

解説

2. 光の基本素子



2.5 光情報処理用能動デバイスの性能極限†

神谷 武志††

1. はじめに

光エレクトロニクスの発展史をひもとくと1960年のレーザ出現以来、情報処理への適用の試みがいろいろな形で進められてきた。最も代表的なものにスペーシャルフィルタによる空間フーリエ変換原理を利用したアナログ信号変換があり、レーダや宇宙画像情報処理に役立てられてきている。デジタル信号処理についても半導体レーザのスイッチング機能を利用した論理演算の提案や基本動作の実験が1960年後半にすでに行われたり、光双安定性の理論、実験がかなり早い時期に現れている。全体的にみると残念ながらこれらの試みは継続的な発展を遂げるに至らず、その間に通信への応用が実用化への糸口を見出し、光ファイバと半導体レーザを核とする光伝送技術の体系が1970年代にまとまり、1980年代に至って全面的な開花を示すことになった。この間情報処理へむけての光技術の発展への努力は光通信実用化の大規模な展開の陰になって地道な基礎研究として続けられていた。

1980年代になってから、光による情報伝送について光による情報記録の技術が発展し、実用化をむかえ、音声情報、画像情報をはじめとするデジタル情報の記録が成功を収め、情報記憶技術体系に大きなインパクトを与えるようになった。

これにひき続いて進歩した新しい光技術を用いて情報処理なかんづくデジタル演算及びデジタル信号変換に実現のめどは見出せないか、という期待感が再び浮上してきている。光コンピュータについての話題が再び活発に論じられるようになったのも、光通信技術によって発達したハードウェア技術をもとにすれば従来不可能視されていたことも可能となるのではないかと、との憶測が根拠にあるものと思われる。

一方において新世代の情報処理ハードウェアの候補として GaAs 集積回路、ジョセフソン集積回路及び低温動作の GaAs 系 HEMT 集積回路などが登場し、これらに較べると光デバイスをもとにしたデジタル回路は消費電力・遅延時間積の点で圧倒的に不利である、との悲観論も根強く、今後光エレクトロニクスの技術が広く情報処理の分野に浸透するかどうかは予断を許さないところがある。本稿の目的はこのような背景において光デバイスの性能を現時点での実現成果とは若干離れて物理的性能限界という立場から眺めることにより、現在行われている楽観論・悲観論の討論にくらかの討論材料を提供しようとするものである¹⁾。議論の性質上、いくつかの基本的仮定に基づいて推測を重ねざるを得ず、その根拠に関する証明も今後の課題に含まれる、という不確定さを伴わざるを得ないが、意の足りぬ点は読者諸賢のご賢察に待ち、また卒直など批評をいただければ幸いである。

2. 半導体レーザの性能限界

2.1 光の信号電力の下限

光通信の領域では伝送ビットレートが年とともに伸び、400 Mbit/s から 1.6 Gbit/s にさしかかったところである。すなわち約1ナノ秒当り1ビットの伝送が行われているがこれに要する発光源の出力パワーは mW のオーダーであり、光子エネルギーを約 1 eV と丸めると1ビット当り 6×10^6 個の光子数が用いられていることになる。これは送信端における値であり、受信端では 30 dB~40 dB 減衰したものを検出しているから、光検出素子では1ビット当り $10^3 \sim 10^4$ 個の光子を受けていることになる。

デジタル信号を取り扱うデバイスではたとえば磁気パルス素子のように物理的な粒子にビット信号を荷任せ、これを空間または時間的に転送することによって信号を伝達し、処理することが良く行われる。これと同様に光子を粒としてビット信号を運ばせることが

† Performance Limitation of Active Devices for Optical Information Processing by Takeshi KAMIYA (Faculty of Engineering University of Tokyo).

