

解説

LiNbO₃ 光スイッチ

皆 方 誠

静岡大学電子工学研究所/新技術事業団「さきがけ研究 21」 〒432 浜松市城北 3-5-1

(1995年4月10日受理)

LiNbO₃ Optical Switches

Makoto MINAKATA

Research Institute of Electronics, Shizuoka University/JRDC-PRESTO,
3-5-1, Johoku, Hamamatsu 432

1. ま え が き

ニオブ酸リチウム (LiNbO₃, 以下 LN と略す) は人工的に作られた強誘電体結晶であり, 光損失が少なく, 大きな自発分極をもつことから優れた電気光学効果, 非線形光学効果, 音響光学効果を示し, 同系の LiTaO₃ (LT) 結晶とともに, 光制御デバイス材料, 非線形光学材料, 音響光学材料として注目されてきた光学結晶である^{1,2)}. 現在, 直径 10 cm, 長さ 30 cm 程度の均質で透明な大型単結晶が容易に得られている. 1974 年低損失でパターン化の容易な Ti 拡散 LN 光導波路が開発され, 80 年代にプロトン交換光導波路などが提案されて以来, デバイス特性は飛躍的に向上した. 現在, LN 光変調器/光スイッチは, 10 Gb/s 大容量光ファイバ伝送用外部光変調器として, あるいは CATV やジャイロ用光スイッチとして実用化されつつある³⁻⁵⁾. また, 高出力赤外レーザーダイオードを用いた青色コヒーレント光発生用 SHG (second harmonic generation) デバイスの研究開発は進展し, 性能改善の努力は内外の研究機関において精力的に進められている⁶⁾. 光変調器・光スイッチには DC ドリフトの問題があり⁷⁾, 長年の懸案となっていたがこれらの研究も進み, DC ドリフトフリーも実現しつつある⁸⁻¹⁰⁾. SHG デバイスでは, 強力な青色光を出そうとすればするほど, 結晶端面から光が出難くなる光損傷の問題¹¹⁾があり, 現在その機構解明と対策が急がれている. また, 良質の LN 単結晶薄膜成長技術が再度精力的に開発されつつあり, デバイスへの新しい応用が図られようとしている¹²⁾.

そこで, 本報告では, 筆者が研究を進めてきた DC ドリフトフリー LN 光変調器/光スイッチを中心に, 光学結晶, 光導波路, プロセスおよび高速光変調技術などの現状を紹介してみたい.

2. 光変調器と DC ドリフト

2.1 光変調器・光スイッチの種類

ちらつきのないレーザー光線の強度や位相 (光波の山谷の位置) を, 画像や音声などの電気信号に対応して変化させてちらつきを与える操作を光変調と呼んでおり, 行路を切り換えたり光を on, off する場合 (100% 光変調に相当) を特に光スイッチと呼ぶことが多く, これらの操作をするデバイスをここでは広く光変調器と呼ぶことにしよう. 現在, 主として使われている光変調器の原理構成を図 1 に示す. 結晶は z -cut または y -cut 板が使用されており, 導波路は Ti 拡散あるいはプロトン交換チャンネル光導波路が使用されることが多い. 動作はいずれも電気光学効果による屈折率変化²⁾を利用している. 屈折率変化量 Δn は, 電界 E を z 軸 (= c 軸) と並行に印加し, 異常光線に対する屈折率 n_e を感じる偏光方向 (z -cut 板で TM-like mode, y -cut 板で TE-like mode) の光を使用した場合に最大となり $\Delta n_e = (1/2)n_e^3 r_{33} E$ (r_{33} は Pockels 定数) で表される. (a) は位相光変調器, (b) は分岐干渉型光変調器, (c) は方向性結合型光変調器 (光スイッチ) である. (b) の Y 分岐の代わりに 3 dB 方向性結合器を用いた 2 入力 × 2 出力のバランスブリッジ型光変調器 (光スイッチ) も使用されている. 動作原理の詳細については成書^{2,13)}を参照された

