

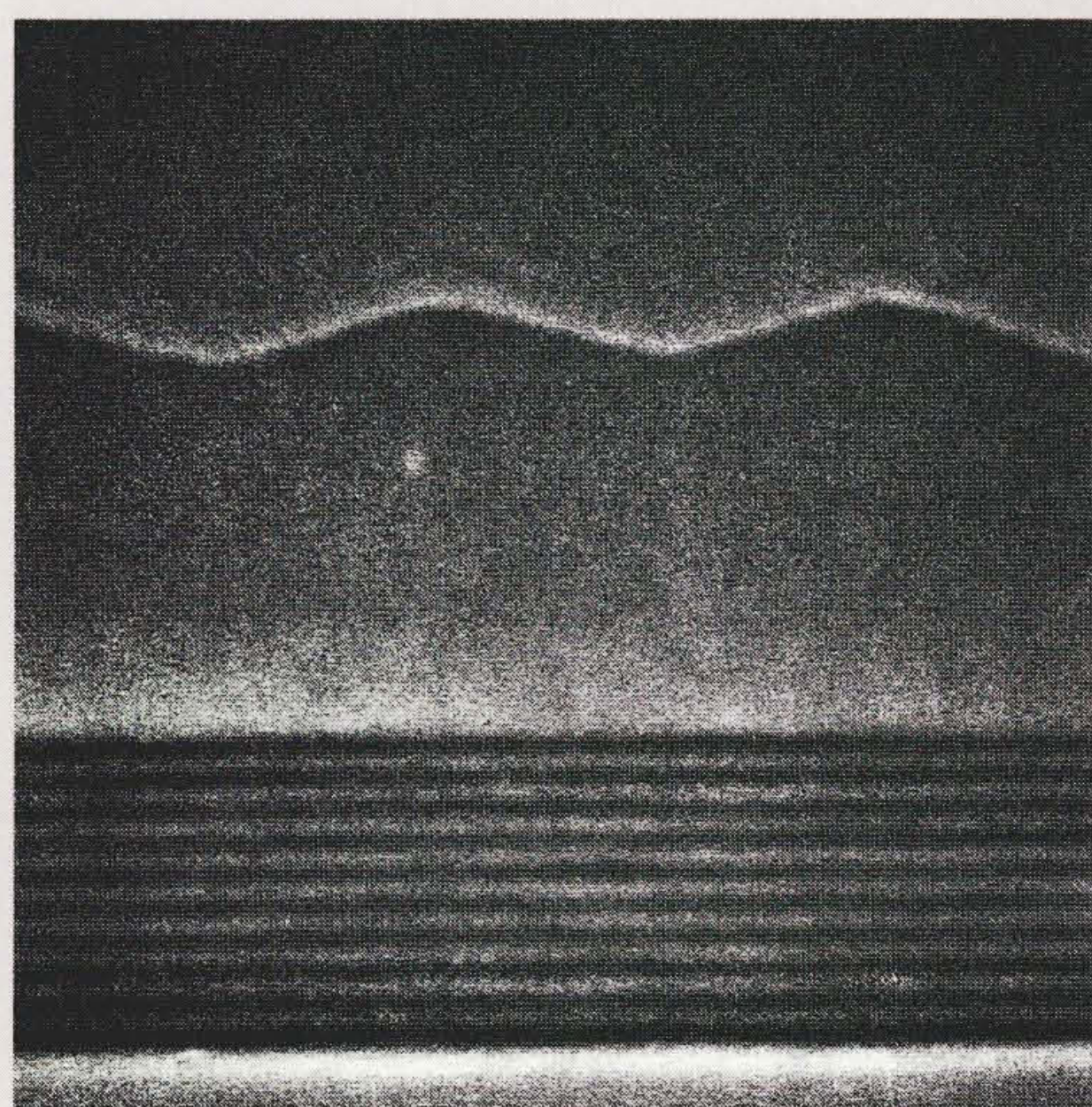
2.4 Gビット/s, 120 km光伝送用半導体レーザモジュール

Laser Diode Module for High-speed Large Capacity Optical Transmission

青木 聡* Satoshi Aoki

田中 強* Tsuyoshi Tanaka

嶋岡 誠** Makoto Shimaoka

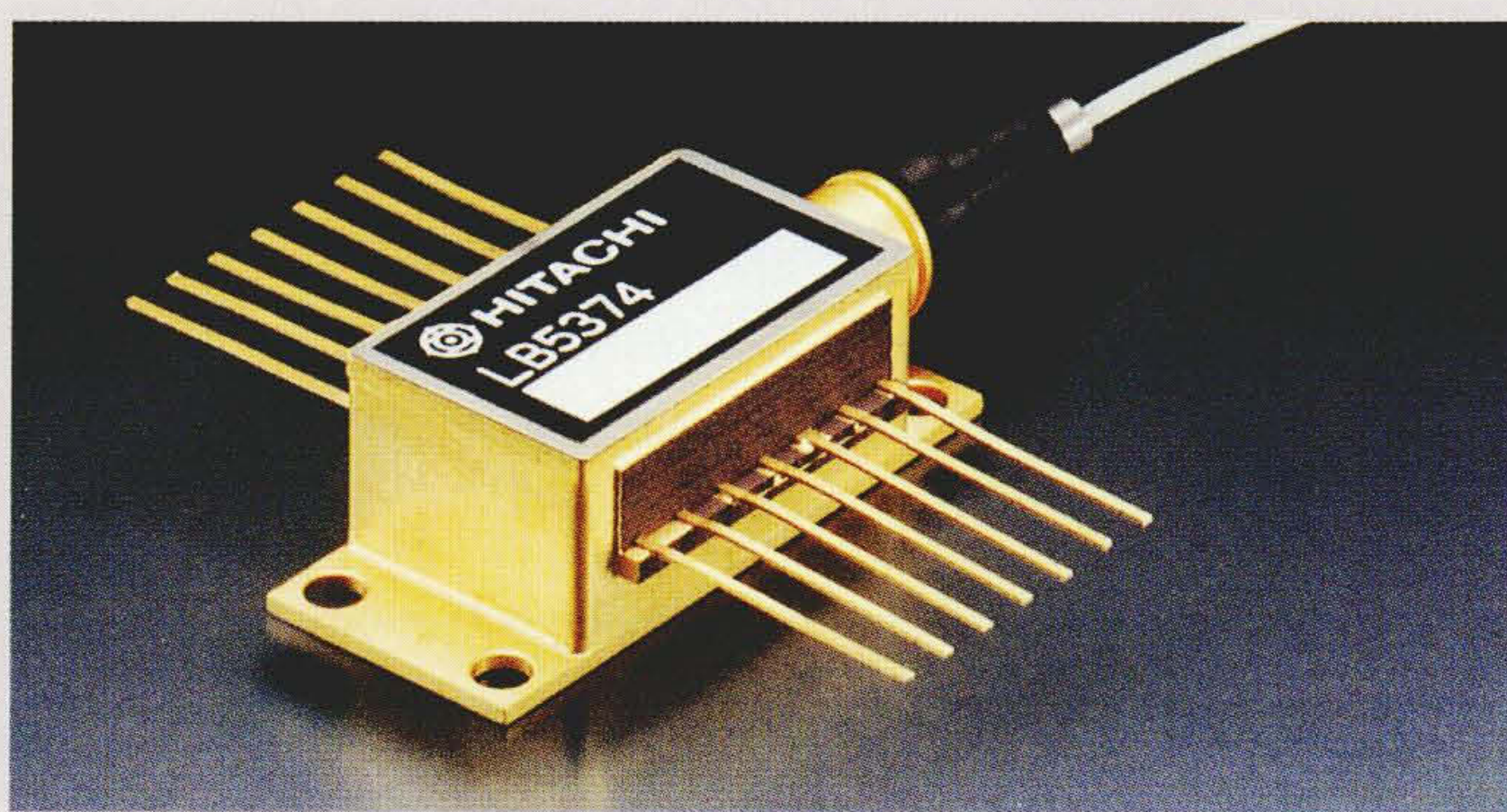


(b) MQW-DFB-LD断面の走査型電子顕微鏡写真

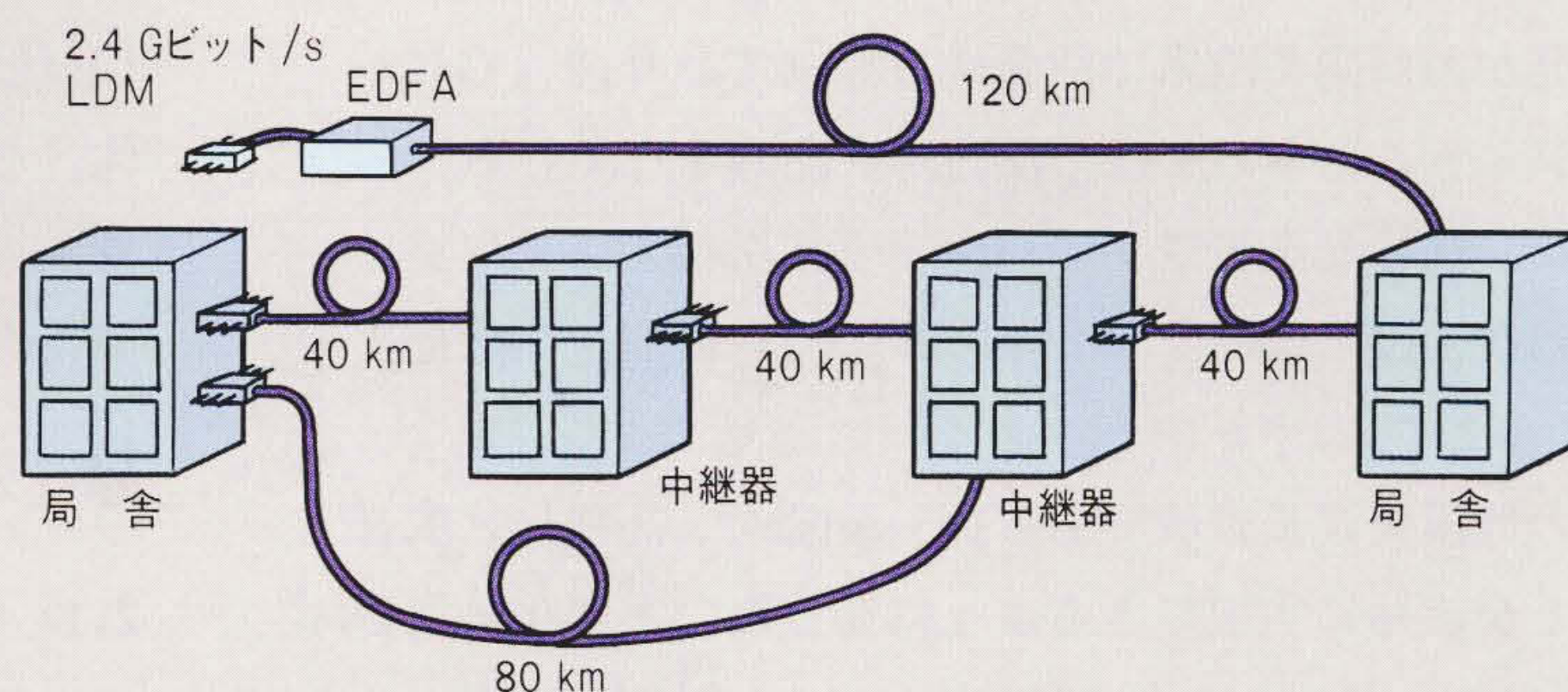
注：略語説明

LDM (Laser Diode Module)

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)



(a) 半導体レーザモジュール



高速・大容量長距離伝送半導体レーザモジュール
高速(2.4 Gビット/s)変調時に発振スペクトル幅の広がり小さいMQW-DFB-LDを用いて40 km, 80 kmおよび120 km伝送を達成した。

高速(2.4 Gビット/s)変調時に発振スペクトル幅の広がり小さいMQW-DFB-LDを用

最近、従来の電話サービスに加えて、映像伝送や高速データなどの広帯域サービスを国際的に相互接続可能とする広帯域ISDN(Integrated Services Digital Network)構築の要求が高まっている。このためには、幹線伝送用に2.4 Gビット/sや10 Gビット/sの高速・大容量光伝送システムが不可欠となる。このニーズにこたえて日立製作所は、2.4 Gビット/sや10 Gビット/s伝送の光源として用いるLD(Laser Diode)モジュールを開発した。

LDモジュールは、LDには変調時のスペクトル線幅の広がりを抑えた、チャープ特性の優れた多重量子井戸型 $\frac{1}{4}$ 波長シフトDFB-LD(Distributed Feed-

back-LD)を用い、光出力制御用モニタPD(Photodiode)、LD温度制御用サーミスタ、熱電子冷却素子、外部反射戻り光抑圧用30 dB光アイソレータとともに14ピンバタフライ型パッケージに内蔵した構成としている。

今回開発したLDモジュールは従来品が2 Gビット/s、40 kmの能力であったのに対し、2.4 Gビット/s、80 km伝送を達成している。また、Er(エルビウム)ドープ光ファイバ増幅器を用い、120 km伝送が可能であることを確認した。光伝送システムの中継間隔を2～3倍に延ばし、システムコストの低減を可能にした。

* 日立製作所 光技術開発推進本部 ** 日立製作所 機械研究所

1 はじめに

