

解説

半導体レーザー光増幅

望月清文

KDD 目黒研究所光通信システム研究室 〒153 東京都目黒区中目黒 2-1-23

(1989年2月16日受理)

Semiconductor Laser Amplifiers

Kiyofumi MOCHIZUKI

KDD R&D Laboratories, 2-1-23, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo 153

1. ま え が き

光増幅器を用いた光通信システムを構築することは、光通信の研究に従事する人達にとって長年の夢であり、これまで多くの研究がなされてきた¹⁻⁷⁾。とくに、大洋横断海底ケーブルシステムのような多中継システムにおいては、中継器の簡素化や、システムの多機能化等が期待されるため、光増幅は非常に魅力的な技術である。光増幅器は図1に示すように、①利得が伝送速度に依存しない、②波長多重信号や周波数多重信号の一括増幅が可能である、③双方向信号の増幅が可能である、④強度変調された信号も周波数変調された信号もともに増幅することができる等の特長がある。光増幅の方法としては、主に、半導体レーザーを基本とするものと、光ファイバを基本とするものがある。ここでは、半導体レーザーを基本とする光増幅に関し、最近の研究開発状況について報告する。

半導体レーザーを基本とする光増幅には、主に二つのタイプがある。一つは、通常の半導体レーザーをそのまま光増幅素子として使うもので、一般にファブリー・ペロー型光増幅 (FPA) と呼ばれている。FPA は、通常のファブリー・ペロー型半導体レーザーを閾値電流より若干低い動作電流で駆動して用いる。もう一つは、ファブリー・ペロー型半導体レーザーの両端面に反射防止膜を施し、信号光を進行波的に増幅する進行波型光増幅 (TWA) である。特性の良い TWA を得るためには、反射率のできるだけ低い反射防止膜を施すことが重要であるが、これまでに報告されている TWA の多くは、十分な低反射率の反射防止膜が施されていないため、準

進行波型光増幅 (NTWA) と呼ばれることもある。ここでは、これらを総称して TWA と呼ぶことにする。

FPA と TWA とは、増幅特性に大きな違いがある。最も典型的な特性の違いは、利得の波長特性である。利得の波長特性の一例として Eisenstein らによって報告されている実験結果を図2に示す⁸⁾。この結果は、波長 1.5 μm 帯で測定されたもので、FPA においては、基本となる半導体レーザーの縦モードごとに利得にピークが現われ、最大利得と最小利得との差が 10 dB 以上にもなる。このため、利得帯域としては非常に狭くなってしまふ。これに対し、TWA では、最大利得と最小利得との差が少なく、低反射率の反射防止膜を施した理想的な TWA では、数十 nm の波長域において、利得はほぼ一定となる。このため、TWA では、温度変化に伴う利得変動が少ないのに対し、FPA では、温度変化に伴って最大利得を与える波長が大きく変化する。また、後述するように、FPA では TE モードと TM モードとの間で利得が相当異なるため、偏光制御等の技術が必要となる。

2. 利 得 特 性

2.1 基本理論

半導体レーザー光増幅の利得 G は、増幅媒質で構成されたファブリー・ペロー共振器の入出力の関係から求められ、一般に次の式で表わされる^{3,5)}。

$$G = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s}{(1-\sqrt{R_1R_2}G_s)^2 + 4G_s\sqrt{R_1R_2}\sin^2\{2\pi(\nu-\nu_0)L/c\}} \quad (1)$$

