

解説

半導体系光スイッチ

多田 邦雄

東京大学工学部電子工学科 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1992年5月13日受理)

Semiconductor Optical Switches

Kunio TADA

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. ま え が き

半導体系光スイッチ, 特に電気信号入力により光出力を制御する電気-光制御スイッチを動作させるのに利用されている主な物理現象を列挙すると,

- a. 一次電気光学効果
- b. フランツ-ケルディッシュ (Franz-Keldysh) 効果
- c. 量子閉じ込めシュタルク (Stark) 効果
- d. 自由キャリア・プラズマ効果
- e. バンド・フィリング効果

がある。これらの他に音響光学効果や熱光学効果も利用しうが、今のところ、ほとんど用いられていない。

上記 a ~ c は電界効果であり, 半導体の屈折率 n や吸収係数 α が印加電界 F に応じて変化する。a はポッケルス (Pockels) 効果とも呼ばれ, 非中心対称性 (圧電性) 結晶において, F に比例する Δn が生ずる現象である。ダイヤモンド型結晶構造をとる Si や Ge にはみられないが, 閃亜鉛鉱型やウルツァイト型の結晶構造をとる多くの化合物半導体には, この効果が認められる。b は電界印加により基礎吸収端が長波長側にシフトする現象で, その付近の波長の光に対して比較的大きな $\Delta\alpha$ や Δn が生ずるが, 主に $\Delta\alpha$ が利用されている。c は量子井戸中で上記 b がいわば強調されたような現象で, 大きな $\Delta\alpha$ や Δn が生じ, いずれも利用されている。これらは電界効果であるので, 高速応答が可能であり, 原理的にはマイクロ波~ミリ波帯の周波数の変調信号にも追従できる。

一方, d, e はキャリアの注入や除去を必要とすると

いう意味で電流効果である。d は周知のとおりキャリアのバンド内遷移に伴う現象で, 伝導電子または正孔の密度の変化量を ΔN とすると, 光学係数の変化量は次の値となる。

$$\Delta n = -q^2 \lambda_0^2 \Delta N / 8\pi^2 c_0^2 \epsilon_0 n m^* \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = q^2 \lambda_0^2 \Delta N / 4\pi^2 c_0^3 \epsilon_0 n m^* \mu \quad (2)$$

(q : 電気素量, λ_0 , c_0 : 真空中の光波長と光速, ϵ_0 : 真空誘電率, m^* , μ : キャリアの実効質量と移動度)

したがって, 比較的長波長の光に対して有効に作用する現象といえる。e では, 半導体中への伝導電子と正孔の同時注入により基礎吸収端が大きく短波長側にシフトし, その付近の波長の光に対して大きな $\Delta\alpha$ や Δn が得られる。これらの現象を生じさせるためにキャリア密度を変える方法としては, pn 接合, pin 接合に順方向電流を注入する方法と, pn 接合やショットキー接触における空乏層の逆方向電圧による拡大や縮小を利用する方法とがある。前者の方法では大きな ΔN を得ることができるが, キャリアの蓄積に, あるいは蓄積したキャリアの抽出や再結合による消滅に時間がかかるので, 高速応答性は必ずしも期待できない。一方, 後者の方ではキャリア密度の変化量や変化のおよぶ場所の範囲は大きくはないが, 比較的大きな応答速度を期待することはできる。

半導体系光スイッチの材料としては, III-V 族化合物半導体, 特に GaAs/AlGaAs 系, InP/InGaAsP 系が主として用いられているが, 後者に関連して, InGaAs, InAlGaAs なども用いられている。このように半導体レーザーやフォトダイオードなどの他の光デバイスと共通の材料が主に用いられる理由の一つは, いうまでもな

くモノリシックな光集積デバイスないしは光集積回路を指向しているためである。さらにこれらの材料を用いれば、ヘテロ・バイポーラ・トランジスタ (HBT) やショットキー・ゲート電界効果トランジスタ (MESFET) などの高速電子デバイスも加えたモノリシック光電子集積回路にも発展しうる。

デバイス構造から分類すると、まずバルク型 (空間伝搬型)、光導波路型、面垂直入射型に大別できよう。バルク型は一次電気光学効果を用いたものだけといえるが、CO₂ レーザー光の変調用などの特殊なもの以外、現在ではほとんど研究されていない。1970年代初頭以降、代って光導波路型が主として研究されてきたが、近年、光交換、光インターコネクション、光コンピューティングなどに関連して、面垂直入射型にも注目が集められている。光導波路型では、ガラス系や LiNbO₃ 系の場合と同様に、単一ガイド型、マッハ-ツェンダー干渉計型、方向性結合器型 (分布結合ガイド型)、X字型などの形態がある。面垂直入射型では大きな光学係数変化が必要なので、量子閉じ込めシュタルク効果を用いたものが専らであり、ファブリ-ペロー共振器を持つものと持たないものに分類できよう。

