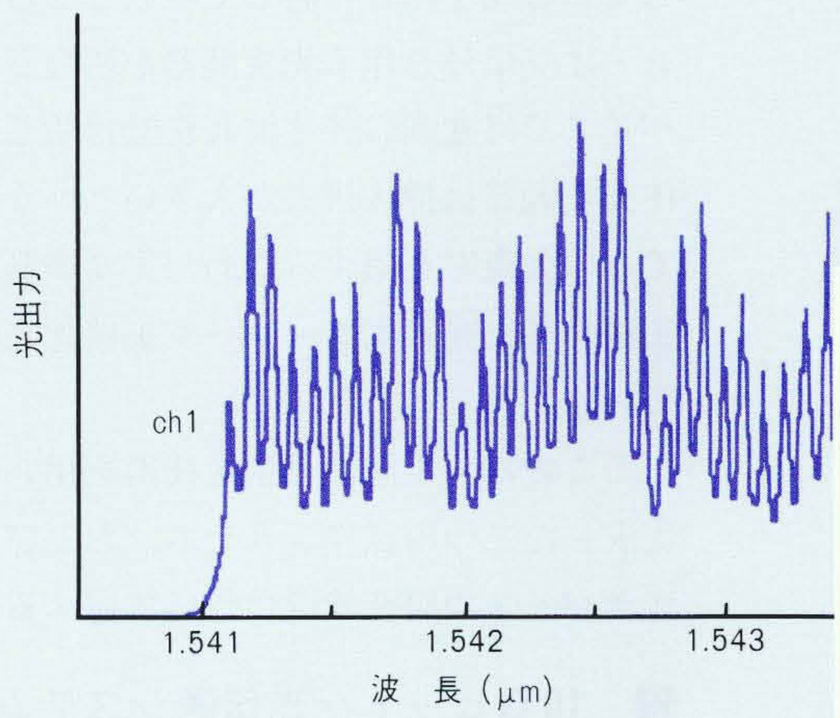
将来の大容量光伝送システムを目指す研究開発

Optical Transmission and Device Technologies for Future Large Capacity Optical Transmission Systems

佐々木慎也*　*Shinya Sasaki*
辻　伸二**　*Shinji Tsuji*
中野博行**　*Hiroyuki Nakano*
佐野博久**　*Hirohisa Sano*



コヒーレント光伝送試作装置で送られた信号光　光周波数分割多重により，1本の光ファイバで送られた波長の異なる32の信号光が確認される。試作装置の総伝送容量は，40 Gビット/sで，現在商用化されているシステムの伝送容量の16倍である。

公衆通信網での幹線系光通信システムの伝送容量は，現在2.4 Gビット/sまで実用化段階にある。今後，画像サービスや高速データ伝送サービスを含んだいわゆる広帯域ISDN(Integrated Services Digital Network)の普及が予想されている。このような高度情報化社会を実現するためには，さらに大容量な光通信システムの研究開発が必須(す)である。本稿は前論文で述べた動向にこたえるべく日立製作所で推進した先行研究の成果である。光伝送方式では，平成3年3月に二つのシステムを試作した。強度変調・直接検波方式を利用した次世代の伝送速度10 Gビット/sで140 km伝送可能な伝送システム，およびさらに大容量を目指し光の周波数変調・ヘテロダイン検波方式を利用した，総伝送容量が40 Gビット/sで120 km伝送可能なコヒーレント光伝送システムである。一方，大容量光伝送を支える光デバイスの研究例としては，光のままで光信号を増幅する偏波無依存半導体光増幅器，および10 Gビット/s以上の速度で光をオン・オフできる光変調器がある。

* 日立製作所 中央研究所 工学博士　** 日立製作所 中央研究所

1 はじめに

画像や高速データ伝送サービスを含んだ，いわゆる広帯域ISDN(Integrated Services Digital Network)の普及が数年後と予想されている。画像情報は音声や低速データ(64 kビット/s)と比較して情報量がおよそ二けた大きく，広帯域ISDNを実現するためには情報伝送システムの容量も飛躍的な増加が望まれる。

