

# 半導体レーザー増幅器

水戸 郁夫

半導体レーザー増幅器は比較的古くから研究開発されているが、いまだ本格的な実用化には至っていない。これは  $\text{Er}^{3+}$  ドープ光ファイバー増幅器 EDFA (erbium doped fiber amplifier) が開発され 40 dB にも達する高利得、3 dB の理論限界の雑音特性など優れた光増幅特性が実現され急速に実用化されたのと好対照である。しかし、この間半導体レーザー増幅器の製作技術が進歩し入出射端に光ファイバーを接続したモジュールで 30 dB 程度の利得が得られる<sup>1,2)</sup> など性能向上が進んだ。また光ファイバー通信システムの高速化、ネットワーク化が指向されているなかで、半導体レーザー増幅器は小型、低電力であること、1.3  $\mu\text{m}$  と 1.5  $\mu\text{m}$  波長帯のどちらの素子も可能、波長変換などの非線形動作が可能などの利便性、機性能性が注目され、光ネットワークを構成するうえでのキーデバイスとして見直されている。本文では半導体レーザー増幅器の基本原則から始まり、最近の応用状況についてまとめる。

## 1. 半導体レーザー増幅器の基本原則<sup>3-5)</sup>

### 1.1 基本構造

半導体レーザー増幅器の基本構造を図 1 に示す。半導体レーザーと基本的に同様な構造を有し、光導波路である活性層へ電流を注入し光学利得を生じさせる。活性層は二重ヘテロ接合構造あるいは量子井戸構造が用いられる。活性層材料あるいは組成を変えることで増幅する波長、すなわち信号光波長に対応した素子を製作できる。光入出射端面が半導体レーザーと大きく異なり、半導体

レーザー増幅器の場合はレーザー発振を抑制するために反射率を非常に小さく低減する必要がある。

### 1.2 利得特性

半導体レーザー増幅器の基本的特性を記述する式は以下のように与えられる。

長さ  $L$  の活性層を有する光増幅器を 1 回通過するときの利得  $G_s$  は、

$$G_s = \exp[(\Gamma g - \alpha)L] \quad (1)$$

$\Gamma$ : 活性層への光閉込め係数,  $g$ : 単位長さ当たりの利得,  $\alpha$ : 単位長さ当たりの活性層の吸収損失で与えられる。ここで単位長さ当たりの利得  $g$  は、近似的に以下のように表現される。

$$g = a(N - N_g) - b(\omega - \omega_0)^2 \quad (2)$$

$N$ : キャリヤー密度,  $N_g$ : 導波路が透明になるときのキャリヤー密度,  $\omega$ : 増幅波長の振動数,  $\omega_0$ : 活性層の利得がピークになる波長の振動数,  $a, b$ : 材料の定数,  $a, b, N_g$  などは材料によって異なる。

### 1.3 利得変動

図 1 の構造の両端面に  $R_1, R_0$  の端面反射率がある場合には両端面の間でファブリー・ペロー (Fabry-Perot) 共振器が形成される。この結果半導体レーザー増幅器の利得  $G$  は波長依存性を有する。利得の波長に対する変動量  $\Delta G$  は

$$\Delta G = \{(1 + \sqrt{(R_1 R_0) G_s}) / (1 - \sqrt{(R_1 R_0) G_s})\}^2 \quad (3)$$

で与えられる。

(1)~(3) の式で  $g, a, \Gamma, R_1, R_0$  は一般に偏光依存性を有することから、入射偏光に対して利得の変動が生じる。

以上のような利得の入射波長依存性、偏光依存性があると半導体レーザー増幅器の適用範囲が大きく制限される

Semiconductor laser amplifier (1996 年 8 月 8 日受理)  
Ikuo MITO NEC 光エレクトロニクス研究所 (〒305 つくば市御幸が丘 34)