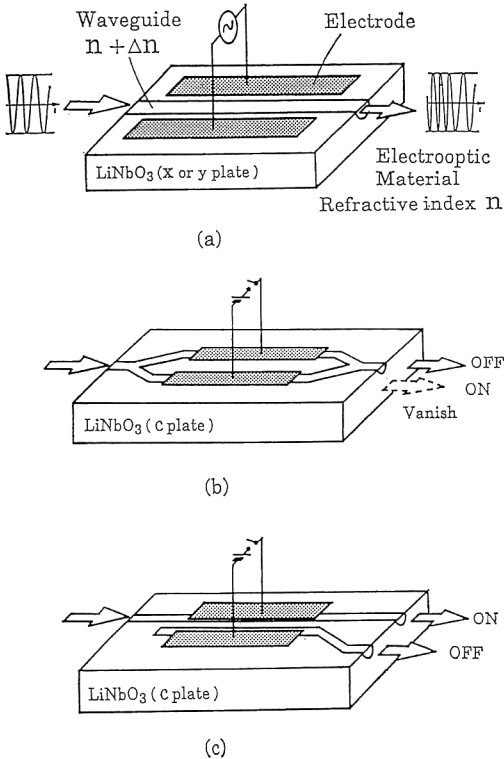


図 1 主な光変調器の原理構造図
 (a) 位相光変調器, (b) 分岐干渉型光変調器,
 (c) 方向性結合型光スイッチ。

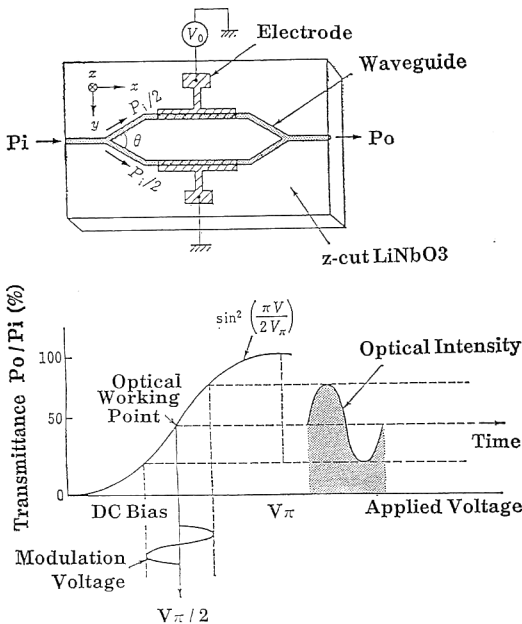


図 2 光変調器の動作原理図

い。なお、32個の方向性結合型光スイッチを用いた8入力×8出力の光マトリックススイッチも試作され、一部実用化されている¹³⁾。

2.2 DC ドリフト

一般に、光変調器(図2参照)は小さな電気信号で歪みのない大きな光信号を得るために、電極に電気信号と一緒に直流電圧(DC バイアス電圧)を加えて光の動作点を定める²⁾。光変調では光の動作点が不動であることが重要であり、これが変動すると画像は乱れ、膨大なデータは正確に変調されない。一定のDC電圧を加えておいても光の動作点が時間とともに動いていく現象はDCドリフトと呼ばれている⁸⁾。1本のファイバで何万チャンネルもの信号を運ぶ高速大容量光伝送システムや光交換システムにおいて、DCドリフト退治はきわめて重要であるが難問であり、懸案となっていた。この問題はLN結晶自身の品質とデバイス作製プロセスに原因があり、結晶によってばらつきが大きく、再現性に問題があること、結晶(絶縁物)中に発生するわずかな可動キャリアによって引き起こされることなどが最近わかってきた¹⁴⁾。少なくとも安心してデバイスを作製できる光学用LN結晶が必要であり、その仕様が模索され続けてきた。

3. 光学用 LN 結晶の仕様

光学用結晶はSAW(弾性表面波)グレード結晶と比較すると、①使用する光波のエネルギーが極端に大きい、②エネルギー密度が高い、③印加電界強度が強い、④極表面層を使用することなどから条件は厳しいといえる。(財)光産業技術振興協会の「LN結晶研究会」(委員長:福田承生教授)では、1990年4月より3年間、内外主要8社・合計60枚の3吋z-cut LNウエハを使い、産・官・学より30数名の研究員の協力を得て、結晶基板評価、デバイス試作評価を含むworking group活動(幹事:皆方)を継続してきた。それらの成果を中心に会員独自の研究成果を加味することにより光学用LN結晶の仕様案を表1のようにまとめることができた¹⁴⁾。①組成は、均一性・結晶性・耐光損傷性に優れている調和組成が望ましい。②Liの変動率が0.01mol%以下と小さいことが望ましい。これより屈折率の変動量は 2×10^{-4} 以下となる(図3参照)。Ti拡散方向性結合型光スイッチを試作し、 n_e を用いた場合、結合長の変動率は2%以下(従来のSAWグレード結晶0.1mol%では47%の変動)となる。③不純物(Feなど)が極力少ないこと。欠陥、特にリネエッジが少ないこと

