次世代光伝送用部品

Optical Devices for Next Generation Transmission Systems

次世代光伝送用部品について、研究開発の状況を述べる。超高速光通信用光源として、狭メサ構造多重量子井戸分布帰還形レーザを開発し、10 Gビット/秒の変調と波長チャーピングの低減を確認した。コヒーレント通信用光源に向けた回折格子周期変調形長共振器レーザで、スペクトル線幅1.5 MHz、波長可変幅1.6 nmを得た。超高速光通信用受光素子として超格子なだれ増倍形フォトダイオードの基本素子を試作し、増倍現象とイオン化率比の向上を確認した。超高速光通信用外部変調器として多重量子井戸構造吸収形変調器を試作し、9.4 GHzの高速特性が得られた。光クロスコネクトなどに向けた空間分割形光スイッチについて、増幅器集積化形スイッチの基本素子を試作し、増幅器の利得による損失の低減を図った。

茅根直樹* Naoki Chinone
石田宏司* Kouji Ishida
中村 均** Hitoshi Nakamura

1 緒 言

現在の通信システムでは、主として幹線系に光通信方式が 導入されている。将来、加入者に至るまで信号伝送に光信号 が用いられるようになると、クロスコネクトや交換の分野に も光技術が導入されることは想像に難くない。このような時 代には、光の特質を生かして伝送と交換を一体化した光ネットワークが形成できる可能性が高い。このときに活躍するで あろう光部品の将来像はまだ十分明らかとは言えないが、現 在の研究開発の動向を表1に示すようにまとめた。幹線系通 信では、伝送情報量の増大に伴い、超高速伝送あるいはコヒ ーレント多重伝送用の光部品が必要である。また交換の分野 では、空間あるいは時間分割形の光スイッチのほかに、光波 の特徴を生かした波長変換スイッチも重要となるであろう。 これらの光部品相互のあるいは光部品と電子部品のモノリシック集積化も進展するものと予想される。

本稿では,これらの光部品のうち,発光および受光素子と 光集積回路について,日立製作所での研究開発の状況につい て述べる。

2 発光素子

ここでは、幹線伝送系の大容量化へ向けた超高速通信用お よびコヒーレント通信用の半導体レーザについて述べる。

2.1 超高速通信用半導体レーザ

幹線伝送系では、現在開発が進められている伝送速度2.4Gビット/秒のシステムの次の世代として10Gビット/秒システ

表 1 光部品の研究開発動向 図中アンダーラインを施したところは、本稿で述べるものを示す。

システム	光 部 品		
幹線伝送系	 超高速発光および受光素子 コヒーレント通信用発光および受光素子 光変調器 → 光源との集積化 光増幅器励起光源などを含む。 		
加入者伝送系	●加入者系用発光および受光素子──光電子集積化		
クロスコネク ト・光交換	空間分割形光スイッチ → 増幅器との集積化波長分割形光スイッチ 波長変換素子などを含む。時間分割形光スイッチ 光論理・光メモリなどを含む。		

ムの導入が予想される。これに向けた半導体レーザに対する 技術課題として、(1) 超高速変調を可能とすることと、(2) 波長 チャーピングを低減することがあげられる。波長チャーピン グは、半導体レーザの電流にパルス信号を重畳したときに生 ずるレーザ発振波長の変動のことで、伝送速度が高いとチャ ーピング量の大きさによって伝送距離が制限されるようにな る。

まず初めに超高速変調を可能とするためには、半導体レーザの容量を低減することが重要である。このため②1に示すように活性層の周囲 5μ m程度を残して、他の部分をエッチン

^{*} 日立製作所 中央研究所 工学博士 ** 日立製作所 中央研究所

グで除去する狭メサ構造とした。これにより素子容量は従来の8pFから約2pF以下に低減した。これより素子の高速特性の指標となる変調周波数帯域は、従来の約5GHzから14GHzに向上した。

一方、波長チャーピングの低減に関しては、活性層に多重量子井戸構造を導入した。多重量子井戸構造とは、厚み100 Å以下の井戸層と、これより禁制帯幅の大きなやはり厚み100 Å付近の障壁層を交互に多数積層したものである。図1に示すように、波長1.55 μmでは井戸層はInGaAs、障壁層はInGaAsPである。井戸層の厚みが電子の波束の波長より薄いため、井戸層内に注入された電子と正孔はおのおの量子準位を形成する。レーザ発振はこれらの量子準位間で生じ、レーザの波長は量子準位間のエネルギー差によって決まる。量子準位自体のエネルギー幅が非常に狭いので、多重量子井戸構造ではレーザ波長の変動幅が小さく、従来に比べ大幅な波長チャーピングの低減が可能となる。従来から用いられてきた液相成長法ではこのような薄膜の成長は難しいので、新たに薄膜制御性に優れた気相成長法を開発した。

以上述べた狭メサ構造の多重量子井戸分布帰還形(DFB)半導体レーザについて、 $10~\rm{G}$ ビット/秒のランダム信号で変調したときのアイパターン(光出力波形)を図2に示す。 $10~\rm{G}$ ビット/秒の高速信号でも良好なアイパターンが得られている。このときの時間平均スペクトルを図3(a)に示す。従来では、同図(b)に示すようにスペクトル幅(光強度が $-20~\rm{d}B$ になるところの全幅)が $1.5~\rm{n}m$ もあったが、多重量子井戸構造では $0.5~\rm{n}m$ と約 $\frac{1}{3}$ に低減された。今後さらに、多重量子井戸構造の最適

