

解説

2. 光の基本素子



2.2 光電子集積回路 (OEIC)†

林 殿 雄††

1. はじめに

OEIC は半導体の光素子を含む集積回路で、光通信だけでなく光を利用した情報処理技術にとって、きわめて大切な要素回路である。

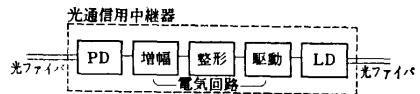
半導体レーザとこれを駆動するトランジスタを1つの基板結晶の上に作れば、ワンチップの光発振器ができる。同じように1つの光通信用中継器をそっくり集積することが考えられる(図-1)。このように半導体の光素子と電子素子を1つの基板の上に集積したものを“光電子集積回路”, “Opto-Electronic Integrated Circuit”, 略して OEIC と言う^{1),2),3)}。現在光通信に用いられている送信器, 受信器, 中継器などはすべて OEIC にすることができる。1チップにすれば, 配線も短くなり高周波特性が向上するだけでなく将来量産技術が確立すれば, 信頼性が高まり安くできることが期待される。実際発光特性のよい GaAs のような化合物半導体を基板に用いれば, レーザや FET (Field Effect Transistor) などを組み合わせた OEIC ができる(図-2)⁴⁾。

OEIC は本特集号の 2.1 で説明のあった光集積回路いわゆる光 IC とは異なった概念のものである。光 IC は光導波路や光偏向器などを組み合わせたもので“光だけを用いて”何かの機能を持たせることを考えるのに対して, OEIC は“光と電子”両方を積極的に利用しようと言うものである。すなわち光と電子それぞれの特徴を生かして, 必要に応じてそれらを自由に使いこなすことにより, 光または電子単独では得られない高い機能を持たせようという考えである。

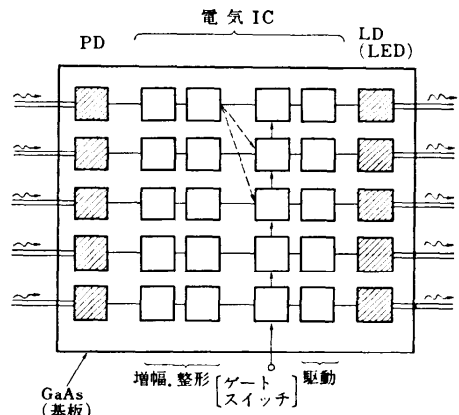
OEIC は光通信用のみならず, 各種の光応用装置たとえばコンパクトディスク, レーザプリンタその他のものに利用できる。そればかりでなく OEIC のもつ

特徴をいろいろと考えてゆくと OEIC の最も重要な応用は実は電子計算機などの“電子装置”であろうということに気がつく。あとで説明するように LSI を利用した現在の電子計算機の高集積化が進行すると次第に配線による時間遅れが増大し, 遂にはいくら素子の高速化をはかっても無意味な状態となる (Communication Crisis)^{5),6)}。この難関を突破する1つの方法は, 電気信号の接続に光を用いる方法, すなわち“光接続” (Optical Interconnection) である。将来の OEIC の槍舞台はここにある。

現在 OEIC はまだ幼児期にある。図-2 に示すような数個の素子の集積がはじまったところである。光通信が実用期に入り高性能の光素子が作られているとは言っても, これら素子の製作技術は単体素子の段階にあって, 高集積の OEIC を作れるような“集積素子



(a) 光通信用中継器, 前後に光素子, 中間に複数のトランジスタがある

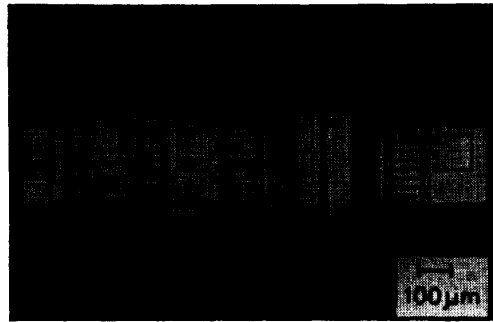
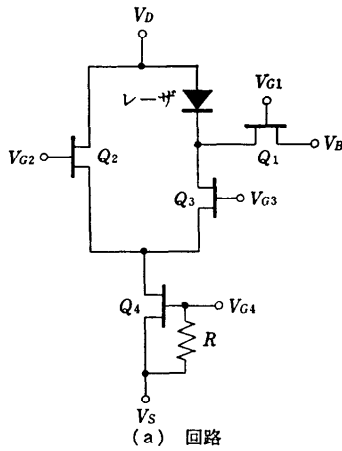


(b) 5チャンネルの中継器を1つの基板上に集積した OEIC

図-1 OEIC 中継器

† Opto-Electronic Integrated Circuit by Izuo HAYASHI (The Optoelectronics Joint Research Laboratory).