†† 東京大学工学部電子工学科

できそうに思われるが、実はそのようなことは量子力学の基本的要請である不確定性原理によって不可能である。

実際レーザ光を記述するにはコヒーレント状態という表示を用いるのが適当である。これにしたがえば平均光子数 m の状態はいろいろな光子数の状態の重ね合わせで表され、光子数 n の状態の重みづけ係数がポアソン分布の $1/2$ 乗

$$\left[\frac{m^n}{n!} \right]^{1/2} \exp\left[-\frac{m}{2}\right] \quad (1)$$

であるような状態である。具体的なイメージとして平均パワーの判っているレーザビームを光検出器にあってその前にシャッタを置いてある時間幅だけシャッタを開いたとしよう。平均パワー、レーザ光子エネルギー、及びシャッタ時間間隔からこの間に光検出器にあたる光子数の期待値はただちに求められる。実際には量子ゆらぎによって上記のようにいろいろな光子数状態が混ざっているから、このときに光子数が m でなくて n になる確率は (1) 式の自乗、すなわちポアソン分布そのものとなる。これから判るようにたとえ平均光子数がかなり大きい値をとろうとも実際には光検出器に光子が 1 個も飛来しない、ということが起り得るのである。誤り率の許容値を設定することによって必要最小限の平均光子数をもとめることができる。ポアソン分布関数により光子数が 0 となる確率を 10^{-11} 以下にするための平均光子数は $m \geq 26$ 、ともとめられる。これが量子力学的限界としての最小信号電力といえるであろう。

光通信の実例でみたように実際にはこれよりも数十倍の光子数が受信 OE 回路のヘッドに達している。量子的なフォトンのゆらぎ以外の要素、すなわち前置増幅器の熱雑音が主に効いている、と考えられる。

2.2 高速性の限界

電子デバイスの性能も次々に向上し、HEMT やジョゼフソン素子では 1~10 ピコ秒のパルスを作ることにも可能と考えられている。半導体レーザのモードロッキング動作では 0.5 ピコ秒程度のパルス幅が実測されており、最高限度としては十分太刀打ちできる。ただし、これは半導体レーザ内部の非線形光学的応答によるパルス圧縮効果が用いられており、通常の能動モードロッキングや利得スイッチ動作ではパルス幅 20~30 ピコ秒となることが多い。短い電流パルスを半導体レーザに印加したときのおよその応答はちょうど半導体レーザが一種の LCR 共振器 (すなわち減衰振動回

路系) のような振舞いをする。これは半導体レーザの活性領域に蓄積されている電子の集団と光子の集団とが誘導放出という非線形過程で結びつけられていて相互に平均値のまわりを往復する傾向をもっていることを意味する。過渡状態においてもし瞬時的な電子密度が過剰であれば光子に対する大きな増幅がおこり、光子集団は平均値を超えて増殖し、一方電子密度は平均値を超えて落ち込む。このようなシーソーゲームの往復周波数は緩和振動周波数とよばれ、

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_e \tau_{ph}} \left(\frac{I}{I_{th}} - 1 \right)} \quad (2)$$

のように電子の再結合寿命 τ_e 、光子の寿命 τ_{ph} 及び閾値電流 I_{th} と動作電流 I の比、に依存している。

通常のレーザ構造では τ_e は 10^{-9} 秒、 τ_{ph} は 10^{-12} 秒の桁であるので、 I/I_{th} が 0 と 1 の間では f_r は 1 GHz を少し超える程度となる。ただし近年の半導体レーザの進歩によって発振閾値電流 I_{th} が数 mA のものが再現性良くできるようになってきたため、(2) 式の中の注入電流の比をきわめて大きくとる実験が可能となり、トップアータでは f_r は 15~20 GHz に達しようとしている。発光ダイオードの応答速度はキャリア再結合時間で決まっており、 10^{-9} 秒を大幅に下まわることには困難である。これに対して半導体レーザの時定数は上記のように光子系の関与した過渡過程によって定められるので、パルス幅で表現すると緩和振動の半周期程度となる。 $f_r = 20$ GHz とすればパルス幅は 25 ピコ秒となり、典型的なモードロック動作のパルス幅と一致する。

両者は物理的機構の違いにより同じ限界を持つわけではないが、通常達し得る過剰瞬時利得の大きさ、及び誘導放出レートが同じ大きさのオーダとなっているといえる。

緩和振動周波数の理論式を見ると電子の寿命及び光子の寿命を短くするのが有利と思われるが、両者とも際限なく縮めることはできない。電子の寿命を短くするには再結合の相手である正孔の密度を増加させる必要があるが、キャリア密度を増してゆくとオーグジュ過程と呼ばれる非発光再結合過程や、活性領域外へのキャリア漏れ過程が支配的となってレーザ発振を阻害する。

