

LN 光変調器の開発動向

住友大阪セメント(株)

宮崎徳一

1 はじめに

LiNbO₃ (ニオブ酸リチウム, LN) は, 大きな電気光学定数を有することや, Ti 熱拡散やイオン交換により通信波長帯で低損失な光導電路を形成できること, LN 結晶が光学デバイス用材料として, 現在では直径 3 ~ 4 インチの高品質な結晶が安定して得られることなどの特徴を有している。このため, 光変調器, 光ジャイロ, 光スイッチや電界センサ等の電気光学効果を利用したデバイスや, 音響光学効果を用いたチューナブルフィルタ等, 多くの光デバイスに利用されてきている。

LN 光変調器は, LN を用いた光デバイスの代表的なものの一つである。LN 光変調器には, 温度変化やバイアス用の DC 電圧の印加によって, 動作点が動くドリフト現象が問題になっていたが, 現在では対策がなされ, 光海底ケーブルシステムといった高速光通信システムの送信部において, 高性能な外部変調器として用いられてきている。

また, 近年陸上幹線系においても高速化が進み, 光ファイバの分散の影響が軽視できなくなり, 変調による周波数チャープが問題とされるようになった。このような点から, 商用 10Gbit/s 高密度波長重 (DWDM) 光通信システムにおいても, LN 光変調器の有用性が認識されるようになり, 現在大きな需要が生じてきている。さらに次期通信システムとして研究開発の進む, 40Gbit/s 通信システムにおいてもその実用化が検討されており¹⁾, より高性能な光変調器の開発実用化が期待されている。

本稿では, このような LN 高速光変調器を中心に, 特徴や研究開発動向を紹介して行きたい。

2 LN 光変調器の構成・特徴

LN 光変調器は, 1 次の電気光学効果である, ポッケルス効果を用いた屈折率変化により, 光変調を行うデバイスである。電気光学効果の応答速度は非常に早いため, 高速なスイッチング応答が可能である。また LN 結晶は, 結晶光学軸の Z 方向に電界を印加することにより, 最も効果的に光変調を行うことができる。このため, 使用される結晶カット (主に Z カットおよび X カット) に応じて, 図 1 のような導波路およびコプレーナ線路 (CPW) 型電極構成がとられ, 結晶の Z 軸方向の偏光を入射する。また, 電極を LN 基板との間には, 電極金属による光波の電搬損失を防ぐため, SiO₂ 等のバッファ層が形成される。

LN 光変調器には, 位相変調, 強度変調, 偏波変調の各動作がある。基本となるのは位相変調器で, 図 1 の構成方法により実現できる。また 2 つの位相変調器を組み合わせマツハツェンダー (MZ) 型構成をとることで光強度変調器を, また TE/TM の両偏光を入射することで偏波変調器 (偏波スクランブラ) を構成することができる。

一般に, 変調器の動作帯域を広帯域化させるため, 図 2 のような電気信号と光波を同方向に電搬させる進行波型動作が用いられる。このとき素子の作用長が数 cm にもおよび LN 光変調器では, 電気信号 (マイクロ波) と光波の速度整合ととることが特に重要である。速度統合が満たされた場合では, 動作帯域が 10GHz 以上にもおよび広

帯域な光変調器を実現できる。しかしLNの屈折率が光波とマイクロ波で大きく異なることから(光波 $1.55\ \mu\text{m}$ での屈折率 $n=2.15$, マイクロ波の屈折率 $n_m \sim 4.2$), LN中に分布する電界を相対的に少なくしてマイクロ波の実効屈折率を光波の実効屈折率に近づける必要がある。また電極の特性インピーダンスを駆動回路やコネクタの $50\ \Omega$ 系にマッチさせマイクロ波の反射を少なくする必要もあるために電極構成が制限され、 $1\ \mu\text{m}$ 程度の比較的厚いバッファ

