

解説

キャリア注入型半導体光スイッチ

小泉 真里*・桐原 俊夫**・金武 達郎**・井上 宏明*

* (株)日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

** (株)日立製作所基礎研究所 〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町赤沼 2520

(1995年2月6日受理)

Semiconductor Optical Switches with Carrier Injection

Mari KOIZUMI,* Toshio KIRIHARA,**† Tatsuo KANETAKE**
and Hiroaki INOUE*

* Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji 185

** Advanced Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
2520, Akanuma, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-03

1. はじめに

21世紀の大容量情報化社会に向けて、幹線網、地域網、構内網、インテリジェントビルの内部網といったさまざまな規模の伝送網に対して、光技術の適用が急速に進められている。このような流れのなかで、伝送技術とともに通信を支えるもう一つの技術である交換の分野でも、光波の広帯域性を利用した高スループットの交換機の実現を目指し、研究開発が活発化している¹⁾。

光の特性を十分に活かすような交換機を構成するためには、交換方式を含めた検討が必要である²⁾。そこで、接続変更制御を通話の開始・終了時のみ行う交換方式である回線交換に留まらず、情報をヘッダ付きのセルに分割し、そのヘッダ情報に応じたルーティングを各セルごとに行いつつ交換する方式である非同期転送モード(ATM)交換を目指した検討も盛んになりつつある^{3,4)}。

本論文では、さまざまな交換方式において共通して求められる基本デバイスとして空間分割型光スイッチを取り上げ、特に半導体材料を用いた光スイッチを中心に解説する。ここではまず、半導体材料がキャリア注入により大きな屈折率変化を引き起こす⁵⁾という性質に加えて、きわめて小型な高利得光増幅器を構成できるという比類のない性質を併せもつことに注目し、キャリア注入

型光スイッチと光増幅器とを集積した無損失低漏話光スイッチアレイについて述べる。次に、半導体光スイッチの今後の展開の一例として、半導体材料が光励起されたキャリアによっても大きな屈折率変化を引き起こすことに注目し、ATM交換において求められるセルフルーティング機能を有する光スイッチを実現しようとする試みについて述べる⁶⁾。

2. 無損失低漏話光スイッチアレイ

2.1 キャリア注入型光スイッチの基本構造

半導体材料にキャリアを注入すると、プラズマ効果による屈折率の減少、およびバンド間遷移の吸収端波長 λ_g が短波長へ推移すること (band-filling 効果) による屈折率変化が生じる。光通信で用いられる波長に適した InP 系半導体材料でこれらの効果を利用することにより、光スイッチを作製することができる。

図1にキャリア注入型光スイッチの基本構造の一例を示す。X型に交差した光導波路の片側にY分岐光スイッチで接続した光導波路をもつことから片渡り交差構造 (single-slip structure (S³)) と呼ぶ。Y分岐光スイッチの活性領域に電流を注入すると屈折率が減少するため、光導波路を伝搬してきた光波はそこで全反射され光路が切り替わる。キャリア注入による屈折率変化には入射光に対する偏波依存性がないため、スイッチ動作時の偏波依存性が問題となる光ファイバー通信網に好適な光スイ

† (株)日立製作所 知的所有権本部

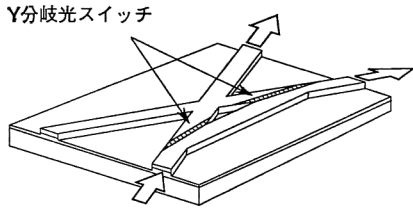


図 1 片渡り交差構造キャリア注入型光スイッチの概形図

チとなっている。

この S^3 キャリア注入型光スイッチの単位セルをクロスバー状に接続し、 N 入力 N 出力 ($N \times N$) の光スイッチアレイを形成することができる。これまでに $N=4$ までのアレイが試作されている⁷⁾。ここで、光スイッチアレイの規模拡大の上限を決めているのは損失と漏話である。半導体光スイッチの場合、損失は主に光ファイバーとの結合損失とスイッチ内の伝搬損失とから生ずる。結合損失は半導体光導波路のモードサイズ (半導体レーザーでは通常 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 程度) が通常のシングルモードファイバー ($10 \mu\text{m}$) と大きく異なることから起こる。結合効率を上げるためにレンズ加工を施した先球ファイバーを用いた場合でも 2 dB 以上の損失となる。また、伝搬損失は不純物による吸収、導波路側面の roughness による散乱、基板への放射などにより起こり伝搬長が長くなるほど増加する。

