

4-2 高速光デバイス技術

4-2 High-speed Photonic Device Technologies

4-2-1 高度な変調方式に対応した高速光変調デバイス

4-2-1 High-speed Optical Modulators for Advanced Modulation Format

山口祐也

Yuya YAMAGUCHI

光変調デバイスは光ファイバネットワークを構成する一要素であり、電気信号から光信号を生成する役割を担っている。一般的に、光変調器は高速に低駆動電圧で動作することが求められているが、近年では多値変調やアナログ応用を見据えて信号歪みの小さい光変調動作が求められ始めている。本稿では、極めて変調歪みの小さい変調器として、高消光比変調器と高線形性変調器の2種について試作デバイスの評価結果を交えて紹介する。

Optical modulator is one of key elements constituting the optical fiber network, and the device plays a role of generating optical signals from electric signals. Many researches to reduce the half-wave voltage and to widen the electro-optic bandwidth of optical modulators have been reported. For the future applications such as analog radio over fiber, it is required to suppress the modulation distortions. In this paper, we review the two types of modulators for the precise optical modulation.

1 はじめに

光変調技術は電気信号から光信号を生成する基盤的技術であり、光変調器は現在の光ファイバ通信ネットワークを構成する一要素を担っている。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における通信方式も高度に複雑化しており、デバイス性能への要求も高くなってきている。

光変調器は光ファイバ通信の成長の歴史を共に歩んだデバイスであり、特に代表的な外部変調器であるLiNbO₃(LN: ニオブ酸リチウム)変調器は1970～1990年代に精力的に研究開発が進められた[1][2]。現在実用されている変調器もこの時期に培われた技術が基となっている。LN変調器は広帯域化と低駆動電圧化を目指した研究が活発に行われてきたが、それを困難としていた要因のひとつはLNが難加工材料であるということである。例として、ドライエッチングによる光導波路形成は半導体に代表される他材料において基本的なプロセス技術であるが、LN基板を用いたデバイスではドライエッチングによる光導波路形成は容易ではなく、多くのLN変調器ではTi拡散やプロトン交換による導波路形成を採用している。その一方で、

近年ではプロセス技術及び装置の発達により、LNのような難加工材料についても微細構造を作製できるようになってきている。例えば、イオンスライス法によるサブミクロン厚のLN薄膜基板が作製可能であり、エッチング加工によりリッジ導波路を形成することで小型かつ高帯域な光変調器が実現され始めている[3][4]。ただし、これまでに報告されているものは最小限の構成から成る単一マツハ・ツェンダ(MZ)変調器であり、実用されているDP-QPSK変調器のような集積デバイスへの発展が待たれる。

光変調器の広帯域化及び低電圧化に関する研究開発が進められている一方で、変調デバイスの機能に関する研究の進展は少なく、LN変調器の黎明期に開発されたMZ干渉計型デバイスが現在も使われ続けている。変調器の構造は目的とする変調方式によるが、現在の変調器の基本構造であるMZ変調器は強度変調用途で開発されたものである。このMZ変調器は本質的には光波電界の振幅変調器であり、位相を変化させることなく振幅あるいは強度のみを変化させることが可能である[5]。長距離光ファイバ通信の実用化初期は強度変調・二乗検波方式で構成されており、LN強度変調器は不要な位相変化の小さい低チャープな変

