

次世代光伝送方式

Next Generation Optical Transmission Technologies

次世代広帯域ISDN(Integrated Services Digital Network)の構築に向け、10 Gビット/秒光伝送システムおよびコヒーレント光伝送システムの研究開発が活発に行われている。

本稿では、これら次世代光伝送システムの実現に不可欠な10 Gビット/秒光伝送方式およびコヒーレント光伝送方式に関する最新の研究成果を紹介する。前者については、 $\frac{\lambda}{4}$ DFB(Distributed Feedback)レーザとFET(Field Effect Transistor)駆動回路を一体内蔵した送信モジュールを試作し、光ファイバ40 kmを用いた伝送実験によって10 Gビット/秒光伝送が可能なことを示した。また、半導体光増幅器の導入による長距離化が可能であることに言及した。後者については、x偏波とy偏波をそれぞれ異なった周波数に変換して、合成後信号を復調する偏波-周波数変換形ダイバシティ受信方式、および局部発振光源の光周波数を掃引したときに検出されるビートを計数する多チャネル光チューニング方式を提案し、その有効性を検証した。

山下 喜市* *Kiichi Yamashita*
佐々木 慎也* *Shinya Sasaki*
中野 博行** *Hiroyuki Nakano*
辻 伸二** *Shinji Tsuji*

1 緒 言

最近、公衆通信網の幹線系では光デバイスや電気デバイスの急速な進展とあいまって、伝送システムの高速・大容量化が一段と活発に進められている。伝送容量は、5、6年で一桁(けた)のペースで大容量化される傾向にあり、すでに、1.6 Gビット/秒¹⁾および1.7 Gビット/秒²⁾光伝送システムが商用化されている。現在、広帯域ISDN(Integrated Services Digital Network)伝送ハイアラキの国際標準化に伴い、2.4 Gビット/秒光伝送システムの実用開発が国内外で盛んに行われている。また、同時にポスト2.4 Gビット/秒光伝送システムとして、4倍の伝送容量を持つ10 Gビット/秒光伝送システムの研究開発もあわせて進められている。一方、マイクロ波通信と同様光の電磁波としての性質を利用し、光の周波数や位相を情報の伝達手段に用いるコヒーレント光伝送方式の研究が積極的に行われている³⁾。この方式は、光強度のオン、オフ信号を情報の伝達に用いた現行の光伝送方式とは異なり、光周波数領域での多チャネル信号多重および変換が可能であるため、映像分配サービスが主体となる次世代広帯域ISDNでフレキシビリティの大きな超大容量ネットワークを実現できる有望な方式として脚光を浴びている。

本稿では、次世代広帯域ISDNの構築に不可欠な10 Gビット/秒およびコヒーレント光伝送方式に関する最新の研究成

果について述べる。

2 10 Gビット/秒光伝送方式

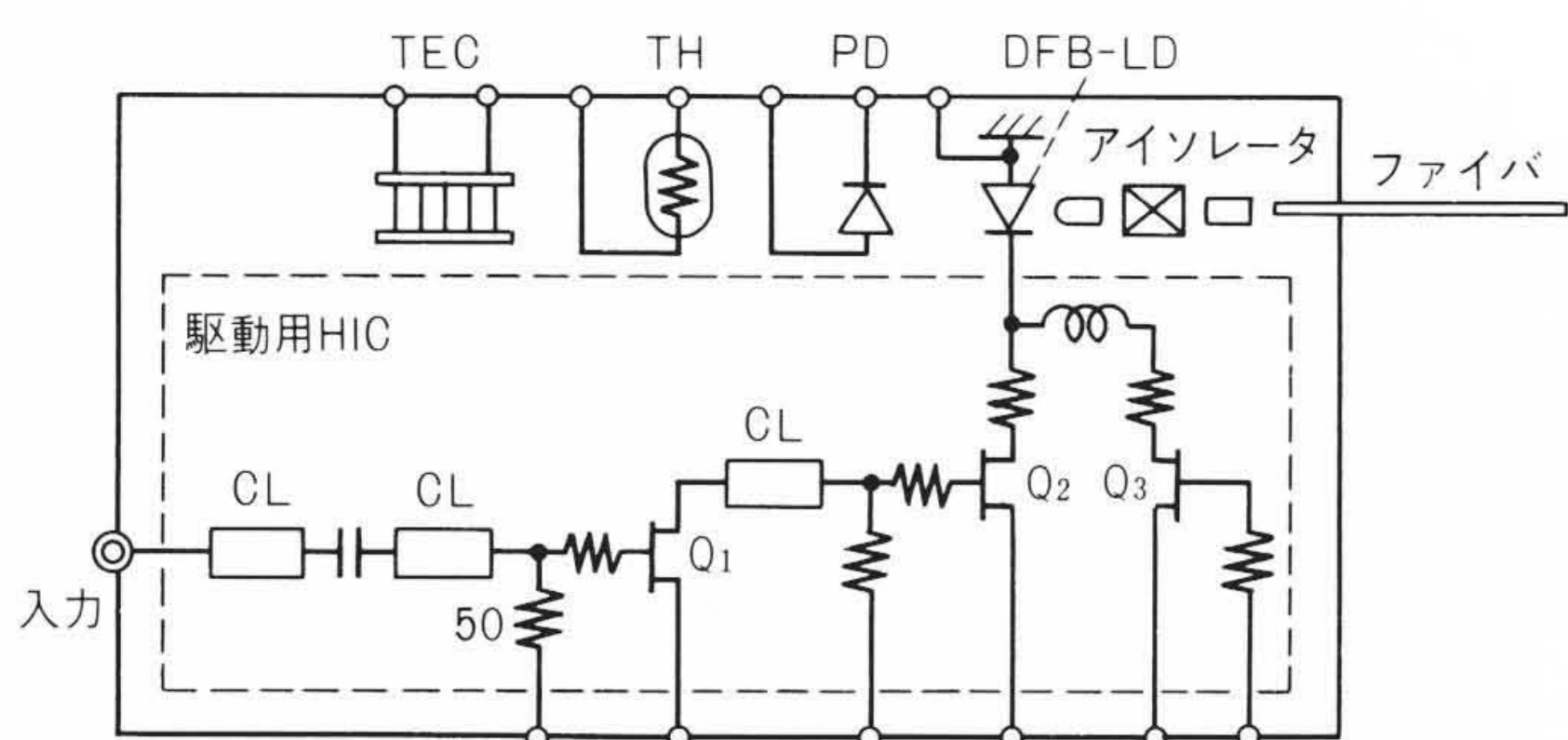
光送信器の速度は、半導体レーザと駆動回路の動作速度のほかにこれらの実装に起因する寄生リアクタンスで決まる⁴⁾。特に、10 Gビット/秒帯ではこの寄生リアクタンスの影響が顕著となるため、寄生リアクタンスを大幅に低減できるレーザと駆動回路のモジュール一体化技術^{5),6)}の開発が必須(す)となる。本章では、10 Gビット/秒光伝送が可能な $\frac{\lambda}{4}$ DFB(Distributed Feedback)レーザ⁷⁾とFET駆動回路を一体化した光送信モジュール、およびこれを用いた40 km光ファイバ伝送実験結果⁸⁾について述べる。また、半導体光増幅器の適用効果についても言及する。

2.1 光送信モジュール

DFBレーザとHIC(駆動用ハイブリッドIC)を一体化した試作送信モジュールの等価回路を図1に、外観を図2に示す。HICにはコープレーナ線路方式を用いた。この方式はマイクロストリップ線路方式に比較して、次のような利点がある。

