

# 光 導 波 路

皆 方 誠

1969年 Miller によって提案された光集積回路の概念<sup>1)</sup>は、実用的な光導波路を生みだし、半導体レーザーを初めとする新たな光導波路デバイス群を世に送り出すとともに、バルク型光デバイスを導波路型デバイスへと変身させ、その性能を飛躍的に向上させてきたことはよく知られた事実である。長い年月を経て広帯域光変調器や光第2高調波発生 (SHG) 青色光源が一部実用化され、光学結晶や実装技術も確実に進展しつつある<sup>2)</sup>。「光導波路の温故知新」という題で執筆依頼をいただいた。この方面に若い研究者の方々が途切れることなく参画されつつある。光導波路についてその歴史を振り返ってみることは多少なりとも価値があるかも知れないと考えてお引き受けした。光導波路研究の軌跡を私見を交えながら略述してみたい。

## 1. 光 導 波 路

1870年イギリスの Tyndall は、桶の側板に穴を開け、上部から照明すると噴出水が光を導く作用をもつことを見出しており、これが光導波路の始めとされている。その後は、コアとクラッドの二重構造の細い石英チューブが光導波路としてきわめて有効であることが明らかにされ、半導体レーザーや光検出器、半導体集積回路と相俟って実用的な「光ファイバー通信」を生み出した。現在、その潜在能力は未曾有の成果を導きつつあり、マルチメディアをサポートする地球規模のインフラストラクチャーとなりつつある。本題の集積回路用光導波路について考えてみよう。図1はこれまでに開発されてきた光導波路の典型的な種類と機能である。材料としては半導

体結晶、誘電体、磁性体、有機/高分子材料などが利用されており、光源、変調器、アイソレーター、検出器など多様な機能デバイスを構成している。光導波路は埋込型と拡散型に大別される。埋込型では、階段状の屈折率分布となり、界面の上下左右で全反射を繰り返しながら光のエネルギーを低損失で伝搬する。拡散型では屈折率分布は、補誤差関数、ガウス (図示)、線形など多様であり、空気界面では全反射を、内部では屈折率分布に対応して屈折しながら伝搬する。導波モードを決定する波動関数 (固有値) は、波動方程式と境界条件から計算することができて、その様相は図中に示すようにそれほど大きな形状の差異は生じない。これは、光導波路が誘電的性質により規定され、光は速度のわずかに遅いコアに絡み付いて伝搬することを意味している。

## 2. 誘電体光導波路

### 3.1 光 学 結 晶

1960年代に発明されたレーザー光の変調、偏向、波長変換など光を制御するデバイスを作製する目的で誘電体光学結晶の研究が進められ、1964年 Ballman は Chockuralski 法により大型のニオブ酸リチウム ( $\text{LiNbO}_3$ , 以下 LN と略称) の育成に成功し、引続いて  $\text{LiTaO}_3$  (LT), PLZT などの結晶が続々と開発された<sup>3)</sup>。これらは顕著な電気光学効果、音響光学効果、非線形光学効果などをもつことが特徴である。LN は直径4インチ程度の大型で均質な結晶が得られることから光学結晶の代表と考えられてきた。キュリー点は  $1210^\circ\text{C}$ 、室温では擬イルメナイト系  $C_{3v}$  である。LN は LT と同様「酸素八面体 ( $\text{BO}_6$  構造)」を有し、エネルギーバンド構造は似通っている。価電子帯は O イオンの  $2p$  軌