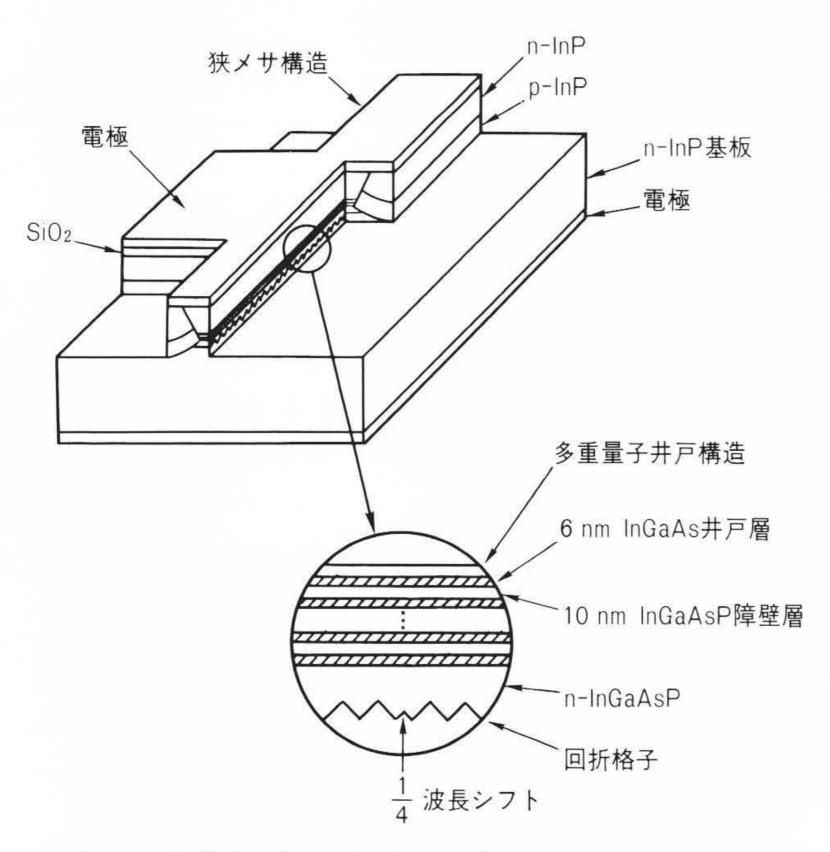


図 | 狭メサ構造多重量子井戸分布帰還形レーザ 狭メサ構造と 多重量子井戸との組み合わせで、高速変調が可能で、波長チャーピング の小さなレーザ素子が実現される。

化によってチャーピング量の低減が期待でき,実用化も近い と考えられる。

2.2 コヒーレント通信用半導体レーザ

コヒーレント通信システムでは、光周波数多重方式によって大容量化が図られる見通しである。このようなシステムへ向けた半導体レーザに対する主要な技術課題として、(1)スペクトル線幅の低減、および(2)レーザ波長の可変化があげられる。前者に対するシステム仕様は、変復調方式や伝送速度に依存するが、線幅が100kHz程度にまで低減できれば、ホモダイン方式を含む広範なシステムに対応できる。波長可変化は、受信側の局部発振光源で、多重信号を波長チューニングによって選択するために必要である。これに対するシステム仕様についても、送信信号の多重数やチャネル間隔に依存しているが、可変幅として5nm以上あれば、数十チャネルの多重化に対応できる。

まずスペクトル線幅の低減について述べる。現状の分布帰還形半導体レーザでは、線幅は通常10 MHz以上である。これを低減するためには、主として(1) 長共振器化による反射損失の低減、(2) ホールバーニング現象の低減が重要である。ホールバーニング現象とは、高出力時に素子の光軸方向に部分的に光が集中し、キャリヤ密度分布に不均一性が生ずる現象を言う^{1),2)}。これによりスペクトルが不安定になり、線幅が増大する。これを防ぐためには、素子内のレーザ光分布を均一化する必要がある。これを達成するために周期変調形の回折格子3)を導入し、長共振器化を図った狭スペクトル分布帰還形半導体レーザの縦断面図を図4に示す。回折格子として、同図に示すように回折格子周期の異なる位相調整領域を素子内に3か所設けた構造とした。これにより、光軸方向の光分布を平均化できる。このような回折格子を実現するために、機械刻線法を応用した回折格子ホトマスク法を用いた4)。共振器長

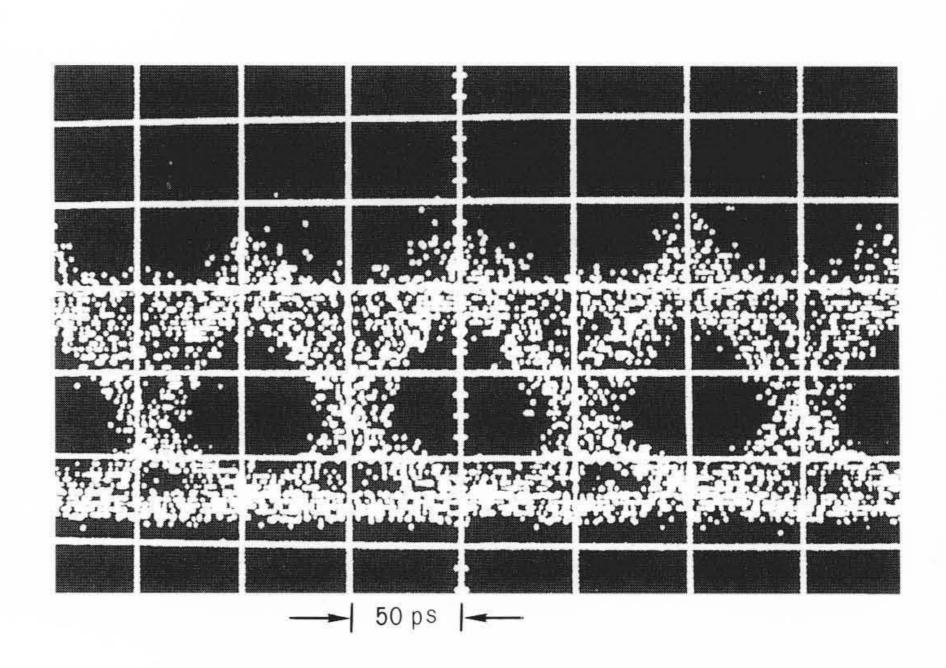
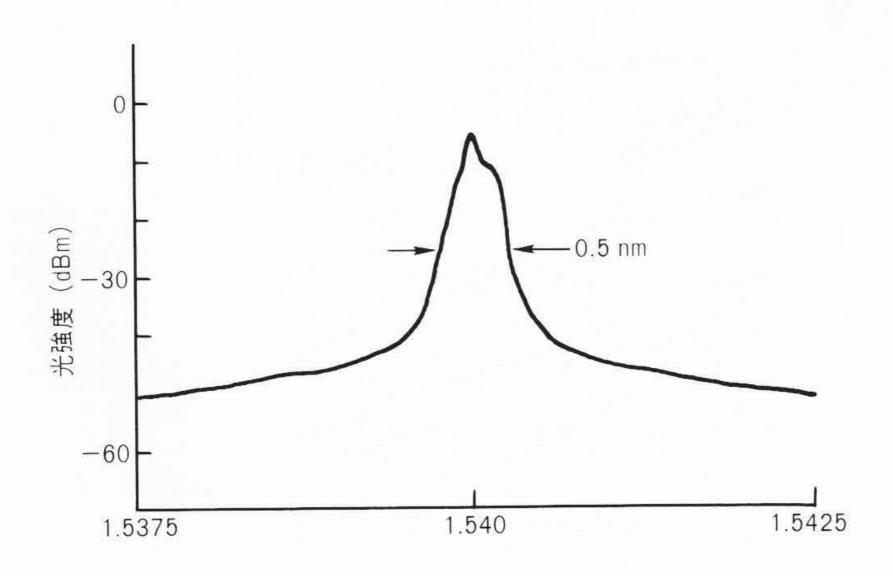


