

LN 光デバイス集積技術

Recent Progress of LiNbO₃ Optical Integrated Devices

Key-words : LN optical integrated devices, Optical modulators, Optical matrix switches, Fiber optic gyroes

箕輪 純一郎 Junichiro MINOWA
(New Technology Research Labs., Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd.)

1. ま え が き

1960年代半ばに生まれたニオブ酸リチウム (LiNbO₃, 以下 LN と略す) は, 大きな電気光学定数や圧電定数を有していたため, 当時いずれも黎明期にあった光通信工学, レーザー工学, 超高波工学に携わる研究者に強い関心が持たれた。そしてガスレーザーの変調用及び光非線形用材料として, また超音波デバイス特に弾性表面波デバイス用材料として利用された。

1980年代以降, LN結晶は弾性表面波デバイスの実用化の進展に伴ってその需要が伸び, 品質も改良され現在では3~4インチ系の高品質ウエハーとして広く供給されている。

一方, 光集積回路の視点から歴史的にみると, 1969年に光集積回路の概念が, 前記LN結晶を生んだベル研究所から提案された。この考えを実現する方法として光導波路を結晶表面上に形成する試みが1970年代前半に行われた。すなわち1974年にベル研究所から¹⁾, ほぼ同時期に電々公社通研から²⁾, LN結晶にTi拡散で良質の先導波路が形成できることが報告された。これを契機に, この技術を使って導波路あるいは集積構造の光機能デバイスを製作する動きが急速に高まった。そして多くの研究開発機関で取り上げられ, 数多くの検討結果及び研究開発成果が得られた。

これらを整理すると,

- ① 光通信の用途で,
 - a 高速変調器, b 光スイッチ素子及びこれを多段に配列したマトリクススイッチ, c 光通信測定器用で OTDR (オプティカルタイムドメイ

ソリフレクトメーター用) スイッチ, d 光通信信号処理用で可変波長フィルター, 光周波数シフター, 偏光変換器など。

- ② センサーの用途で,

- a ファイバージャイロ用位相変調器と集積化,
- b ドブラー速度計用光位相調整器と集積化, c 変位計測用位相変調器など。

- ③ その他, SHG (倍高調波発生) 素子など。

これらの詳細については, 1980年代後半より1990年代前半にかけ, 光集積回路特集あるいは LiNbO₃ 導波路デバイス特集として, 電子情報通信学会の学会誌や専門委員会討議資料^{3), 4)}, 応用物理学会光学懇話会からの教科書⁵⁾, 業界技術・製品紹介雑誌⁶⁾ などに次々とまとめられてきている。

本稿ではこのうち市場ニーズが明確となり, 1990年代後半まで開発実用化の検討が続いている代表的な LN 導波路デバイスについて記述することとしたい。なお, 誌面に制限があり, 詳細な説明や図表は文献や教科書などを参照願いたい。

2. LN 導波路デバイスの基本素子

LN 導波路デバイスは以下の特徴を持っている。

- ① 1次の電気光学効果であるポッケルス効果を利用している。LN結晶の光軸に沿った方向の電界の印加により, 大きな屈折率変化が得られる ($\gamma_{33}=30 \times 10^{-12}\text{m/V}$)。

- ② 金属Tiの熱拡散により低損失(0.1dB/cm程度)な導波路が形成できる。例えば5~8 μm 幅の導波路(シングルモード条件)を形

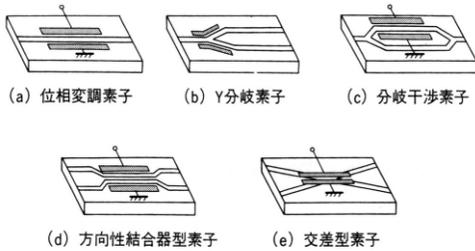


図1 LN導波路デバイスで利用される基本素子

成すると、深さ方向にも十分な屈折率差 ($\Delta n = 2 \sim 5 \times 10^{-3}$) が得られ、標準的なシングルモードファイバーとの接続損失は0.5dB程度とすることができる。

