

ギガビット帯伝送用光送信モジュール

Optical Transmitting Module for Gigabit-band Lightwave Transmission

広帯域ISDN(サービス総合デジタル網)の国際標準化に対応するため、日本、欧米で2 Gビット/秒帯の超大容量光伝送システムの開発が活発に行われている。ギガビット帯光伝送の実現には、光信号の狭スペクトラム化、デバイスの高速・広帯域化、これに対応した実装技術などが課題となる。

2 Gビット/秒帯伝送用光送信モジュールとして、光スペクトラム特性の優れたDFB-LD(Distributed Feedback-Laser Diode)を搭載し、LD駆動用GaAs-IC、モニタ用フォトダイオード、温度制御用デバイス(熱電子冷却素子、サーミスタ)、さらに反射戻り光抑圧用光アイソレータを同一のパッケージに内蔵し、一体化したLDモジュールを開発した。

このLDモジュールは、2.4 Gビット/秒、40 km伝送で良好な特性を得ている。

青木 聡* *Satoshi Aoki*
村田 淳* *Atsushi Murata*
高井厚志** *Atsushi Takai*
八田 康*** *Yasushi Hatta*

1 緒 言

近年、ISDN(サービス総合デジタル網)や画像通信などの広帯域通信の需要増加が予測されており、すでに1 Gビット/秒帯システム^{1),2)}が実用化されている。一方、広帯域ISDNの国際標準化も進められており、2.488 Gビット/秒伝送(CCITTレベル:STM-16)が一つのハイアラキーとして採用されることが確実視されている。これらの状況に対応して、2 Gビット/秒帯の超大容量光伝送システムの開発が日本、欧米で活発に行われている。

ギガビット帯光伝送の実現には、光信号の狭スペクトラム化、半導体デバイスの高速・広帯域化およびこれに対応した実装技術が課題となる。

今回、2 Gビット/秒帯伝送用光送信モジュールとして、高速変調下での光スペクトラム特性の優れた $\frac{1}{4}$ 波長シフト形DFB-LD³⁾(Distributed Feedback-Laser Diode:DFB形半導体レーザ)を搭載し、これと-5.2 V単一電源動作を特徴とするLD駆動用GaAs-IC⁴⁾、LD光出力モニタ用フォトダイオード、LD温度検出用サーミスタ、LD温度制御用熱電子冷却素子を同一のパッケージに内蔵し、さらに反射戻り光によるLD特性の変動を防止する光アイソレータをも内蔵したLDモジュールを開発した。

本稿は、今回開発した2 Gビット/秒帯伝送用光送信モジュールの構成、LD駆動回路の内蔵、光アイソレータの効果、伝送特性などについて述べる。

2 光送信モジュールの構成と特徴

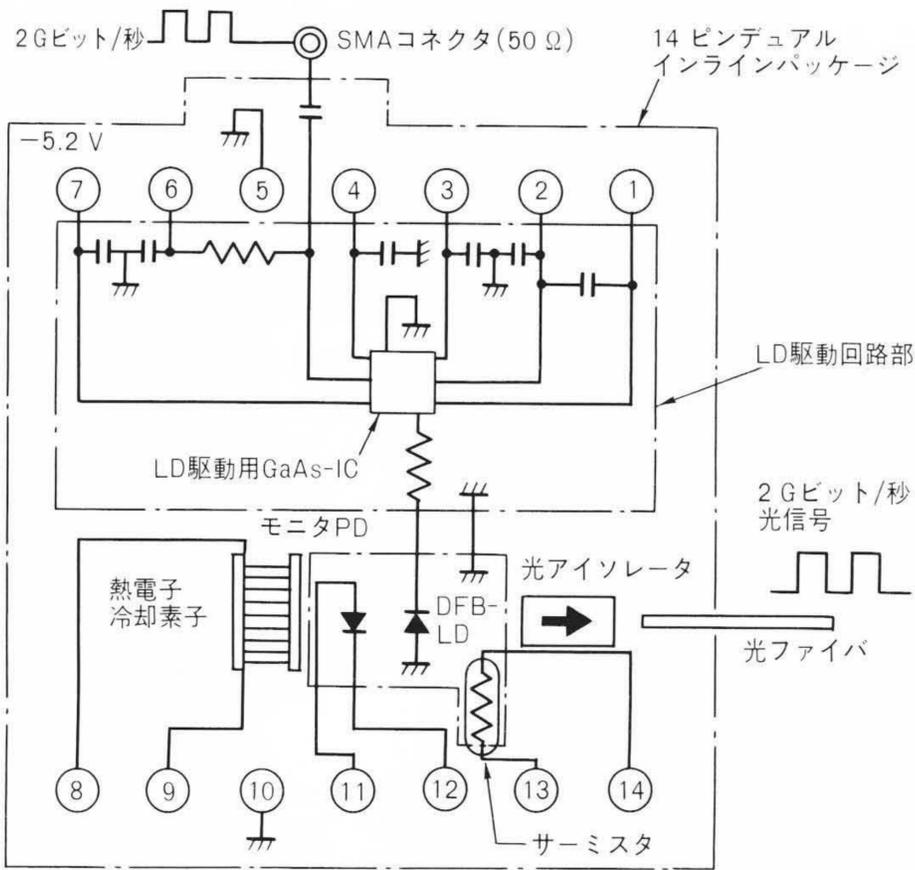
光送信モジュールのブロック図とその外観を図1に示す。LDには2 Gビット/秒帯の高速変調時に副モード抑圧比が35 dB以上、-25 dBスペクトル線幅が1.0 nm以下が得られる光スペクトラム特性の優れた $\frac{1}{4}$ 波長シフト形DFB-LD³⁾を採用している。このLDと-5.2 V単一電源動作を特徴とするLD駆動用のGaAs-IC⁴⁾、LD光出力モニタ用フォトダイオード、LD温度検出用サーミスタ、LD温度制御用の熱電子冷却素子(ペルチェ素子)を、50 Ω 整合高周波信号入力端子(SMAコネクタ)付きの14ピンDIL(Dual-in-Line)パッケージに内蔵している。さらに外部からの反射戻り光によるLD特性の変動を防止する30 dB光アイソレータも内蔵している。SMAコネクタと光ファイバ結合部を除くパッケージ本体の大きさは縦20 mm×横20 mm×高さ13 mmと小形化を達成している。

