

# 解説

## 光スイッチの物理—半導体物性を中心に—

山田 実・桑村 有司

金沢大学工学部電気・情報工学科 〒920 金沢市小立野 2-40-20

(1995年2月1日受理)

### Operating Mechanism of Optical Switches: in Relation with Semiconductor Physics

Minoru YAMADA and Yuji KUWAMURA

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering,  
Kanazawa University, 2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa 920

#### 1. 光スイッチと光変調器

光スイッチという語は2種の意味で利用されている。一つは光の伝搬を通過させたり遮断させたりする素子のことであり、光シャッターともいう。もう一つは光の伝搬方向や通路を切り替える素子で、光交換器ともいう。一方、光変調器とは光に情報を載せる素子であり、透過光の強度を変調するものや光の位相を変化させるものなどがある。透過光強度を0から100%まで変調できれば光シャッターになる。また、2筋の光を干渉させ位相関係を変化させれば合成した光の伝搬方向が変化するので、光交換器になり光強度変調器ともなる。

上記のように、光スイッチと光変調器とは使用目的や機能性から分類されるが動作原理は同じである。したがって、本解説では光スイッチと光変調器とを同義語として用いる。

#### 2. 動作原理の分類

##### 2.1 分類の方法

半導体を利用した光スイッチは図1のように種々の側面から分類される。(a)は変化する光学定数で分類した場合、(b)は素子の形状と光伝搬との方向や導波原理との関係での分類、(c)は利用する電子のエネルギー状態で分類した場合、(d)はその電子状態を変化させる要素で分類した場合、(e)は用いる材料での分類である。このほかに、前節で示した用途や機能性に基づいた分類や、材料の作製技術による分類などが考えられるが、本

記事の主旨から離れるので省略する。

##### 2.2 変化する光学定数から見た分類

光を制御するのは物質中の電子であり、異なるエネルギー単位への電子遷移で光との相互作用が記述される。一般的に、電子遷移による光の吸収係数  $\alpha(\omega)$  は

$$\alpha(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\omega}{n} \sum_{b,a} |R_{ba}|^2 (f_a - f_b) L(\hbar\omega - E_{ba}) \quad (1)$$

で示される。

ここで、 $n$  は屈折率、 $\omega (=2\pi c/\lambda)$  は光の角周波数、 $\hbar$  はプランク定数/ $2\pi$ 、 $R_{ba}$  は双極子能率、 $f_a$  は単位  $a$  での電子の分布確率 (フェルミディラック関数)、 $E_{ba} (=E_b - E_a)$  は上側単位  $b$  と下側単位  $a$  とのエネルギー差である。 $L(\hbar\omega - E_{ba})$  は電子散乱などによるスペクトルの広がり関数であり、通常はローレンツ型関数やガウス型関数あるいは  $\delta$  関数などで記述される。式(1)は下側単位  $a$  から上側単位  $b$  までの遷移確率について全エネルギー単位で総和することを意味している。

この電子遷移は電磁波論的には分極の振動として導入され、分極率や誘電率あるいは導電率として記述される。分極率や誘電率を複素数で示すと、実数部が屈折率に対応し、虚数部が導電率に対応する。屈折率の変化は伝搬光の位相を変化させ位相変調器となる。また、導電率の変化は光の吸収係数を変化させ、光強度変調器を作ることができる。

さて、分極率や誘電率の実数部と虚数部とは有名なクレマース・クレニッヒの関係で結び付いている。すなわち、吸収係数の変化  $\Delta\alpha$  と屈折率変化  $\Delta n$  の間には、

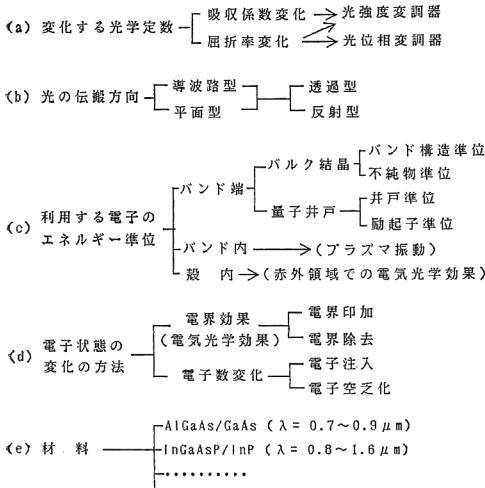


図 1 光スイッチ/光変調器の分類

$$\Delta n(\omega) = \frac{c}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Delta \alpha(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2)$$

$$\Delta \alpha(\omega) = -\frac{4\omega^2}{c\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Delta n(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (3)$$