ここで、 R_1, R_2 は、両端面の反射率、 L はキャピティ

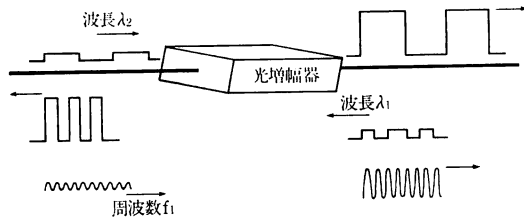


図 1 光増幅器による信号光の増幅

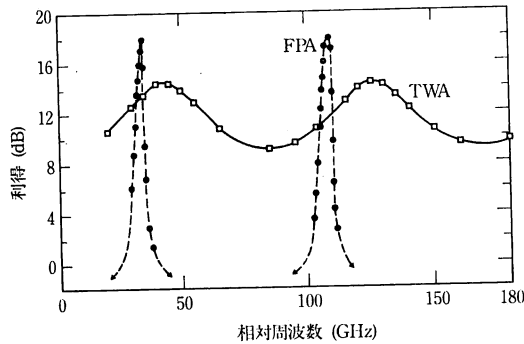


図 2 半導体レーザー光増幅器利得の波長特性⁸⁾

長、 ν_0 はファブリー・ペロー共振モードの周波数、 ν は入射信号光の周波数、 c は光速をそれぞれ表す。また、 G_s は、光が入射端から出射端に行く間に受ける単一通過利得であり、モード閉じ込め係数 (Γ)、素子の利得係数 (g) および吸収係数 (α) 等と関係し次式で表わされる。

$$G_s = \exp [(\Gamma g - \alpha)L] \quad (2)$$

端面反射率に対する G_s と G との関係を図 3 に示す。図より、端面反射率が下がるに従って同じ G_s に対する利得は低下し、 $G = G_s$ の関係に近づく。このため、同じ利得を得るには、TWA では、FPA より G_s を大きくする必要があり、それだけ多くの注入電流が必要とな

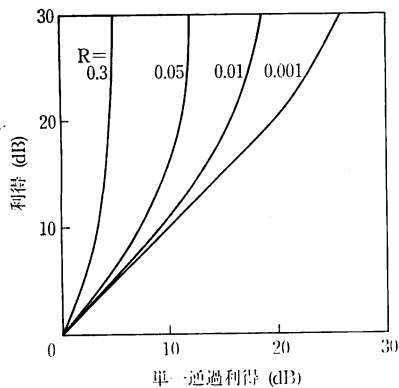


図 3 端面反射率に対する G_s と G との関係

る。

2.2 波長特性

光増幅器では、波長多重信号の一括増幅や、温度変化に対しても安定な増幅を得るために、波長による利得偏差 (ゲインリップル) ができるだけ少ないことが望ましい。半導体レーザー光増幅器の場合、この利得偏差は端面の反射率に大きく依存している。(1)式を用いると、利得偏差と端面反射率との関係が次式のように表わされる。

$$\Delta G = (1 + \sqrt{R_1 R_2} G_s)^2 / (1 - \sqrt{R_1 R_2} G_s)^2 \quad (3)$$

(3)式を用いて、端面反射率に対する利得偏差の関係を利得をパラメータとして求めた結果を図 4 に示す。図より、端面反射率が利得偏差に大きく影響していることがわかる。また、端面反射率の目安として、利得 30 dB のとき、利得偏差を 1 dB 以下におさえるためには、 $R < 1 \times 10^{-4}$ とする必要があることがわかる。図 5 に、これまでに報告されている TWA の端面反射率に対する利得偏差の関係を示す。最も低い端面反射率として、

