

光 IC と ガ ラ ス

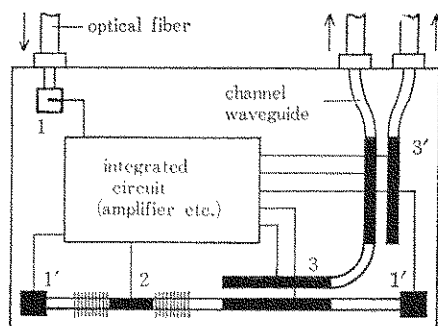
東京大学工学部 多田邦雄

1. はじめに

このたび、標記の題目のもとに、「要素となる光電子機能、光 IC の将来、光 IC に期待されるガラス材料」等につき講演するよう依頼された。将来を語るのは仲々難しい問題であり、また光 IC に期待されるガラス材料については、ガラス専攻の方々の方が詳しく調査されていると思うが、光エレクトロニクスのハードウェア専攻の立場から述べてみたい。

2. 光集積回路の概念

まず、光 IC とは何かということから始めたい。図 1 は、光ファイバ通信における光中継器を光 IC 化するならこのようにしたいという目標の一例である。光ファイバで送られてきた光信号を、フォトダイオード 1 で電気信号に変換し、中央の電子 IC で増幅、波形整形する。次段に光を送り出すための光源はレーザーダイオード 2 で、集積化のためには劈開面反射鏡をもたないものが便利であるから、回折格子を反射鏡に使ったブラッグ反射型（分布反射型）レーザーをここでは想定した。これを一定出力で発振させておく。3 は分布結合ガイド型（方向性結合器型）光変調器であって、2 本の光導波路が極めて接近しているので、一方の入射端から光を入射すると、その一部が他方の光導波路にも結合移行して出射する。その光量を光導波路に加えた電圧で調節できるから、次段に送り出したい電気信号に応じて光が強度変調される。すなわち光に信号を乗せたことになる。3' は 3 と同様のデバイスを光路切り替えスイッチに使用しており、信号を送り届ける相手を選定できる。フォトダイオード 1' はモニター用で、左側の



- 1, 1' : photodiode
- 2 : Bragg reflector laser
- 3, 3' : coupled-waveguide modulator

図 1 光 IC の目標例（光ファイバ通信用光中継器）¹⁾

ものはレーザーが一定出力で発振しているかどうか、右側のもは光変調が正しく行われているかどうかをそれぞれ監視している。光デバイス間は光導波路でつながれ、全体が電子 IC で制御されている。これは光電子集積回路いわゆる OEIC という用語の出現以前に描いた図であって¹⁾、電子 IC は別に作って搭載したようになっているが、これらすべてを例えば GaAs などまとめて作ってしまえば、OEIC ということになる。

このように光 IC とは、光部品や光電子デバイス、すなわち光源のレーザーダイオード、光検出器、光変調器や光スイッチなどの光制御デバイス、光フィルター、レンズといったような受動光回路素子、これらのものを光導波路などを使って単一基板上に結合集積化して一定の機能を果たし得るようにした光回路系であるというように定義できよう。

レーザー発明以後の光デバイス技術体系を第1世代から第3世代までに分類する考え方があ
る。第1世代は従来の光学に立脚し、ガスレー
ザーや在来型の光学部品を光学ベンチの上で組
み立てるような技術体系をさす。第2世代は微
小光学 (Micro Optics) に立脚し、レーザーダイ
オードや微小光学部品 (ロッドレンズなど) を
組み合わせた小形の装置が中心である。第3世代
は集積光学 (Integrated Optics) に立脚し、光 IC
が中心である。第1世代の時代 1969 年にす
でに光 IC の原形が提案されて以来 15 年以上経
過し、この間第2世代の微小光学系が興隆し
た。光 IC には色々困難もあるが、小形軽量化
の他に、高性能化 (低電力化、高速化など)、
量産化、高信頼化などの利点が期待され、さら
に集積化に伴う新機能の開発なども目指して、
研究開発が活発化しつつある。

3. 光導波路と受動光回路素子

これらは光 IC の最も基本的な構成要素であ
るから、最初にやや詳しく述べたい。図2は薄
膜光導波路を横からみた断面図で、導波光の幾
何光学的な伝搬の様子等が併記してある。屈折
率の高いガイド層 (膜厚 f , 屈折率 n_f) が、そ
れより屈折率の低い基板または下部クラッド層
(屈折率 n_s) とカバーまたは上部クラッド層
(屈折率 n_c) とに挟まれている。入射角 θ が基
板側界面との全反射臨界角 $\theta_{critical}$ より大
であれば、光線は上下の界面で全反射を繰り返
し、ガイド層内を伝搬することが可能である。
そのような導波光に対する実効屈折率 n_{eff} は、
図2より明らかなように、 $n_f > n_{eff} > n_s$ と
なる。ただし、 $n_s \geq n_c$ と仮定した。実効屈折率と
は、導波光の等価的な屈折率であり、真空中の
光速と導波光の z 方向への位相速度の比であ
る。