(1) 共通接地電極を基板表面の大面积に作製可能であり、その接地電極上にチップ部品を直接実装できるため、接地配線

* 日立製作所 中央研究所 工学博士 ** 日立製作所 中央研究所



注：略語説明

HIC (ハイブリッドIC), CL (コープレーナ線路)

DFB-LD (分布帰還形半導体レーザ), PD (フォトダイオード)

TH (サーミスタ), TEC (ペルチェ素子)

図1 試作光送信モジュールの等価回路 寄生リアクタンスの影響を低減するため、レーザと駆動用ハイブリッドIC(HIC)が一体化されている。HICにはFET3石がコープレーナ線路を用いた基板上に実装されている。

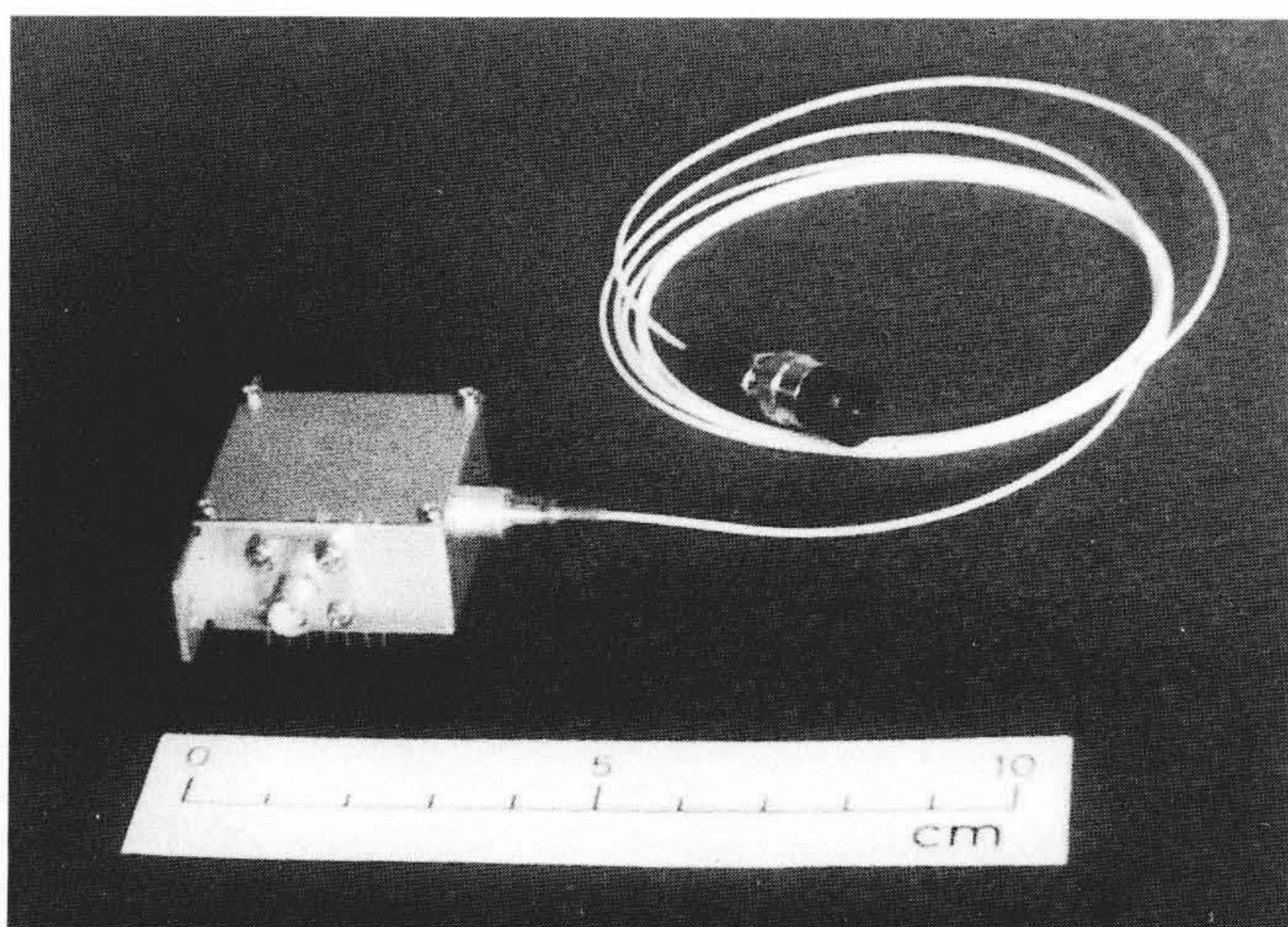


図2 試作光送信モジュールの外観 パッケージは14ピンデュアルインライン形である。電気信号はSMAコネクタを介して入力され、光信号に変換されてから単一モードファイバ・ピグテイルから出力される。

の低インダクタンス化が可能である。

(2) 線路の特性インピーダンスは、線路のパターン幅と接地電極とのギャップ幅の比で決まるため、パターン幅を任意に変えることができる。このため、線路間に交流結合用の大容量コンデンサを挿入する場合のインピーダンス不整合を避けることが可能である。

(3) 基板の裏面には接地電極や金属ステムが存在しないため、レーザとケースはセラミック基板だけによって接続される。このため、レーザとケース間を高い熱抵抗で実装可能とした。

以上の理由から、コープレーナ線路形のパターンニングを採用した。DFBレーザ(発振波長: $1.547\ \mu\text{m}$)とHICのほかには、光アイソレータ(逆方向損失: 30 dB以上)、モニタ用フォトダイオード、温度制御用のサーミスタおよびペルチェ素子を内蔵している。パッケージは14ピンデュアルインラ

イン形で、寸法は長さ $31.5\times$ 幅 $29.8\times$ 高さ $16.4\ \text{mm}^3$ である。電気信号は20 GHz以上まで低損失な特性を持つSMA(Sub-miniature A-type)コネクタから入力され、光出力信号は単一モードファイバ・ピグテイルから取り出される。光結合系には無反射コートした2個のロッドレンズを用い、結合効率28%を実現している。駆動用HICはゲート長 $0.3\ \mu\text{m}$ のGaAs FET 3石を用いて構成しており、入力インタフェースのインピーダンスは $50\ \Omega$ である。FET(Field Effect Transistor) Q_1 , Q_2 はレーザを高速スイッチングするためのもので、2段のソース接地形増幅・振幅制限回路を構成し、波形スライスによって高速駆動電流パルスを生成している。また、段間のインピーダンス不整合抑圧およびFET Q_2 とレーザ間の配線インダクタンスに起因するリングング低減のため、ダンピング抵抗を挿入した。FET Q_3 はレーザのバイアス電流供給に用いている。試作送信モジュールの10 Gビット/秒光出力アイパターンを図3に示す。立上り・立下り時間は30/50 psであり、良好なアイ開口が得られた。出力波形に見られるオーバーシュートは、レーザの緩和振動(約10 GHz)に起因するものである。このときの信号電流振幅は $60\ \text{mA}_{\text{P-P}}$ 、バイアス電流は44 mA(しきい電流: 40 mA)であり、消光比10 dB、光出力+1.5 dBmが得られた。試作送信モジュールの主要性能を表1にまとめて示す。