光子寿命は一つの光子が光共振器の中に閉じこめられている平均時間のことで、ミラーの反射率 R 、共振器長 L 、活性領域の吸収係数 α によって

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{c}{n_{eff}} \left\{ \alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right\} \quad (3)$$

と表される。ここで c は光速、 n_{eff} は活性領域の実効屈折率である。吸収係数 α を大きくしたり、共振器長を短くし、また反射率 R を下げることは τ_{ph} を小さくする方法である。発振閾値電流密度は τ_{ph} を短くするほど高くなるので、過度に追求すると I_{th} の増加をもたらすので望ましくない。

2.3 微小化と低電力化

半導体レーザの消費電力は現在のところ 100 mW のオーダーで光出力は 1~10 mW のものが普通である。はじめに述べたように情報処理の目的では長距離光通信の場合と異なり、光出力は犠牲にしても良いからより低電力で動作するものが得られることが望まれる。半導体レーザで用いられる光増幅媒質では伝導帯と価電子帯の間のバンド間遷移が素過程となっていることは良く知られている。熱平衡状態では光を吸収して電子がエネルギーを獲得する素過程の方が電子からエネルギーを光子に与える素過程を凌いでいるために媒質は光吸収媒質として働く。光増幅特性を示すようにするためには熱平衡にない過剰の電子正孔対をおよそ 10^{18} cm^{-3} のオーダー注入しなければならぬことが量子力学的計算に基づいて明らかにされている。これに基づいてレーザ発振に必要な最小電力に関する原理的な検討を行ってみよう。

注入電流密度を $J(\text{A/cm}^2)$ 、活性層の厚さを $d(\text{cm})$ とすると、1秒1立方 cm 当りに注入される電子の数は (J/d) で与えられる。 e は電子の電荷 (C) である。活性領域の電子寿命が発振条件直前で τ_e であるとき、再結合の時間率は (n/τ_e) で与えられる。両者は定常状態では釣り合わなければならないから、キャリア密度を $n(\text{cm}^{-3})$ とする電流密度は

$$J = \frac{ned}{\tau_e} \quad (4)$$

で与えられることになる。典型的な値として $n=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 、 $d=2 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 、 $\tau_e=3 \times 10^{-9} \text{ s}$ を代入すると $J=1.1 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ となる。半導体レーザのストライプ幅を w 、長さを L とすると、注入電流はこれらの積

$$I = J \cdot w \cdot L \quad (5)$$

で支えられることになる。上の数値例に $w=3 \mu\text{m}$ 、 $L=300 \mu\text{m}$ という大きさを追加して仮定すると発振に必要なだけの電子密度が活性層に蓄積されるには約 10 mA という値が得られる。実際に作成される半導体

レーザも 10 mA 程度の発振閾値を持つものが多くなってきた。ここで半導体レーザの寸法を小さくすることによる効果を考える。共振器の長さ L は(3)式によって光子寿命に関係している。光子の供給と散逸のバランスを与える関係式は

$$\frac{c}{n_{eff}} g = \frac{1}{\tau_{ph}} \quad (6)$$

ただし g は単位長当りの利得係数である。したがって L を短くするだけでは発振に必要な増幅媒質の利得係数は大きく、したがって電流も増加する傾向に寄与する。これを抑えるには端面反射率 R を増せば良い。さらに τ_{ph} の典型的な値として 10^{-12} 秒をとったが L を $5 \mu\text{m}$ 程度に縮めて τ_{ph} をそのままに保つとすれば R は 98% 以上の反射率にする必要がある。

共振器長を短くする第2の効果は(5)式によるもので、電流は共振器長に正比例する。 τ_{ph} がかわらないような反射率を設定したとすれば発振に必要な利得係数及び発振閾値電流密度は前と変わらないとすることができる。よって(5)式の比例計算によって共振器長が $5 \mu\text{m}$ の場合には発振閾値電流はさきの数値例の 1/60 すなわち $160 \mu\text{A}$ と見積られる。