半導体光導波路において、ガイド層とクラッド層の間に必要な屈折率差を得るには、次の二つの方法がある。第一は異種接合構造における組成による屈折率の相違を利用する方法で、例えば GaAs ガイド層を両側から Al_xGa_{1-x}As クラッド層で挟めば、ダブルヘテロ構造光導波路が得られる。第二は、同種接合構造でもキャリア密度が高ければ(1)式のとおり屈折率がわずかに小さくなることを利用する方法で、例えばノンドープのガイド層を n 型クラッド層で挟んで nin 3層構造とすればよい。これらをさらにチャンネル型光導波路とするための断面構造としては、リッジ型 (リブ型)、ストリップ装荷型、埋め込みヘテロ構造型などがしばしば用いられる。

以上のように半導体系光スイッチは、利用する物理現象、材料、構造いづれをとっても多種多彩であり、これらの組合せで実に多くの種類のものが存在しうることになる。研究の歴史も30年以上におよび、光導波路型が現れてからも20年余が経過している。近年、半導体系の重要性や将来性に対する認識も高まって論文数も急増しつつある。この小文では、以下、利用する物理現象別に分類して、光導波路型構造デバイスの最近の具体例を紹介し、半導体系光スイッチ研究開発の現状動向および問題点などを概観することとした。

2. 一次電気光学効果によるデバイス

GaAs や InP のような閃亜鉛鉱型 (点群 43m 型) の結晶における一次電気光学効果は、屈折率楕円体の式

$$\frac{x^2+y^2+z^2}{n^2}+2r_{41}(yzE_x+zxE_y+xyE_z)=1 \quad (3)$$

をもとに解析できる¹⁾。例えば、図1のデバイスの場合²⁾、ショットキー接触ダイオードに十分な逆方向電圧を加えると、空乏層が上部電極から下方へ向かって伸び、下部クラッド層にまで達する。この時、ガイド層中の [001] 方向の電界強度を E_z とすると、TE モードの光波 (ガイド層に平行な方向に光電界が振動しているモード) に対する屈折率は

$$\Delta n = -\frac{n^3 r_{41} E_z}{2} + \frac{q^2 \lambda_0^2 N}{8\pi^2 \epsilon_0^2 \epsilon_{om} m^*} \quad (4)$$

だけ増加する。ここに、右辺第1項は一次電気光学効果によるもの、第2項は式(1)と同じで、ガイド層のキャリア密度が N からゼロに減少したための自由キャリア・プラズマ効果によるものである。例えば n-GaAs を考え、表1に示した一次電気光学係数 r_{41} の値を用い、 $N=1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $m^*/m=0.068$ 、 $\lambda_0=1.06 \mu\text{m}$ 、 $E_z=10 \text{ V}/\mu\text{m}$ とすると、

$$\Delta n = 2.47 \times 10^{-4} + 0.21 \times 10^{-4} \quad (5)$$

という結果となり、この程度のキャリア密度の場合には一次電気光学効果の方が支配的となることがわかる。

さて、GaAs や InP の一次電気光学効果の大きさ^{3,4)}が LiNbO₃ や LiTaO₃ のそれに比べて小さいと考えておられる人が多いが、それは必ずしも正しくない。表1において同一の光波長のところで比較すると、GaAs、InP は LiNbO₃ に比べて一次電気光学係数はたしかに相当小さいが、屈折率が大きいため、立方体試料における半波長電圧

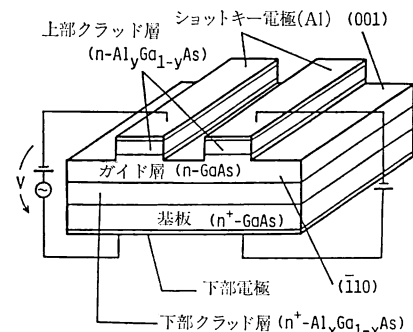


図1 ダブルヘテロ構造並置ガイド型の方向性結合器型光スイッチ²⁾

表 1 GaAs, InP, LiNbO₃ の電気光学特性の比較^{3,4)}

結 晶	光波長 λ_0 (μm)	屈折率 n	一次電気光学係数 r_{41} (pm/V)	半波長電圧 v_π (kV)	回折制限時の変調電力帯域幅比 $P/\Delta f _{d.l.}$ (mW/MHz)
GaAs	1.06	3.48	-1.17	10.8	6.5
	1.21	3.43	-1.25	12.0	9.3
	1.31	3.41	-1.28	12.9	12.2
	1.50	3.38	-1.36	14.3	16.6
InP	1.06	3.29	-1.32	11.4	8.9
	1.21	3.23	-1.49	12.0	11.1
	1.31	3.20	-1.53	12.9	13.9
	1.50	3.17	-1.63	14.4	20.2
LiNbO ₃	1.15	2.15*	19**	6.1	9.8

* n_3 (異常光線屈折率), ** $r_c \equiv r_{33} - (n_1/n_3)^2 r_{13}$.