現在の光通信システムは，光のオン・オフを利用した強度変調・直接検波方式によって2.4 Gビット/sシステムまでが実用化されている。さらに大容量化を目的に高速化を図った10 Gビット/sシステムの研究が進んでいる[1]。

この光のオン・オフを利用した通信システムは，10～40 Gビット/sで高速化の限界に行き着くと言われており，さらに大容量化を図ろうとすると新しい伝送技術の開発が必要となる。この新しい伝送技術の一つがコヒーレント光伝送技術である。コヒーレント光伝送では光の波としての性質を利用しており，波長の異なる多数の光を1本の光ファイバで伝送することによって通信システムの大容量化を図ることができる。

一方，これらの大容量光伝送システムを支える光デバイスの研究が精力的に行われている。その第一の例として光増幅器がある。従来のシステムでは光ファイバの損失を補償するため，伝送中に減衰した光信号を一度電気信号に変換して増幅し，また光信号に変換して送信していた。光増幅器は，光・電気変換を行うことなく光のまま信号増幅を実現する装置であり，光ファイバ型光増幅器と半導体型光増幅器の2タイプがある。現在研究の主流は光ファイバ型であるが，半導体型光増幅器を用いることによって伝送装置の小型化が実現できる可能性がある。

光デバイスの研究の第二の例として光変調器がある。従来の強度変調・直接検波方式では，光源である半導体レーザの駆動電流をオン・オフする直接変調方式を用いていた。しかしこの方式では，変調時に生じる波長変動を避けることは難しく，高速伝送ではこの波長変動が光ファイバの分散と相まって，伝送後の波形ひずみを引き起こして伝送距離を制限する。そこで，一定波長で発振している光を信号に応じて吸収させることによって，オン・オフ信号を作る光変調器が研究されている。このデバイスでは変調に伴う波長変動は生じない。ただ，半導体光変調器は挿入損失が大きいという欠点がある。そこでこの欠点を克服するため，光変調器と半導体レーザを集積化した光変調器・レーザ集積化光源の研究が行われている。

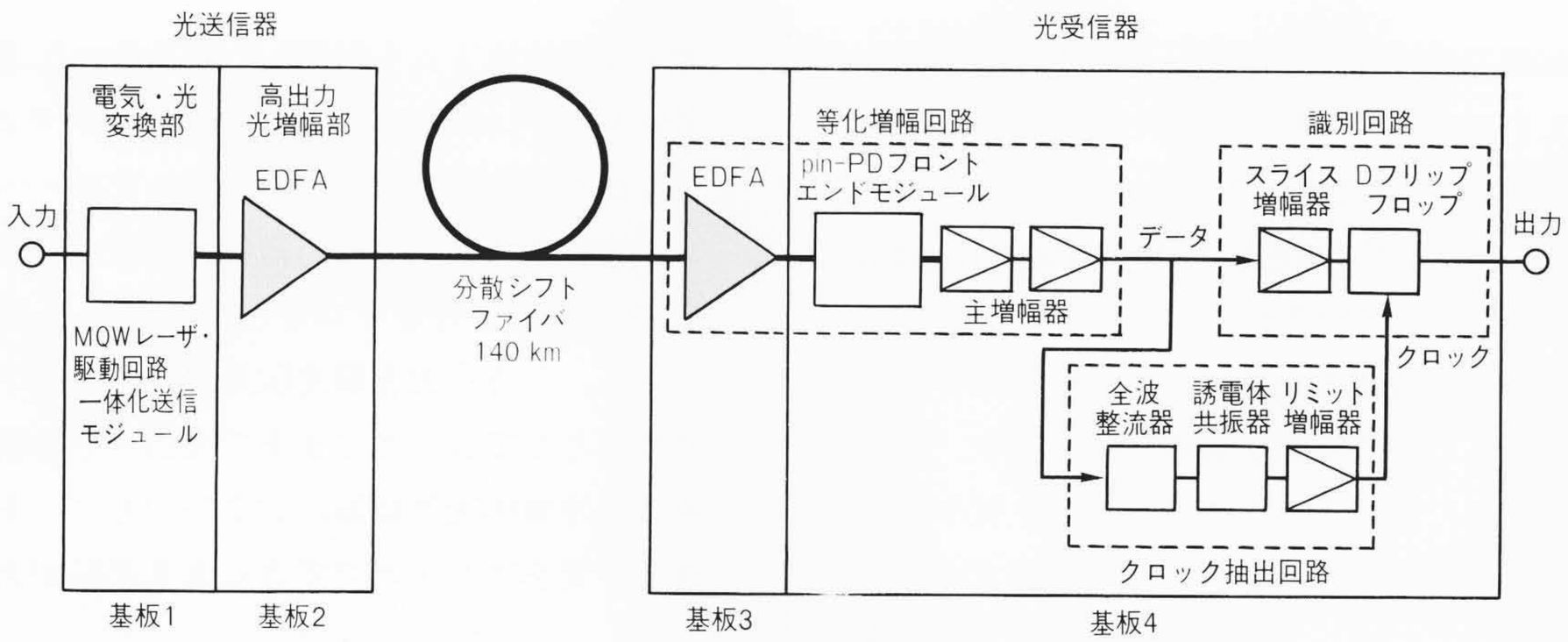
ここでは，上記の光伝送技術を用いて平成3年3月に完成した二つの試作システム，および上述した2種類の光デバイスの研究状況について述べる。

