オプトエレクトロニクス とハイブリッド技術

Hybrid Technology in Opto-electronics

梶原 孝生*

1. はじめに

今日のエレクトロニクスの隆盛を支えている中核に、IC、LSI、VLSIがあるようにオプトエレクトロニクスの分野でも、光部品の集積化技術が重要な役割を担うものとして注目されてきている。

1969年、米国ベル研究所の S.E. Miller 博士によって光 IC の概念が初めて示された¹⁾。

これは光導波路を固体上に設ける技術を中心としたもので、各種の個別な光部品を 1 枚の誘電体基板上に構成した光導波路と一体化した形でまとめあげるもので、ちょうど電気 IC のハイブリッド形に相当する。光源と受光素子は半導体でつくられるため、この場合はハイブリッド形に誘電体基板に結合される。

これに対して 1972 年、カリフォルニア工科大学の A. Yariv 教授によって、化合物半導体基板上に形成するものが提案された²⁾。

これは光能動素子(半導体レーザー、LED、受光素子など)と電気素子(トランジスタ、ダイオードなど)を同じ化合物半導体基板上に集積してしまうもので、光電子集積回路(opto-electronic integrated circuits 略して OEIC)と呼ばれモノリシック形に相当する。

光部品を光導波路と一体化したものを光 IC、光素子と電気素子を一体化したものを OEIC と区別することに関してはまだ多少議論の余地は残っているが、おおざっぱに言えば光 IC がハイブリッド形、OEIC がモノリシックの形と対応つけてよいであろう。

したがって、標題のオプトエレクトロニクスとハイブ

リッド技術ということになると、主としてこの光 IC 技術を指すことになる。

電気的な IC や LSI と異なり、光 IC はまだ開発途上にあり実用化されたものがあるといってもそれは単発的なものであって、現状まだ確立されたデバイス技術にはいたっていない。したがって、本稿では開発段階ではあるがハイブリッド光 IC 技術の紹介を試みる。

2. オプトエレクトロニクスとは

旧訳聖書にも“初めに光ありき”とあるごとく、人類と光とのかわりあいには有史以前から続いており、これが近代になってレンズ、プリズム、鏡などを用いた「光学技術」として確立し、カメラ、望遠鏡といった光学機器を生み出した。

光学技術は純粋に光のみを取扱っており、分光学や幾何光学を基礎にしている。これに対しオプトエレクトロニクスは量子エレクトロニクスが基本となり、レーザーを核とし、さらに従来の光学をも含めた広い領域をカバーした新しい分野の技術といえよう。

1960 年、米国ヒューズ研究所のメイマン博士が直径約 1 センチメートル、長さ約 2 センチメートルの円柱状ルビー結晶を使って世界で初めてレーザー発振に成功した。

これからオプトエレクトロニクスの華々しい発展が幕を開けたといってもよいであろう。

オプトエレクトロニクスの代表格としては光通信がまず第一にあげられよう。現在わが国の主幹電話網は、すでに光ファイバーケーブルに置き換えられ、長距離電話でわれわれはその恩恵を受けている。今や ISDN が期待をこめてスタートしようとしているところである。

しかし、オプトエレクトロニクスの拡がりは、単に光通信のみにとどまらずわれわれのごく身近な生活にま

*Takao Kajiwara

松下電器産業/Matsushita Elec.

で入り込んできている。

スーパーマーケットのレジにはレーザーを使ったバーコード読取り機が置かれ、病院ではレーザーメスがその威力を発揮している。

今や、オーディオの世界では明けても暮れても光源に半導体レーザーを使ったコンパクトディスク（CD）が全盛である。アパレル産業ではレーザー裁断機がコンピュータと連動してファッショナブルな生地を高速で裁断している。

オプトエレクトロニクスの産業領域あるいは技術分野は、光通信に代表される光情報伝送、CDに代表される光情報処理、レーザー溶接やレーザーメスのようなエネルギー利用（米国のSDI構想もこの領域に入る）、それに高精度なレーザー光の特長を生かした光計測の四分野に大別することができよう。そして、これらを総合して、わが国の昨年度の生産規模はすでに1兆2千億円に達している。

