | 6. 最初と最後の頁 22 ~ 24 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21820/23987073.2020.4.22 | 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 Enami Yasufumi, Yoshida Yuichi | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Analysis and characterization of electro-optic coefficient for multi-layer polymers: dependence on measurement wavelengths | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 39239 ~ 39239 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.500462 | 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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Yasufumi Enami |
| 2. 発表標題 Analysis and demonstration of ultra-broadband Mach-Zehnder polymer/sol-gel waveguide modulators |
| 3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, M3A, San Diego, California, USA（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Yasufumi Enami |
| 2. 発表標題 Novel approach for highly accurate measurement of electro-optic coefficient based on transmission Teng and Man ellipsometric method: dependence on measurement wavelengths |
| 3. 学会等名 Optics and Photonics International Congress (OPIC) 2024, ICNN8-04, Yokohama, Japan 22-26 April, 2024.（国際学会） |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Yasufumi Enami |
| 2. 発表標題 Highly accurate measurements of electro-optic coefficients based on transmission Teng and Man ellipsometric method |
| 3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2024, Charlotte North Carolina, 5-10 May, 2024. (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Yasufumi Enami |
| 2. 発表標題 Unprecedentedly accurate measurements of electro-optic coefficients using the Teng and Man method to eliminate wavelength-dependent errors |
| 3. 学会等名 14th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF) 2024, Tucson, Arizona, 10-12 July, 2024. (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 榎波康文 | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 (株)技術情報協会 | 5. 総ページ数 20 |
| 3. 書名 5G向け高周波拘束部材の開発動向」第3節「マッハツェンダ型有機光変調器の開発と低消費電力、広帯域化 | |

〔出願〕 計3件

| | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 Active region-less modulator and method | 発明者 Yasufumi Enami | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、20200183201 | 出願年 2020年 | 国内・外国の別 外国 |

| | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 Direct drive region-less polymer modulator methods of fabricating and materials therefor ” | 発明者 Yasufumi Enami | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、2020/0285085 | 出願年 2020年 | 国内・外国の別 外国 |

| | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 Active region-less modulator and method | 発明者 Yasufumi Enami | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、2021/0141250A1 | 出願年 2021年 | 国内・外国の別 外国 |

〔取得〕 計1件

| | | |
|-----------------------|--------------|---------------|
| 産業財産権の名称 光変調器 | 発明者 榎波康文 | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、取得済 | 取得年 2019年 | 国内・外国の別 国内 |

〔その他〕

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 長崎大学 榎波研究室 http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/labs/frontier/index.html University of Arizona College of Optical Sciences https://www.optics.arizona.edu/research/faculty/profile/yasufumi-enami 長崎大学大学院工学研究科電気電子工学コース http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/labs/frontier/index.html |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

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 | 高村 映一郎 (Takamura Eiichiro) (30843015) | 福井大学・学術研究院工学系部門・助教 (13401) | 削除：2020年10月26日 |

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 | | |
|---------|-----------------------------------|--------------------------|------------------|
| 米国 | University of Arizona 光科学 カレッジ | University of Washington | Lighthouse Logic |
| 中国 | City University of Hong Kong | | |