放送用光通信技術の動向

正会員 上野 義人[†]

最近における光通信技術の動向について概説するとともに、放送分野への光通信システムを適用する際、光ファイバー、レーザーダイオードなど主要光デバイスを用いたテレビ信号伝送上の留意事項について述べている。また、実際に国内外で導入、実用化されている光通信システムの具体例について、その構成、性能など、使用する立場から解説を行っている。

1. ま え が き

光ファイバーの低損失化と広帯域化とは、石英系光ファイバーとして、すでに理論的限界まで到達し、かつ量産化に富んだファイバー製造法も開発され、実用上の問題はほとんど解決されてきた。一方、光半導体素子については $0.83\ \mu\text{m}$ 帯の光源であるレーザーダイオード、発光ダイオードともに長寿命化が達成されており、広く実用に供されるようになってきた。さらに、光ファイバーの最低損失領域である $1.3\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 帯のレーザーダイオードも単一モード発振が実現され、結晶成長プロセスの改良とレーザーダイオード構造の改善とにより、50万時間以上の長寿命化が実現されている。

長波長帯 ($1.3\sim 1.5\ \mu\text{m}$) の受光素子も InGaAsP などの化合物半導体を用いた4元素のアバランシェフォトダイオード (APD) が開発され、短波長帯 ($0.8\sim 0.9\ \mu\text{m}$) で広く用いられているシリコンAPDの特性に比較して遜色ない性能が得られている。

その他、光通信システムを構成する上に必要となる光分岐、光分波、光スイッチなど実用的な光デバイスも開発され、公衆通信のみならず電力・交通・放送・防衛用光通信システムが導入されつつあり、これら実用化テンポはますます加速されつつある。

最近、140 Mb/s という高速 PCM 信号を 102 km 無中継伝送したという驚異的な実験データも報告さ

れ、さらに波長多重技術として、光波長を 20 波多重化できる光分波器も開発されるなど、さらに光通信の応用分野がひらけつつある。また現在、研究の緒についた発光受光素子と電気回路とを一体化した光 IC が開発されれば、光通信の飛躍的な発展が期待できる。

以下、放送分野への応用を主眼にして、使用する立場からみた光デバイスの諸特性ならびに光通信システムの概要について述べる。

2. 光 デ バ イ ス^{1)~3)}

2.1 光ファイバーケーブル

石英系光ファイバーの製造技術は、ほぼ完成の域に達している。この製法として、ミニコンピュータ制御された MCVD 装置や連続製法である VAD 法がある。これら確立された技術により、光ファイバー特性の均一化と量産化とが可能になり、図1に示すような、石英系光ファイバーとしての理論限界に近い、良好な特性が得られるようになった。波長 $0.83\ \mu\text{m}$ で平均 $2.5\ \text{dB/km}$ 、 $1.3\ \mu\text{m}$ で平均 $0.6\ \text{dB/km}$ の低損

図1 光ファイバーの損失特性

[†] 日本電気株式会社 ミリ波画像通信開発本部
 "Recent Progress of Optical Communications for Broadcasting Application" by Yoshito Ueno (NEC mm Wave and Video Communication Development Laboratory, Yokohama)

失化が実現されている．光ファイバーの伝送帯域も集束形マルチモードファイバーで平均 $1.2 \text{ GHz} \cdot \text{km}$ が実現されている．

通常，光ファイバーケーブルの単長は，ドラム巻きで 1 km であり，長尺化するために光ファイバーどうしをスプライス接続する必要がある．このとき，接続損失として，スプライス損失が 1 接続当たり平均 0.1 dB 増加する．また，長尺化した光ファイバーの伝送帯域は，光ファイバーのコア内を伝搬する光のモード変化により，長さの γ 乗に反比例して狭くなる．一般に γ の値が 1 に近いほど伝送帯域は早く狭くなり，集束形マルチモードファイバーでは， γ の実測値は平均 0.56 程度である．

現在，集束形マルチモードファイバーの規格は国際的に標準化され，コア径は $50 \mu\text{m}$ ，クラッド径は $125 \mu\text{m}$ で統一されている．