メイマンのレーザー発振成功からわずか28年、オプトエレクトロニクスが産業としても急速に発展を続けている魅力のあふれた分野であることがよく分かる。

これらの眼を見はる発展は、昨今の高度情報化社会のニーズに対応したものであり、レーザーを中心としたオプトエレクトロニクス技術が質のよい革新技術であった点に原因があろうが、一方では、半導体レーザーに見られるような光部品、光部品要素技術の開発が急速に進み、優れた光部品が早期に実用化時期を迎えたのが強い原動力を生んだ点も見逃すことができない。

3．光部品と光 IC

光部品に対して光デバイスという言葉がある。両者の定義や区別は明確ではないが、前者がプリズムやレンズといった光の受動部品をさし、後者は半導体レーザーや受光素子のような光の能動素子を意味する語感がある。

また、プリズムやレンズを組み合わせて複合化した光分波器や光分岐器などを光部品ということもあるし、光ファイバーや固体レーザー、さらには太陽電池、CCDまでを含む場合もある。

Tab.1 は光 IC を構成する要素としてとらえたときの光部品の分類で、光デバイスも含めて光部品としている。

個々の部品の特性などの解説は他の専門書に譲るとして、表に示された技術動向を見れば分かるようにほとんどのものが集積化を指向している。

集積化技術というものは、部品のもつ宿命的な課題であり、小形化、高性能化、低価格化、信頼性向上などの目的のために当然の課題であろう。

先輩格のシリコン集積回路を見た場合、集積化技術として時系列的な流れからは個別→ハイブリッド→モノリシックであるにもかかわらず今日立派にハイブリッドはその地位を築いている。

その存在価値はモノリシックにはないメリットの追求であつたろう。すなわち、熱、電力、高耐圧、設計変更の容易さ、半導体材料以外の部品の集積化の容易さといったところであろうか。

これらはすべて光 IC の場合にもあてはまる。さらに光の場合、モノリシック用基板の化合物半導体単結晶が Si

Tab.1 Technological Development of Optical Devices

大 分 類	小 分 類		技 術 動 向
発・受光素子	発 光 素 子	LD	○大出力化 ○高速化 ○短波長化 ○狭スペクトル化 ○低雑音化 ○複合機能化(集積化) ○高信頼性化(長寿命化) ○低価格化
		LED	○短波長化 ○高速化 ○大出力化 ○複合機能化(集積化)
	受 光 素 子	PIN-PD APD PT	○高速化 ○低雑音化(高感度化) ○長波長化(1μm帯) ○複合機能化(集積化)
光回路素子	光通信部品	光SW 分岐結合 分波合波 アイソレータ 変調器など	○小型化(モジュール化) ○高性能化 ○高速化 ○多機能化(集積化) ○高信頼性化 ○低価格化
光 セ ン サ	光ファイバー センサ	温度 電流 電圧 振動 ジャイロ ドップラー など	○新構造センサ開発 ○高性能化 ○低価格化 ○高信頼性化 ○多機能化

と異なり、結晶品質、価格、インゴット直径（ウェハーサイズ）等に問題が残されており、ハイブリッド構成の方が有利である。

電気の場合と異なって、光の場合その直進性や光軸合せの問題が存在する。個別部品の相互接続で光軸アライメントは複雑で機械的安定度にも問題があったが、集積化することにより著しく改善される。

4. 光 IC の実例

光ファイバ通信として、光交換器などの重要な構成要素となるマトリックス光スイッチの例として、Fig. 1の構成が報告されている³⁾。

LiNbO₃ 基板上に Ti 拡散によって光導波路を形成し、方向性結合器形のスイッチが64個集積された8×8マトリックス光スイッチである。長さが60mmであって、導波路のパターニングにはステップアンドリピート方式の電子ビーム描画が用いられた。

クロストークは-23dB、挿入損失は-13dBである。また InP 基板を用いた利得型のマトリックススイッチも報告されている⁴⁾。

光情報処理分野の例として最近最も注目されたものとして Fig. 2の光ディスク用ピックアップがあげられる⁵⁾。

15mm×5mmの Si 基板上に SiO₂ バッファ層、#7059 ガラス導波層、SiN グレーティング層の導波路が形成され、導波光は波長0.79μmの半導体レーザーで端面結合する。