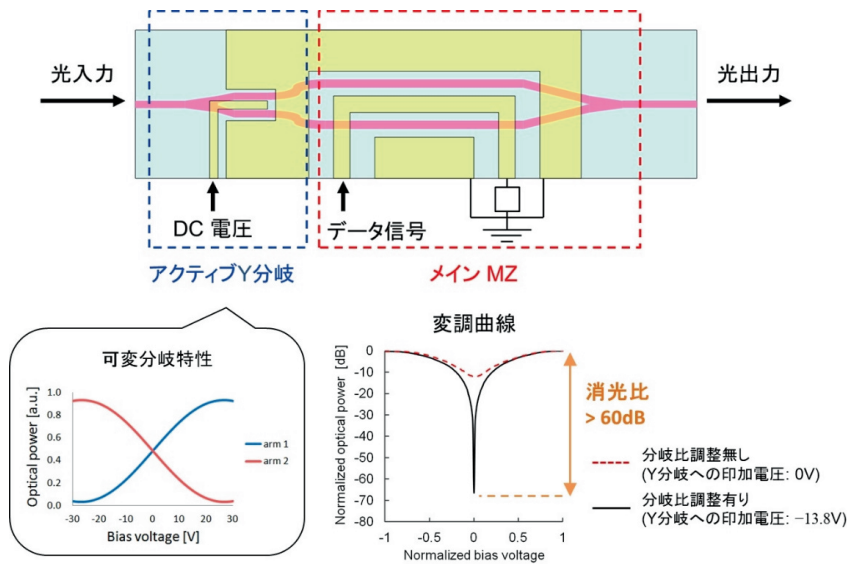


図1 高消光比 MZ 変調器の構造と動作

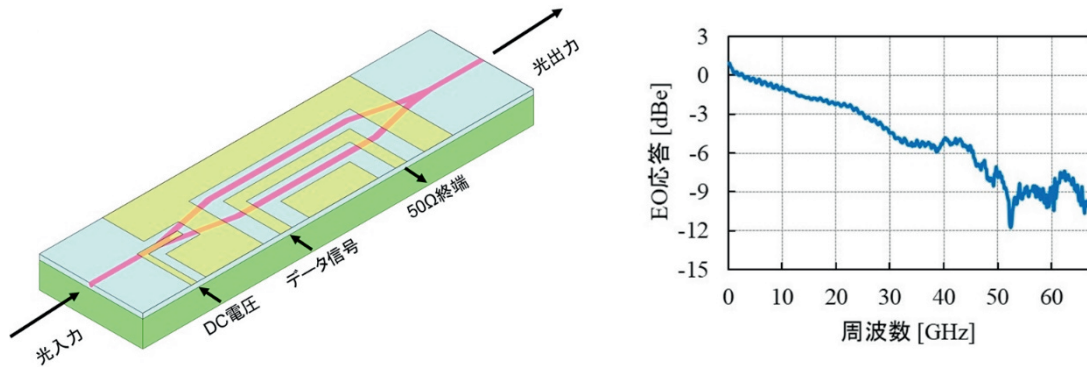


図2 薄膜LN基板を用いた高速光変調器と周波数応答特性

調が可能であることから採用された。その後、スペクトル利用効率や検出感度に優れるデジタルコヒーレント方式が提案され [6]、現在では QAM に代表されるベクトル変調が主流となっている [7][8]。今後も更なる周波数利用効率の増大を図って変調方式の高度化が予想される一方で、デバイス構造の観点から見ると基本構造は強度変調用途に開発されたものが現在のコヒーレントリンクでも流用されている。今後は長距離基幹網以外のモバイルフロントホールやデータセンター向けリンクでもパフォーマンスを最大化させるために高度な変調方式が用いられることが予想されるが、デバイスについてもそれぞれのリンクに応じた機能及び性能が要求されると考えられる。

本稿では、将来の超多値光変調やアナログ応用に向けた変調歪みの極めて小さい変調器について紹介する。数学的理論どおりに動作する高消光比 MZ 変調器と、その MZ 変調器が本質的に有する非線形性を補償した高線形性変調器について順に述べる。

2 高消光比変調デバイス

光ファイバ通信が普及している現在では、光変調器に限らず多くの基本的光部品が高精度に作製され、高性能なデバイスが安定して供給されているということが共通認識であると思うが、実際には光デバイスにおいて高い精度で設計どおりの性能を再現性良く実現することはいまだに困難である。例として、光の干渉を利用した MZ 変調器では、理論上は無限の ON-OFF 消光比が得られるが、実際に作製された変調器では 20 ~ 30 dB の消光比となるのが一般的である。デジタル通信用途で使用する場合には、この有限の消光比による変調歪みを無視できる場合が多いが、多値 QAM 信号やアナログ信号生成等の用途では、この変調歪みが問題となり得る。

上記のような問題を解決するため、図1に示す構造を有する高消光比変調器を作製した [9]。高消光比変調器は消光比調整部と高速光変調部から成り、消光比調整部は従来の Y 分岐型 EO スイッチを静的可変光

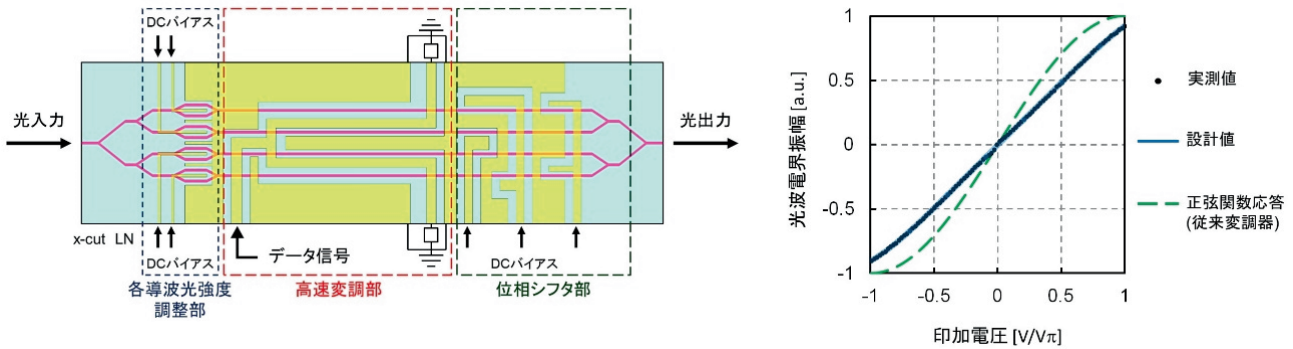


図3 高線形性光振幅変調器と実測された線形応答

分岐器(以後、アクティブ Y 分岐と呼ぶ)として応用したものである。図1の変調曲線が示すとおり、アクティブ Y 分岐への電圧印加による消光比の調節が実現されており、60 dB を超える静的消光比が達成されている。