ることから、後述するように端面反射率の低減による波長依存性の低減、活性層断面の等方化などによる偏光依存性の低減などが行われている。

#### 1.4 飽和出力

半導体レーザー増幅器の注入電流を一定とした場合でも、入射信号光強度  $P_{in}$  を増加させると増幅光強度  $P_{out}$  が増加し活性層内のキャリア密度を減少させるために利得  $G$  が減少する。利得  $G$  が  $1/2$  になるときの増幅信号光強度は飽和出力  $P_{sat}$  と定義される。

$$G = G_0 / (1 + P_{out} / P_{sat}) \quad (4)$$

$$P_{sat} = (Wd_a / \Gamma)(h\nu / A\tau) \quad (5)$$

ここで  $G_0$ ,  $W$ ,  $d_a$ ,  $A$ ,  $\tau$  は未飽和状態の利得、活性層幅、活性層厚、微分利得 ( $A = dg/dN$ )、キャリア寿命を表す。飽和出力  $P_{sat}$  を大きくすることはブースター増幅器や中系増幅器への適用を図るうえで重要である。

#### 1.5 雑音特性<sup>6)</sup>

半導体増幅器からは誘導放出で増幅された信号光と自然放出光が出射する。半導体増幅器からの出射光が有する雑音は、信号光ショット雑音、自然放出光ショット雑音、信号光と自然放出光のビート雑音、自然放出光ど

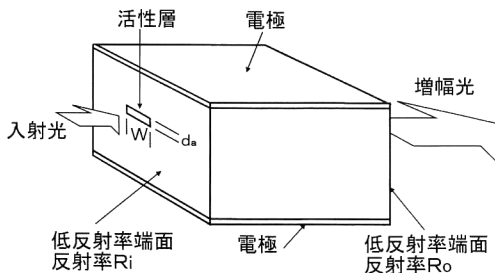


図1 半導体レーザー増幅器の構造模式図。

うしのビート雑音である。数十 nm の半値幅の自然放出光は狭帯域フィルターを半導体増幅器の後段に設置することにより除去できるが、信号光と同じ波長域の自然放出光は信号光と分離することはできず本質的な雑音となる。入射信号光と出射信号光の雑音比 ( $SNR_{in}/SNR_{out}$ ) で定義される雑音指数 NF は反転分布パラメーター  $N_{sp}$  を用いて次のように与えられる。

$$NF = 1/G + 2n_{sp} \quad (6)$$

$$n_{sp} = [N/(N - Ng)] [\Gamma g / (\Gamma g - \alpha)] \quad (7)$$

低雑音化には  $Ng$ ,  $\alpha$  を小さく設計することが有効である。

## 2. 半導体レーザー増幅器の特性

### 2.1 半導体レーザー増幅器の報告例

半導体レーザー増幅器の利得、光出力の増大など性能向上に向けて各種の研究機関で開発が進められている。表1に最近の代表的な報告例をまとめる。半導体レーザー増幅器の主たる応用が光通信であることから材料として InGaAsP/InP 系半導体を用いられ、波長も 1.3  $\mu\text{m}$  帯と 1.5  $\mu\text{m}$  帯にまとまっている。半導体レーザー増幅器の利得や波長依存性、偏光依存性、飽和出力などの性能を向上させるために、端面反射率や活性層の形成方法に最も注意が払われている。したがって表1では端面構造と活性層構造を中心として報告例をまとめた。

### 2.2 端面反射率

半導体レーザー増幅器の端面反射率が大きいと、電流注入し利得を増大させたときに容易にレーザー発振してしまうために、信号光利得を大きくとれない。端面反射率の低減には図2に示すように、(a)アンチレフレクション (AR) コート膜形成<sup>9)</sup>、(b)活性層となる光導波路の