図 2 10 Gビット/秒ランダム信号による光出力波形(アイパターン) 狭メサ構造によって10 Gビット/秒の高速信号でも, 比較的良好なアイパターンが得られる。



(a) 多重量子井戸構造

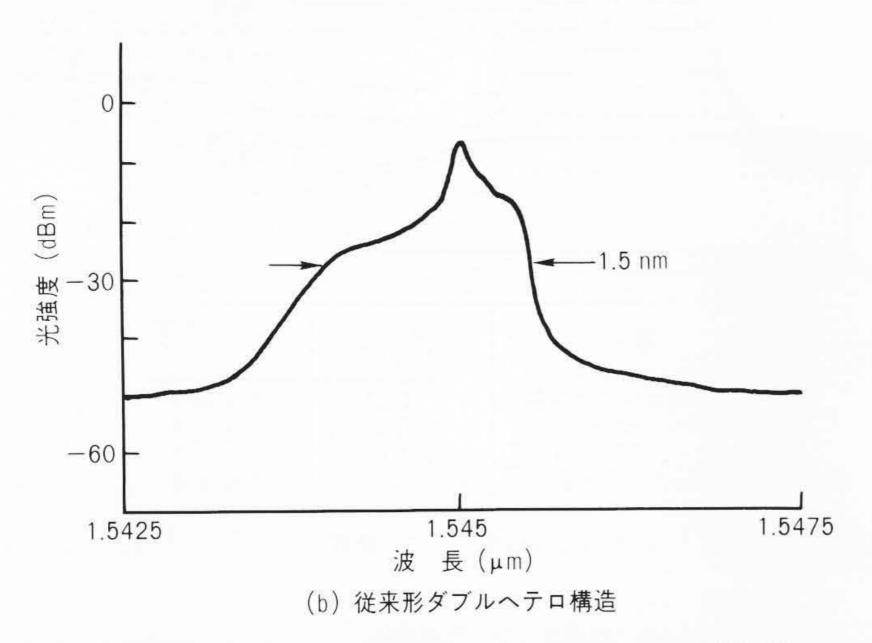


図3 10 Gビット/秒ランダム信号で変調したときの時間平均スペクトル 多重量子井戸構造の導入により、低チャーピング化が図れる。

は従来に比べ, 3, 4倍の1.2 mmとした。スペクトル線幅の 実測結果を図5に示すが, 高出力でも安定な単一スペクトル が得られ, 光出力20 mWで線幅1.5 MHzを得た。

一方、波長を可変とするために、 $\mathbf{図4}$ に示したように分布 帰還形半導体レーザの一方の電極を2電極に分割し、双方に 加える電流の割合を変化させる方式とした。これより $\mathbf{図6}$ に 示すように、1.6 nmの波長可変範囲を得た。このときのスペ クトル線幅はほぼ2 MHz以下であった。

以上述べたように、コヒーレント通信用半導体レーザでは、 まだすべてのシステム仕様を満足する段階ではないが、今後 素子構造の最適化や新しい技術の導入により、さらに性能の 向上が期待できる。

3 受光素子

次世代の10 Gビット/秒光伝送システムに用いるなだれ増倍 形フォトダイオード(APD: アバランシェフォトダイオード) には、G(増倍率)10、B(遮断周波数)10 GHzのいわゆるGB積 100の性能が要求される。ここでは、超格子APDによるアプローチと原理実験の結果について述べる。