2.2 伝送特性

試作したプロトタイプ光送信モジュールを用い、10 Gビット/秒ファイバ伝送実験を行った。10 Gビット/秒の入力信号は、5 Gビット/秒のパルスパターン発生器の出力信号と、この信号を奇数ビット位相シフトさせた信号を2:1マルチプレクサによって多重化し生成した。受信器はPINフォトダイオードとハイブリッドIC増幅器を用いて構成した。また、

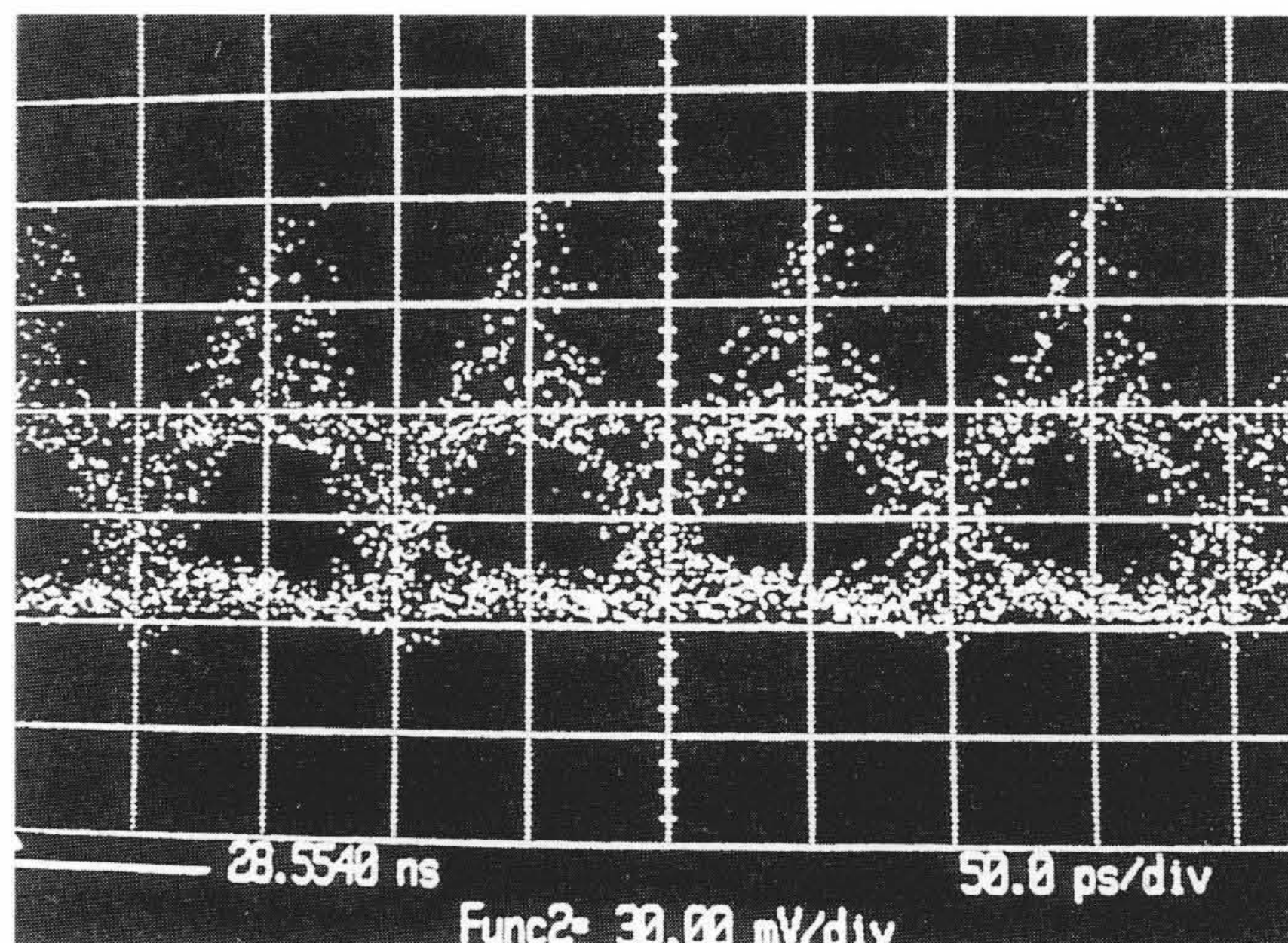


図3 10 Gビット/秒光出力アイパターン 入力信号パターンは 2^7-1 ビット擬似ランダムNRZ(Non Return to Zero)信号である。光出力信号の立上り・立下り時間は30/50 ps、消光比は10 dBおよび出力レベルは1.5 dBmである。

表1 試作光送信モジュールの主要性能 試作モジュールは40 kmファイバ伝送(受信感度で制限されている。)が可能であり, 10 Gビット/秒光伝送に適用できる。

項 目	記号	単位	性能	備 考
変 調 速 度	B_0	Gビット/秒	10	—
入力信号	立上り・ 立下り時間	tr/tf	ps	40/40
	インピーダンス	Z_{in}	Ω	50
	電圧振幅	V_{in}	V_{PP}	1
光出力信号	光波長	λ_p	nm	1,547
	立上り・ 立下り時間	tr/tf	ps	30/50
	光電力	P_f	dBm	+1.5 ビグティル出力, アイソレータあり
	消光比	ER	dB	10
変調電流信号	立上り・ 立下り時間	tr/tf	ps	~40/30
	電流振幅	I_s	mAp	60
	バイアス電流	I_b	mA	1.1 lth lth = 40mA

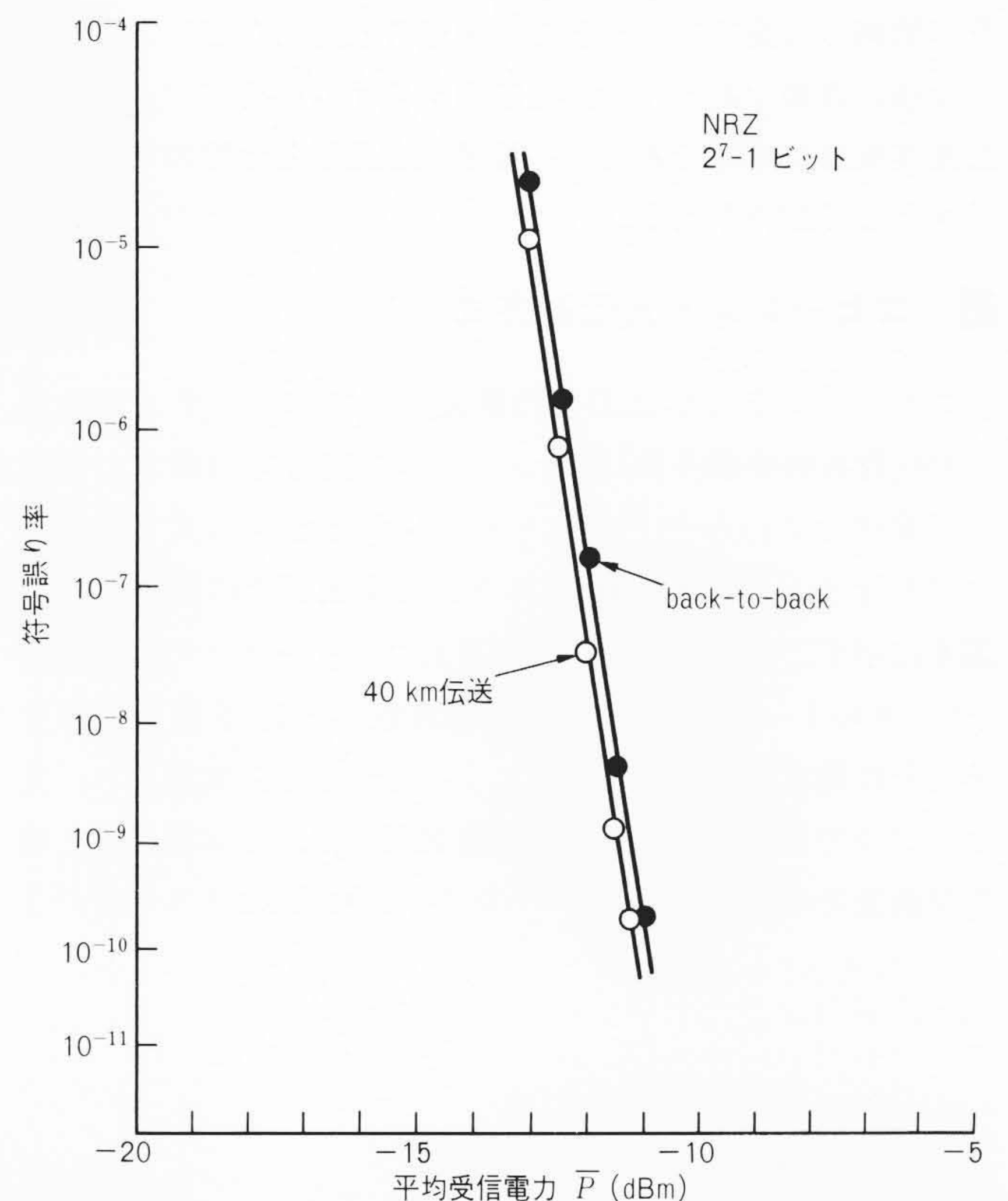
光受信信号を5 Gビット/秒信号に分離するため, GaAsICにより構成したデマルチプレクサを用いた。