64 kビット/s系デジタル網による狭帯域ISDN (Integrated Services Digital Network)については、わが国をはじめ欧米ですでに商用サービスが行われている。しかし最近、従来の電話サービスに加えて、映像伝送や高速データなどの広帯域サービスを国際的に相互接続可能とする広帯域ISDN構築の要求が高まり、CCITT (国際電信電話諮問委員会)によって1988年11月にSDH (Synchronous Digital Hierarchy: 公衆通信同期網)の国際標準化が行われ、155.52 Mビット/sを基本速度とする世界統一インタフェースが勧告された。

このような背景に基づき、広帯域ISDN構築のため幹線伝送用に155.52 Mビット/sの16倍、64倍の伝送速度を持つ2.488 Gビット/s、9.953 Gビット/s、いわゆる2.4 Gビット/s、10 Gビット/sの高速・大容量光伝送システムの開発がわが国や欧米で活発に行われており、2.4 Gビット/sシステムについては一部商用が開始されている。

また、信号光を光ファイバ中で直接増幅する光ファイバ増幅技術は、ここ2、3年の間に急進展し、高性能のEr(エルビウム)ドープ光ファイバの開発により、光ファイバの低損失波長帯域である1.5 μm 帯で、高利得と広帯域性とが容易に実現できるようになった。実用化の進む2.4 Gビット/sシステムでは、光ファイバ増幅器を用いることによって従来の約2倍の伝送距離である120 km伝送の要求が高まっている。

ここでは2.4 Gビット/s伝送の光源として用いられる

表1 2.4 Gビット/s伝送用LDモジュール主要諸元 1.55 μm 帯伝送用では、1.3 μm ゼロ分散光ファイバ伝送時の分散劣化を低減するため、スペクトル線幅0.35 nmを達成している。

レーザ温度=25 $^{\circ}\text{C}$

項 目	記号	特 性		単位
		1.3 μm	1.55 μm	
光 ファイバ 出力	P_f	$\geq 2^*$	$\geq 1^*$	mW
発 振 波 長	λ_p	$1,310 \pm 20^*$	$1,550 \pm 20^*$	nm
サイドモード抑圧比	S_r	$\geq 35^{**}$		dB
スペクトル幅(-20 dB)	$\Delta\lambda$	Typ.0.45**	Typ.0.35**	nm
3 dB 帯 域 幅	BW	≥ 4		GHz
立上り・立下り時間	t_r/t_f	Typ.40/170	Typ.80/190	ps
熱電子冷却素子冷却能力	ΔT	≥ 40		K
トラッキングエラー	ΔP_f	≤ 0.5		dB
アイソレーション	L_B	≥ 30		dB
入力インピーダンス	Z_o	25		Ω

注：条件 * CW, レーザ駆動電流= $I_{th}+40$ mA

** 2.4 Gビット/s, NRZ, PRBS: $2^{23}-1$, ピーク=2 mW, バイアス電流= I_{th}

略語説明：NRZ (Non Return to Zero)