次に導波モードについて説明しよう。まず、
偏光としては TE モードと TM モードの二通
りがある。それぞれ、光波の電界ベクトルある
いは磁界ベクトルが図2の y 方向に平行なモ
ードをいう。各々の偏光モードに対し、 n_{eff} は
上記の n_c と n_s の間で任意の値をとりうるわ

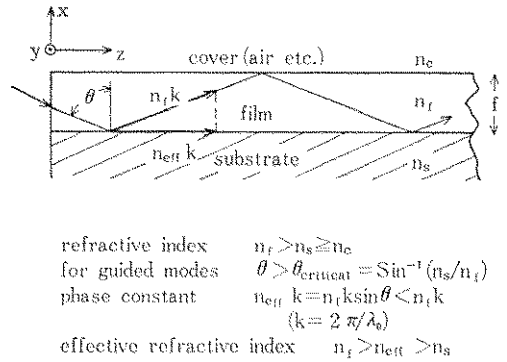


図2 薄膜光導波路における導波光

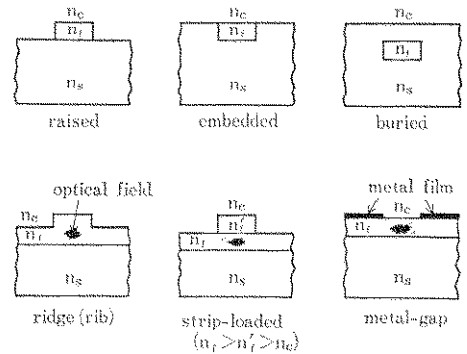


図3 種々のチャネル型光導波路の断面図

けではなく、実は1個または有限個の特定の
 n_{eff} 値だけが許される。このようにいくつかの
離散的なモードだけが許されるということは、
導波モードが安定に存在するための境界条件か
ら決まることである。許された n_{eff} の1番大
きいモードを基本モード (0次モード)、それ
より n_{eff} の小さいモードを高次モード (1~ n
次モード) という。基本モードは θ 最大である
から全反射の回数最少で、伝搬損失最少のモ
ードである。導波層膜厚 f が増すほど許され
たモード数が増加する。このような多モード光
導波路には不都合な点もあり、基本モードだけ
伝搬する単一モード光導波路が光 IC では望ま
しいことが多い。後者を得るには、 f をある程
度小さくする必要があり、通常 $1\mu\text{m}$ 程度か
それ以下になる。ある特定のモードに着目す
ると、 f の増大と共に n_{eff} が増大すること
も知っておくべき点である。