表 1 光産業振興協会 LN 結晶研究会提案の光学用 LN 結晶の仕用

1. 結晶組成; Congruently melt composition
2. Li_2O mol% 変動量; $< 0.01 \text{ mol}\%$ → 屈折率変動量; $\Delta n \leq 2 \times 10^{-4}$ → 音速変化量; $< 1.44 \text{ m/s}$ → SHG 位相整合温度幅; $T_c = 0.6 - 0.8^\circ\text{C}$ → Ti 拡散の均一性; 結合長 L_c のばらつき $< 2\%$
3. 不純物欠密度; 少ないこと, 特にリニエッジ X線 topography... 目視で欠陥なし (有効) X線 rocking curve... 半値全幅 6 s 程度以下 (結晶性, 研磨などを反映)
4. 結晶中の酸素濃度... (仮説) 過剰でも欠乏しても DC ドリフトあり Li/Nb ratio given → O の値に optimum あり → 酸素濃度を最適値に制御することが必要

が重要. 評価には X 線透過トポグラフ (X 線の透過像) が有効であり, 目視で欠陥がなく, 均一・無歪みであることが重要である. ④結晶表面や研磨の具合などは, X 線ロッキングカーブの半値全幅から判定が可能であり, 6 秒以下が望ましい. ⑤酸素の量と振舞いが重要. 従来, Li/Nb の組成比が議論され, キュリー温度の高いことが望まれてきたが, DC ドリフトには Li のほかに, 酸素が重要であり, Li/Nb 比が与えられると抵抗率 ρ を最大にする酸素の量が存在することがわかった.

4. プロセスと結晶性

最近, 筆者らは光学結晶の仕様をさらに明確化する目的で, 標記 LN 結晶を用いて “Ti 拡散 Y 分岐干渉型光変調器” (図 1 参照) を試作し評価を続けてきた. その

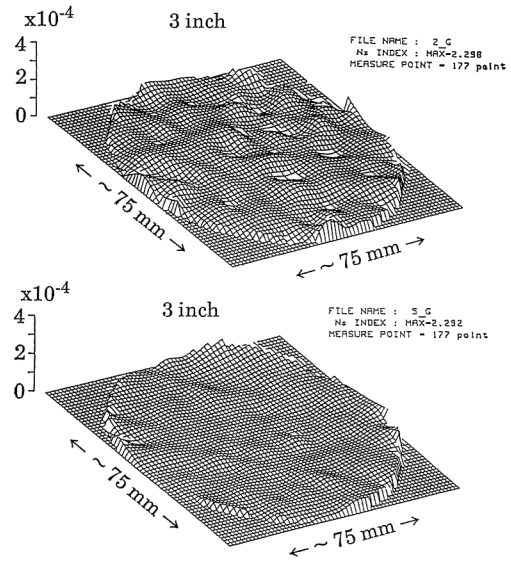


図 3 光学用 LiNbO_3 結晶における屈折率変化の 3D マップの測定例

際, デバイス作製プロセスが LN 結晶基板にどのような影響を与えるのかを明らかにするために, 各プロセスごとに光電子分光法 (XPS) を用いて組成分析を行い, また, 質量分析 (Q-Mass), 2 次イオン質量分析 (SIMS), X 線および電子線回折などを併用して組成変動の様相を詳細に検討した^{14,15)}. XPS による分析結果の一例を表 2 に示す. その結果,

- ① プラズマエッチングでは Li が抜けやすいこと,
- ② 従来の常識に反して, 酸やアルカリの低温 (室温) エッチングでも Li が抜けること,
- ③ O は 10^{-7} Torr では 230°C から抜けはじめ, Li は 700°C から外拡散すること,

表 2 プロセスと LN 結晶組成の変化の関係; XPS による分析結果の例 (Buffer layer なし)

	Nb	Li	O	Nb 酸化物 (表面)	備考
Virgin	1.0	1.0	2.6	無	国産 A 社
Virgin	1.0	0.9	2.2	無	C. T. I.
熱拡散 1050°C , 6h dry O_2 中	1.0	1.1	2.1	有	
熱拡散 (同上) + プラズマエッチング (Ar + O_2 Sputt.)	1.0	0.5	2.4	有	300Å Etching drift なし
ケミカルエッチング Room temp. 30 秒 (CH_3COOH ($\text{H}_3\text{PO}_4, \text{HNO}_3$))	1.0	0.7	2.1	有	