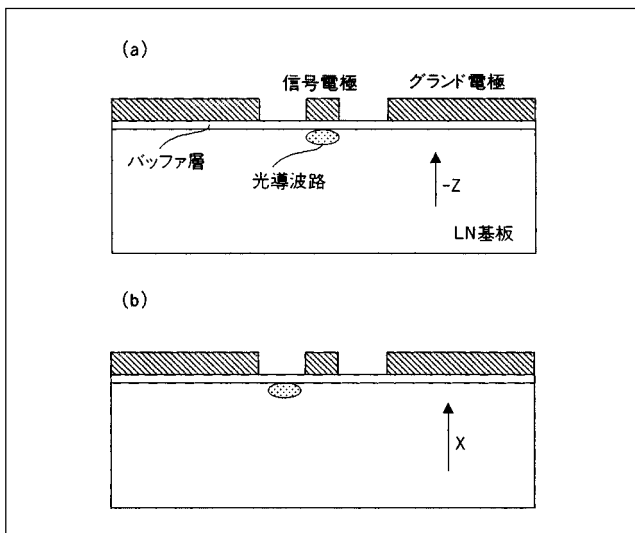


図1 LN光変調器の断面図
(a) Zカット変調器 (b) Xカット変調器

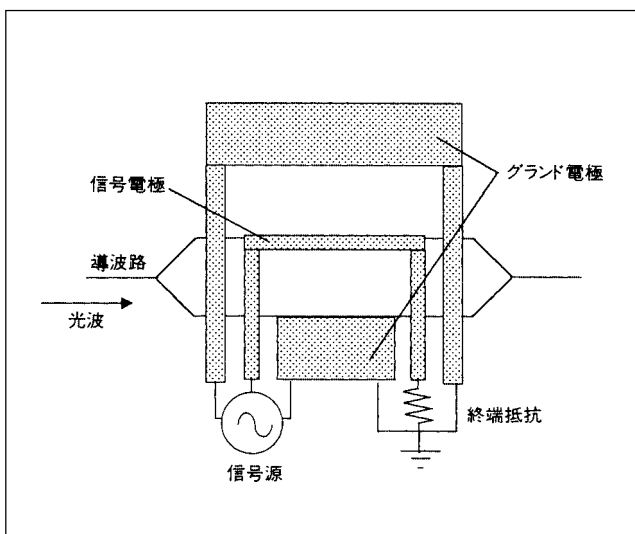


図2 進行波型動作(MZ型光強度変調器)

層と厚さ $20\ \mu\text{m}$ 程度の高アスペクト比の電極で構成されている。

LN光変調器の特に光強度変調器は、半導体EA変調器と比較して、下記のような特徴を持っている。

1) 変調による周波チャープが小さい。

図3に示すような、2電極型のMZ型変調器または、XカットMZ型変調器を用いて、MZの各アームに等量の位相変化を加えるプッシュプル変調を行なうことにより、原理的に変調による周波数チャープを0にすることができる。