静岡大学電子工学研究所 (〒432 浜松市城北 3-5-1)  
E-mail: minakata @ rie. shizuoka. ac. jp

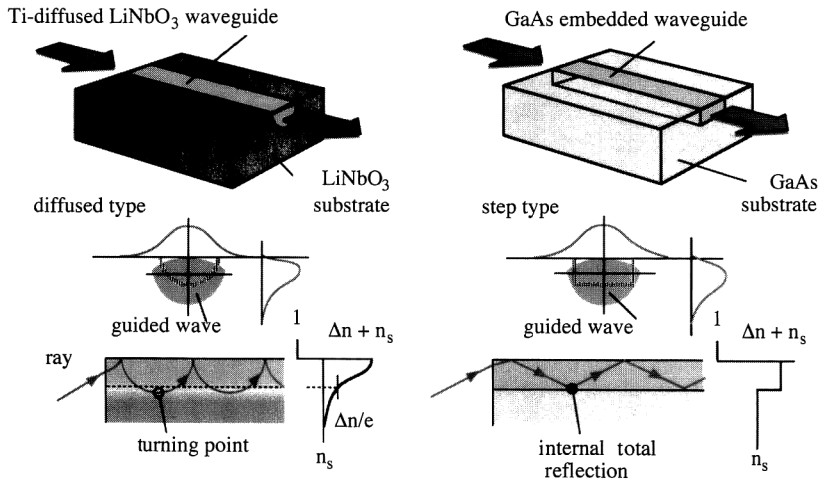


図1 光導波路の種類と動作特性, 固有モードなど。

道が, 伝導帯は Nb, Ta などの B イオンの d 軌道が決めている<sup>4)</sup>。バンド構造に関する光学的性質も似通っており, LN のバンドギャップエネルギーは 4.2 eV, 吸収端は 365 nm 程度である。

## 2.2 光導波路とはじめ

1973 年 Kaminow は LN 結晶を真空中で熱処理することにより Li<sub>2</sub>O を結晶外部へ拡散 (out-diffusion) させた光導波路形成法を提案した<sup>5)</sup>。この方法では異常光線に対する屈折率  $n_e$  のみが上昇し, 常光線に対する屈折率  $n_o$  は変化しない。屈折率は外拡散量によって制御可能 ( $\Delta n_e < 10^{-3}$ ) であり, 分布は Exponential 型で, わずかに吸収が生じる。線路化が困難,  $n_e$  と  $n_o$  共に使用するデバイスには使えないなどの問題はあったが, この技術をきっかけに, 拡散法, 特に不純物拡散法 (indiffusion) の研究が世界中で活発となった。筆者が研究に参加したのはこの黎明期で, 1974 年電電公社武蔵野研究所 (現 NTT 研究所) に勤務した年からである。当時は米国, 特に Bell 電話研究所 (Bell 研) が世界をリードしており, 所内定期刊行誌である BSTJ (Bell System Technical Journal) が光導波路理論, 解析方法などのパイプ的存在であった。APL, JAP, IEEE-JQE, Appl. Optics などのジャーナルが成果を競う場であり, 慣れない実験を続けながら毎月ドキドキしながらジャーナルを読んだことが思い出される。この年の 9 月の APL に Bell 研の Schmidt と Kaminow の Ti 拡散光導波路作製の報告が掲載された<sup>6)</sup>。筆者は 5 月から基礎部に配属となり, ただちに拡散法による光導波路形成の研究に従事した。8 月には, リーダーの野田寿一氏, 斎藤

昇一研究員が  $n_e$ ,  $n_o$  ともに上昇する物質として TiO<sub>2</sub> 拡散源を探り当てられ, 新米の筆者も多少お役にたったのか APL 投稿原稿に名前を入れていただいた。筆者は, ただちに LN 結晶中に Ti 金属拡散の研究を開始した。Ti は TiO<sub>2</sub> より大きな屈折率変化をもつことが判明したためである。原稿は翌年 2 月の APL<sup>7)</sup> に掲載されたが, 発明者はもちろん Bell 研の Schmidt 氏らである。入所 1 年足らずで研究の厳しさをもろに体験した。

## 3. 主な光導波路と今後の展望

本題に戻ろう。この当時, 拡散型光導波路を作るためにグループで種々の検討を行った。成果の一部を表 1, 2, 図 2 に示す。基板上に拡散材料薄膜をスパッタ法で形成し熱拡散した後, 断面を研磨し干渉顕微鏡で屈折率分布を測定した<sup>8)</sup>。表 1 は各イオンの拡散係数, 活性化エネルギーを, 表 2 には屈折率変化の様相を示している。Ti は  $\Delta n_e$ ,  $\Delta n_o$  ともに増加し, Mg はともに低下する。Zn はともに増加するが,  $\Delta n_e$  は表面で低下していることが特徴である (図 2 参照)。