表1 半導体レーザー増幅器の報告例のまとめ。

報告者	材料 活性層	端面構造 反射率	波長 ( $\mu\text{m}$ )	最大利得 (dB)	利得の波長 依存性 (dB)	利得の偏光 依存性 (dB)	飽和出力 (dBm)	文献
車ら	InGaAsP バルク	窓/AR $3 \times 10^{-4}$	1.562	26	1.5 dB	1.3	+6.5	7
Zahら	InGaAsP バルク	斜め導波路/AR $< 1 \times 10^{-4}$	1.492	23	$< 0.5$	6	+3.5	8
辻ら	InGaAsP バルク	斜め導波路/窓/AR $3.6 \times 10^{-5}$	1.505	28	$< 0.4$	$< 1$		9
北村ら	InGaAsP バルク	窓/AR	1.31	29			+6	10
Eisensteinら	InGaAs MQW	ARコート $1 \times 10^{-4}$	1.50	19			+16.2	11
Tiemeijerら	InGaAsP 歪みMQW	斜め導波路/窓/AR $3 \times 10^{-6}$	1.31	モジュール 利得:33 dB	$< 0.5$	$< 0.5$	モジュールの 飽和出力:+13	1
Doussiereら	InGaAsP バルク	斜め導波路/窓/AR $10^{-5}$	1.53	モジュール 利得:29 dB	$< 0.5$	$< 0.5$	モジュールの 飽和出力:+10	2

両端を端面から遠ざけて内部に埋め込み実質的な端面反射率を減少させる窓端面構造<sup>7)</sup>, (c)光導波路を端面に対して斜めにすることにより実効的に端面反射率を低減する方法<sup>8)</sup>などが用いられている。(a)~(c)の方法の組合せにより  $10^{-4}$  から  $10^{-6}$  の端面反射率が実現され、光ファイバーを両端面に実装させたモジュールの状態では 30 dB を超える増幅利得が実現されている<sup>1)</sup>。

### 2.3 利得偏光依存性の解消

利得の偏光依存性を解消するには活性層の増幅特性、端面反射率の偏光依存性をなくす必要がある。(a)等方な断面形状を有する活性層を形成する方法<sup>7,10)</sup>, (b)圧縮歪みと引っ張り歪みの量子井戸(QW)を組み合わせた多重量子井戸(MQW)活性層を用いる方法<sup>1)</sup>が報告されている。(a)の方法は、通常の偏平な断面形状の活性層ではTEモードとTMモードの光閉込め係数 $\Gamma$ が異なるために偏光依存性が生じることに着目し、等方な断面形状を形成している。図3は活性層を有機金属気相成長法(MOVPE)により、形成した素子の構造図である<sup>10)</sup>。断面の操作電子顕微鏡写真のように幅 $0.4\ \mu\text{m}$ 、厚さ $0.3\ \mu\text{m}$ 程度のほぼ等方な断面形状が得られている。こ

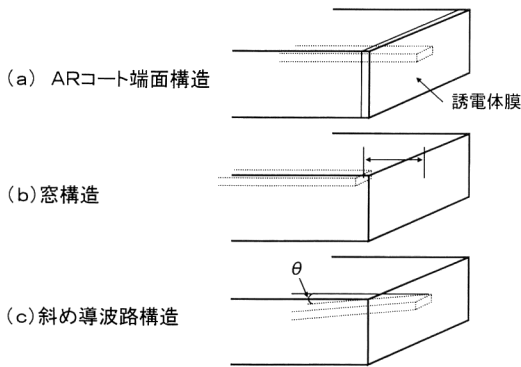


図2 端面構造の種類。(a)ARコート端面構造、(b)窓構造、(c)斜め導波路構造。実際にはこれらの組合せの構造が用いられている。

の結果、図4に示す4個のアレイ素子作製結果からもわかるようにTE、TMモード間の利得差は0.5 dB以内と小さく抑制され、その均一性も良好である。

(b)の方法は、InGaAsP層は圧縮歪みQWの場合にはTEモードの利得が生じ、引っ張り歪みQWの場合にはTMモード利得が生じることを用いている。図5に示すように3層の圧縮歪みQWと4層の引っ張り歪みQWを組み合わせることで高利得状態において偏光依存性が解消されている<sup>1)</sup>。