2 10 Gビット/s光伝送システムの試作

2.1 技術課題と試作システムでのアプローチ

次世代の10 Gビット/s光伝送技術は，将来の広帯域ISDNを構築するために必須(す)の基幹伝送技術として開発が進められている[1]。

10 Gビット/s光伝送システムを構築するための第一の



注：略語説明 MQW (多重量子井戸)，pin-PD (pinホトダイオード)，EDFA (Erドープ光ファイバ増幅器)

図1 10 Gビット/s 3 R光中継器と伝送実験系の構成 EDFAを送信器と受信器に用いることによって，140 km伝送を可能にしている。

技術課題として当然のことではあるが，等化増幅，識別再生，リタイミングの3R(Reshaping, Regenerating, Retiming)機能を持つ受信器の広帯域化，高速化がある。

一方，受信器の広帯域化に伴って雑音帯域が増大し，その結果，従来システムの中継間隔を確保したままで10Gビット/sシステムを実現することが難しくなる。そこで第二の技術課題として，中継スパンの確保(可能ならばその拡大)がある。

機能確認を目的に平成3年3月に試作した10Gビット/s光中継器では，第一の技術課題に対しては広帯域なGaAsデバイスを用いたハイブリッドICというアプローチを取った。また第二の技術課題に対しては，送信器の高出力化および受信器の高感度化をEDFA(Er-Doped Fiber Amplifier：Erドープ光ファイバ増幅器)の使用によって実現するというアプローチを取った。

2.2　試作した10Gビット/s光中継器と伝送実験系の構成(図1)[2)]

(1)　光送信器

光送信器は電気・光変換部とその出力光を増幅する高出力光増幅部で構成している。電気・光変換部ではレーザの高速直接変調を実現するため，レーザ駆動用ハイブリッドICとレーザチップを一体化した低寄生素子レーザモジュールを使用している。高出力光増幅部では，半導体レーザの特性によって制限されていた光出力をEDFAで増幅し送信している。

(2)　光受信器

等化増幅回路はEDFA，pin-PD(pinホトダイオード)フロントエンド，およびGaAsデバイスを用いた主増幅用ハイブリッドICから成る。受信感度向上を目的に，EDFAをpin-PDの前段に設置し光プリアンプとして使用している。クロック抽出回路は全波整流回路，誘電体共振器，およびリミット増幅器から成る直接抽出方式であり，簡易で小型の回路構成を実現している。識別回路はハイブリッドICによるスライス増幅器とGaAs D-フリップフロップICによって構成した。

2.3　試作システムの主要諸元

試作した光中継器を用いたシステムの主要諸元を**表1**に示す。信号光波長は，EDFAの光増幅特性やファイバの低分散波長帯に整合させている。光送信電力と最小受信感度は，EDFAの使用によってそれぞれ8.5 dBと9.3 dB改善しており，その結果140 km伝送が可能となった。140 km伝送後でも，誤り率特性の変化はわずか(ペナルティ0.7 dB)であり，この結果，試作中継器の機能確認ができた。

