

有機物による 200GHz 超広帯域マッハツェンダ型光強度変調器の研究開発 (171509001)

200GHz ultra-broadband Mach-Zhender intensity modulators based on hybrid polymer/sol-gel waveguide

研究代表者

榎波康文 高知工科大学

Yasufumi Enami Kochi University of Technology

研究分担者

-

研究期間 平成 29 年度～平成 30 年度

概要

有機光変調器を構成する各薄膜誘電率及び導電率の測定精度を向上させた後光変調器設計に反映させた。特にミリ波高周波電極は表皮効果のため電極表面にミリ波が進行するため電極表面を鏡面となるように金メッキ処理を最適化し金電極表面を伝搬するミリ波進行波の電極損失を低減した。複数の電極幅で光変調器進行波電極を作製し、その中で最も帯域幅が広い電極幅を選択し光変調器作製及び帯域幅測定を行った。通常光変調器に使用する光通信波長 1.55 μm 以下で電極表面を平滑化すれば電極損失を低減できるのでこれらの荒さを数 100nm 以下の精度で電極作製を行った。その結果を高周波電極設計に反映することによりネットワークアナライザや光コンポーネントアナライザで測定した光変調指数に対する実験結果は理論計算とほぼ一致した値を得ることができた。測定可能な光変調周波数上限 67GHz に対する光変調減衰値 1.5dB を測定し、これらの計算及び実験結果から光変調器設計を最適化し帯域幅 200GHz 実証を可能とした。

1. まえがき

超大容量の情報を極めて安定的、高品質及びシームレスで広域接続するコア系ネットワーク構築のために必要な 400Gbps 通信用の有機物を用いた 200GHz 超広帯域光変調器を研究開発する。光インターフェースを有する光集積回路は、データセンタのサーバチップ間、ラック間などの短距離信号を高速かつ低消費電力でおこなうために研究開発が進められてきた。その際に半導体レーザの高速化限界を補う外部光変調器は電位信号を光信号に変換 (EO 変換) する最も重要な光デバイスの 1 つで光変調器を高速化、低消費電力化する必要がある。

Intel、IBM、Cisco 等の企業はシリコンフォトニクス分野で卓越した研究開発成果を上げつつあり、CMOS と整合性のあるシリコン材料及び半導体プロセス技術を適用しシリコン光変調器を中心にその光集積化を行ってきた。このためにはレーザ、光変調器、光検出器等の光デバイスを小型化集積化 (光トランシーバ化) するとともに低消費電力化や高速化する必要がある。従来型のシリコン等の光変調器を用いた光トランシーバはシングルチャンネルで 25Gbps を超えることは困難である。研究レベルのシリコン光変調器の光変調帯域幅 (3dB 光減衰帯域幅) は 30–40GHz が限界であり帯域幅をこれ以上広げられないことは高速化も困難であることを意味している。InP 光変調器帯域幅は 70GHz 程度まで広帯域化が可能であるがこれ以上の広帯域化は材料特性により極めて困難であった。

したがって、これらの材料限界に基づく光変調器の高速化限界を打破するためには異なる材料である有機物を使用した光変調器を用いる必要がある。

本研究においては電極設計最適化 (インピーダンス整合の最適化及び光変調器長短縮) により 200GHz 以上の帯域幅を実証し 400Gbps の超高速光変調器を実現する。

2. 研究開発内容及び成果

A. 光変調帯域幅拡大のための解析及び実験

(a) 位相速度不整合による光変調帯域幅制限の拡大

RF 電極は共平面型とし電極長 10mm 及び 5mm の有機光

変調器を作製し 110GHz 帯域ネットワークアナライザによりそれぞれのミリ波進行波の透過パラメータ (S21) 及び反射パラメータ (S11) を測定した。作製した超広帯域ハイブリッド型有機光変調器を図 1 に示す。