10 Gビット/秒伝送実験により得られた符号誤り率特性を図4に示す。黒丸がback-to-back, 白丸が40 km伝送時の特性である。伝送路には分散シフト光ファイバ(零分散波長: 1.5555 μm)を用いた。光受信器の最小受信電力(誤り率: 10^{-9})は-11.2 dBmであった。40 km伝送で, モード分配雑音によるフロア現象などの誤り率特性劣化は観測されなかった。また, 40 kmファイバ伝送による0.2 dBの感度改善は, レーザのチャープとファイバの分散特性に起因したパルス圧縮効果によるものと考えられる。このときの光スペクトラム幅は7.7 Å (-20 dB幅), サイドモード抑圧比は約40 dBであった。この伝送実験により, 試作したレーザ・駆動用HIC一体化送信モジュールが10 Gビット/秒光伝送用として使用可能であることがわかった。今後は, レーザ駆動回路のモノリシックIC化と, APD(Avalanche Photodiode)の採用による受信器の高感度化が課題である。

2.3 光増幅器の応用

最近, 許容スパンを大幅に拡大できる光増幅器を積極的に導入した10 Gビット/秒長距離光伝送実験が盛んに行われている^{9), 10)}。光増幅器には, 大別して半導体光増幅器とファイバ光増幅器があり, それぞれ, 前置増幅器, 中継増幅器, ブースター増幅器としての応用が検討されている。

基板にInPを用いて試作した進行波形半導体光増幅器の構造を図5に示す¹¹⁾。素子長は600 μm であり, 活性層(InGaAsP)は幅1.5 μm の埋込みヘテロ構造とした。素子は進行波形とするため, 両端面に無反射膜コーティングを施し, さらに6°の斜めへき開面を設けた低反射率構造により高利得化と低雑音化を図っている。試作増幅器では, ファイバーフ



注: 略語説明 NRZ (Non Return to Zero)

図4 10 Gビット/秒伝送時の符号誤り率特性 40 km伝送でファイバの分散によるパルス圧縮効果のため, 0.2 dBの受信感度改善がみられる。なお, 40 km伝送には分散シフトファイバを使用した。

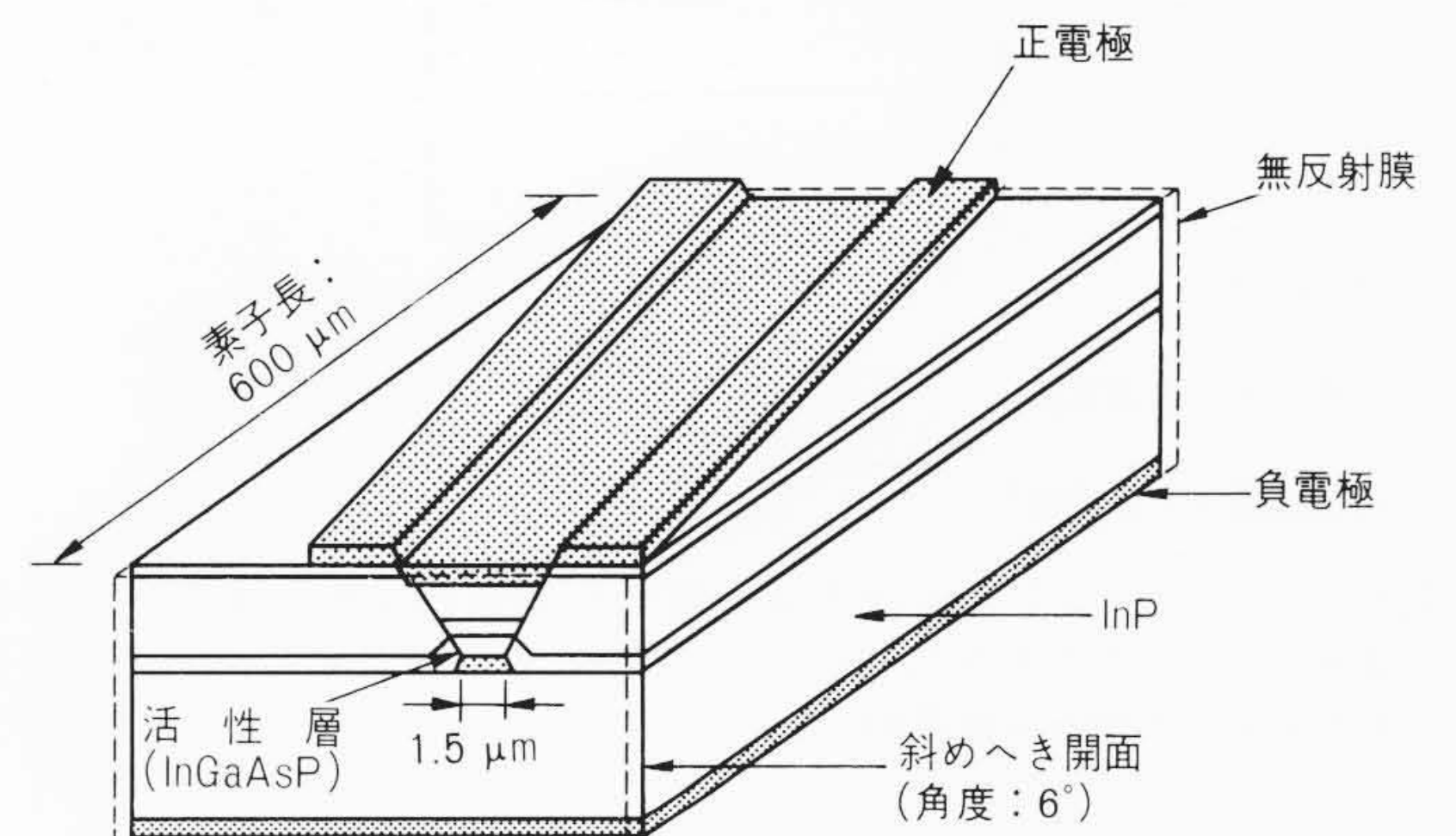


図5 光増幅器の構造 素子の両端面には無反射膜コーティングを施しており, さらに斜めへき開面(6°)によって反射率を抑えた進行波形構造となっている(基板はInP, 活性層はInGaAsP)。