†† 光技術共同研究所



(b) 表面写真

図-2 OEIC 発光素子

AlGaAs/GaAs レーザが駆動用の GaAs MESFET とともに半絶縁性 GaAs 基板上に集積されている。

(a) は回路図

(b) は上面から見た写真、劈開共振器を用いている。

技術”の段階には程遠い。シリコン素子は単体トランジスタから出発して今日の LSI に到達するのに 20 年あまりもかかっている。今日の化合物半導体の材料技術はシリコンの単体素子技術の段階にあって、集積化を達成するためにはあとにのべるような幾多の技術的課題が残されている。通産省工業技術院の“光技術大型プロジェクト”で行われている光技術共同研究所では OEIC のための GaAs 材料技術の研究開発が始まっている。

本文では OEIC の原理と現状その特徴と問題点、OEIC の将来について簡単に記述を試みる。

2. OEIC と光接続

2.1 OEIC の特徴

半導体の (p-n) 接合を順方向にバイアスすれば、図-3 に示すように、バンドギャップをはさんで電子と正孔が出会い再結合がおこる。GaAs のような化合物半導体を用いると、再結合のエネルギーが効率よく光となって放射される。この原理は半導体レーザーや発光ダイオードに利用され 100% に近い効率で電気エネルギーが光に変換される。光通信ではこの方法で発光の直接変調を行って、GHz にも及ぶ高速の光信号を作っている。受光素子では逆のプロセスを利用して、高

速の (光→電子) の変換を行っている。このように半導体を用いれば (電子→光) の変換を高い効率でしかも高速で行うことができる。このような半導体による発光受光プロセスはマイクロン程度の短距離でおこる。したがってこれらの素子は LSI 上のトランジスタと同程度の微小な寸法に作る事ができるという特徴がある。OEIC ではこのような半導体光素子を用いて (光→電子) 変換を行い信号は隣接する電子素子と接続され

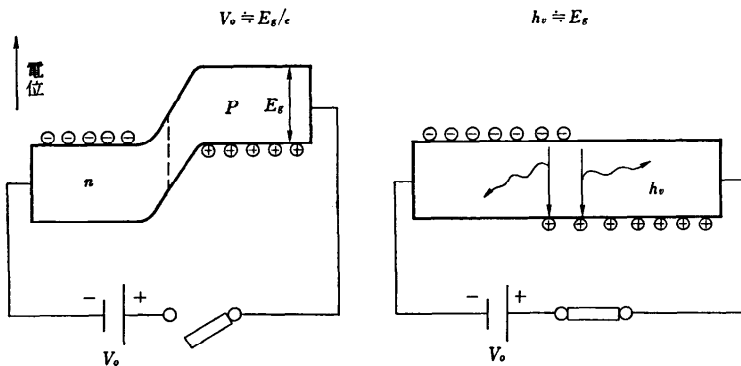


図-3 半導体発光素子の原理

半導体 (p-n) 接合による再結合発光を利用して、レーザーや発光ダイオードがつけられる。(p-n) 接合の電流を on, off するだけで発光が高速変調できる。数ボルトの低電圧で駆動でき、内部効率は 100% に近い。