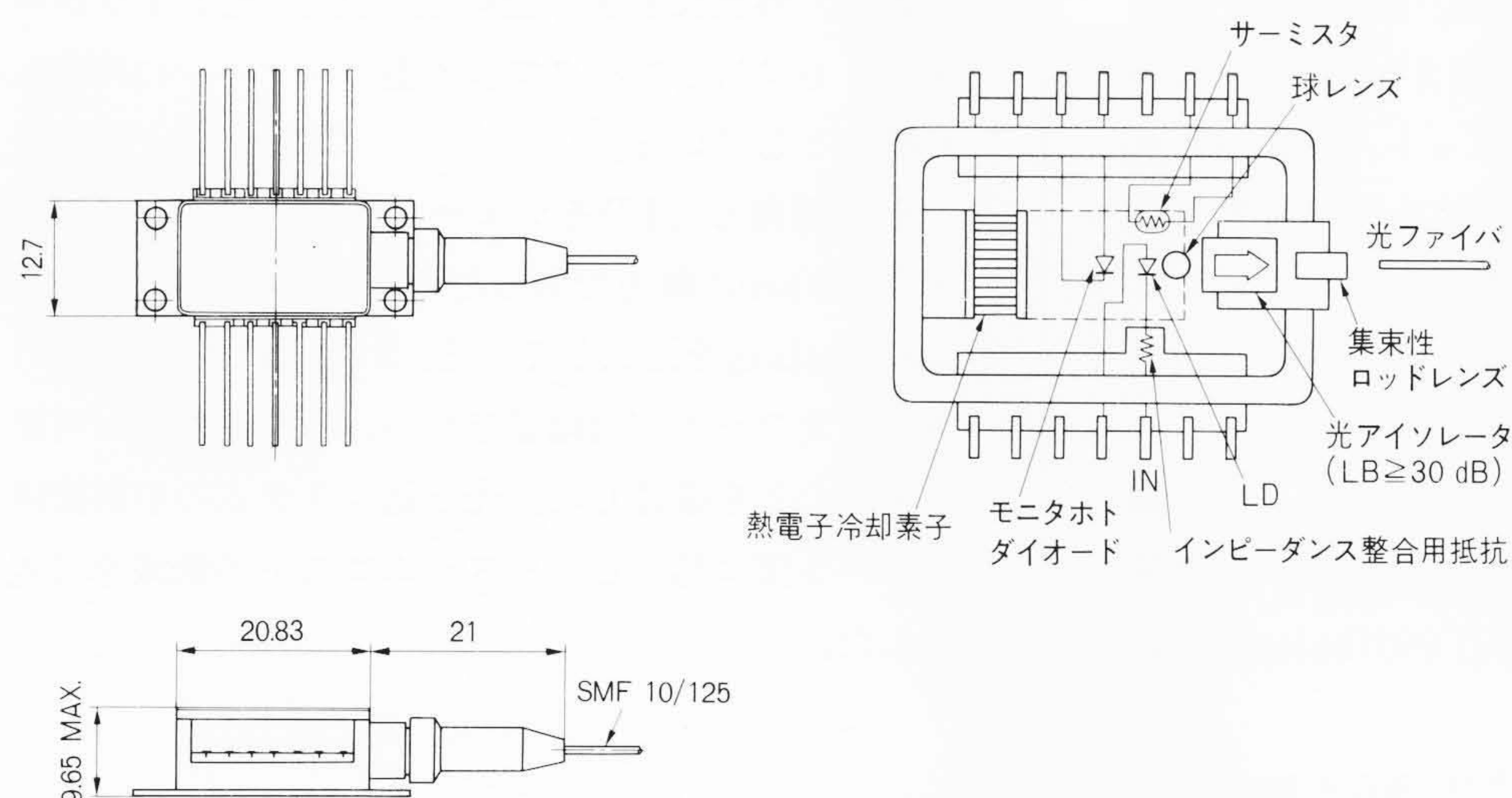
PRBS (Pseud-Random Bit Sequence)

LD (Laser Diode) モジュールの構造、機能および伝送特性、ならびに上記モジュールを基盤として開発した直接変調方式10 Gビット/s伝送用LDモジュールの構造と変調特性について述べる。

2 2.4 Gビット/s光伝送用LDモジュール

2.1 モジュール概要

1.3 μm と1.55 μm 帯2.4 Gビット/s伝送用LDモジュールの主要諸元を表1に、モジュールの外形寸法と内部構成を図1に示す。LDには高速変調時のスペクトル特性の優れた $\frac{1}{4}$ 波長シフト型DFB-LD (Distributed Feed-



注：略語説明ほか

LD (Laser Diode)

LB (Loss Backward)

SMF (Single Mode Fiber)

SMF 10/125 (コア径10 μm , クラッド径のSMF)

図1 2.4 Gビット/s伝送用LDモジュール外形寸法と内部構成 LDは光出力制御用モニタPD, LD温度制御用サーミスタ, 熱電子冷却素子, 外部反射戻り光抑圧用の30 dB光アイソレータとともに気密パッケージに内蔵されている。

back：分布帰還型¹⁾を用いており、特に1.55 μm 帯伝送用では1.3 μm ゼロ分散光ファイバ伝送時の分散劣化を低減するため、変調時のスペクトル線幅の広がりを抑えた、いわゆるチャープ特性の優れたMQW(Multi Quantum Well：多重量子井戸)構造²⁾を採用している。

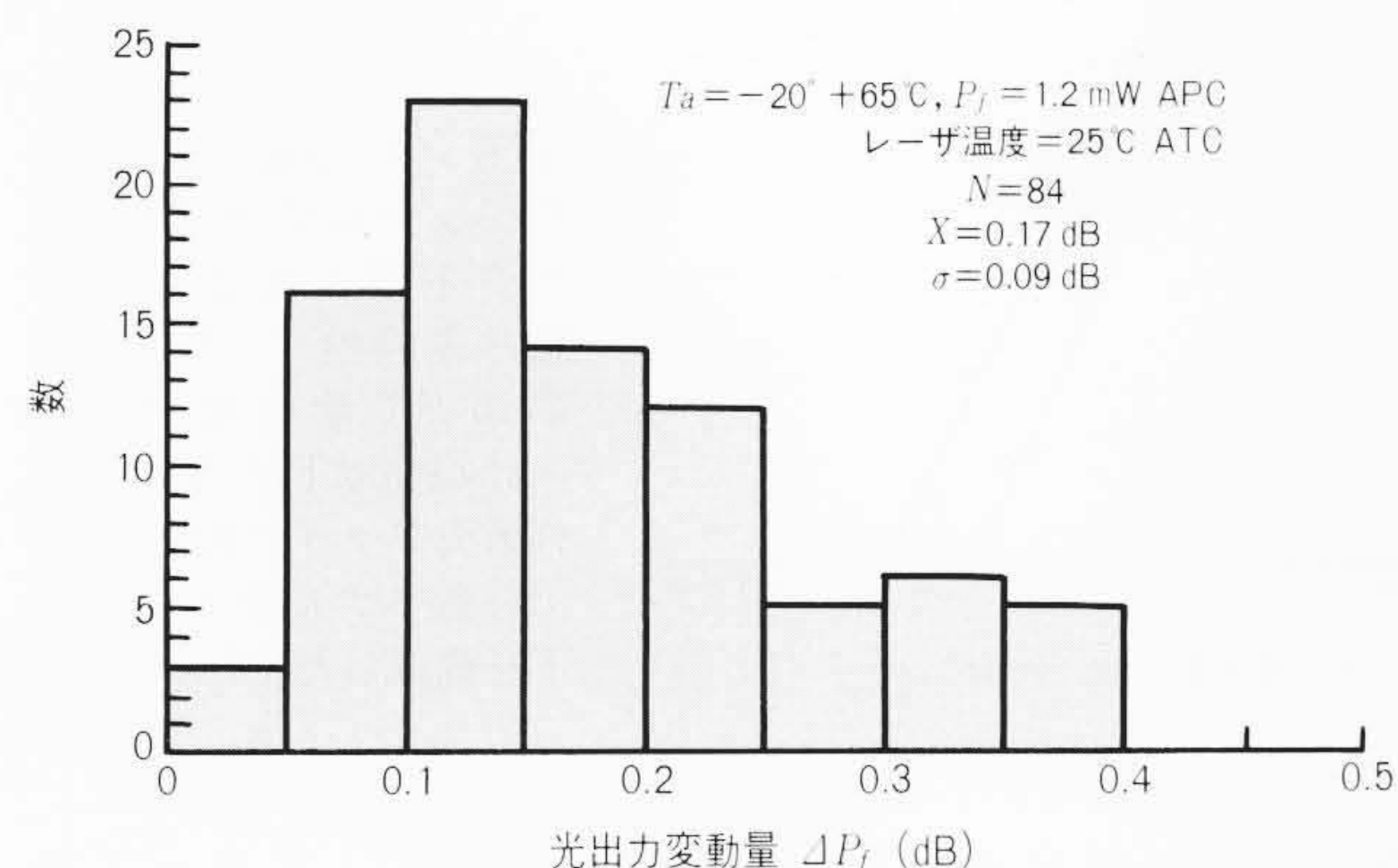
LDは光出力制御用モニタPD、LD温度制御用のサーミスタ、熱電子冷却素子、外部反射戻り光抑圧用の30 dB光アイソレータとともに14ピンバタフライ型気密パッケージに内蔵されている。パッケージ内に実装される部品はすべてフラックスレスはんだ固定とすることで、光素子の信頼度を確保している。

LDとピグテイルファイバとの光結合には、第1レンズに球レンズまたは非球面レンズを、第2レンズに集束型ロッドレンズから成る2レンズ結合光学系を採用し、レンズ間に光アイソレータを挿入した構成としている。結合効率は $-3 \sim -4$ dBが得られている。