一方、漏話の影響は以下のように見積られる。クロスバー構造をもつ光スイッチにおいて、信号光に対する漏話光の比 SXR (signal-to-crosstalk ratio) は、入出力数 N と単位スイッチの on/off 比 (光スイッチに電流を注入したときと電流を注入しないときの出力レベルの比) X を使って次のように表すことができる⁸⁾。

$$SXR = |X| - 10 \log(N - 1)$$

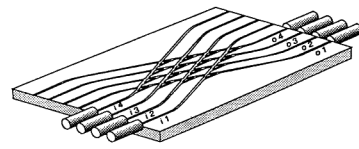
これからわかるように入出力数が増えるに従い SXR は急激に劣化する。また、スイッチアレイを多段接続してスイッチ規模を広げる場合には、さらに漏話が累積する。

先の $4 \times 4 S^3$ 光スイッチアレイでは、挿入損失が最良のスイッチ経路においても約 11 dB と比較的大きく、また漏話レベルの基準となる on/off 比も $9 \sim 25 \text{ dB}$ と素子内のばらつきが大きいという問題点があった。

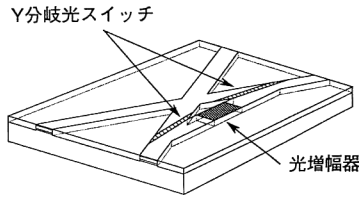
2.2 光増幅器を集積したキャリア注入型光スイッチ

2.2.1 素子構造

大規模光スイッチアレイに要求される損失の低減は、光増幅器を導入して損失を補償することによって実現される⁹⁻¹³⁾。しかし、単純に光スイッチアレイの入出力端

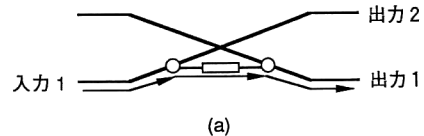


(a)

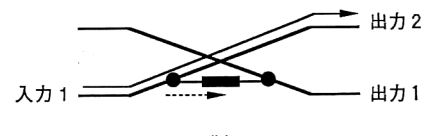


(b)

図 2 (a) 4×4 COSTA (carrier-injection type optical S^3 switch with traveling-wave amplifier) の概形図, (b) 単位セルの概形図



(a)



(b)

図 3 COSTA の動作図

(a) on 状態, (b) off 状態。

に光増幅器を集積しても、漏話特性はもとのスイッチ特性から改善されない。そこで、この損失補償機能と同時に漏話の低減、特性バラツキの補正を満たす構成として S^3 キャリア注入型光スイッチの片渡り導波路部に光増幅器を集積した構造を筆者は提案し、この光スイッチを COSTA (carrier-injection type optical S^3 switch with traveling-wave amplifier) と呼んでいる^{14,15)}。 4×4 COSTA と単位セルの概形を図 2 (a), (b) に示す。COSTA の基本アイデアは、素子の小型化が可能な S^3 キャリア注入型光スイッチの構造をそのまま活かし、光増幅器のゲート機能 (電流 on のときに光を増幅し、off のときには吸収する) を利用したことである。単位スイッチの動作を図 3 に示す。単位スイッチの二つの Y 分岐光スイッチと光増幅器は同時に on/off させる。図 3 (a) に示す on 状態では、入射した光は光スイッチで光路を

切り替えられ光増幅器で増幅され射出端へと出力される。スイッチアレイを構成したときにはスイッチング経路によって挿入損失が異なるが、スイッチング経路に対応する光増幅器の増幅度をあらかじめ調整しておくことですべての経路での損失を補正し均一化することができる。一方、図3(b)に示す off 状態では、入射した光は Y 分岐光スイッチを通過し他の交差点へと伝搬する。従来の Y 分岐光スイッチでは、この際に通過するはずの光の一部が片渡り導波路に漏れ込み、これが、on/off 比を悪化させ、特性のパラツキを起こす主な原因となっていた。COSTA では、Y 分岐光スイッチからの漏話光が off 状態にある光増幅器で吸収されるため特性が大幅に改善される。

図4に COSTA の Y 分岐光スイッチ、光増幅部、光増幅器と光導波路の結合部の断面構造を示す。Y 分岐光スイッチは、n-InP 基板、バンドギャップ波長 $1.15 \mu\text{m}$ の InGaAsP 導波層、p-InP 層からなる pn 接合により構成され、電流注入部以外には半絶縁性 Fe-InP からなる電流狭窄構造が設けられている。この Y 分岐スイッチの光導波路は分岐形状を精度よく作製するために結晶面方位依存性のないドライエッチングを用いる。しかし、従来の光増幅器はウェットエッチングにより結晶の面方位依