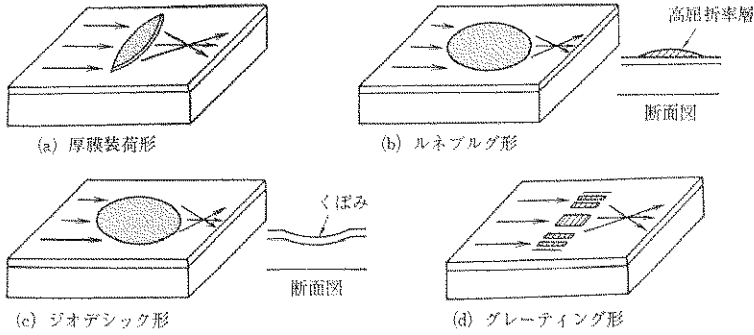


図4 種々の導波路レンズ²⁾

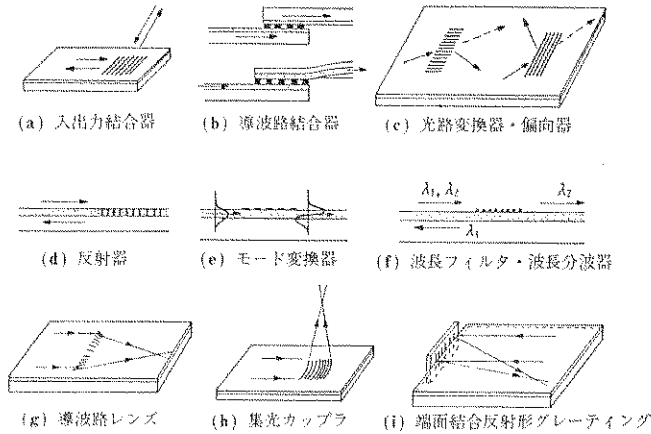


図5 種々のグレーティング受動光回路素子³⁾

以上はプレーナ型すなわち面状の光導波路についての話であった。チャンネル型すなわち線状(柱状)の光導波路はやや複雑となる。図3に代表的構造について断面図を示す。光波は紙面垂直の方向に伝搬する。上の側の三つは光導波路が左右からも屈折率の小さい領域で挟まれているので、原理は自明であろう。下側の三つでは、光波は黒く塗った付近に局在して伝搬している。例えばリッジ型(リップ型)について説明すると、導波層の中央部分が左右より厚いので、プレーナ型光導波路とみた時の実効屈折率が大きいことになり、光波はその付近に局在するわけである。いずれのタイプでも、先に考えた厚さ方向(上下方向)だけでなく横方向(左右方向)についても単一モード化するために

は、導波路横幅も小さく制限する必要がある。

次に受動光回路素子について説明したい。まず、チャンネル型光導波路を基礎にしたものに、曲り導波路、Y分岐、X分岐、方向性結合器等がある。曲り導波路では放射損失のため曲率半径を小さくするには制限がある。Y分岐は光の分岐または合流に使われるが、単一モード導波路で構成すると、合流の際には位相弁別作用を付加できる。X分岐ではさらに複雑な位相弁別光路切替えが可能である。方向性結合器は図1中の3, 3'を受動化したような素子で、導波路から一定比率で光を取り出すのに用いる。

図4はプレーナ型光導波路上の種々の導波路レンズの概念図である²⁾。(a)はモードインデックス型とも呼ばれ、膜を付加した部分で前述

のようにプレーナ型光導波路としての実効屈折率が高くなることに立脚している。(b)も同様の原理に基づく。(c)は測地線型とも呼ばれ、くぼみにより光路長をかえてレンズ作用をもたせている。(d)は回折格子すなわちグレーティングを利用している。回折格子は、この他に図5³⁾に示すように多くの受動光回路素子に利用され、また図1中の2に示したような分布反射型さらには分布帰還型(DFB型)レーザーダイオードの反射器として用いられており、光ICにおいて重要な地位を占めている。

以上に述べた光導波路や受動光回路素子の分野は、ガラスの透明性、成膜や物理的・化学的加工処理の容易性等からみて、ガラスに最も期待される分野の一つである。

4. 光集積デバイスに必要な機能と材料特性の関係

ここでは光導波や光学的、受動光回路的な機能以外の光電子的機能もすべて含めて、光集積デバイスに必要な機能と材料に要求される特性の関係を検討してみよう。

表1は、縦にデバイスおよびその基礎となっている物理現象を、横に典型的な材料群をとって、それらの間の組み合わせの適否を要約した表である⁴⁾。発光デバイスではレーザーダイオードが最も重要であるが、半導体接合における電子と正孔の発光再結合に基づいているので、発光遷移確率の高い直接遷移型のバンド構造をもった半導体が必要である。さらにpn接合が作れること、ダブルヘテロ構造が作れること等の条件が加わるので、GaAs-AlGaAs系やInGaAsP-InP系などIII-V族化合物半導体の一

表1 光集積デバイスと材料機能の関係⁴⁾

component	effect	single-crystalline			polycrystalline amorphous	
		semiconducting		ferroelectric	oriented	non-oriented
		compound	elementary			
laser LED	radiative recombination (direct transition)	⊙	×	×	×	×
photodiode APD	photoconduction photovoltaic	⊙	⊙	×	×	×
modulator deflector	electrooptic	⊙	×	⊙	○	×
	acoustooptic	○	○	⊙	○	○
transducer (acoustic)	piezoelectric	○	×	⊙	⊙	×
passive components (waveguide, lens, coupler etc.)		⊙	○	⊙	○	⊙
typical materials		(AlGa)As/GaAs (InGa)(AsP)/InP	Si Ge	LiNbO ₃ LiTaO ₃	sputtered ZnO	glass polymer oxide chalcogenide
crystal structure		zinc blende	diamond	oxygen-octahedra (LiNbO ₃ type)	—	—

⊙ most suitable ○ suitable × not suitable or impossible

部に材料が限られてくる。発光ダイオード(LED)となると、上記以外の種々の発光遷移も利用できるが、必ずしも直接遷移型半導体に限らないが、実際的にはやはり材料は化合物半導体の一部に限定されてしまう。それに反して、受光すなわち光検出のデバイスであるフォトダイオードやアバランシュフォトダイオード(APD)では、SiやGeなど元素半導体も極めて有用である。