2.1 LD駆動回路の内蔵

従来の光送信器は、一般にプリント基板上に設けたLD駆動回路と、これに近接して実装したLDモジュールとで構成していた。ギガビット帯では、上記の構成ではLD駆動回路とLD間の寄生リアクタンスの影響によって波形ひずみが生ずるため、波形整形回路や複雑な実装方法と調整を必要とし実装性や取り扱い性に難点があった。また、上記の調整は特定のビットレートに対し最適化されるため汎(はん)用性に乏しく、量産上の問題があった。

これに対し、本稿で述べる光送信モジュールは、GaAs-IC化したLD駆動回路をLDとともに同一のパッケージに内蔵し、

* 日立製作所 光技術開発推進本部 ** 日立製作所 中央研究所 *** 日立製作所 デバイス開発センタ



注：略語説明
LD (Laser Diode：半導体レーザ), DFB-LD (Distributed Feedback-LD)

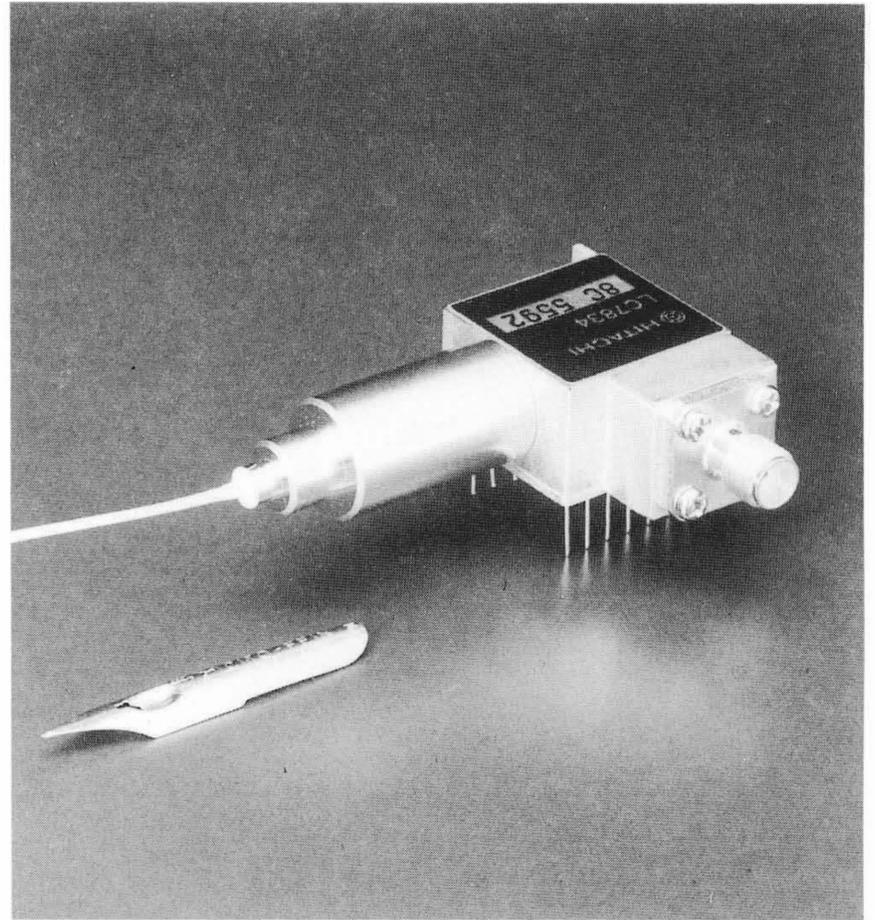


図1 2 Gビット/秒帯光送信モジュールのブロック図および外観 DFB-LDと、-5.2 V単一電源動作を特徴とするGaAs-IC(LD駆動用IC)をモニタフォトダイオード、サーミスタ、熱電子冷却素子とともに50 Ω整合高周波入力端子(SMAコネクタ)付き14ピンデュアルインラインパッケージに内蔵し、さらに、30 dB光アイソレータをも内蔵した2 Gビット/秒帯光送信モジュールを示す。

LD駆動回路とLD間の寄生リアクタンスを低減している。高周波信号入力端子に50 Ω整合SMAコネクタを用いており、プリント基板への実装の際、実装に伴う寄生インダクタンス、容量の影響がなく、微妙な調整が不要である。

LDの駆動方式は電流駆動であるため、IC~LD間の寄生インダクタンスによるリングングが誘起される。リングング周波数が伝送速度あるいは受信器の帯域に比べて十分高い場合には問題はない。しかし、ICの出力容量、実装による寄生容量(十分の数ピコファラッド~数ピコファラッド)とボンディングワイヤの寄生インダクタンス(十分の数ナノヘンリー~数ナノヘンリー)により生ずるリングングを数ギガヘルツ以上とすることは困難である。このリングングは波形劣化や符号間干渉の原因となるだけでなく、LDのチャージングによる分散ペナルティとバイアス電流をLDの発振しきい値近傍に設定したときの消光比ペナルティを増加させる。

このため、本LDモジュールではIC~LD間にダンピング抵抗を挿入し、リングングを抑圧している。ダンピング抵抗の有無および寄生インダクタンス1 nH、3 nHの場合の、ビットレート2.488 Gビット/秒でのLD駆動電流波形のシミュレーション結果を図2に示す。以上のように、高速応答を得るにはIC~LD間の寄生インダクタンスを低減することが重要である。本LDモジュールではLDは温度制御用の熱電子冷却素子上に搭載されており、LD駆動用ICはセラミック基板上にマイクロ波実装され、ともに同一のパッケージに内蔵されている。LDとIC間の接続には高速応答を得るため、寄生インダクタンスを低

