半導体光増幅器を用いた1.3 μm 帯波長多重伝送の一検討

正員 山下 育男 (関西電力)
 非会員 下浦 一宏 (関西電力)
 正員 青海 恵之 (関西電力)

Transmission characteristics of WDM signals amplified by semiconductor optical amplifiers
 in a 1.3- μm wavelength band

Ikuko Yamashita, Member, Kazuhiro Shimoura, and Shigeyuki Seikai, Member (Kansai Electric Power)

Application of semiconductor optical amplifiers to wavelength division multiplexing systems in a 1.3- μm wavelength band have been studied. Measured characteristics of gain and noise figure of the SOA having small dependency on polarization states confirm that it is applicable to the repeater amplifier and the pre-amplifier. When it is used as the pre-amplifier of a non-repeated two-channel 10-Gb/s system an allowable line loss of 32dB is attained with the aid of the other SOA used for the post-amplifier. Measured bit error rate of a system with one repeater amplifier is well simulated from the individual characteristics of the SOA and the optical receiver. Using the similar technique, it is predicted that more than ten amplifiers can be applied in the system with cascaded repeater amplifiers on the assumption that the polarization dependency of the gain is ignored.

キーワード： 半導体光増幅器, 波長多重, 1.3 μm 帯, 伝送特性, OPGW, 多段中継

1. まえがき

高度情報化社会の実現には情報通信網の拡充が必須であり、光通信に関しても高速化、大容量化の研究が活発に行われている。とりわけ波長多重(WDM)伝送方式は最も有望な伝送方式と考えられているが、これには多波長の一括増幅による中継器の簡素化や、光合分波器や外部変調器の挿入による光損増の補償のために、光増幅器が不可欠である。1.5 μm 帯では30nmの波長域にわたって高利得が得られるエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)が実用化され、実験的には132波長の増幅^[1]が報告されている。一方、既設の光ファイバケーブルの大半は零分散波長が1.3 μm 帯にある単一モード光ファイバ(SMF)であるので、この波長域に適用可能な光増幅器もいろいろ検討されており、プラセオジウム光ファイバ増幅器^[2]、半導体光増幅器(SOA)^[3-5]、光ファイバラマン増幅器^[6, 7]等が有力な候補である。いずれにしてもEDFAほどには確立された技術とはなっていないが、使用方法をある程度限定すれば実用に供することは可能であろう。特にSOAは半導体レーザ(LD)と共通の技術があるため古くから研究されてきたが、最近になって高出力で偏波依存性の少ないタイプ^[3, 4, 5, 8]が開発されるようになり、大出力を要求しない場合にはかなり有望であると考えられ

る。すでにSOAを用いた高速伝送や2波長多重伝送の検討が報告されているが^[9, 10]、フィールドの線路への適用を想定した波長多重伝送の検討は数少なく、また中継伝送特性の検討^[11]についても実験と対比した例はあまりない。

本論文は、1.3 μm 帯での2波長多重伝送にSOAを適用した場合の伝送特性について、実験的な検討とそれらを基にした多中継伝送についての理論的検討を行う。実験には2台のSOAを用いるが、そのうちの1台は偏波依存性があるが比較的高出力(15dBm)が得られるタイプで(Philips社製CQF881/E)、ブースター用に適したもの(SOA-B)、もう1台は偏波依存性が小さく高利得(約27dB)が得られるタイプ(Philips社製CQF882/E)で、受信器のプリアンプあるいは中継器に適用可能なもの(SOA-P)である。

本文の構成は次の通りである。第2章ではSOAの基本特性として、SOAの利得特性、雑音指数(NF)、利得の偏波依存性の測定結果を示す。また偏波依存性の影響を具体的に調べるために、電力特有の光伝送路の光ファイバ複合架空地線(OPGW)にSOAを適用した場合の、利得変動の測定結果を示す。第3章では、1波あたり伝送速度を10Gbit/sとして、SOAをプリアンプに用いた場合の受信感度特性、SOAを用いた単一波長及び2波長多重無中継伝送の伝送特性を実験的に検討する。またO