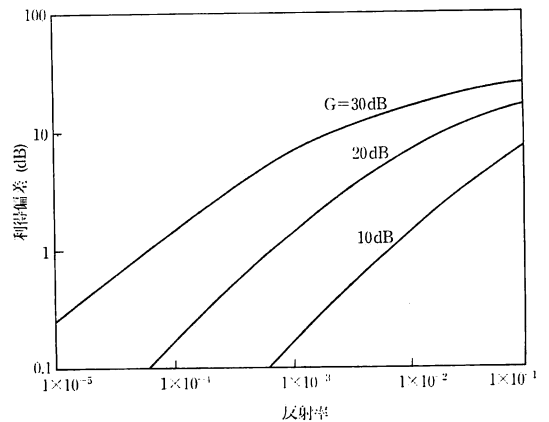


図 4 端面反射率に対する利得偏差の関係

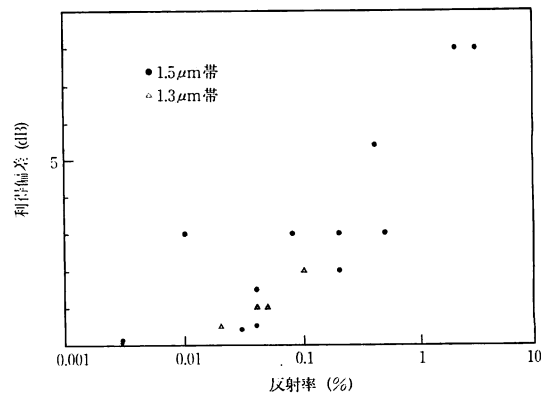


図 5 端面反射率に対する利得偏差報告結果

0.003% 以下のものが報告されている⁹⁾。このときの利得偏差は、0.2 dB 以下であった。

2.3 偏光特性

端面反射率が高いと、波長に対する利得偏差が大きくなるのに加え、TE 波および TM 波に対する利得偏差も大きくなる。このため、通常の光ファイバ通信システムに光増幅器を用いた場合、光増幅器の利得が入射信号光の偏波変動に伴って変化してしまう問題がある。半導体レーザー光増幅器の利得の偏光依存性は、主に次の二つの要因からなる。一つは、TE 波と、TM 波とで、端面反射率が異なることに起因するもので、この影響をなくすためには、端面反射率を低くする必要がある。したがって、波長による利得偏差および偏光方向による利得偏差を極力少なくするために、半導体レーザーの端面に、低反射率の反射防止膜を施す技術が非常に重要となる。利得に偏光依存性を発生させるもう一つの要因として、(2)式のモード閉じ込め係数 Γ が、TE 波と TM 波とで異なることがある。この影響をなくすためには、モード閉じ込め係数 Γ が、TE 波と TM 波とで同じになるような新しい素子構造にする必要がある。光増幅器の偏光依存性を解消するための一手段として、偏波ダイバーシティ方式を用いた方法も報告されている¹⁰⁾。

2.4 飽和特性

半導体レーザー光増幅器は、通常の電気増幅器と同様に飽和特性をもつ。齊藤らによって報告されている飽和特性についての実験結果の一例を図 6 に示す¹¹⁾。図からわかるように、TWA のほうが FPA の飽和出力より高くなっており、TWA の最大飽和出力としては、数 dBm 程度である。また、飽和出力は、使用する波長が長波長になるに従って高くなる¹²⁾。飽和出力が高いと、入射光パワーが高いときにおいても十分な利得が得られ、波長多重信号や周波数多重信号の一括増幅において有利である。また、光増幅器を中継器として用いたシス

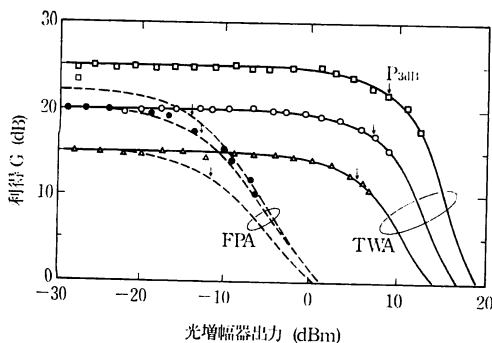


図 6 利得飽和特性¹¹⁾

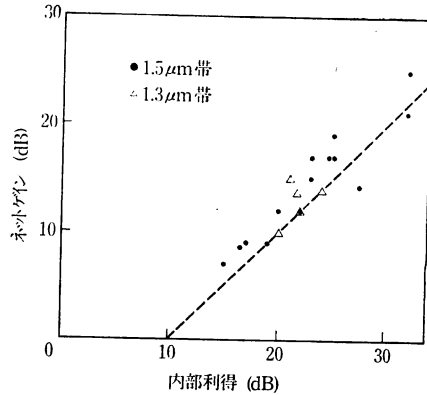


図 7 既発表データにもとづく内部利得に対するネットゲインの関係。破線は結合損失 10 dB を示す。

テムにおいては、信号光パワーを高く保つことができるため、高い信号対雑音比が期待できる。飽和出力の高い TWA を得るためには、キャリアの寿命やモード閉じ込め係数を低くし、活性層を大きくする必要がある⁶⁾。