の関係がある。ここで、 $c$  は光速である。つまり、一つの電子遷移により、吸収係数変化  $\Delta \alpha$  と屈折率変化  $\Delta n$  の両者を得ることができる。図 2 は 2 準位での電子遷移による例である。

$\Delta \alpha$  が最大になる波長を  $\lambda_0 (= 2\pi c/\omega_0)$  とすると、屈折率変化  $\Delta n$  はこの波長  $\lambda_0$  よりも長波長側または短波長側にずれた波長で最大になる。しかし、一般的に短波長側は母体での吸収が大きく、長波長側で透明になる。したがって、同じ材料で吸収型変調器と光位相変調器を作る場合、光位相変調器の最適波長は吸収型変調器よりも長波長になる。

### 2.3 光の伝搬方向による分類

光素子は素子の表面に沿った導波路を伝搬させる構造と表面に垂直に入射させる平面型に大きく分類される。導波路型は光通信とともに発展してきており、平面型はレンズや鏡などの光学素子として古典光学の時代から利用されている。最近では並列型の光情報処理を目的として平面型の機能素子が再び脚光を浴びている。

光出力としては素子の透過光を用いる場合と反射光を用いる場合がある。これを図 3 に例示する。光の吸収係数を変化させる場合には透過型になるが、屈折率を変化させる場合には透過型と反射型の両者を構成できる。光交換器の場合にはエネルギー損失がなく、出力ポートを切り替える必要があり、透過と反射とを併用する。また、吸収係数と屈折率の両者を変化させると、反射型で

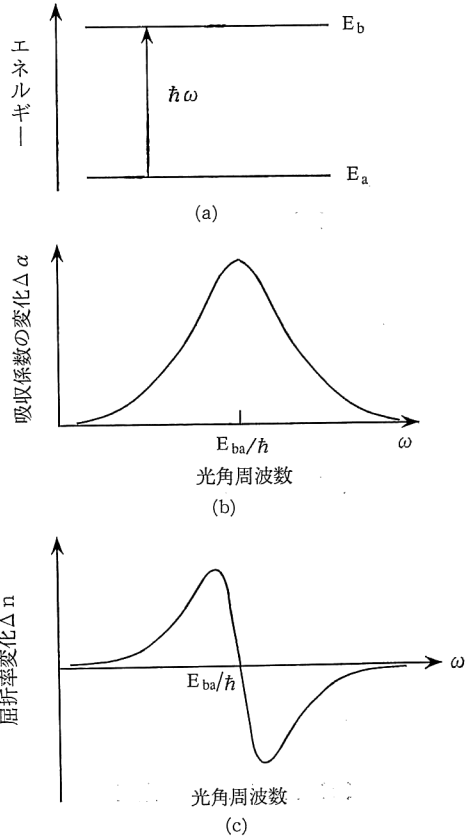


図 2 2 準位モデルでの吸収係数と屈折率

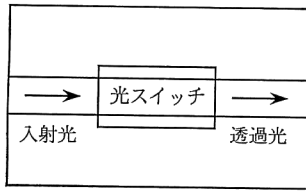
100% の強度変調が可能になることが理論的に示されている<sup>1)</sup>。しかし、透過型で完全な 100% 変調を得るためには、かなりの創意工夫が必要である。

### 2.4 利用する電子のエネルギー準位による分類

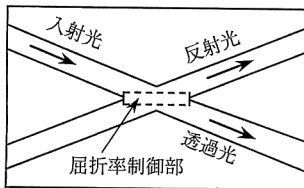
半導体の特質はエネルギー準位がバンド(帯)構造を形成していることである。多くの半導体光スイッチはこのバンド端近傍のエネルギー準位を利用し、価電子帯側から伝導帯側への電子遷移を外側から制御している。この時、本来のバンド構造準位でなく、不純物準位や量子井戸構造にした時の準位や励起子準位なども利用できる。このようなバンド端付近の電子を利用した動作原理については 3 節や 4 節でさらに詳細に述べる。

また、伝導帯内での電子や価電子帯内での正孔は電磁波(光)によりプラズマ振動を生じ、屈折率や吸収係数を変化させる。そして、これらの定数は電子数や正孔数により制御できる。