④ O は雰囲気 (10^{-7} Torr から 10 気圧の範囲) によって結晶から容易に入出入りすること、O の加圧熱処理により結晶性は向上すること、などがわかった。

⑤ 調和組成において、 ρ は酸素雰囲気圧力が 1 atm 近辺で最大値を示し、過剰に外拡散しても内拡散しても低下する¹⁴⁾。1 atm に最大値があるのは偶然としても、幸運に思われる。

⑥ 結晶中の OH, H は ρ を低下させ、外拡散を助長する。

⑦ Li や O の抜け (vacancy) は、一般に格子定数を大きくし、可動キャリアを発生させることが判明した。

⑧ DC ドリフトはキャリアの移動によって生じるが⁹⁾、これらを防止するためには、結晶表面に形成される組成変成層 (Nb 酸化物を含む組成のずれた層で 300 Å 以下の表層, 表 2 参照) を除去することが重要であることがわかった。光学結晶でも面内に若干組成変動があり (図 3 参照), ドリフトの大きさはばらつくが, CF 系と酸素の混合ガスを用いて ECR エッチングなどにより表層を除去すれば, DC ドリフトをほぼゼロに制御することが可能であること, などが明らかとなった。

5. DC ドリフトフリー光変調器

5.1 デバイスの作製プロセス

実験に用いた LN は z-cut 3 吋ウエハ, 厚さ 1 mm, 両面研磨したもので表 1 の仕様を十分満たしている。ただし, 面内径方向に多少の Li 濃度分布を有しており, 変動量 Δn_e は 2×10^{-4} 以下である。屈折率の分布測定例を図 3 に示す。前章までの成果を踏まえて新たに開発したデバイス試作プロセスを図 4 に示す。光学結晶を使用すること, Ti 拡散の際, 結晶表層抵抗率が最大となり, 結晶性が向上する酸素分圧を設定すること, 変成層を除去すること, バッファ層や電極形成の際, 結晶表面に過剰な熱エネルギーを加えないことなどが重要である。

5.2 デバイス形状

試作素子の形状・寸法を図 5 に示す。特性評価では, まず TE-like mode (n_o) を用い, 電極と結晶間にバッファ層を使用しない構造で DC ドリフトを測定した。これは結晶自体の特性と変成層の有無・影響を調べるためである。これより, 図 6 (a) に例を示すように, DC ドリフトフリーが実現できたので, SiO₂ のバッファ層を 0.2 μm 程度形成して, TM-like mode (n_e), TE-like mode (n_o) の DC ドリフト特性を評価した。