上部電極膜厚 6 μm 及び電極幅 11、13、15、及び 17 μm の電極を作製した。

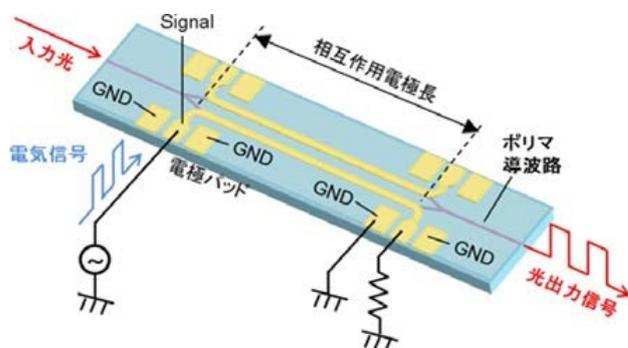


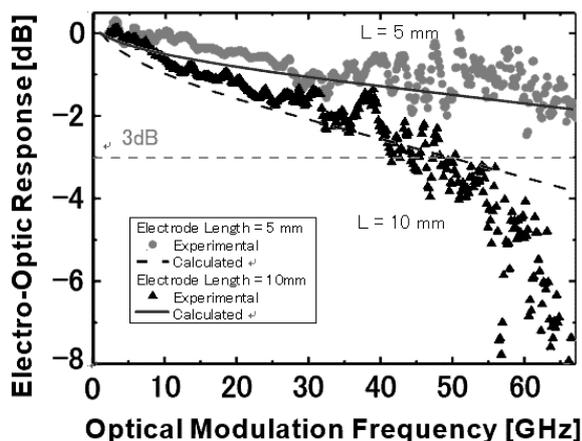
図 1 超広帯域ハイブリッド型ポリマ・ゾルゲル光導波路型光変調器 高速変調器の概要

光変調帯域幅を制限する要因を実験的に明確にし、光変調帯域幅測定を行いさらなる帯域幅拡大に必要な要因を明確にした。特に材料の周波数特性が光変調帯域幅に大きな影響を及ぼすため、アクティブ材料で有る電気光学ポリマだけでなく、光変調器に使用する全ての材料の誘電率等を正確に測定して光変調電極設計に使用した。実験的に得たこれらの値から光変調帯域幅を計算し、電極の RF 進行波透過や反射を計算するとともにネットワークアナライザによる実験的測定を行いその値が一致することを確認した。これにより光変調帯域幅 200GHz 実証可能である事を示した。

(b) 光変調帯域幅制限の解析及び実験結果 (ハイブリッド型有機・ゾルゲルシリカ光導波路)

光コンポーネントアナライザを使用して光変調帯域幅を現有装置限界周波数 67GHz まで測定し、67GHz における減衰値から待機幅 130GHz を理論的に求めた。さらに電極長さとの関係から 200GHz 光変調に必要な電極を計算した。

光コンポーネントアナライザ（測定帯域上限 67GHz）を使用して電極長 5mm 及び 10mm に対する光変調応答（小信号光変調指数）を測定した。電極長 5mm の場合、計算より予想した帯域より遙かに帯域を広げることができた。電極長 10mm の光変調器は 40GHz を超える周波数に対して光変調指数が急激に落ち込んだことから電極構造と設計値に差違あると考えられる。一方で電極長 5mm の光変調器は 67GHz 上限までの全ての周波数において光変調指数の減衰が少なく実験結果と計算結果の良い一致を確認した（図 2）。



（グレー三角：光変調指数実験結果（電極長 5mm）
 黒三角：光変調指数実験結果（電極長 10mm）
 実線：計算結果（電極長 5mm）
 破線：計算結果（電極長 10mm）

図2 光コンポーネントアナライザを用いた光変調指数実験結果及び位相速度不整合及び電極損失を考慮した光変調指数計算結果

(C)光変調帯域幅制限の解析結果 (TiO₂ スロット導波路型有機光変調器)

従来から研究を続けてきた TiO₂ スロット導波路を用いた光変調器を用いて光変調帯域幅をさらに拡大するための計算を行った。TiO₂ は高い屈折率を有し高密度で光変調器への光閉じこめを可能とするだけでなく、電気光学ポリマを高効率で電場配向し高い電気光学係数を得ることを示してきた。本スロット層を用いて誘電体スロット層導入帯域幅拡大のための構造を最適化した。

