

## 光通信用 $\text{LiNbO}_3$ 変調器

光ファイバー通信システムの高度化を支えるキーデバイスとして、誘電体結晶を用いた  $\text{LiNbO}_3$  変調器が注目されている。変調器の原理や特性、さらに今後の課題や新材料への期待などについて述べる。

住友大阪セメント(株) 久保寺 憲一\*、坂根 敏夫\*\*

光ファイバーを用いた通信インフラの整備拡大が続いている。光ファイバーの能力を最大限に活用するために、変調速度の高速化（2.5Gb/sから10, 40Gb/s）と多重波長数の増大（高密度WDM化）が鋭意進められている。

このような状況において、半導体レーザー、ガラスファイバーと並んで、誘電体結晶を用いた  $\text{LiNbO}_3$ （以下、LNと略す）光変調器が、キーデバイスとして（特に、大陸間や陸上の長距離系伝送路における不可欠なデバイスとして）用いられている。誘電体材料は半導体、ガラス材料と並んで光通信技術を支える材料として位置付けられている。本稿ではまずLN変調器の原理と構造について説明し、特性、並びに最近の開発動向について、さらに、今後の課題と新材料への期待について述べる。

### LN 変調器の原理と構造

光変調器とは情報を光の信号に変換して光ファイバーに乗せる働きをするものであり、光通信システムにおいて必須な部品としてあげられる。光変調器には、LN以外に半導体を用いたもの（EA変調器）があるが、使用波長が設定波長の近傍（ $\pm 5 \sim$

10nm）に限定されること、強度変調に伴って周波数変動（チャープング）が起こることが知られており、大容量の長距離幹線用としてはこれらの影響の小さいLN変調器が通常用いられる。

LN変調器では動作原理として、電界によって屈折率が変わる電気光学効果（ポッケルス効果）を用いている。図1にLN変調器（強度変調器）の代表的な構造を示す。変調器の構成としては、まずバルク型と導波路型があり、さらに導波路型については、交差型、Y分岐型、分岐干渉型、方向性結合型などの構造が報告されている<sup>1)</sup>。ここでは、製造上の再現性、並びに駆動電圧や温度安定性などの特性に最も優れた分岐干渉導波路型を採用している。光導波路は、Ti（チタン）金属の熱拡散あるいはプロトン交換法と呼ばれる方法で形成される。

直線導波路に入射した光はY分岐導波路によって2つに分けられ、並列に配置された直線導波路を通過して再びY分岐で合波される。2つの直線導波路に近接して電極が設けられており、2つの導波路には逆方向の電界がかかるために、電圧が印加されると、それぞれ  $\Delta\phi$  と  $-\Delta\phi$  の位相変化を受ける。

$\Delta\phi$  は、

$$\Delta\phi = 2\pi \Delta n L / \lambda \quad (1)$$

で与えられる<sup>1,2)</sup>。ただし、 $\Delta n = n_0^3 r_{33} E_z / 2$  は結晶のz軸方向に電界  $E_z$  をかけたときの屈折率変化（通常  $10^{-5}$  オーダー）、 $L$  は電極長、 $\lambda$  は入射波

\*くぼでら けんいち：新規技術研究所 所長  
\*\*さかね としお：同研究所 主席研究員  
〒 274 - 8601 千葉県船橋市豊富町585  
☎ 047 - 457 - 0900

図1 LN強度変調器の構造(結晶長は約5cm)