ファイバ間利得として10 dB程度が得られている。この光増幅器を前置増幅器として用いた場合の受信感度改善を検討中であり, 現在, 10 Gビット/秒で6 dB程度の改善が得られることを確認した。これは, 波長1.55 μm 帯で約30 kmの長距離化が可能であることを示す。さらに大きな受信感度の改善効果を上げるためにはファイバーファイバ間利得の向上および自然放出光雑音の低減が必要である。また, 試作増幅器では, TE/TM(Transverse Electric/Transverse Magnetic)モード間の利得差が約8 dBとやや大きく, 偏波依存

性の低減も必要であり、活性層構造の最適化などによる対策が今後の課題である。光増幅器のシステム応用についてはまだ基本検討の段階であるが、将来の光通信各分野のキーデバイスとして期待される。

3 コヒーレント光伝送方式

コヒーレント光伝送方式の研究開発では、多チャネル光FDM(周波数分割多重)伝送システムの実現を目指した動きが活発化している^{12)~15)}。コヒーレント光伝送方式を用いた放送形4チャネル光FDMシステムの構成とその要素技術を図6に示す。光送信装置に入力された4チャネルの電気信号(チャンネル1~4)は、異なる光周波数($f_1 \sim f_4$)を持つ光源をそれぞれ周波数変調することによって光信号に変換され、光カップラで多重化される。光受信装置では、受信信号光と局部発振光との掛け算処理(ヘテロダイン検波)により所望の1

チャネルを選んで原信号を復調している。このようなシステムの実現には、偏波ダイバシティ受信方式、光チューニング方式などの要素技術の開発が不可欠となる。本章では、偏波ダイバシティ受信方式および光チューニング方式の方式提案と実験結果について述べる。

3.1 偏波ダイバシティ受信方式

コヒーレント光伝送システムでは、光ファイバの中を伝搬する信号光の偏波(電界方向)が外乱によって変動する。したがって、ヘテロダイン検波時に信号光と局部発振光の偏波が異なり、偏波が直交する場合には復調信号が得られないことも生じる。特に、光FDM伝送システムでは各チャネルごとに偏波の時間的変動が異なるため、安定なチャネル選択が困難になるので、偏波変動対策が不可欠となる。従来からさまざまな方式が提案されてきているが、現在では電氣的に偏波変動を補償する偏波ダイバシティ方式が最も有望と考えられ

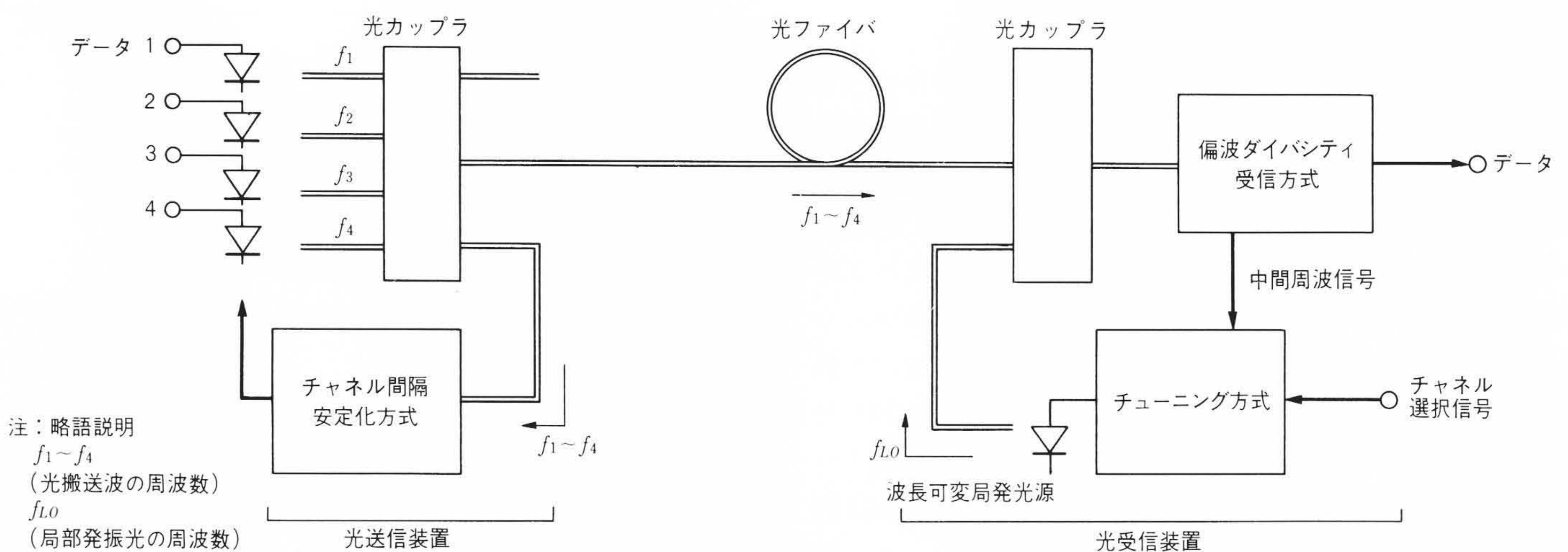
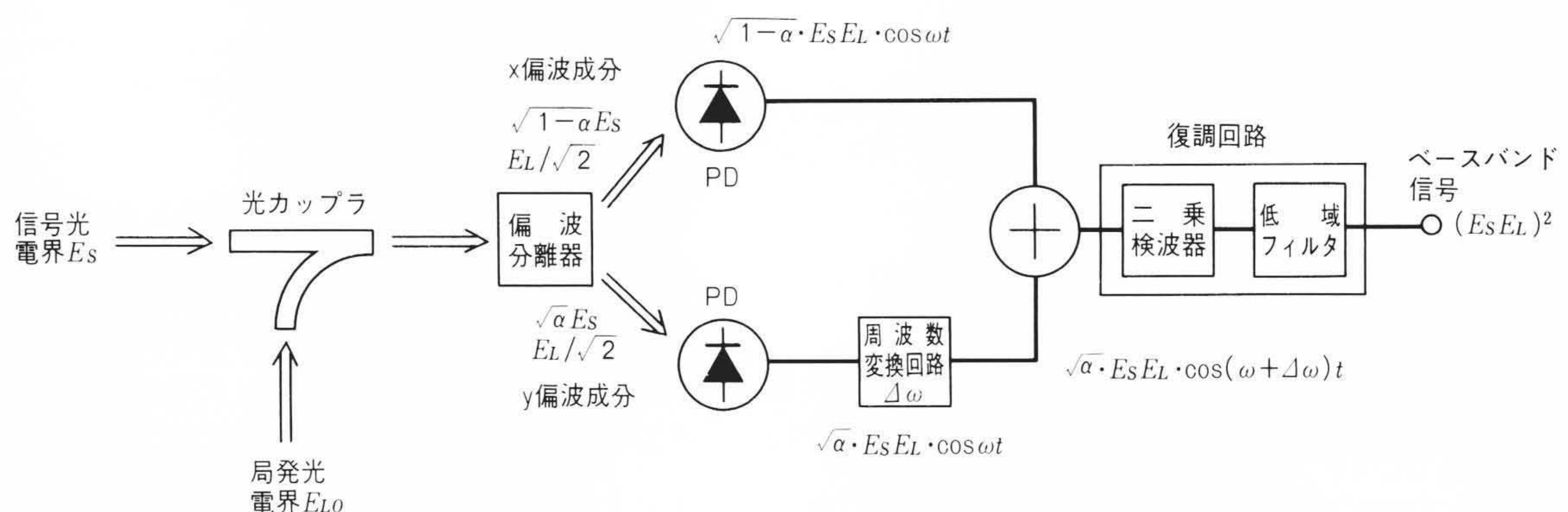