半導体レーザーから10mmの位置に電子ビーム直接描画で集光グレーティングとビームスプリッタグレーティングを隣接して形成する。集光グレーティングは曲がりと緩い周期変化をもたせたピッチになっており、導波光を光ディスクの面上に集光し、今度は反射光を再び導波路内に戻す役割をもつ。ビームスプリッタグレーティングは、傾きと緩い周期変化により戻り光を回折し、受光素子へ集光させる役割をもっている。

これらの各要素の位置とグレーティングによる結像の関係によって、光ディスク信号の読出し、フォーカスエラー、トラッキングの各信号が4個のフォトダイオード出力の簡単な演算で検出可能となる。

光ピックアップとしての基本動作は確認されたが、今後実用化に結びつけるためには光源として使用される半導体レーザーの改善が重要課題である。現在の半導体レーザーは発振周波数の安定度、戻り光に対する雑音などの点でまだまだ課題を残しており、今後このような光 IC のハイブリッド光源として用いるためにも外部共振器構造⁶⁾のような工夫を必要とする。

Fig. 1 Architecture of a Strictly Nonblocking 8×8 Switch Matrix. Any Unoccupied Input Port (1-8) can Reach any Unoccupied Output Port (1-8) without Altering Existing Connections.

Fig. 2 Schematic View of the Proposed IODPU

光演算用の光 IC としては、LiNbO₃ 基板を用いたベクトル演算器をはじめとして種々の光デバイスがすでに検討、報告されているが、光コンピュータの研究の進展に伴い今後ますます活発になる領域であろう。Fig. 3はコリレーション演算を行うことのできる光 IC の例である⁷⁾。基板に Li Nb O₃ を用い、電気光学効果によるグレーティングと弾性表面波 (SAW) によって生ずる表面のグレーティングの組み合わせによって、電気光学効果のグレーティングに印加する電気信号と SAW に印加するデジタル信号の相関を導波光によってとっている。32ビットの空間変調器とキャリア周波数263MHzの SAWで17.5 Mb/sのコリレーション演算が報告されている。

計測分野における光 IC としては、光ファイバをプローブとして用いたレーザードップラー速度計が報告されている⁸⁾。Fig. 4に示すようなもので、TE-TMモード変

Fig. 3 Schematic Drawing of an Integrated Optical Correlator Based on the Programmable IOSLM. The IOSLM is the Array in the Center of the Drawing. The Notations (0-1, 1-0, etc.) on the Output Beams Indicate the State of the IOSLM and SAW Segments, Respectively, that are Encountered by the Respective Beams.

Fig. 4 Fabricated Optical IC for the Fiber Laser Doppler Velocimeter

換器，モードスプリッタ，周波数シフタ，合波器などが Li Nb O_3 基板上に集積化されており，計測可能な速度上限は約10cm/s，SN比は約25dBである。

これらのほかに， Li Nb O_3 の非線形光学効果を利用したレーザー光の2次高調波発生（SHG）用の光ICがある。これはわれわれのところで試作している例であるが⁹⁾，

Fig. 5にその構造を示す。

半導体レーザーの発振波長を短くする開発努力が続けられているが，Ⅲ－Ⅴ化合物半導体材料では赤色の600nm付近に限界がある。一方，光情報処理の光源としては400～500nmといった短波長光源が望まれており，このSHG光ICは800nm付近の現在実用化されている半導体

レーザーの光を半分の波長に変換するものである。

Fig. 5の構造から分かるように、LiNbO₃の基板にプロトン交換法によって幅2μm、厚み0.4μm、長さ6mmの光導波路を形成する。導波モードと放射モード間で位相整合をとるチェレンコフ放射の構成によって、導波路に対して約16°の角度で2次高調波がとりだせる。半導体レーザーの出力120mWで現在1.05mWの420nm出力が得られている。Fig. 6は光源と一体型にしたものである。