減するとともに、ICの搭載されたセラミック基板からの熱電子冷却素子への熱流入による冷却能力の低下のトレードオフを考慮する必要がある。本LDモジュールではLD~IC間の接続用リードの形状、寸法と材質を最適化し、インダクタンス0.2 nH、熱抵抗1,250 °C/Wとしている。

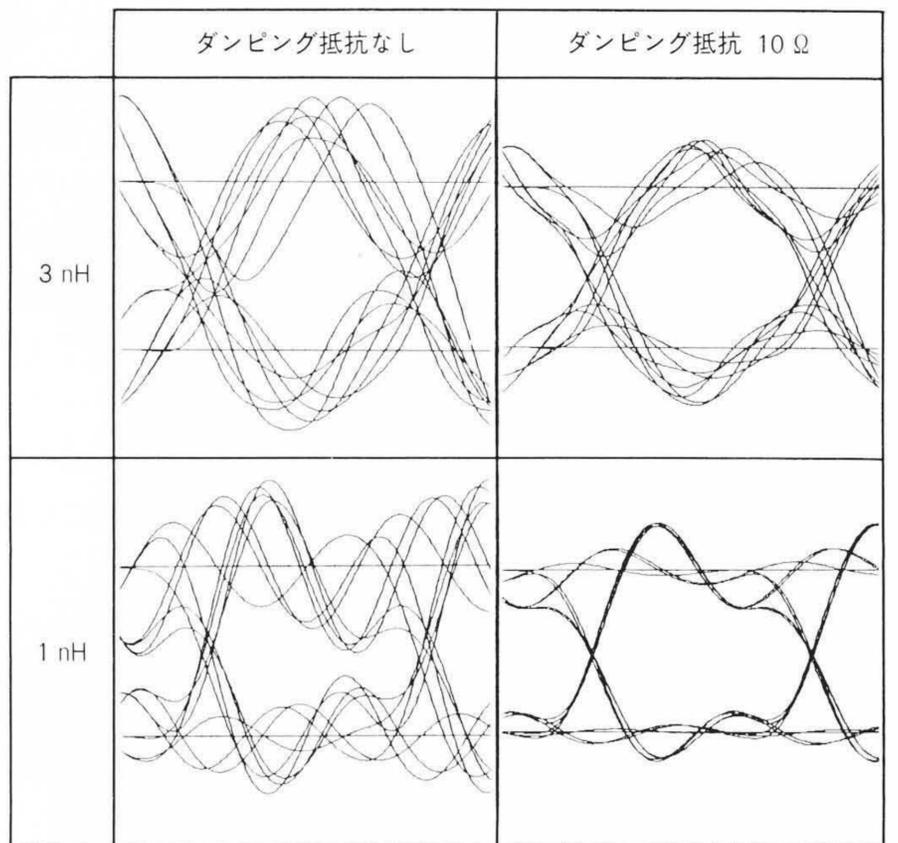


図2 LD駆動電流波形シミュレーション結果 ダンピング抵抗10 Ωと寄生インダクタンス1 nHへの低減により、LD駆動電流波形が改善される。

2.2 光アイソレータの効果

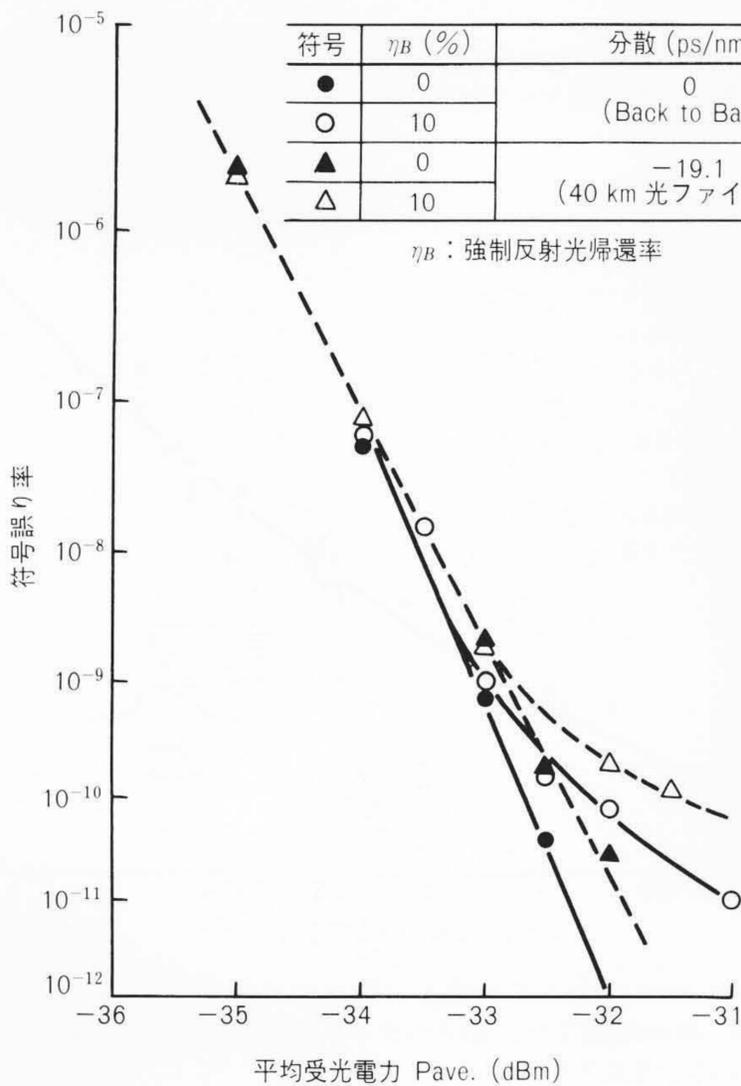
LDモジュールから送信された光信号が光コネクタなどの接続点で反射された場合、反射戻り光によるLDの不安定動作が伝送特性を劣化させる。このため、本LDモジュールは外部からの反射戻り光によるLD特性の変動を防止するため、直径6 mm×長さ8 mmの外形寸法で逆方向損失30 dB以上を達成した光アイソレータを内蔵している。光アイソレータの効果を確認するため、光アイソレータあり、なしの2種類のモジュールを用いて、モジュールピッグテイル端から可変反射器を介して0～18%の強制反射光を帰還し、Back to Back、および40 km光ファイバ伝送での符号誤り率特性を測定した。測定に用いたLDモジュールの主要特性を表1に、測定結果を図3に示す。

