特集 高度情報通信システム

U.D.C. [621. 391. 64:681. 7. 068. 2]: [621. 375. 826. 038. 825. 5:621. 376. 5/. 6]

光伝送技術

Optical Transmission Technologies

広帯域ISDN (Integrated Services Digital Network)の構築に向けて, 2.4 G~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、これら光伝送システムを実現するために必須(す)の超高速および コヒーレント光伝送技術の研究開発状況について概説する。超高速光伝送技術 に関しては、2.4 Gビット/秒システムの実用化を可能とする光デバイスやICの 構成、性能およびこれらデバイスを用いた伝送特性について述べるとともに、 10 Gビット/秒伝送実現の可能性を示した。コヒーレント光伝送技術に関しては、 システム構築に必要なAMI(Alternate Mark Inversion)-FSK(Frequency Shift Keying)変調、偏波-周波数変換形ダイバシティ受信、多チャネル光チュ ーニング方式などを提案し、その有効性を検証した。

山下喜市*	Kiichi Yamashita
茅根直樹*	Naoki Chiñone
長野克之**	Katsuyuki Nagano
太田紘一***	Kôichi Ôta

1 緒 言

近年,公衆通信幹線系光伝送システムの高速・大容量化は 著しい進展をみせ、すでに1.6 Gビット/秒¹⁾,1.7 Gビット/秒²⁾ システムが実用に供されている。最近では、SONET (Synchronous Optical Network)をベースとする広帯域ISDN (Integrated Services Digital Network)伝送ハイアラーキの 標準化に伴い、155 M~2.4 Gビット/秒システムの実用開発が 活発に進められており、さらに10 Gビット/秒システムの研究 も盛んになりつつある。一方、光の電磁波としての性質を利 用し、光周波数や位相を信号の伝達手段に用いるコヒーレン ト光伝送方式は、光領域での多重伝送が可能なため、映像分 配サービスが中心となる広帯域ISDNでのフレキシビリティの 大きな超大容量ネットワーク構成実現の有力な方式として研 究が活発に行われている。

本稿では,超高速・大容量光伝送システムを実現するため に必須(す)の超高速およびコヒーレント光伝送方式,並びに 光デバイスやICに関する研究成果の概要を紹介する。

2 光伝送方式

2.1 超高速光伝送方式

超高速光伝送方式は半導体レーザの光強度をオン,オフし, 受信側で直接検波する方式であり,長距離伝送を実現するた





7.4 kmファイバ

39

めには、変調によって生じるレーザのモード分配雑音と波長	伝送時にモード分配雑音によるフロア現象がみられ、 <i>I_b=I_{th}では符号</i> 誤
チャーピングに起因する受信感度劣化の低減とが大きな課題	り率10 ⁻⁶ で飽和する。

* 日立製作所中央研究所 工学博士 ** 日立製作所光技術開発推進本部 *** 日立製作所戸塚工場

892 日立評論 VOL.71 No. 9 (1989-9)

となる。ここでは、これらの観点から検討した結果について 述べる。

モード分配雑音は、縦モード間の動的競合が原因で生じる。 DFB(Distributed Feedback)レーザでも微少なサイドモード が存在するため,モード間の利得差が大きくとれない場合に は, 高速パルス変調時に確率的なサイドモードの成長とメイ ンモードの消失が起こる。モード分配雑音の影響を定量的に 調べるために行った2.4Gビット/秒光伝送特性の実験結果を 図1に示す3)。この実験に用いたレーザのサイドモード抑圧比 は30 dBである。7.4 kmファイバ伝送時にすでにフロア現象が 観測され、特にレーザのバイアス電流Ibがしきい電流Ith近傍 では符号誤り率は10-6で飽和している。DFBレーザのモード 分配雑音は、モード間利得差を大きくとれるλ/4シフト形構 造を導入することによって大幅に低減できる。しかし、モー ド分配雑音は光コネクタなどからの反射戻り光によって強調 されることがある。2.4 Gビット/秒,40 kmファイバ伝送時の 反射戻り光量に対する受信感度劣化特性を図2に示す。従来 形構造とλ/4シフト形構造のDFBレーザを比較してある⁴。 同図からλ/4シフト形構造の優位性がわかる。通常, 光コネ クタの最大反射率は-9dB程度であるから、反射戻り光によ る感度劣化は2.3dBと大きな値となる。これから感度劣化を 低減するには、反射減衰量が30 dB以上の光アイソレータが必 要となる。以上の検討結果を踏まえて試作した2.4Gビット/ 秒伝送用λ/4シフトDFBレーザモジュールの外観を図3に示 す。光ファイバ接続点からの反射戻り光によるレーザ雑音の 増加を防ぐため、30 dBの光アイソレータをレーザとファイバ の結合部に導入し、安定な変調特性を実現している⁵⁾。波長1.5