集束形マルチモードファイバーを使用するとき，以下に述べるモーダルノイズという現象がある．すなわち，コヒーレンシーの良いレーザーダイオードからの光をマルチモードファイバーに入射させると，多数の電磁波モードが伝搬する．このとき，光ファイバーの屈折率が波長によって異なる分散特性をもつため，各モードの伝搬時間が僅かに異なったり，レーザー光の光ファイバーへの入射角度により各ビームの伝搬速度が異なったりする．このため，光ファイバーの伝搬方向に応じて，各モード間の位相や振幅が異なり，各電磁波モード相互間で干渉を生ずる．この結果，光強度の空間的・時間的強弱として現れ，いわゆるスペckルパターンが生ずる．

このようなスペckルパターンの発生機構を図 2 に示す．この図は，一番簡単な最高次モードと最低次モードとを伝搬させたときの光の強弱を表している．

一般に，マルチモードファイバーでは，数百のモードが伝搬するため，モード数に比例して，光の強弱（スペckル）の数が級数的に増加する．特に光ファイバーを接続するとき，軸ずれや間隔ずれを起こした状態で接続したとき，接続損失が非常に僅かな値でも大きなスペckルパターンを発生する．さらに，光ファ

イバーに外部から振動を与えたり，僅かな曲げを加えたとき，伝搬する各モード間の遅延時間差が生じ，動的なスペckルパターンの変動となる．

また，レーザーダイオードは，結晶両端のへき開面による共振器長に相当した縦モードでレーザー発振しており，これに変調をかけると活性領域の温度が変化し，光の強度に応じた縦モードジャンプが生ずる．この縦モードシフトは，マルチモードファイバーでは，正弦波状のスペckルパターン変化となり，光振幅の変動に相当する．このため，コヒーレンシーの良いレーザーダイオードを用いてアナログ伝送したり，高速デジタル伝送するとき，このモーダルノイズによって発生する波形ひずみや非直線ひずみは無視できない．このため，アナログ直接変調ではモーダルノイズを発生する心配のないインコヒーレント光源である発光ダイオードが主に用いられる⁴⁾．

マルチモードファイバーと同程度の低損失を有し，かつモード分散による帯域制限がなく，超広帯域伝送ができる単一モードファイバーがある．コア径が数 μm と小さく接続が困難であったが，スプライス技術の進歩によりマルチモードファイバーと同程度の接続損失が得られるようになった．単一モードファイバーは $1.3 \mu\text{m}$ 近傍で石英系光ファイバーの材料分散が零になるため，構造分散による遅延が小さくなるように光ファイバーのパラメーターを選んでいる．

一方，最低損失を示す $1.55 \mu\text{m}$ で広帯域化する方法として，コアクラッド間屈折率差を上げコア径を小さくして，構造分散による遅延量と逆符号をもつ材料分散量とを差引して，零分散を実現している．このようにして，伝送帯域が $200 \text{ GHz/km} \cdot \text{nm}$ 以上のシングルモードファイバーが実現されている．

一方，シングルモードファイバーには，次に述べるような偏波分散とよぶ遅延ひずみが発生する．すなわち，単一モードファイバーでは，入射光の偏光面によってコアの屈折率が異なり，直線偏光を入射しても，コアの x 軸と y 軸の伝搬定数に差がある．このため，曲げや内部応力によって楕円偏光に変化する．現状では，光ファイバーの長さ方向の屈折率やコア，クラッド寸法が均一でないため，光ファイバーの長さ方向に沿って，楕円偏光に変化する間隔が変わる．この間隔をビート長と呼ぶ．このビート長は波長に比例することから，レーザーダイオードの発振縦モードが変化して周波数シフトを起こしたとき，異なるビート長が光ファイバーの長さ方向に生じ，発光源の僅かな周波数じょう乱は，AM-FM 変換により，偏波分散に相当した波形ひずみを生ずる．このため，コアまたはクラッ

図 2 モーダルノイズ (2 モードのとき)

ドを楕円にし、 x 軸、 y 軸の伝搬定数差を大きくして、両モードの伝搬距離に差をつけることにより定偏波特性を得ている。

最近、光ファイバーを回転させながら紡糸すると、光ファイバーの長さ方向の複屈折率が変わるため、偏波分散が小さい定偏波単一モードファイバーが実現されている⁵⁾。

実用上、光ファイバーは、細くて軽く、かつ耐環境性を有しているが、光ファイバー自身の許容張力は 5～8 kg と小さく、布設に問題がある。このため、光ファイバーの機械的破断を防止する必要から、各種のケーブル構造が用途に応じて提案され、布設上の問題をすべて解決している。すなわち、単芯光ケーブル、多芯光ケーブル、電力線との複合ケーブル、海底光ケーブル等、数多くの種類に及ぶ光ケーブルが実用に供せられている。