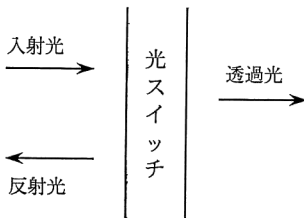
さて、バンド構造は半導体結晶を構成する原子の最外殻軌道の電子に対してのエネルギー準位である。価電子帯中のかかなり深い準位や殻内軌道にも電子は存在する。



(a) 導波路、透過型



(b) 導波路、透過・反射型



(c) 平面型、透過・反射型

図3 光の伝搬方向による分類

これらの電子は原子に強く拘束されているので運動しにくい、電磁波とある程度の相互作用を示す。そして外部から強い電界が印加されると結晶間隔が歪むため、電磁波との相互作用も変化する。バンドギャップより小さなエネルギーの赤外線に対してこの相互作用が利用できる、これを赤外領域での電気光学効果と呼ぶ。

## 2.5 電子状態の変化の方法による分類

「半導体」を文字通り解釈すると「導体と絶縁体の中間的性質を持つ材料」となる。しかしこの解釈は適切ではない。「中間的」の意味がきわめて曖昧である。「導体の特性と絶縁体の特性とを選択して制御できる材料」と定義するほうが適切であろう。つまり、キャリアを減少させて「絶縁体」的に利用したり、キャリアを増加させて「導体」的に利用したりすることが半導体の特色である。

光を制御するためには電子遷移の形態を変化させればよい。一つの方法は絶縁材料的に用い印加電界を変化させる方法である。もう一つは導体として用いキャリア数を変化させる方法である。

真性半導体にはキャリア（伝導帯中の電子と価電子帯中の正孔）が少なく、絶縁材料的である。これに電界を

印加し、種々の電界効果（電気光学効果）を得ることができる。電界効果は式(1)の吸収係数においてエネルギー単位差  $E_{0a}$  や双極子能率  $R_{0a}$  の大きさを変化させる。この方法が現在開発されている半導体光スイッチで最も多く利用されており、これについては3節で詳細に述べる。

半導体の p-n 接合や p-i-n 接合を作ると接合部に空乏領域が生まれる。空乏領域にはイオン化した不純物原子による電界が存在する。この既存電界を利用し、外部電源によりさらに電界を強化したり除去することもできる。

キャリア数（電子や正孔の数）を変化させる方法は式(1)での電子分布関数  $f_b$  や  $f_v$  を変化させることを意味する。半導体レーザーや発光ダイオードのように p-i-n 接合を作り、順方向バイアスを印加して電子や正孔を注入する方法が比較的多く検討されている。

また、p-n 接合に逆バイアスをかけると空乏層が広がる。つまり、電子や正孔を除去できる。筆者らはこの方法で光スイッチを開発している。電子数変化による光スイッチについては4節でさらに述べる。

## 2.6 材料による分類

半導体光スイッチの多くは価電子帯側から伝導帯側への電子遷移を電界印加や電子数変化で制御するものである。そのため、直接遷移型で p-接合やヘテロ接合が可能な材料が優れており、半導体レーザーと同じ材料系が利用される。また、使用する波長によって混晶比が選ばれる。つまり、GaAs を基板とした AlGaAs 系の化合物や InP を基板とした GaInAsP 系の化合物などが適している。

## 3. 電界効果

### 3.1 バルク半導体での電界効果

バルク半導体での電界効果はフランツ・ケルディッシュ効果とも呼ばれ、次のように理解されている。

バルク半導体中の電子は広がって分布する。この半導体に電界を加えた場合、図4のようにバンド端が傾斜するので伝導帯の電子はバンドギャップ内にも染みだして分布することになる。価電子帯中の正孔も同様にバンドギャップ中に染みだす。本来のバンドギャップエネルギーを  $E_g$  とすると、染みだした電子と正孔とのエネルギー差  $E_g'$  は  $E_g' < E_g$  である。つまり、バンドギャップよりも小さなエネルギーの光でも吸収される。図5には吸収係数の理論計算例と実測値とを示す<sup>2)</sup>。電界によりバンドギャップ内に吸収端が伸びるが、その分だけバン