P G Wの予備心線を用いて、2 波長多重無中継伝送実験を行った結果について述べる。第4 章では光増幅器のNFをもとに受信信号のS N比からビットエラーレート（BER）を計算するモデルを作り、計算結果と実験結果がよく一致することを示す。さらにこのモデルより、S O Aを用いて多中継伝送を行う場合に予想される伝送特性について考察する。

2. S O Aの基本特性

2. 1 S O Aの増幅特性及び雑音特性

S O A - Pについて、単一波長増幅と2 波長多重増幅時の利得、及びNFの測定を行った。2 波長は実験室で使用可能な1 3 1 3 n m, 1 3 1 8 n mとした。波長差が5 n mであるので、光パワーが特に大きくない限り光ファイバ中の4 光子混合の影響は考慮しなくてよいと考えられる。実

際、本測定中には4 光子混合の影響は観測されていない。なお、以下では簡単のために単一波長を1 波、2 波長多重を2 波という。図1 は駆動電流（ I_d ）と利得の関係の測定結果である。S O Aへの入力信号強度（ S_{in} ）は、1 波あたり-5 d B m及び-3 0 d B mとした。

I_d を大きくするにつれて利得が増加していくが、2 5 0 m Aを越えると大きな変化はなくなっている。これよりS O A - Pの I_d は3 0 0 m A程度で十分と考えられる。また $S_{in}=-3 0$ d B mでは、1 波入力時と2 波入力時での利得差、及び波長間での利得差はほとんどなく、約2 8 d Bの利得が得られている。また飽和出力は1 0 d B mを越えていること、2 波入力時には利得の波長依存性がやや顕著になることがわかる。

次に、 S_{in} と利得の関係の測定した結果を図2 に示す。 $I_d=3 0 0$ m Aとし、1. 3 μ m帯の光を1 波のみ入力した場合と、2 波入力した場合の利得について示しているが、2 波増幅の場合の横軸は1 波あたりの強度である。

小信号入力に対しては、1 波、2 波どちらの場合も約2 7 d B程度の利得が安定して得られ、利得差はほとんどない。但し、1 3 1 3 n mと1 3 1 8 n m間で利得に若干の差が生じており、利得の波長依存性が現れている。 S_{in} が-2 0 d B mより大きくなると利得の飽和が見られ、2 波増幅では相互変調等には注意が必要と思われる。これについては3. 1 節で若干の考察を行う。

次にS O AのNFを光学的に測定した。S O A出力を偏波コントローラーにより信号光とこれと直交する偏波の雑音に分離して計測し、この値から算出した^[12]。雑音は、ここでは増幅された自然放光（ASE）である。 I_d が5 0 m A～4 0 0 m Aの場合のNFを、横軸をS O A入力として図3 に示す。

図1 S O A - Pの駆動電流（ I_d ）と利得の関係

Fig.1 Gain of the SOA-P vs. I_d .

図2 S O A - Pの入出力特性

Fig.2 Gain of the SOA vs. S_{in} .

図3 S O Aの雑音指数

Fig.3 NF of the SOA

NFは $I_d=5 0$ m Aでは、やや大きな値となるが、 I_d が1 0 0 m Aを越えると7 d B以下に収まってくる。また

S_{in} が -10 dBm 以下では、 S_{in} が大きくなるにつれ雑音指数は小さくなる。これはEDFAと同様に、小信号入力時には信号光よりもASEが大きくなり、特にSOAの入口付近では逆方向のASEが支配的になり飽和を生じさせるためであると考えられる。なお2波増幅の場合のNFも測定したが、1波の場合と差はなかった。

2.2 SOAの偏波依存性及びOPGWへの適用性

SOAの偏波無依存性が種々検討されているが^[3, 4, 5, 8]、現状ではEDFAほどには小さくない。そこで本実験に用いたSOA-Pについて偏波による利得変動を測定した。図4に示すように波長1313nmと1318nmの2つのLDの出力を、1/4波長板と半波長板から成る偏波コントローラを通した後に合波し、SOAに入力する。ここで2つの偏波コントローラの各波長板を回転させ、SOA入力の偏波状態を変えた。光ファイバは十分に固定して、波長板の回転以外による偏波変動を極力避けた。図5は測定結果の一例で、1313nm側の偏波コントローラの半波長板のみを回転させた場合の出力変動をプロットしたものである。

図4 SOAの偏波依存性測定系

Fig.4 Measurement setup of polarization dependence of the SOA gain.