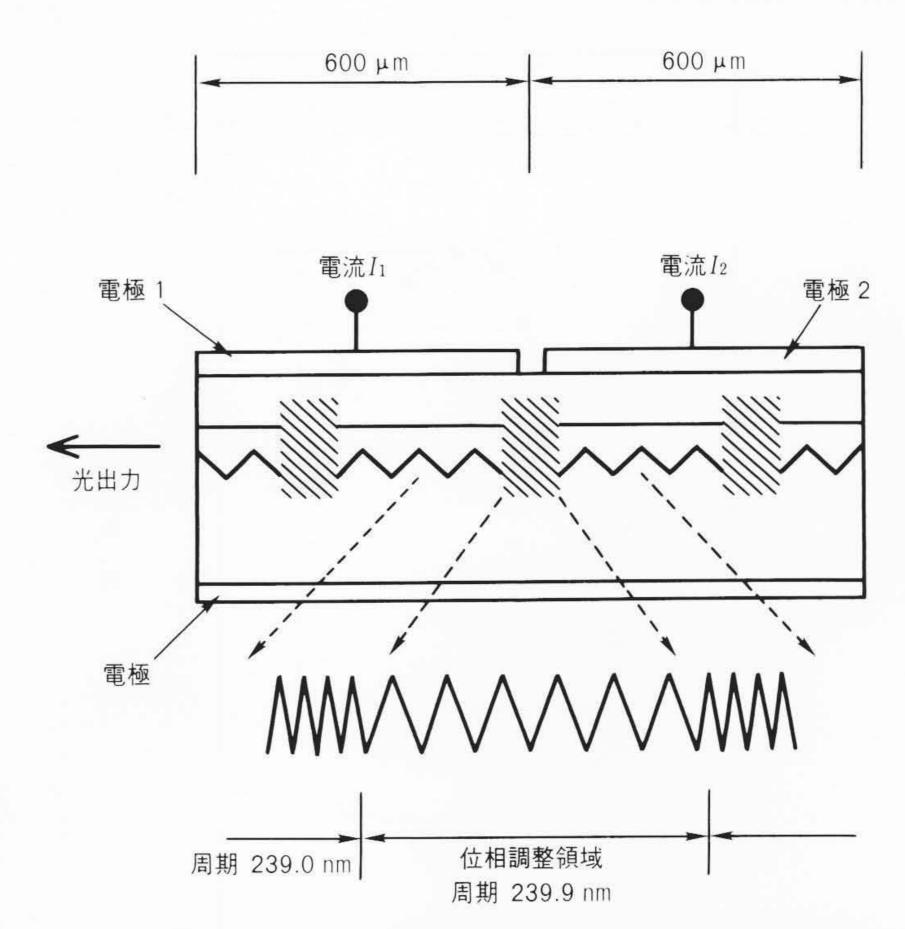


図 4 回折格子周期変調形長共振器分布帰還形レーザ 周期変調形の回折格子を用いることにより、長共振器でもスペクトル安定性を保つことができる。

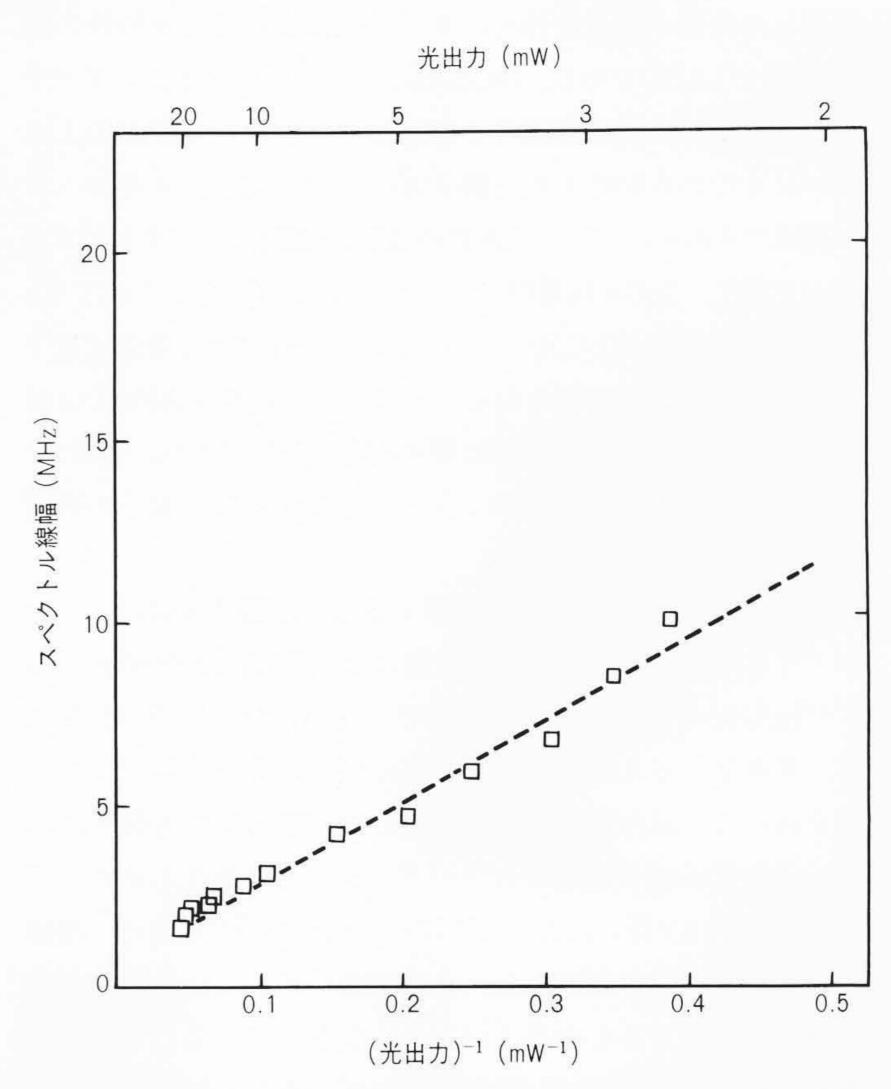


図5 スペクトル線幅の光出力依存性 光出力20 mWで最小1.5 MHzが得られている。

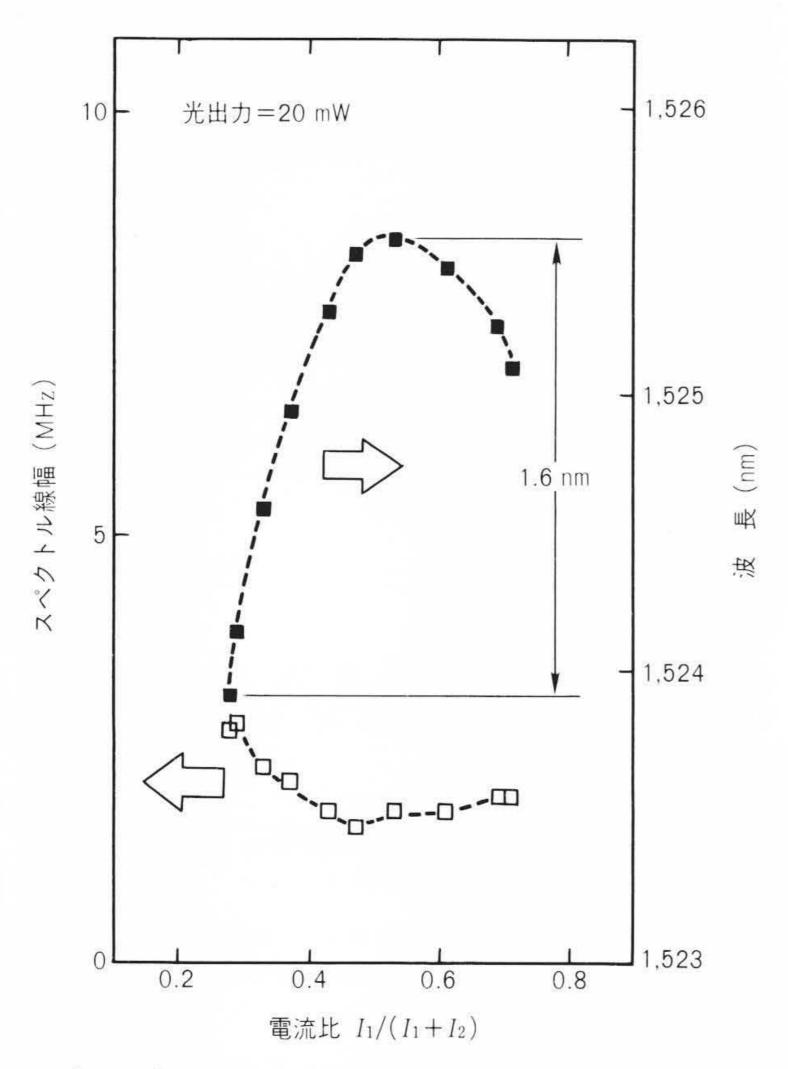
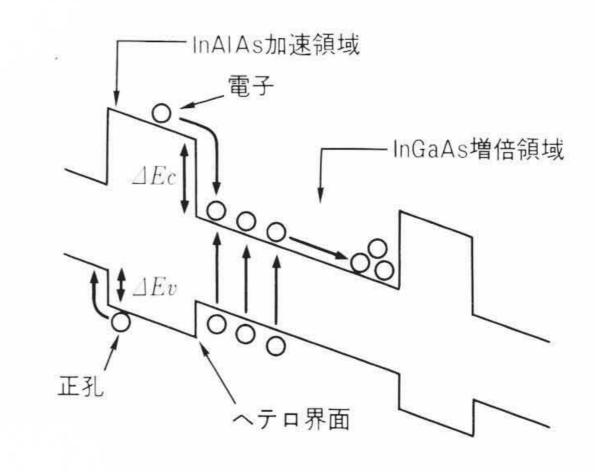


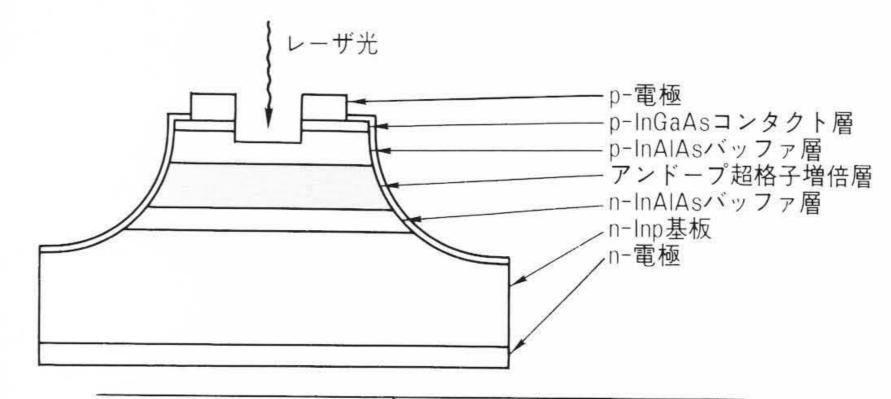
図 6 波長可変特性とスペクトル幅 2 電極間の電流比率を変えることにより、波長可変にできる。

超格子APDは、増倍層に膜厚10 nm程度の2種類の薄膜を積層した超格子構造を持ち、人工結晶によって受光特性の向上を図ったAPDである。InGaAs/InAlAs系超格子に、アバランシェ増倍が生ずる高電界を印加したときのキャリヤのふるまい、すなわち動作原理を図7(a)に示す。電子、正孔はヘテロ界面でそれぞれバンド不連続値 ΔEc 、 ΔEv に対応するエネルギーを得て、InGaAs層内でアバランシェ増倍を引き起こす。ここで、 ΔEv は ΔEc に比べ小さいため、正孔による増倍は電子による増倍に比べ抑制される。その結果、超格子APDでは従来のAPDに比べ、増倍過程に要する時間が短縮され、同時に、増倍時に生ずる雑音を低減できる。したがって、素子の高速化、高感度化が期待できる。

超格子APDの基本動作を確認するため、2 7 (b)に示すメサ 形ダイオードを試作した。増倍層には膜厚15 nmのInGaAsおよびInAlAsを50周期積層した超格子を用いた。素子の作製には、界面急しゅん性、膜厚制御性に優れた分子線エピタキシ 法を用いた。試作素子の印加電圧と増倍率の関係を2 8 に示す。印加電圧30 V付近からアバランシェ増倍を生じ始め、45 Vで増倍率14が得られた。この増倍の機構を調べるため、増倍 に伴う過剰雑音を評価した。その結果、正孔による増倍の確立は、電子によるものの $\frac{1}{5}$ 以下に抑制されていることが観測され、超格子APD特有の増倍が生じていることを確認できた。今後は、さらに高速化を図り、超高速光通信用受光素子とし



(a) 超格子APDの動作原理



層名	膜厚 (nm)	キャリヤ濃度 (cm ⁻³)
p-InGaAsコンタクト層 p-InAlAsバッファ層 アンドープ超格子増倍層 n-InAlAsバッファ層	200 1,500 (15/15)×50 1,000	$ 5 \times 10^{10} \\ 1 \times 10^{10} \\ < 1 \times 10^{15} \\ 2 \times 10^{10} $