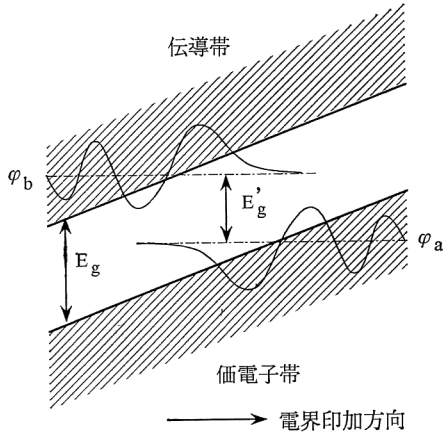


図 4 バルク半導体におけるフランツ・ケルディッシュ効果

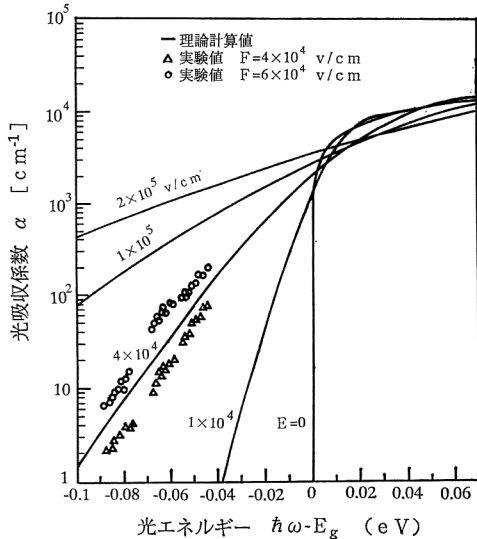


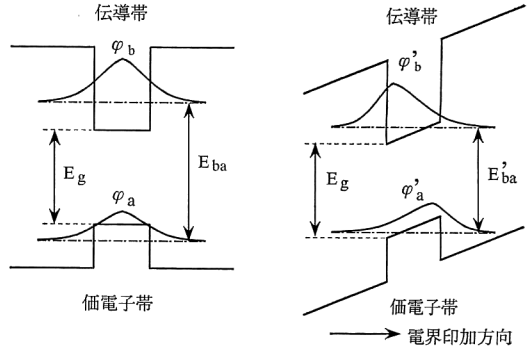
図 5 フランツ・ケルディッシュ効果の理論計算と実測値 (文献 2) による

ド内部での吸収は減少する。

### 3.2 量子井戸での電界効果

量子井戸構造での電界効果は、QCFK (quantum confined Franz-Keldish effect), または QCSE (quantum confined Stark effect) と呼ばれる<sup>3-7)</sup>。

電界がかかっていない量子井戸構造では図 6 (a) のように伝導帯と価電子帯中に電子と正孔が存在する。この時の伝導帯電子と価電子帯正孔とのエネルギー差を  $E_{ba}$  と置こう。電界が印加されると図 6 (b) のようにポテンシャルが傾斜する。電子の単位は下端側  $b'$  へ移動し、正孔は上端側  $a'$  へ移動する。したがって電子と正孔とのエネルギー差  $E_{b'a'}$  は無電界時の  $E_{ba}$  よりも小さくな



(a) 印加電界なし (b) 印加電界有り

図 6 量子井戸構造での電子分布と電界による変化

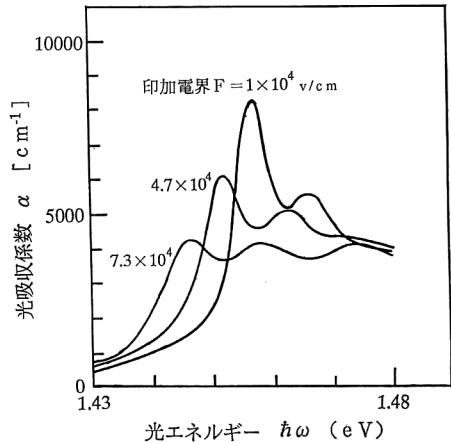


図 7 QCSE の実測例 (文献 5) による

り、光吸収端が低エネルギー側に移る。ただし、電子波動関数  $\phi_b$  と  $\phi_a$  の分布位置がずれるため、双極子能率  $R_{ba}$  あるいは遷移行列要素の大きさが小さくなり、光吸収の大きさ自身は減少する<sup>3,4)</sup>。

量子井戸構造で注目されるもう一つの特性は励起子による光吸収である。励起子とは電子と正孔が対になって存在し、相互でのクーロン引力のために個々が単独で存在する場合よりも相対エネルギーが低くなる。つまり、励起子を形成している電子は伝導帯端よりも低いエネルギーになっている。バルク半導体では自由に移動できる多くの伝導帯電子と価電子帯正孔が存在し、励起子を構成している電子と正孔との間のクーロン引力を弱めている。このため、III-V 族半導体において、励起子による光吸収はかなり小さい。しかし、量子井戸構造では電子や正孔の運動がポテンシャル障壁のために制限されているため励起子の存在が顕著になり、励起子単位での光吸収が明確になる。電界を印加すると励起子単位の移動が確

