

3-2 次世代通信網のための高速光変調技術

3-2 High-speed Optical Modulation for Next-generation Optical and Wireless Networks

山口 祐也

YAMAGUCHI Yuya

将来の光ファイバ通信及び光ファイバ無線ネットワークを見据えて、光変調器の広帯域化に関する研究開発を進めている。光変調デバイスの3次元的な構造最適化と光集積回路の2つの方向性から広帯域化を図る取組を進めており、両技術について紹介する。また、両技術を導入した新規デバイスに関する実験結果についても併せて紹介する。

For the future optical and wireless networks, we are conducting research and development on high-speed optical modulators. We developed two techniques to increase the bandwidth of the modulators. One is an optimization of three-dimensional device structure with layered substrates. The other is an integration of electro-optic frequency-domain equalizer. Finally, an experimental demonstration of broadband modulation with a device we developed is shown.

1 まえがき

光ファイバ通信は現代社会を支える情報インフラとなっており、年々増加し続ける通信トラフィックに対応するために光ファイバ通信黎明期から今日まで光ファイバ通信関連技術に関する研究開発が行われてきた。電気信号波形を光信号波形に転写する機能は光変調と呼ばれ、近距離通信ではレーザーの直接変調、中～長距離通信では光変調器を用いた外部変調と使い分けられている。レーザーを直接変調した場合には原理的に周波数チャープが生じるが、外部変調器では変調歪みの小さいゼロチャープな光変調が可能であるという特徴があり、高い周波数利用効率が要求される中～長距離通信では光変調器を用いた外部変調方式が実用されている [1]。光ファイバ1本あたりの通信容量限界はシャノン・ハートレーの定理で与えられるように、伝送路が許容する周波数帯域幅と信号対雑音比(SNR)に依存する。信号帯域幅については波長多重技術を用いることで光ファイバを低損失に伝搬可能な全帯域にわたる広帯域光信号を用意することができるが、それに必要となる光部品の数についても1波長チャンネルの帯域幅に依存する。したがって、1波長チャンネル当たりの信号帯域幅を大きくする、すなわち、より高速・広帯域な電気信号にて光変調器を動作させることで波長チャンネル多重数を減らすことができ、必要となるコスト・光部品数を減らすことができる。一般的な環境では、標準シングルモード光ファイバ1本あたりの伝送

可能容量は非線形シャノンリミットによって100 Tbps程度に制限されており、この制限を打破する実用的な技術は未だ確立されていない。しかし、通信トラフィックは年平均成長率～20%程度で増加し続けており、仮にこの傾向が10年以上続くのであれば当面の間は伝送可能容量も年率20%程度で増加させ続けていく必要がある。前述のように、シングルモード光ファイバ1本あたりの伝送容量は理論限界に近付いており、今後も継続的に伝送容量を増加させていくためには別方向からの技術的アプローチが必要となる。その技術の1つとしてはマルチコアファイバや細径ファイバに代表される空間領域でのチャンネル並列化が挙げられる [2]。マルチコアファイバでは1本のファイバ内に多数のコアを配置することで、その伝送可能容量をコア数倍に増加させることが可能である。なお、細径ファイバを用いたファイバ芯線数の増加も同様の効果があり、光ファイバ通信における伝送可能容量増加のためには並列化が効果的な手段の1つである。空間的な直交性を利用することでペナルティ無しに通信容量を並列数倍に増加可能であることは従来技術の延長で通信容量を増加させ得るという面で利点であるが、問題点としては消費電力とコストが挙げられる。コストは装置導入のための初期コストと装置故障対応を含めたそれを維持するコスト等から成り、消費電力も維持コストの一部と捉えても良い。単純な並列化を想定した場合には通信容量をn倍とする場合には消費電力もn倍となり、必要となる装置数もn倍となる。これは、

今後の伝送容量増加をチャンネル並列化技術のみで対応した場合、年率 20% で通信トラフィックが増加するのに対応して消費電力も年率 20% で増加していくことを意味する。また、同様に並列化に必要な装置数が増加していくことも意味している。