次に光変調器、光偏向器等の光制御デバイスを考えてみよう。電気光学効果、つまり直流または低周波(光波に比べて)の電界の印加による屈折率変化の現象が最も多く用いられる。これには1次の効果(ポッケルス効果)と2次の効果(カー効果)があるが、前者つまり屈折率変化が電界に比例する現象が主として用いられる。この現象は非中心対称性のつまり圧電性の結晶にしか生じない。残念ながらSiやガラス等は使用できず、強誘電体系のLiNbO₃結晶、GaAsなどの内亜鉛鉱型半導体結晶などを使う必要があるが、単結晶でなくともスパッタリングで作製したc軸配向ZnO膜なども使えない。なお2次の効果はガラスを含めどのような物質にも生じうるが、PLZTなどの強誘電体系の材料でこの効果が大きいことが知られている。

音響光学効果も光制御によく用いられる。これは超音波歪により弾性光学効果を介して媒質中に位相回折格子が形成され、光波が回折される現象である。この回折格子にブラッグ条件を満足する角度で光ビームを入射させると、直進する0次回折光ビームとそれよりやや方向のずれた1次回折光ビームが射出する。後者のパワーと方向は加えた超音波のパワーと周波数によって変化するので、光変調や光偏向が可能となる。弾性光学効果は透明な弾性固体、液体すべてに生じうるので、音響光学材料の選択範囲は比較的広いが、材料の良さの指数は屈折率の6乗、弾性光学係数の2乗、質量密度の-1乗、音速の-3乗に比例し、基本的には屈折率の大きい物質が最も有利である。その意味でガラス材料の中にも良い物が色々あり、とくにAs₂Se₃

As₂S₃等のカルコゲナイドガラスは有望と思われる⁹⁾。

最近になって熱光学効果が光制御に応用され始めている。これは温度による屈折率の変化を利用するもので、ヒーター加熱により温度を変えており、応答速度は遅いが、簡便に高能率な導波路型の光変調器や光偏向器を構成しうる可能性がある。従来のガラスでは屈折率温度係数を小さくすることが重要であったと思われるが、逆の方向の研究開発も必要であろう。

磁界の印加により光学的特性の変化する磁気光学効果にはいくつかの現象があるが、最も重要なのはファラデー効果であろう。これを利用すると光を一方向のみに伝送する光アイソレーターを構成でき、それを導波路型化して光ICの要素デバイスの一つにすることも研究されている。材料としてはYIGなどもあるが、ガラスにも今後期待したい分野である。

5. 光 IC の現状

光ICの構成法を材料面から眺めてみると、大別して二つの流れがある。一つは、色々な材料の長所を組み合わせで構成しようというハイブリッド光ICである。基板材料としてはLiNbO₃結晶が使われることが多い。表面にTiを選択的に拡散して良い光導波路ができ、それをベースに光制御デバイスや受動光回路素子を形成できるから、半導体で作った発光デバイス、受光デバイスを搭載すれば、全体が構成できる。この他、ガラス基板、あるいはシリコン基板上のガラス的な光導波路系を基礎に、ハイブリッド光ICを構成するアプローチもある。もう一つの流れは、表1からも明らかなようにGaAs-AlGaAs系などの特定の化合物半導体を用いれば、光ICに必要なほとんどの要素機能を実現できるので、そのような一系統の材料で構成しようとするモノリシック光ICである。こちらの方が製作技術上その他難しい点が多いので、現時点ではハイブリッド光ICの方が現実的なアプローチとされている。しかしモノリシック光ICの方が究極的には高性能、高機能で量産性も高いという考え方もあって、将来を

目指し研究が進められている。

以下、これら二つの流れにそって、光 IC の現状を概観してみよう。まず、Ti 拡散 LiNbO_3 光導波路に立脚したハイブリッド光 IC について述べる。図 1 に原理を説明した方向性結合器型光変調デバイスでは、例えば変調遮断周波数が 7GHz といった高速の素子ができており、AT & T ベル研究所で最近これを用いて 1.55 μm 帯で 4 Gbit/s, 117 km の大容量長距離光伝送の世界記録が作られた。このような光スイッチを 5 個組み合わせた 4×4 マトリックススイッチなども作られており、さらにそれを応用した 4 チャンネルの時分割光交換装置なども実験されている。マッハツェンダー干渉計をいわば光 IC 化したような干渉計型光変調デバイスも有用である。単体としては変調遮断周波数が 11 GHz を越える高速素子もある。4 個組み合わせ、4 ビットの AD 変換器が試作されている。これは光パルスを用いることにより、アナログ電圧信号を例えば 828 M Sample/s の高速で 4 ビットのデジタル符号に変換することができ、Si IC よりも高速の AD 変換器として注目されている。干渉計型素子は導波路型光応用センサーとしても有用であって、電界センサー、温度センサー等に応用されている。また、X 分岐を利用するとマイケルソン干渉計を光 IC 化することができ、微小変位センサー、圧力センサー等に応用されている。