図5 SOA出力の偏波依存性

Fig.5 Polarization dependence of output of the SOA

1波あたりの S_{in} が -15 dBm と -30 dBm のどちらの場合も、1313nmの出力変動は2dB以内であることがわかる。また -15 dBm の場合、1313nmの出力変動につれて1318nmの出力が若干変動している様子がわかる。しかし -30 dBm の場合には、1313nmの出力変動は1318nm側に対してほとんど影響を与えないことがわかる。以上のような傾向は偏波を変える波長を入れ替えても同様であった。

利得の偏波依存性の影響をさらに具体的に見るために、電力会社特有の設備であるOPGW(20km)を伝搬したCW光をSOAで増幅して、その出力変動を測定した。また波長1.55 μm のLDを用いて伝搬光の偏光状態を測定した。図6は出力変動の測定結果の1例で、横軸は時間、縦軸は相対的な変動量である。LD出力及びSOA入力が安定しているのに対し、SOA出力は約1.5dBの

図6 OPGW伝搬光及びSOA出力の強度変動例

Fig.6 Optical power fluctuation observed at the output port of the LD, the OPGW, and the SOA

図7 OPGW伝搬光の偏波変動例

Fig.7 An Example of polarization fluctuation measured at the end of OPGW

幅でランダムに動いていることがわかる。

図7は偏光の主軸角度の時間変化を示している。架空ケーブルや地中管路に敷設されたケーブルの偏波変動の周期は、一般的には時間または分のオーダーであるのに対し、OPGWの偏波変動はそれよりもかなり短時間になる場合があることが知られている^[13]が、図7もそのような状態を選んで示したものである。

図6の出力変動は、SOA入力安定していることから偏波変動によるものと考えられる。この変動幅は伝送特性として無視できないが、無中継や1中継程度であればこの変動幅をマージンとして確保することで伝送上の問題はないと考えられる。但し中継器に用いて多段中継を行う場合には、偏波コントロールが必要と考えられる。

3. データ伝送特性

3.1 SOAをプリアンプとした場合の受信感度特性

前節の検討よりSOAを受信側に適用できると考えられるため、1.3μm帯の光信号の1波及び2波伝送に関して、SOAをプリアンプとする受信器の受信感度を実験的に調べた。

実験に先立って、2波増幅における相互変調の影響を調べた。伝送速度を2.4Gbit/sとし、2つのLD出力を独立に変調してSOAに入力した場合のBERを測定した。I_o=300mA、S_{in}を1波あたり-18~-30dBmとした時の光受信器入力とBERの関係を図8に示す。S_{in}=-25dBmでは相互変調の影響はほとんど見られないが、逆にS_{in}=-30dBmではASEの増加によって感度が低下する。このことから波長多重にSOAを用いる場合には、適当なSOA入力を選べば1波の場合とほとんど差のない良好なプリアンプとなることがわかる。

図8 SOAに入力する2波長の光強度によるBERの変化

Fig.8 Influence of the input power of the SOA on the BER for the case of 2-channel WDM

次に伝送速度を10Gbit/sとし、SOAのプリアンプとしての特性を調べた。S_{in}が十分小さいため、2波の場合には一括して変調した。BER特性を、SOAを使用しない場合(Back-to-Back)と合わせて図9に示す。Back-to-Backの場合に比べ、SOAをプリアンプとして使用することで約12dBのパワーバジェットが得られており、1波の場合と2波の場合を比較すれば、若干2波の場合が感度が低下しているが、パワーバジェットはほとんど差がないことがわかる。これは1波増幅と2波増幅の利得差によるものと思われる。また1313nmと1318nmでは、やや1318nmの方が感度が高いが、これはSOAの波長依存性により、1318nmの方が利得が高くなることの影響と考えられる。

図9 SOAをプリアンプとして用いた場合の受信感度特性

Fig.9 Sensitivity of the optical receiver including the SOA as a pre-amplifier.