($r, v_\pi, p/\Delta f$ は無応力時の値)

$$v_\pi = \lambda_0 / 2n^2 r \quad (6)$$

はさほど高くなく、さらに比誘電率 ϵ_r が小さいので、バルク型デバイスで形状を最適化した場合のいわゆる回折制限時の変調電力帯域幅比

$$P/\Delta f|_{d.l.} = S^2 m^2 \lambda_0^3 \epsilon_r \epsilon_0 / 2\pi^2 n^7 r^2 \quad (7)$$

で比較すると、むしろ LiNbO₃ より GaAs の方がやや小さく、優れていることがわかる。なお、表 1 の数値は式(6), (7)で安全係数 S を π , 変調度 m を 1 とした時の値で、GaAs では $r=r_{41}$, LiNbO₃ では $r=r_c/2$, $n=n_3$ として計算してある。導波路型デバイスでは

$$P/\Delta f \propto \epsilon_r / n^6 r^2 \quad (8)$$

であり、この大小で比較すると、LiNbO₃ がややもち直すが、それにしても GaAs, InP と大差ない。 ϵ_r が GaAs, InP で LiNbO₃ の 1/4 程度に小さく、かつ $\sqrt{\epsilon_r} \equiv n$ であることは、高速光スイッチ用、特に進行波型デバイス用に潜在的には有利な点でもある。さらに、式(5)の数値例での電界強度 $10 \text{ V}/\mu\text{m}$ は、薄い半導体空乏層中では容易に得られる値であるが、LiNbO₃ 中ではそうとはいえない。以上により、例えば導波路型スイッチで比較すると、半導体系のものが LiNbO₃ 系のものより数分の 1 ないし 1/10 程度に小形に、特に素子長を短く、作製できることが多い。

ここで図 1 に戻って、ストリップ装荷型ガイドを並置した方向性結合器型光スイッチについて説明したい。これは pn 接合を有する積層ガイド型デバイス⁵⁾、同じく並置ガイド型デバイス⁶⁾を経て改良されてきたもので、ショットキー接触により逆方向電圧を印加する構造に簡易化されているので、作製容易という利点がある。分子線エピタキシー法 (MBE) によるウェーファをウェットエッチング法で加工して作製したガイド層厚 $1.5 \mu\text{m}$,

ストリップ幅 $4 \mu\text{m}$, ストリップ間隔 $4 \mu\text{m}$, 全長 4.4 mm の素子で、 $1.06 \mu\text{m}$ 光に対しスイッチング電圧 16 V , クロストーク -12 dB , 3 dB 変調遮断周波数 Δf が 1.5 GHz という特性が得られている²⁾。なお、 Δf はショットキー接触の障壁キャパシタンスその他の寄生インピーダンスによって制限されている。

図 2 は半導体系では現在のところ最大規模と思われる 8×8 マトリクス光スイッチ⁷⁾の概略図である。スイッチエレメントは長さ 3 mm で、構造は図 1 のものに類似しているが、ショットキー接触の代りに pin 接合を有すること、および反転 $\Delta\beta$ 型⁸⁾であることが異なる。 $1.3 \mu\text{m}$ 光に対し、電圧 21.5 V で bar (直進) 状態 (クロストーク -16.5 dB), 9 V で cross (切替) 状態 (クロストーク -16.2 dB) が得られている。 8×8 マトリクススイッチはこの素子を 64 個集積して構成されており、全長 26.5 mm , 光伝搬損失は 12.3 dB である。ウェーファは MBE 法で作製され、反応性イオンビームエッチング法 (RIBE) で加工が行われている。

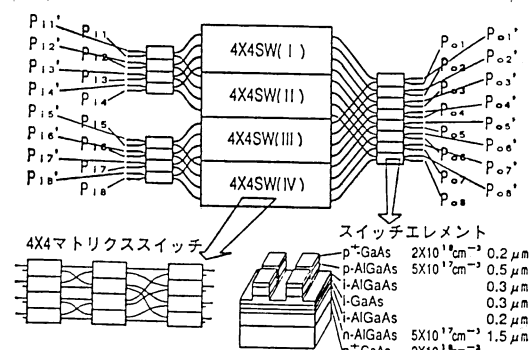


図 2 方向性結合器型 8×8 マトリクス光スイッチ⁷⁾

以上の 2 例も含めて、通常の方向性結合器型光スイッチは (001) 基板上に [110] 光伝搬の方向に構成されており、TE₀ 状モードの光しかスイッチできない。TM₀ 状モードの光に対しては一次電気光学効果による屈折率変化量 Δn はゼロである。この点を改良した偏光無依存方向性結合器型光スイッチが提案され⁹⁾、試作されている¹⁰⁾。すなわち、(111) 基板上に構成し、[111] 方向に電界 E を印加すると、TE₀ 状モードに対しては

$$\Delta n = n^3 r_{41} E / 2\sqrt{3} \quad (9)$$

であり、TM₀ 状モードに対しては

$$\Delta n = -n^3 r_{41} E / \sqrt{3} \quad (10)$$

となる。後者の絶対値が前者に等しくなく 2 倍であるが、この難点は回避できる。すなわち、TM₀ 状モードの最初の bar 状態が得られる電圧のほぼ 2 倍の電圧を印加することにより、両モードともほぼ完全な bar 状態が得られることになる。