2) 広帯域は波長範囲で動作が可能。

LN光変調器はその動作原理上、光同波路のシングルモードを満たす条件で導波路作成すればよいため、ファイバアンプの増幅帯域以上の広帯域な波長範囲で動作が可能である。

3) 特殊な変調器動作が可能。

2電極型構成の変調器を用いることにより、光デュオバイナリのような、特殊な変調器動作を行うことも可能²⁾。

これらの点が、半導体電界吸収型(EA)光変調器と異なるLN光変調器の特徴的な点となっている。

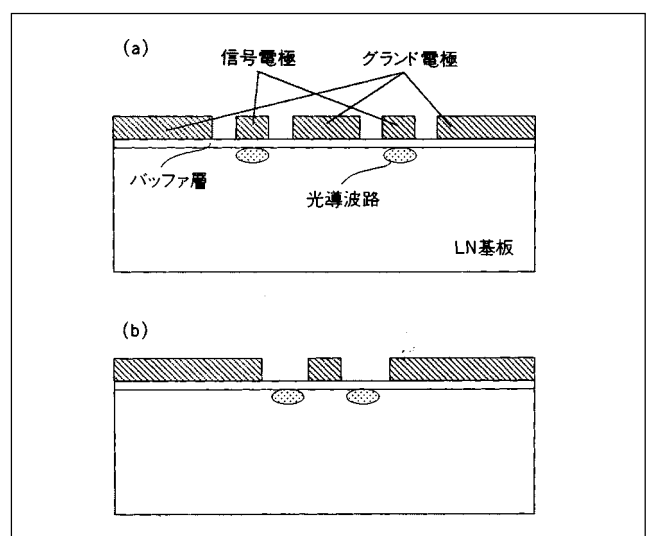


図3 LN光変調器の断面図
(a) 2電極型MZ型光変調器(Zカット) (b) XカットMZ型光変調器



3

LN 光変調器の開発動向

3. 1 変調帯域の広帯域化, 低電圧駆動化

LN変調器の開発の領域において,最も重要なテーマが磁気40Gbit/sシステムで使用可能な,低電圧駆動できる超

高速変調器の開発である。現在,市販の変調器では図4のような40GHz帯までなだらかな周波数応答を持ち,応答が急激に落ち込むロスディップ等が無い変調器が製作されている³⁾。しかし前章で述べたような,バッファ層厚と電極厚の制御による変調器構成では,-3dB帯域で最大20GHz程度の変調帯域が限界となっている。40Gbit/sのような超高速光変調器では,変調電気信号のドライバから得られる出力電圧にも制限があり,このような変調器を駆動可能なドライバアンプは,非常に高価である。このため,変調器には,一層の広帯域化,低電圧駆動化が求められている。変調器の広帯域化を阻む要因としては次のようなことがあげられる。

1) 進行波型動作における電気信号と光波の速度整合の問題。

2) 電気信号の減少・劣化。(変調電極の導体損,表皮効果による伝搬損失,およびバッファ層とLNの誘電体損,電極の線路インピーダンスやコネクタとの電気接続部のインピーダンス不整合)

上記の理由のため,広帯域化のためには変調電極を短縮し,作用長を短くするのが有効だが,駆動電圧の上昇を

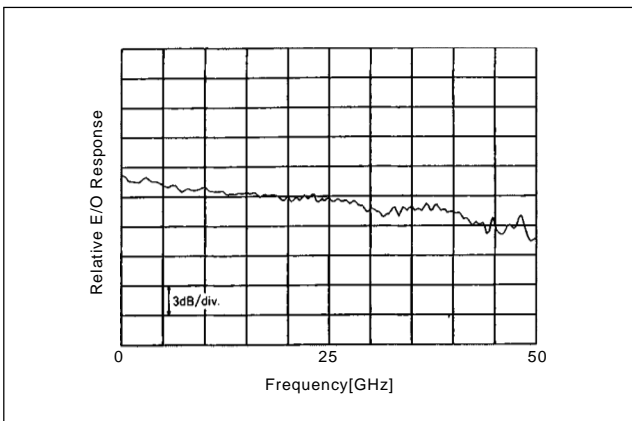


図4 LN変調器の周波数応答例

招いてしまう。これらこの点を改善のため,以下のような報告が行なわれている。

a) リッジ型構造

図5のようにZカットLN変調器において,Ti拡散により導波路を形成した後,導波路の両側をエッチングすることによりリッジ構造としたものである。マイクロ波帯で高屈折率なLNが,電極周囲から減少するため,従来構造に比べて速度統合がとりやすくなることと,さらに電極下の電界密度が上がり,変調効率が増するという利点がある。最近の報告では,リッジ型構造に,かつ電極を2段構成で精度よく作成することで,2電極型動作で低周波での駆動電圧1.5Vという報告がされている⁴⁾。

b) マッシュルーム型電極構造

電極構造を図6に示すようにマッシュルーム型にし,電極表面積を増やすことにより,表皮効果によるマイクロ波の伝搬損失の低減を行なうものである。帯域32GHz,DCでの駆動電圧4.3Vという報告がある⁵⁾。