このような状況の中で上記のような通信トラフィックの増加に対して並列化で対応せざるを得ないと仮定し、通信ネットワークを構成するデバイスにはどのような高性能化が求められるかについて考える。厳密には、通信ネットワークは多種多様な電子・光デバイス等によって構成されており、一まとめにして議論することは不可能であるため、ここでは point-to-point の光リンクにおける光変調器の性能について考えることとする。まず、消費電力の観点では光変調器の半波長電圧（駆動電圧に関する性能指標）の低減が必要となる。仮に年率 20% で通信容量が増加していくと仮定すると、消費電力を増加させない条件としては年率 20% の消費電力の低減、変調器の動作電圧としては 10% 程度の低減が要求されることとなる。帯域幅についても同様の議論が適用でき、1つの変調器で生成できる信号帯域幅を拡大することで全光信号帯域幅を一定とした上で波長多重度を小さくできることとなり、必要となる装置の数が減少する。光変調器の広帯域化は従来の光ファイバ通信だけでなく Beyond 5G に代表される将来的なミリ波/テラヘルツ波の利用にも貢献し得る。無線信号を光信号に変換することで信号伝送や増幅、広帯域なアナログ信号処理等が容易になることを利用した光ファイバ無線技術は将来の有線通信網と無線通信網をシームレスに接続可能とする技術として期待されている。光ファイバ通信用光変調器はその大容量化を目的として広帯域化に関する研究開発が続けられてきており、現在では 50 GHz 程度のものが一般的に流通している。また、最新の研究開発では 100 GHz 級のものが報告され始めている状況であり、まさにミリ波/テラヘルツ波帯の光変調技術が開拓され始めている。NICT においてもその前身である通信総合研究所時代から 20 年以上にわたり光変調技術に関する研究を続けてきており、超高速かつ超高精度な光変調技術を世界に先駆けて実証してきた。本稿では、近年の光変調器に関する研究開発動向をレビューするとともに、NICT の開発した高速光変調器について紹介する。

2 光変調器とその帯域制限要因

光変調器にはその電極構造によって集中定数回路と見なせるものと分布定数回路と見なせるものの 2 種に大別することができるが、本稿では後者について主に

説明する。分布定数回路を採用することで伝搬方向に作用長を大きくする構造は進行波型構造と呼ばれており、その電極は進行波型電極と呼ばれている [3]。集中定数型ではそのキャパシタンスに依存する RC 時定数によって動作周波数が制限されるが、分布定数回路とすることでこの制限から解放される。しかし、分布定数回路では電気信号の伝搬損失が無視できなくなり、この伝搬損失の周波数依存性によって 3 dB 帯域は有限の値に制限される。言い換えると、この伝搬損失の周波数依存性を小さくすることができれば広帯域な光変調器を実現できることとなる。

NICT では、デバイス断面構造の最適化と補償回路構造の導入という 2 つの技術を組み合わせることで広帯域化を図っており、両技術について以下の 2.1 及び 2.2 にて説明する。

2.1 光変調器の断面構造と層構造の導入

進行波型光変調器における主な帯域律速要因は速度整合と伝搬損失の周波数依存性の 2 つである。速度整合は被変調光と変調電気信号との伝搬速度の一致度合いを意味しており、両者が一致する場合を完全速度整合と呼ぶ。完全速度整合を満たす場合には、被変調光と変調電気信号との位相的な関係は伝搬方向の作用長にわたって一定となり、誘起される光位相変化量も最大となる。これは被変調光と変調電気信号の時間的積なり積分（オーバーラップとも呼ぶ）が完全速度整合条件下で最大となることと等価である。完全速度整合はデバイスの光導波路と電極の構造を適切なものと設計することで満たすことができ、その状況下においては光変調器の帯域制限要因は電気信号伝搬損失の周波数依存性となる。

電気信号の伝搬損失とその周波数依存性は伝送路によって異なるが、ここでは誘電体基板上的のコプレーナ線路について考える。このとき、信号の伝搬損失は導電損失と誘電損失に分けることができ、前者は周波数の平方根に、後者は周波数に比例して増加する。図 1 に光変調器を構成する進行波型電極における損失の数値計算例を示す [4]。導電損失と誘電損失のどちらも周波数の増加に伴って損失が増加するが、その増加傾向はそれぞれ異なるため、比較して低周波帯では導電損失が、高周波帯では誘電損失が支配的となる。言い換えると、低周波帯では誘電損失は基本的に無視できるほど小さいが、ある程度高周波まで動作帯域を確保したい場合には誘電損失が無視できない程度には大きい値となるため、広帯域変調器を設計する際には導電損失と誘電損失のどちらも小さくなるような設計が求められることになる。

電気信号伝搬損失を低減させる方法として、デバイ

スへの層構造の導入に関する研究開発が近年活発に行われている。その背景には、スマートカットやイオンスライスに代表されるウェハ加工技術の進展が挙げられる [5][6]。これらの技術により、光デバイスの3次元的な構造設計と製造が可能となってきた。光変調器においては、層構造の導入によって電気信号の損失低減が可能となり、結果として広帯域化が実現される。図2にニオブ酸リチウム (LN) 変調器において層構造