以上、半導体レーザー光増幅器の利得に関する基本的な特性について述べたが、より良い光増幅通信システムを構築するためには、利得特性の改善に加えて、半導体レーザー光増幅器と光ファイバとを低損失で結合する技術の確立が重要である。また、TWA では、半導体レーザーの両端面の反射率が非常に低くなっているため、光ファイバとの結合によって、外部の反射点との間でレーザー共振器を作ってしまう可能性があり、低損失の結合でかつこれらの問題の発生しないモジュール化技術が重要になる。図 7 に、これまでに報告されている半導体レーザー光増幅器の内部利得と実効利得 (ネットゲイン) との関係を示す。内部利得とネットゲインとの差は、半導体レーザー増幅器と光ファイバとの結合損失であり、図より、平均値として、9~10 dB の結合損であることがわかる。ネットゲインは、10~20 dB の範囲に分布しており、最大ネットゲインとして 25 dB のものが得られている¹³⁾。

3. 雑音特性

半導体レーザー光増幅器は、信号光を増幅すると同時に自然放出光を発生する。この自然放出光は、信号に対して雑音となるため、その特性を把握しておくことは、光増幅器を用いた光通信システム的设计上非常に重要である。とくに、光増幅器を中継器として用いる長距離光増幅中継システムでは、各光増幅中継器内で発生する自然放出光が蓄積され、信号対雑音比の劣化に加え、利得

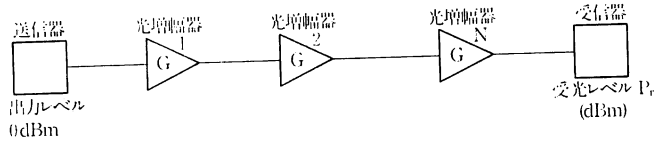


図8 多段光増幅中継システムモデル

飽和の問題が発生し、中継数や増幅器の利得を制限する大きな要因となる。自然放出光のパワー P_n は、利得と関係して一般に次式で表わされる¹⁴⁾。

$$P_n = h\nu k B (G - 1) \quad (4)$$

ここで、 $h\nu$ は光子のエネルギー、 k は過剰雑音係数、 B は光の帯域幅を表わす。自然放出光が信号光と一緒に受光器にはいると、ショット雑音に加えて、信号光-自然放出光ビート雑音や自然放出光-自然放出光ビート雑音が発生する。熱雑音のない、理想的な受信器で受光した時に得られるショット雑音が量子雑音限界を与えるが、光増幅器の雑音指数を量子雑音限界からの増加した量と定義すると、雑音指数は $2k$ で表わされる⁵⁾。TE 偏光または TM 偏光のどちらか一方のみに注目した場合、理想的な光増幅器では $k=1$ となり、雑音指数は 3 dB となる。これまで、半導体レーザー増幅器で、雑音指数の最も低いものとして、5.2 dB のものが報告されている¹⁵⁾。自然放出光の発生は、とくに多段光増幅中継システムにおいては、信号対雑音比を劣化させるが、コヒーレント光通信方式を用いることによって、自然放出光の影響を受けることの少ない通信方式が提案されている¹⁶⁾。しかし、この方式を用いた場合でも自然放出光による光増幅器の利得飽和の問題があるため、自然放出光パワーを低減するための光フィルタが必要となる。

図8に示すような N 段光増幅器を多段中継したシステムで、光増幅器によるネットゲインと中継器間の損失がバランスしている場合、 N 段目の光増幅中継器からの自然放出光パワーは NP_n となり、そのときのシステム長 l (km) は次式で与えられる。

$$l = N \{ (G - \alpha_l) / \alpha_l \} - (P_r / \alpha_l) \quad (5)$$

ここで、 P_r は受信レベル (dBm)、 α_l は光増幅器の挿入損 (dB)、 α_l は光ファイバの損失 (dB/km) を表わす。式(4)と(5)を用い、光増幅器からの自然放出光のパワーが、1 mW となる状態での光増幅器の利得とシステム長との関係について求めた結果を図9に示す。図において、パラメータは、光フィルタの通過波長幅である。この結果より、雑音による飽和という観点から見た場合、波長幅 1 nm の狭帯域光フィルタを用いることによって、理想的には利得飽和の影響を受けず、10000 km の光増幅中継システムが可能であるといえる。なお、図