Si スロット導波路型有機光変調器の光変調指数計算結果は電極長 1cm 及び 2cm に対しそれぞれ 50GHz 及び 35GHz であり TiO₂ スロット導波路型有機光変調器の光変調帯域幅は電極長 1cm 使用時 Si スロット型に比べて 80GHz 広くできることが解った。(D. Zhang and Y. Enami, IEEE Photonics Journal, 9, 5501809, 2017)

(d)実用化のためにパッケージングした光変調器の帯域幅拡大

実際に光変調器実用化するには光変調器チップをパッケージングして光ファイバ接続、RF 信号入力、RF 信号の終端処理、バイアス電極等を総合的に考慮してデバイス設計を行った。特にパッケージング後、RF 信号入力パッ

ドと入力位置により帯域幅が制限されることも計算により見出しより実用化に近い形での光変調器設計を行った。

4. むすび

ゾルゲルシリカガラスと電気光学ポリマを組み合わせた光導波路型光変調器はその低電圧駆動や高速性に優れており、本光変調器に加えて TiO₂ 層等の高屈折率誘電体材料を付加したスロット導波路型光変調器に誘電体スロット層導入し帯域幅をさらに拡大する。今後の展開はデータセンタで使用する光モジュール（光トランシーバ）に組み込み可能なポリマ光変調器を研究開発し 300Gbps（単一チャンネル NRZ）、1.2Tbps（4 チャンネル NRZ）、2.4 Tbps（4 チャンネル PAM4）デジタル光変調を実証することである。

【誌上发表リスト】

- [1] A. Seki, S. Masuda, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Bandwidth optimization for Mach-Zehnder polymer/sol-gel modulators", Journal of Lightwave Technology, vol. 36, pp. 4181-4189, (2018)
- [2] Y. Enami, "130GHz bandwidth based on ultrafast electro-optic polymer/sol-gel modulators", Bit's 6th Annual World Congress of Advanced Materials-2017(WCAM-2017), Xian China, 13 - 16 June, (2017). (invited)
- [3] Y. Enami, A. Seki, S. Masuda, J. Luo, A. K-Y. Jen, "Demonstration of 130 GHz ultra-broadband Mach-Zehnder intensity modulators based on hybrid polymer/sol-gel waveguide", EMN Photonics 2017, Budapest Hungary, 19 - 23 September, 2017. (invited)
- [4] Y. Enami, J. Luo, and A. K-Y. Jen, "Analysis and demonstration of 130 GHz bandwidth for Mach-Zehnder hybrid polymer/sol-gel modulators", 2018 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR), Seoul Korea, 25 - 29 June (2018). (invited)
- [5] Y. Enami, A. Seki, S. Masuda, J. Luo, A. K-Y. Jen, "Ultra-broadband Mach-Zehnder hybrid electro-optic polymer/sol-gel silica waveguide modulators", World Congress on Semiconductors, Optoelectronics and Nano structure 2018(WCSON-2018), Kuala Lumpur, Malaysia, 20-21 Jun, (2018). (invited).
- [6] 榎波康文 「マッハツェンダ型有機光変調器の低消費電力化及び光変調広帯域化」光回路実装技術研究会（エレクトロニクス実装学会 光回路実装技術委員会）東京回路会館（6.22.2018）
- [7] Y. Enami, A. Seki, S. Masuda, J. Luo, A. K-Y. Jen, "Analysis of ultra-high speed Mach-Zehnder hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) pacific rim 2018, Th2J. 5, Hong Kong 29 July - 3 August, 2018.
- [8] Y. Enami, "Ultra-broadband hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators", IEEE CPMT Symposium Japan 2018(Formerly VLSI Packaging Workshop in Japan), Kyoto University, Kyoto Japan. , 19-21 Nov. (2018). (invited).

【登録特許リスト】

- [1]榎波康文、「光変調器」、日本、2015年1月13日、2019年4月2日、特願 2015-004259