図3 Gビット伝送用レーザモジュール レーザ駆動用GaAsICお よび30 dB光アイソレートを内蔵している。

 μ mの $\lambda/4$ シフトDFBレーザを内蔵した本モジュールで、2.4 Gビット/秒の伝送系を構成した場合,既存の光ファイバ(零分 散波長1.3 μ m)40 km伝送時のファイバ分散による受信感度劣 化は1.0 dB以下であり、十分な実用性を備えている。なお、 1.5 μ mと1.3 μ mとの波長多重を行えば、4.8 Gビット/秒のシ ステム構築も可能である。ポリイミド膜埋め込み $\lambda/4$ シフト DFBレーザ(図9参照)の10 Gビット/秒および16 Gビット/秒 の光変調波形を図4に示す⁶⁾。また、40 kmファイバ伝送(符号 誤り率:10⁻⁹)を実現しており、直接変調による10 Gビット/秒 光伝送が可能であることを確認できた。しかし、レーザ活性 層内の屈折率変化によって生じる波長チャーピング幅(-20 dB幅)は $I_b = I_{th}$ において1.2 nmと大きいため、MQW(Multi



		:		••	•
					·
	A A				

(a) 10 Gビット/秒 I_b = I_{th} + 10 mA (50 ps/div)



(b) 16 Gビット/秒 I_b = I_{th} + 10 mA(20 ps/div)

図 2 受信感度劣化量の反射戻り光量依存性 λ/4シフト形DFB レーザが従来形DFBレーザよりも反射耐力が大きいことがわかる。 (伝送速度:2.4Gビット/秒,距離:40 km,符号誤り率:10⁻⁹)

40

図 4 PIQ(Polymide) 埋め込み $\lambda/4$ シフト形DFB(Distributed Feed back) レーザの変調特性 $I_b > I_{th}$ で良好なアイ開口度が得られており、 IOGビット/秒直接変調方式による光伝送システム実現の可能性を示す。

光伝送技術 893

Quantum Well)構造の導入などによる低チャープ化が課題で ある。

2.2 コヒーレント光伝送方式

多チャネル映像分配を可能とするコヒーレント光伝送シス テムの実現には、変復調、偏波変動抑圧、多チャネル光チュ ーニング方式など解決すべき技術課題が多い。ここでは、こ れら課題に対する方式提案および実験結果について述べる。 実用システムでの有望な変復調方式の一つにFSK (Frequency Shift Keying) - ヘテロダイン検波方式がある。この方 式は半導体レーザを容易に直接変調できる利点があるが、レ ーザの不均一な周波数変調特性に起因する信号波形のひずみ が問題になる場合が多い。一般に、数メガヘルツを境にして 周波数偏移量が異なるうえ, 位相も反転するためサグ状の波 形ひずみを生じ,受信感度の大幅な劣化を生じる。そこで, 解決策としてAMI(Alternate Mark Inversion)-FSK変調方 式を提案した7),8)。AMI符号は-1,0,+1の3値レベルを とる直流平衡符号であるから,低周波領域の電力密度が小さ いため、レーザの不均一な周波数変調特性による信号波形ひ ずみを軽減できる。この方式を適用したときの実験結果を図5 に示す。NRZ(Non Return to Zero)符号で変調する場合は, 光受信電力を増加させても符号誤り率が10-2以下にならない が、AMI符号の場合にはほぼ理論どおりの減少傾向を示して おり、この方式が有効であることがわかる。