周囲温度 $T_a = -20 \sim +65^\circ\text{C}$ での光ファイバ出力の変動量であるトラッキングエラー ΔP_f の分布を図2に示す。内蔵のモニタPDを用いたAPC(Automatic Power Control)、サーミスタ、熱電子冷却素子を用いたATC(Automatic Temperature Control)駆動により、周囲温度 $T_a = +65^\circ\text{C}$ で、LD温度 T_{LD} を 25°C 以下に制御可能とするための冷却能力 $\Delta T \geq 40^\circ\text{C}$ を熱電子冷却素子駆動電流 $I_c \leq 1$ A以下で達成しており、 $\Delta P_f \leq 0.5$ dBの安定な特性が得られている。

以上のように、 $-20 \sim +65^\circ\text{C}$ の動作温度範囲で安定動作を可能としている。

変調信号入力端子の入力インピーダンスを 25Ω とし、



注：略語説明 APC (Automatic Power Control；自動光パワー制御)
ATC (Automatic Temperature Control；自動温度制御)

図2 光ファイバ出力トラッキングエラー分布 周囲温度 $-20 \sim +65^\circ\text{C}$ の範囲でAPC、ATC駆動により、変動量0.5 dB以下の安定動作が得られている。

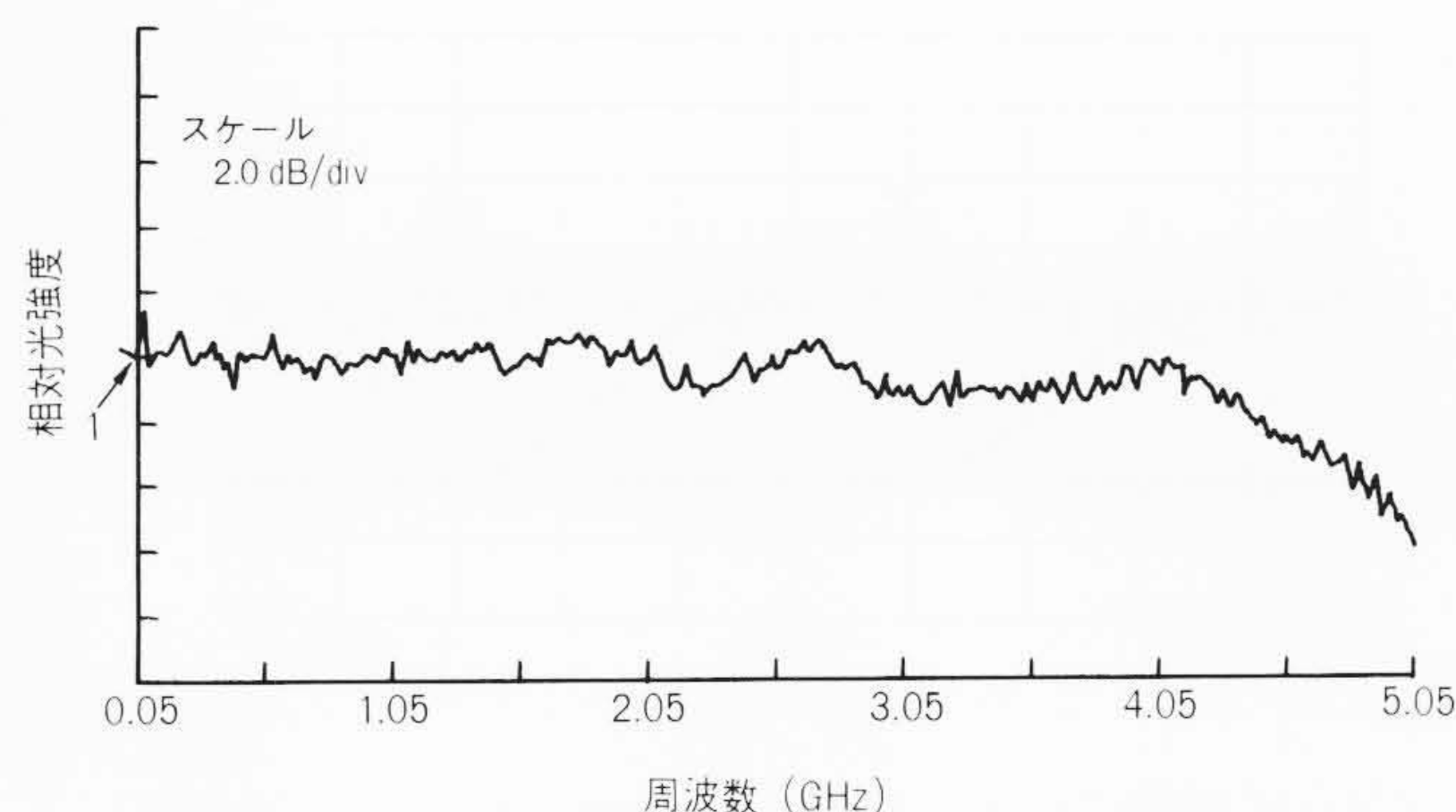


図3 小信号周波数応答特性 DC ~ 2 GHzでのリプル ± 0.5 dB以下、3 dB帯域4.5 GHzを達成した。

チョークコイルの内蔵によってバイアス印加端子を別端子とすることで駆動回路の負荷を低減するとともに、2.5 Gビット/sでの高速動作特性を達成している。1.3 μm DFB-LDを搭載したモジュールの小信号周波数応答特性を図3に示す。DC ~ 2 GHzでのリプルが ± 0.5 dB以下、3 dB帯域が4.0 GHz以上の特性を得ている。

2.2 伝送特性

1.3 μm DFB-LDを図4に、1.55 μm MQW-DFB-LDを搭載したモジュールの光送信波形、変調時スペクトラムおよび符号誤り率特性の代表例を図5に示す。光送信波形は帯域14 GHz以上の受信器を用いて測定している。1.3 μm 、1.55 μm ともにLDの緩和振動周波数は9 GHz以上である。1.3 μm ゼロ分散光ファイバ伝送時の符号誤り率特性については、図4に示す1.3 μm 伝送用では40 km伝送で分散ペナルティ $P_d \leq 0.5$ dBが得られている。図5に示す1.55 μm 伝送用では分散が1,360 ps/nmとなる80 km伝送でも、MQW-DFB-LDの狭スペクトル線幅、低チャープ特性の効果によって分散ペナルティ $P_d \leq 1.0$ dBが得られている。80 km伝送時の受信感度がBack to Back(光ファイバを伝送させない状態)での受信感度より低い値を示す負性の分散ペナルティとなる場合があるが、この原因については後述の120 km伝送結果を用いて説明する。

120 km伝送では光ファイバの損失が約30 dBとなり、測定用光部品の損失を含めるとその損失は約35 dBとなる。受信器の最小受信感度が約 -30 dBmであることから、受信光電力は安定な符号誤り率測定を可能とするため -30 dBm以上、送信光電力は光ファイバ伝送路の非線形効果の影響³⁾を受けない $+10$ dBm以下となるレベルに設定した。光ファイバ増幅器には1.48 μm 励起のErドー