3. 2 コスト削減,省スペース化

近年の大容量高速通信においては,通信システムが複雑化し複数の変調器を用いることが多くなっている。1chあたり伝送速度が10Gbpsを越える高速通信においては,

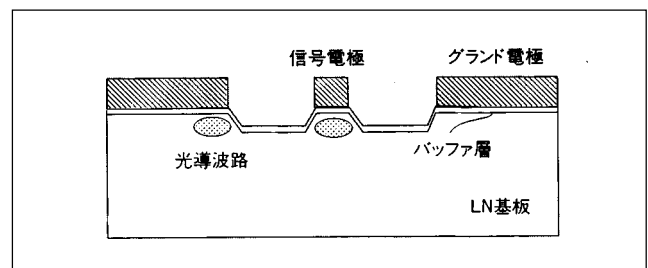


図5 リッジ型LN光変調器の断面図

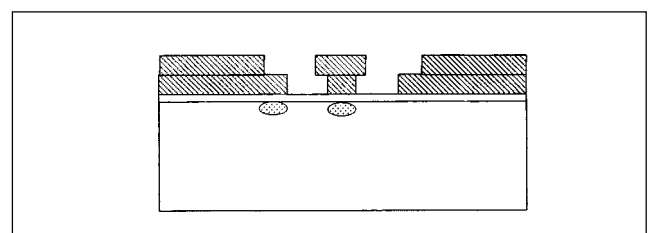


図6 マッシュルーム型電極LN光変調器の断面図

ファイバの分散や非線形効果の影響を無視することができない。このため、伝送信号のRZ符号化や位相変調器を用いたチャープ制御といった手段がとられ、図7(a)のように複数の光変調器が直列接続されて用いられている⁶⁾。このため変調器に対するコストの削減や省スペース化が強く望まれており、1チップ中に複数の変調器を集積化する試みが行なわれている⁷⁾。また、集積化によりシステム中に占める、変調器の挿入損失を減少することができる。

これらのことから、図7(b)のような組み合わせの集積型変調器の開発が行われている。現在では駆動電圧の関係から素子長が制限され、1チップ中に2素子の集積化が主であるが、さらに多素子の変調器の集積化を行なうための要素技術の開発が重要である。またDWDMでは100波以上の多重が行なわれるため、必要な変調器の数量は非常に大きなものとなる。このことに対して、コスト削減および省スペース化が要求されており、変調機の並列集積化を行っていく検討も必要であろう。

3. 3 ミリ波フォトニクスにおけるLN変調器

携帯電話の普及等、無線通信に対する需要も盛んであ

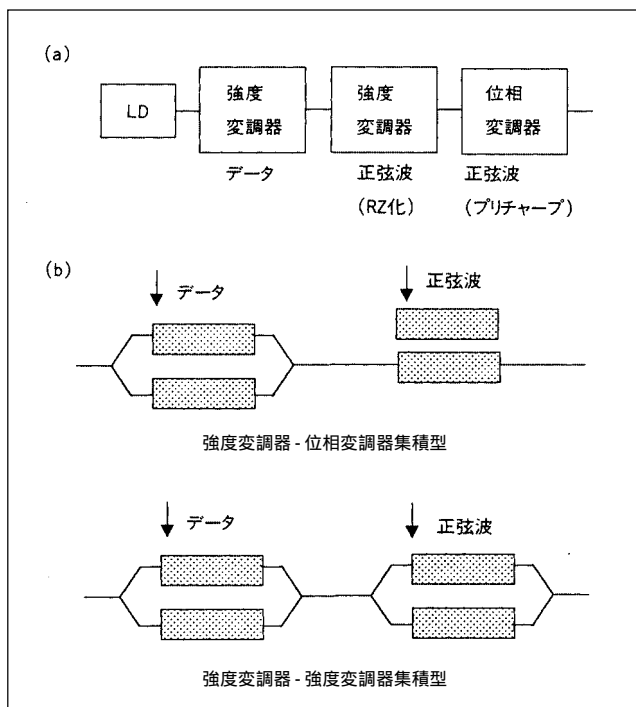


図7 (a)送信部ブロック例 (b)LN光変調器の集積例

る。このような無線通信システムにおいても、無線通信と光通信の融合化が行われており、例えば図8のように、基地局とアクセスポイント間には、光伝送が用いられている。現在では周波数資源の拡大のため、新たに30GHzや60GHz帯といったミリ波帯での通信サービスの研究開発が行われており⁸⁾、高性能な光変調器が必要とされている。