音響光学効果を光変調または光偏向に利用できることを前節に述べたが、これらの作用を同時に行わせることによりスペクトルアナライザを構成できる。すなわち分析しようとする高周波信号を表面超音波として与え、それによってプレーナ型光導波路で導波光が回折される様子を数百個のフォトダイオードの一次元アレイで並列測定することにより、1 GHz 程度までの広帯域の周波数分析を小形の装置で一挙に行うことができる。これは光を利用した機能デバイスの有名な例であって、 LiNbO_3 またはカルコゲナイドガラスの光導波路を中心にハイブリッド構成した光 IC として各方面で種々に開発されている。

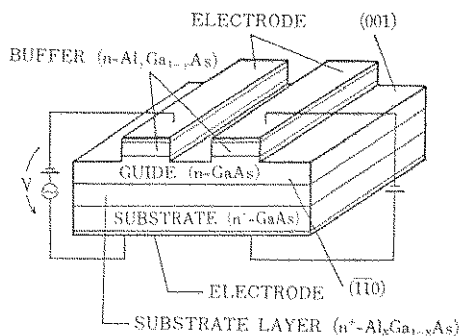


図 6 GaAs-AlGaAs 系方向性結合器型光変調デバイスの一例⁷⁾

次にモノリシック光 IC について述べよう。これは発光、受光、光制御、光導波など必要なほとんどの材料機能を持つ GaAs-AlGaAs 系または InP-InGaAsP 系の化合物半導体が主として用いられ、それ自身が優れた導波路型デバイスであるレーザーダイオードが中心に据えられていることが多い⁸⁾。図 6 は図 1 で説明した方向性結合器型光変調デバイスをダブルヘテロ構造の半導体光導波路を用いて構成した例であって⁷⁾、全長 4.4 mm の素子でスイッチング電圧 16 V、変調遮断周波数 1.5 GHz の特性が得られている。この他、InP-InGaAsP 系の素子や干渉計型デバイスも最近研究されている。これらは LiNbO_3 を用いたものと同様に 1 次電気光学効果に立脚しているが、その他に半導体特有の電気吸収効果（フランツ-ケルディッシュ効果）やキャリア注入による吸収係数および屈折率の変化の現象を利用して、単一光導波路の光変調器や X 字型の 2×2 スイッチなどが開発されている。さらに、半導体量子井戸構造においては電気吸収効果や電気光学効果が顕著に現れる場合があり、光変調器や光スイッチへの応用が研究され始めている。

これら半導体による光変調器あるいは光増幅器、過飽和光吸収素子などをレーザーダイオードにタンデムに結合した構造の種々の複合デバイスが研究されており、発振波長の同調、動的単一化およびチャージング抑制、あるいは高速変調、Q スwitching、モードロック光パルス

列の発生、光双安定動作などの様々な複雑な機能が実現されている。もっと簡単なところではレーザーダイオードとモニター用フォトダイオードを結合した素子や、レーザーダイオードをアレイ化して大出力化した素子などが実用域にある。

6. ガラス光 IC の現状

ここでは特にガラスを材料にした光導波路や光回路系について概観してみよう。ガラスは前述のように光導波路や受動光回路素子の分野に最も適しており、光 IC の最初期のころから多くの研究が重ねられてきた。中でも、ガラス中にイオン交換、特に電界印加イオン交換で光導波路を形成する技術は発展をとげており、例えば低損失の 8×8 スターカップラーや光アクセサなどが開発されている。これについては次の御講演にゆだね、光ファイバー製造技術と同様の CVD 法によるガラス膜作製法に基づく光回路系を次に紹介しよう。

図 7 は、Si 基板上に形成された多モード石英系光導波路による光合分波器モジュールである⁸⁾。SiCl₄ 等の火災加水分解反応によりガラス微粒子を Si 基板上に堆積させ、加熱して透明ガラス化後、反応性イオンエッチングによりパターンニングを行う。これに多モード光ファイバー光波長選択用干渉膜フィルターチップを装着し、波長 0.81, 0.89, 1.2, 1.3 μm の 4 波の合分波器が構成されている。このようなアプローチの利点として次を列挙している；(1)石

英系導波路は高品質かつ光ファイバーとの整合性がよい (2)石英, Si 共に熱的, 機械的に安定で高信頼部品が得られる (3)大形光回路も形成可能 (4)Si 基板をヒートシンクとしてレーザーダイオードなどを直接搭載できる (5)Si と III-V 族化合物半導体のヘテロエピタキシー技術による機能複合化が将来期待できる (6)Si 電子回路と光回路との結合も可能である⁹⁾。