る。これらの光素子は電子素子と同種の半導体で作られその特性は接続する電子素子とよく整合する。すなわち両者とも低い電圧 (Volt 程度) 小さい電流 (mA 以下) で動作させることができる。現在作られている半導体レーザなどは、数十 mA 以上の電流を必要とし、その大きさも数百ミクロンと大型である。光通信などの目的にはこれで十分であるが OEIC 用には大きすぎる。あとで説明するように新しい材料技術を用いれば、もっと小型のレーザを作ることができる。10 ミクロン程度の大きさで 1 mA 位の電流で動作するレーザを設計することも十分可能である。このような小型の光素子と電子素子を集積し、必要に応じていつでも (光-電子) の変換を気楽に行えるようにするのが OEIC 技術の考え方である。すなわち論理演算などは電子素子で行い、信号を伝達するときは光素子で光に変換して送るという考え方である。ここで光接続の特徴について説明しよう。

2.2 光接続の特徴

光通信ではよく知られるように、光による信号伝達は多くの特徴をもっている。低損失、高速広帯域、無誘導などである。一方、電気配線中の電流を用いる信号伝達は、配線の抵抗、容量インダクタンスなどによる減衰が大きい。通信用ケーブルは光ファイバとくらべるとはるかに大きい減衰を示す。電子計算機の中などで LSI チップ間の接続をする場合を考えると配線の長さが 10 cm でも約 10 pF の浮遊容量をもつ。もしこれを 1 kΩ の内部抵抗をもつ FET (負荷 1 kΩ) で駆動すれば、 $10 \text{ PF} \times 1 \text{ k}\Omega = 10 \text{ ns}$ の立上り時間が必要となる。これは信号電圧が次の LSI に到達する

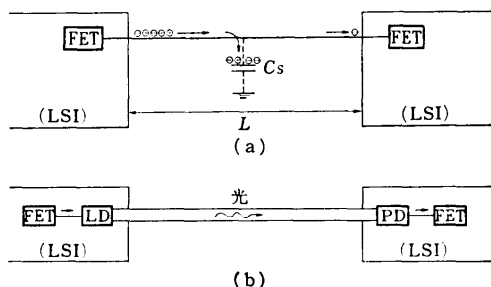


図-4 電気接続と光接続

- (a) 電気配線の浮遊容量を充電する時間だけ信号の伝達に遅れが生ずる。L=10 cm の配線 ($C_s \approx 10 \text{ pF}$) を 1 mA のトランジスタで駆動 (回路抵抗 1 kΩ) すれば 10 ns の立上り時間がかかる。
- (b) 光接続の場合は発光素子の特性による遅れのほか (回路抵抗) には信号伝達の遅れはほとんどない。全体で 1 ns より小さくできる。(10 cm)

までに配線全体の容量を充電しなければならないからである (図-4)。現在の LSI 上の早いトランジスタでは数百 ps の早い信号を扱える能力があるが、もし配線によってこのような信号のおくれが生ずればせっかくの高速性が死んでしまう。光接続の場合には光素子自身による以外は信号のなまりはほとんどない。電氣的に早い接続を行うには同軸ケーブルのような伝送線路 (Transmission Line) を用いなければならない。しかしこれらの伝送線路は本質的に低いインピーダンス ($\sim 100 \Omega$) であり、これを駆動するには出力の大きい (数十 mA) トランジスタを必要とする。現在の LSI ではこのような方法が取られている。しかし将来計算機の高速度高集積化が進めば LSI 上の消費電力は極力小さくしなければならないのでこのような接続法は望ましくない。光接続の場合には特性インピーダンスの制限はなく、光素子を小型にすれば小電力で接続を行うことができる。たとえば 1 mA で動作するレーザを用いれば現在の LSI 上の FET とよく整合する。また、発光受光素子を高速の電子素子に見合うように高速化することも可能である。これについてはあとでのべる。

光接続の場合には、金属導体に代って透明物質で作った光導波路を用いる。現在のプリント配線の光版である。また光の場合には全く別の方法として光の空中伝搬を利用することも可能である。J. W. Goodman はホログラムを利用した接続法を提案している⁵⁾ (図-5)。

このように光接続には電気接続には存在しない大きな自由度がある。

このほか光接続に用いれば、電気配線で問題になる誘導雑音がさけられる。また接続される 2 つの回路間に直流電位のちがいがあっても差しつかえない。こ

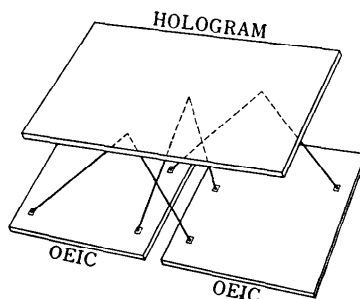


図-5 ホログラムを用いた OEIC の光接続

J. W. Goodman は 2 つの OEIC 上の複数の点の間の光接続を 1 つのホログラム板で接続することを提案した。

の特徴のために回路の接続が著しく容易となる。現在すでに多数の“光カップラ”が電子装置に用いられているのはこのためである。その他配線間クロストークの減少、光の波長をかえた接続の多重化なども可能となる。