LDと単一モード光ファイバの結合光学系には、球レンズとGRIN (Graded Refractive Index) レンズから成る2レンズ結合方式を採用し、球レンズとGRINレンズ間に光アイソレータを気密封止固定した。表1に示すように、光アイソレータ内蔵による光結合損失の増加はなく、高効率結合を得た。DFB-LDの駆動条件はバイアス電流 $I_b = 0.8 \times I_{th}$ 、変調電流振幅 $im_{pp} = 50$ mA、1.8 Gビット/秒、NRZ (Non-Return to

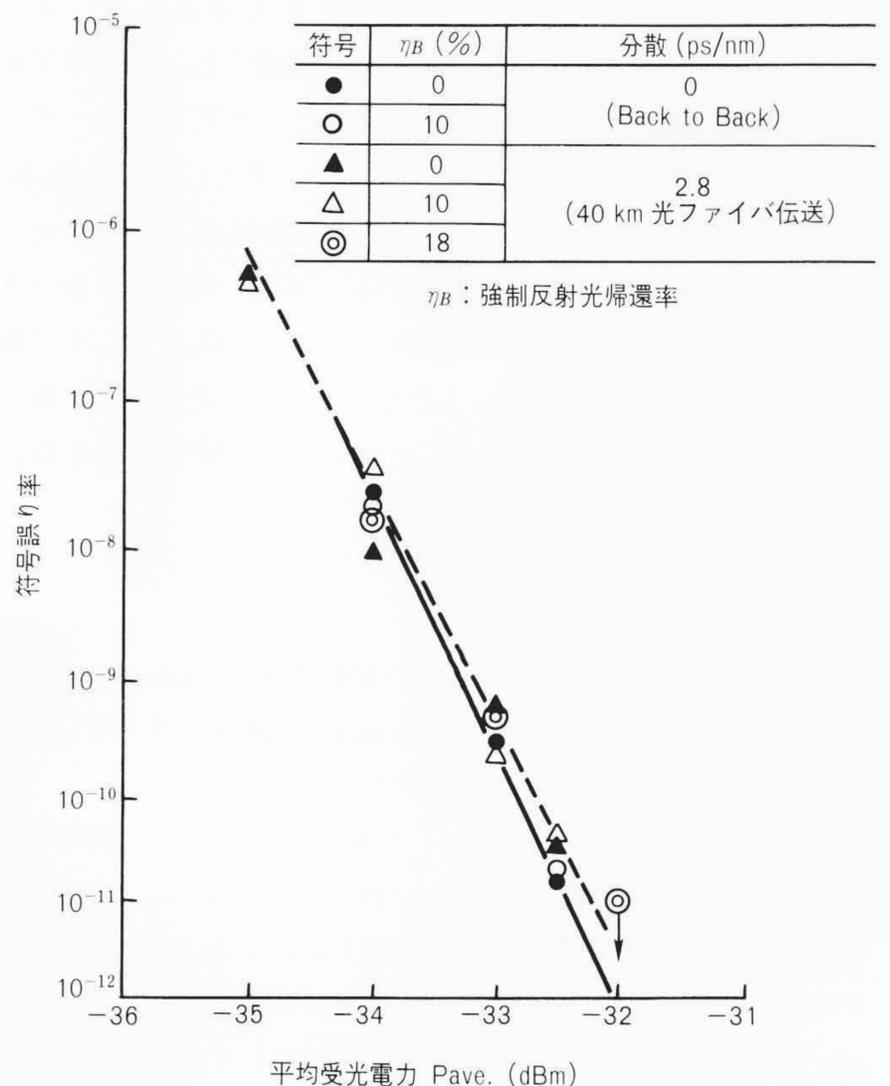
表1 測定サンプルLDモジュール諸特性 光アイソレータの効果を見るため、結合損失は同程度としている。

特性項目	記号	光アイソレータなし	光アイソレータ付き
発振中心波長	λ_p	1,307 nm	1,313 nm
しきい値電流	I_{th}	10 mA	9 mA
サイドモード抑圧比	Sr	32 dB	30 dB
アイソレーション	L_B	—	31.5 dB
光結合損失	η	4.5 dB	4.6 dB

Zero)で、平均光出力は+0.7 dBm以上である。図3(a)に示すように、光アイソレータのない場合には、強制反射光帰還率 $\eta_B = 10\%$ で、誤り率 10^{-9} 以下でBack to Back(光ファイバを伝送しないとき)、40 km伝送時ともにエラーフロアを生じ、反射戻り光雑音に起因する特性劣化⁵⁾を示した。しかし、同図(b)に示すように30 dB光アイソレータ付きでは18%の強制反射光帰還率でも光受信レベル-32 dBmでエラーフリーが得られ、2 Gビット/秒帯光伝送での光アイソレータの有効性が確認された。



(a) 光アイソレータなし



(b) 光アイソレータ付き

注: Back to Back (光ファイバを伝送しない状態)

図3 30 dB光アイソレータ有無での符号誤り率特性 (a) 光アイソレータなしでは $\eta_B = 10\%$ で誤り率 10^{-9} 以下でエラーフロアを生ずるが、(b) 光アイソレータ付きでは $\eta_B = 18\%$ でも 10^{-12} でエラーフリーが得られる。