また、光ファイバーの寿命も 20 年以上と推定され、耐熱、耐火、耐放射線をもつ光ケーブルも開発されており、広い分野に光ケーブルが導入されている。さらに、光ファイバーのスプライス技術も自動融着装置が実用化されており、接続損失も現場で平均 0.1 dB 程度のデータが得られている。

このように、光ケーブルを布設する工法は、特に新しい布設工法を必要とせず、架空、管路布設ともに従来工法と同様に行うことができる。もちろん、テレビ放送などの野外中継用光ケーブルも実用化されており、**写真 1** に外観を示す。最高 8 芯まで光コネクタで接続することができ、**写真 1** では 2 芯の光ファイバー接続と 2 芯の電力線接続が同時に行える構造になっている。この光接続損失は約 1 dB であり、許容張力も 120 kg 以上と充分な布設張力があり、重量も 60 kg/km と軽量化され、持ち運びに便利である。

2.2 発光・受光素子

光通信用発光素子には、発光ダイオードとレーザーダイオードとがあり、発光波長帯では 0.8 μm 帯の短波長用と、1 μm 帯の長波長用とがある。結晶材料に

写真 1 野外用光コネクタの外観

は両者とも化合物半導体を用い、0.8 μm 帯では GaAlAs 系を、1 μm 帯では InGaAsP 系を使用している。結晶成長技術は、どちらの材料でも完成されており、実用的な推定寿命は、発光ダイオードで 100 万時間以上、レーザーダイオードで 50 万時間以上のデータが得られている。

光通信用発光ダイオードとして、高輝度発光可能な面発光形あるいは、端面発光形ダブルヘテロ構造で、光ファイバーとの結合効率が高いものが実用化されている。発光スペクトルは、波長 0.83 μm で約 40 nm、波長 1.3 μm で約 100 nm の半値幅をもつため、光ファイバーの材料分散により光パルスが拡がり、広帯域長距離伝送ができない。

発光ダイオードを直接変調したとき、変調周波数の周波数特性は、活性層の不純物濃度が高いほど注入キャリアのライフタイムが短くなって、高くのびる。しかし、非発光再結合が増加して発光量子効率が低下し、発光出力が小さくなる。したがって通常、遮断周波数は 30～40 MHz が多く、長波長帯で 100 MHz まで周波数応答する発光ダイオードも開発されている⁶⁾。一般に、波長 0.83 μm 帯発光ダイオードの光出力は 2～5 mW で、波長 1.3 μm 帯の発光ダイオードの光出力は約 1 mW 以下である。

発光径約 30 μm の面発光形 LED に、コア径 50 μm 、NA $\approx$ 0.2 の集束形光ファイバーを密着結合したとき、光ファイバー内に入る光入力値は、GaAlAs 発光ダイオードで約 -10 dBm、InGaAsP 発光ダイオードで約 -15 dBm である。このため、光ファイバーとの結合効率を高くする方法として、セルフフォーカスレンズや微小球レンズで集光したり、光ファイバーの先端を球レンズ状に加工して、高い結合効率を得るようにしている。

発光ダイオードの駆動電流対光出力特性は本質的に非直線特性をもっているため、何らかのひずみ補償を必要とし、負帰還方式、プレディストーション方式、フィードフォワード方式など、各種ひずみ補償方式が実現され、高品質でテレビ伝送が行われている。

一方、レーザーダイオードは、結晶成長技術の進歩や端面保護技術の採用により、推定寿命 50 万時間以上が実現され、実用上大きな障害となっていた寿命の問題が解決された。残る実際上の問題としてレーザーダイオードの駆動電流を変えて光出力を強度変調する、いわゆる直接強度変調方式では、レーザーダイオード自身の変調特性が重要になってくる。