存性を積極的に用いる作製方法であり、集積する光増幅器は独自の構造が必要となる。

集積する光増幅器に要求される条件は次の2点と考えられる。すなわち、1) 光導波路と同様にドライエッチングにより作製が可能であること、2) 光導波路との結合効率が高い構造であることである。これらを満たす光増幅器の構造を図4(b)に示した。n-InP 基板、導波層、光を増幅する活性層、電流注入のための p-InP 層により構成され、光導波路と一括にドライエッチングを行い断面形状は台形となる。一括でエッチングするため導波路と増幅器の結合部での横方向のずれがなく高効率な結合が可能である。ただし、ドライエッチングで形成した場合、活性層の幅が広がらざるを得ず、キャリア密度が低下して増幅効率が悪化する問題がある。これを解決するためには材料選択性のあるエッチング液によりウェットエッチングを追加し、活性層だけをエッチングすればよい。通常の半導体増幅器では活性層の幅は $1\sim 2 \mu\text{m}$ が用いられるが活性層幅と光導波層幅が極端に異なる場合、横方向のモードサイズの違いから結合損失を生じる。そこで条件2)を満たすため結合効率が80%以上と見込まれる $3 \mu\text{m}$ としている(導波路幅は $5 \mu\text{m}$)。

一方、縦方向の軸ずれによる結合効率の低下を防ぐために共通導波層によって厚さ方向の軸合せを行うバットジョイントと呼ばれる構造を導入した。光増幅器と光導波路の結合部断面を図4(c)に示す。光導波路の導波層厚は光スイッチの効率を高めるため(キャリア注入によって生じる屈折率変化領域である導波層の光閉込め係数が大きいほどスイッチング効率は高い)多モード化しない範囲内で厚くすることが望ましく、約80%の光閉込め係数が得られる $0.7 \mu\text{m}$ としている。このとき共通導波層の厚さは光増幅器と光導波路の結合効率が最大となるように $0.3 \mu\text{m}$ としている。

以上のような構造の光増幅器を集積した 4×4 COSTA の外形寸法は $11.8 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ であった。

2.2.2 素子特性

図5に試作した 4×4 COSTA の写真およびスイッチング特性の一例を示す。スイッチング経路は入力端と出力端の番号から“E21”のように呼ぶことにする。入力端2(i2)より光を入射し、出力端1(o1)の出力E21 (switched path) と、光スイッチを通らずそのまま出力端6(o6)に出射したときE26 (through path) の光出力を観察した。光源には波長 $1.3 \mu\text{m}$ の DFB レーザーを用い、入出力端とも先球ファイバーで光結合を取っている。光増幅器への電流 (I_{amp}) を一定にし、光スイッチへ