### 2.4 飽和光出力の増大

半導体レーザー増幅器の光出力を増大する、すなわち飽和光出力 $P_{\text{sat}}$ を増大するには、式(5)から、光閉込め係数 $\Gamma$ 、および微分利得 $A$ 、キャリア寿命 $\tau$ の減少が必要である。量子井戸層数の少ないMQW活性層を用いると $\Gamma, A$ を低減することが可能であり飽和出力 $P_{\text{sat}}$ を増大できる。表1にあるようにEisensteinらはTEモード利得のみであるが+16.2 dBmの飽和出力を実現している<sup>11)</sup>。

## 3. 応用

### 3.1 光通信の光増幅器

半導体レーザー増幅器はEDFAに比較し、増幅利得が小さい、雑音指数が大であるなどの理由により、

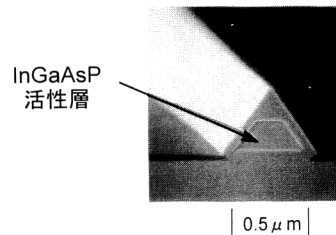


図3 選択MOVPE成長を用いて形成された狭ストライプで横幅、膜厚がほぼ等方なInGaAsP活性層の断面写真(北村らによる<sup>10)</sup>)。

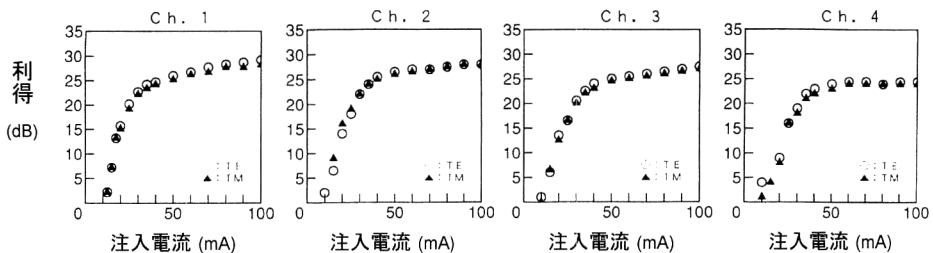


図4 4チャンネルアレイ半導体レーザー増幅器の利得特性(北村らによる<sup>10)</sup>)。

EDFAのような実用化は進展していない。しかし最近増幅利得が向上しており、光前置増幅器として受信感度を改善する実験などが行われている。図6はDurhuusらにより実験された2.5 Gb/sおよび10 Gb/sの受信感度測定結果である<sup>12)</sup>。光ファイバー間利得が28 dBの高利得1.5 μm帯半導体レーザー増幅器モジュールが使用

されている。雑音指数は6 dB、結合損失分を入れると7.8 dBである。2.5 Gb/s、10 Gb/s信号光の受信感度(10<sup>-9</sup>の信号誤り率を与える入射光強度)は-40.1 dBm、-32.4 dBmが得られている。この値は0.98 μmの励起光源を用いたEDFAの場合に比べて3~4 dB程度の感度低下にとどまっている。半導体レーザー増幅器の駆動電流は100 mA程度であり、EDFAに比べてコンポーネント数が少ないこと、消費電力が小さい、また1.5 μmのみに限定されるEDFAに比べて1.2 μmから1.6 μm帯の任意の波長域の素子を作製できるなどの特長があり、今後WDMシステムなどへの適用が期待される。

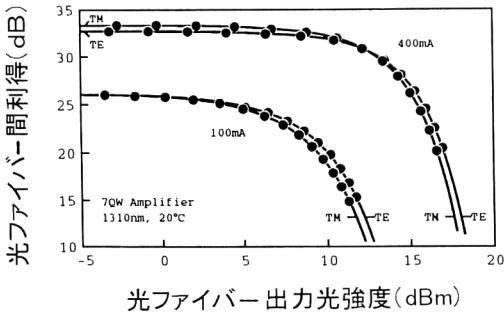


図5 MQW 活性層を有する半導体レーザー増幅器の増幅特性 (Tiemeijer らによる<sup>11)</sup>)

### 3.2 光ゲートスイッチ (SW)

半導体レーザー増幅器を光ゲートSWとして用い、高い消光比を実現するとともに一定程度の利得を与えることが可能となっている<sup>13)</sup>。図7(a), (b)に用いられた半導体レーザー増幅器のモジュール特性と、駆動電流