一般にレーザーダイオードの電流-光出力特性は閾値電流以上になるとレーザー発振するが、温度が上昇

すると閾値電流は大きくなる．ここでレーザーダイオードの発振領域の温度を T_j 、特性温度を T_0 とすると、閾値電流は $\exp(T_j/T_0)$ に比例する．したがって、この T_0 の高いレーザーダイオードほど使い易く、GaAlAs 系では $T_0=120\sim170$ K、InGaAsP 系レーザーでは $T_0=60\sim70$ K となり、長波長帯レーザーダイオードでは放熱を充分考慮する必要がある．したがって、周囲温度が変化すると光出力が変動するため、光出力を安定化する必要がある．このため、レーザーダイオードの前後から出るレーザー光のうち、一方のへき開面から出る光出力をフォトダイオードで受光し、その電気出力が絶えず一定になるように、レーザーダイオードに流す電流を制御して光出力を安定化するという、いわゆる APC 回路がよく用いられる．

次に、レーザーダイオードの発振モードは、図 3 に示すように、レーザー内部の広い利得幅の中で、へき開面で閉じられた共振器損失に打ち勝つ縦モードが発振する．この縦モード間隔は、GaAlAs 系レーザーで約 $3\text{ \AA}$ 、InGaAsP 系レーザーで約 $10\text{ \AA}$ である．また中心波長の温度依存性は、波長 $0.083\text{ }\mu\text{m}$ で約 $2.5\text{ \AA}/^\circ\text{C}$ 、波長 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ で約 $4.5\text{ \AA}/^\circ\text{C}$ である．

一方、レーザーダイオードの発振モードとして、活性層に平行な方向に分布をもつ横モードがあり、屈折率導波形ストライプ構造や利得制御形ストライプ構造により、横モード制御が行われている．この横モードが不安定になって多モード発振すると、電流-光出力特性に“キンク”と称する非直線性が現れたり、レーザー光の雑音が増加したりする．さらに、放射パターンが変化して、光ファイバーとの結合効率が悪くなる．したがって、現在では高次モード発振を抑え、基本横モード発振する埋め込み形、PCW、

TJS、CSP、V 溝等の構造をもつ各種レーザーが商品化されている⁷⁾．

レーザーダイオードの高速変調特性は、4 Gb/s を越す高速応答が可能であるが、過渡応答時にレーザーダイオード自身で本質的に発生する緩和振動とよぶ共振現象が現れ、波形ひずみとなる．さらに高速パルス変調時、立上り時間の遅れによりパルス幅が狭くなるというパターン効果が生ずる．

この波形ひずみを除去するため、閾値電流以上の直流バイアスをかけるが、オフ状態でも強い光が出るため、消光比が悪く、符号誤り率を劣化させる．また 100 MHz 位まで変調したとき、レーザーダイオードの 2 次高調波ひずみは -50 dB 、3 次高調波ひずみは -60 dB という値が得られている．しかし、レーザーダイオードの発振出力に含まれる雑音として、スポンテニアスな自然発光がランダムに起こるために生ずるショット雑音などがある．この雑音は、スレシホールド附近の C/N で 30 dB 以下と大きく、電流の大きい所では C/N 40 $\sim$ 50 dB が得られている．

さらに、レーザーダイオードの出力端に光ファイバー端面や光コネクタからの反射光が戻るとレーザーの縦モードが反射光で変動し、雑音が増加する．これを除去するため、光アイソレータを挿入し、反射による雑音を軽減することが行われている⁷⁾．

光ファイバーの最低損失を示す波長 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯を有効に活用するためには、材料分散の影響を受けない単一波長スペクトラム発振するレーザーが望ましい．通常の単一横モード形レーザーダイオードでは、縦モードがマルチモードであるため、高速変調時、発振スペクトラムが広がる．したがって、単一縦モード発振が可能な分布帰還形レーザーや分布ブラッグ反射形レーザーが有効である．これらは、レーザーの内部または両端に回折格子を設け、光の回折により光のフィードバック効果をもたらせてレーザー発振させるものである．