さて一次電気光学効果による導波路型光スイッチのスイッチング電圧 V_s は一般に素子長 L に反比例するので、 V_s を低減するには L を大きくするのが早道である。しかし電極キャパシタンス C や光の通過時間 τ_t は L に比例するので、3 dB 変調遮断周波数 Δf は通常のいわゆる集中定数型デバイスでは L に反比例して低下してしまう。すなわち、 C により Δf が定まる場合には

$$\Delta f_1 = 1/\pi R_1 C \quad (R_1 \text{ は負荷抵抗}) \quad (11)$$

τ_t により Δf が制限される場合には、

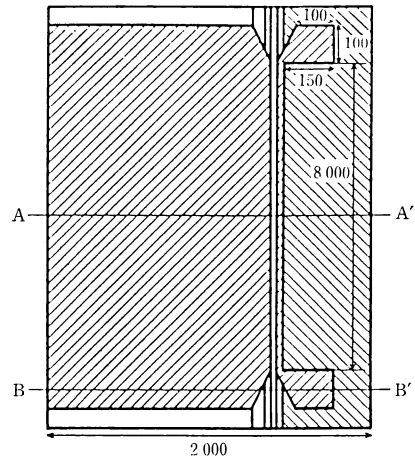
$$\Delta f_2 \approx 1.4/\pi\tau_t = 1.4c_0/\pi n_g L \quad (12)$$

である。GaAs で導波路屈折率 n_g を 3.48 とすると、 $\Delta f_2 \cdot L \approx 3.8 \text{ GHz} \cdot \text{cm}$ という値となる。通常は $\Delta f_1 < \Delta f_2$ であるが、導波路幅や電極幅を減らす等で Δf_1 を上げたとしても、集中定数型デバイスでは Δf は上記 Δf_2 の値が限度で、超高速度は望めない。

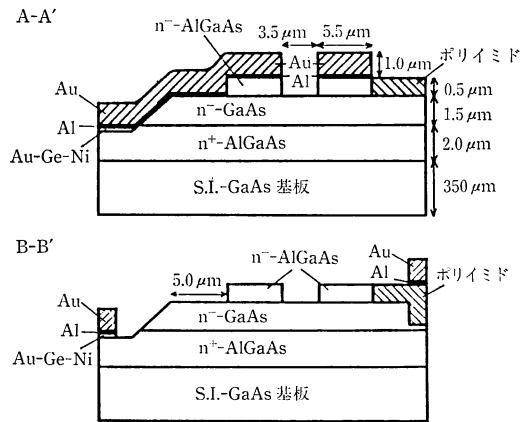
これを改善するには、光導波路にそって伝送線路を設け、変調電磁波をできるだけ光と等速になるように進行させる進行波型デバイスが望まれる。伝送線路の特性インピーダンスと等しい整合抵抗で終端したとすると、 Δf は次の値に向上すると期待される。

$$\Delta f \approx 1.4c_0/\pi |n_g - n_m| L \quad (13)$$

ただし、 n_m は伝送線路上を進行する変調電磁波の屈折率である。半導体系方向性結合器型光スイッチとしては最初の進行波型デバイスの例¹¹⁾を紹介しよう。この素子は図 3 に示すとおり半絶縁性 GaAs 基板上に構成されており、下側電極は厚さ $2 \mu\text{m}$ の n⁺-AlGaAs 層となっている。これが左側光ガイド上のショットキー電極に短絡され、接地電極となっており、右側光ガイド上のシ



(a) 上面図



(b) A-A'および B-B' 断面図

図 3 進行波型方向性結合器光スイッチの構造図¹¹⁾

ットキー電極との間に交調電圧が印加される。このように下側電極をきわめて薄くすることによって、その導電性による変調電磁波の遅波効果が緩和され、 n_m は広い周波数範囲にわたって約 5 の値に低下したので、 Δf は 9.1 GHz に向上しているが、さらに改良の余地がある。なお、スイッチング電圧は $1.06 \mu\text{m}$ 光に対して 10.4 V であった。このほか、半導体系の進行波型超高速光変調器としては、単一ガイド型のもの¹²⁾およびマッハ-ツェンダー干渉計型のもの¹³⁾が報告されており、後者では $\Delta f = 36 \text{ GHz}$ と報告されている。

