特集 光伝送技術

U.D.C. (621.375.826.038.825.5+621.383.52).001.76:621.391.64

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。

茅根面	重樹*	Naoki Chinone
石田宏	云司*	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 表 | 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		
幹線伝送系	 ●超高速発光および受う ● <u>コヒーレント通信用</u> ● <u>光変調器</u> → 光源との ● 光増幅器励起光派 	<u>光素子</u> <u>発光</u> および受 の集積化 原などを含む	· 光素子	
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

71

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 ザの容量を低減することが重要である。このため図1に示す 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 ように活性層の周囲5µm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

384 日立評論 VOL. 72 No. 4 (1990-4)

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In-GaAsP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 腹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

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100 kHz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5 nm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

導体レーザについて、10 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 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 dBになるとこ ろの全幅)が1.5 nmもあったが、多重量子井戸構造では0.5 nm と約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。

72

図2 IOG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IOG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。



(MHz)

トル線幅

くく

K

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,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 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。

73

日立評論 VOL. 72 No. 4 (1990-4)

386

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。

p-InGaAsコンタクト層	200	5×10^{10}
p-InAIAsバッファ層	1,500	1×10^{10}
アンドープ超格子増倍層	(15/15)×50	$< 1 \times 10^{15}$
n-InAlAsバッファ層	1,000	2×10^{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)

超格子APDの動作原理と試作素子の構造 义 7 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。

光変調器 4

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5)。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6),7)。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

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、AEvはAEc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、図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図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

74

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

次世代光伝送用部品 387

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 ー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9.4GHz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。

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

75

図(b), (c)に、また素子の外観を図12に示す。本構造では光増 光増幅器を集積したキャリヤ注入形光スイッチ 5 幅部の活性層内でTE(Transverse Electric), TM(Trans-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 verse Magnetic) モードの閉じ込め係数が縮退しているため, や、将来の光交換機を実現するためには、小形・低損失・低 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 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。

388 日立評論 VOL. 72 No. 4 (1990-4)

図II 光増幅器を集積したキャリヤ注入形光スイッチの構造 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 積されている。

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。

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4 dBの利得、および最大29 dB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

76

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 Ser-

参考文献

- 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)
- M. Okai, et al. : IEEE Photonics Technology Lett., l, 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)
- 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)

vices 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

9) H. Inoue, et al. : IEEE J. Select. Areas Comm., SAC6, p.1262(1988)