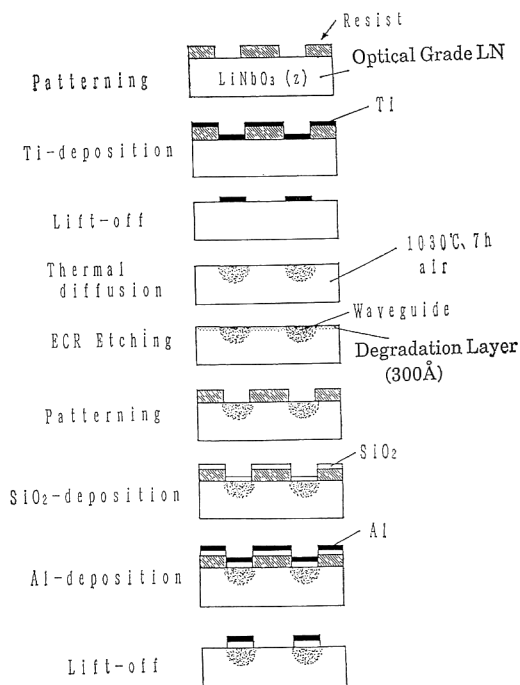


図 4 光変調器の作製プロセス

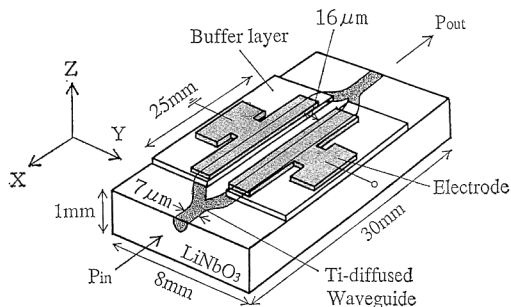
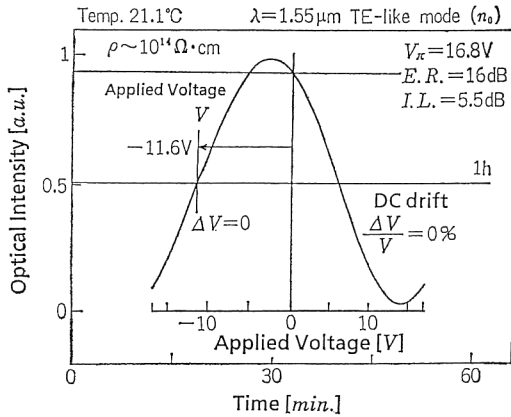


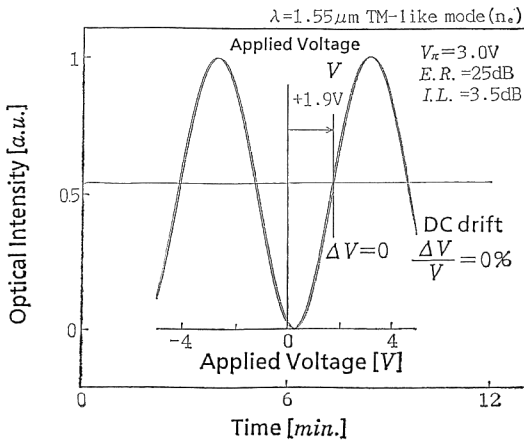
図 5 DC ドリフトフリー分岐干渉型光変調器の諸元

5.3 DC ドリフトフリーの特性

得られた光変調器の特性を表 3 にまとめて示す。半波長電圧 $V_{\pi} = 3 \text{ V } (n_e), 12 \text{ V } (n_o)$ (at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$), 消光比 22~25 dB, 挿入損失 2.8~3.5 dB (回折損失, 両ファイバ結合損失, 伝搬損失を含む) であった。図 6 (b) に TM-like mode (n_e) の DC ドリフト特性の測定例を示す。印加電圧 $\pm V$ [V] に対して DC ドリフト ΔV (変動分) はゼロであることがわかる。ドリフト測定は 100 時間程度まで行っているが, V_{π} の数倍までの印加電圧のもとではほとんど変動はない。なお, 変調電圧として $\pm V_{\pi}$ 程度のスイング電圧を印加して得られる hysteresis curve¹⁴⁾ はキャリアの量, 性質および移動度などを特定することができる重要なデータである。図 7 に測定



(a) TE-like mode (n_e) の例, Buffer layer なし.



(b) TM-like mode (n_e) の例, Buffer layer あり.

図 6 DC ドリフトの測定例 ($\Delta V=0$, DC ドリフトフリーの例)

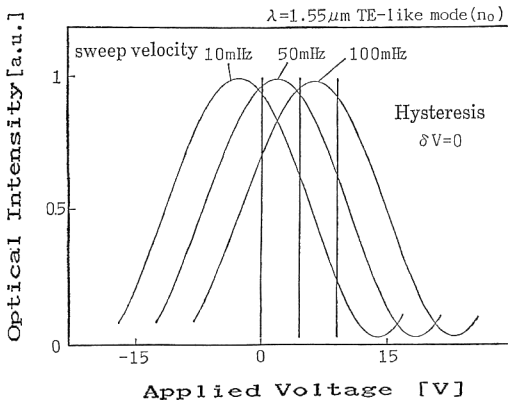


図 7 Hysteresis curve の測定例, DC ドリフトフリーの例

表 3 DC ドリフトフリー光変調器の特性例

	TM-mode (n_e)	TE-mode (n_o)
DC drift	Free	Free
Hysteresis (V) (δV)	0.065	0
V_π (V) ($\lambda=1.55 \mu\text{m}$)	2.6	10.6
E. R. (dB)	22-25	25
Insertion loss (dB) AR coat なし	3.5	2.8
Modulator dimensions		
Waveguide : Ti $6.5 \mu\text{m}$ 900\AA (1030°C 7 h in O_2)		
Buffer layer : SiO_2 2000\AA		
Electrode : Al gap $16 \mu\text{m}$ length 24 mm (Lift off)		

例を示す. 最大変動分 δV は, 結晶中に存在する可動キャリアの量と比例関係があり, 理想的にキャリアがゼロであれば δV はゼロとなる. 試作デバイスの hysteresis curve から得られた変動分 δV は, sweep 速度 $10 \sim 100$ mHz において TE-like mode (n_o) でゼロ, TM-like mode (n_e) で最大 $0.06 \sim 0.1$ V であった. これらは, 実用上問題のない値である. 以上, 光学用 LN 結晶と組成分析を主体とした新しいプロセスの採用により, 従来実現が困難とされてきた「DC ドリフトがゼロ」である LiNbO_3 光変調デバイスを実現することができた.