表1　試作した10Gビット/s光伝送システムの主要諸元
EDFAの使用によって高送信光電力と高受信感度を実現している。

No.	項　　目	諸　　元
1	信号波長	1,550 nm
2	送信光電力	+9.5 dBm
3	受信感度*	−26.5 dBm
4	伝送路用光ファイバ	分散シフト単一モード光ファイバ
5	波長分散	−0.2 ps/km/nm
6	伝送距離	140 km

注：*　(符号誤り率10^{-9}で規定)

3　コヒーレント光伝送システムの試作

3.1　コヒーレント光伝送の原理と特長

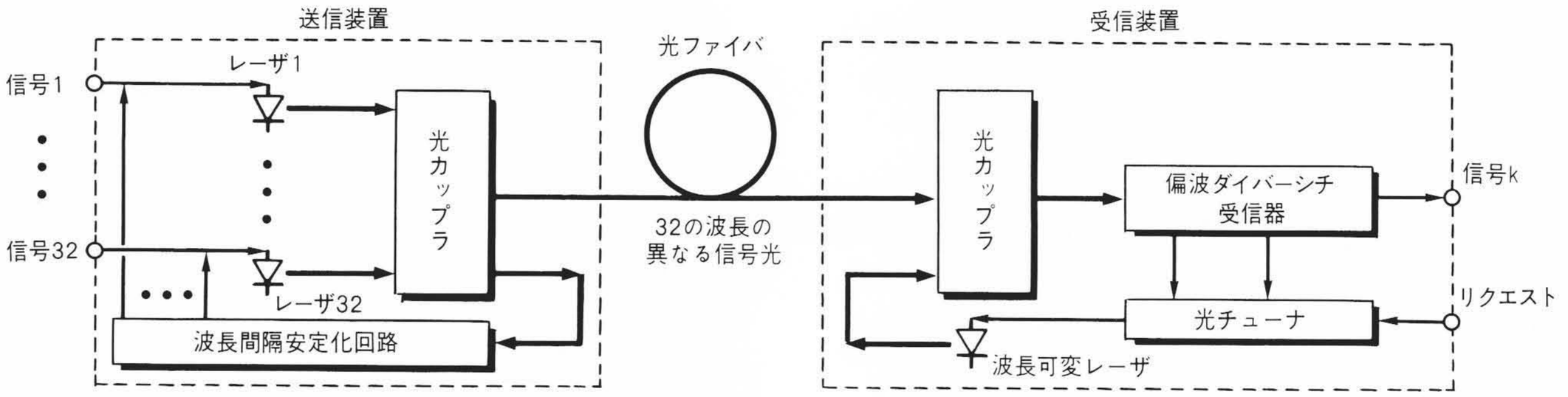
コヒーレント光伝送は，光の波としての性質を利用した伝送方式である。送信側では伝送しようとするディジタル信号の“0”と“1”に応じて，光の周波数を変調する。受信側では局部発振光源からの光を送信されてきた信号光と合波し，それら二つの光のうなり信号(電気信号)をホトダイオードで生じさせ(光ヘテロダイン受信)，元のディジタル信号を復調する。この光ヘテロダイン受信方式は，周波数選択性に優れており，波長の異なる多数の光を1本の光ファイバで同時に伝送する周波数分割多重方式を用い，光の多重数倍だけ伝送容量を増やすことができるという特長を持つ[3)]。

3.2　試作システムの概要[4)]

総伝送容量40 Gビット/sの試作システムの構成を**図2**に示す。

送信側では波長の異なる32台の半導体レーザを使用し，各レーザでは1.244 Gビット/sのディジタル信号を光の周波数変調によって送信する。32の光は光カップラで合波され伝送路用光ファイバに送出される。おのおのの光が1.244 Gビット/sの情報を運んでいるので，このシステムの総伝送容量は40 Gビット/sである。送信装置の中では信号光の波長間隔(0.08 nm)安定化を行い，隣り合う信号光の混信を防いでいる。

受信側では局部発振光源として波長可変レーザを用いる。このレーザの波長を光チューナと呼ぶ電子回路によって制御し，32の信号光の中から任意の光を選択受信する。また，伝送路光ファイバに加わる外乱(温度変化，圧力など)により，信号光の偏光状態が変化した場合でも安定な受信ができるように偏波ダイバーシチ受信器を用いている。