3.2 10Gbit/s 無中継伝送特性

次にSOAを用いた無中継長距離伝送の可能性を見るために、SOA-BとSOA-Pをそれぞれポストアンプ及びプリアンプとして用いて、10Gbit/s伝送実験を行った。

1波及び2波伝送の場合の伝送路の光損とBERの関係を図10に示す。送信光出力は各波2dBmであるが、SOA-Bは飽和出力が大きく、この程度の出力に対しては相互変調の影響は無視できる。図には示していないが、送受信端にSOAを使用することで、Back-to-Backの場合と比べて約12dBのパワーバジェットが得られており、また1波の場合と2波の場合のパワーバジェットの差はほとんどない。BER=10⁻⁸で評価すると、伝送路許容光損はいずれの場合も32dBであり、光ファイバ光損を0.4dB/kmとすると光ファイバ長換算で約80kmに相当する値となる。ただし、受信感度差の影響で1波と2波では、2波の場合が若干低下した特性となってい

図10 伝送路光損とBERの関係
Fig.10 Relationships between BER and line loss.

る。また1313nmと1318nmでは、1318nmの方が許容光損がやや高くなっている。

以上からSOAを用いて1.3μm帯10Gbit/s 2波伝送を行う場合、1波伝送の場合と同等の良好な伝送特性が期待できることがわかる。

3.3 OPGWによる2.4Gbit/s 無中継伝送
SOAのOPGWへの適用性を確認するため、図11に示すような実験系により2波無中継伝送実験を行った。本実験は当社の猪名川変電所～宝塚開閉所間13.2kmのOPGW(24C)の予備光心線を用いて、折り返しにより伝送路79.2kmを構成して実施した。なおこの伝送路の光損は、1318nmでの測定では34.85dB(0.44dB/km)であった。

図11 OPGWを用いた2波長多重伝送実験系
Fig.11 Experimental setup of 2-channel WDM transmission using the OPGW.

前節と同じく送信端にSOA-Bを、受信端にSOA-Pを用いており、伝送速度は1波あたり2.4Gbit/s

としてLN変調器で外部変調を行った。1313nmと1318nmのそれぞれの波長について得られた、伝送路光損とBERの関係を図12に示す。図より両波長でBER特性はほぼ一致しており、BER=10⁻⁹で38dBが得られていることがわかる。本OPGWの光ファイバ光損は0.44dB/kmであるため、約86kmに相当する値となる。このBER特性は室内実験での結果と差はなく、2.4Gbit/sではOPGWに起因する伝送特性の劣化はないと考えられる。但し季節変動やOPGWの温度が大幅に変化する場合等の影響についてはさらに長期間の調査が必要と思われる。

図12 伝送路光損とBERの関係(フィールド)
Fig.12 Relationships between BER and line loss obtained in the field.

4. 多中継伝送の検討

4.1 SOAによる多中継伝送

SOAは偏波無依存化の検討が進んでいるが、前節までで見てきたように1dB程度の依存性が存在する。従ってこのようなSOAを多段に用いた場合には、受信信号強度が確率的に非常に大きな変動を起こす可能性があり、現状のままでは多中継伝送に用いることは難しいと考えられる。しかしトップデータの中には依存性0.1dB以下が報告されており、また偏波制御も種々検討されているため、将来的には多段の使用も可能になると考えられる。そこで偏波変動についてはこれを見捨て、前節までで得た特性をもとに、1波伝送について利得と雑音指数のみを考慮し、多中継の可能性について検討を行った。2波伝送の場合も利得飽和がなく相互変調の影響が無視できる小信号入力を想定すれば本モデルは適用可能と考えられる。