5. 光 IC 作製技術

5.1 光導波路

光 IC の構成の基本要素は少なくとも低損失の光導波路の作製であろう。現在までに研究開発されてきた光導

Fig. 5 SHG Device Using Proton-exchanged Li Nb O₃ Waveguide

波路を材料別に整理したものを Tab. 2 に示す¹⁰⁾。

絶縁体結晶を用いるものは、電気光学効果や磁気光学効果を利用できる点で個別素子にはない複合化した機能を持たせることができる。化合物半導体結晶は半導体レーザー等を含んだモノリシック形に適しているが、光の導波損失が大きい点に課題が残る。ガラス系としては、Si 基板上に形成した SiO₂ が代表的であるが、光受光素

Fig. 6 Blue Light Source in which a Semiconductor Laser and SHG Device Are a Single Module. (a) Configuration and (b) Exterior Photograph (size : 14×14×43mm)

Tab. 2 Various Materials for Optical Waveguides

	材 料*	製 法*	光損失* (dB/cm)	特 徴	応 用 回 路 例
絶縁体結晶	誘電体 LiNbO ₃	{ 熱拡散 スバッタ LPE	1	電気光学効果 音響光学効果 磁気光学効果	光変調器, 光スイッチ スベアナ, 光演算器 TE-TM 変換器 アイソレータ
	磁性体 PLZT YIG		5 1~10		
化合物半導体結晶	GaAs 系	{ LPE MOCVD VPE	0.2~2	電気光学効果 電流-屈折率効果 受発光, 光双安定	光・電子集積回路 光スイッチ 光増幅器
	InP 系		6~12		
ガ ラ ス	石英系 SiO ₂	{ スバッタ CVD 火炎堆積 イオン拡散	0.1~0.5	低損失	分岐, 光合分波器 周波数弁別器
	多成分系 SiO ₂ -B ₂ O ₃ -Na ₂ O カルコゲン		0.1	低損失	
	AS ₂ S ₂	{ 蒸着 スバッタ	0.4~2	光-屈折率効果	回折格子
有 機 材 料	プラスチック PMMA	{ 熱重合 紫外線重合 キャピラリー	0.2	加工性 低価格 非線形	スターカブラ 分岐
	光非線形有機 ポリジ アセチレン		0.2 2		
		{ 蒸着	—		SHG, THG
液 晶	PCH 1083	積層	2	屈折率変化大	光スイッチ

* 代表例を示す

Tab. 3 Typical Examples of Fabrication Techniques and Materials for Wareguides

材 料	作製技術	ポリマ	ガラス	ナカル イコ ドゲ	LiNbO ₃ LiTaO ₃	ZnO	Nb ₂ O ₅ Ta ₂ O ₅	Si ₃ N ₄	YIG
デ ポ ジ シ ョ ン	スピン コーティング	○							
	熱 蒸 着			◎					
	スパッタリング		◎	◎		◎	○		
	C V D 重 合		○			○		○	
熱 拡 散					◎				
イ オ ン 交 換			◎		○				
イ オ ン 注 入			○						
エ ピ タ キ シ	L P E				○				○
	V P E					○			

◎印は特によく利用されている例であることを示す

Fig. 7 Fabrication Process for Proton-exchanged LiNbO₃ Waveguide Using Pyrophosphoric Acid

Fig. 8 Propagation Loss of Proton-exchanged LiNbO₃ Waveguide

子を一体化できる点、最近の GaAs on Si 技術などの発展に伴って今後注目されるものとなろう。有機材料も最近非線形光学常数の大きい点が注目され、活発な研究が行われている。

Tab. 3 はこれらの材料と導波路作製技術との関連を示したものである¹¹⁾。作製法を大別すると、基板上に基板よりわずかに屈折率の高い材料の薄膜を堆積させるデポジション法と、基板内に表面からイオンを拡散なり注入なりさせて基板よりわずかに屈折率の高い層を作り込む方法とに分けられる。

熱拡散や CVD 等これらのほとんどの技術は Si 集積回路で培われた技術を流用したものであるが、イオン交換法は Si 集積回路にはない技術である。

硝酸銀や安息香酸の溶液中に結晶を浸し、イオン交換を行って屈折率差を得る方法で、例えば安息香酸溶液中に LiNbO₃ を浸すと、 $\text{Li} \longleftrightarrow \text{H}^+$ の交換が起こり、結晶表面に $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ なる高屈折率層を得る。この方法はプロトン交換とも呼ばれており、Ti 拡散導波路に比べて光損傷を起こす入力レベルが高くなる特長がある。