3. OEIC 技術の現状と課題

3.1 小集積の OEIC

OEIC は 1979 年 A. Yariv などによって最初に作られた⁹⁾。これは 1 個のレーザとこれを駆動するガン発振器を同一の半絶縁性 GaAs 基板上にとりつけたものである。その後レーザと FET、受光ダイオードと増幅用 FET など数個の素子の集積が試みられてきた。最近になって光技術大型プロジェクトその他の研究で光通信用の送受信機を目標にした小集積の OEIC の試作がはじまった⁹⁾。図-2 に示したものは AlGaAs/GaAs の量子井戸型レーザと GaAs の MESFET 4 個を持った OEIC である。これは発振波長 0.8 ミクロンで LAN などの近距離光通信を念頭に置いている。このほかに 1.3 ミクロン用の InGaAsP/InP 系のレーザとトランジスタを集積した OEIC などの試みがはじまっている⁹⁾。このような集積化によって、レーザとこれを駆動するトランジスタ、受光素子と増幅用トランジスタの間の配線が短くなり、高周波特性の改善が期待される。今後数 GHz 以上の超高速光通信の場合には OEIC がなくてはならないものになるであろう。

現在これらの OEIC は今まで単体の光素子や電子素子を製作していたのとほぼ同じ方法を用いて作られている。そのために製作上の難しさがあることがわかってきた。たとえば、レーザはエピタキシャル層を必要とするが、FET は基板にイオン注入をするだけというように両者のプロセスは全く異っているために、それぞれの工程が互いに干渉し合って製作をむずかしくしている⁹⁾。この対策については次節で述べる。

光技術大型プロジェクトでは、今までの OEIC の概念を拡張して、LAN (Local Area Network) などの光ネットワークの“節目”にもっと集積度の高い OEIC を置きネットワークの接続を切り替える役目などをさせることを考えた。1 チップの交換器である。OEIC の集積度を大きくすればさらにいろいろの高い機能を持たせることができる。光技術共同研究所ではプロジェクトの一環として将来高集積の OEIC を可能にするための新しい材料技術の開発に取り組んで

いる。

3.2 高集積の OEIC と材料技術

OEIC の概念は明確でありその有効性については疑う余地はない。情報処理用として OEIC は現在の IC の延長線上にあり、これを高機能化したものと考えられる。すなわち、現在の電子的 IC の信号伝達の障壁 (Communication Crisis) を打破する可能性をもつものである。しかしその実現には、現在の光素子技術をはるかに超えた高度な半導体材料技術が必要である。先にものべたように現在の光素子技術はいまだ個別素子技術であって集積化には適さない。一例をあげれば現在の半導体レーザでは、劈開によって光共振器を形成しているので集積化することができない。またそのために光共振器の長さも大きく (数百ミクロン) その発振には大きな電流 (数十 mA 以上) が必要である。

エッチングにより短い (数十ミクロンまたはそれ以下) 光共振器を作り、端面の反射率を高くすれば、現在より一桁以上低い電流で発振させることは十分可能である。最近ドライエッチング技術を用いて、劈開なみの光共振器が作られるようになった^{10), 11)}。さらに多数のレーザを集積するためには、現在よりも簡単で作りやすい構造にしなければならない。またいかにして高い歩留りにするかは大きな課題である。現在のレーザは所望の規格を満しかつ劣化しない素子の選別を行っている。歩留りは高くても数十パーセント程度である。多数のレーザを集積するには、1 個 1 個のレーザの歩留りはほとんど 100% であることが必要である。このためには劣化防止を含めて、現在のレーザプロセスの抜本的な見直しが必要である。