この他にも Si 基板に SiO₂ バッファ層を介してガラス導波路を形成することも色々研究されている。リフトオフ法により、幅 5 μm の 7059 ガラスのチャンネル型光導波路なども作られている。このような SiO₂/Si 基板上のガラス系導波路の場合、レーザーアニーリングにより光伝搬損失を極めて小さくできることが知られており、プレーナ型導波路であるが、例えば 7059 ガラスで 0.01 dB/cm, Si₃N₄ で 0.1 dB/cm, ZnO で 0.01 dB/cm, Ta₂O₅ で 0.4 dB/cm を得たという報告もある¹⁰⁾。光伝搬損失を減少させることは光 IC の大形化等のために極めて重要なことであり、このような面でもガラス系材料に対する期待は大きい。

As₄₀Se₆₀, As₁₀Ge_{22.5}Se_{67.5}, Ge₁₀As₄₀Se₂₅S₂₅ 等のカルコゲナイドガラスは赤外域での透明性が高く、また屈折率が 2.5 前後と高いので LiNbO₃ 等と組み合わせるのに適した光導波材料と考えられる。さらに面白いことに、バンドギャップ光すなわち、短波長の可視光あるいは紫外光を当てると屈折率が数%上昇し、ガラス転移点付

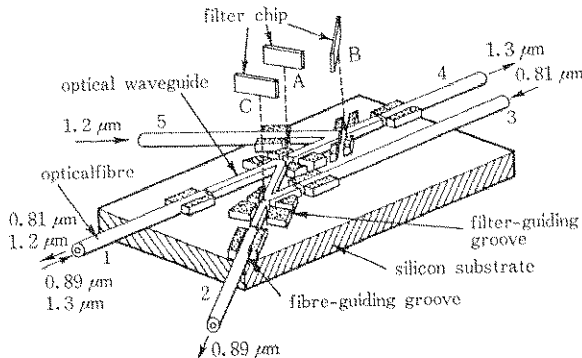


図 7 Si 基板上石英系光導波路による光合分波器モジュール⁸⁾

近の温度でアニールすると元に戻るという性質がある。これは光黒化現象とよばれているが、これを利用して近赤外光用のチャンネル形導波路やグレーティング光回路素子を短波長光照射だけにより容易に書き込むことができる。さらにフォトリソグラフィという現象があり、カルコゲナイドガラス表面に Ag 極薄膜を形成しバンドギャップ光を照射すると、照射部に Ag が急速に拡散してアルカリ難溶性に変化することが知られている。無機レジストやレリーフ型光回路素子への応用が研究されている。これらの現象は電子ビーム照射によっても同様に生じさせることができるので、極微細パターンをもつ光回路素子などが研究されている。

7. 光 IC の発展と将来

以上、光導波路や光電子デバイスを中心的な構成要素とした薄膜光導波路型の光 IC について述べてきた。一方、1978 年ごろからは、GaAs など化合物半導体材料を用いて光電子デバイスと純電子的デバイスのモノリシック集積化が試みられるようになり、その後光電子集積回路（いわゆる OEIC）という語も生まれた。

ハイブリッド方式で光 IC と電子 IC を結合する考え方は以前からあったが、新たにモノリシック方式が試行されるようになった原因の一つは、GaAs 電界効果トランジスタ (FET) や GaAs IC 関連の材料・プロセス技術の進歩である。化合物半導体の光電子デバイスと電子デバイスが結合・共通の場をもったことは、両者の進歩に相乗的加速効果をもたらす有意義な出来事であった。以来、レーザーダイオードと FET またはバイポーラトランジスタを組み合わせた光送信器、pin フォトダイオードと FET からなる光受信器、これらを組み合わせたような光中継器などが種々開発されてきた^{11,12)}。図 8 は光中継器の一例であって、半絶縁性 GaAs 基板の上にフォトダイオード、FET とレーザーダイオードが集積されており、光パワー利得と変調帯域幅の積が 178 MHz という特性が得られている¹³⁾。このようなアプローチによると寄生的な静電容量などを減少でき、さらに HEMT 等の高速電子デバイスと組み合わせる等で高速化が可能であるから、高速大容量光伝送用というのが一つの方角であろう。反対に、ビッグティル・ファイバーやコネクタ等も含