室温で、波長 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ の単一スペクトラム発振が可能な分布帰還形レーザーが開発され、発振波長の温度特性も $1\text{ \AA}/^\circ\text{C}$ と単色性の優れたレーザーダイオードが報告されている⁸⁾⁹⁾．また、長波長帯 ($1.2\sim1.6\text{ }\mu\text{m}$) の波長多重用光源として、1つのレーザーダイオードで2つの異なる波長を同時に発振させるレーザーダイオードが開発されている．これは InGaAsP の成分比を変えて、1つの基板上に $1.2\text{ }\mu\text{m}$ と $1.3\text{ }\mu\text{m}$ とを同時に発振させ、1本の発光ビームとしたものである¹⁰⁾．

さらに、1つの基板上に発光・受光素子と化合物半

図 3 レーザーダイオードの発振モード

図4 レーザーダイオードとFETの集積化

導体のFET素子とを形成した電気増幅回路とを一体化するモノリシック光ICが試作されている。一例として、図4にレーザーダイオードと駆動用FETとを集積化したモノリシック光ICを示す。レーザーとFETとが直列に配置されているため、電圧-電流特性にオフセットがあり、ゲート電圧は+2V~5Vで変調電圧がかけられ、立上り・立下り時間も0.4ns以下で、高速変調が可能である¹¹⁾。

一方、受光素子についても、GaAsフォトダイオードに結晶成長したチップ上にMESFETとをモノリシック化した光ICも開発されている¹²⁾。これは立上り時間が遅く、10 Mb/s程度のPCM伝送しかできない。同じような手法で結晶材料をInGaAsPに変えた長波長帯モノリシック光送受信器も検討されている。

次に、短波長帯のSi受光素子については、量子効率、応答速度、過剰雑音などの諸特性ならびに信頼度の点では充分満足すべきものが得られている。一方、長波長帯APDは、主にGe-APDが用いられているが、暗電流が大きいこと、過剰雑音指数が大きいなどの欠点がある。このため、3元系InGaAs-PINフォトダイオードを用い、前置増幅器として、高入力インピーダンスをもつMESFETをフォトダイオードに直結して、45 Mb/s以下でGe-APDと同等な最小受信入力力が得られる光受信回路が実用化されている¹³⁾。しかし、4元系混晶材料を用いたAPDが望ましいため、1~1.6 μm 帯で、暗電流が10 nA以下で、増倍率30以上、量子効率70%以上の良好な特性をもつ長波長帯APDが開発された¹⁴⁾。今後、実用化のための様々な改良を加える必要がある。

また、波長多重用受光素子として、1つのチップ上に異なる波長の光入力を別々に検出できる受光素子も検討されている。これは、InGaAsP/InPを多層エピキシャル成長させて、0.8 μm 、1.0 μm 、1.4 μm の分波感度特性をもつものが報告されているが、波長感度特性が互いにオーバーラップしたり、接合容量によるクロストークが大きいなどの欠点がある¹⁵⁾。

2.3 光回路部品

光回路部品は、少なくとも電気回路部品と同様な機能をもつ必要があり、発光・受光素子と光ファイバーとを結合する光コネクタを初めとして、光減衰器、光分岐・光分波光合波器、光アイソレータ、光サーキュレーター、光スイッチ、光変調など、各種の光回路部品が実用化されている。

光受動回路部品は、1ミクロンオーダーの精度をもつ精密機械加工部品と集束形ロッドレンズであるセルフォックレンズや、光ファイバー自身を加工し組合せた種々な形式のものが開発実用化されている。一方、光能動回路部品は、電気光学効果や磁気光学効果を有する誘電体光学結晶を利用するものと、化合物半導体自身に導波路を形成し、各種能動デバイスを構成するものがある。

まず、光ファイバー伝送システムを構成するうえで必要不可欠な光コネクタは、着脱が容易なこと、接続損失が小さいこと、信頼性が高いことが要求される。光コネクタの接続損失は、光ファイバーどうしの接続部で生ずる、①軸ずれ、②角度ずれ、③間隔ずれ、④ファイバー端面の粗さなどに起因する。

たとえば、コア径50 μm の集束形光ファイバーの接続損失を0.7 dB以下に保つためには、コアの軸合せ精度を5 μm 以下にする必要がある。このため、光コネクタを現場で組立てるとき細心の注意が必要であるが、各種治具が準備されており、誰でも現場組立ができるようになっている。