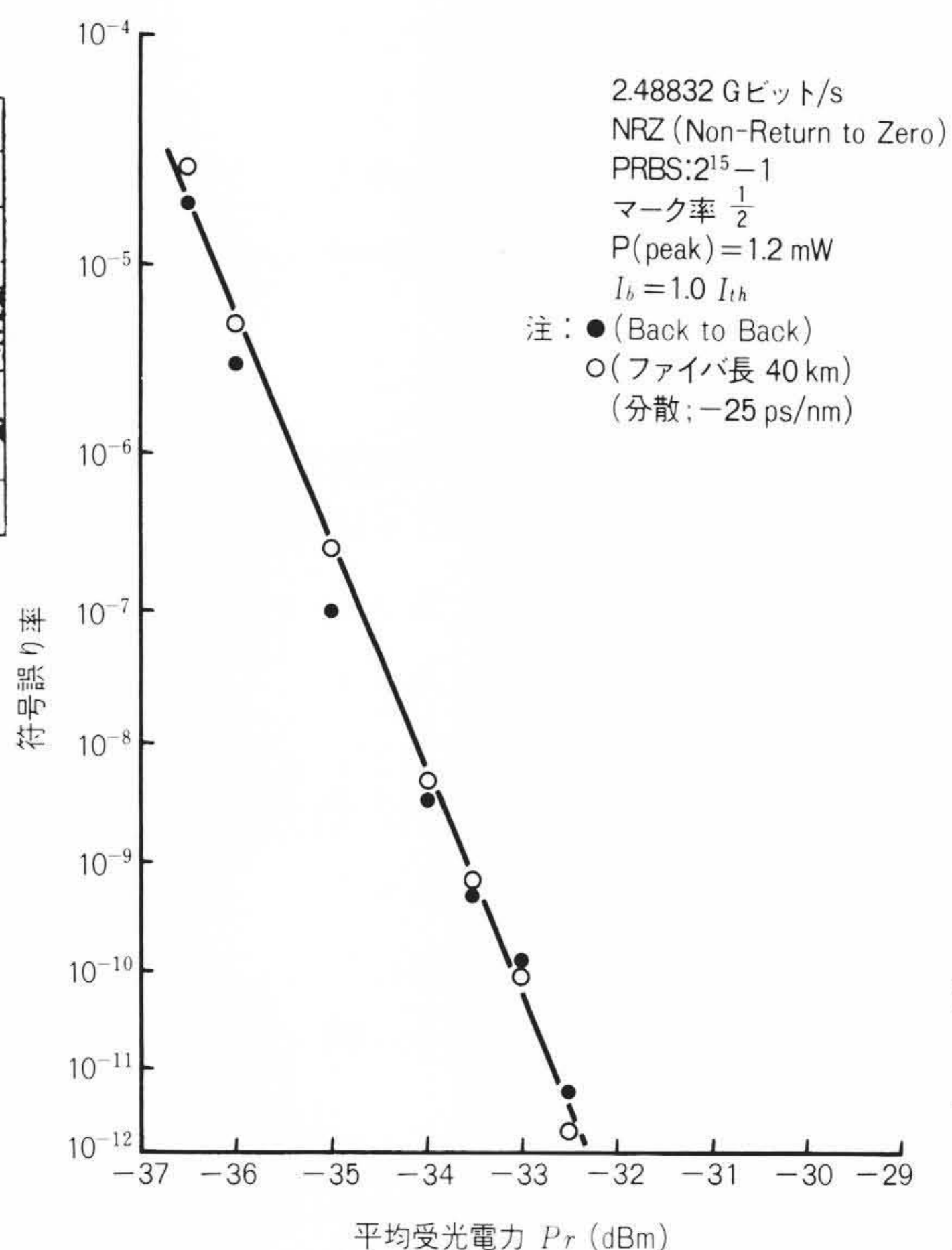
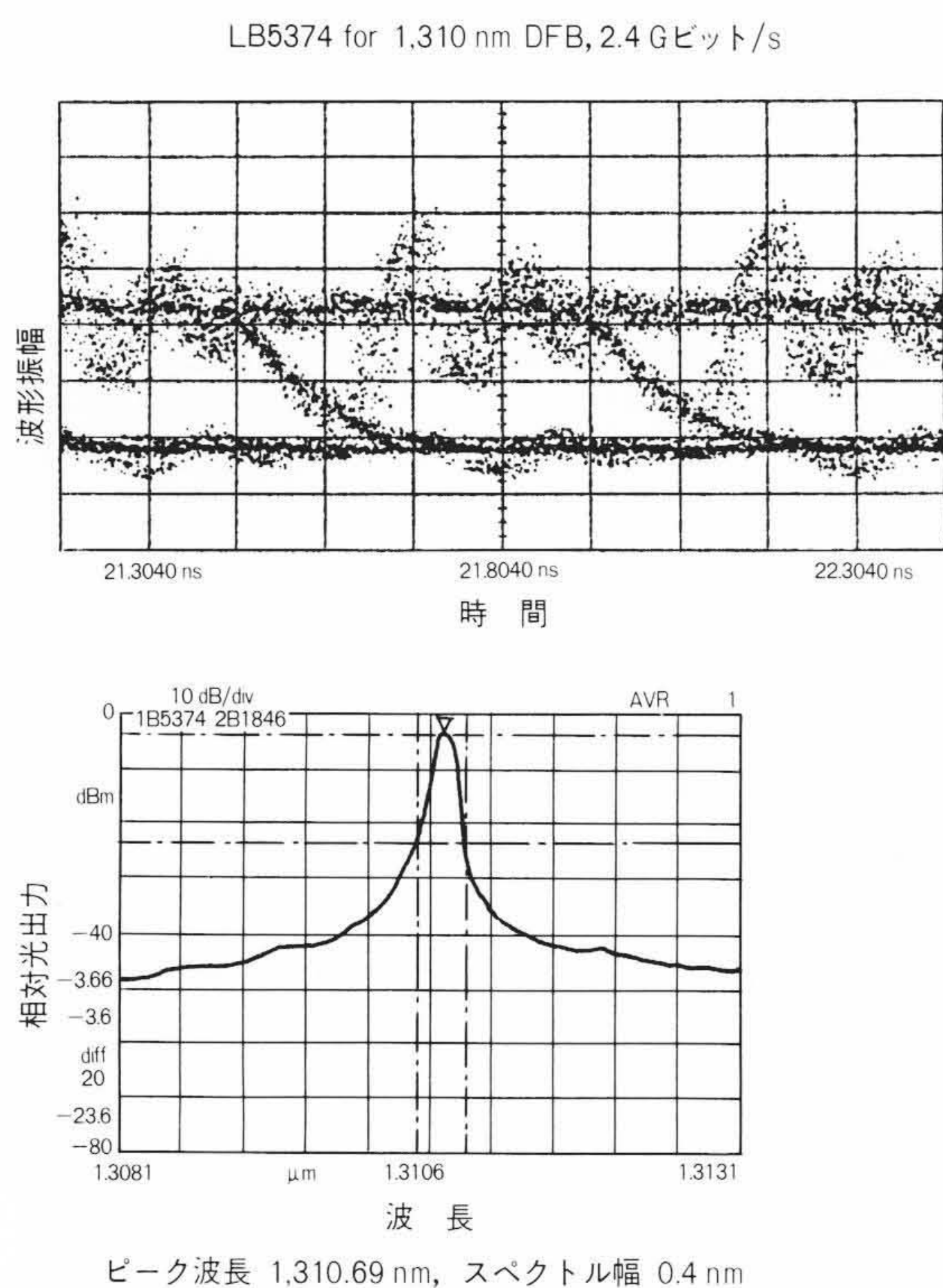


図4 1.3 μm 波長LDモジュールの光波形、スペクトラムおよび符号誤り率特性 符号誤り率 10^{-10} で最小受信感度 -33 dBm 以下、1.3 μm ゼロ分散光ファイバ40 km伝送で分散ペナルティ0.5 dB以下を達成した。