このほか光技術共同研究所では高集積の OEIC を実現するために、IC 用基板結晶の高品質化、エピタキシャル技術の高度化、イオン注入技術の研究などが行われている^{11), 12)}。これらの課題を 1 つ 1 つ解決してゆけば、現在の LSI に用いられている電子素子と見合う小型小電力の光素子を量産的手法で作ることも可能になる。

光素子の小型化は高速化を助ける。現在の大型 (数 100 ミクロン) レーザでも電極容量を減らせば ~10 GHz に近い応答速度にすることができる¹³⁾。10 ミクロン程度の小型レーザであれば、この数倍以上の高速も十分可能であろう。発光ダイオードでも、縦方向に電界をかけることによって注入キャリアの寿命時間 (ns) と無関係に早い変調をさせることも研究されている¹⁴⁾。一般に受光素子は発光素子より早い応答時間を

もっている。光素子の高速化については2.5章にまとめて記述されている。このように光素子は電子素子と十分見合う高速性をもっている。

近年 GaAs を基板にした FET の IC 試作が始っており、数万素子の LSI が試みられている¹⁵⁾。GaAs の FET 素子は単体としては実用化されているが、集積回路のための技術は未完成である。今後高集積 IC 実用化のためにはまだ多くの研究が必要である。GaAsIC はシリコンの IC より数倍高速となる可能性を持っており、マイクロ波用及び高速計算機用として注目されている。このような LSI に光素子を集積すれば、GaAs 基板の高集積 OEIC ができる。

一方 AlGaAs/GaAs のヘテロ構造を利用した高速 FET, “HEMT” の集積化も試みられている。この IC も GaAs を基板としているので高速 OEIC の候補である。

多数のレーザとその駆動回路を集積した OEIC (Array) 多数の受光素子と附属回路を集積した OEIC も必要となる。

将来はシリコンの LSI を OEIC 化することも当然要求される。シリコンのバンド構造は本質的に発光に不向きである。それゆえ OEIC を作る際には発光素子の必要な所に Si 基板の上に GaAs をエピ成長させることが必要となる。最近になって、この一見きわめて困難そうな問題が意外な進展をみせている¹⁶⁾。FET に十分な品質の GaAs エピ結晶はすでに得られており、発光素子にも使えるようになるのもそう遠いことではあるまい。一方 Si は受光素子に以前から用いられており、GaAs の発光スペクトルとよいマッチングを示す。

これら材料技術の課題が達成されれば本格的 OEIC 実現は夢でなくなる。図-1(b)に示すような第1世代 OEIC は基本的には従来構造の素子を用いて実現できる。

4. 光接続の課題

OEIC と OEIC をむすぶ光信号の伝達方法も大きな研究課題である。伝達距離が大きい場合は光ファイバを用いるが、小さい場合はどうするのか。現在の LSI チップの接続にプリント配線基板上の金属配線が用いられているのと同様に、OEIC チップの連結には光配線基板を用いる方法が考えられる。光ファイバや薄膜光導波路と同様に、屈折率の分布や幾何学的形状の分布によって、多数の光配線をプラスチックなど

の基板上に作りつけることができよう。光配線基板と OEIC チップとのつなぎの方法や配線の曲がり、交差の問題などいろいろの課題がある。

図-5 のように光の空中伝搬を利用する接続方式も考えられる。J. W. Goodman は多重ホログラムを用いて複数の光接続を1つのホログラム板で行えることを実験的にたしかめた¹⁷⁾。この方法は1つのホログラムで任意の点の間の損失の少ない接続をすることができきわめて魅力的な方法である。Goodman はこれを用いて計算機の同期信号を送ることを提案している⁹⁾。すなわち1つの光源から、分散する多数の受光器に同期信号を送ることにより正確に同期がとれる。現在の計算機では配線による時間遅れのために同期信号の位相ずれが起り問題になっている。