するために試作した実験系を図6に示す。x偏波, y偏波を周 波数変換($f_M \rightarrow f_{MY}, f_{MX}$)するのに偏波面が直交する2台の局部 発振レーザ₁₀、10xを用いている。実験結果を図7に示す。 0~90度の偏波変動に対する感度劣化を1dB以下に抑圧でき ることがわかった。

多チャネル光チューニング方式としては、チャネル選択信 号入力時に、選択中のチャネル光周波数に所望チャネルとの 光周波数差を加算してチャネル選択する方式を提案した。光 チューニング部の構成と実験結果を図8に示す。同図から150



偏波変動抑圧方式としては,x偏波成分とy偏波成分とを別 別の周波数に変換したのち合成・復調する偏波-周波数変換形 ダイバシティ受信方式を提案した⁹⁾。この方式は従来の方式に 比べ復調回路が一式ですみ,また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 $(f_{MX} = f_M - f_{LOX}, f_{MY} = f_{LOY} - f_M)$

注:略語説明 PD (受光素子), BPF (帯域通過沪波器), LPF (低域沪波器) fLox, fLoy (局部発振光源, Lox, Loy の光周波数) fm, fs (変調信号のマーク,スペースに対応する光周波数) fmx, fmy(周波数変換後の光周波数)

偏波−周波数変換形ダイバシティ受信器の構成 2 台の局 凶 6 部発振光源によって周波数変換した後, BPFでマークに対応する光周波 数だけを検出し復調する。構成を簡易化できる。



い.

図5 AMI-FSK変調方式での符号誤り率特性 AMI-FSK変調方 式では、ほぼ理論どおりの低減傾向を示し、レーザの不均一な周波数変 調特性の影響を受けないことがわかる。

図7 偏波-周波数変換形ダイバシティ受信方式での感度劣化特性 受信感度劣化は0~90度の偏波状態の変動に対し、IdB以下と小さ

41

894 日立評論 VOL. 71 No. 9 (1989-9)



(a) チューニング部の構成

(b) 送信・局部発振光スペクトル

図8 光チューニング部の構成および選択特性 コントローラが,選択チャネルの光周波数検知とメモリの所望チャネルへの光周波数差呼び 出し・加算を実行する。150 GHz(600 Mビット/秒,20チャネル相当)離れたチャネル選択が可能なことを示す。

GHz離れたチャネル間の任意選択が可能であることを確認で きた。これは、600 Mビット/秒で20チャネル(周波数間隔:7.5 GHzの場合)分のチューニングが可能であることを示すもので ある。



83 光デバイス

本章では、光伝送技術を支える光デバイスについて最近の 研究開発状況を紹介する。ここでは主に幹線伝送系に焦点を 当てて、これに使用する光デバイスのうち、光源となる半導 体レーザ、受光素子であるなだれ増倍形のAPD(Avalanche Photodiode)および光合分波器について述べる。この中で半導 体レーザについては、超高速伝送用の光源とコヒーレント光 伝送用の局部発振光源について述べる。

3.1 超高速DFBレーザ

42

10 Gビット/秒以上の超高速光伝送を実現するには、光源と して用いるレーザの広帯域化が不可欠である。広帯域化はレ ーザの寄生容量と抵抗の積分効果による帯域制限の軽減およ び緩和振動周波数の向上によって達成できる。寄生容量の低 減によって広帯域化をねらった $\lambda/4$ シフトDFBレーザの断面 を図9に示す。発光ストライプの外部領域を低誘電率のポリ イミド膜で約4 μ m埋め込む新構造を採用した¹⁰⁾。試作したレ ーザの寄生容量は1.5 pFであり、従来構造の埋め込み形レー ザの約 $\frac{1}{5}$ に低減することができた。その結果、図10に示すよ うに周波数帯域17 GHz(光出力: 5 mW時)を達成し、10 Gビ 図 9 PIQ 埋め込み $\lambda/4$ シフトDFBレーザの断面構造 活性層の 周りをポリイミド膜で囲むことによって、寄生容量の低減を図っている。 寄生容量は、従来構造の約号の1.5 pFが得られている。