3. フランツ-ケルディッシュ効果によるデバイス

標記の現象は別名 electro-absorption effect (電気光吸収効果)とも呼ばれているように、電界印加によりエ

エネルギー帯が傾くと実効的な禁制帯幅がトンネル効果により減少し、基礎吸収端が長波長側にシフトし、その付近の波長の光の吸収が増加する現象であって、これを利用した小形、高能率、高速な光強度変調器が開発されている。一例をあげると¹⁴⁾、基礎吸収端波長が $1.40 \mu\text{m}$ である i-GaInAsP 吸収層を導波層にした pin 接合埋め込みヘテロ構造のデバイスで、逆方向電圧を 0 V から 5 V に変化させると、 $1.55 \mu\text{m}$ 光の透過出力が 13 dB 減少する (消光比 -13 dB)。素子長は $200 \mu\text{m}$ でダイオードキャパシタンスは 0.55 pF と小さく、 Δf は 10.3 GHz に達する。この素子は分布帰還型 (DFB) 半導体レーザーとモノリシック集積化されていて、前者の一定の出力を受けて 10 Gb/s NRZ 変調を加えることができ、この時の透過出力のスペクトル広がりには 0.1 \AA 程度で、前者に直接変調を加えた場合の広がりよりもはるかに小さい。同様のモノリシック集積素子を用いて $1.55 \mu\text{m}$ 帯で 5 Gb/s 、 100 km の高速長距離光伝送実験も行われた¹⁵⁾。

4. 量子閉じ込めシュタルク効果によるデバイス

例えば図 4 に示すように厚さ L_w が 10 nm 程度の GaAs 薄膜井戸層を AlGaAs 障壁層で両側から挟むと、いわゆる量子井戸が形成される。井戸層に閉じ込められたキャリアは層に垂直な方向には激しく往復運動をしていると考えられるので、エネルギーはバルク半導体中にある時よりも上昇する。光子 1 個が吸収されて基底状態の電子と重い正孔とが 1 個ずつ生じ、しかもそれらがクーロン力で引き付け合って励起子 (exciton) になった

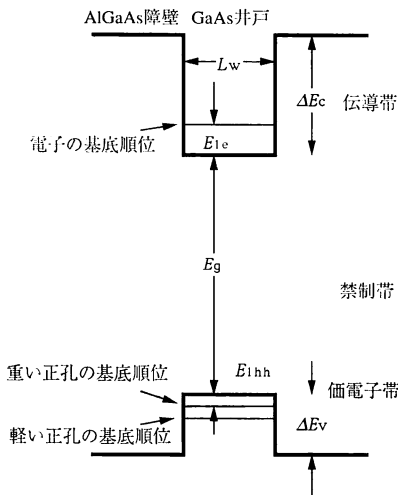


図 4 GaAs/AlGaAs 量子井戸のエネルギー準位図

とすると、必要な光子エネルギーは次の値となる。

$$h\nu = E_g + E_{1e} + E_{1hh} - E_{ex} \quad (14)$$

ここに、 E_{ex} は励起子の結合エネルギーであるが、量子井戸中では電子・正孔間の距離が小さな値に制限されるので、 E_{ex} はバルク中よりも増大し、励起子はより安定になる。室温でも光吸収スペクトルには大きな励起子吸収ピークが観測され、これが基礎吸収スペクトル ($h\nu \geq E_g + E_{1e} + E_{1hh}$ である波長域の吸収帯) の低エネルギー側 (長波長側) に隣接する形となる。

井戸層に垂直な方向に電界 F を印加すると、シュタルク効果により、 E_1 が減少するが、その変化量は、 F が極端に大きくなり、かつ ΔE_c 、 ΔE_v が十分大として計算すると

$$\Delta E_1 = -\frac{1}{24\pi^2} \left(\frac{15}{\pi^2} - 1 \right) \frac{m^* q^2 L_w^4 F^2}{\hbar^2} \quad (15)$$

となる。 E_{ex} の変化量は小さいので、通常は無視できる。重要なことは、量子井戸中では電界を加えても励起子が解離し難いので、励起子吸収ピークがそれほど減衰せず光吸収スペクトル全体が低エネルギー側に F^2 に比例して大きくシフトすることである。これが量子閉じ込めシュタルク効果である。式(14)の励起子吸収ピークより高エネルギー側では F とともに吸収が減少する特異な現象が生じ、これが SEED (self-electrooptic effect device) に利用されている。一方、低エネルギー側では F とともに吸収が大幅に増大するので、これがまず導波路型光変調器に利用されている¹⁶⁾。 L_w が小さいほど励起子は安定になるが、式(15)からわかるようにシュタルク・シフトが小さくなってしまうので、 L_w はある程度大きく、通常 10 nm 前後に設定することが多い。単一量子井戸では変調効果が小さいので、多数の量子井戸層を挟み込んだ多重量子井戸 (MQW) 導波路が用いられる。