このような通信システムでは、搬送波周波数を中心とした狭い信号帯域幅のみ通信に必要なため、変調器についても帯域動作型であっても問題がない。このことを利用して、進行波型動作とは異なった原理を用いた、高効率な変調器が提案されている。図9のような共振電極動作を用いたLN変調器で、60GHz帯の変調動作の確認が報告させている^{9,10)}。

4 おわりに

以上にLN光変調器の現状や研究開発状況について述べた。40Gbit/s 通信システムを目指した、低電圧駆動な超高

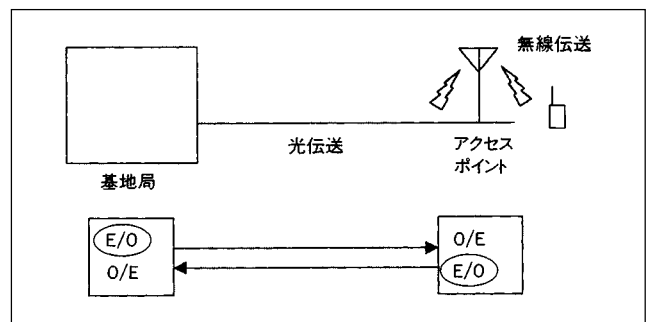


図8 ミリ波帯通信システム例

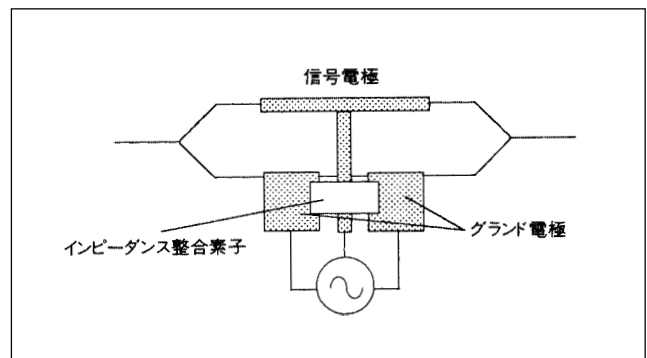


図9 共振型LN光変調器上面図



速LN光変調器の早期開発,商用化を進めることが大切である。また,変調器の集積化を中心に,光変調器の高性能化,多機能化を進め,EA型半導体変調器等にないLN変調器の特徴を生かした用途開発を図ることが重要と考えられる。

参考文献

- 1) 例えば,第1回40Gbit/s 光伝送技術研究会,信学技報, OCS 40G-1, 1998
- 2) 松浦暁彦ほか,信学技報, OSC99-30, pp.57-62, 1999
- 3) 下津臣一ほか,信学技報, OCS95-61, pp.25-30, 1995
- 4) K.Noguchi et .al, IEICE Trans. E81-C, pp.13161320, 1998
- 5) Rangaraj Madabhushi et.al, ECOC 97 TU1b, pp.29-32, 1997
- 6) 例えば, K.Imai et al, OFC199 Tech Digest, PD5-1, 1999
- 7) P. Hallemeier et . al, NFOEC Technical proceedings session A5, 1999
- 8) 例えば,小川博世, CRL第96回研究発表会予稿, pp.51 - 64, 1999
- 9) 水落隆司ほか,信学技報, OQE-87-163, pp.29-36, 1987
- 10) 佐々木雅英ほか,信学会総合大会, C-3-125

Recent developments of LiNbO₃ (LN) Optical Modulators
Norikazu Miyazaki
Sumitomo Osaka Cement CO.,LTD. Opto - Electronics research division New technology research Laboratories



ミヤザキ ノリカズ

所属:住友大阪セメント 新規技術研究所オプトエレクトロニクス研究グループ

連絡先:〒274-8601 千葉県船橋市豊富町585番地
Tel.047 (457) 0902 Fax.047 (457) 3993

E-mail: nmiyazaki@sits.soc.co.jp

経歴:1994年電気通信大学電気通信学部電子工学科卒業。1996年電気通信大学大学院電気通信学研究科電子工学専攻終了。同年住友大阪セメント(株)入社以来, LN光変調器の研究開発に従事。