ット/秒光伝送システムへの適用が可能であることを確認した (図4参照)。

なお,現状ではバイアス電流をしきい電流以上に設定する 必要があるので,消光比の低下による感度劣化が数デシベル と大きい。このため, MQW構造などの導入による緩和振動周



図10 PIQ埋め込み $\lambda/4$ シフトDFBレーザの周波数特性 光出力の増加に伴い帯域は広がる。光出力が 5 mWで17 GHzの帯域が得られる。

波数の向上とともに低チャープ化を図ることが今後の課題で ある。

3.2 コヒーレント光伝送用波長可変レーザ

多チャネルコヒーレント光伝送方式での局部発振用光源と して、送信側の波長領域をカバーできる波長可変半導体レー ザが必須である。従来形DFBレーザのp電極を電気的に二つに 分離した2電極波長可変レーザの構造を図11に示す¹¹⁾。二つの 電極への電流比率を変えることによって、発振波長を制御す ることができる。光出力一定の条件での波長可変特性を図12 に示す。光出力が1mWのとき、最大波長可変幅3.3 nmが得 られた。発振スペクトルの線幅は10 MHz程度であるが、実シ ステムに適用するには1 MHz以下に低減することが望ましい。 また、モジュール化に際しては反射戻り光の影響を避けるた め、60 dBの光アイソレータが必要となる¹²⁾。

3.3 APD

APDは高速・長距離光伝送システムの実現に必須の受光素 子である。InP/InGaAsプレーナ形APDの構造を図13に示す。 結晶成長には組成,キャリヤ濃度,厚さなどの制御性に優れ たMOVPE(有機金属気相成長)法を採用した。暗電流,素子





容量を低減するため,結晶欠陥密度5,000 cm⁻²以下,アンドー プキャリヤ濃度2×10¹⁵ cm⁻³以下の制御技術を確立した。pn 接合面の形状は,中央部を周辺部より深くして,増倍特性を 安定に得る自己ガードリング形とした¹³⁾。pn接合の形成には, SiNx膜を用いた新しい選択強調熱拡散法を開発した。この方 法は,(1)イオン注入など複雑なプロセスが不要であること,





図13 自己ガードリング形APDの構造 pn接合面の形状を, 主接 合部が周辺部よりも深くなるようにした自己ガードリング形としたこと が特長である。これによって安定した増倍特性が実現できる。APDとは, Avalanche Photodiodeの略称である。

(2) Znの低温(430 ℃)熱拡散によって接合位置を精密に制御で
 き,生産性に優れること,(3) 雑音の原因となる表面漏れ電流
 を低くできること,などの特長を持つ。

Induiter / AIL

低反射コーティング

図II 2電極DFB波長可変レーザの断面構造 従来形DFBレーザのp電極を二つの領域に分割し、駆動電流h, I2の比率を変えて波長を制御する。

n電極

た。遮断周波数の増倍率依存性を図14に示す。GB(増倍率・ 遮断周波数)積は30 GHz,遮断周波数 2 GHz以上の増倍率の 範囲は 2 ~15であり,ダイナミックレンジが広い。過剰雑音 指数は0.75,量子効率は波長1.55 µmに対し80%以上が得られ ている。

43

896 日立評論 VOL. 71 No. 9 (1989-9)



3.4 導波路形光合分波器

光合分波器は,波長多重光伝送に不可欠なデバイスである。 試作した石英系導波路形光合分波器の構成を図15に示す¹⁴⁾。 この光合分波器は,3個の光方向性結合器で構成されており, 各方向性結合器の結合比の波長依存性を利用して,所望波長 の光信号を合分波する。製造プロセスには,電子ビーム蒸着 によるガラス膜形成技術とドライエッチングによる厚膜加工 技術を用いた。試作結果を図16に示す。膜質の改善とエッチ ング時のラフネス低減により,挿入損失3dB,1.3 μmと1.5 μmの波長間アイソレーション30 dB以上を達成できた。