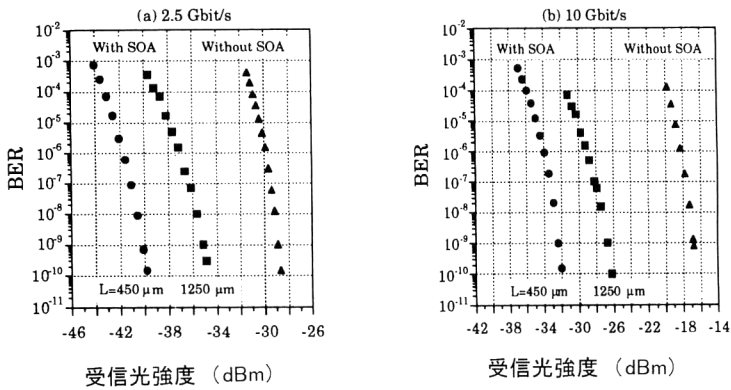
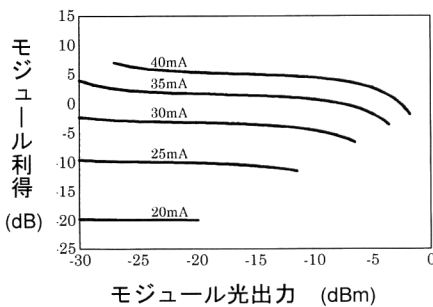
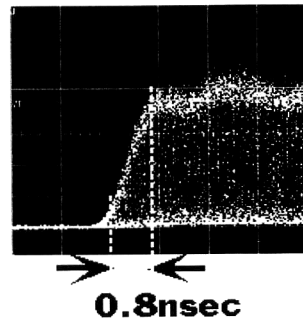


図6 半導体増幅器を光前置増幅器として用いた受信器の感度特性 (Durhuus らによる<sup>12)</sup>)



(a)



(b)

図7 半導体レーザー増幅器を光ゲートSWとして用いた特性。光ファイバーモジュールの特性(a)と2.5 Gb/sの信号ストリームを切り換えたときの立ち上がり特性(b) (北村らによる<sup>13)</sup>)

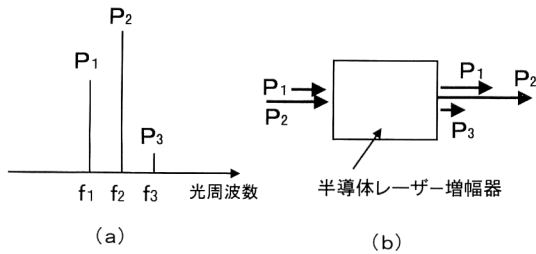


図8 四光波混合に関する光周波数の関係(a)と半導体レーザー増幅器で四光波混合を発生させる入出力光の関係を模式的に示す図(b).

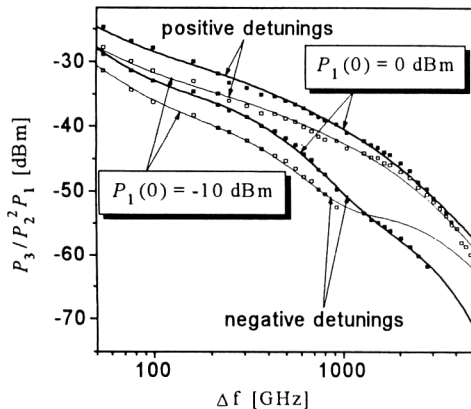


図9 半導体レーザー増幅器内での四光波混合による波長変換効率の測定結果 (Koltchanov らによる<sup>14)</sup>。

27 mA で ‘off’ 状態から ‘on’ 状態へと切り換えたときの信号光の変化の様子を測定した結果を示す。2.5 Gb/s の信号光ストリームを約 0.8 ns の速度で切り換えている。消光比は 60 dB 以上と大きく半導体レーザー増幅器を挿入したことによる信号光品質の劣化は見られていない。このように高速、低電流で駆動でき、消光比も大きくとることができることから、半導体レーザー増幅器をアレイ状に配置することで並列信号の光路切り換えを行うマトリクス光 SW を構成することも可能である。