Fig. 7 はわれわれのところでやっているピロリン酸($\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$)を用いた 3 次元導波路作製のプロセスを示したもので、ピロリン酸は粘性が高く結晶表面に塗布できる、屈折率差が大きい、伝搬ロスが小さいといった特長がある。Fig. 8 に安息香酸とピロリン酸の伝搬ロスの比較を示した¹²⁾。

5.2 微細加工技術

ハイブリッド形光 IC は、本質的には単一モード導波路で構成されることが望ましいので、その中の素子の構造は光の波長オーダー、すなわちマイクロメートルのオーダーでの技術が要求される。導波路や個々の素子の微細加工技術としては、シリコン集積回路技術として育ってきた CVD, エッチング, 微細パターンニング技術といったものを基礎としている。

電子素子の微細加工と異なる点を列挙すると、

- 1) 電子素子では微細である点が重要であるが、光 IC の導波路ではパターンのギザギザは直接光の伝搬ロスに効いてくる。
- 2) 微細パターンであると同時に大面積である。例えば、光導波路厚みが $0.4\mu\text{m}$ 、導波路幅 $2\mu\text{m}$ で長さが 6mm とか、Fig. 9 のように光の損失を極力抑えた曲り導波路を作製する必要がある。このため、微細加工の手段は IC 技術が使えても、装置としてはそれなりの工夫が必要である。
- 3) 誘電体基板、特にイオン性の強い結晶ではダストが静電的に吸着しやすく、プロセスのクリーン化はシリコン以上の配慮が必要である。

微細加工の製造装置は、ここ数年間に格段に進歩し、これらの技術の進展に伴ってハイブリッド光 IC の開発も大きく前進するであろう。

6. ハイブリッド光 IC の課題

電子集積回路におけるハイブリッド IC の位置づけと同様に、OEIC に対して導波路を主体にしたハイブリッド形の光 IC は異なる機能の組み合わせで妙味を発揮するであろう。OEIC はその中の単一機能の素子を高集積する努力、例えば発光素子のマルチアレイ化や O と E の組み合わせさせたユニットセルの高集積化に進むであろうが、ハイブリッド形光 IC はまったく異なった材料、構造、機能の組み合わせが新しい複合機能を生み出す点に特徴を発揮すべきものである。

光 IC を支えてゆくハイブリッド技術としては、光導波路の低伝搬ロス化、低散乱化、基板の大面積化に対応した加工技術、さらには Tab. 2 に示した導波路材料の特性

(a) 構造

(b) 導波光のストリーク

Fig. 9 Curved Ridge-type Waveguide Fabricated by Lift-off Technique on Fused Silica

の改善あたりに課題が残されている。

参考文献

- 1) S. E. Miller : Bell Syst. Tech. J., 48, (1969), 2059.
- 2) S. Somekh and A. Yariv : Int. Telecom. Conf. Los Angeles, Oct. (1972) 407.
- 3) P. Granstrand et al. : IGWO '86, WAA3, (1986).
- 4) 池田：昭和61年秋応物, 28p-X-5, (1986).
- 5) S. Ura et al. : J. Lightwave Tech., LT-4, (1986).
- 6) T. Fujita et al. : Electronics Lett. 25th April, vol.21, No.9, (1985), 374.
- 7) C. M. Verber et al. : Appl. Opt. 20, (1981), 1626.
- 8) 戸田, 他：光ファイバ・センサ・シンポ '85, WOFS 2-7, (1985).
- 9) T. Taniuchi and K. Yamamoto : Proc. ECOC '86, TuC5, (1986).
- 10) 電気学会技術報告, 1部第148号, (1988), 26.
- 11) 西原, 春名, 栖原 著：光集積回路, p.145, オーム社, (1985).
- 12) K. Yamamoto and T. Taniuchi : OFC/IOOC '87, TuH2, (1987).
- 13) 西原, 春名, 栖原 著：光集積回路, p.202, オーム社, (1985).