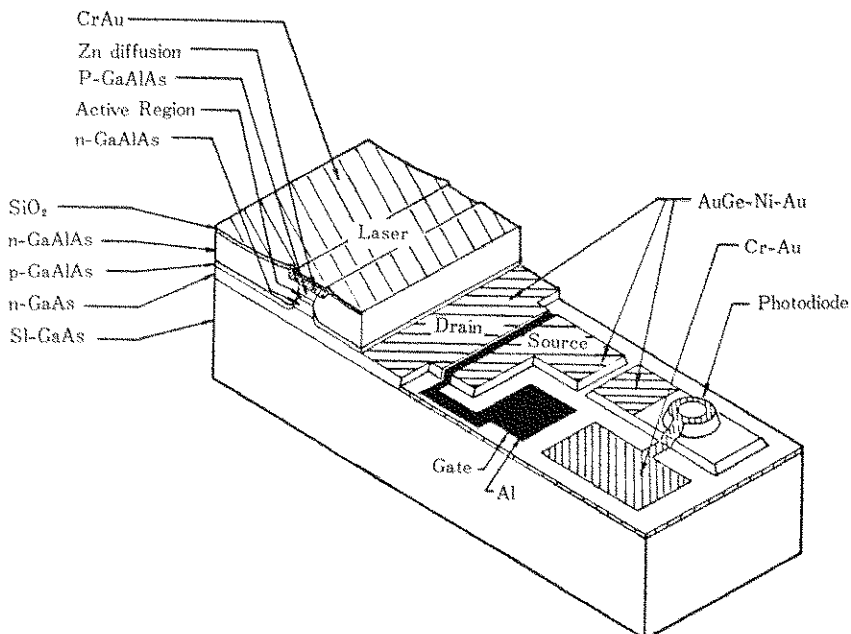


図 8 OEIC の一例 (光中継器)¹³⁾

めて小形、簡便、低価格化の方向に進歩すれば、光エレクトロニクス技術全般の普及拡大に大いに貢献すると期待される。

光集積回路技術への新たな課題として、二つの方向が近年注目されている。一つはいわゆる光計算機であり、他の一つは IC チップ内、あるいはチップ間、ボード間等の光による信号接続である。光計算機あるいは光による情報処理についてはレーザ出現以来 20 年以上の研究の歴史があるわけであるが、近年、光双安定デバイス、特に半導体の光学定数の非線型性を利用した室温動作可能で比較的小形、高速のデバイスが出現したこと等により、研究への関心が高まりつつある。十分高速かつ小形、低電力のデバイスが生まれるかどうかは鍵であるが、いずれにせよ光による並列処理の利点を活用したものが重要であると考えられている。従来の薄膜光導波回路系でも二次元空間情報は並列処理できるが、二次元空間情報を並列処理するには、いわゆる積層光回路系が必要である。これは、二次元アレイ状あるいは平板状の光学素子や光電デバイスを三次元的に積層することにより光回路を二次元アレイ状にするものである。各光回路は、光導波路型とすることもできないが、むしろ二次元アレイ分布屈折率平板マイクロレンズなどを用いて非導波路型で構成する方が簡単であろう。このような二次元アレイ的構造の光集積デバイスは他の手近な用途もあり、真剣に検討すべきと思われる。さしあたり、面発光レーザや光双安定デバイスの二次元アレイ化、空間変調デバイスの改良などが望まれる。

次に、光による接続については、電子 IC の超大規模化にともなって予見され、あるいは現実問題化しつつある種々の限界、特に電氣的配線による信号の遅延とクロストークの問題を解決するために、具体的検討が各方面で開始されている^{14,15)}。光接続の利点として、(1)容量性負荷をまぬがれることによる高速性、(2)相互非干渉性、(3)平面内に束縛されない空間的自由度、(4)可変光接続器の導入による再プログラミング(接続の変更)の可能性、(5)電子的

論理デバイスへの光信号の直接注入の可能性、があげられている¹⁵⁾。光接続のうち比較的単純と思えるものは、クロック信号を光により各電子素子へ分配することであるが、光導波路による分配、空間伝搬による分配(平行投射型あるいはホログラムによる集光型)などの方式が考えられている。より複雑な素子間データ接続についても、光導波路による接続、各種の空間伝搬接続(信号源は発光素子あるいは光変調器、反射接続器はホログラムあるいはプログラマブル光マスク等々)などの方式が提案されている。これらを実現するには解決すべき幾多の困難があるが、電子と光子に各々得意な仕事を割り当てるのが良いという思想にもとづいて電子 IC、光 IC、OEIC の将来を考えるとすれば、光接続ということはやはり重要な視点の一つであろう。

このように考えてくると、光計算機であれ、光接続であれ、光 IC の夢の一つとしては、三次元光 IC というものが考えられる。すなわち、積層光回路系では層と層の間で各素子同士は 1 対 1 に対応連結されているが、これをさらに発展させ、層と層の間で各素子間に複雑あるいは自由に可変な経路で対応関係をもたせたような真の意味の三次元光 IC というものが一つの究極的な姿として想像される。