### 3.3 波長変換

半導体レーザー増幅器への入射光強度が変化すると内部でキャリア密度変動が生じる。これに伴う屈折率変化などの非線形現象を利用し、波長変換など新しい機能を実現する“光-光制御”技術が注目され種々の実験が試みられている。

図8に四光波混合を用いた波長変換を示す。半導体レーザー増幅器に強度の大きな励起光  $P_2$  (周波数  $f_2$ ) を入れた状態で入射光  $P_1$  (周波数  $f_1$ ) を加えると、 $P_2$  と  $P_1$  との間でビートが発生する。半導体レーザー増幅器

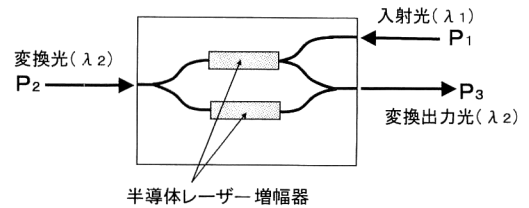


図10 半導体レーザー増幅器を用いて Mach-Zehnder 干渉器を構成する模式図 (Mikkelsen らによる<sup>15)</sup>。

内部のキャリアはビート周波数  $\Delta f = f_2 - f_1$  で揺さぶられ、半導体レーザー増幅器内部に屈折率変調が生じさせる。この結果、 $P_2, P_1$  に対しビート周波数  $\Delta f$  分の周波数シフトを生じた変換光が発生する。最も光強度の高い励起光  $P_2$  に対しては周波数  $f_3 (= f_2 + \Delta f)$  の変換光  $P_3$  が発生する。この変換効率は  $P_3/P_2^2P_1$  で与えられ、図9に示すようにビート周波数依存性を有し  $\Delta f$  が数十 GHz では  $10^{-3}$  程度以下である<sup>14)</sup>。

四光波混合により入射光  $P_1$  の周波数  $f_1$  を  $f_2$  に対して対称な周波数  $f_3$  へと波長変換することができる。このような波長変換技術は長距離光ファイバー伝送において、波長分散により生じる信号光歪みを回復させる手法として実験検討されている。しかし変換効率が小さくまた入射光波長依存性が大きいことが課題である。

半導体レーザー増幅器内部での屈折率変化を用い光干渉系を構成し、波長変換を行う方法も試みられている。図10に半導体レーザー増幅器を用い Mach-Zehnder 干渉器を構成した波長変換器を示す<sup>15)</sup>。入射信号光  $P_1(\lambda_1)$  が入力されていない状態では、Mach-Zehnder 干渉器は変換光の波長  $\lambda_2$  に対して両側のアームで光路長差が半波長であるが、入射光  $P_1$  を入れることで半導体レーザー増幅器の屈折率を減少させ光路長差をなくし、波長  $\lambda_2$  の変換出力光  $P_3$  を出射する。入射光  $P_1$  の強度変化に伴い変換出力光  $P_3$  の強度が変化し波長変換が行われる。

このような変換系では変換光の波長を半導体レーザー増幅器の利得波長帯域内で任意に設定できること、変化強度を大きくとれることなどの有利さがあるが、半導体レーザー増幅器内部に所定の屈折率変化を引き起こすために入射信号光強度範囲が制限されるという課題がある。

半導体レーザー増幅器について原理から応用までをまとめた。近年の製作技術の進展により高性能の素子が実現されている。EDFA には性能面で劣るものの小型、

低消費電力, 広い動作波長範囲などの優れた特長もあり, 光前置増幅器や光ゲート SW などとして今後の実用化が期待される. また半導体レーザー増幅器内部での非線形現象を利用した波長変換などは光通信ネットワークを構成していく場合のキーとなる技術として注目される.