### 3.1 主要な光導波路の現状

Ti 拡散 LN 光導波路は現在, 最も優れた光導波路であり, 高速光変調器や, ファイバー・ジャイロ用位相光変調器, CA-TV 用光スイッチなど実用化デバイスに広く使用されている<sup>9)</sup>。図 3 は Ti 拡散濃度と屈折率変化の様相を示しており, 屈折率分布はガウス型である<sup>9)</sup>。 $\Delta n$  は  $\sim 5 \times 10^{-3}$  で一致する。Ti 拡散を行うと a 軸方向に縮む (図 4 参照)。これより, 光弾性効果を介して  $\Delta n$  が増加する割合は  $\Delta n_e$  が 30%,  $\Delta n_o$  が 12% 程度で

表1 各イオンの拡散定数  $D_0$  と活性化エネルギー  $Q$ .

拡散物質	LiNbO <sub>3</sub>		LiTaO <sub>3</sub>	
	$D_0$ (cm <sup>2</sup> /s)	$Q$ (eV)	$D_0$ (cm <sup>2</sup> /s)	$Q$ (eV)
MgO	$2.17 \times 10^{-4}$	1.95 (y)	$4.04 \times 10^{-6}$	1.55 (y)
NiO	$1.33 \times 10^{-4}$	1.64 (y)	$5.16 \times 10^{-6}$	1.26 (y)
ZnO	$1.12 \times 10^{-6}$	1.22 (y)	$5.10 \times 10^{-8}$	1.04 (y)
CuO	$2 \times 10^{-4}$	1.15 (y)	$1.2 \times 10^{-5}$	0.95 (y)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$1.82 \times 10^{-8}$	0.98 (y)	$5.06 \times 10^{-9}$	0.91 (y)
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$4.33 \times 10^{-4}$	1.76 (y)	$1.10 \times 10^{-5}$	1.44 (y)
TiO <sub>2</sub>	$5.80 \times 10^{-5}$	1.99 (y)	$3.60 \times 10^{-2}$	3.21 (y)
	$8.48 \times 10^{-1}$	3.05 (z)		

表2 拡散濃度比と屈折率変化量の関係 (XMA 分析における拡散濃度比% = 試料のイオン強度/pure-metal の強度).

LiNbO <sub>3</sub>				
拡散物質	膜厚 (Å)	$T$ (°C)	$dn_e/dc$ (% <sup>-1</sup> )	$dn_o/dc$ (% <sup>-1</sup> )
MgO	900	1,000	$-5.5 \times 10^{-2}$	$-2.5 \times 10^{-2}$
NiO	900	950	$-4.3 \times 10^{-3}$	$3.7 \times 10^{-3}$
ZnO	600	950	$-1.6 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-3}$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400	1,050	$4.6 \times 10^{-3}$	$7.4 \times 10^{-3}$
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600	850	$2.9 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$
TiO <sub>2</sub>	600	1,150	$5.7 \times 10^{-3}$	$7.0 \times 10^{-3}$

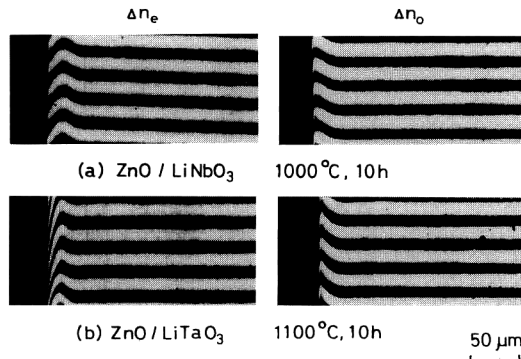


図2 ZnO 拡散層の屈折率変化の様相 (左側が結晶の拡散面).