このように空間伝搬による光接続は、光の直進性、直交性を活用して、配線なしに多数の信号接続を並列に行うことができるといふ大きな特徴がある。

光接続の場合には電気的接続の場合のように Fan out (接続分岐) の増加により出力側の負荷が増大し時間遅れが生ずることがない。

一般に光接続では、発光素子受光素子の効率、接続光学系の結合効率を考えなければならない。半導体レーザの量子効率は数十%、受光素子は100%に近くにすることができる。接続光学系の効率は条件によって大きく異なる。1対1の接続を考えた場合、光導波路またはホログラム、レンズなどの光学系を用いて数十%以上の接続効率にすることができる。またこの値は発光受光素子と光学系の組み合わせによっても左右される。レーザは出射光のひろがり小さいので結合効率は高いが、発光ダイオードではずっと小さくなる。これらの議論は光通信などの場合と同じであるが距離の短い光接続の場合は、モードや波長の分散による時間ずれをあまり考えないでもよい。したがって受光角の大きい多モードの光導波路を用いるなど、もっぱら結合効率を大きくすることを考えることができる。

総合的効率は発光受光吸結合系の効率の掛け算になる。たとえばレーザを用いた1対1の光結合であれば、全体で数十%の効率にすることができる。光源が発光ダイオードであれば効率は1桁以上小さくなる。また Fan out が多い結合では、当然 Fan out 数だけそれぞれの結合効率が小さくなる。受光素子の出力が次段のトランジスタを駆動するのに不十分になれば、電気的に増幅しなければならない。

一方電気的接続の場合には、前段からの電荷は大部

分途中の配線を充電するのに消費され、かんじんの次段のトランジスタの電極に到達するのは少量となる。また Fan out が多い場合にはそれだけ余分の電荷が必要となり信号の立ち上がりがおそくなる。

このように高性能の光接続をつくり上げるには、発光受光素子の特性、結合光学系の設計に十分な研究が必要である。OEIC のためのこのような研究はまだまだほとんどなされていない。

5. まとめと将来展望

OEIC は光通信の中継器のように互いに接続している光素子と電子素子をモノリシックに集積しようという発想から出発した。最近その線に沿って図-2 のような簡単な OEIC の試作がはじまっている^{3), 4), 9)}。

OEIC を高集積化すればいろいろの機能を持たせることができる。通信用光ネットワークの節目に置いて光交換器の役目をさせることも考えられる。

OEIC の概念をさらに短距離の信号接続に拡張すると、きわめて重要な結果に到達する。OEIC は将来の電子計算機の重要素子になるという予想である^{5), 18), 19)}。

2章で説明したように電算機のような電子装置内部の信号を光で接続するといろいろの利点がある。とくに高速の信号処理を行う場合電気配線のもつ信号の遅れは、光接続によって救われる。将来の超高集積高速の計算機を考えるとこの種の信号遅れがシステムの速度の上限をきめる要因になる^{5), 19)}。この壁を打ち破るものとして光接続の電子計算機の考えが生れてくる。光接続の利点は高速性だけでなく、低雑音や接続の自由度、配線の簡略化などいろいろ考えられる。したがって将来 OEIC が大量に安く作れるようになると、高速計算機だけでなく各種の電子装置の中に広く用いられるようになるだろう。将来の OEIC の最大の用途はここにある。

今までは図-1(b)のような、入出力に光素子を配した OEIC を考えたが、電気配線による遅れは、LSI のチップ間配線に止らずチップ内にも当然あらわれてくる。チップの高集積化がすすめば、個々のトランジスタのパワーは小さくなり、配線による遅れの割合は増大する。ついに集積回路の速度はほとんど配線遅れによって決まるようになり、それ以上のトランジスタの高速化は全く意味をなさない状態になる^{5), 19)}。

最近試作が進んでいる GaAs の FET の LSI では、すでにチップ内の配線容量と Fan out により、

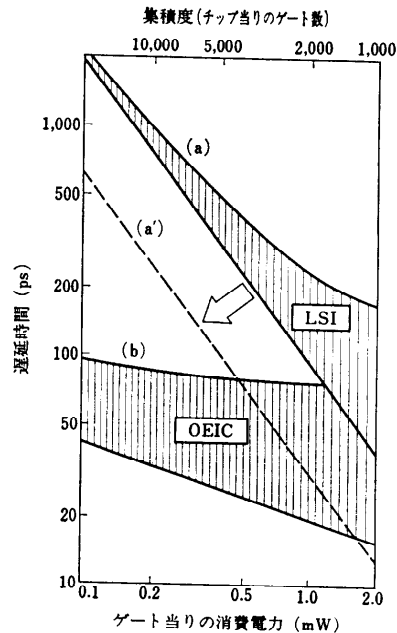


図-6 LSI (電気接続) と OEIC (チップ内光接続) の比較

LSI では一定電力で集積度が大きくなるとトランジスタの電流が小さくなり配線の充電時間で遅れが著しく増大しこれで全体の早さが決るようになる。OEIC では配線を光速でつたわる時間だけで遅れが決るので LSI にくらべてはるかに早くなる。

