最近の発展と将来

光 集 積 回 路 の 進 歩

末 田 正*

Tadashi SUETA*

1. はじめに

コヒーレント光源に適した光回路を構成するのに、光導波現象を利用した新しい光学系（導波光学系）を用いることは、マイクロ波回路との類推からも自然の成り行きと考えられる。一枚の基板上に複数個の導波形光デバイスを集積して作成することにより光集積回路（光IC）を実現しようという考えは1960年代の終りに導入された。それ以来、多くの人々によって熱心に研究が進められ、ガラスや種々の結晶などを基板とした導波形光デバイスが実現されてきた。しかし、2～3年後（1970年）に発表された低損失光ファイバと室温連続発振半導体レーザーの華々しい発展ぶりは周知の通りであり、これに比べると光集積回路の歩みは遅々としていた。

しかし、ここ2～3年、光ICはふたたび世間の関心を集め、各研究機関で熱心な研究が行われるようになった。その背景と考えられるのは、まず、これまで着実に進められてきた研究の成果が最近になって結実し、有用な導波形光デバイスが順次実現され、中にはバルク形に比べて格段に高性能のデバイスがえられるようになったこと、単一モード光ファイバが急速に進歩し、これと接続する光回路として導波形光回路あるいは光ICが注目されたことなどが挙げられる。さらに、光ファイバ通信、光情報処理、光センサなどの光エレクトロニクスシステムに対する関心が強くなり、これに伴って光ICへの期待も高まってきたと言える。

一方、光ファイバと同じように、半導体レーザーの最近の進歩にも目を見張るものがあり、丁度電子回路が真空管・トランジスタ・ICの時代を経てきたように、光回路もガスレーザー・半導体レーザーに続いて光ICの時代へと進むことが各方面から期待されるようになった。さらに進んで、レーザーを含む種々の光デバイスの他に、関連する電子回路をもモノリシックに集積化する光電子集積回路(OEIC)**の概念も導入され、基礎研究が進められている。

2. 導波形光デバイスの進歩

光集積回路の要素となる導波形光デバイスについて、最近のトピックスを中心として述べる。詳細は文献1—8を参照されたい。

2. 1 導波路と受動デバイス

最近の高性能光デバイスにはTi拡散LiNbO₃導波路を利用したものが多く、比較的低損失(1dB/cm以下)の単一モードガイドがえられている。しかし、2, 3の問題点も残っており、未だ確立された技術とはいえない。又、可視領域では光学損傷のため光パワーが制限されるので、損傷の少ないLiTaO₃導波路の研究も進んでいる。

発光・受光素子を含むモノリシック光ICを念頭に置いた半導体光導波路(GaAlAs, InPなど)の研究も進められているが、Ti:LiNbO₃導波路程低損失にはなっていない。一方、単一モード光ファイバとの接続を考慮して埋込み形SiO₂導波路も注目されており、0.1dBという

* 大阪大学基礎工学部

** Optoelectronic Integrated Circuit

低い結合損失のものが報告されている。

光導波路は開放形であるため不連続部で放射を生じ易く素子の動作解析が難しい。実際によく用いられているY分岐の動作機構も最近になって明らかとなった。又、この考察から、新しいハイブリッド回路が提案されている。

2次元導波路を用いた光信号処理系では、導波路レンズが必要になる。後述するIOSPに関連してこの分野の技術も進歩し、回折限界に近い性能を持つレンズが作られるようになった。さらに、波長多重系においては、分波・合波器が重要な素子となるが、これらを導波形式で構成しようとする試みもいくつか報告されている。

2.2 光変調デバイス

導波形とすることによって従来のものに比べて格段の高性能が実現されたデバイスとして、光変調器及び光スイッチが挙げられる。これは、導波構造によって、光波を長区間にわたって狭い断面内に閉じ込めることができるためであって、数年前に帯域幅当りの変調電力 $1.7 \mu\text{W} / \text{MHz}$ という高能率のものが報告されている。

さらに、変調器と進行波形プッシュプル干渉計で構成し、変調電極を非対称平面ストリップ線路とすることによって、DC-18GHzにわたる広帯変調実験も行われた。Fig. 1 にこの変調

Fig. 1. A broad-band push-pull interferometer-type intensity modulator

器の概略図を示す。その性能は、3 dB 帯域幅 11.5 GHz, パルス応答時間 40 ps であり、現在の所これが最高速の光変調器であるといえる。

又、これと異なるアプローチとして、電極間隔を極端に小さく ($1 \mu\text{m}$) によって 100 ps に近いパルス応答特性もえられている。さらに、導波形特有の変調器構成法として、しゃ断形、TE-TM モード変換器形、導波-放射モード変換器形などがある。

2.3 光スイッチ

光スイッチ及びスイッチマトリックスは、通信・信号処理などへの応用に際して重要である。多くの光変調器はオン・オフのスイッチとして使用できるが、普通、光スイッチは2個の出力導波路を持ち、対称的に2個の入力導波路を持つもの（すなわち 2×2 スイッチ）が多い。スイッチマトリックスは、複数個のスイッチを集積化して実現される。