図6 コヒーレント光伝送方式を用いた放送形4チャネル光FDMシステムの基本構成とその要素技術 光送信装置には4チャネルのデータ信号(1~4)が入力され、それぞれが異なる光周波数($f_1 \sim f_4$)の光源を変調し、光カップラで多重化される。光受信装置ではチューニングによって4チャネルの中から任意の1チャネルを選択し、データとして再生する。



注：略語説明 α (パワー分配比), ω (中間周波角周波数), $\Delta \omega$ (周波数変換量), PD (受光素子)

図7 偏波ダイバシティ受信器の基本構成 信号光は局発光と合波された後に、偏波分離器によってxおよびy偏波成分に分離され、それぞれ受信される。y偏波受信信号は周波数変換された後にx偏波受信信号と加算されて、復調回路によりベースバンド信号に変換される。

ている。偏波ダイバシティ方式とは信号光の偏波を直交する二つの成分に分け、それらの成分を別々に2台の光受信器で受信した後、電氣的に加算して復調するもので、偏波が0度から90度まで変動しても安定した受信が可能となる特長を持つ。

今回提案した偏波ダイバシティ受信方式¹⁶⁾は、一方の光受信器(y偏波用)の信号を周波数変換した後に他方の光受信器(x偏波用)の信号を加算し、1台の復調回路で加算信号から原信号を再生する方式である。この方式は、前回報告した方式¹⁷⁾とは異なり局部発振光源が1台で済む。また、従来方式に比較して復調回路が一式で済み、位相調整が不要であるため受信器を簡略化できる利点がある。この方式の有効性を確認するために試作した実験系を図7に示す。信号光は光カップラによって局部発振光と合波された後に、偏波分離器によってxおよびy偏波成分に分離され、別々に受信される。周波数変換回路は発振器、周波数ミキサおよびフィルタとで構成しており、y偏波用受信器にだけ設けられている。実験結果を図8に示す。偏波変動によってy偏波用受信器へのパワー分配比が0から1まで変化した場合であっても、受信感度の変動幅を0.6 dB以内に抑圧できるという結果を得た。これは、信号光の偏波変動にかかわらず安定な受信が可能であることを示すものである。

3.2 光チューニング方式

受信装置では局部発振光の周波数をチャンネル選択信号に応じて変更することにより、多チャンネルの信号光の中から所要のチャンネルを選択受信できる。今回、チャンネル選択(光チューニング)方式としてビートカウント方式を提案した¹⁸⁾。この方式は、チューニング(局部発振光周波数掃引)時に検出される信号光と局部発振光とのビート信号の発生回数を計数す

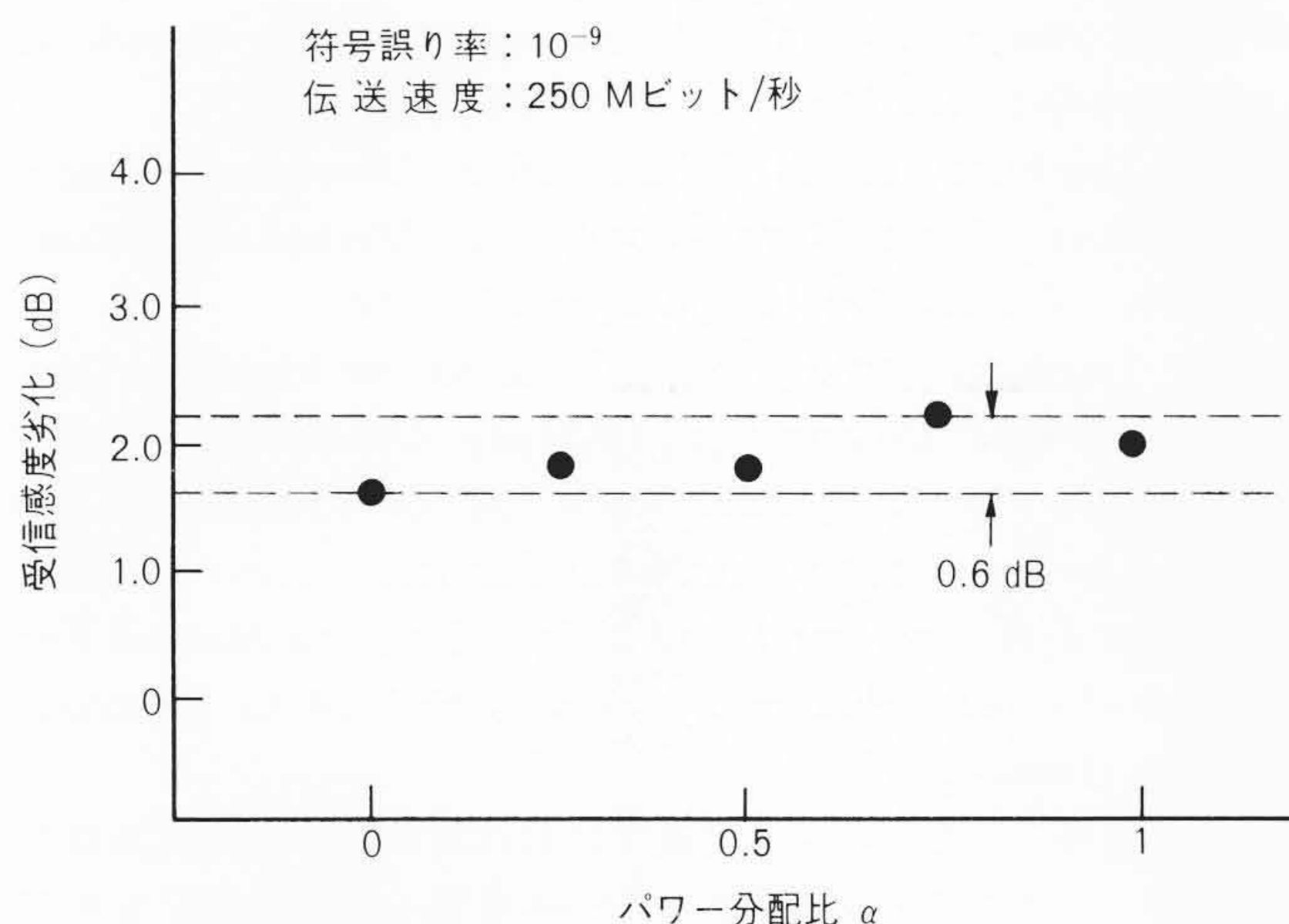
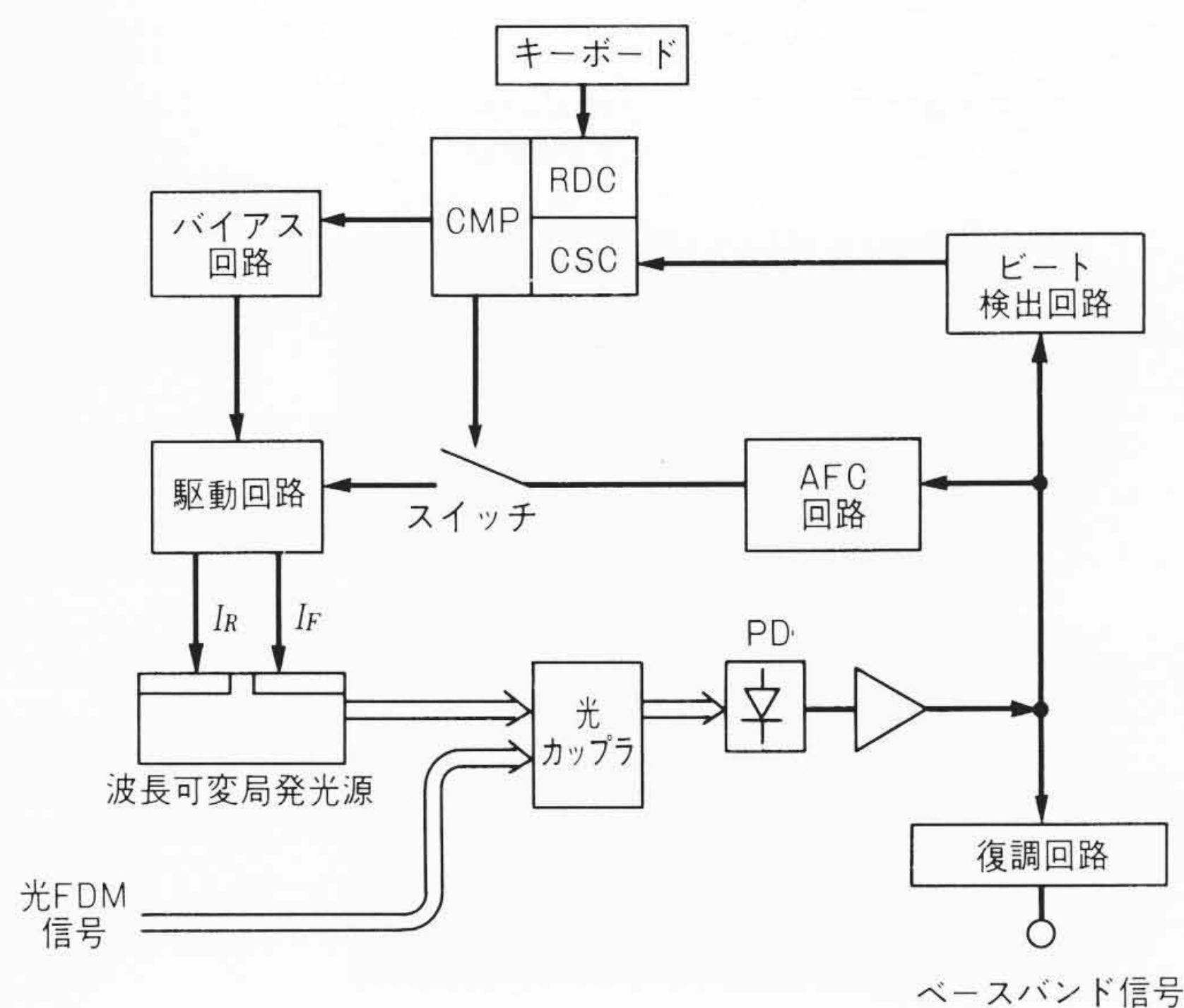