チップの消費電力を一定 (2W)、電源電圧 1.5V、2層配線、配線の幅 6.6 μm トランジスタの遅れは零として配線による遅れだけを計算した²⁰⁾。

LSI の場合 (a) の下側の線はトランジスタの大きさ零 (配線リミット)、上側の線はトランジスタの大きさを計算に入れた (ゲート長 1 μm ゲート幅は 36 $\mu\text{m}/\text{mm}$)。配線の幅を 3.0 μm にせまくした場合が (a') OEIC の場合 (b) 下側の線は光素子の遅れを零とした場合、上側の線は光結合系 (駆動回路を含めた発光受光対) の遅れを 50 ps と仮定しかつ光素子がトランジスタと同じ大きさを持つと仮定した。

FET 単独の場合に比較して数分の一の速度になっている²⁰⁾。

図-6 は GaAs ゲートアレイチップの消費電力を一定として集積度を大きくした場合にゲートあたりの遅延がどの位になるかの計算例である²⁰⁾。カーブ (a) はトランジスタのみのチップの場合で、集積数とともに著しい遅れの増大が配線によって生じていることが見られる。したがってこの場合トランジスタの高速化は全く意味をなさない。これに対して信号接続に光を用いた場合は (b) のようになり遅れの増大が大幅に抑えられる。(b) の上側の線は光素子による遅れを 50 ps と仮定した場合で、これが小さくなると (b) の下側の

線に近づく。

このようなチップ内光接続をもつ OEIC を第2世代の OEIC と呼ぶことにする。第2世代の OEIC では多数のトランジスタ間の接続に光素子の仲介を必要とするために、素子数が著しく増大する場合が出てくる。このような場合にはフォトリソグラフィのように1個の素子で光の入出力とトランジスタ作用とを合わせ持つ素子ができれば理想的である。一方超高集積 IC として素子の歩留り向上の必要性を考えると、現在の FET 以上に製作上のマージンの大きい作りやすい素子でなければならない。素子構造としても新しい発想が必要であるし、材料プロセス技術としても高度のものが要求されよう。

Neumann 型の計算機の限界をこえるものとして各種の並列方式の計算機が提案されている。これらの並列演算計算機に光の利用が期待されていることは本誌の中でも論じられている。2次元の並列演算方式に光の利点が生かされるであろうことは想像にかたくない。そのために具体的にどのようなハードウェアが必要になるのかよくわからないが、OEIC の場合のように、電子と光の特徴を生かしこれらを融合した半導体集積回路が中心となることが想像される。

現在の発達した SiLSI を見ると、さらに多数の素子を要求する将来の計算機の要求にこたえられるものは、半導体の量産技術で作られるものが本命と考えられる。

並列した多数のプロセスライン間の相互通信には、光による空間接続が最も適しているのではなからうか。このようなしくみは OEIC と類似の技術でつくることができよう。

また画像処理に必要な空間変調器などにも OEIC 技術が用いられるのではないだろうか。2次元の面上に多数の光素子、電子素子それに必要ならば電気光学素子を集積することができれば役に立つだろう。

これらのことを実現するためには、化合物半導体技術を大幅に向上させて、現在のシリコンと同程度の高集積 IC が作れるようになることがまず必要である。またシリコンと化合物半導体素子を任意に混合できる材料技術が必要であろう。

天性ひ弱な化合物半導体をマスターすることは容易ではないが、一つ一つ着実に問題を解決してゆけば必ず達成できる。その第1歩はすでに始まっている。今世紀中には市場における大きな進展が期待されるであろう。