まず $1.55 \mu\text{m}$ 帯での光強度変調器の一例を紹介すると¹⁷⁾、全長 $90 \sim 120 \mu\text{m}$ 、幅 $4 \mu\text{m}$ の pin 接合メサ型デバイスで、 $0.4 \mu\text{m}$ 厚さの i-MQW 層が、 8.6 nm 厚さの InGaAsAs 井戸層と 5 nm 厚さの InAlAs 障壁層、30 組で構成され、これが導波路層になっている。電子と重い正孔の励起子吸収ピーク波長は $1.44 \mu\text{m}$ で、逆方向電圧 4 V を印加すると、このピークが 25 nm 長波長側にシフトするので、 $1.55 \mu\text{m}$ 光に対して消光比が 10 dB の吸収型光変調器として作動する。ダイオードキャパシタンスは 0.2 pF にすぎず、 Δf は 25 GHz に達する。

一般にこのような量子井戸導波路型デバイスにおいて、TE モード光は重い正孔・電子遷移と軽い正孔・電子遷移の両方に結合するが、TM モード光は後者のみと

しか結合しない。加えて図4のような通常の矩形ポテンシャル分布をもつ量子井戸では、式(15)のようにシュタルクシフト量 ΔE_1 は関与するキャリアの実効質量 m^* に比例するので、軽い正孔による ΔE_1 は小さい。この二つの原因で TM モード光はほとんど変調効果を受けず、偏光無依存動作は通常は全く期待できない。この点を改善するために放物線型ポテンシャル分布をもつ量子井戸を利用することが提案され¹⁸⁾、偏光無依存光強度スイッチが試作された¹⁹⁾。放物線型ポテンシャル井戸の深さを V_0 、幅を L_p とすると、シュタルクシフト量は

$$\Delta E_1 \approx -q^2 L_p^2 F^2 / 16 V_0 \quad (16)$$

と計算され、式(15)と異なり、キャリアの実効質量に無関係となることからわかる。これにより、上記の二つの難点の一つが解消するので、TM モード光に対しても大きな変調効果を得ることが可能となる。実際に、GaAs/AlGaAs 系材料で構成した17組の放物線型ポテンシャル量子井戸を導波路に組み入れた長さ440 μm の pin 接合プレーナ導波路デバイスで、4.6 V の逆方向電圧で 0.846 μm 光の TE モード、TM モード両方に対して等しく 16.1 dB の消光比が得られている。

量子閉じ込めシュタルク効果においては、以上のような大きな吸収係数変化に伴って屈折率にも大きな変化が現れる。一次電気光学効果における値よりも2桁大きい0.01程度の屈折率変化を得ることも不可能ではない。これを利用した光路切替型スイッチも種々研究されていて、例えばMQW 方向性結合器型スイッチとして、並置型²⁰⁾や積層型^{21,22)}のデバイスが報告されており、なかには全長138 μm 、スイッチング電圧5 V の超小形低電圧のものも含まれている。

一般に量子閉じ込めシュタルク効果による光制御デバイスは、変調効果の大きい波長域では光吸収も大なので、この二つの要因の適度な妥協点で設計する必要がある。したがって、使用温度幅や波長幅なども狭くなる場合があり、実用にはまだまだ多くの研究が必要であるが、潜在能力には大きな可能性が秘められているといえよう。さらに、歪超格子を利用すること²³⁾や、以上で述べたいわば量子井戸膜だけでなく、量子井戸細線や量子井戸箱を利用すること²⁴⁾も、非常に興味あるトピックスといえよう。

5. バンド・フィリング効果によるデバイス

まえがきに述べたように、自由キャリア・プラズマ効果によってもある程度大きな光学定数変化が生ずるが、これが基礎吸収端付近でいわば顕著に現れるのが標記の

現象である。例えば pin 接合に順方向電流を加え、p 層から i 層に正孔を、n 層から i 層に電子を注入したとする。i 層において、価電子帯の上部は正孔で充されるので電子は存在せず、一方、伝導帯の下部は電子で充されるから、価電子帯上部の電子が伝導帯下部へ遷移するような光吸収は生じ得なくなる。すなわち、キャリアを注入することによって、i 層の実効的な禁制帯幅が増大し、基礎吸収端が短波長側にシフトする。この付近の波長域ではキャリア注入により吸収係数と屈折率が大きく低下することになる。GaAs について数値的に解析した結果例によると、注入キャリア密度 10^{18}cm^{-3} で屈折率の低下量は 0.01 程度にも達する²⁵⁾。

図5は、この現象を利用した1.3 μm 光用の4×4マトリクス光スイッチの模式図である²⁶⁾。長さ8.1 mm、幅1.5 mm の InP 基板上に16個の単位光スイッチがモノリシック集積化されている。単位光スイッチは下方の拡大図から明らかなように2段全反射型光スイッチであって、二つのY分岐上の細長い電極からその下の pn 接合を通じて InGaAsP 導波層にキャリアを注入すると、その部分の屈折率が低下して全反射ミラーが形成され、光は直進せずに二つのY分岐を通過して屈曲して進行することになる。これに要する電流は単位スイッチ1個あたり120 mA である。