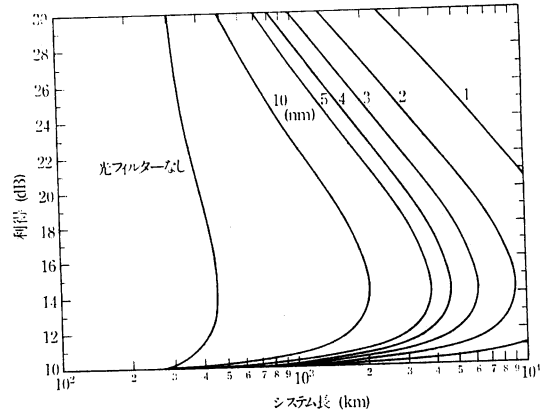


図9 光フィルタ波長幅をパラメータとしたときの利得とシステム長との関係。1 Gbit/s・FSK ヘテロダイン方式による。結合損失 10 dB、雑音指数 6 dB、光ファイバ損失 0.2 dB/km。

9に示した関係は、S/N 的には誤り率 1×10^{-9} 以下を満足している。

4. 光増幅を用いた光伝送実験

光増幅器の光通信システムへの適用としては、主に、ブースターアンプ、光中継器、前置増幅器の三つの用途がある。

光増幅器を信号の送信側に用いるブースターアンプとしては、CATV 等の放送形態をとる通信において、多分岐による信号レベルの低下を補償することへの適用が考えられる。ブースターアンプとしての伝送実験としては、2048 個の分岐を含む伝送系に 2 個の光増幅器を用い、90 チャンネルの TV 信号を伝送したものが報告されている¹⁷⁾。また、波長 1.527 μ m から、波長 1.561 μ m の波長域で、波長多重された 20 個の信号を一括増幅した実験も報告されている¹⁸⁾。

前置増幅器としての光増幅器は、受信感度の向上を目的とする¹⁹⁾。受信器の受信感度は、広帯域化に伴いとくに劣化するため、前置増幅器は、1 Gbit/s 以上の高速伝送においてはとくに有効な手段である。伝送速度 4 Gbit/s の信号を半導体レーザー増幅器を前置増幅器として用い、受信感度を 9.3 dB 向上させた実験結果が報告されている²⁰⁾。

表 1 半導体レーザー光増幅器を中継器とした光通信システム実験

伝送方式	全伝送距離 (km)	光増幅器段数	総利得 (dB)	波長 (μm)	研究機関	文献
IM-DD 140 Mbit/s	~120	2	26	1.5	BTRL	20)
IM-DD 280 Mbit/s 565 Mbit/s	50	1	12.5	1.525 1.506	BTRL	21)
FSK heterodyne 400 Mbit/s	372	4	47.7	1.5 μm 帯	AT & T	22)
IM-DD 1 Gbit/s	313	4	40.9	1.54	AT & T	23)
DPSK heterodyne 400 Mbit/s	~75	2	14.5	1.488	AT & T	24)
IM-DD 2 Gbit/s	88	1	8	1.548	KDD	25)
DPSK heterodyne 560 Mbit/s	~54	2	30	1.288	HHI	26)
IM-DD 2 Gbit/s	210	2	27	1.516	BTRL	27)
IM-DD 1.2 Gbit/s	200	1	15	1.5	BTRL	6)

光増幅器を中継器として用いることは、大洋横断等の長距離光通信においては非常に魅力的な技術であり、近年多くの光増幅中継伝送実験が報告されている。これまでに報告されている半導体レーザー光増幅器を中継器とした伝送実験結果をまとめて表 1 に示す。光増幅器を光中継器として用い、最も長距離の伝送を行なった例として、四つの TWA を用いて、400 Mbit/s-FSK 信号を 372 km 伝送したものがある²²⁾。このときの TWA の総利得は、47.7 dB であり、伝送後のパワーペナルティは、ビット誤り率 1×10^{-9} に対して 1.5 dB であった。