注：——（電気信号），▬▬（光信号）

図2 試作したコヒーレント光伝送装置の構成　　波長間隔安定化回路，波長可変レーザ，光チューナ，偏波ダイバーシチ受信器など，多くの新しい技術を用いて実現している。

試作システムの主要諸元を**表2**に示す。総伝送容量40 Gビット/sはこれまでに報告された光ヘテロダイン受信方式を用いた実験システムの中で世界最大である。

3.3 試作システムの応用例

このシステムの一応用例として，放送局から高精細テレビジョン信号(150 Mビット/sを仮定)を，光ファイバを用いて各家庭に分配し，家庭で選択受信する光CATV (Cable Television)を考える。この試作システムの送受信パワーレベル差と総伝送容量から算出すると，高精細テレビジョン信号250チャネルを放送局から半径10 km以内の1万軒の家庭に分配できる光CATVシステムが実現できる。

表2 試作したコヒーレント光伝送システムの主要諸元
波長間隔を0.08 nmときわめて狭く安定化し，32波を同時に伝送することによって総伝送容量40 Gビット/sを実現している。

No.	項　　目	諸　　元
1	波長帯	1,541.1～1,543.6 nm
2	波長数	32波
3	波長間隔	0.08 nm
4	1波長当たりのビットレート	1.244 Gビット/s
5	総伝送容量	40 Gビット/s
6	1波長当たりの送信光電力	−14 dBm±0.5 dB
7	1波長当たりの受信感度*	−45.1～−44.2 dBm
8	伝送路用光ファイバ	通常分散単一モード光ファイバ
9	伝送距離	121 km

注：＊ (符号誤り率10^{-9}で規定)

4 半導体光増幅器の開発

4.1 光増幅器

光増幅器は，(1) 応答周波数が1 THz以上と広く，(2) 変調速度や変調形式に依存しない，(3) 波長多重信号の一括増幅ができる，など大容量光伝送系の実現に適した装置となっている。

光増幅器には**図3**に示すように光ファイバ増幅器と半導体光増幅器がある。光ファイバ増幅器は光ファイバ中に添加した希土類イオン(Er：エルビウム)を高出力レーザダイオード(波長：1.48 μmあるいは0.98 μm)で励起して，このエネルギーで信号光を増幅するものである。