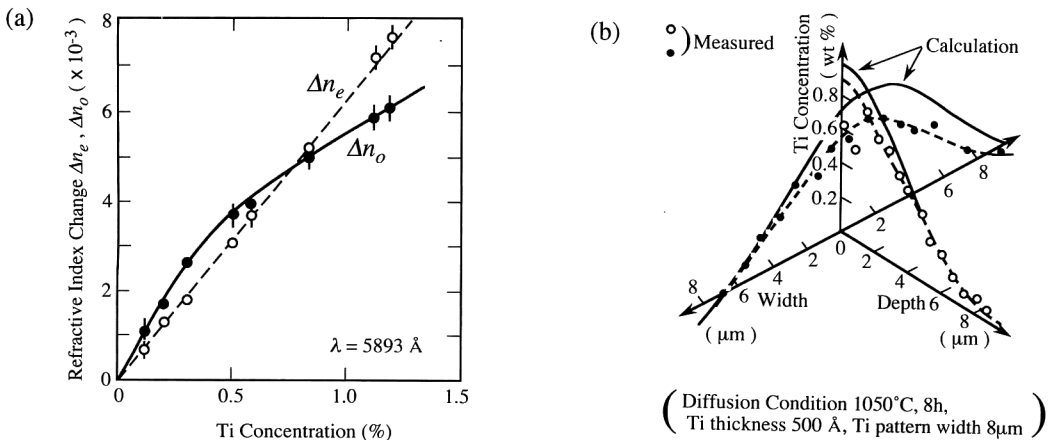


図3 X線マイクロアナライザーと端面研磨法を組み合わせ測定した、Ti の濃度分布と屈折率変化の様相。

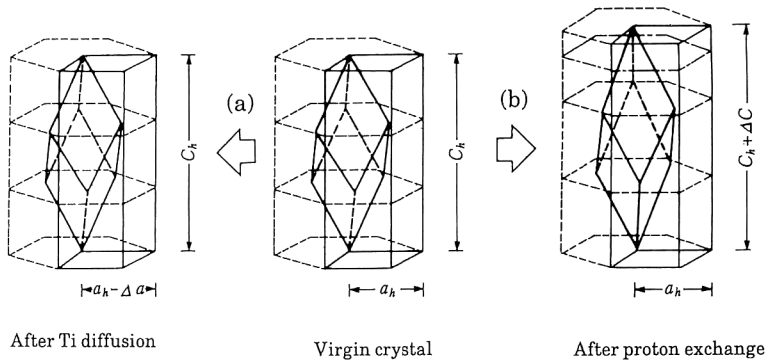


図4 Ti拡散およびプロトン交換時の結晶格子の変化の様子。

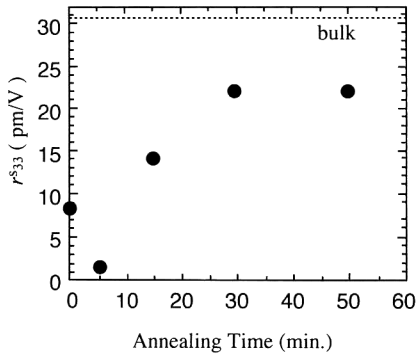


図5 プロトン交換光導波路における電気光学定数  $r^s_{33}$  のアニール時間に対する測定値の変化。

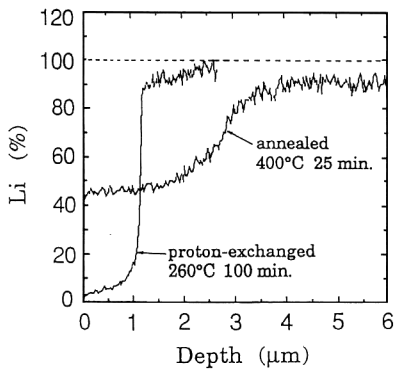


図6 アニール前後のLi濃度分布、深さ0  $\mu\text{m}$  は結晶表面を示す。(LiTaO<sub>3</sub>の例)。

ある<sup>2)</sup>。80年代に入るとBell研のJackelらによりプロトン交換光導波路が提案された<sup>10)</sup>。LN基板を安息香酸中、またはピロリン酸中200~300°Cで熱処理するとLiとHイオンの交換が生じて表面にLiHNbO<sub>3</sub>なる高屈折率層が形成される<sup>11)</sup>。交換直後屈折率分布は階段型で、電気光学定数( $r$ 定数)は1/10以下程度に低減するが、