スイッチの構成法にもいろいろあるが、導波形デバイスでは、 $\Delta\beta$ 反転方向性結合器を利用するものが多い。発表された性能としては、漏話 28 dB, スイッチ電圧 4 V の程度であるが、実際には 30 dB, 2 V のものが作られている。材料としては Ti:LiNbO_3 が用いられている。

半導体光導波路を用いた光スイッチとしても、GaAs あるいは InP 方向性結合のものが試作され、 $1.06 \sim 1.51 \mu\text{m}$ の波長域でテストされている。

スイッチマトリックスとしては、5 個の方向性結合器形スイッチを LiNbO_3 基板上に集積化したものが報告されており、最近、波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯における 32 Mbit/s の光信号のスイッチ動作も示されている。

2.4 その他のデバイス

光導波路は、高い光強度を得易いこと、導波路のパラメータを利用して設計の自由度を大きくできることなどから、原理的に非線形光学デバイスの構成に適していると考えられ、初期の頃から第2高調波発生などの研究が行われてきた。しかし、予想に反して高性能デバイスは中

々えられず、期待された光パラメトリック発振も、最近になってやっと発振したという報告がある程度である。

アイソレータなど導波形非相反光デバイスは、応用の上からも強く期待されており、設計法はかなり進んでいるものの、未だ満足すべきデバイスは実現されていないのが現状であり、今後の努力に待つ所が大きい。

光変調器などを利用した光双安定素子も興味あるデバイスといえる。とくに、非線形光学効果を利用した高速度素子への期待は大きい。

3. 集積化と応用

導波形光デバイスが広く応用されるには、その集積化を進めることが重要である。集積化は徐々に進んでおり、場合によっては複数個の素子を集積化することによって1個の導波形デバイスを実現しているものもある。しかし、最近になって、特定の機能を実現するために複数個の導波形光デバイスを集積しようとする動きが活発になってきた。そのきっかけとなったのはFig. 2に概念図を示す光集積化RFスペクトル分析器(IORFSP)であろう。この場合、Ti拡散LiNbO₃ 2次元導波路上に、2個のレンズとSAW(表面弾性波)トランスデューサがモノリシックに集積され、両端面に半導体レーザー及びフォトダイオードアレイが付けられている。この分析器は、音響光学効果による光ビームの偏向角が周波数に依存することを利用し、第2のレンズの焦点面における光強度分布をフォトダイオードアレイによって測定しスペクトル分布を得ようとするものである。実際の

Fig. 2 An integrated optical RF spectrum analyzer (10 ps)

Fig. 3. An integrated optical 4-bit analog-to-digital converter.

ものでは、帯域幅400MHz、分解能4MHz、測定時間数 μ s程度の性能が得られている。

Fig. 3に示すものは、高速電気信号のAD変換を行う光集積回路として提案されているもので、4個の干渉計形光変調器を集積化することにより、4ビットのAD変換を828MSample/sの高速度で行うようになっている。

光変調器を集積化したものとしては、この他にも、2組の干渉計形光変調器と3個の光移相器を集積化したSSB(単側波帯)光変調器の提案と2GHzにおける実験、2個の光変調器の縦続接続による相関と高速サンプリングなども報告されている。又、高速光信号のピコ秒ないしサブピコ秒サンプリング法の提案もなされている。

その他、光集積化ホログラム、光集積化ファイバジャイロ、種々の光ICセンサーなどの提案と実験も報告されている。

導波形光デバイスの他、レーザー・フォトダイオード・能動電子回路素子などを含むモノリシック集積回路(光電子集積回路, OEIC)は重要で興味ある問題である。すでに、いくつかの考え方が発表され研究も進められているが、材料、加工法、デバイス構成法などに関する技術確立する必要がある。たとえば、レーザーとトランジスタのように構造や動作機構の異なる半導体素子を一枚の基板上に集積化することは容易ではない。しかし、レーザーと2個のFETの集積化などOEICの可能性を示す成果もかなり発表されている。

4. むすび

以上見てきたように、光ファイバも半導体レーザーの発展に刺激されて、光集積回路に対する関心が深くなり、高性能導波形光デバイスの実現や集積化の進展などこの分野における最近の進歩には著しいものがある。信頼性の高い導波路の作成法など基礎的技術を固めると共に、今後の課題である光電子集積回路の発展を図り、集積光学が光エレクトロニクスの中核技術の一つとなることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) D. Botez and G. Herskowitz: Proc. IEEE, **68** (1980) 689.
- 2) R. C. Alferness: IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 946.
- 3) F. J. Leonberger: Fiberoptic Technology (Laser Focus), March (1982) 125.
- 4) 末田: 応用物理 **51** (1982) 427.
- 5) L. D. Hutcheson: Photonics Spectra, April (1982) 69.
- 6) N. Bar-Chaim, I. Ury and A. Yariv: IEEE Spectrum, **19** (1982) 38.
- 7) R. C. Alferness: IEEE Trans. MTT, **MTT-30** (1982) 1121.
- 8) T. Sueta: 8th ECOC (1982) B III-1.