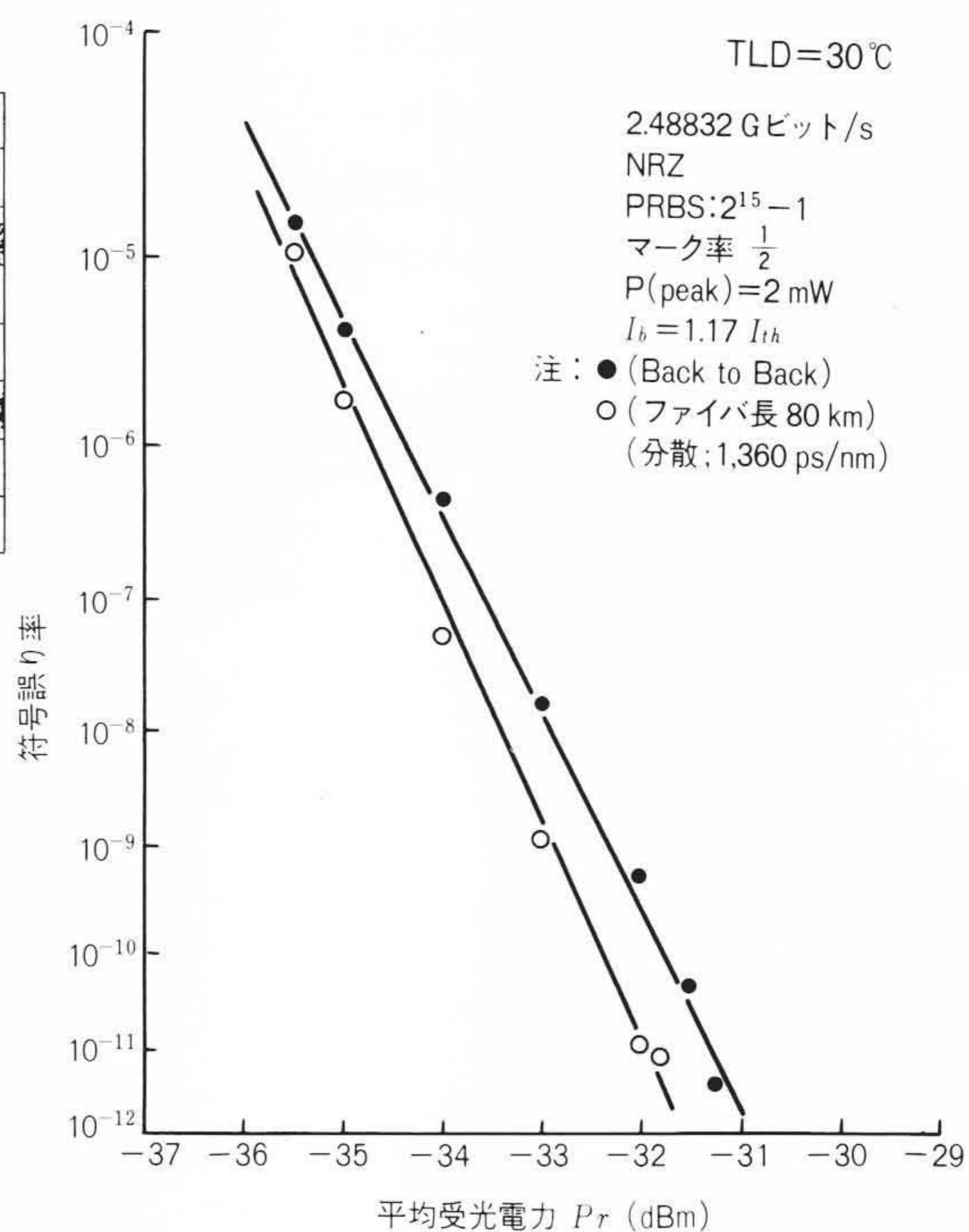
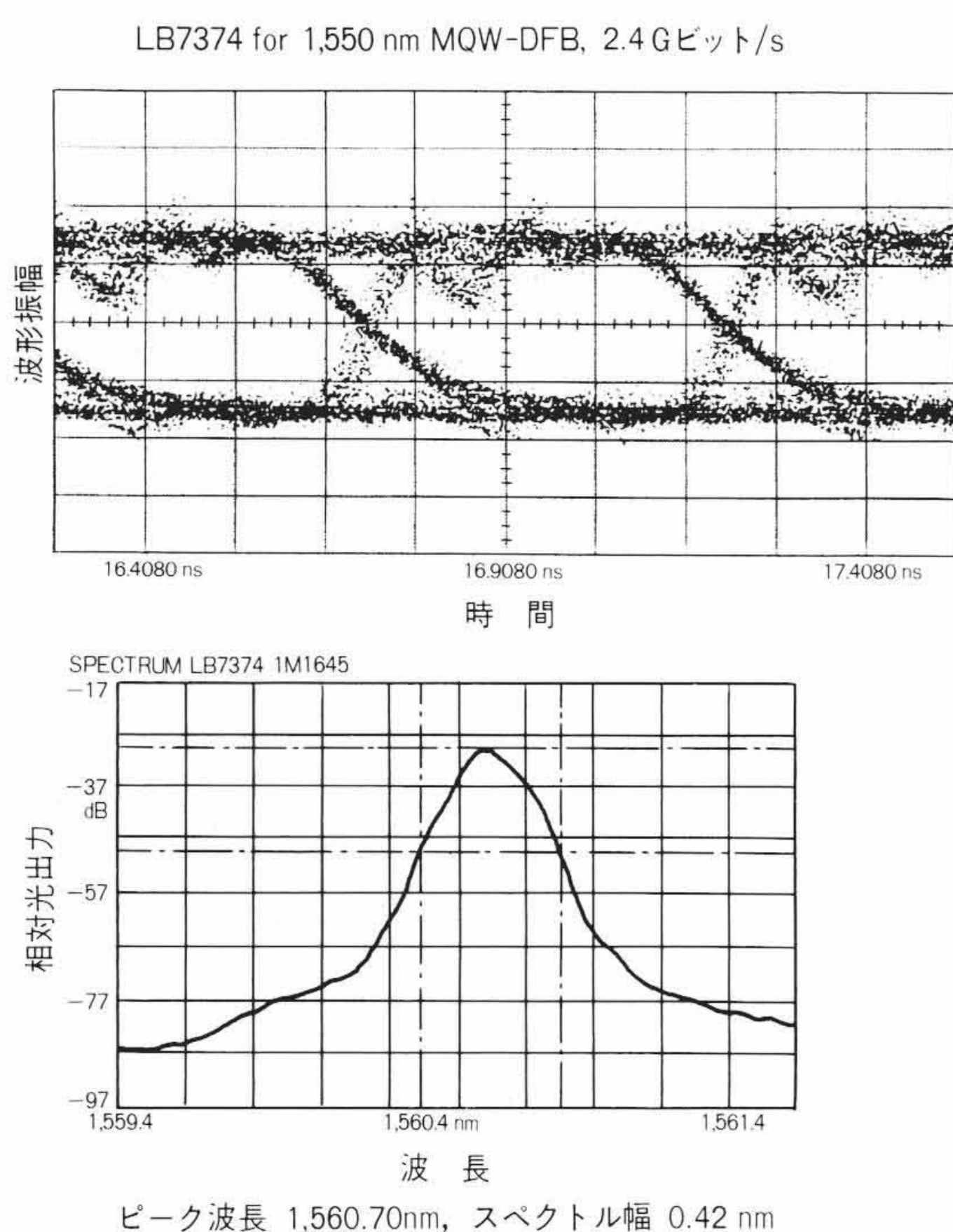


図5 1.55 μm 波長LDモジュールの光波形、スペクトラムおよび符号誤り率特性 符号誤り率 10^{-10} で最小受信感度 -31 dBm 以下、1.3 μm ゼロ分散光ファイバ80 km伝送で分散ペナルティ1 dB以下を達成した。

プ光ファイバ増幅器を用い、利得は約10 dBとしている。使用した120 km光ファイバは1.3 μm ゼロ分散光ファイバであり、分散は約2,100 ps/nmである。符号誤り率特性の代表例を図6に示す。

120 km伝送時の受信感度はBack to Backでの受信感

度より低い値を示す負性の分散ペナルティとなっている。LDのチャープ特性は、立上りや緩和振動のオーバシュート部分では、LD活性層内のキャリア密度が高まることから短波長側へのシフトを生じ、立下りや緩和振動のアンダシュート部分では、キャリア密度が減ることか

ら長波長側へのシフトが生ずる。このチャープ特性と光ファイバの分散特性により、図7に示すようにパルス幅は光ファイバを伝搬するに従って圧縮されることから、受信波形の符号間干渉が低減され受信感度が向上し、分散ペナルティは負性となる。

以上、2.4 Gビット/s伝送用LDモジュールはCCITT規格を満足する特性を達成しており、すでに実用に供されている。

3 10 Gビット/s伝送用LDモジュール

10 Gビット/s伝送用LDモジュールとして、LDとLD駆動回路部との接続部に寄生するリアクタンスを低減するため、LDとLD駆動用ICとを同一のパッケージに内蔵したモジュールが検討⁴⁾されている。一方、実用化が開始された2.4 Gビット/s光伝送システムでは、ユーザーが複数のLDモジュールのサプライヤーを持つ必要性のあることから、前章で述べたようなLDモジュールを用いてLD駆動回路をモジュール外部に設置する形式が主流となっている。10 Gビット/s光送信器でも2.4 Gビット/s光送信器と同一の形式が主流となるであろうとの考えに基づいて開発した直接変調方式10 Gビット/s伝送用LDモジュールについて次に述べる。