LN導波路デバイスで利用される代表的な基本素子を図1に示す。(a)の位相変調素子は直線導波路と電界印加用の電極とで構成される。(b)のY分岐素子は導波路の光強度を分岐するが1:1の分岐比が標準的である。電極を配する場合もある。(c)の分岐干渉素子はマッハツェンダー型構成とも呼ばれ、Y分岐素子によって分岐されたそれぞれの導波路の位相変化を強度変化に変換することができる。すなわち強度変調器を構成するときの素子である。(d)の方向性結合器型素子と(e)の交差(x)型素子はともに2入力2出力の構造であってスイッチの基本素子であり、これらを多段に配置すれば $N \times M$ のマトリクススイッチとなる。

LN結晶の持つ電気光学定数のうち、 γ_{33} が最も大きな値である。これは光軸方向(Z方向)に電界が印加されたとき利用できる定数である。LNウエハーのX板(Y板)とZ板によって導波路と電界印加用の電極の位置関係は異なる。X板(Y板)の場合は電極は導波路を挟む構造となる。Z板の場合は導波路の真上に電極がある構造となる。ただしこの場合、光が電極金属によって吸収されるという現象を防ぐため、 SiO_2 など誘電体膜からなるバッファ層が必須となる。

3. 光通信デバイス

3.1 変調器

通信システムでは変調という機能は不可欠である。LN結晶に光導波路が製作でき、この

導波路構造によって重要な変調器パラメーターである帯域幅及び駆動電圧の大幅な改善がなされると新しい光通信システムを生み出すことができる。このようなインパクトを期待しながら、LN導波路型変調器の研究が、1970年代後半よりNTT研究所⁷⁾及び大阪大学⁸⁾で始まった。1980年代に入り、光通信システムは幹線系への適用が進み、ギガビット伝送が始まりつつあったが、レーザーダイオード(LD)の直接変調ではチャーピングという現象で、長距離伝送ができないという問題が生じていた。これを解決するには外部変調器、代表的にはLN強度変調器が有力候補であった。しかし、前記LN変調器のその後の開発はDCドリフトや温度ドリフトという変調動作点がDCバイアスや温度によって変動する現象に苦しんでいた。1980年代後半、富士通研究所では温度ドリフトを抑圧する解決法を見だし⁹⁾、LN変調器の実用化に弾みをつけた。1990年に入るとDCドリフトを印加する方法、超高速化、広帯域化を実現する設計法、実装手法¹⁰⁾などの開発が進み、実用に耐え得るLN変調器に成長してきた。

実用に供せられているLN変調器は、強度変調器では図1(c)に示した構造を基本として、電極を進行波型構造でインピーダンスを50Ωに設定して、広帯域化を図り、半波長電圧を数V以下としている。図1(a)に示した位相変調器もほぼ同様な構成となっている。更に位相変調器の変形として偏波スクランブラーが用いられるようになった。偏波スクランブラーは位相変調器の入力点に偏光子を約45°に設置し、二つの直交する偏波(TE/TM偏波)を励起して、この2偏波の位相差が光導波路伝搬中に印加電界により、0~360°変化するようにしたものである¹¹⁾。ある時間幅で見掛け上偏波がないようにすることができる変調器である。

これらLN変調器は、

① 2.5及び5Gb/s強度変調器として、太平洋/大西洋横断光海底ケーブルシステムを始めとした光海底ケーブルシステム¹²⁾、

② 2.5及び10Gb/s強度変調器として各国陸上光幹線システム、

に用いられている。なお、偏波スクランブラーは①のシステムの中で強度変調器の出力側に設置して用いられている。また②のシステムでは欧米で波長多重(WDM)方式が極めて盛んになり、その中でLN強度変調器の需要が増大している。また、③光CATV用に約2GHz帯域のアナログ変調器として需要が急増してきた。この変調器では強度変調器と位相変調器を集積化することが要求されている。