を有する基板を用いた場合のデバイス断面構造を従来の単一材料基板 (バルク基板) と比較して示す。LNは誘電率が比較的大きいため、外部回路と整合の取れる 50Ω の特性インピーダンスを持つコプレーナ電極を設計した場合には、信号電極幅は細く、その電極厚みも薄いものに制限される。これに層構造を導入し、低誘電率材料へと置き換えることで、同じ特性インピーダンスを維持したまま信号電極幅や電極厚みを比較的大きく設計できる。これにより、導電損失は減少し、結果として周波数依存性も比較的平坦となる。また、誘電損失についても層構造の材料を低誘電率かつ低誘電正接なものを選ぶことで低減することができ、従来のLN単一基板に比べて低減することができる。現在までの研究報告では SiO_2 や低誘電率樹脂を用いたものが代表的であるが、今後は特性のより良い材料と組み合わせることで更なる高性能化が期待できる。

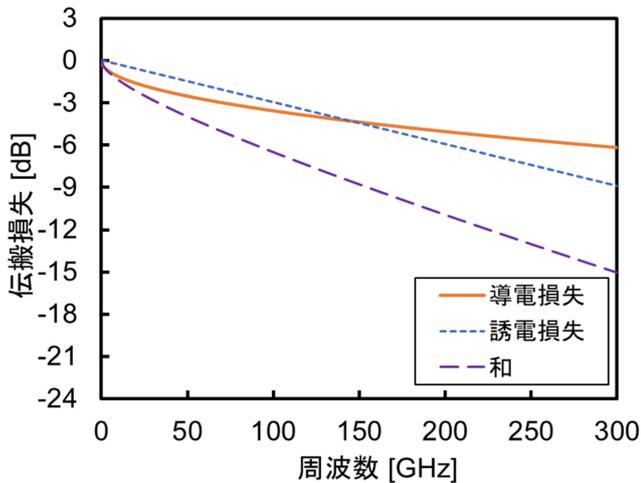


図1 進行波電極における伝搬損失の数値計算例

2.2 光変調器の回路構成と応答の周波数領域等化

光変調器の回路構成を変更することで広帯域化を図る研究開発について説明する。前節で説明したように進行波型電極における 3 dB 帯域は導電損失と誘電損失によって制限されており、その周波数依存性も物理法則に従うように現れるが、この周波数依存性を光回