6. 高速・広帯域光変調器

光変調器・光スイッチの変調限界を考えてみよう. 変調限界を決定する制限要因としては, ①電気光学効果の動作限界周波数, ②光波と変調波との伝搬速度差, ③高周波における電極損失, ④材料分散・構造分散, などがある¹⁶⁾. 電気光学効果は DC から近赤外領域 (THz) まで動作するので問題はない. ②~④は主として電極や構造に依存する¹⁶⁾. 進行波型電極¹⁷⁾ (図 8 参照) を用いると光変調帯域幅 Δf は, 光波と変調波の伝搬速度 V_o , V_m の差と電極長 l に反比例するので, $\Delta f \propto 1/[V_o - V_m]l$ で与えられる¹⁸⁾. LN デバイスでは通常 $V_o \cong 1.9 V_m$ (光波は変調波より 1.9 倍速い) であるから $\Delta f = 9.2 \text{ GHz} \cdot \text{cm}$ となり, 例えば, $l = 2.5 \text{ mm}$ の方向性結合型デバイス (図 8 参照) で $\Delta f = 40 \text{ GHz}$ が得られている³⁾. 速度整合条件 $V_o = V_m$ が満足されれば, 理論上帯域幅 Δf は無限大となるが, 次の制約は③の電極損失である. 例えば, 100 GHz では銅電極の場合, 導電率 σ が大きいのでマイクロ波電流は表面から $0.2 \mu\text{m}$ (skin depth) 程度しか流れない. わずかな凹凸は散乱・放射

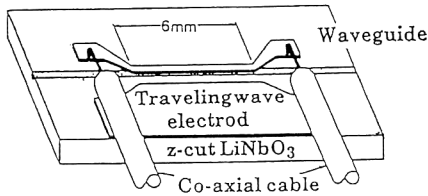
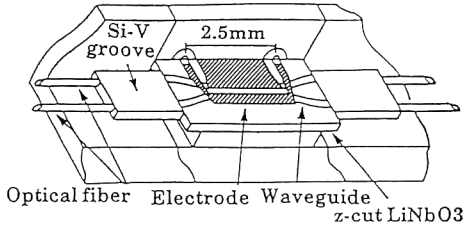
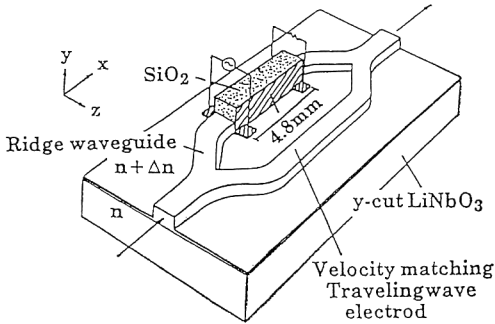
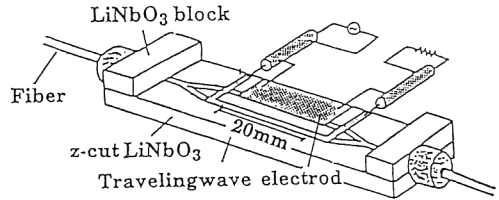
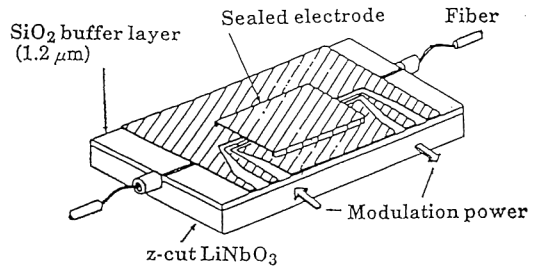
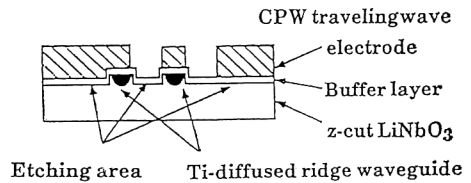
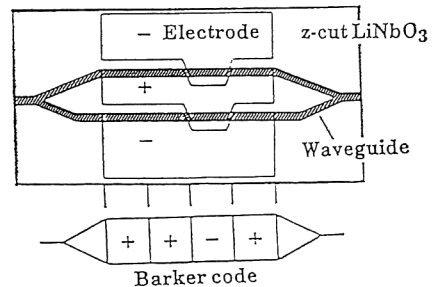
(a) $f_m = 18\text{GHz}$, $V_\pi = 23\text{V}$, $\lambda_0 = 633\text{nm}$ (Izutu, et al.1980).(b) 40GHz , $V_\pi = 26\text{V}$, $\lambda_0 = 1.5\mu\text{m}$ (Korotky, et al.1987).(c) 18GHz , $V_\pi = 1.7\text{V}$, $\lambda_0 = 633\text{nm}$ (Minakata, et al.1987).(d) 12GHz , $V_\pi = 6.4\text{V}$, $\lambda_0 = 1.5\mu\text{m}$ (Seino, et al.1988).(e) 26GHz , $V_\pi = 4.7\text{V}$, $\lambda_0 = 1.5\mu\text{m}$ (Kawano, et al.1991).(f) 70GHz , $V_\pi = 5\text{V}$, $\lambda_0 = 1.5\mu\text{m}$ (Noguchi et al.1993).(g) 20GHz , $V_\pi = 8\text{V}$, $\lambda_0 = 1.3\mu\text{m}$ (Dolfi et al.1987).