2.3 実装

本LDモジュールの主要構成部品であるLD駆動用GaAs-IC⁴⁾と光アイソレータの実装方法について説明する。

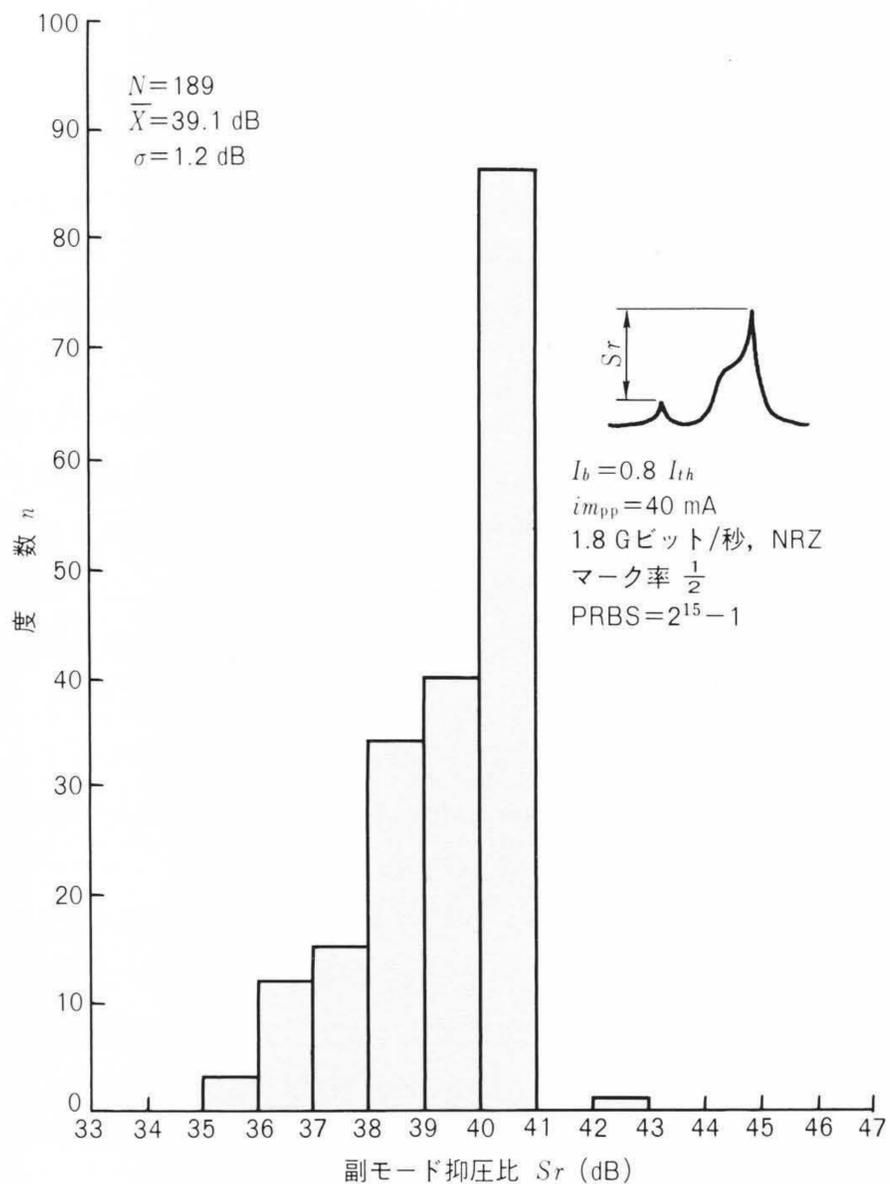
GaAs-ICはバイパス容量、ダンピング、終端抵抗とともにセラミック基板上にマイクロ波回路の実装形態で搭載されている。入力信号は50 Ω抵抗により終端し、ICとLD間に10 Ωダンピング抵抗を挿入している。また、2 Gビット/秒帯での高速応答を得るためGaAs-ICのボンディングワイヤ、LDの搭載されるステムのリード、ボンディングワイヤなどの総合インダクタンスを2 nH以下としている。上記セラミック基板はパッケージ内に設けた銅タングステン合金から成るヒートシンクにはんだ付け固定し、放熱性を高めている。GaAs-ICの電源電圧、制御信号およびモニタPD出力、サーミスタ、熱電子冷却素子のDC信号は14本のDILピンから供給している。

光アイソレータはファラデー回転子にFZ(Floating Zone)法によるYIG(Yttrium Iron Garnet)、偏光子、検光子にPBS(偏光ビームスプリッタ)を使用しており、その組立に接着剤が使用されている。この接着剤によるLD、GaAs-ICへの影響を防止するため、光アイソレータを気密窓付きのハウジングに装着し、このハウジングを前述した球レンズによってコリメートされたLD出射光軸上に配置し、パッケージにレーザ溶接によって気密封止固定している。ハウジング気密窓はテーパ状断面形状を持ち、LDへの近端反射を防止している。GRINレンズはハウジングにレーザ溶接固定され、光アイソレータを気密封止している。以上のように、光アイソレータに接着剤を使用しているため、光アイソレータとLD、GaAs-ICの収納されたパッケージとを別空間に気密実装し、パッケージ内はNon-Epoxy構造になっている。また、光アイソレータハウジングは材質に磁性材を使用しており、磁気シールド構造としている。これにより、LDモジュールに近接して、他の磁性体が配置された場合の光アイソレータの特性劣化を防止している。

3 LDモジュールの特性

開発したLDモジュールは、LDの発振波長1.3 μmと1.55 μm帯の2種類である。本稿では1.55 μm帯 $\frac{1}{4}$ 波長シフト形DFB-LDモジュールの特性について述べる。

DFB-LDの駆動条件がバイアス電流 $I_b=0.8 I_{th}$ 、変調電流振幅 $i_{m_{pp}}=40$ mA、1.8 Gビット/秒、マーク率 $\frac{1}{2}$ 、NRZの15段擬似ランダム信号での副モード抑圧比の分布を図4に示す。平均39.1 dBと通常のDFB-LDの30~39 dBと比較して3~5 dBの改善がある。-25 dBスペクトル線幅と分散ペナルティの関係を図5に示す。伝送距離40 km、分散値680 ps/nmでも分散ペナルティは1 dB以下であり、 $\frac{1}{4}$ 波長シフト形DFB-LDの狭スペクトラム特性とGaAs-IC内蔵による高速応答特性の効果を確認できた。



注：略語説明 NRZ (Non-Return to Zero)
PRBS (Pseudo Random Bit Sequence)