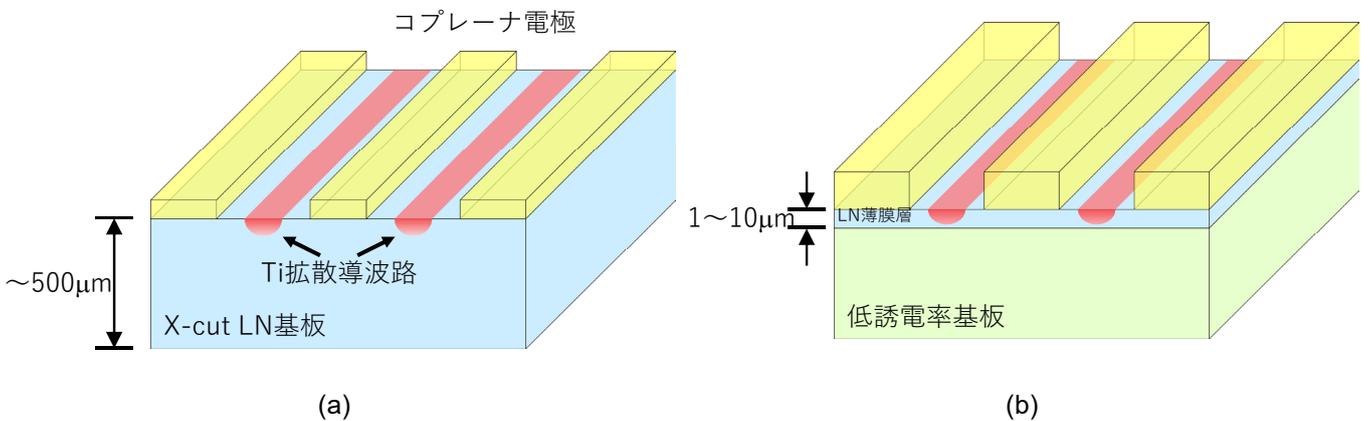


図2 (a) 従来の単一材料基板を用いたデバイス断面構造 (b) 層構造を有する基板の断面構造

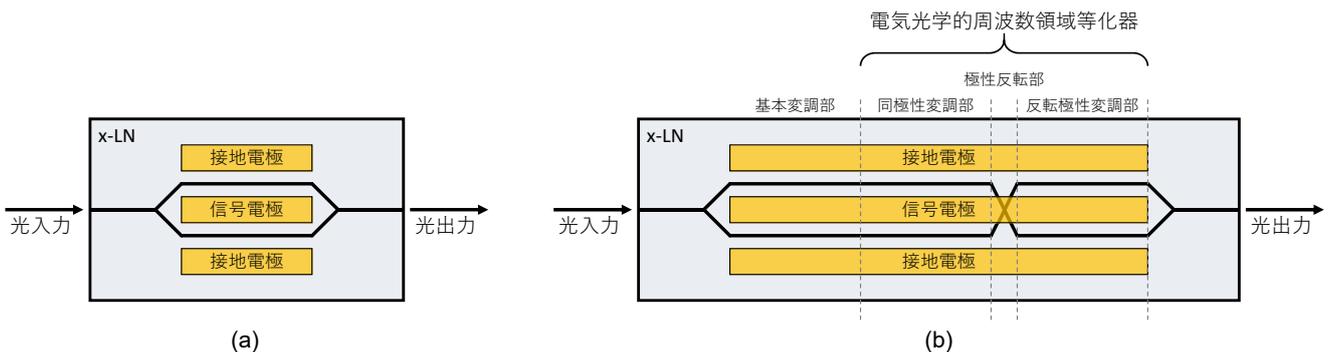


図3 (a) 従来のマッハ・ツェンダ変調器 (b) 電気光学的周波数領域等化器を集積した構造

路の集積によって補償する方法を提案している。図3にその回路構造を従来構造と比較して示す。ポッケルス効果を利用したLN変調器は本質的には光位相変調器であり、その光位相変化量は入力電圧に比例する。光振幅(強度)変調器として使用したい場合には、この位相変化を光振幅変化へと変換するためにマッハ・ツェンダ干渉計構造を導入するのが一般的となっている。図3(a)はその光回路の概要を示しており、2分岐した光路では印加電界を通して位相変化を与えられ、合波後の出力光振幅は干渉する2光波間の位相関係に応じて変化する。この基本構造に対して、図3(b)では電気光学的周波数領域等化器を伝搬方向における後段に集積することで広帯域化を図っている。その動作原理は進行波型電極の伝搬に伴う減衰を利用したものであり、電気光学的周波数領域等化器を単体として見ると低周波では動作せず、高周波でのみ動作するような変調器となっている。これにより、従来構造と比較して低周波帯での応答を維持した上で、高周波帯での感度のみを向上させることが可能となる[4]。

電気光学的周波数領域等化器による広帯域化の効果について理論計算した例を図4に示す。仮に従来設計で100 GHz程度の3 dB帯域を有する変調器があった場合、それに電気光学的周波数領域等化器を集積することで200 GHz程度まで広帯域化されることがわかる。

この電気光学的周波数領域等化器による広帯域化を実証するために図5(a)に示すデバイスを作製した。基板はLNが低誘電率材料に貼り合わされた構造であり、光導波路はチタンの熱拡散によって形成している。電極は進行波型のコプレーナ線路を構成しており、材料には金を用いている。デバイスの基本特性として、光挿入損失は5.4 dB、半波長電圧は3.7 Vであった。光変調動作の感度を表す電気光学応答(EO応答)の周波数依存性について測定した結果を図5(b)に示す。理論値と似た平坦な周波数依存性が得られており、変調器としての3 dB帯域は110 GHzを超えていることが確認された。現在はこの電気光学的周波数領域等化器を集積する利点を実証した段階であり、今後は本技術によって変調器性能を最大化する理論提案や更なる構造変更による高性能化を図るべく研究開発を続けていく予定である。