半導体レーザー光増幅器の応答周波数帯域として、50 ps の短光パルスを用いた実験結果より、50 GHz 以上であることが確認されている²⁸⁾。また、半導体レーザー光増幅器を用いた高速信号の伝送実験としては、伝送速度 5 Gbit/s の信号の増幅実験が報告されている²⁹⁾。

5. ま と め

半導体レーザー光増幅器について、主に光通信用という観点から最近の開発状況について述べた。半導体レーザー光増幅器の実用化にあたっては、偏光依存性が小さく、利得の安定した低雑音な増幅素子の開発に加え、光増幅器としての最適なモジュール化技術の確立が重要であろう。半導体レーザー光増幅器は、増幅という線形な特性のほかに、四光子混合^{30,31)}や双安定³²⁾等の非線形な特性がある。四光子混合は、周波数多重されたコヒーレント信号を増幅した場合、クロストークの問題を発生さ

せるが、光周波数変換としての機能をもつため、この活用も今後の研究課題となろう。また、双安定な現象は、光波形等化としての機能を提供する。このほか、光増幅器による光スイッチの提案等も報告されている³³⁾。このように、光増幅器には単なる増幅器としての機能だけでなく、さまざまな機能を発揮する可能性が秘められており、これらの分野の研究が、光技術の適用範囲をさらに広げていくものと期待される。

本文に関しご討論をいただいた KDD 目黒研究所の関係各位に感謝いたします。

文 献

- 1) H. Steinberg: "The use of laser amplifier in a laser communication system," Proc. IEEE, **51** (1963) 943.
- 2) S. D. Personick: "Applications for quantum amplifiers in simple digital optical communication systems," Bell Syst. Tech. J., **52** (1973) 117-133.
- 3) Y. Yamamoto: "Noise and error rate performance of semiconductor laser amplifiers in PCM-IM optical transmission systems," IEEE J. Quantum Electron., **QE-16** (1980) 1073-1081.
- 4) T. Mukai and Y. Yamamoto: "Noise in an AlGaAs semiconductor laser amplifier," IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 564-575.
- 5) J. C. Simon: "Semiconductor laser amplifier for single mode optical fiber communications," J. Opt. Commun., **4** (1983) 51-62.
- 6) M. J. O'Mahony: "Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-6** (1988) 531-544.
- 7) T. Saitoh and T. Mukai: "Recent progress in semiconductor laser amplifiers," IEEE J. Lightwave