4 光伝送用IC

44

超高速光伝送システムの実用化には、光中継器の信頼性向上、小形化、消費電力低減とともに高速化が必須であり、このためIC化がますます重要になっている。ここでは、2.4 Gビット/秒光伝送用として開発した送・受信GaAs ICについて述 べる^{15),16)}。

光中継器のIC化構想を図17に示す。太枠で囲んだ部分が0.8 µm GaAs・MES FET(MES電界効果トランジスタ)プロセス を用いてIC化した回路である。レーザ駆動回路は図18に示す ように電流スイッチと2段の入力バッファ回路で構成してお り 信号電流50mAで120 pcのスイッチング時間が達成されて



波 長 (µm)

図16 石英系導波路形光合分波器の波長選択特性 挿入損失 3 dB, 1.3 µmと1.5 µmの波長間アイソレーション30 dBが実現されている。

1%であり,高い安定性を実現できた。なお,本ICはレーザ と同一パッケージ内に実装され,送信モジュール(図3参照) としてGビット/秒帯伝送用光送信器に適用されている。前置

り、信写電流50mAで120psのスイッナンク時間が達成されて	理幅器は図19に示すように、並列帰還形回路と高域可変補償
いる。また、簡易な構成のダイオードクランプ回路を導入す	回路で構成されており,等化増幅系の周波数特性の補正が可
ることによって、温度や電源電圧変動に対する駆動電流の安	能である。試作ICの周波数特性を図20に示す。トランスイン
定化を図っている点に特長がある。駆動電流の変動は0~	ピーダンス800 Ω, 帯域2.4 GHz, 入力換算雑音 7 pA/√Hzが
25℃で+1%,25~75℃で-2%,電源電圧±10%に対し±	得られている。AGC (Automatic Gain Control) 増幅器には動

光伝送技術 897



注:略語説明 APC (Automatic Power Control), AGC (Automatic Gain Control)

図17 2.4 Gビット/秒光中継器のIC化構想 太枠で囲んだ部分が開発したIC化対象回路である。IC化には高速性に優れ ている0.8 μm GaAs MES FET(MES Field Effect Transistor)プロセスを適用した。



図18 レーザ駆動ICの構成と特性 ICは電流スイッチと2段の入力バッファ回路で構成しており,駆動電流50mAを120psでスイッチングでき る能力を持つ。4Gビット/秒まで動作することを確認している。



図19 前置増幅ICの構成 並列帰還形増幅器(a)と広域可変補償回路 (b)の組み合わせによって広帯域,低雑音特性を得るとともに,等化増幅 系の周波数特性の補正ができる。

図20 前置増幅ICの周波数特性 制御端子電圧 V_p を変えることによって、周波数特性を調整できることがわかる。 $V_p = -0.3$ Vのとき、帯域は2.4 GHzである。

45

898 日立評論 VOL. 71 No. 9 (1989-9)

作点安定化電流分配形回路構成を導入し¹⁷⁾,30 dB以上の利得 可変幅を得ている。利得可変ICと主増幅ICを組み合わせたと きの総合特性は帯域2.3 GHz,利得40 dBであった。識別器は 2段のスライス増幅器とフリップフロップで構成されており, 2.4 Gビット/秒で28 mVの識別感度が得られている。

なお,これらICを使用した1.55 µm・2.4 Gビット/秒の光伝 送実験では,符号誤り率10⁻⁹で-31.8 dBmの受信感度が得ら れており,2.4 Gビット/秒システムへ適用可能であることを 確認できた。