LN変調器の今後の展望としては、ミリ波帯SCM(副搬送波多重)変調器、超高速変調器(40~100Gb/s)の需要が出てくるものと予想され、その実用化に向けた開発が必要と考えられる。

また、上記用途①、②について低価格化への取り組みと強度変調器と位相変調器の集積化のためのデバイス構成法の検討が重要である。

3.2 マトリクススイッチ

1980年代に入り、光ファイバーの普及の動きが出てきてネットワーク化を指向するようになり、複数のファイバー回線を切り換える光スイッチや光の状態のまま交換を行う光交換機の開発の必要性が生じてきた。このような要求には多数の1×2、2×2などの光スイッチ素子(図1参照)を集積化したマトリクススイッチが必要である。ここにLN導波路型マトリクススイッチが有力な候補として取り上げられた。そしてマトリクススイッチのアーキテクチャー、スイッチング電圧の低減法、消光比特性の改善法などにつき、いくつかの研究機関で精力的に検討された。NECの研究所では8×8マトリクススイッチを幾つか使って32回線の空間分割型光交換システムの実演ができるレベルのものを試作した⁵⁾。

しかし、多くのマトリクススイッチでは長期信頼性、経済性、偏光依存性などに課題を残しており、実用化には至っていない。最近ようやくこれらの課題を解決した4×4マトリクススイッチが実用品として世に出るといふ報告がある¹³⁾。

4. センサー用デバイス

4.1 ファイバージャイロへの応用

計測分野において、LN導波路デバイス実用化の先陣を切ったのは、ファイバージャイロ(FOG)である。

これまで使用していた圧電素子にファイバーを巻き付けて構成していた光ファイバー位相変調素子をLN導波路型位相変調素子に置き換えることによって、FOGのダイナミックレンジ、スケールファクターの安定性などを大幅に改善することができる。図2はクローズドループFOGに組み込まれたLN位相変調素子の一例である。ジャイロメーカーはその後カプラー、偏光子などもLN基板に集積化してジャイロチップとして小型、安定化、経済化を図っている。そして、カーナビゲーション、無人搬送車、自動測量システムなどの商用に使用を開始している^{14)、15)}。

4.2 電界センサー

導波路LN変調器の電磁界測定 電界センサーとしての応用がある。電界センサーは、LN変調器の信号用電極にアンテナエレメント(センサーエレメント)を接続したので、このアンテナエレメントと電極以外はすべて非金属材料とすることができるため、測定する電磁界を乱さず正確な判定が可能である。また導波路型構造に基づく広帯域性と高感度性という特徴を併せ持つ。

図3にマッハツェンダー型強度変調器を用いた電界センサーシステムを示す¹⁶⁾。システムは光変調器の収められたセンサー本体と光源部、検出部からなっている。光源から出た光は、光ファイバーを通りセンサー本体に入る。このときセンサー本体の導波路部を通るとき、セン

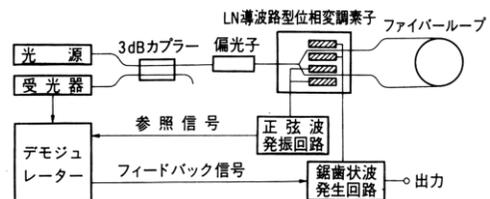


図2 クローズドループFOGの構成

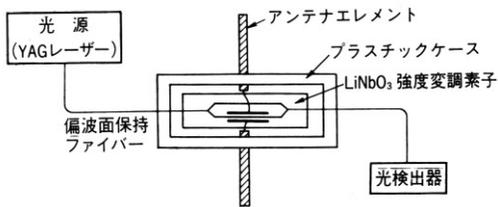


図3 電界センサーの構成

サーエレメント間に誘起される電圧により強度変調を受ける。変調の度合いは誘起された電圧に比例するので、これを光検出部で検出して、電界強度を測定することができる。

近年、情報化の進展に伴い、我々の周囲には多くの電子機器・通信機器が増加している。本システムはこれら電子機器から放射される妨害波の測定、妨害波に対する耐性、遮蔽特性、人体への影響などの測定に大いに活用されると考えられる。