ともあれ、以上のように、過去 15 年の間に光 IC の概念は次第に多様化し拡大してきた。さらに、いわゆる光計算機や光接続といった将来の課題まで含めて考えると、光 IC の将来像は相当複雑なものになるであろう。光 IC をいったいどのように定義したらよいであろうか。そこで試みに、信号の形態が入口、内部、出口の 3 個所で光(O)であるか、電気(E)であるかに着目して集積化機能デバイスを分類し、該当例を挙げてみると、表 2 の 8 種類に分類できよう¹⁶⁾。このうち、光が関係するのは 1~7 であるが、薄膜光導波回路系と OEIC 等を合わせて考えれば、1~7 のすべてに実例が存在する。OEIC で電子デバイスをも含めることになり、かつ OEIC と積層光回路系で光導波技術に無関係なものも含めて定義したわけであるから、

表 2 集積化機能デバイスの分類¹⁶⁾

番号	信号形態 (入口—内部—出口)	該 当 例
1	〇—〇—〇	光マトリクススイッチ, 光合波/分波器, 光双安定デバイス I
2	〇—E—〇	光中継器, 光双安定デバイス II
3	〇—〇—E	光ヘテロダイン検波器 光導波路型センサ I (回転, 歪, 温度等)
4	〇—E—E	光受信器, イメージセンサ
5	E—〇—〇	光導波路型センサ II (電界等), 光送信器 I
6	E—E—〇	光送信器 II, パネルディスプレイ装置, 空間変調器
7	E—〇—E	スペクトラムアナライザ, AD 変換器, 相関演算器
8	E—E—E	フォトカプラ, 光インターコネクタ 電子 IC

さらに CCD イメージセンサや液晶ディスプレイ等を光 IC から除外する論理的根拠は見あたらない。上記 1~7 の該当例すべてを含むように、光 IC とは、「光電子デバイスあるいは光素子を包含した集積デバイス」であると、広義に定義してはどうかと考えられる。

実際問題としては、光 IC には解決を要する種々の問題点があり、材料技術、プロセス技術を中心に今後一層の努力が必要である。しかしながら、少なくとも光エレクトロニクスの分野においても、ハードウェアは現在のような個別のデバイス、素子を組み立てて装置やシステムを構成している状況から次第に脱却し、着実に集積化の方向に向かうものと考えられる。光エレクトロニクス以外への進出も含め、以上に述べたような光 IC の将来の多くの分野において、ニューガラスの果たす役割りが大いに期待されるところである。

(参 考 文 献)

- 1) 多田邦雄: 応用物理学会応用電子物性分科会第 377 回研究会資料, (1979.1).
- 2) 末田 正; “光エレクトロニクスの基礎”, p. 110, 昭見堂, (1985).
- 3) 西原 浩・春名正光・橋原敏明; “光集積回路” p. 68, オーム社, (1985).
- 4) 多田邦雄; 日本真空協会研究会資料 (1979.6).
- 5) 岩崎 裕 (監修); “オプトエレクトロニクス材料”, 第 5 章, 電子通信学会 (1983).

- 6) 末松安晴 (編著); “半導体レーザと光集積回路”, オーム社 (1984).
- 7) K. Tada, et al; Extended Abstracts of 17th Conf. on Solid State Devices and Materials, B-1-7 (1985.8).
- 8) M. Kawachi, et al; Electron. Lett., Vol. 21, p. 314 (1985.4.11).
- 9) 小林盛男; 昭 60 電子通信学会総合全国大会, 1004(1985.3).
- 10) J. T. Boyd, et al; Proc. SPIE, Vol. 517, p. 100 (1984).
- 11) 矢嶋弘義; 島田潤一: 信学誌, Vol. 67, p. 857 (1984.8).
- 12) 末宗幾夫; 電学誌, Vol. 105, p. 313 (1985.4).
- 13) N. Bar-Chaim, et al; Appl. Phys. Lett., Vol. 44, p. 941 (1984.5).
- 14) 日本電子工業振興協会報告書 59-M-214, “光情報処理用材料調査報告書”, (1984.3).
- 15) J. W. Goodman, et al; Proc. IEEE, Vol. 72, p. 850 (1984.7).
- 16) 多田邦雄; 応用物理学会応用電子物性分科会第 407 回研究会資料, (1985.1).

(筆 者 紹 介)



多田邦雄 (ただくにお)

昭和 35 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業, 40 年 3 月同大学院 (電子工学) 修了, 工学博士, 同年 4 月東京大学講師, 41 年 4 月同助教授, 56 年 6 月同教授 (工学部電子工学科), 現在に至る。専門は電子物性・光物性工学で、バイポーラトランジスタおよび IC, 電気光学結晶, 光変調器, 半導体レーザ, 光 IC 等の研究に従事してきた。