図8 受信感度のパワー分配比依存特性 パワー分配比0から1の偏波変動に対して、受信感度変動幅は0.6 dBに抑圧されている。なお、1.6 dBの受信感度劣化は偏波-周波数変換に伴う固定劣化量である。



注：略語説明 RDC (Register for Desired Channel)
CSC (Counter for Selected Channel)
CMP (Comparator)
AFC (Automatic Frequency Control)

図9 ビートカウント形光チューニング方式を用いた受信器の構成 ユーザーが選択しようとするチャンネルの番号をキーボードから入力すると、波長可変光源の光周波数が選択しようとするチャンネルの信号光に向かって掃引される。ビート検出回路は、局発光と通過する信号光間で生じるビート信号の数を計数し、局発光周波数が所要のチャンネルに達した瞬間にAFCループをオンとして、チャンネルを引き込む。

ることにより、所要チャンネルを確定するものである。従来方式¹⁹⁾に比較すると信号光の周波数ドリフトに対して強く、また局部発振光源の光周波数特性を記憶する必要がないなど、信頼性および装置の簡略さの点で優れている。ビートカウント形光チューニング装置の構成を図9に示す。ユーザーが選択しようとするチャンネルの番号をキーボードから入力すると、AFC(自動周波数制御)ループは開(スイッチオフ)となる。同時に、バイアス回路により局部発振光源(波長可変レーザ)の光周波数が選択しようとするチャンネルに向かって掃引される。ビート検出回路は、局部発振光と通過する信号光との間で生ずるビート信号の数を計数し、選択しようとするチャンネルに局部発振光の周波数が達した瞬間に掃引を停止させてから、再びAFCループを閉(スイッチオン)としてそのチャンネルを引き込む。チャンネル切換(チャンネル4→チャンネル1)実験の結果を図10に示す。チューニング範囲として、150 GHzが得られた。これは、伝送速度600 Mビット/秒で20チャンネル分(チャンネル間隔周波数: 7.2 GHz)のチューニングが可能であることを示す。なお、150 GHz離れたチャンネル間の切換時間は15 ms以内であり、放送形サービスには十分な特性が得られた。