- Technol., **LT-6** (1988) 1656-1664.
- 8) G. Eisenstein, R.M. Jopson, R.A. Linke, C.A. Burrus, U. Koren, M.S. Whalen and K.L. Hall: "Gain measurements of InGaAsP 1.5 μm optical amplifiers," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 1076-1077.
 - 9) N.A. Olsson, M.G. Oberg, L.D. Tzeng and T. Cella: "Ultra-low reflectivity 1.5 μm semiconductor laser preamplifier," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 569-570.
 - 10) G. Großkopf, R. Ludwig, R.G. Waarts and H.G. Weber: "Optical amplifier configurations with low polarisation sensitivity," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1387-1388.
 - 11) T. Saitoh and T. Mukai: "Broadband 1.5 μm GaInAsP travelling-wave laser amplifier with high-saturation output power," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 218-219.
 - 12) K. Inoue, T. Mukai and T. Saitoh: "Gain saturation dependence on signal wavelength in a travelling-wave semiconductor laser amplifier," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 328-329.
 - 13) H.J. Westlake and M.J. O'Mahony: "Bidirectional and two-channel transmission system measurement using a semiconductor-laser-amplifier repeater," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 649-651.
 - 14) H. Kogelnik and A. Yariv: "Considerations of noise and schemes for its reduction in laser amplifiers," *Proc. IEEE*, **52** (1964) 165-172.
 - 15) T. Mukai and T. Saitoh: "5.2 dB noise figure in a 1.5 μm InGaAsP travelling-wave laser amplifier," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 216-217.
 - 16) K. Mochizuki and O. Hirota: "Quantum noise analysis of cascaded channels with amplifiers and attenuators," *The 11th Symposium on Information Theory and Its Applications (SITA '88)*, 35-3 (1988).
 - 17) W.I. Way, C.E. Zah, S.G. Menocal, C. Caneau, F. Favire, F.K. Shokoohi, T.P. Lee and N.K. Cheung: "90-Channel FM video transmission to 2048 terminals using two inline travelling-wave laser amplifiers in a 1300 nm subcarrier multiplexed optical system," *ECOC (1988)* 37-40.
 - 18) G. Coquin, H. Kobrinski, C.E. Zah, F.K. Shokoohi, C. Caneau and S.G. Menocal: "Simultaneous amplification of 20-channels centered at 1.54 μm in a multiwavelength distribution system," *ECOC (1988)* 41-44.
 - 19) Y. Yamamoto and H. Tsuchiya: "Optical receiver sensitivity improvement by a semiconductor laser preamplifier," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 233-235.
 - 20) I.W. Marshall, M.J. O'Mahony and P.D. Constantine: "Optical system with two packaged 1.5 μm semiconductor laser amplifier repeaters," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 253-255.
 - 21) H.J. Westlake and M.J. O'Mahony: "Bidirectional and two-channel transmission system measurements using a semiconductor-laser-amplifier repeater," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 649-651.
 - 22) N.A. Olsson, M.G. Oberg, L.A. Koszi and G. Przybylek: "400 Mbit/s, 372 km coherent transmission experiment using in-line optical amplifiers," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 36-38.
 - 23) M.G. Oberg, N.A. Olsson, L.A. Koszi and G.J. Przybylek: "313 km transmission experiment at 1 Gbit/s using optical amplifiers and a low chirp laser," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 38-39.
 - 24) J.M.P. Delevaux, T.C. Rice, L.D. Tzeng, R.T. Ku and S.J. Salko: "400 Mbit/s optical heterodyne DPSK system experiment with inline 1.5 μm amplifiers," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 305-306.
 - 25) S. Yamamoto, K. Mochizuki, H. Wakabayashi and Y. Iwamoto: "Long-haul high-speed optical communication system using a semiconductor laser amplifier," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1554-1558.
 - 26) G. Grosskopf, R. Ludwig and H.G. Weber: "Cascaded inline semiconductor laser amplifiers in a coherent optical fibre transmission system," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 551-552.
 - 27) D.J. Malyon, L.C. Blank, R.E. Hobbs, D.J. Elton, A.J. Cockburn and W.A. Stallard: "Long-span high capacity transmission system experiments employing two near-travelling-wave laser amplifiers," *ECOC '88* (1988).
 - 28) I.W. Marshall, D.M. Spirit and M.J. O'Mahony: "Picosecond pulse response of a travelling-wave semiconductor laser amplifier," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 818-819.
 - 29) D.J. Malyon, L.C. Blank, W.A. Stallard and S. Yamamoto: "5 Gbit/s optical transmission system experiment employing laser amplifier repeater," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 108-109.
 - 30) K. Inoue, T. Mukai and T. Saitoh: "Nearly degenerate four-wave mixing in a travelling-wave semiconductor laser amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, **51** (1987) 1051-1053.
 - 31) S. Ryu, K. Mochizuki and H. Wakabayashi: "Influence of nondegenerate four-wave mixing on coherent transmission system using inline semiconductor laser amplifier," *OFC '89, THC-4* (1989).
 - 32) H.J. Westlake, M.J. Adams and M.J. O'Mahony: "Measurement of optical bistability in an InGaAsP laser amplifier at 1.5 μm ," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 992-993.
 - 33) M. Ikeda: "Tandem switching characteristics for laser diode optical switches," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 252-254.