活性領域の厚さ d についても改良の余地がある。ただし、通常の2重ヘテロ構造で活性層を薄くすると光の電磁界が活性層の外部に浸み出しが増加して電子と光子の相互作用が弱められてしまう。最近発達の著しい超薄膜エピタキシ技術を用いたいわゆる量子井戸構造と光導波路の最適化とを組み合わせると従来構造のものに比べ電流密度が約 1/3 で同一の利得係数が得られると報告されている。これを考え合わせれば室温において発振閾値電流 $50 \mu\text{A}$ のレーザが実現可能ということが言える。

消費電力としてはこれにバイアス電圧を掛ける必要があるが一般に半導体のバンドギャップエネルギーを電子ボルト単位で表した大きさのバイアス電圧をかければ良いから $0.8 \text{ eV} \sim 1.4 \text{ eV}$ の半導体が波長 $1.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$ に対応する。バイアス電圧を1ボルトとするとときに想定した微小レーザの消費電力は50マイクロワットということになる。

このようなレーザのスイッチオン、オフを1秒間に 2×10^9 回行ったとすると1ビット当りの電力・時間積は 2.5×10^{-14} ジュールと見積られる。

微小化による高速化、低電力化を達成するためにわれわれが支払わねばならない対価は取り出し光出力の減少である。光取り出し効率を論ずるには活性領域内

部での光吸収と端面から取り出される光出力との分岐比を知る必要があるが、議論を単純化するために光吸収による損失は無視して発振閾値を越えて注入された電子正孔対はすべて取り出し光出力に寄与するものと仮定しよう。ただし電流密度の増加は熱的、電子的な劣化の加速を避けるため、通常の半導体レーザと同程度、たとえば発振閾値電流密度の2倍程度であるとしよう。この場合には量子効率100%であるから注入電流に含まれる電子数がそのまま取り出し光子数の上限を与えるから、動作電流値が1/180になる上記の数値例では光出力もまた同じだけ減少せざるを得ず、10 μ W の桁となる。このとき1ギガビットで信号を送ったとすると1ビット当りの光子数は 10^9 に近い数値となり、さきに議論した量子限界よりかなり大きい水準を維持している。

量子限界で動作するレーザダイオードの実現には動作体積を 10^3 分の1に圧縮する必要があり、構造上及び技術上にさらに大きな飛躍が必要とされるが不可能なことではないと思われる。将来の課題である。

2.4 材料及びプロセス技術

これまでの議論で微小化、高反射率、量子井戸構造の組み合わせによって低い消費電力の半導体レーザが実現できる可能性があることを述べてきた。実際にはいまだ実験的な成功は得られていない。近い将来に実現すると期待して良いのであろうか。たしかにここで並べた数値例は通常の半導体レーザからはかなりかけ離れた量であり、まったく同一の加工技術で実現することは難しい。ここではこれを解決するに適していると思われる表面発光型レーザの試みについて紹介してみよう。表面発光型レーザは歴史的には1960年代に研究されているが近年では我が国で新しい技術基盤のもとに再び取り上げられ、東工大伊賀研究室、東北大稲場・伊藤研究室、電総研八百、小倉両氏らが活発な研究を展開している。また光情報処理に関連した種類の可能性は故世古氏によって論じられた。面発光レーザとは通常のレーザと異なって光共振器が結晶成長方向すなわち面と垂直方向に形成されているものをいう。これによって共振器長を数ミクロンに縮めることが可能である。反射率を増加させるためには各種のエッチング技術によって平坦な表面を得る努力が続けられると同時に多層膜コーティングや多層ヘテロ構造エピタキシャル成長によって縦方向に光学的な周期性を持ち込み、縦型分布フィードバック共振器(DFB)とする試みがすすめられている。活性層内の電子状態