4.2 符号誤り率の定式化

図13は多中継伝送系のモデルである。ポストアンプには送信信号S₀が入力され、等価入力雑音N₀と等価印加雑音N_aがSOAで印加され、利得Gで増幅されて信号出力

S_0' 及び雑音出力 N_0' が得られる。ここで等価入力雑音 N_0 は雑音改善限界に相当する雑音パワーであり、等価印加雑音 N_a は光増幅器の雑音指数として表される雑音パワーに相当する。第 k 段の中継増幅器では信号 S_k 及び雑音 N_k が入力され、等価入力雑音 N_0 と等価印加雑音 N_a が加えられ、信号電力 S_k' 、雑音電力 N_k' が出力される。今回は全増幅器の特性に差がないものとして、 N_0 と N_a は同じ値とする。受信器では、プリアンプに信号 S_r と雑音 N_r が入力され、 N_0 と N_a が印加されて、信号出力 S_r' 、雑音出力 N_r' となる。これが O/E に入力され等価電気系雑音 N_E が印加されて、多中継伝送系の最終的な出力として信号電力 S_M 、雑音電力 N_M が得られる。なお等価電気系雑音 N_E は O/E の暗電流等の電氣的に起因する雑音に相当するものである。

図13 多中継モデル

Fig. 13 A model of a transmission system having cascaded repeaters.

このモデルより多段中継伝送時の BER 特性を求める。いま、最終的にデジタル判定回路に入力される信号の SN 比を η_M とすると、この場合の BER は、 $On-Off-Ke y i n g$ の非同期検波時の BER 算出式より、次式で表される。

$$BER = \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{1}{4} \eta_M \right) \quad (1)$$

従って、多中継系の最終出力の S_M 、 N_M より η_M を求めると BER を算出できる。

ポストアンプ出力の SN 比 (η_0) は、次式となる。

$$\eta_0 = \frac{S_0'}{N_0'} = \frac{S_0}{N_0 + N_a} \quad (2)$$

等価印加雑音 N_a は、測定した雑音指数 (NF) より次式で定義できる。

$$N_a = N_0 (NF - 1) \quad (3)$$

次に、第 k 段の中継器出力の SN 比 (η_k) は、多段中継において中継器入力を等しい (S_t) とすると

$$\eta_k = \frac{S_t}{\frac{N_0 + N_a}{S_0} S_t + k (N_0 + N_a)} \quad (4)$$

となる。

受信器のプリアンプ出力の SN 比 (η_r) は、(4)より第 n 段中継器出力の SN 比の η_n が求まるため、プリアンプへの入力信号強度 S_r を用いて次式となる。

$$\eta_r = \frac{S_r}{\frac{S_r}{\eta_n} + N_0 + N_a} \quad (5)$$

以上から最終段 O/E 出力の SN 比 (η_M) は、 O/E への入力信号強度 S_r' を用いて次式となる。

$$\eta_M = \frac{S_r'}{\frac{S_r'}{\eta_n} + N_E} \quad (6)$$

以上のモデルの妥当性を調べるために、 $SOA-P$ を中継器として用いた場合の BER の計算値と実験結果を比較する。

2 台の SOA をポストアンプ及び中継器用アンプとして用いて、 10 Gbit/s 1 波を伝送する場合について、伝送路光損と BER の関係の実験結果と本モデルによる計算結果を、図14 (a)、(b)に示す。両図とも中継器入力 (S_{rep}) をパラメータとし、伝送路光損を横軸にして BER を示したものである。伝送路光損はポストアンプから中継器までの伝送路と、中継器から受信器までの伝送路の光損の和であり、送信端出力は $+5 \text{ dBm}$ 、光受信器入力 -13 dBm とした。なお SOA の NF は 7.2 dB とした。