電流注入により光吸収が減り、透明化し、さらには上手にやれば多少の増幅利得が得られることを利用することもできる。このようなゲート光スイッチもレーザー・

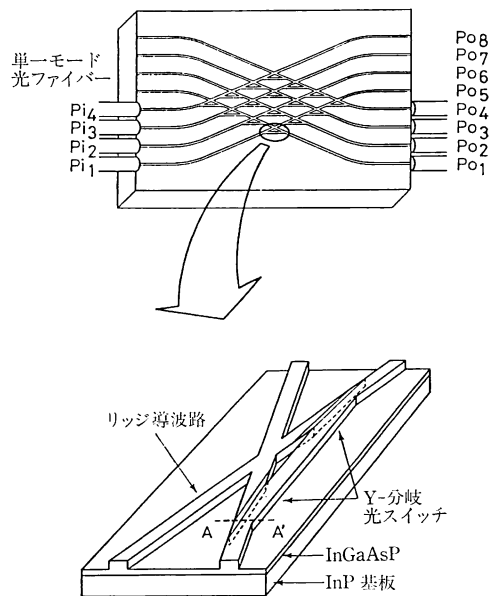


図5 全反射型4×4マトリクス光スイッチ²⁶⁾

ダイオード光スイッチ等の名称で研究されており、光路選択機能を有するものも発表されている²⁷⁾。上記の2段全反射型光スイッチにおいても、二つのY分岐間の短絡路の部分に電流を注入して光増幅を行い、光スイッチにおける光損失を補償する試みが行われている²⁸⁾。

このようなバンド・フィリング効果による光スイッチは基本的には偏光無依存であり、構造も小形であるが、動作速度が高くないことが欠点である。すなわち、pn接合ダイオード部分に多量のキャリアが蓄積されるので、遮断時にこれが消滅するまで通常は数 ns 程度の時間が必要である。そこで、ダイオード構造のかわりにバイポーラ・トランジスタ構造を導入し、薄いベース領域のみにキャリアを蓄積させ、これを小さなベース電流で制御したり高速で引き抜いたりすれば、低電流動作や高速動作が可能になると考えられる²⁹⁾。単なるゲート光スイッチ的なものであるが、このような3端子制御デバイスも試作されている³⁰⁾。

6. あとがき

以上、半導体系光スイッチについて、利用する物理現象別に分類して光導波路型デバイスの現状と研究開発動向を概説した。これらのデバイスのスイッチング電圧あるいは電力、消光比ないしはクロストーク、動作速度、集積度等が既に相当高度な水準に達していること、特に寸法の面では他の材料系のものに比べて著しい小形化が可能であること等が明らかといえよう。

では問題点は何かということ、挿入損失が大きいことであって、20 dB 程度ということもしばしばである。といっても光導波路自体の損失は 5 dB 程度以下のことも多く、大半は光結合損失である。このうち 3~4 dB はフレネル反射損であるから、無反射コーティングにより改善できる筈であるが、残りの大半は、半導体系光導波路の断面寸法特に厚さがあまりにも小さいことによるモードパターン不整合損失である。

この問題を解決する方策としては、次の三つが考えられる。第1はテーパ構造の導入により入出力端部の導波路断面寸法を拡大する等、構造上の工夫による結合損失の低減、第2は素子同士の直結化すなわちモノリシック集積化の推進、第3は5節にも例を記したように光増幅機能をもつ素子を組み入れることによる損失補償である。このうち、第1、第2の方向はかなり試みられており、プロセス技術の進歩におうべき面も多いが、その他の方面からもよりいっそうの研究が必要であろう。第3についてはむしろ半導体系の利点を生かす方向でもある