図4 副モード抑圧比の分布 1.8 Gビット/秒変調時で平均39.1 dB、最低値で35 dBの副モード抑圧比を得ている。

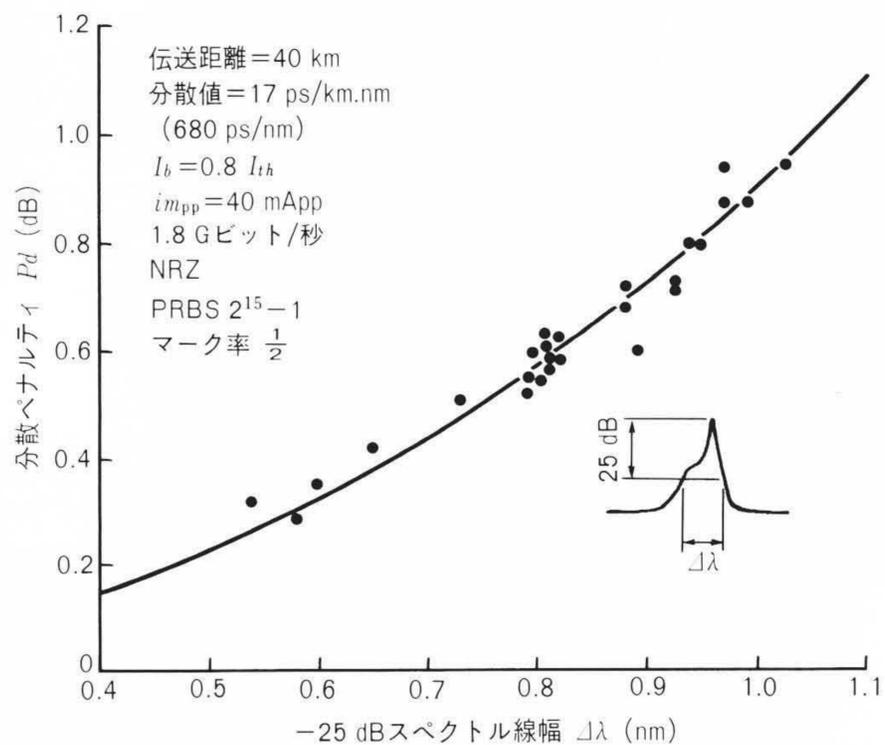


図5 -25 dBスペクトル線幅と分散ペナルティの関係 1.8 Gビット/秒、40 km伝送で-25 dBスペクトル線幅1 nm以下で分散ペナルティ1 dB以下が達成される。