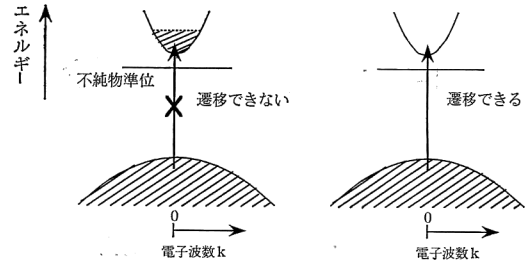
認められる。図7は電界を印加しない場合と印加した場合での光吸収の波長特性である<sup>5)</sup>。励起子単位での光吸収は  $8000\text{ cm}^{-1}$  にも達する。

4. 電子数変化

価電子帯側のエネルギー準位から伝導帯側のエネルギー準位への電子遷移によって、光が吸収され屈折率も変化する。この時、伝導帯側準位にすでに電子が存在したり価電子帯に正孔が存在すると、価電子帯側の電子は遷移できず、光吸収も屈折率変化も生じない。つまり伝導帯側の電子数を制御すれば光吸収や屈折率変化を制御できる。電子数の制御方法には2種の方法がある。

一つは図8(a)のように、ダブルヘテロ接合のp-i-n構造において順方向に電圧を印加し、電子と正孔を注入する方法である<sup>8,9)</sup>。印加電圧がゼロのときは光が吸収され、電子と正孔が注入すると光吸収がなくなる。つまり、半導体レーザーを低注入で動作している場合に対応する。電子や正孔の注入をさらに増やせば光発光が増加し、光の増幅利得も大きくなる。この方法は光を増幅するこ

ともできるので優れているように思われるが、電子や正孔を注入すると光吸収が大きい場合でも自然放出光が発生する。つまり自然放出光が光信号への雑音光として障害になる。



(a) 熱平衡状態のn形半導体 (b) 空乏化したn形半導体

図9 電子空乏化による電子遷移の制御

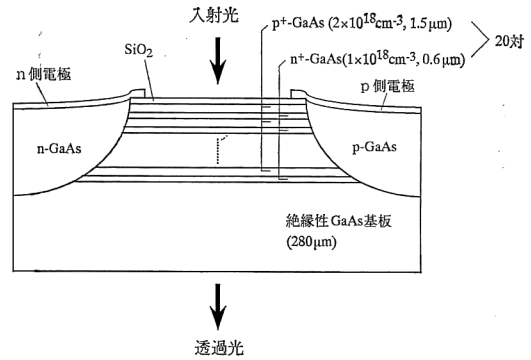


図10 電子空乏化によるEDAC光変調器の構成例

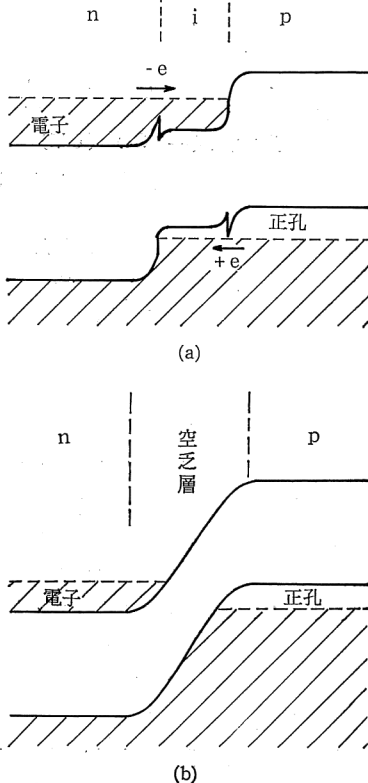


図8 電子数変化の方法

(a) 電子や正孔の注入, (b) 電子空乏化.