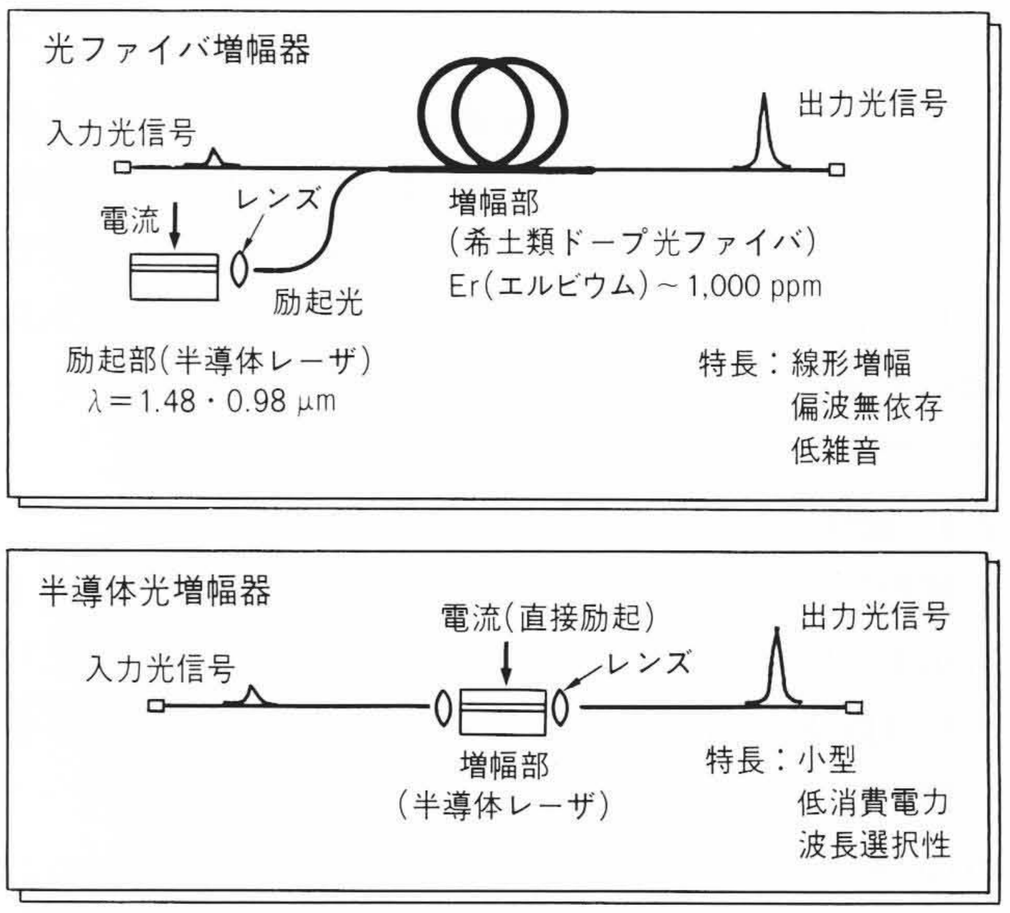


図3 光増幅器の構成比較　　光増幅器には光ファイバ型と半導体型がある。

偏波依存性がないことや，高出力時にも線形性に優れた増幅特性が得られることから，光通信システムへの適用検討が進んでいる。

一方，半導体光増幅器はレーザダイオード中の光増幅作用を直接利用するものである。このため２～３cc程度の小型モジュールで全機能を満足できる利点があり，伝送装置の小型化，高密度化に有効であると考えられる。

4.2　偏波無依存半導体光増幅素子[5)]

半導体光増幅素子の構造は，長さ550 μmのストライプ状の活性領域が屈折率の低い結晶で埋め込まれた光導波路でできている。一方の端から入射された光が光導波路を伝搬しながら増幅され，他方の端から出射される。２種の伝搬モードのうち，TMモード光はTEモード光に比較して利得の生じる活性領域への光分布の割合が一般に小さいので利得が小さくなる。この結果，入射光の偏波状態によって利得が異なるという偏波依存性が生じる。このため活性層幅を0.4 μmとするなど，光の感じる屈折率分布を等方的にして偏波無依存化を図った。

また，導波路が素子の端面方向から６度傾いた斜め窓構造を開発することによって実効反射率を0.004％まで低減させた。これにより，素子利得28 dBまでの安定な増幅特性が得られた。

4.3　半導体光増幅器モジュール[6)]

光ファイバ通信への適用には，入力出力側に単一モードファイバを組み込んだモジュール化が不可欠である。偏波無依存化に伴って光のスポットサイズが0.6 μm程度に小さくなるため，従来の光学系ではファイバと素子の光結合損失が増加する。開口数が0.7と高い非球面レンズを用いた共焦点レンズ光学系を開発し，光結合損失の低減を図った。この光学系を組み込んだモジュール構造を**図４**(a)に，増幅特性例を同図(b)に示す。結合効率は片端当たり－3.2 dBであり，TEモード光で22 dB，TMモード光で21 dBのファイバ間利得が得られた。モジュールの飽和出力値は＋５dBmであり，この高出力化が今後の課題である。