5 結 言

広帯域ISDNの新伝送ハイアラーキに沿った超高速・大容量 光伝送技術の研究開発概要を紹介した。2.4 Gビット/秒光伝 送方式に関しては、システム実用化に必要な光デバイスやIC などが出そろっており、これらデバイスを駆使した伝送装置 の開発が今後の課題である。コヒーレント光伝送方式では、 AMI-FSK変調、偏波-周波数変換形ダイバシティ受信、多チ ャネル光チューニング方式などを提案し基本動作を確認した。 この結果、コヒーレント光伝送に必要な要素技術がほぼそろ ったので、モデルシステムの試作・評価によりこれら方式の ブラッシュアップと有効性の検証を行っていく。 Lasers on Gbit/s Transmission Systems, Electron. Lett., Vol.24, No.1, pp.26~28(1988)

- 4) H. Nakano, et al. Comparison of Optical Reflection Tolerance between Conventional and λ/4-Shifted DFB Lasers in a 2.4 Gb/s System, Electron. Lett., Vol.24, No.16, pp.1049~1050(1988)
- 5) 高井, 外: 2.4 Gb/s伝送用光送信回路, 昭和63年度電子情報通 信学会春季全国大会, B-656(昭63-3)
- 6) 中野,外: PIQ埋込みDFB-LDを用いた10 Gb/s帯光変調実験, 1989年度電子情報通信学会春季全国大会, B-717(平1-3)
- 7) 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)
- 8) H. Tsushima, et al. Novel Optical FSK Modulation/ Demodulation Schemes with Alternate Mark Inversion (AMI) Coding, IEICE Trans., Vol. E71, No.11, pp.1086~ 1088(1988)
- 9) H. Tsushima, et al. A Novel Polarization Diversity Optical Receiver Using Polarization-Frequency Conversion Techniques, IOOC '89, 18C2-4(1989)
- 10) K. Uomi, et al. : Ultra-High Speed (17 GHz) 1.55 nm λ/
 4-Shifted DFB Lasers and Proposal on Reducing Damping Phenomenon for Higher Speed Modulation, ibid, 19C2-4 (1989)

超高速光伝送方式では、2.4 Gビット/秒システム実用化の めどが立っており、内外各国で1~2年後のシステム導入を 目標に精力的な開発が展開されると思われる。今後、研究の 主流は10 Gビット/秒システムを実現するための方式やデバイ スに移行するものと予測される。また、コヒーレント光伝送 方式については、多チャネル化に向けた技術開発とともに、 光周波数分割多重伝送技術をベースとした光ネットワークの 研究が活発化するものと考えられる。

参考文献

- 1) 木村,外:F-1.6G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.: 1.7Gb/s Lightwave Transmission Field Experiments, ICC '86, 48.1(1986)
- 3) S. Sasaki, et al. : Effects of Dynamic Spectral Behaviour and Mode-Partioning of 1550 nm Distributed Feedback

- 11) 岡井,外:多電極DFB型波長可変レーザ,1989年度電子情報通 信学会春季全国大会,SB9-4(平1-3)
- 12) 村田,外:コヒーレント光伝送用60dB光アイソレータ内蔵
 DFB-LDモジュール,1989年度電子情報通信学会春季全国大会,B-722(平1-3)
- 13) 伊藤,外:MOVPE結晶を用いたZn接合・自己ガードリング InGaAs/InP APD,第49回応用物理学会予稿集,7P-R1(昭 63-10)
- 14) K. Imoto, et al. : Guided-wave Space Multi/Demultiplexer with High Stopband Rejection, Applied Optics, Vol.26, No.19, pp.4214~4219(1987)
- 15) Y. Hatta, et al. : A GaAs IC Set for Full Integration of 2.4 Gb/s Optical Transmission Systems, '88 GaAs IC Sympo., Tech. Dig., pp.15~18(1988)
- 16) 山下,外:2Gb/s带光通信用LD駆動GaAsIC,電子情報通信 学会技術報告資料,ED87-147(昭63-1),2.4Gb/s光受信用 GaAs IC,電子情報通信学会技術報告資料,ED88-68(昭63-7)
- 17) T. Kinoshita, et al.: A DC-Coupled Wide Dynamic Range AGC Amplifier IC for 560 Mb/s Optical Transmission, IEEE J. Lightwave Tech., Vol. LT-5, No.8, pp.1062~1067(1987)