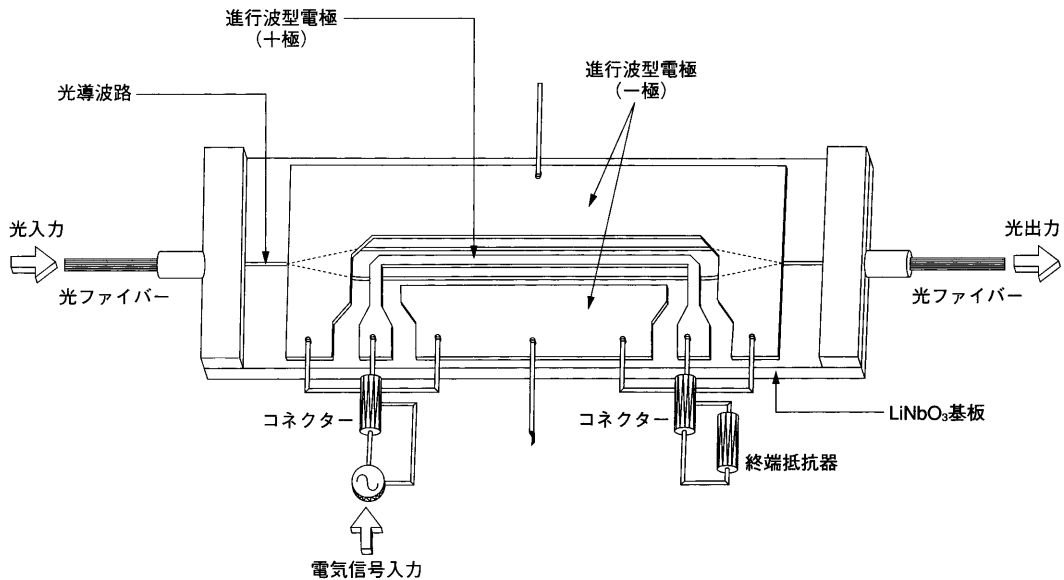
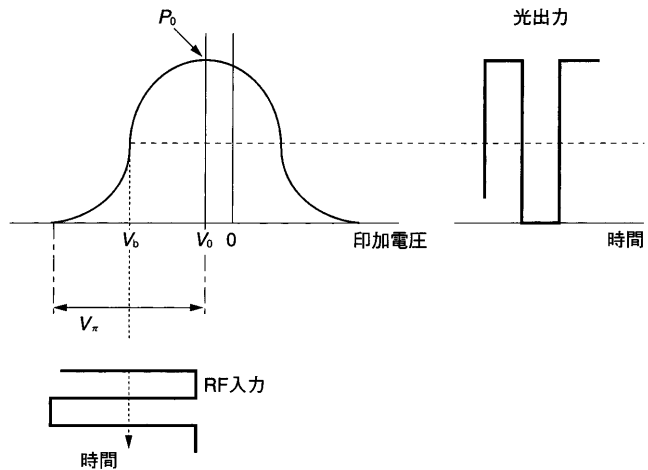


図2 LN強度変調器の動作原理



長,  $n_0$ はLNの屈折率,  $r_{33}$ は1次の電気光学定数(ポッケルス定数)を表す。

2つの導波路での位相差が  $2\Delta\phi = \pi$  となるように電圧をかけると, 2つの光は逆位相の状態で見合ひ, 干渉して打ち消し合ひ, 導波路から出射されない(基板内部に散乱する)。この電圧は半波長電圧 ( $V_\pi$ ) と呼ばれ, 印加電圧  $V$  を  $V_\pi$  と  $0V$  の間で行き来させることで強度変調が行われる。

変調器の光出力は,

$$P(V) = 1/2 \{ 1 + \cos(\pi V / V_\pi) \} \times P_0 \quad (2)$$

で与えられる。ただし,  $P_0$ は最大透過光強度である。

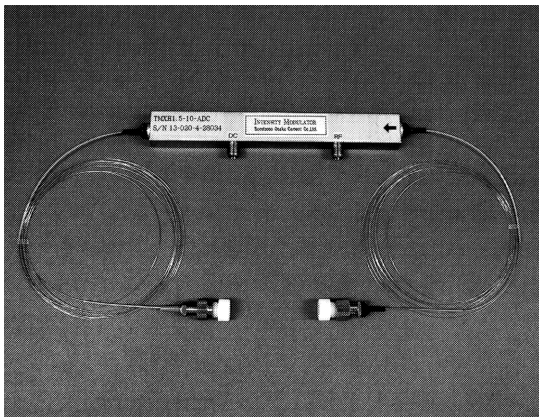
図2に変調時の入出力動作を示す<sup>3)</sup>。印加電圧としては, 変調信号の高周波電圧のみでなく,  $1/2$  ピーク点を動作点とするための直流電圧  $V_0$  を重畳する。さらに図中に示したように, 実際には製造上の

変調速度	強度変調器			
	5Gb/s	10Gb/s	20Gb/s	40Gb/s
使用波長	1.55 $\mu$ m帯			
挿入損失	$\leq 5$ dB			
駆動電圧	$\leq 4V_{p-p}$	$\leq 4.5V_{p-p}$	$\leq 5V_{p-p}$	$\leq 5.5V_{p-p}$
光帯域 <sup>*1)</sup>	$\geq 4$ GHz	$\geq 8$ GHz	$\geq 18$ GHz	
ON/OFF消光比	$\geq 20$ dB			
電極インピーダンス	50 $\Omega$			

\*1) 光3dB-down (130MHz基準)

表1 LN強度変調器の性能

写真1 LN光変調器外観写真



バラツキによるゼロ点シフト $V_0$  (0)があり、これを補償するための直流電圧も重畳される。

電極には進行波型電極と呼ばれる構造が用いられる。電極を走る高周波信号(マイクロ波)の速度と導波路内の光の速度が同じになるように、電極構造および $SiO_2$ パツファ層(光の導波損失を避けるために設けられたLN表面と電極間の膜)の膜厚が設計される。