前章で述べた2.4 Gビット/s伝送用LDモジュールのパ

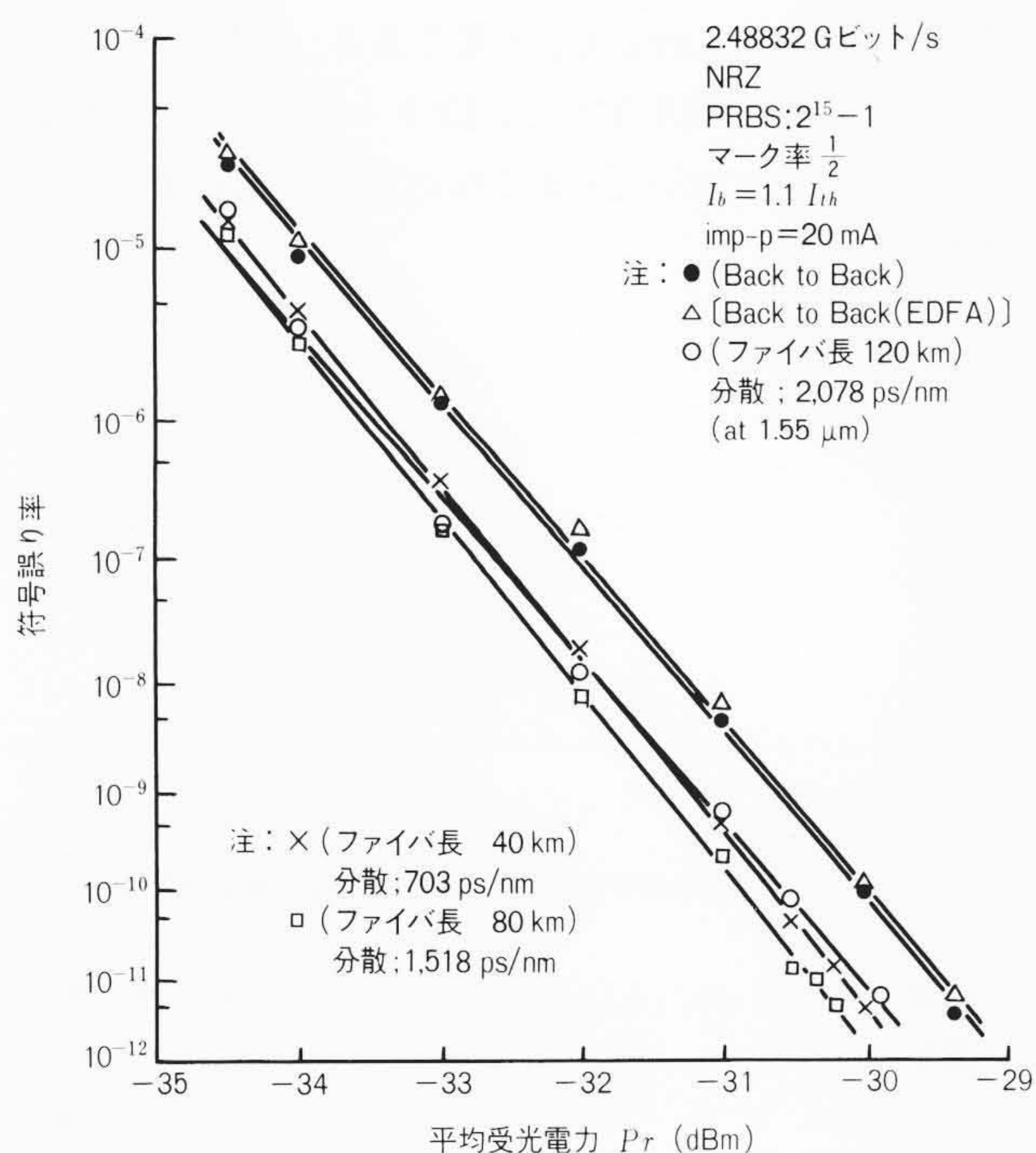


図6 1.55 μ m波長LDモジュールの120 km伝送符号誤り率特性 分散2,100 ps/nmとなる120 km伝送でエラーフリー伝送を達成し、LDの低チャープ特性を確認した。

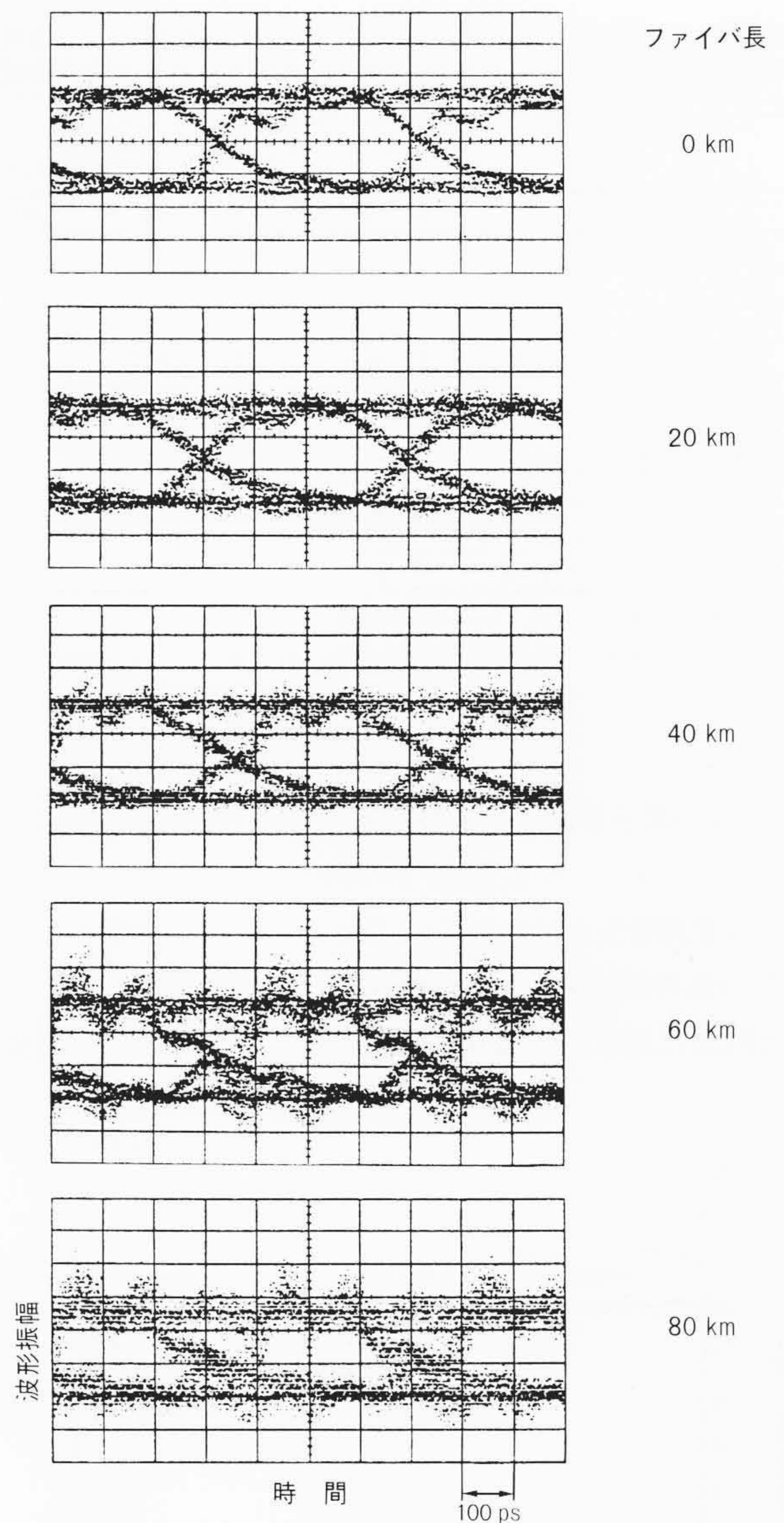


図7 光波形の伝送距離依存性 LDのチャープ特性と光ファイバの分散特性により、パルス幅は光ファイバを伝搬するに従って圧縮され、符号間干渉が低減される。

パッケージが10 GHz以上の帯域を持っていることから、パッケージ内部構造の見直しにより、高周波信号入力端子からLDに至る高周波パス部のインダクタンスを低減することで10 Gビット/s変調特性を達成している。LDには10 Gビット/s光伝送用MQW- $\frac{1}{4}$ 波長シフト型DFB-LD⁵⁾を搭載し、内蔵部品、機能は2.4 Gビット/s伝送用LDモジュールと同等とした。主要特性を表2に、小信号周波数応答特性を図8に示す。3 dB帯域幅は11.1 GHzであり、同モジュールに搭載したLD素子単体での3 dB帯域幅が12 GHzであることから、パッケージングによる帯域劣化はほとんどないものと考えられる。

10 Gビット/s, $I_b = I_{th} + 10$ mA時の光波形を図9に示

表2 10 Gビット/s伝送用LDモジュール主要諸元 高周波信号入力端末からLDに至る高周波パス部のインダクタンスの低減により、3 dB帯域幅は10 GHz以上を得ている。

レーザ温度=25 °C			
項 目	記 号	特 性	単 位
光 ファイバ 出力	P_f	$\geq 0.5^*$	mW
発 振 波 長	λ_p	$1,550 \pm 20^*$	nm
サイドモード抑圧比	Sr	$\geq 35^{**}$	dB
-20 dB チャープ幅	$\Delta\lambda$ chirp	Typ. 0.45**	nm
3 dB 帯 域 幅	BW	≥ 10	GHz
立上り/立下り時間	t_r/t_f	Typ. 30/45**	ps
熱電子冷却素子冷却能力	ΔT	≥ 35	K
トラッキングエラー	ΔP_f	≤ 0.5	dB
アイソレーション	L_B	≥ 30	dB
入力インピーダンス	Z_o	50	Ω

注：条件 * CW, レーザ駆動電流= $I_{th} + 20$ mA
 ** 10 Gビット/s, NRZ, PRBS: $2^{15}-1$, imp-p=40 mA, バイアス電流= I_{th}

す。LD素子単体での光波形と同等のアイ開口が得られ、10 Gビット/s, NRZ駆動での動作を確認した。10 Gビット/s変調特性だけでなく、LDモジュールが具備すべき、その他の諸特性も2.4 Gビット/s伝送用LDモジュールと同等に達成しており、駆動回路を外部設置する実装形