適当な熱処理により分布型となり $r$ 定数はバルク値の73%まで回復する<sup>12)</sup>(図5参照)。図6に示すように、アニールするとLiは表面に戻りH<sup>+</sup>は結晶の中へ侵入していくことから、 $r$ 定数のアニールによる回復はLiイオンの戻りに原因している<sup>13)</sup>。交換後、格子定数は $c$ 軸方向に伸びる(図4参照)。格子定数の伸びから計算すると光弾性効果により $\Delta n_e$ は減少するが、Liイオンの外拡散により屈折率の増加が顕著であり、 $\Delta n_e < +0.135$ となる。Liに依存しない $\Delta n_o$ は、光弾性効果を介して減少( $-\Delta n$ )している。この光導波路は分極反転を行ったLN, LT QPM-SHG(疑似位相整合-第2高調波発生)青色コヒーレント光源などに多用されている<sup>13)</sup>。このほか、リッジ型光導波路が提案され<sup>14)</sup>、70 GHz超広帯域光変調器などに利用されている<sup>15)</sup>。エピタキシャル薄膜を用いた光導波路の研究<sup>3)</sup>が最近再び活発化しており、不純物混入も組成変動もない完全コアをもった理想型の光導波路が研究されつつある<sup>16)</sup>。

### 3.2 今後の展望

LN結晶の諸定数を基にデバイスの特性を考えてみると、①10<sup>-2</sup> dB/cm以下の極低損失光導波路、②超高速、高エネルギー光変調器/光スイッチ(変調帯域幅300 GHz、半波長電圧1V以下)実現の可能性がある、③ナノメートルサイズの分極反転の可能性があり、QPM-SHG青色光源などの非線形デバイスの他に、超大容量メモリー実現の可能性もある。今後、技術的進展があれば光導波路デバイスの性能は飛躍的に向上することが示唆される。最近、高品質「光学結晶」の仕様が提案され、長年懸案であったDCドリフトを生じない光変調器が安定に量産可能になってきた<sup>2)</sup>。しかし、短波長の強い光を結晶に照射すると出射光がゆらいたり、 $c$ 軸方向に広がったりする「光損傷」については解決されておらず、QPM-SHGデバイス実用化のためには、損傷機構

の解明と結晶品質の向上, 新しい光導波路作製技術が必要と思われる。

光変調器や, SHG デバイスが一部実用化され光学結晶や実装技術も確実に進展している。しかし, 先が見えず, 不安もある。このような時期には「光導波路の温故知新」が重要かもしれない。そこで, 光導波路—特に誘電体光導波路—についてその歴史を振り返って考えてみた。若い研究者の方々の参考になれば幸いである。

## 文 献

- 1) S. E. Miller: Bell. Syst. Tech. J., **48** (1969) 2059-2069.
- 2) 皆方 誠: 信学会論文誌 C-I, **J77-C-I** (1994) 194-205.
- 3) 岩崎 裕: オプトエレクトロニクス材料, コロナ社 (1983) .
- 4) M. Didomenico Jr. and H. S. Wemple: J. Appl. Phys., **40** (1969) 720-734.
- 5) I. P. Kaminow and J. R. Carruthers: Appl. Phys. Lett., **23** (1973) 326-328.
- 6) R. V. Schmidt and I. P. Kaminow: Appl. Phys. Lett., **25** (1974) 458-500.
- 7) J. Noda, N. Uchida, S. Saito, T. Saku and M. Minakata: Appl. Phys. Lett., **27** (1975) 19-21.
- 8) M. minakata, S. Saito, M. Shibata and S. Miyazawa: J. Appl. Phys., **49** (1978) 4677-4682.
- 9) M. Minakata, S. Saito and M. Shibata: J. Appl. Phys., **50** (1979) 3063-3067.
- 10) J. L. Jackel, C. E. Rice and J. I. Veselka: Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 607-609.
- 11) M. Minakata, K. Kumagai and S. Kawakami: Optoelectronics, **1** (1986) 163-173.
- 12) 垣尾省司, 皆方 誠: 信学会論文誌 C-I, **J76-C-I** (1993) 514-522.
- 13) 山本和久: レーザ研究, **21** (1993) 1089-1096.
- 14) I. P. Kaminow and V. Ramaswamy: Appl. Phys. Lett., **24** (1974) 622-624.
- 15) 野口一人, 宮沢 弘, 三富 修: 信学会秋季大会予稿 (1993) C-175.
- 16) T. Kawaguchi, D. H. Yoon, M. Minakata, Y. Odaka, M. Imaeda and T. Fukuda: J. Crystal Growth, **152** (1995) 87-92.

(1997年3月14日受理)