(b) 試作した超格子APDの構造

注:略語説明 APD (アバランシェフォトダイオード)

△Ec (伝導帯バンド不連続値)

△Ev (価電子帯バンド不連続値)

図7 超格子APDの動作原理と試作素子の構造 超格子中のヘテロ界面により、電子による増倍に比べ正孔による増倍が抑制され、高速化、低雑音化が図れる。

て実用化の予定である。

4 光変調器

光変調器は、超高速光伝送をはじめとする各種の光信号処理システムで重要なデバイスであるが。光信号の広帯域性を生かすためには、光変調器は高速動作可能なものでなければならない。また将来の光信号処理の高度化を考えると、他の光素子との集積化にも対応できる必要がある。多重量子井戸構造の吸収スペクトル端が、電界の印加によりシフトする現象(QCSE:Quantum Confined Stark Effect)は、本質的にサブピコ秒オーダの高速応答特性を持っているが、またこれを用いた吸収形光変調器は、レーザなどの光素子との集積化が容易であるという特徴を持っている。ここでは、InGaAs/InAlAs多重量子井戸構造を用いた1.55 μm帯光変調器の基本動作特性について述べる。

多重量子井戸構造吸収形光変調器の構造を**図9**に示す。同 図からわかるように、アンドープ多重量子井戸構造をnおよび

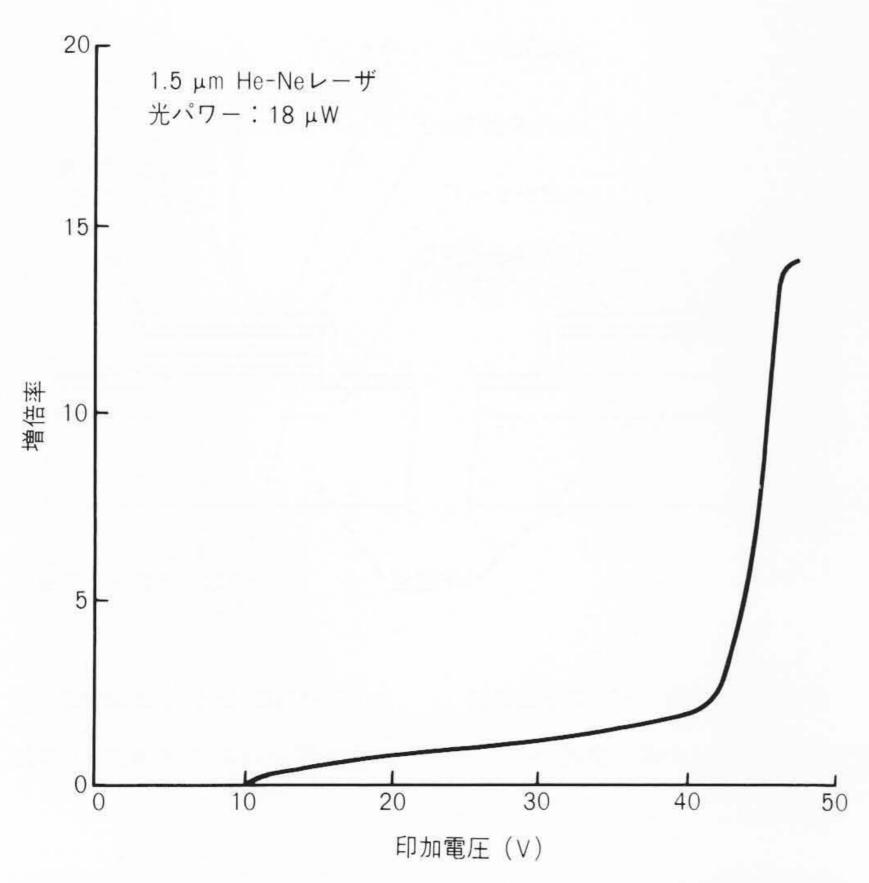


図 8 試作した超格子APDの増倍特性 超格子増倍層で増倍特性が確認された。

pドープInAlAsで挟んだ構造とした。多重量子井戸構造には井戸層にInGaAs,障壁層にInAlAsを用い、これを20周期積層したものを用いた。動作波長が1.55 μm帯となるように、井戸層および障壁層の厚みはおのおの67 Åに設定した。ドライエッチングを用いて幅4.0 μmのリッジを形成することによって単一モードの光導波路を形成した。これに逆バイアスを印加すると、吸収ピークは長波長側に大きく移動する。この吸収ピークの移動に伴う吸収係数の変化によって入射光の強度が変調される。素子長は約200 μmである。

試作した素子の小信号変調特性を図10に示す。同図からわかるように3dBダウンの変調周波数帯域は9.4 GHzであった。 試作した素子容量の測定結果は、電界によらず一定の値(0.7 pF)であった。50 Ωの負荷抵抗を用いた場合のCR時定数の計算値は35 psとなり、本測定結果と良い一致を示す。すなわち、本素子の変調帯域はCRリミットとなっていることがわかる。素子の容量は、構造の最適化によってさらに低減することができるので、本構造の光変調器を用いると20 GHz以上の広帯域変調特性も十分に可能である。光変調器は半導体レーザの直接変調に比べきわめて小さな波長チャーピングが得られるので、再生中継を行わないような超長距離化に適している。システムの方式を見極めて実用化を考えてゆきたい。