また、基礎性能として求められる高速変調動作と上記の高消光比特性を同時に実現するため、薄膜 LN 基板上的試作も行った [10]。図2にその構造を示すが、従来 500 μm 程度ある LN 基板厚を 10 μm 程度まで薄片化し低誘電率な支持基板に接着している。本デバイスの光挿入損失は 9 dB、半波長電圧は 1.2 V である。また、周波数応答特性を図2に示しているが、20 GHz を超える 3 dB 帯域を確認している。なお、本デバイスは低駆動電圧化に重点を置いた設計のものであり、同構造で変調作用長の短いデバイスを作製した場合には更なる広帯域化の実現が見込まれる。

3 高線形性変調デバイス

MZ 変調器はほかの変調器と比べて変調歪みが小さいことから長距離光ファイバ通信に用いられている。MZ 変調器を光振幅変調器としてみなした場合には、数学的に理想的な振幅変調器と比較して 3 次の非線形応答を本質的に有している。信号歪みのない理想的な光振幅変調器を実現するため、図3に示す集積デバイスを作製した。本デバイスでは変調深さの異なる 2 組の MZ 変調器が信号電極を共通化する形で集積されており、デバイス内部での光の干渉を利用することで MZ 干渉計由来の 3 次の非線形性を抑圧している [11]。試作したデバイスでは設計どおりの変調動作が得られており、従来変調器に比べて応答の線形性向上が確認されている。

4 まとめ

今後更に高度化するであろう変調方式に対応するた

め、変調歪みの極めて小さい光変調デバイスを開発した。プロセス技術の進展の恩恵を受けて、変調器の基礎性能についても向上を続けているが、今後も従来にない新たな機能を有する変調デバイスの創出を目指す。

謝辞

本研究の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発」の研究開発課題「ミリ波帯による高速移動用バックホール技術の研究開発」として実施された。

【参考文献】

- H. Nakajima, "Integrated optics devices for high bit rate applications," Proc. Optical Fiber Communication Conference, TUH6, 1990.
- M. Izutsu, Y. Yamane, and T. Sueta, "Broad-band traveling-wave modulator using a LiNbO₃ optical waveguide," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.13, no.4, pp.287-290, 1977.
- V. E. Stenger, J. Toney, A. Pollich, D. Brown, B. Griffin, R. Nelson, and S. Sriram, "Low Loss and Low V_π Thin Film Lithium Niobate on Quartz Electro-optic Modulators," Proc. European Conference on Optical Communication, Tu.2.C.5, 2017.
- M. Zhang, C. Wang, X. Chen, M. Bertrand, A. Sham-Ansari, S. Chandrasekhar, P. Winzer, and M. Loncar, "Ultra-High Bandwidth Integrated Lithium Niobate Modulators with Record-Low V_π," Proc. Optical Fiber Communication Conference, Th4A.5, 2018.
- F. Koyama and K. Iga, "Frequency chirping in external modulators," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.6, no.1, pp.87-93, 1988.
- K. Kikuchi, "Fundamentals of coherent optical fiber communications," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.34, no.1, pp.157-179, 2016.
- T. Kawanishi, T. Sakamoto, and M. Izutsu, "High-speed control of lightwave amplitude, phase, and frequency by use of electrooptic effect," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol.13, no.1, pp.79-91, 2007.
- P. Winzer and R. -J. Essiambre, "Advanced Optical Modulation Format," Proc. IEEE, vol.94, no.5, pp.952-985, 2006.
- Y. Yamaguchi, S. Nakajima, A. Kanno, T. Kawanishi, M. Izutsu, and H. Nakajima, "Single Mach-Zehnder modulator with active Y-branch for higher than 60 dB extinction-ratio operation," Proc. European Conference on Optical Communication, P.2.15, 2013.
- Y. Yamaguchi, A. Kanno, N. Yamamoto, T. Kawanishi, and H. Nakajima, "High Extinction Ratio LN Modulator with Low Half-Wave Voltage and Small Chirp by Using Thin Substrate," Proc. Microoptics Conference, A-2, 2017.
- Y. Yamaguchi, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "Linearized LiNbO₃ Modulator with Dual Mach-Zehnder Interferometer and Branched Asymmetric CPW Electrode," Proc. European Conference on Optical Communication, Tu.2.C.4, 2017.



山口祐也 (やまぐち ゆうや)

ネットワークシステム研究所
ネットワーク基盤研究室
研究員
博士(工学)
光エレクトロニクス