参考文献

- 1) Hayashi, I.: Development of Optoelectronic ICs in Japan, JST News, Vol. 3, No. 1, pp. 33-38 (1984).
- 2) 矢嶋弘義, 島田潤一: 光電気集積回路の現状と将来, 電子通信学会誌, Vol. 67, No. 8, pp. 857-860 (1984).
- 3) 橋本寿夫: 実用化に向けてはばたく OEIC, エレクトロニクス, 昭和60年3月号, pp. 73-80 (1985).
- 4) Wada, O., Sanada, T., Yamakoshi, S., Hamaguchi, H., Fujii, T., Horimatsu, T. and Sakurai, T.: Monolithic Integration of a Quantum-Well Laser and a Driver Circuit on a GaAs Substrate, Intern. Electron Devices Meeting, San Francisco, Technical Digest, pp. 520-523 (1984).
- 5) Goodman, J. W., Leonberger, F. I., Kung, S. Y. and Athale, R. A.: Optical Interconnection for VLSI Systems, Proceedings of the IEEE, Vol. 72, No. 7, pp. 850-866 (1984).
- 6) 伊藤日出男, 石原 聡: マイクロエレクトロニクスにおける光配線, 光学, 第14巻, 第1号, pp. 51-53 (1985).
- 7) 林 巖雄, 福田承生: 半導体材料技術の最先端に挑戦する光技術共同研究所の GaAs 結晶技術の開発, 工業レアメタル, No. 80, pp. 10-14 (Mar. 1983).
- 8) Lee, C. P., Margalit, S., Ury, I. and Yariv, A.: Integration of an Injection Laser with a Gunn Oscillator on a Semi-insulating GaAs Substrate, Appl. Phys. Lett. Vol. 32, No. 12, pp. 806-807 (1978).
- 9) 柴田 涼: InP 系光電子集積回路 (OEIC), 応用電子物性分科会研究報告, No. 407, 昭和59年1月16日, (応用物理学会) pp. 22-27 (1984).
- 10) 内田 護, 松本尚平, 浅川 潔, 川野英夫, 古瀬孝雄: RIBE を用いた etched mirror を有する BCM レーザ, 第32回応用物理学関係連合講演会予稿, 1P-ZB-8, p. 152 (1985).
- 11) 田村英男, 古川千里, 栗原春樹: BCl₂/Cl₂RIE (III)~ドライエッチング端面をもつ AlGaAs/GaAs レーザ, 第32回応用物理学関係連合講演会予稿, 1P-ZB-7, p. 152 (1985).
- 12) 光応用計測制御システムの研究開発成果発表会論文集, 光応用システム技術研究組合 (港区西新橋 2-7-4), pp. 1-52 (1984).
- 13) Lau, K. Y., Bar-Chaim, N., Ury, I. and Yariv, A.: 11 GHz Direct Modulation Bandwidth GaAlAs Window Laser on Semi-insulating Substrate Operating at Room-temperature, Appl. Phys. Lett., Vol. 45, No. 4, pp. 316-318 (1984).

- 14) 宇佐見雄一, 永井秀男, 山西正道, 末宗幾夫 : GaAs/AlGaAs 単一量子井戸からのフォトルミネッセンスの電界印加効果, 第32回応用物理学関係連合講演会予稿, 29a-V-10, p.568 (1985).
- 15) 津田建二 : 実用期に突入する GaAs LSI の技術, NIKKEI MICRODEVICES, 1985年春号, 特別編集版, pp.25-34 (1985).
- 16) Akiyama, M., Kawarada, Y., and Kaminishi, K., : Growth of Single Domain GaAs Layer on (100)-Oriented Si Substrate by MOCVD, Jpn. J. of Appl. Phys. Part 2, Vol. 23, No. 11 pp. 843-845 (1984).
- 17) Kostuk, R. K., Goodman, J. W. and Hesselink, L. : Imaging Interconnects for Microelectronic Circuits (私信).
- 18) 島田潤一, 矢嶋弘義 : 新しい OEIC のイメージを探る (光情報処理用材料調査報告), 電子工業月報, 第25巻, 第4号, pp.41-45 (1983).
- 19) 光情報処理用材料調査報告書 (汎用計算機用 OEIC 他), 日本電子工業振興協会, 59-M-214 (1984).
- 20) 二井理郎 : LSI 技術の問題点と高集積 OEIC の可能性について, 19) の報告書の中で, pp.5-10 (1984).

(昭和60年5月16日受付)