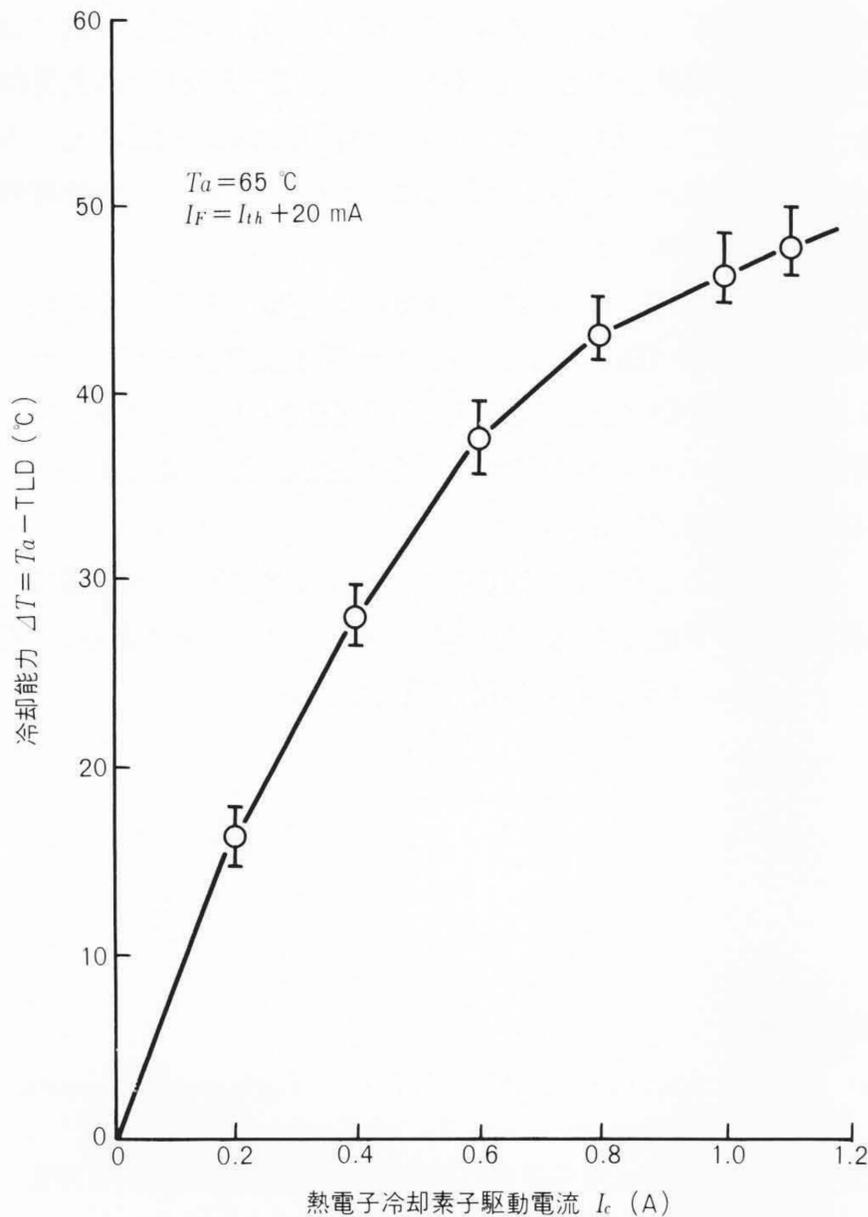
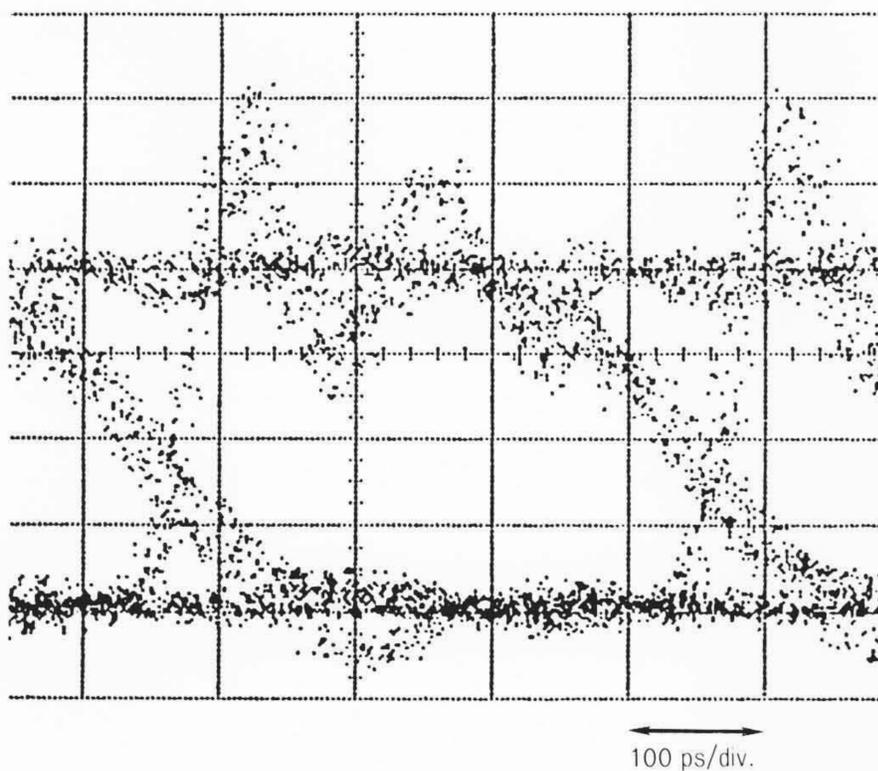
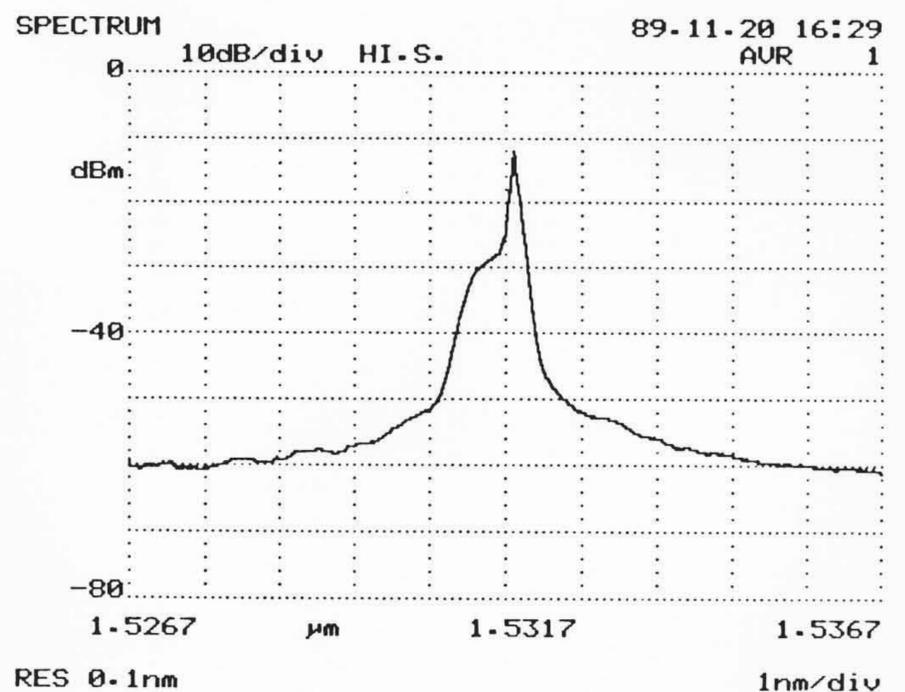


図6 冷却特性 周囲温度+65°Cで、LDを+25°Cに保つための冷却能力 $\Delta T \geq 40^\circ\text{C}$ を、熱電子冷却素子駆動電流 $I_c \leq 0.7\text{A}$ で得られる。



(a) 光出力波形



(b) 光スペクトラム

図7 2.4 Gビット/秒NRZ擬似ランダム光出力波形と光スペクトラム $I_b = 0.8 I_{th}$, $im = 40\text{ mA}_{pp}$ 駆動での(a)光出力波形と(b)光スペクトラムを示す。

LDモジュールに内蔵した熱電子冷却素子の冷却特性の一例を図6に示す。LDをLD発振しきい値電流 $I_{th} + 20\text{ mA}$ の定常電流で駆動し、モジュール周囲温度を65°Cとした場合、熱電子冷却素子駆動電流 $I_c = 0.7\text{ A}$ でLDを25°Cに冷却することができる。内蔵したモニタ用フォトダイオードをAPC(Automatic Power Control)回路に接続しLD光出力を一定とし、サーミスタをATC(Automatic Temperature Control)回路に接続して、熱電子冷却素子によってLD温度を25°C一定とした場合の、周囲温度10~65°Cの変化に対するモジュールの光ファイバ出力のトラッキングエラーは $0.2 \pm 0.18\text{ dB}$ であり、周囲温度の変化に対しても安定であることを確認した。

本LDモジュールを用いて2.4 Gビット/秒の伝送実験を行った。バイアス電流 $I_b = 0.8 I_{th}$ 、変調電流振幅 $im_{pp} = 40\text{ mA}$ としたときの2.4 Gビット/秒NRZ擬似ランダム光出力波形と光スペクトラムを図7に示す。-25 dBスペクトル幅0.63 nm、副モード抑圧比36 dBを得ている。1.3 μm帯零分散ファイバを40 km伝送した符号誤り率特性を図8に示す。同図はバイアス電流 $I_b = I_{th}$ とした結果であり、Back to Backの 10^{-11} での最小受信感度は-30.0 dBm、40 km光ファイバ伝送による劣化は0.1 dBと良好な特性を得た。