図8 これまでに開発された広帯域光変調器の例

損の原因となるので鏡面電極が必要となる。しかし、鏡面であっても電極断面寸法は有限であり、マイクロ波は、 α を減衰定数として $\exp(-\alpha l)$ で減衰するので電極が長ければ急激に減衰し、長い電極は一部しか変調に役立たない。④LN の材料分散として 700 GHz 程度まではほぼ一定であると考えられ、構造分散は光変調器構成によって決まる。これらを総合すると、通常の電極構成 (TEM 波近似の成り立つ長さ 10 mm 程度の進行波電極) を用いれば、少なくとも 300 GHz 程度までは変調

ができる (DC から 300 GHz までフラットな光変調特性が得られる) と考えられる¹⁹⁾。

ところで、光変調周波数の上限および変調電圧は電極長に反比例する。したがって、一般に低駆動電圧で高速・広帯域光変調器を作るとは困難であるが、それらを克服するために種々の努力がなされてきた。図8にそれらの例を示す。電極や光導路の構造を工夫することにより変調波の速度を光波の速度に近づけて広帯域化を図る方法 (a)~(f)^{3,4,17,19-21)}、および電極を周期的に反

転コード化してスペクトルを拡散し、広帯域化を図る方法^(g)²²⁾などが報告されている。(e)はリッジ光導波路を用いており、光3dB帯域幅70GHz、 $V_p=5V$ を達成している²¹⁾。これらの上限周波数は、光スイッチの動作速度のほぼ上限に一致すると考えられる。

最近、YBaCuO系超伝導電極を用いた共振型光変調器が報告され、77Kで電極損失はCuやAlの 10^{-3} に低減し、中心周波数18GHzで $V_{p-p}=2.3V$ を得ている²³⁾。また、誘電体テーパガイドと電極アンテナを結合することにより94GHzの光変調を確認している²⁴⁾。

7. ま と め

本報告では、光学用結晶、プロセス、DCドリフトなどを概説し、結果として光学用結晶を用い、プロセスの観察と組成変動を極力抑えた新しいプロセスの採用により、従来実現が困難とされてきたDCドリフトフリーLiNbO₃光変調デバイスを実現することができることを紹介した。また、最近の話題として高速・広帯域光変調器の現状を紹介した。LN光変調器・光スイッチについてはすでに一部実用化されつつあり、本文で述べたとおり今後の実用化に明るい見通しが得られている。しかし、光損傷など今後の研究課題も多く、研究の進展に期待したい。