から、今後の真剣な検討が望まれる。

文 献

- 1) 難波 進：“閃亜鉛鉱の電気光学効果”，応用物理，28 (1959) 432-437.
- 2) 多田邦雄，川西悟基，林 秀樹：“GaAs 系ダブルヘテロ構造分布結合ガイド形光変調器とその高周波変調特性”，電子情報通信学会論文誌C，J71-C (1988) 709-719.
- 3) N. Suzuki and K. Tada：“Elasto-optic and electro-optic properties of GaAs,” Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) 1011-1016.
- 4) N. Suzuki and K. Tada：“Electro-optic properties and Raman scattering in InP,” Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) 291-295.
- 5) K. Tada and K. Hirose：“A new light modulator using perturbation of synchronism between two coupled guides,” Appl. Phys. Lett., 25 (1974) 561-562.
- 6) K. Tada, H. Yanagawa and K. Hirose：“Design theory of the coupled-waveguide optical modulator with pn junction—Strip-loaded channel waveguide configuration,” Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Jpn., E61 (1978) 1-7.
- 7) 浜本貴一，小松啓郎，阿南隆由，杉本満則，水戸郁夫：“8×8 GaAs/AlGaAs 方向性結合器型マトリクス光スイッチ”，1991年電子情報通信学会春季全国大会，C-225 (1991).
- 8) H. Kogelnik and R. V. Schmidt：“Switched directional couplers with alternating $\Delta\beta$,” IEEE J. Quantum Electron., QE-12 (1976) 396-401.
- 9) K. Tada and H. Noguchi：“Proposal and theory of polarization-independent semiconductor electro-optic directional coupler switches,” Trans. Inst. Electron. Inform. Comm. Eng., E73 (1990) 88-93.
- 10) 小松啓郎，浜本貴一，杉本満則，甲賀祐二，鈴木 明，水戸郁夫：“偏光無依存 GaAs/AlGaAs 方向性結合器型光スイッチ”，1991年電子情報通信学会春季全国大会，C-226 (1991).
- 11) 林 秀樹，多田邦雄，高橋芳浩，石川卓哉：“GaAs 系進行波形方向性結合器光変調器の設計，試作，実験”，電子情報通信学会論文誌 C-I，J73-C-I (1990) 627-635.
- 12) S. Y. Wang and S. H. Lin：“High speed III-V electro-optic waveguide modulation,” J. Lightwave Technol., 6 (1988) 758-771.
- 13) R. G. Walker：“High-speed III-V semiconductor intensity modulators,” IEEE J. Quantum Electron., 27 (1991) 654-667.
- 14) H. Soda：“10 Gb/s monolithic electro-absorption modulator/DFB laser light source,” 3rd Optoelectronics Conference Technical Digest, 12B1-1 (Makuhari, 1990).
- 15) M. Suzuki, H. Tanaka, H. Taga, S. Yamamoto and Y. Matsushima：“3V-10 Gb/s modulation and 0.5 Tb/s·km transmission using a $\lambda/4$ -shifted DFB laser/E-A modulator integrated light source,” *ibid.*, PD-7 (1990).
- 16) T. H. Wood：“Multiple quantum well (MQW) waveguide modulators,” J. Lightwave Technol., 6 (1988) 743-757.
- 17) K. Wakita, I. Kotaka, O. Mitomi, H. Asai, Y. Kawamura and M. Naganuma：“High-speed InGaAlAs/InAlAs multiple quantum well optical modulators,” J. Lightwave Technol., 8 (1990) 1027-1032.

- 18) T. Ishikawa, S. Nishimura and K. Tada: "Quantum-confined Stark effect in a parabolic-potential quantum well," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) 1466-1473.
- 19) K. Tada, S. Nishimura and T. Ishikawa: "Polarization-independent optical waveguide intensity switch with parabolic quantum well," *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 2778-2780.
- 20) J. E. Zucker, K. L. Jones, M. G. Young, B. I. Miller and U. Koren: "Compact directional coupler switches using quantum well electrorefraction," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 2280-2282.
- 21) M. Kohtoku, S. Baba, S. Arai and Y. Suematsu: "Switching operation in a GaInAs-InP MQW integrated-twin-guide (ITG) optical switch," *IEEE Trans. Photon. Tech. Lett.*, **3** (1991) 225-226.
- 22) T. Yamaguchi, K. Tada and T. Ishikawa: "Vertical multiple quantum well directional coupler switch with low switching voltage," *IEEE Trans. Photon. Tech. Lett.*, **4**, 7 (1992).
- 23) T. C. Chong, H. W. Wan and F. J. Chua: "Polarization dependence of field-induced refractive index variation in strained and unstrained quantum well structures," *Electron. Lett.*, **26** (1990) 1060-1061.
- 24) K. Shimomura, S. Arai and Y. Suematsu: "Operational wavelength range of GaInAs(P)-InP intersectional optical switches using field-induced electro-optic effect in low-dimensional quantum-well structures," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 471-478.
- 25) Y. Okada, R. H. Yan, L. A. Coldren, J. L. Merz and K. Tada: "The effect of band-tails on the design of GaAs/AlGaAs bipolar transistor carrier-injected optical modulator/switch," *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (1989) 713-719.
- 26) H. Inoue, H. Nakamura, K. Morosawa, Y. Sasaki, T. Katsuyama and N. Chinone: "An 8 mm length nonblocking 4x4 optical switch array," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, **6** (1988) 1262-1266.
- 27) R. Kishimoto and M. Ikeda: "Optical self-routing switch using integrated laser diode optical switch," *ibid.*, **6** (1988) 1248-1254.
- 28) H. Inoue, T. Kiriwara, Y. Sasaki and K. Ishida: "Carrier-injection type optical S³ switch with traveling-wave amplifier," 1st Topical Meeting on Integrated Photonics Research Technical Digest, ME5 (Hilton Head, 1990).
- 29) K. Tada and Y. Okada: "Bipolar transistor carrier-injected optical modulator/switch: Proposal and analysis," *IEEE Electron. Device Lett.*, **EDL-7** (1986) 605-606.
- 30) Y. Okada, T. Ishikawa and K. Tada: "Optical intensity modulator for integrated optics by use of a heterojunction bipolar transistor waveguide structure," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 2591-2593.