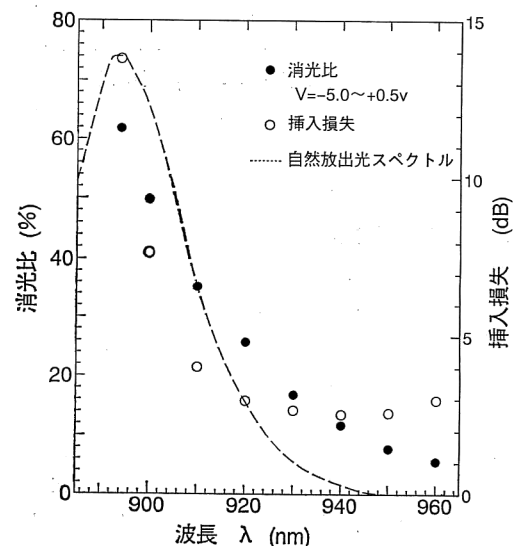


図11 EDAC光変調器の消光比特性(文献13)による)

第2の方法は、図8(b)のように p-n 接合を逆方向にバイアスする方法である<sup>10-13)</sup>。バルクの n 型半導体では熱平衡状態ですでに伝導帯電子が存在する。したがって、図9に示すように価電子帯側の電子は伝導帯側へ遷移しにくく、光は吸収されない。電子を空乏化すると光が吸収される。p 型半導体の正孔についても同様な議論ができ、正孔を空乏化すると光吸収が増加する。つまり、p-n 接合からはなれたバルク材料中では光は吸収されず、空乏層では吸収される。逆バイアスを印加し空乏層を広げると光吸収量は増える。

筆者らは、この電子空乏化による平面型半導体光変調器を開発している。図10はその構成図で、EDAC (electron depleting absorption control) 光変調器と命名した<sup>13)</sup>。図11に得られた光の on/off 比 (消光比) を示す。

## 5. ま と め

半導体光スイッチ/光変調器について構造や動作原理の観点から種々に分類し、その原理や特性を説明した。光スイッチ/光変調器は光通信や光情報処理の基幹素子として期待されているが、本格的に実用化されているものは少ない。今後の研究が大いに期待される。

## 文 献

- 1) R. H. Yan, R. J. Simes and L. A. Coldren: "Surface-normal electroabsorption reflection modulators using asymmetric Fabry-Perot structures," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27** (1991) 1922-1931.
- 2) G. E. Stillman, C. M. Wolfe, C. O. Bozler and J. A. Rossi: "Electroabsorption in GaAs and its application to waveguide detectors and modulators," *Appl. Phys. Lett.*, **28** (1976) 544-546.
- 3) 山西正道: "電界による量子井戸構造の光学特性変化と光デバイスへの応用", *応用物理*, **55** (1986) 210-218.
- 4) 山西正道: 超格子ヘテロ構造デバイス (13章), 江崎玲於奈, 榊 裕之監修編著 (工業調査会, 1988) pp. 475-509.
- 5) D. A. B. Miller, D. S. Chemla and T. C. Damen: "Electric field dependence of optical absorption near the band gap of quantum-well structures," *Phys. Rev.*, **B-32** (1985) 1043-1060.
- 6) D. A. B. Miller and D. S. Chemla: "Relation between electroabsorption in bulk semiconductors and in quantum wells: The quantum-confined Franz-Keldysh effect," *Phys. Rev.*, **B-33** (1986) 6976-6982.
- 7) D. A. B. Miller, J. S. Weiner and D. S. Chemla: "Electric-field dependence of linear optical properties in quantum well structures: Waveguide electroabsorption and sum rules," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 1816-1830.
- 8) K. Ishida, H. Nakamura, H. Matsumura, T. Kadoi and H. Inoue: "InGaAsP/InP optical switches using carrier induced refractive index change," *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987) 141-142.
- 9) B. R. Bennett, R. A. Soref and J. A. D. Alamo: "Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs and InGaAsP," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-26** (1990) 113-122.
- 10) J. G. Mendoza-Alvarez, R. H. Yan and L. A. Coldren: "Contribution of the band-filling effect to the effective refractive-index change in double-heterostructure GaAs/AlGaAs phase modulators," *J. Appl. Phys.*, **62** (1987) 4548-4553.
- 11) J. G. Mendoza-Alvarez, L. A. Coldren, A. Alping, R. H. Yan, T. Hausken, K. Lee and K. Pedrotti: "Analysis of depletion edge translation lightwave modulators," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 793-808.
- 12) M. Yamada, K. Noda, Y. Kuwamura, H. Nakanishi and K. Imai: "Semiconductor optical modulator by using electron depleting absorption control," *IEICE Trans. Electron.*, **E75-C** (1992) 1063-1070.
- 13) Y. Kuwamura, M. Yamada and M. Suzumi: "Panel-type semiconductor optical modulator using electron depleting absorption control," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 578-582.