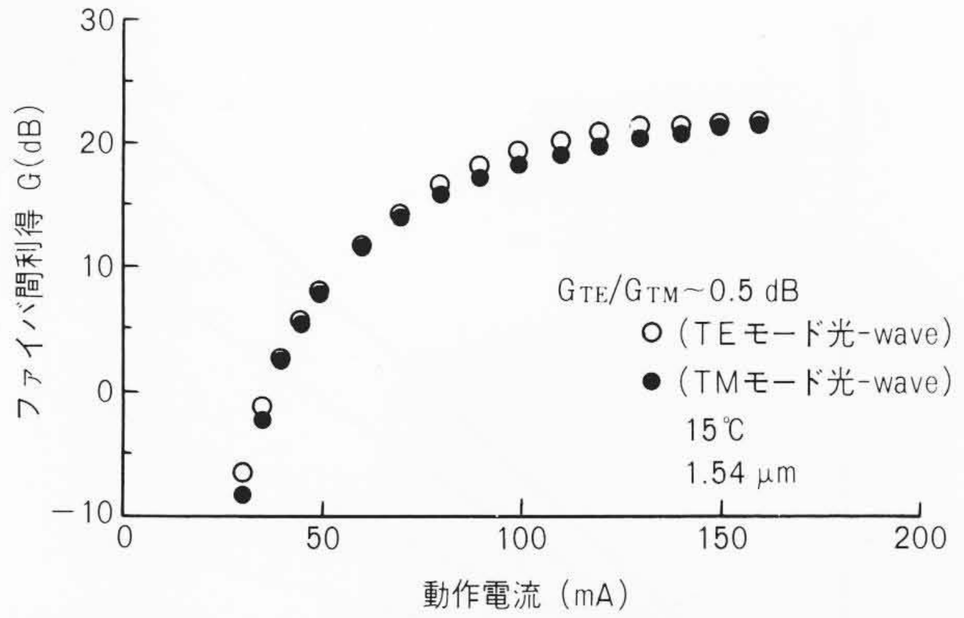


図４　光増幅モジュールの増幅特性例　　非球面レンズを用いた光学系により，入出力部のファイバと光増幅素子との結合損失の低下を図っている。この結果，22 dBのファイバ間利得を得ている。

5　超高速光変調器の開発

5.1　光変調器・レーザ集積化光源

外部変調は，一定波長で発振する光を光変調器によってオン・オフする方式であり，波長変動が生じないため高速・長距離伝送に適した方式である。しかし，従来は

(1)　光変調器と光源の間の光結合損失が大きい。

(2)　光変調器の効率が低く，高出力駆動回路が必要。

などの問題があった。この問題を解決するため，日立製作所は多重量子井戸光変調器と半導体レーザの一体集積化の検討[7)]を進めている。これにより，光源と光変調器の高効率光結合の実現，および多重量子井戸の大きな電界効果[8)]の利用による変調効率の大幅な向上が可能となる。

作製した素子の半導体レーザの活性層には，発振波長である1,550 nmに合わせて設計された多重量子井戸が配置されている。一方，光変調器部にはレーザ部とは異なる構造を持つ多重量子井戸が用いられており，この部分の透光度が電圧の印加によって変化することを用いて光変調を行っている。従来，このように異なる構造を持つ素子を集積化する場合には，複数回の結晶成長が用いられていた。しかし，レーザ部と変調器部の成長界面での構造の乱れが避けられず，集積化素子の特性を劣化させる要因となっていた。今回，日立製作所は１回の結晶成長で異なる構造を持つ多重量子井戸を同時に作製する技術を新たに開発することにより，この問題を解決している。

5.2　作製した素子の特性

作製した素子の変調特性を**図５**に示す。横軸にはレーザ部の駆動電流を，縦軸には光出力を示しており，素子特性を光変調器部に印加する電圧をパラメータとして表示している。10 mW以上の最大光出力と２V以下の駆動電圧($\frac{1}{10}$消光時)が得られており，高光出力化と高変調効率がともに実現されていることがわかる。また，14 GHz以上の変調帯域が得られており，高速性の点でも将来の10 Gビット/s以上の光伝送に十分な性能を持つことを確認している。