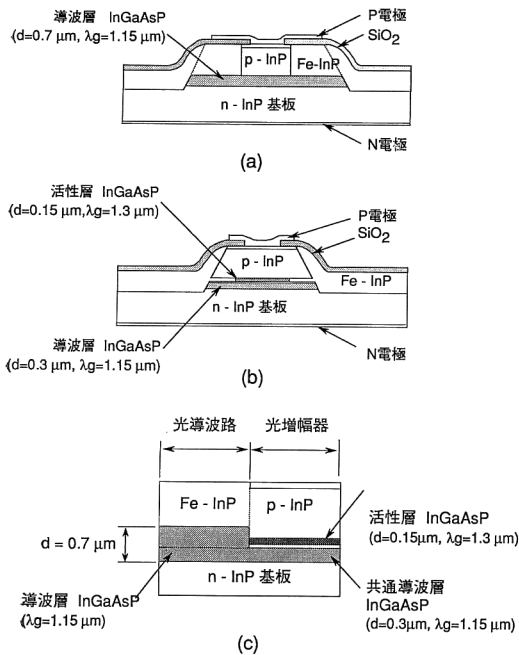


図4 COSTA の主要部断面構造図
(a) Y分岐光スイッチの断面構造図、(b) 光増幅部断面構造図、(c) 光増幅器-光導波路間のバットジョイント断面図。

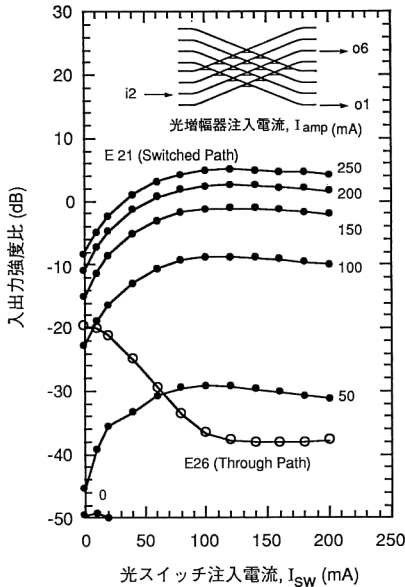
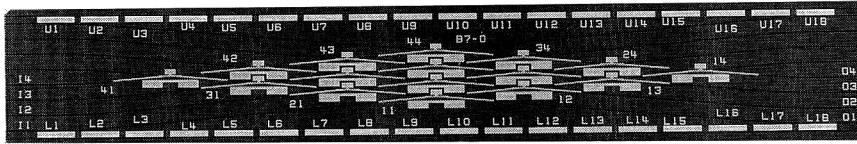


図 5 4×4 COSTA の写真およびスイッチング特性

の電流 (I_{sw}) に対してプロットした。縦軸は入力光強度で規格化しており、負側が光スイッチの損失、正側が利得を表す。測定時の入力光強度は -10 dBm であった。また、測定した試料の光増幅器の長さは $700 \mu\text{m}$ である。

Switched path において光増幅器への電流が 200 mA、光スイッチへの電流が 50 mA で両端のファイバーとの結合損を含む挿入損失を完全に補償することができた。さらに電流を加えると最大 5 dB の利得が得られた ($I_{amp} = 250$ mA, $I_{sw} = 180$ mA)。光増幅器への電流を一定にし、光スイッチへの電流を変化させていくと約 120 mA で出力光強度が飽和し、約 13 dB の出力光強度変化が得られ、集積したキャリア注入型光スイッチが良好に動作していることがわかる。Through path の挿入損失は、光スイッチへの電流が 0 mA のとき最小で 19.7 dB であっ

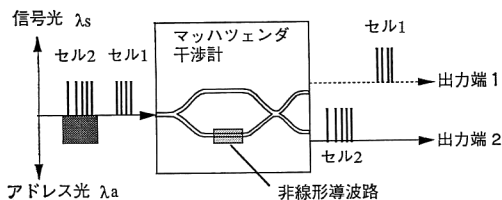


図 6 半導体非線形導波路を用いた光セルフルーチングスイッチの一例

た。光スイッチへの電流を増加させるにしたがって光出力は減衰し、最小挿入損失レベルより 16.4 dB 低下した。この結果、through path から良好な光スイッチ動作を確認することができた。Through path の挿入損失は、素子の損失と光増幅器の内部利得を推定するための目安となる。Through path の最小挿入損失時の出力が、理想的には光増幅器を集積していない光スイッチでの出力に等しいと考えられる。このことから光増幅器は出力レベルを -19.7 dB から最大 5 dB まで増幅していることとなり、集積した光増幅器の利得は半導体光増幅器として十分な特性である約 25 dB と推定することができる¹⁶⁾。

COSTA の on/off 比は、最大の出力光状態と光増幅器と光スイッチの両者に電流を加えていない状態との比と定義することができ、図 6 から 54 dB となる。

同じ試料の他のスイッチング経路について同様にして測定を行った結果、すべてのスイッチング経路 16 個のうち 7 個のスイッチング経路において無挿入損失を達成した。また、on/off 比は S^3 光スイッチより 20 dB 以上改善され ($33.1 \sim 54.6$ dB)、良好な特性が得られた。以上のように、渡り導波路に光増幅器を集積した COSTA では、無損失と漏話特性の改善が図れることが実証されている。

3. セルフルーチング機能を有する光スイッチ

3.1 基本構造

前節では、制御電流によるキャリア注入に伴って半導体の屈折率が大きく減少することを用いた光スイッチについて述べた。半導体材料は光励起されたキャリアによっても同様な屈折率変化を引き起こす。この光誘起屈折率変化は三次非線形光学過程に分類され、短波材料である GaAs/AlGaAs 量子井戸系などでは $0.25 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ の強度の光により -0.04 に及ぶ屈折率変化が報告されている¹⁷⁾。このような効果を利用することにより、光のアドレス信号に応じて光信号セルの行先を切り換える機能をもったセルフルーチング光スイッチを構成できる。その構成の一例として、片方の光路に非線形導波路を挿入した Mach-Zehnder 干渉計型光スイッチを図 6 に示した。波長 λ_s の信号光に乗ったセルの行先は、波長 λ_a の