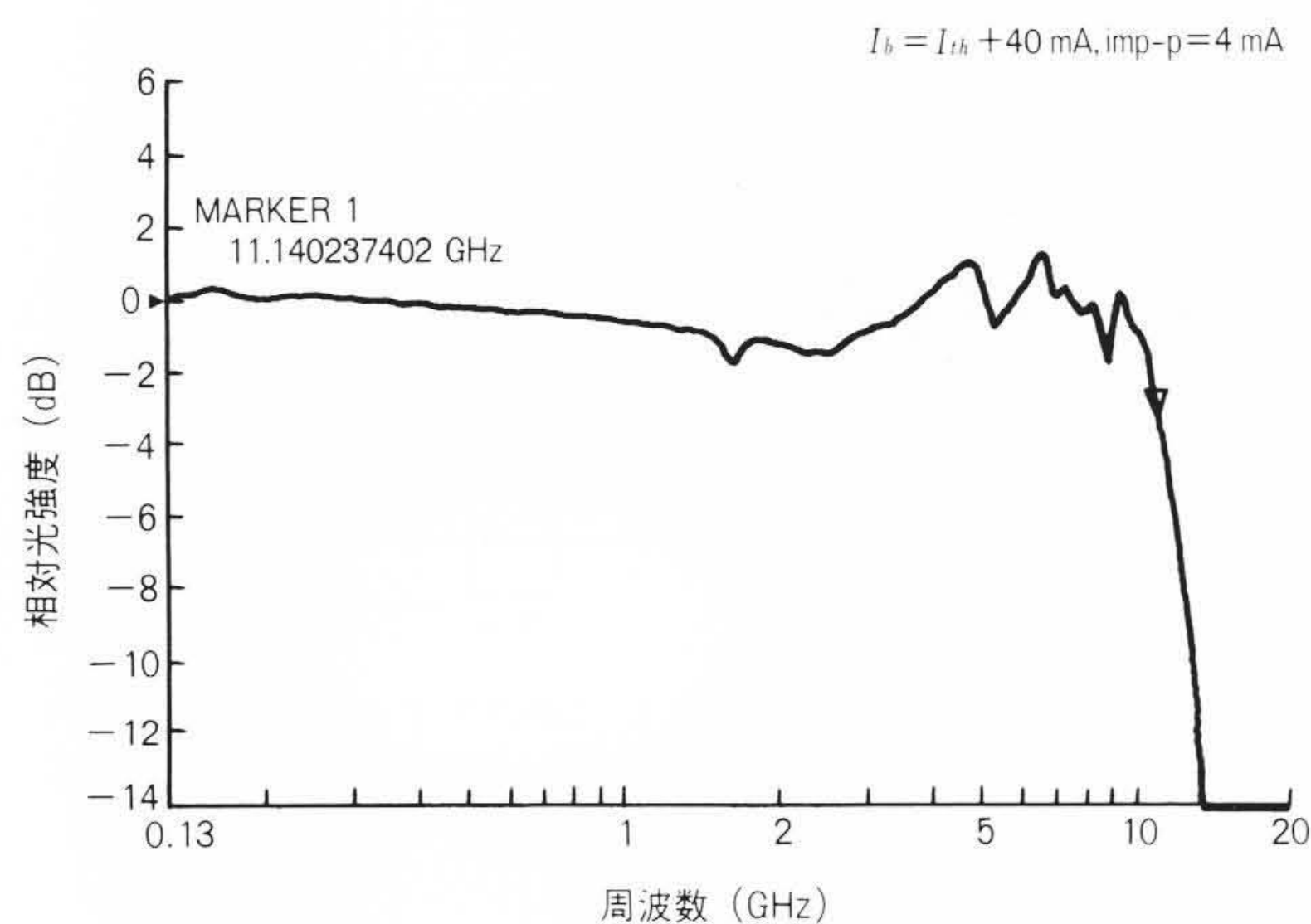


図8 10 Gビット/s伝送用LDモジュールの小信号周波数応答特性 3 dB帯域12 GHzのLD素子を実装し、モジュールでの3 dB帯域11.1 GHzを得た。

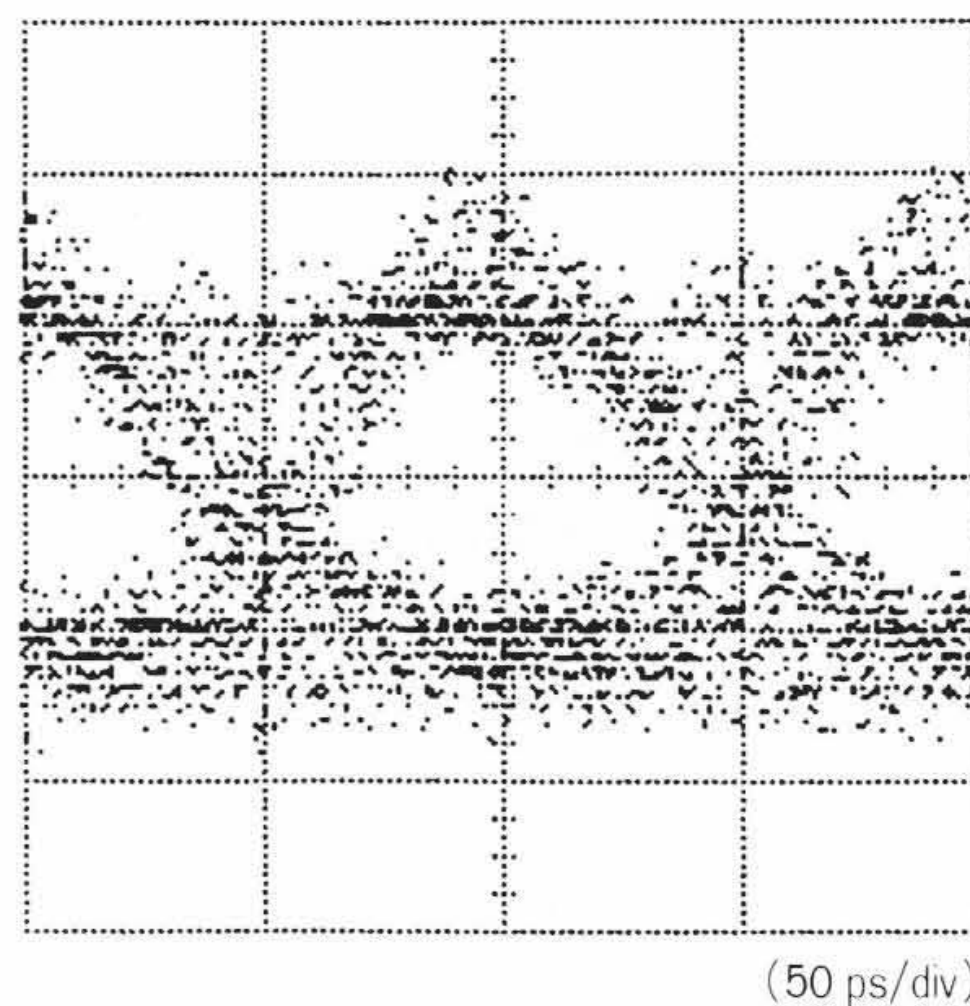


図9 10 Gビット/s変調光波形 LD素子単体での光波形と同等のアイ開口が得られ、10 Gビット/s, NRZ駆動動作を確認した。

式と10 Gビット/sパッケージング技術の可能性を確認できた。

4 おわりに

広帯域ISDN構築に不可欠である2.4 Gビット/s伝送用LDモジュール、および10 Gビット/s伝送用LDモジュールの構成、機能ならびに伝送特性について述べた。

日立製作所が開発したMQW-DFB-LDの採用により、2.4 Gビット/s伝送を可能にした。この2.4 Gビット/s伝送用LDモジュールは、CCITT規格を十分満たす伝送特性を得ており、80 km伝送が可能である。さらに、その低チャープ発振の特長を生かし、Erドープ光ファイバ増幅器を用いることで120 kmまで伝送距離を延ばすことができた。

参考文献

- 1) M. Okai, et al.: Stability of the Longitudinal Mode in $\lambda/4$ Shifted InGaAsP DFB Lasers, IEEE J. Quantum Electronics 25, 6, pp.1314~1319(1989)
- 2) K. Uomi, et al.: Ultralow Chirp and High-speed 1.55 μm Multiquantum Well $\lambda/4$ Shifted DFB Lasers, IEEE Photonics Technology Letters, vol.2, pp.229~230(1990)
- 3) T. Ogata, et al.: Long-Distance, Repeaterless Transmission Utilizing Stimulated Brillouin Scattering Suppression and Dispersion Compensation, OEC'92, 16A4-3 (1992)
- 4) 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, 1990年春季信学全大, B-931
- 5) K. Uomi, et al.: High-speed Properties of 1.55 μm InGaAs-InGaAsP MQW $\lambda/4$ Shifted DFB Lasers, 110/SPIE Vol.1634 Laser Diode Technology and Applications IV (1992)