変調器の帯域は、マイクロ波と光の屈折率の差( $n_m - n_0$ )および電極長 $L$ に逆比例することが知られており<sup>4)</sup>、例えば40GHzの帯域を得るには、 $(n_m - n_0) \cdot L < 0.166$ が要求される(例えば $L = 3$ cmとすると、 $n_m - n_0 < 0.055$ の高精度が要求される<sup>3)</sup>)。

### LN変調器の特性と新構造

表1に代表的なLN強度変調器(写真1)の性能を示す<sup>5)</sup>。使用波長は1.55  $\mu$ m帯用のものを示すが、他に1.3  $\mu$ m帯用がある。使われる伝送路の特

性に合わせて、5、10、20、40Gb/s用のものが準備されている。変調方式としては通常のNRZ変調を想定しており、変調帯域は20および40Gb/s用で18GHz(正弦波を印加した場合の光信号出力が、DCまたは低周波信号で変調したときの $1/\sqrt{2}$ に低下する信号周波数。光帯域と呼ばれる)に設定されている。

40Gb/s用の伝送システムは現在のところ開発段階にあり、LN変調器以外のデバイス開発を含めて各メーカーがシステムの構築にしのぎを削っている。この中であって、キーデバイスであるLN変調器は、伝送システムそのものの性能を決めるといっても過言ではなく、広帯域で低電圧動作が可能で、かつ安定性、信頼性<sup>6)</sup>に優れた低価格のデバイスの実現が期待されている。

LN変調器には、前述して強度変調器の他に位相や偏波状態に変調をかける位相変調器や偏波変調器があり、表1の強度変調器とほぼ同等の特性が得られている。位相変調器は、図1の分岐干渉導波路の部分一本の直線導波路に置き換えた構造をしている。通常、強度変調器の後に接続して信号に同期させて用い、出力光に周波数変調をかけてファイバー伝送路の波長分散特性を補償するために用いられる。

偏波変調器は偏波スクランブラとも呼ばれ、偏波状態の変動によってシステムに発生するノイズを抑えるために、やはり強度変調器と組み合わせで用いられる。構造は位相変調器と同一であり、位相変調器に、LN基板に対して45°方向の直線偏波光を入射すると、導波光は直交する2つの偏波状態となって(TEおよびTM偏波と呼ばれる)印加電圧に応じた位相差を生じ、出力光の偏

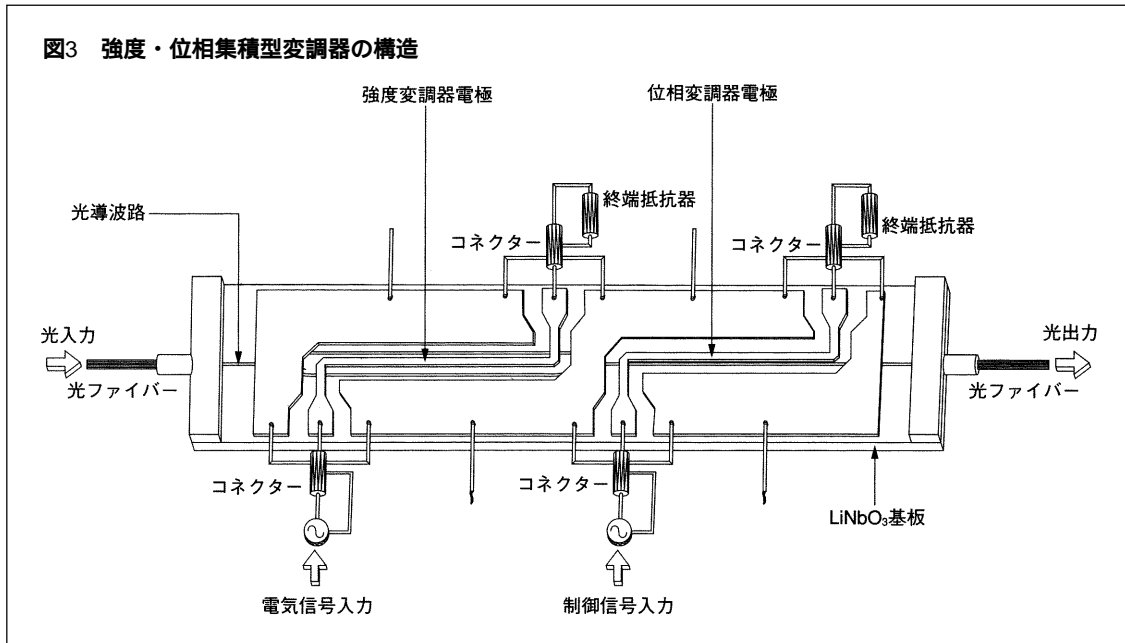


表2 各種の光変調器材料

	$r$ 定数 ( $\text{pm}/\text{V}$ )	屈折率 $n$	誘電率 $\epsilon$	吸収端 ( $\mu\text{m}$ )
LiNbO <sub>3</sub> (LN)	30.8	2.14	35	0.32
LiTaO <sub>3</sub> (LT)	30.3	2.13	43	0.28
KTiOPO <sub>4</sub> (KTP)	35	1.83	15.4	0.35
ストイキオメトリックLN	38.3	2.14	35	0.3
色素ドーパポリマー	>50	~1.6	~4	0.5~0.6