図14 (a) をみると、 $Back-to-Back$ の場合に比べ、中継器を使用することにより約 23 dB のパワーバジェットが得られていることがわかる。また、 $S_{rep} = -25 \text{ dBm}$ 程度までは特性は直線となり、波形歪みなく伝送されることがわかる。図より $BER = 10^{-12}$ で評価すれば、中継器入力 -25 dBm で伝送路許容光損 45.3 dB (光ファイバ損失 0.4 dB/km として約 110 km) が1中継伝送の限界であり、これ以内であれば良好な特性が得られると考えられる。但し、 $BER = 10^{-9}$ で評価すれば、中継器入力 -28 dBm が許容でき、許容損失も若干増大する。実験と同じ条件になるようパラメータを設定して得られた図14 (b) は、実験結果の (a) とよく一致しており、計算モデルが妥当なものであることを示していると考えられる。

4.3 多中継線路の符号誤り率特性

中継器入力を -18 dBm 及び -22 dBm として、多中継を行った場合に理論的に予想される特性を、それぞれ図15 (a)、(b)に示す。図より S_{rep} が -18 dBm 及び -22 dBm のどちらの場合も、中継数が多くなるにつれ BER 特性にフロアが発生してくる様子がわかる。しかし、 -22 dBm 中継では5段程度、 -18 dBm 中継では10段程度以内の中継器数であれば、伝送特性の劣化は許容範囲と考えられる。さらに多段中継の伝送を行うには、中継器入力を大きくすること及び NF の改善が重要と

(a) 測定値
(a) measured.

(a) $S_{rep} = -18 \text{ dBm}$
(a) $S_{rep} = -18 \text{ dBm}$.

(b) 計算値
(b) calculated.

(b) $S_{rep} = -22 \text{ dBm}$ の場合
(b) $S_{rep} = -22 \text{ dBm}$.

図14 中継器使用時の伝送路光損とBERの関係
Fig.14 Relationships between BER and total line loss of one-repeater transmission system.

図15 多段中継時のBER特性
Fig.15 BER of the transmission system having many repeater amplifiers.

考えられる。但し中継器入力が大きくなり、それにより出力が大きくなりすぎると、光ファイバでの誘導ブリルアン散乱や4光子混合等の非線形効果の影響を考えなければならない。また、多波長増幅でSOA入力が大きすぎると、SOAの非線形効果により特性が劣化することになる。今回これらについては考慮しておらず、今後の検討課題である。

5. まとめ

1. 3 μm 帯用SOAのWDM伝送への適用を検討した。利得約27 dB、NF約7 dBのSOA-Pについては、偏波依存性が1.5 dBであったが、無中継及び1中継の2波伝送のプリアンプもしくは中継器に適用可能であった。さらに他のSOAをポストアンプとして用いた無中継伝送では、伝送路許容光損32 dB（約100 km）であり、1波伝送と2波伝送の場合ではほとんど差がないという結果を得た。また実線路のOPGWを用いた2波長多重無中継伝送では、偏波変動によると考えられるSOA出力の変動

(1.5 dB程度)があったが、2.4 Gbit/sの伝送では特に問題は見られなかった。次にSOAの基本特性をよく記述する計算モデルを検討し、SOAを多段に用いた場合の特性を計算した。これより単一波長で中継器入力を-18 dBmとすれば、10段程度の多段中継が伝送特性の大きな劣化なしに可能と予想されることがわかった。

今後、多重数を上げる場合の検討や、周回実験系による多段中継の検討を実施していく予定である。

[謝辞]

日頃より御討論いただく竹中保氏、金岡泰弘氏、ならびに本実験にご協力いただいた、阪本正律氏、猪口勝司氏に感謝いたします。

(平成9年1月27日受付、平成9年4月11日再受付)

[参考文献]