を変化させ、利得を高めるのに有効であると信じられている量子井戸構造は厚さが10ナノメートル前後の活性層を1層または多層積み重ねたものであり、単層の場合には光及び電子の閉じ込めを良くするためにバンドギャップエネルギーの緩やかな変化(グレーディング)が両側に作りつけられることが有効である。超高真空技術に基づいた分子ビームエピタキシ(MBE)法や有機金属気相成長(MOCVD または OMVPE)法の発達によってこれらが制御性良く作られるようになってきた。残された最も大きな方法は電極配置を含むデバイス構造の改良ないし開発であろう。通常の半導体レーザと異なる活性領域のひろがりのため、従来の発光ダイオードと類似の電極配置ではいままでのところ励起の効率がかかなり劣っている。電流を厚み方向に流す方法、横に流す方法、円柱状活性領域を設け放射状に流す方法などが提案され、それぞれに必要なデバイスプロセスに磨きかけられている。表面から光を取り出す方式は2次的にデバイスを配列し、並列処理を行える可能性がある点でも期待されているが、これに代わるものとして結晶表面に平行に光共振器が配置される在来型の配置で短くする可能性も捨てられたわけではない。共振器ミラーとしてこれまで用いられてきた結晶へき開法はそのままでは用いられない。最近反応性イオンエッチング(RIE)法によってかなり良好なミラーの形成されることが光技術共同研究所の浅川氏ら他により報告されているが、集積化レーザの可能性を一步進めるものとして注目される。

3. 光検出器の性能限界

3.1 フォトダイオード及び光伝導素子の速度限界

半導体を用いた光検出器としてはpn接合における光起電力効果を用いたフォトダイオードか光により発生した過剰電子及び正孔による伝導度の増加を用いた光伝導素子に大別される。高速性を必要とする光通信では前者のうち、発生キャリアが速やかに電極間を走行するような内蔵電界を作りつけたPINフォトダイオードやさらになだれ増倍機能を併せもつアバランシフォトダイオード(APD)が用いられる。これらの応答速度は基本的に電極間の電子走行時間

$$t_s = d/v_s \quad (7)$$

で支配される。 $d=2\mu\text{m}$ 、 $v_s=10^7\text{cm/s}$ とすれば走行時間は $t_s=20\text{ps}$ となる。これに対し電界が十分大きくないと光電流は拡散力によって運ばれ、ゆっくりとしたパルスのすそ引きの原因となる。一方理想的な光

伝導素子では応答速度はキャリア再結合寿命で支配される。キャリア再結合寿命の方が長い場合には走行時間との比 (τ/t_0) の倍率だけ受光感度が増すことが知られている。これを光伝導利得 (photoconductive gain) と呼ぶ。この現象はキャリアが電極間を横断し終ったとき、他の側の電極からキャリアの再注入が起り、キャリア寿命の時間だけ繰り返されるためと説明されている。したがって高速性を獲得するにはキャリア寿命を短くするか、電極からのキャリアの再注入を防ぐブロッキング電極にし、キャリアの走行時間が速度の限界を与えるようにするのが望ましい。通常の光伝導デバイスではキャリア寿命が走行時間を上回る場合、キャリア再注入によってキャリア寿命の時間光伝導電流が持続する。

現実の PIN または APD 素子のパルス応答時間は上記の走行時間制限動作と考えたときより遅く、50~100 ピコ秒のものが多い。これは受光面積に比例した並列寄生容量に基づく CR 時定数の影響である。光通信用素子では光ファイバから出射するレーザービームを効率よく受けるために受光面の直径を 30~300 μm 程度にとることが多いが、光情報処理用にはもっと受光面積の小さいものを用いることによって CR 時定数の影響を抑えることができるものと考えられる。

3.2 感度と雑音

フォトダイオードでは走行時間を再結合寿命より短くとすることができ、量子効率を 50~100% の間に保つことが容易である。むしろ感度を議論するには後段の前増幅器に対してどれだけの雑音源として動くかが重要である。雑音の原因としては光電流に伴う量子的なゆらぎであるショット雑音、暗電流に伴うショット雑音、及び熱雑音があげられる。光電流を I_p 、暗電流を I_D 、帯域幅を B 、負荷抵抗を R_L 、増幅器の雑音指数を F 、とすると信号対雑音比は

$$\frac{S}{N} = \frac{I_p^2 R_L}{2e(I_p + I_D) B R_L + 4k T F_i B} \quad (8)$$

ここで e は電子電荷、 k はボルツマン因子である。極低温で用いる場合にはショット雑音が支配的となるが室温では熱雑音が圧倒的に大きいのが現状である。熱雑音の寄与を相対的に抑えるためには増幅器の入力インピーダンスを上げ、 R_L を大きくすることが望ましい。これには RC 時定数を大きくしないために寄生容量 C を減少させることが不可欠である。