4 結 言

2 Gビット/秒帯伝送システムに対応した光送信モジュールとして、LD駆動用GaAs-IC、光アイソレータを内蔵したLDモジュールを開発した。これは高速化とともに実装性、取り扱い性を向上し、さらに量産性の向上を目的としている。

2.488 Gビット/秒, NRZ, マーク率 $\frac{1}{2}$, 15段擬似ランダムパターン,

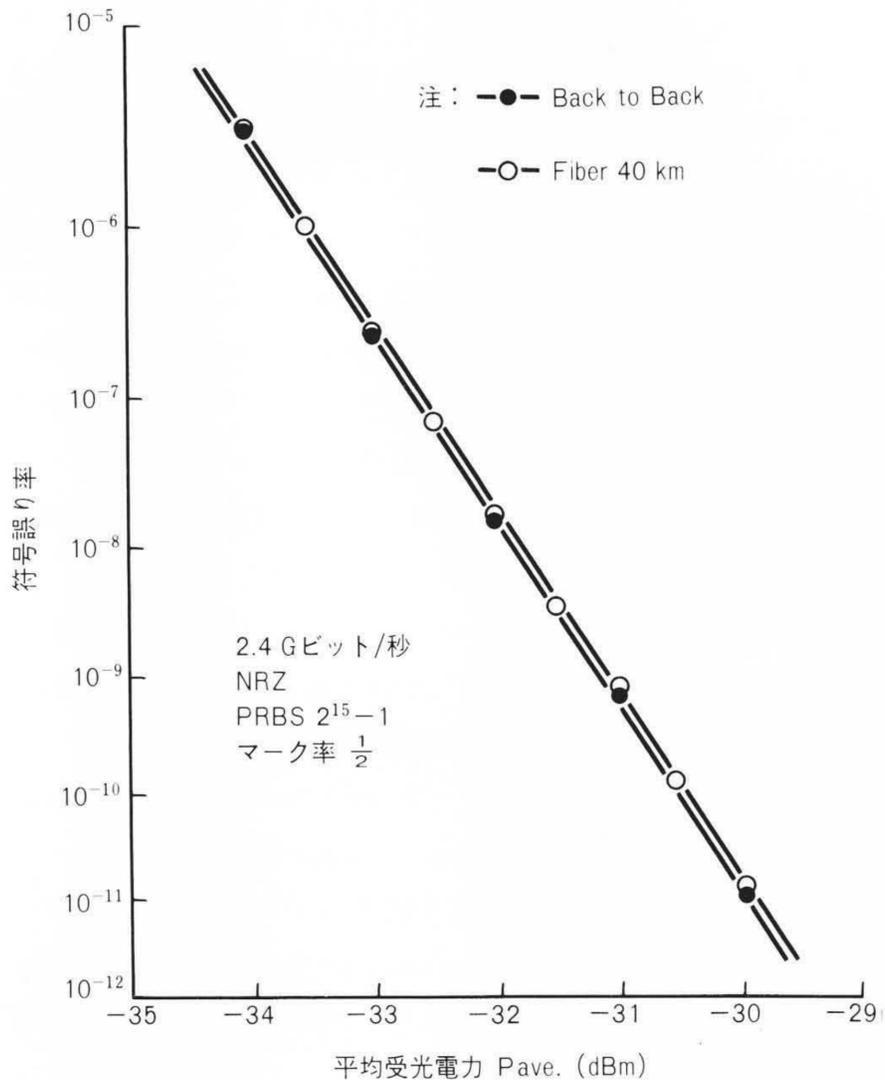


図8 2.4 Gビット/秒, 40 km伝送符号誤り率特性 LD駆動条件 $I_b = I_{th}$, $I_m = 40 \text{ mA}_{pp}$ で 10^{-11} の最小受信感度 -30.0 dBm , 40 km伝送による劣化 0.1 dB を達成している。

本LDモジュールの開発によって次が明らかとなった。

(1) GaAs-ICとLD間に 10Ω のダンピング抵抗を挿入し、ボンディングワイヤ、リードなどの総合インダクタンスを 2 nH 以下とすることにより、リングングを抑圧した駆動電流波形が得られる。

(2) 30 dB 光アイソレータは外部から反射戻り光を強制的に 18% 帰還させた場合でも、 1.8 G ビット/秒で -32 dBm の光受信レベルで 10^{-12} 以下のエラーフリーが得られる。通常の光コネクタの反射量が 4% 程度であることから、実用上、十分有効であることが明らかとなった。

(3) 2.4 G ビット/秒伝送で、Back to Backの 10^{-11} の最小受信感度 -30 dBm に対し、 $1.3 \mu\text{m}$ 零分散ファイバ 40 km を $1.55 \mu\text{m}$ 波長で伝送しても劣化は 0.1 dB であり、 $\frac{1}{4}$ 波長シフト形DFB-LDの狭スペクトラム特性とGaAs-IC内蔵による高速応答特性を確認できた。

以上述べたように、本LDモジュールは 2 G ビット/秒帯での適用が十分可能であり、将来の標準ハイアラキーである 2.4 G ビット/秒システムでの使用が期待される。

参考文献

- 1) D. A. Fishman, et al. : 1.7 Gb/s Lightwave Transmission Field Experiment, OFC'86 Post deadline paper
- 2) 木村, 外 : F-1.6 G方式の概要, 研究実用化報告, 第36巻, 第2号, 153~160 (1987)
- 3) M. Okai, et al. : Stability of the Longitudinal mode in $\lambda/4$ -shifted InGaAsP/InP DFB Lasers, IEEE, Journal of Quantum Electronics, Vol.25 No.6, pp.1314~1319 June 1989.
- 4) 山下, 外 : 2 Gb/s帯光通信用LD駆動GaAsIC, 電子情報通信学会, ED87-147, 79~83 (1988)
- 5) 宮崎, 外 : 光アイソレータ付きDFB-LDの反射戻り光雑音特性, 昭和62年度信学会半導体, 材料部門全国大会, 264 (1987)