アドレス光の有無により指定される。アドレス光を伴わないセル1は、出力端1に出力される。アドレス光を伴ったセル2は、非線形導波路部でアドレス光による屈折率変化が起こり干渉計内の位相状態が変化するため、出力端2に出力される。

このような光スイッチのスループットはスイッチの切替時間、一セル内の情報のビット数(ビット多重度)、信号速度から定まる。スループットはスイッチ切替時間が短いほど増大する。しかし、スイッチ切替時間が一定であっても、ビット多重度を増加させスイッチの切替回数を減らすことで、スループットを大きく増加させることができるため、ナノ秒程度の応答時間を有する半導体材料の非線形光学過程を用いても大きな障害にはならない。

3.2 基本特性

ここでは、光通信で用いられる波長に適し、かつ良好な量子井戸を作製可能な InGaAs/InAlAs 系¹⁸⁾を非線形導波路として用いて feasibility study を行った結果を述べる。測定は、光ファイバーで構成された Mach-Zehnder 干渉計の片方の光路に InGaAs/InAlAs 量子井戸からなる非線形導波路を挿入して行った。始めにアドレス光のないときに信号光が出力端1から出力されるように干渉計の動作点を設定しておけば、InGaAs/InAlAs 量子井戸からなる非線形導波路に $\pi/2$ 位相シフトを誘起するだけのアドレス光パルスを入射すると、Mach-Zehnder 干渉計の両腕間に半波長分の光路差が発生し、信号光が出力端2に出力される。アドレス光の波長は $1.48 \mu\text{m}$ 、信号光の波長は $1.55 \mu\text{m}$ である。

図7に得られた結果を示す。ここで、signal は 200 MHz で強度変調された光信号の波形を示し、address はパルス幅が 30 ns のアドレス光パルスの波形を示す。Out 2 には出力端2で観測された光信号を示した。予想どおり、アドレス光が入射したときだけ信号光が出力端

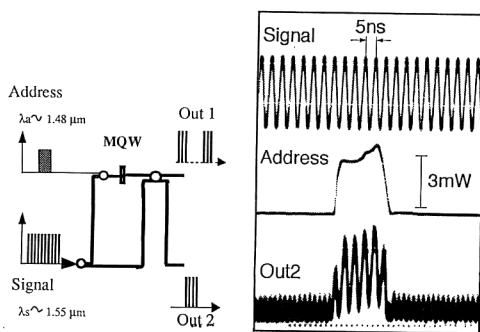


図7 全光学的光スイッチングの実験結果

2から出射されていることがわかる。スイッチングに要する時間は 1 ns 程度と見積られた。また、スイッチングに必要なアドレス光強度は約 3 mW であり、Fabry-Perot 共振器を用いて行った InGaAs/InAlAs 量子井戸の光誘起屈折率変化の測定の結果¹⁹⁾から予想される値とほぼ一致した。

以上のように、半導体導波路の光非線形性を用いることで高速光信号を内包するセルを全光学的にスイッチングできることが実証され、セルフルーチング光スイッチに向けた可能性が確認されている。

4. む す び

光波の広帯域性を利用した高スループットの交換機の実現を目指す際にさまざまな交換方式において共通して求められる基本デバイスとして、半導体材料を用いた空間分割型光スイッチについて解説した。本研究分野は、EO 効果に基づく光スイッチを除くと歴史が浅く、解決すべき問題点や改善されるべき特性、さらに実現が求められている新機能などが数多く残されている。ここではこれらのなかで、スイッチを大規模化する際に直ちに問題となる損失および漏話特性の改善に向けたアプローチとして半導体光増幅器を集積化した光スイッチアレイの例と、光信号のセルフルーチングという新機能を実現するためのアプローチとして非線形光スイッチの例を述べた。これ以外にも量子構造作製技術やデバイス作製技術の急速な進展に伴い、新しい原理・構成・構造のデバイスの提案が活発に行われている。多くの人々がこの分野に関心を寄せ、参加されることを期待したい。