3.3 光・電子集積化技術への期待

通常高周波回路では伝送路として特性インピーダン

ス 50 Ω の系が最も良く用いられる。これは配線に伴って不可欠に存在する寄生容量を線路のインダクタンスでバランスをとりやすいためである。もし寄生容量が小さければ特性インピーダンスをもっと大きくとることが可能であり、信号対雑音比にとって有利である。さらにこのことは信号水準の面からみても有利である。光検出器によって電気信号に変換され、処理された後に EO 変換によって再び光信号に再生される方式を想定すれば EO 変換素子には前述のように約 1 ボルトの駆動源が必要である。電流増倍のない光検出器では 1,500 個の光子が時間間隔 25 ピコ秒に入射したときのピーク電流は 10 μA となり、負荷抵抗が 10⁴ Ω であれば 10⁻¹ V の信号電圧が電圧増幅器に加わる。一方で負荷抵抗を 10⁴ Ω にしながら RC 時定数が 10⁻⁹ 秒以下であるためには 10⁻¹³ F すなわち 100 フェムトファラッド以下でなければならない。通常の個別素子ではパッケージされた状態での寄生容量が 100~1,000 フェムトファラッドであるからこの条件は満たされない。このように厳しい寄生容量に対する要求に応えるためには素子面積を小さくすることと同時に配線長を短くして回路浮遊容量を極力抑える必要がある。近年 GaAs IC 技術及び LnP 系ヘテロ接合技術に基づいて光デバイスと電子デバイスの一体集積化を図ろうとする努力が活発化しているが、寄生容量を減らす目的のためにも光電子集積回路 (OEIC) の実現はきわめて望ましいものである。

4. むすび

以上光能動デバイスとして比較的良好な動作原理の知られている半導体レーザー及び光起電力デバイスを例にとってデバイスパラメータを変化させて情報処理に適する超高速、低消費電力のデバイスが開発可能であるか否かをうらなってみた。光を用いる情報処理の中心となる光制御素子として電気光学効果を用いた光スイッチ、半導体のエキシトン効果に関連した異常分散を動作原理とする光-光制御双安定デバイス、光導電超高速オーストンスイッチなどの可能性が取りざたされているがいずれも主として個別デバイスの性能追求に注意が集まっている段階であり、回路及びシステムのイメージはこれから明らかにされてゆくものと思われる。これらについても本稿で試みたような大づかみのフィジビリティ調査が積み重ねられることが望ましい。光双安定素子に関するレビューはギブス (H. M. Gibbs) らやスミス (P. W. Smith) らによって試みら

れているほか、より広い立場からのデジタル光コンピューティングに関する総合報告がソーチュク (A.A. Sawchuk) らによって最近まとめられているので参照されたい^{2),3)}.

以上をまとめると半導体の光物性現象に立脚した高速光電変換現象を利用したスイッチングネットワークや光コンピュータの可能性については従来考えていたほどパワー消費の大きさに深刻な欠点があるとは必ずしもいえないこと、現在進展中の材料及びプロセス技術を用いることによって情報処理に適した仕様の光デバイスを開発できる可能性が高いこと、光電変換過程を含む回路系では寄生容量の管理がきわめて大きな技

術課題であること、などを指摘した。

おわりに本問題に関して早い時期にご示唆いただいた東北大学稲場文男教授に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 神谷武志: 光デバイスの可能性, 東北大通研シンポジウム, 光コンピュータへのアプローチ, p. 9 (Mar. 1983).
- 2) Sawchuk, A. A. and Strand: T. C. Digital Optical Computing, Proc. IEEE 72, No. 7, p. 758 (1984).
- 3) Fork, R. L.: Physics of Optical Switching, Phys. Rev. A 26, No. 4, p. 2049 (1982).

(昭和 60 年 5 月 27 日受付)