5 光増幅器を集積したキャリヤ注入形光スイッチ

光ネットワークを構成するうえで必要な多重通話路の切換や、将来の光交換機を実現するためには、小形・低損失・低漏話で大規模に集積された光スイッチの開発が必要である。

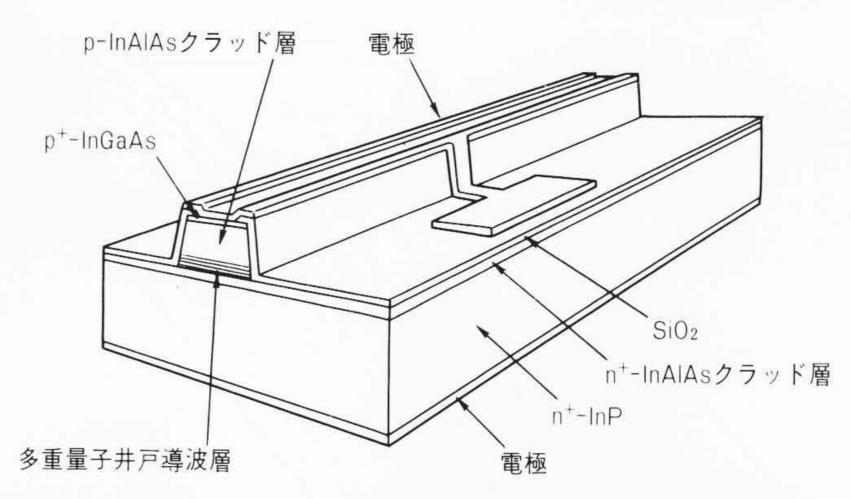


図 9 多重量子井戸構造吸収形光変調器の構造 多重量子井戸に 電界を印加すると、吸収スペクトルが変化する現象を利用して光の強度 変調を行う。

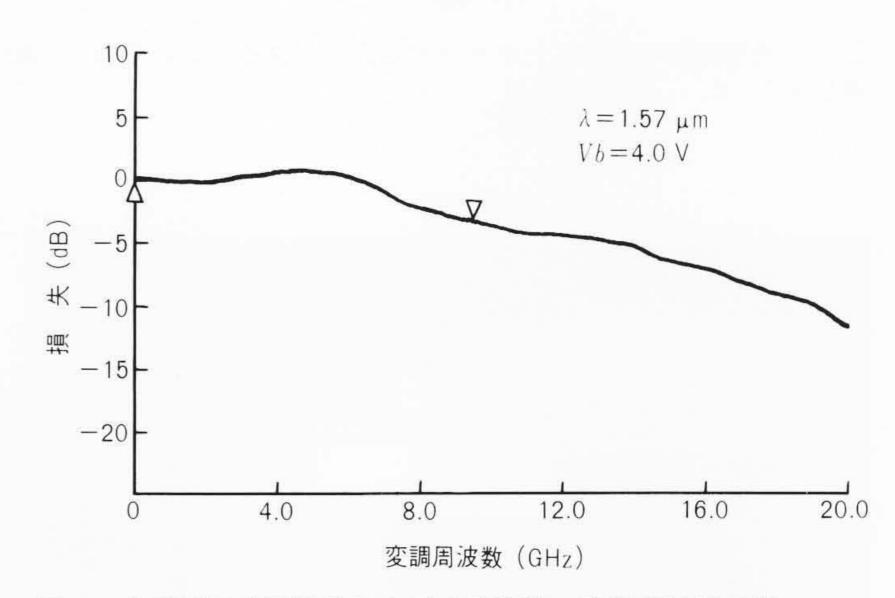
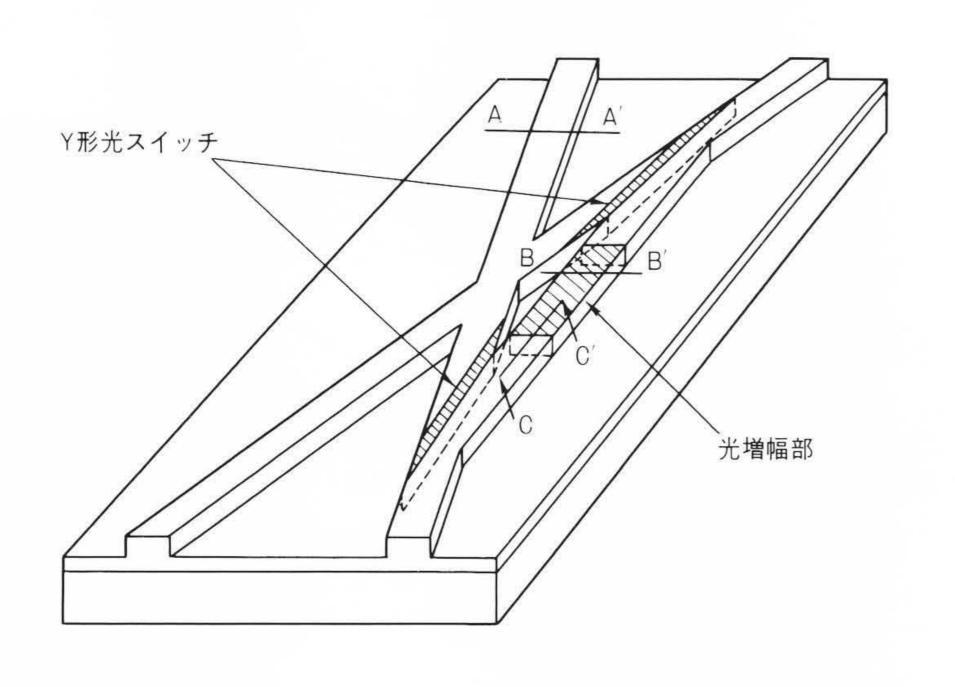
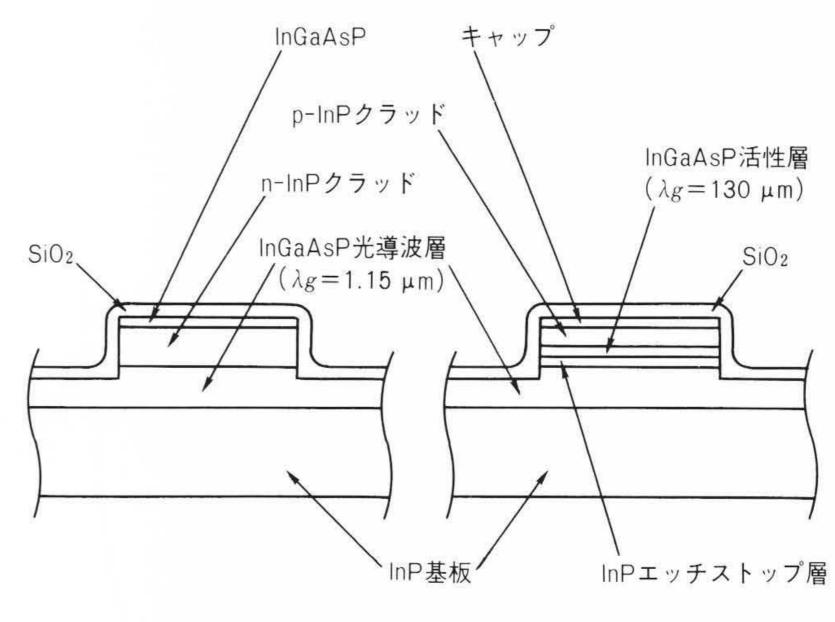