- [1] 小野隆志, 矢野隆, 福知清, 伊東俊治, 山崎裕幸, 山口昌幸, 江村克己:「光デマルチプレクサ方式を用いたWDM高密度多重化の検討」, 信学技報, OCS96-59 (1996).
- [2] M. Yamada, M. Shimizu, T. Kanamori, Y. Ohishi, Y. Teruyama, K. Terumura, K. Oikawa, H. Yoshinaga, K. Kikushima, Y. Miyamoto and S. Sudo, "Low-Noise and High-Power Pr^{3+} -Doped Fluoride Fiber Amplifier", IEEE Photon. Technol. Lett., 7, 8, pp. 869-871 (1995).
- [3] 谷口晃:「半導体光増幅器」, 光通信技術の最新資料集(オプトロニクス社), pp. 168-173 (1995).
- [4] 辻伸二:「半導体光増幅器」, オプトロニクス, 107, pp. 54-58 (1990).
- [5] M. Koga, and T. Matsumoto, "High-Gain Polarization-Insensitive Optical Amplifier Consisting of Two Serial Semiconductor Laser Amplifiers", IEEE J. Lightwave Technol., 9, 2, pp. 284-290 (1991).
- [6] S. G. Grubb, T. Erdogan, V. Mizrahi, T. Strasser, W. Y. Cheung, W. A. Reed, P. J. Lemaire, A. E. Miller, S. G. Kosinski, G. Nykolak, and P. C. Becker, "1.3 μm Cascaded Raman Amplifier in Germanosilicate Fibers", Proc. ECOC'94, Paper PD3, 1994.
- [7] S. V. Chernikov, Y. Zhu, R. Kashyap, and J. R. Taylor, "High-gain monolithic cascaded fibre Raman amplifier operating at 1.3 μm ", Electron. Lett., 31, 6, pp. 472-473 (1995).
- [8] L. F. Tiemeijer, P. A. J. Thijs, P. van Dongen, J. J. M. Binsma, E. J. Jansen, and S. Walczyk, "33dB Fiber to Fiber Gain +13dBm Fiber Saturation Power Polarization independent 1310nm MQW Laser Amplifiers", Proc. OAA'95, Davos, Switzerland, June, Paper PD1, 1995.
- [9] L. F. Tiemeijer, "High Performance MQW Laser Amplifiers for Transmission System Operations in the 1310 nm Window at Bitrates of 10 Gbit/s and Beyond", Invited Paper ECOC'95, Brussels, Belgium, 1995.
- [10] H. de Waardt, L. F. Tiemeijer, and B. H. Verbeek, "2x10 Gbit/s WDM 1310-nm Optical Transmission over 63.5-km Standard Single-Mode Fiber Using Optical Preamplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett., 7, 1, pp. 104-107 (1995).
- [11] J. G. L. Jennen, L. F. Tiemeijer, Coen T. H. F. Liedenbaum, John J. E. Reid, and Hugo de Waardt, "Performance of Cascaded 1300 nm QW Laser Amplifiers in 10 Gbit/s Long Haul NRZ Transmission", Proc. OAA'95, Davos, Switzerland, June, Paper FA5, 1995.
- [12] T. Kashiwada, M. Shigematsu, and M. Nishimura, "Study on accurate noise figure measurements of erbium-doped fiber amplifiers", OEC'92, Makhari, 17B3-2, July, 1992.
- [13] 黒野正裕, 伊澤清順, 栗原雅幸, 「コヒーレント光通信への電磁界の影響と対策(その3)」, 電中研研究報告, No. R94006 (1995.3).

山下 育男

(正員) 1965年10月27日生。88年3月大阪大学工学部通信工学科卒業。90年同大学修士課程了。同年関西電力株式会社入社。現在、同社総合技術研究所研究員として光通信、光増幅の研究に従事。電子情報通信学会会員。

下浦 一宏

1962年10月14日生。86年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。88年同大学修士課程了。同年関西電力株式会社入社。配電業務の後、現在同社総合技術研究所副主任研究員として光ソリトン通信の研究に従事。電子情報通信学会会員。

青海 恵之

(正員) 1945年9月19日生。69年大阪大学工学部通信工学科卒業。74年同大学博士課程了。同年日本電信電話公社茨城通信研究所入所。以来ミリ波線路、光線路の研究に従事。87年立命館大学理工学部電気工学科教授。91年関西電力株式会社入社。電子情報通信学会より82年度論文賞、85年度業績賞を受賞。現在同総合技術研究所主席研究員。工博。OSA電子情報通信学会、応用物理学会、各会員。