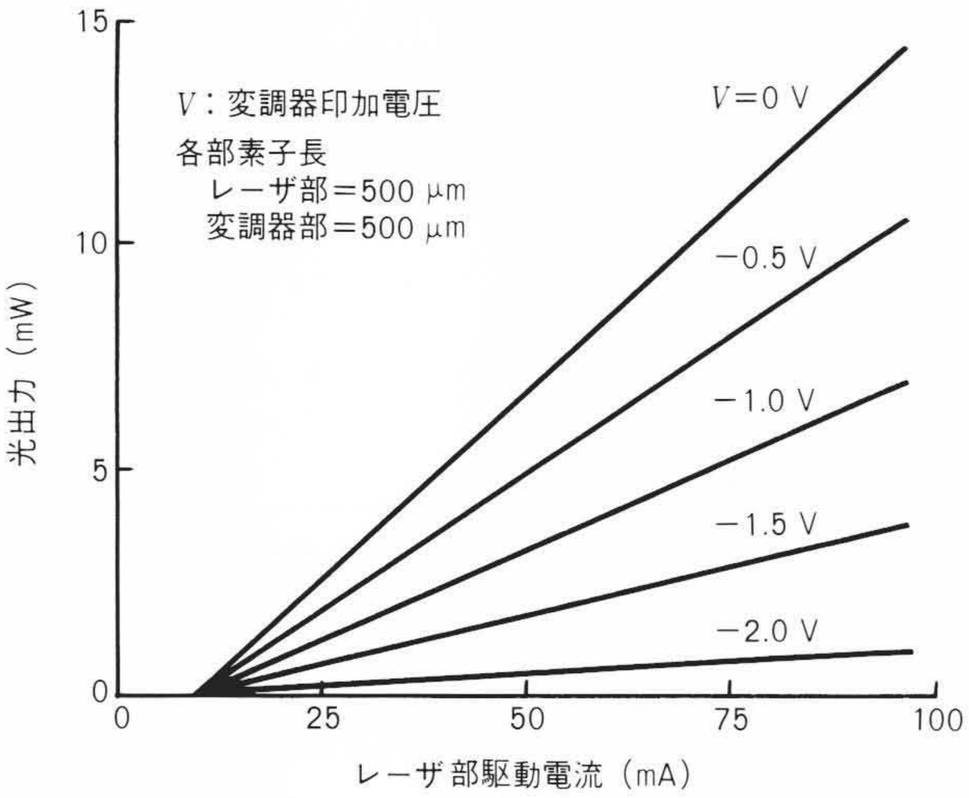


図5 光変調器とレーザを集積化した光源の変調特性
10 mW以上の高い光出力を，2 V程度の印加電圧で消光させることが可能となっている。

6 おわりに

以上，将来の大容量光通信の実現を目指した光伝送システム，および光デバイスの研究開発状況に関して述べた。

光ファイバの低損失波長帯である1,550 nm帯は，帯域がおよそ10 THz以上もあり，Tビット/s伝送のポテンシャルを持っている。本稿はTビット/s伝送のポテンシャルを現実のものとするためのアプローチの一端を示した。ユーザーとの共同開発などにより，その時点でのニーズに合わせた実用システムの実現に向かうための素材である。

日立製作所は，今後もこのTビット/s伝送の可能性を追求する大容量光通信システムの研究開発を継続していく考えである。

参考文献

1) K. Nakagawa, et al.：A Bit-Rate Flexible Transmission Field Trial Over 300 km Installed Cables Employing Optical Fiber Amplifiers, Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications, PdP11(1991)
2) H. Nakano, et al.：High Gain 10 Gbit/s 3R Optical Repeater with Direct Clock Extraction, ECOC'91, WeA9-5(1991)
3) H. Toba, et al.：Optical Frequency Division Multiplexing Systems, IEICE Transactions on Communications Vol.E75-B, No.4, p.243(1992)
4) H. Tsushima, et al.：1.244-Gb/s 32-Channels Transmissions Using a Shelf-Mounted Continuous-Phase FSK Optical Heterodyne Systems, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.10, No.7, p.947(1992)
5) 辻，外：偏波無依存半導体光増幅器，電子情報通信学会技術報告書OQE90，206，p.25(1990)
6) 豊中，外：高開口数非球面レンズを用いた高利得(>20 dB)半導体光増幅器モジュール，電子情報通信学会技術報告書OQE91，91，p.19(1991)
7) M. Aoki, et al.：High Speed(10 Gb/s) and Low Driving Voltage(1 Vp-p) InGaAs/InGaAsP MQW Electroabsorption Modulator Integrated DFB Laser with Semiinsulating Buried Heterostructure, Electronics Letters, Vol.28, 12, p.1157(1992)
8) Wakita, et al.：High Speed InGaAs/InAlAs Optical Modulators with Bandwidth in Excess of 40 GHz at 1.55 μm, Technical Digest CLEO'90, Paper CTuC6(1990)