文 献

- 例えば、岩崎 裕：オプトエレクトロニクス材料，電子通信学会編（コロナ社，1983）。
- A. Yarive: *Introduction to Optical Electronics* (Holt, Reinhart and Winston, Inc., 1976).
- S.K. Korotky, G. Eisenstein, R. S. Tucker, J. J. Veselka and G. Raybon: "Optical intensity modulation to 40 GHz using a waveguide electro-optic switch," *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987) 1631-1633.
- K. Kawano, T. Kitoh, H. Jumonji, T. Nozawa and M. Yanagibashi: "New traveling wave electrode Mach-Zehnder optical modulator with 20 GHz bandwidth and 4.7V driving voltage at 1.52 μ m wavelength," *Electron. Lett.*, **20** (1990) 1382.
- H. Yamamoto, M. Miyamoto, T. Kataoka, K. Kawano and M. Ohhata: "A 17 Gb/s long-span fiber transmission experiment using a low-noise broad band receiver with optical amplification and equalization," *Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications*, TuA2 (1990).
- 例えば、谷内哲夫，山本和久：“半導体レーザの第二高調波発生”，*応用物理*，**56** (1987) 1637-1641。
- 宮澤信太郎，野田寿一：“Ti拡散LiNbO₃光導波路作製における問題点”，*応用物理*，**48** (1979) 867-874。
- S. Yamada and M. Minakata: "DC drift phenomena in LiNbO₃ optical waveguide devices," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) 733-737.
- T. Fujiwara, S. Sato, H. Mori and Y. Fujii: "Suppression of crosstalk drift in Ti:LiNbO₃ waveguide switches," *J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 909-915.
- 皆方 誠：“LiNbO₃光導波路デバイス”，*電子情報通信学会論文誌 C-I*，**J-77-C-1**，**5** (1994) 194-205。
- 例えば、福田承生，佐々木孝友編：“特集：LN，LT結晶の育成と光損傷”，*日本結晶成長学会誌*，**20** (1993) 250-280。
- 例えば、中村正則，神山達也，大野一茂，辻 昌宏，井筒雅之：“液相エピタキシャル成長MgO添加LiNbO₃薄膜光導波路の作製と光損傷”，*日本結晶成長学会誌*，**20** (1993) 288-295。
- 応用物理学会光学懇話会：光集積回路（朝倉書店，1988）pp. 112-134。
- 福田承生，皆方 誠：LN結晶の評価(I)—LN結晶研究会調査報告書I（光産業振興協会，1991）pp. 21-104；皆方 誠，福田承生：LN結晶の評価(II)—LN結晶研究会調査報告書II（光産業振興協会，1992）pp. 15-49。
- 皆方 誠：“LiNbO₃結晶とプロセス”，*信学会第5回集積フォトニクス研究会資料*，IP 92-16 (1992) pp. 19-26。
- 皆方 誠：“進行波形光変調器”，第26回東北大通研シンポジウム「光と電波の境界」論文集（1990）pp. 143-153。
- T. Sueta and M. Izutsu: "1.11 High speed guided-wave optical modulators," *Optical Devices and Fibers*, ed. Y. Suematsu (Ohm & North-Holland Publ., 1982) pp. 140-150.
- R. C. Alferness: "Waveguide electrooptic modulators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-30** (1982) 1121-1137.
- M. Minakata: "LiNbO₃ broad-band optical modulators," *Third Opto-electronics Conf. (OEC '90) Tech. Digest*, 12C1-4 (1990) pp. 136-137; 三浦和則，皆方 誠，川上彰二郎：“広帯域・高効率進行波形光変調器”，*信学技報*，**OQE-87-26** (1987) 95-102。
- M. Seino, N. Mekada, T. Namiki, T. Yamane and H. Nakajima: "12 GHz band-width Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder modulator," *Second Optoelectronics Conf., Tokyo, Post-deadline Papers*, PD-1 (1988).
- 野口一人，宮澤 弘，三富 修：“70 GHz帯Ti:LiNbO₃広帯域光変調器”，1993年信学全秋季大会，C-175 (1993)。
- M. Nazarathy, D. W. Dolfi and R. J. Jungner: "Spread spectrum frequency response of coded phase reversal traveling wave modulators," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1433-1443.
- K. Yoshiara, F. Uchikawa, T. Mizuochi, T. Kitayama, K. Imada, I. Kawamata, S. Matsumo and S. Utunomiya: "A study on LN light modulator using the YBa₂Cu₃O₇ superconducting electrode," *IEEE Trans. Electron. Devices*, **E-75-C** (1992) 65-69.
- F. T. Sheeky, W. B. Bridges and J. H. Schaffner: "60 GHz and 94 GHz antenna-coupled LiNbO₃ electrooptic modulators," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5** (1993) 307-310.