波状態はTE偏波～楕円偏波～TM偏波の間を変動する。

この結果、出力光の偏波状態は等価的にランダムとなり、伝送路の偏波状態に依存する種々のノイズの発生が抑えられる。

位相変調器が強度変調器と組み合わせて用いられることはすでに述べたが、最近、この強度変調器と位相変調器のセットを1枚のLN基板の上に構成して、小型化と低損失化を実現した変調器が使われている。図3に、最近開発された強度・位相集積型変調器の構造を示す<sup>5)</sup>。変調速度は10Gb/s用までが開発されている。強度・位相集積型の他にも、各種の組合せ集積型変調器の要請があり、この傾向はますます進むと思われる。強度変調器を2台集積化し、前段を光パルサー、後段をNRZ強度変調器として使うRZ変調用LN変調器、

後段を低速の強度変調器として使う強度・アッテネータ集積型変調器などが開発されている。

### 今後の課題と新材料

LN変調器が40Gb/sシステムを始めとする将来の光通信システムにおいて、引き続きキーデバイスとしての位置づけを維持していくためには、以下の改善すべき課題が残されている。駆動電圧の低減化、多種の集積型変調器の実現、生産性向上などによる低価格化である。

これらの対策としては、構造面での改良のみならず材料面から見た種々の検討が必要である。構造的な改良としては、リッジ導波路化<sup>7)</sup>などを含む導波路、並びに電極構造の改良、電極長の短縮化、最近市販された5インチLNウェハを用いたプロセスの実現、ウェハ内の電極やその他の膜厚の

均一化などがあげられる。

表2にLNに代わる将来材料として期待される種々の変調器用新材料を示す<sup>8)</sup>。LNと同等あるいは10数%増の電気光学定数( $r$ 定数)をもつLiTaO<sub>3</sub>(LT), KTiOPO<sub>4</sub>(KTP)については, 特性の安定性, 信頼性を含めた総合的観点からの評価が急務であり, 大型結晶の入手が望まれる。

また最近, ストイキオメトリックLNと呼ばれるLN結晶が入手できるようになった。従来のLN結晶が結晶成長の観点から, Li不足の状態で(Li:Nb比が48.5:51.5以下, コングルエント組成と呼ばれる)育成されるのに対し, ほぼ1:1のLi:Nb比を有している。吸収端の短波長化(約20nm), 複屈折の増大, 電気光学定数の増大(約20%)など, 顕著な物性定数の差異が報告されつつあり<sup>9)</sup>, 新変調器材料として大いに期待される。

有機材料においても, 大きな電気双極子をもち対称性を欠く分子材料の中に, きわめて大きな電気光学効果を示す材料が多数見出されている<sup>10)</sup>。変調器への応用上, 最も重要な材料は色素ドープポリマーであり, ごく最近, CLD-1と呼ばれる色素を配向させてPMMAポリマーに分散させたフィルム材料が開発された。フィルム成形により

デバイスが作製されるため, サンドイッチ型の電極構成がとれることが最大のメリットであり, 最低駆動電圧 $V_{\pi} = 0.8V$ (電極長3cm)の変調器が試作された<sup>11)</sup>。導波路損失の低減(現在1dB/cm以下)と進行波型電極の実現が課題であり, 研究の進展が期待される。

以上述べたように, LN変調器の今後の発展のためには, 材料からデバイス構成, さらにコスト, 信頼性を含めた幅広い観点からの検討が必要である。今後の展開が期待される。

#### 参考文献

- 1) 電子情報通信学会編:「先端デバイス材料ハンドブック(オーム社, 1993)pp.535 - 542
- 2) 皆方誠: 光学24, 330(1995)
- 3) 坂根敬夫, 箕輪純 郎: O plus E 22, 1262(2000)
- 4) H. Chung, et al.: J. Quantum Electron. QE-27, 608(1991)
- 5) 住友大阪セメント(株)LN光変調器カタログ
- 6) H. Nagata: IEEE Photonics Tec. Lett. 12, 388(2000)
- 7) K. Noguchi, et al.: IEICE Trans. Electron. 79, 27(1996)
- 8) 宮澤信太郎著:「結晶光学(培風館, 1995)pp.69 - 101
- 9) 北村健二: 応用物理69, 511(2000)
- 10) 雀部博之編:「有機フォトンクス(アグネ承風社, 1995)pp.41 - 79, 194 - 197
- 11) Y. Shi, et al.: Science 288, 119(2000)