4 結 言

次世代広帯域ISDNの構築に不可欠な10 Gビット/秒光伝

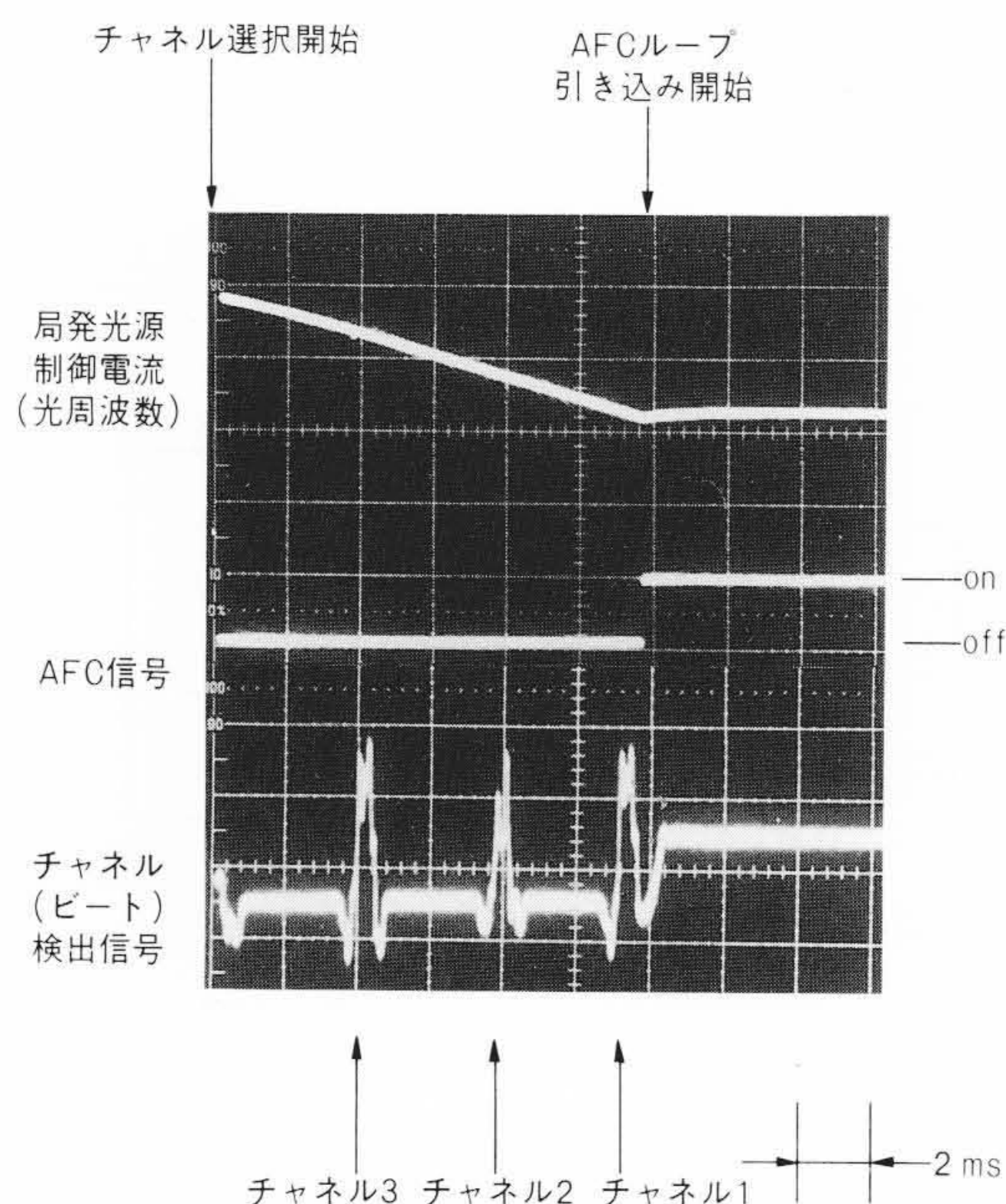


図10 ビートカウント形光チューニング方式のチャンネル切換特性
チャンネル選択信号によって局発光源の制御電流、すなわち光周波数の掃引が開始される。ビート検出信号の数によって所望のチャンネルを判断し、AFCループで引き込む。150 GHz離れたチャンネル間の切換時間は15 msである。

送方式およびコヒーレント光伝送方式に関する最新の研究成果について述べた。前者については、 $\frac{\lambda}{4}$ DFBレーザとFET駆動回路を一体内蔵した送信モジュールを試作し、モジュール化が技術的に可能であることを明らかにした。また、光ファイバ40 kmを用いた伝送実験によって10 Gビット/秒光伝送が可能であることを示した。駆動回路のIC化およびAPDの採用によって高感度化を図っていく予定である。さらに、進行波形半導体光増幅器を前置増幅器として用い受信感度が約6 dB向上することを確認し、30 km程度の長距離化が可能であることを示した。後者については、x偏波とy偏波をそれぞれ異なった周波数に変換・合成後、信号を復調する偏波-周波数変換形ダイバシティ受信方式、および局部発振光源の光周波数を掃引したときに検出されるビートを計数する光チューニング方式を提案し、その有効性を検証した。今後は、これら方式をブラッシュアップすることによって実用化への基礎を固めていく予定である。

参考文献

- 1) 木村, 外: F-1.6 G方式概要, 電気通信研究所・研究実用化報告, Vol.36, No.2, 153~160(昭62-2)
- 2) S. Lumisch, et al.: 1.7 Gb/s Lightwave Transmission

- Field Experiments, ICC'86, 48.1(1986)
- 3) B. Enning, et al.: Bipolar FSK Heterodyne Transmission Experiment at 150 Mb/s Using a Directly Modulated Unequalized DFB Laser Diode, OFC'88, WG5(1988)
- 4) H. Nakano, et al.: Dual-in-line Laser Diode Module for Fiber-optic Transmission Up to 4 Gbit/s, IEEE J. Lightwave Technol., Vol.LT-5, pp.1403~11(1987)
- 5) A. Takai, et al.: A Highly Integrated 1.55 μm 2.4Gbit/s Optical Repeater Using $\frac{\lambda}{4}$ -shifted Distributed Feedback Laser Diode and Seven GaAs Integrated Circuits, Tech. Dig. European Conf. Optical Commun, ECOC'89, paper ThA19-6(1989)
- 6) 後藤, 外: 超高速用ハイブリッド集積LD/Driverモジュール, 1989年電子情報通信学会秋季全国大会, SC-8-2
- 7) K. Uomi, et al.: Ultra High-speed 1.55 μm $\frac{\lambda}{4}$ -shifted DFB PIQ-BH Lasers with Bandwidth of 17 GHz, Electron. Letts., Vol.25, pp.668~669(1989)
- 8) 中野, 外: 10 Gb/s光伝送用レーザ/FET駆動回路一体化送信モジュール, 電子情報通信学会第3回光通信システムシンポジウム資料(1989)
- 9) R. M. Jopson, et al.: 8 Gbit/s 1.3 μm Receiver Using Optical Preamplifier, Electron. Letts., Vol.25, pp.233~235(1989)
- 10) K. Hagimoto, et al.: A 10 Gb/s Long-Span Fiber Transmission Experiment Employing Optical Amplification Technique and Monolithic IC Technology, Tech. Dig. International Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Commun, IOOC'89, paper 20PDA-6(1989)
- 11) 辻, 外: 光増幅器を用いた光入力光変調, 1990年電子情報通信学会春季全国大会, SC-3
- 12) R.-P. Braun, et al.: Ten-channel Coherent Optic Fiber Transmission Using An Optical Traveling Wave Amplifier, ECOC'86, Post Deadline Paper, pp.29~32(1986)
- 13) M. Shibutani, et al.: Ten-channel Coherent Optical FDM Broadcasting System, OFC'89, THC2(1989)
- 14) B. Glance, et al.: Densely Spaced FDM Optical Coherent System With Near Quantum-limited Sensitivity and Computer-controlled Random Access Channel Selection, OFC'89, PD11(1989)
- 15) R. E. Wagner, et al.: 16-channel Coherent Broadcast Network at 155 Mb/s, OFC'89, PD12(1989)
- 16) H. Tsushima, et al.: Polarisation Diversity Optical Receiver Using Novel Combining Method, Electron. Letts., Vol.25, No.15, pp.996~998(1989)
- 17) H. Tsushima, et al.: Novel Polarisation-frequency Conversion-type Polarisation Diversity Optical Receiver, Electron. Letts., Vol.25, No.8, pp.539~540(1989)
- 18) S. Kitajima, et al.: A Novel Random Access Tunable Heterodyne Receiver Using a Beat Counting Method For Multichannel Coherent Systems, submitted to Electron. Letts.(1989)
- 19) 北島, 外: コヒーレント光通信におけるチャンネル間隔加算型光チューニング方式の提案, 1989年度電子情報通信学会秋季全国大会, B-457(平1-9)