図10 多重量子井戸構造吸収形光変調器の変調周波数特性 - 3 dBで9.4 GHzの帯域が得られている。

日立製作所は、これまでキャリヤ注入によって生じる屈折率変化を利用した半導体光スイッチの研究を行ってきた^{8),9)}。このスイッチは、小形で単一モード光ファイバとの接続性に優れ、偏光依存性がないという優れた特徴を持っているが、挿入損失が大きいことや、ON/OFF比が不十分なため、大規模な集積化が困難であるという課題があった。ここでは以上の課題を解決するため、新しい光スイッチ構造を提案し、基礎的な検討を行った結果について述べる。

新たに提案した光スイッチの構造を図11(a)に示す。進行波形光増幅器が、片渡り交差形光スイッチの渡り部であるバイパス導波路に集積されている。この光スイッチは、(1)挿入損失の補償が可能であること、(2)漏話量を低減できること、(3)光信号のモニタ機能を持っていること、などの特徴がある。試作した素子の光導波路部および光増幅領域の断面構造を同図(b)、(c)に、また素子の外観を図12に示す。本構造では光増幅部の活性層内でTE(Transverse Electric)、TM(Transverse Magnetic)モードの閉じ込め係数が縮退しているため、モード間の利得差に起因する偏光依存性を抑制することができる。また、導波路および光増幅部に共通のInGaAsP導波層





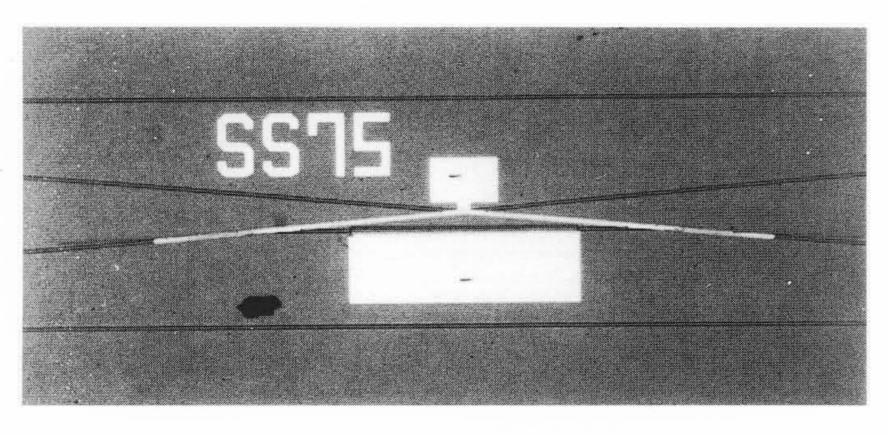
(a) 外観図

(b) 光導波路部(A-A')の断面構造

(c) 光増幅部(B-B')の断面構造

図川 光増幅器を集積したキャリヤ注入形光スイッチの構造積されている。

進行波形光増幅器が片渡り交差形光スイッチの渡り部(バイパス光導波路)に集



500 μm

図12 試作した光増幅器集積化光スイッチの外観 上部の白い部分は光スイッチ部の、下部の白い部分は光増幅部の電極である。

を用いて, 結合部での損失を低減している。

試作した集積化光増幅器の特性を、半導体レーザ光を用いて測定した結果、増幅部を持たない試料の損失に比べて約4dBの利得、および最大29dBのON/OFF比が得られた。これにより、大規模に集積された光スイッチアレー実現のために、本構造が有効であるとの知見が得られた。

6 結 言

次世代光伝送用部品の研究開発状況の一部について述べた。 上記以外にも、光増幅器や光電子集積回路など新しい機能素 子の研究も進めている。今後、広帯域ISDN (Integrated Services Digital Network)への発展と、光ネットワーク化に伴 い、新たなシステム側のニーズが予想され、材料・デバイス での新技術と新概念の創出が今まで以上に重要となろう。また一方では、光部品相互あるいは光と電子部品の間の集積化が進展するものと予想される。また本稿では、主として光素子について述べたが、これらのパッケージ化も重要な技術であり、多機能のモジュール化の方向へ進むとともにシステム技術との融合が図られていくものと予想される。

参考文献

- 1) M. Okai, et al.: IEEE J. Quantum Electron., Vol.25, p.1314(1989)
- 2) H. Soda, et al.: IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-23, p.804 (1987)
- 3) M. Okai, et al.: IEEE Photonics Technology Lett., 1, p.200 (1989)
- 4) M. Okai, et al.: Appl. Phys. Lett., 55, p.415 (1989)
- 5) 鈴木,外:波長分割広帯域光通信網の一検討,電子情報通信 学会技術報告,SE86-117(1986)
- 6) D. A. B. Miller, et al.: Phys. Rev. B, Vol.32, p.1043(1985)
- 7) M. Yamanishi, et al.: Japan. J. Appl. Phys. Vol.21, 21-1, Suppl.21-1, p.365 (1982)
- 8) K. Ishida, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol.50, p.141(1987)
- 9) H. Inoue, et al.: IEEE J. Select. Areas Comm., SAC-6, p.1262(1988)