同様な考えに基づいて導波路型LN変調器にTVアンテナを接続した、TV波中継システムの実用化例¹⁷⁾がある。

5. あとがき

LN導波路デバイスのうち、商品化の進んでいるものを取り上げて記述を行った。

これらデバイスは導波路化による性能向上、高安定化などの効果、メリットによって商品化の段階に達したものであって、集積化に基づいた効果によるものは小さい。マトリクススイッチへの適用を除いては集積の度合いは2~3素子である。

このように見るとLN導波路デバイスの今後の発展には、集積度アップをねらうよりも、他の材料・構成では持たせにくい高速・広帯域の位相変調器や強度変調器を主体とした応用デバイスを広くねらうことが重要と考えられる。最近のIEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics誌上でLN導波路デバイスの通信システム

への幾つかの応用が取り上げられている^{18~22)}。大いに参考になる。

文 献

- 1) R. V. Schmidt and I. P. Kaminov, *Appl. Phys. Lett.*, 25, 498 (1974)
- 2) 宮沢信太郎, 野田寿一, 応用物理, 48, 867-74 (1979)
- 3) 皆方 誠, 電子情報通信学会論文誌, J77-C-1, 194-205 (1994)
- 4) 神谷武志, 荒川泰彦共編; 超高速光スイッチング技術, 培風館 (1993) 第7章.
- 5) 応用物理学会光学懇話会編; 光集積回路: 基礎と応用, 朝倉書店 (1988) 第6章, 8章.
- 6) 特集: 応用が広がるニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 結晶, *Optus E*, 140, 98-141 (1991)
- 7) S. Yamada and M. Minakata, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 20, 733-37 (1981)
- 8) M. Izutsu et al., *IEEE J. Q. E.*, QE-14, 394-97 (1978)
- 9) H. Nakajima, IOOC '89 (1989) 19 D 3-3.
- 10) H. Nagata and N. Mitsugi, *Optical Fiber Technology*, 2, 216-24 (1996)
- 11) F. Heismann et al., *IEEE Photon. Technol.*, 6, 1156 (1994)
- 12) 山本 周, 信学会誌, 80, 281-84 (1997)
- 13) 中林幸信, 潮田 淳, 北村光弘, 電子情報通信学会総合大会, C-3-184 (1997) p.369.
- 14) K. Hotate, ACOFT '95 (1995) pp.367-70.
- 15) 大野有孝, *Optus E*, 208, 109-15 (1997)
- 16) 田島公博, 桑原伸夫ほか, 信学論 B-II, J76, 538-45 (1993)
- 17) 生岩量久, 中 尚ほか, 電子情報通信学会論文誌, J79-C-1, 249-55 (1996)
- 18) F. Wehrmann et al., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2, 263-69 (1996)
- 19) F. Heismann and R. W. Smith, *ibid.*, 2, 311-18 (1996)
- 20) H. Porte et al., *ibid.*, 2, 319-25 (1996)
- 21) P. Baldi et al., *ibid.*, 2, 385-95 (1996)
- 22) M. Fujimura et al., *ibid.*, 2, 396-400 (1996)

[筆者 紹介]

箕輪 純一郎

(みのわ じゅんいちろう)

1972年東北大学大学院博士課程電子専攻修了, 工学博士. 1972~1989年NTT電気通信研究所勤務. SAWデバイスの実用化, 光通信用WDMデバイスの研究開発. 1990~住友大阪セメント(株)新規事業部門の研究開発マネジメント.



[連絡先] 〒274 船橋市豊富町585 住友大阪セメント(株) オプトエレクトロニクス研究部