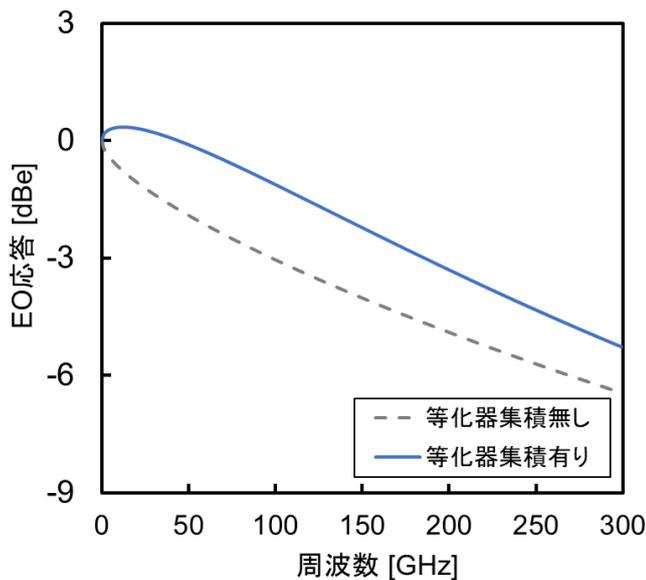


図4 電気光学的周波数領域等化器の集積によるEO応答の周波数依存性に関する変化

3 まとめ

光変調器の広帯域化を目的として取り組んでいるデバイス断面構造の最適化と補償回路構造の導入という2つの技術について紹介した。NICTが本分野における研究開発進展の一助となれるよう今後も研究開発を続けていく。

謝辞

本研究の内容は住友大阪セメント株式会社との共同研究の成果である。ご協力いただいた関係各位に感謝申し上げます。

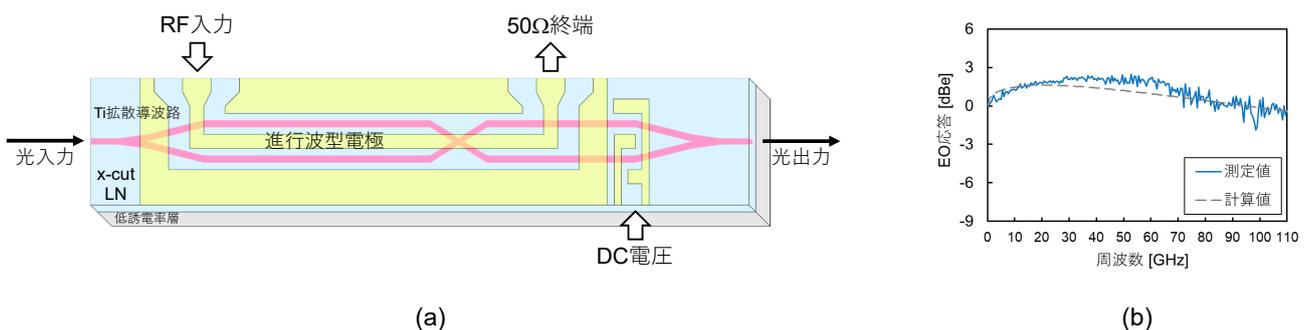


図5 (a) 試作したデバイス構造 (b) 測定したEO応答の周波数依存性

【参考文献】

- 1 F. Koyama and K. Iga, "Frequency Chirping in External Modulators," Journal of Lightwave Technology, vol.6, no.1, pp.87-93, 1988.
- 2 B. J. Puttnam, G. Rademacher, and R. S. Luis, "Space-division multiplexing for optical fiber communications," Optica, vol.8, no.9, pp.1186-1203, 2021.
- 3 M. Izutsu, Y. Yamane, and T. Sueta, "Broad-band traveling-wave modulator using a LiNbO3 optical waveguide," Journal of Quantum Electronics, vol.13, no.4, pp.287-290, 1977.
- 4 Y. Yamaguchi, P. T. Dat, S. Takano, M. Motoya, S. Hirata, Y. Kataoka, J. Ichikawa, S. Oikawa, R. Shimizu, N. Yamamoto, K. Akahane, A. Kanno, and T. Kawanishi, "Traveling-Wave Mach-Zehnder Modulator Integrated with Electro-Optic Frequency-Domain Equalizer for Broadband Modulation", Journal of Lightwave Technology, vol.41, no.12, pp.3883-3891, 2023.
- 5 G. Poberaj, H. Hu, W. Sohler, and P. Gunter, "Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-photonic devices," Laser and Photonics Reviews, vol.6, no.4, pp.488-503, 2012.
- 6 K. Watanabe, Y. Yamaguchi, A. Kanno, and R. Takigawa, "LNOI photonics fabricated on Si wafer by room temperature bonding," Proc. 7th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D), 5A-04, 2021.



山口 祐也 (やまぐち ゆうや)

ネットワーク研究所
フォトニック ICT 研究センター
光アクセス研究室
主任研究員
博士 (工学)
光エレクトロニクス