## 文 献

- 1) L. F. Tiemeijer, P. J. A. Thijs, T. van Dongen, J. J. Binsma, E. J. Jansen and S. Walczyk: "33 dB fiber to fiber gain +13 dBm fiber saturation power polarization independent 1310 nm MQW laser amplifiers," *Optical Amplifier and Their Applications (OAA) '95*, PD-1 (Dabos, Switzerland, 1995).
- 2) P. Doussiere, F. Pommerau, D. Leclerc, R. Ngo, M. Gaix, T. Fillion and P. Bousselet: "Polarization independent 1550 nm semiconductor optical amplifier packaged module with 29 dB fiber to fiber gain," *Optical Amplifier and Their Applications (OAA) '95* (Dabos, Switzerland, 1995) pp. 119-122.
- 3) T. Saitoh and T. Mukai: "1.5  $\mu\text{m}$  GaInAsP travelling-wave semiconductor laser amplifier," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1987) 1010-1020.
- 4) M. J. O'Mahony: "Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems," *J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 531-544.
- 5) J. C. Simon: "Polarization characteristics of a travelling-wave-type semiconductor laser amplifier," *Electron. Lett.*, **18** (1982) 438-439.
- 6) Y. Yamamoto: "Noise and error rate performance of semiconductor laser amplifier in PCM-IM optical transmission systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 1073-1081.
- 7) I. Cha, M. Kitamura, H. Honmou and I. Mito: "1.5  $\mu\text{m}$  band travelling-wave semiconductor optical amplifier with window facet structure," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1241-1242.
- 8) C. E. Zah, R. Bhat, S. G. Menocal, N. Andreadakis, F. Favire, C. Caneau, M. A. Koza and T. P. Lee: "1.5  $\mu\text{m}$  GaInAsP angled-facet flared-waveguide travelling-wave amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2** (1990) 46-47.
- 9) S. Tsuji, T. Toyonaka, M. Haneda and Y. Ono: "High-gain, polarization-independent semiconductor optical amplifier with large optical cavity and angled buried facet," *Optical Amplifier and Their Applications (OAA) '90* PD-5 (Monterey, USA, 1990).
- 10) S. Kitamura, K. Komatsu and M. Kitamura: "Very low power consumption semiconductor optical amplifier array," *Optical Amplifier and Their Applications (OAA) '94* (Breckenridge, USA, 1994) pp. 37-39.
- 11) G. Eisenstein, U. Koren, G. Raybon, T. L. Koch, J. M. Wisenfeld, M. Wegener, R. S. Tucker and B. I. Miller: "Large- and small-signal gain characteristics of 1.5  $\mu\text{m}$  multiple quantum well optical amplifiers," *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990) 1201-1203.
- 12) T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, K. E. Stubkjaer, P. Doussier, G. Garabedian, C. Graver and D. Leclerc: "High performance semiconductor optical preamplifier," *Optical Amplifier and Their Applications (OAA) '94* (Breckenridge, USA, 1994) pp. 13-15.
- 13) S. Kitamura, S. Takahashi, T. Kato, N. Kimura, K. Kurata and M. Yamaguchi: "Small switching current SOA gate," *Optoelectronics and Communications Conference (OECC) '96* (Makuhari, Japan, 1996) pp. 204-205.
- 14) I. Koltchanov, S. Kindt, K. Peterman, S. Diez, R. Ludiwig, R. Schnabel, H. G. Weber, R. Schimpe and G. Kristen: "Saturation and gain dispersion effects on four wave mixing in semiconductor laser amplifiers," *Optical Amplifier and Their Applications (OAA) '95* (Dabos, Switzerland, 1995) pp. 234-237.
- 15) B. Mikkelsen, T. Durhuus, C. Joergensen, S. L. Danielsen, R. J. S. Pedersen and K. E. Stubkjaer: "Wavelength conversion using interferometric structures containing semiconductor optical amplifiers," *Optical Amplifier and Their Applications (OAA) '95* (Dabos, Switzerland, 1995) pp. 238-241.