文 献

- 1) C. Burke, M. Fujiwara, M. Yamaguchi, H. Nishimoto and H. Honmou: "128 line photonic switching system using LiNbO₃ switch matrices and semiconductor traveling wave amplifiers," *J. Lightwave Technol.*, **10** (1992) 610-615.
- 2) 石川 宏監修, 行松健一編著: 光スイッチング技術入門, 第一版(電気通信協会発行, オーム社, 1993) pp. 20-54.
- 3) H. Inoue, T. Kato, Y. Sasaki, K. Ishida, K. Mizuishi, E. Amada and S. Kashimura: "InP-based 4×4 optical switch module and its application to ATM switching," *OSA Proceedings Photonic Switching*, **3** (1989) p. 241.
- 4) M. Eiselt, G. Grosskopf, R. Ludwing, W. Pieper and H. G. Webber: "Photonic ATM switching with semiconductor laser amplifier gates," *Electron. Lett.*, **28** (1992) 1438.
- 5) 山田 実: "光スイッチの物理", *光学*, **24** (1995) 312-317.
- 6) T. Kanetake, S. Tanaka and H. Inoue: "All-optical self-routing switch using a nonlinear InGaAs/InAlAs

- MQW waveguide," *OSA Topical Meeting on Photonic in Switching PWE5* (1995) (to be presented).
- 7) H. Inoue, H. Nakamura, K. Morosawa, Y. Sasaki, T. Katsuyama and N. Chinone: "An 8 mm length nonblocking 4×4 optical switch array," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **SAC-6** (1988) 1262-1266.
 - 8) H. Okayama, A. Matoba, R. Sibuya and T. Ishida: "Optical switch matrix with simplified $N \times N$ tree structure," *J. Lightwave Technol.*, **7**(1989)1023-1028.
 - 9) 奥 哲, 柴田泰夫, 鈴木俊雄, 岡安雅信, 池田正宏: "4×4 LD マトリクススイッチの無損失動作", 信学秋季全体, C-161 (1992).
 - 10) M. Janson, L. Lundgren, A.-C. Mörner, M. Rask, B. Stoltz, M. Gustavsson and L. Thylén: "Monolithically integrated 2×2 InGaAsP/InP laser amplifier gate switch arrays," *Electron. Lett.*, **28** (1992) 776-778.
 - 11) M. G. Young, U. Koren, B. I. Miller, M. Chien, M. A. Newkirk and J. M. Verdiell: "A compact 2×2 amplifier switch with integrated DFB lasers operating at 1.55 μm ," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4** (1992) 1046-1048.
 - 12) J. D. Burton, P. J. Fiddymont, M. J. Robertson and P. Sully: "Low loss monolithic 2×2 laser amplifier gate switch matrix," *Proc. 13th IEEE Int. Semiconductor Laser Conf.*, Takamatsu, Japan (1992) pp. 128-129.
 - 13) M. Gustavsson, B. Lagerström, L. Thylén, M. Janson, L. Lundgren, A.-C. Mörner, M. Rask and B. Stoltz: "Monolithically integrated 4×4 InGaAsP/InP laser amplifier gate switch arrays," *Electron. Lett.*, **28** (1992) 2223-2225.
 - 14) H. Inoue, T. Kirihara, Y. Sasaki and K. Ishida: "Carrier-injection type optical S³ switch with traveling-wave amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2** (1990) 214-215.
 - 15) 桐原俊夫, 小川真里, 井上宏明, 石田宏司: "無損失低漏話 4×4 光スイッチアレイ", 信学会論文誌 C-I, **J77-C-I** (1994) 317-324.
 - 16) S. Tsuji and T. Toyonaka: "High-gain and polarization-independent semiconductor optical amplifier module," *Proc. 4th Optoelectronics Conference*, Chiba, Japan (1992) pp. 278-279.
 - 17) Y. H. Lee, A. Chavez-Pirson, S. W. Koch, H. M. Gibbs, S. H. Park, J. Morhange, A. Jeffery, L. Banyai, A. C. Gossard and W. Wiegmann: "Room-temperature optical nonlinearities in GaAs," *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986) 2446-2449.
 - 18) 田中滋久, 松岡康信, 花谷昌一, 石田宏司, 野津千秋, 中村 均: "MBE 法による InGaAs/InAlAs 系超格子 APD の結晶成長", 信学技報, **OQE 91-182** (1992) 85-90.
 - 19) T. Kanetake, H. Inoue, S. Tanaka and S. Hanatani: "Nonlinear optical properties of an InGaAs/InAlAs multiple quantum well waveguide with pulsed excitation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6** (1994) 418-421.