なお、単芯用光コネクタとして、精密金属形、プラスチック形、野外用レンズ組込形、光-電気複合形など、各種用途に応じたものが開発、実用化されている¹⁶⁾。いずれのタイプのコネクタでも、接続損失は1 dB以下の性能である。また光ファイバーの先端に強磁性体膜を蒸着し、光ファイバー間の磁気吸引力を利用した光コネクタも開発されており、光ファイバーどうしの軸合せ作業を簡易化しようという試みもある¹⁷⁾。

光ファイバーのスプライス接続も、熱融着により、マルチモードファイバー、シングルモードファイバーともに、スプライス損失が平均0.1 dBと低損失接続が現場で行われている。

次に光分岐の機能は、基本的には1本の光ファイバー中を伝搬する光信号を複数の光線路にふりわけるので、分岐比、分岐数に応じて多種多様なものが開発され、用途も多岐にわたっている。原理的には、①光路途中の一点で分岐合成するハーフミラー方式、②光ファイバー間の洩れ光を利用するテーパ形分岐方

式とに大別される．具体的には集束形ロッドレンズを用いたもの，光ファイバーを直接加工し金属膜を蒸着したもの，光ファイバーをテーパ状に加工したもの，マイクロ球レンズを用いたもの，高分子膜を用いた光導波路など各種光分岐がある¹⁸⁾．

これらの分岐の主な用途として，光送信出力のモニター監視，レーザーダイオードの送信2重化，1芯双方向伝送における送受分離，光データウェイにおける光分岐，挿入などがあり，重要な光デバイスのひとつに数えられる．

光ファイバーの多重度を増す有効な方法として波長多重方式があり，このキーデバイスとして，光分岐・光合波器がある．現在まで，この光分波器として報告されているものに，グレーティングを用いた回折格子形，誘電体薄膜を蒸着した多層膜干渉形，光学結晶の分散特性を用いたプリズム形，誘電体薄膜による光導波路構造のものなど各種形式がある．一例として，図5に長波長帯における20チャンネル光分波器の構成を示す¹⁹⁾．

回折格子は，シリコン基板を化学エッチングして，エシェレット形グレーティングを作成したもので，入射光と回折光の方向がグレーティングによる鋸歯面で反射した光を波長により回折光に強弱をつけて，光分波作用をもたせたものである．チャンネル間隔は27 nmで，クロストークも20 dB以上の急峻なフィルター特性が得られ，挿入損失も1.5 dBと小さい．

また，光ファイバー通信システムの調整や区間損失の等化用として，固定光減衰器と可変光減衰器とが実用化され，減衰器の精度も0.1～1 dB程度のものが得られている．

送信用光源の現用・予備切替，光伝送ルートの切替，光交換などの用途では，光スイッチが必要不可欠な光回路部品である．この光スイッチには，光ファイバーやプリズムなどの光学素子を機械的に移動して光パスを切替える形式と，誘電体結晶を用いた電気光学効果や音響光学効果を利用したものに大別される．機械的光スイッチは，切替速度がmsオーダーと遅いが，挿

図5 光分波器（回折格子形）

図6 光マトリックススイッチ

入損失が1 dB以下で，クロストークは50 dBのデータが得られている．

一方，電気光学効果を利用した光スイッチとして，LiNbO₃光学結晶を薄膜導波路とした電氣的駆動光スイッチがある．これは誘電体薄膜化された光方向性結合器の導波路を相互に接近させ，光が結合する状態と結合しない状態とを作って，光のスイッチを行うものである．駆動電圧が50 V，挿入損失が7 dB，応答速度が数 ns と速いスイッチ特性が得られているが，クロストークが10 dBと悪い²⁰⁾．しかし，チャンネル間アイソレーションが大きいマトリックススイッチも開発されており，光検出器のバイアス電圧をオン・オフすることにより光パスを切替えるものもある．

一例として図6に光マトリックススイッチの構成例を示す．この方法により，APDのバイアス電流を切替えるだけで4 GHzまでの信号をスイッチすることができ，50 dB以上のアイソレーションが得られ，かつスイッチ速度も20 ns以下の高速スイッチ特性が得られている²¹⁾．

反射によるレーザーダイオードの雑音増加や発振不安定性を抑制するため，非相反回路素子である常磁性ガラス（0.8 μm帯用）やYIG結晶（1.3 μm帯用）によるファラデー回転素子を用いた光アイソレーターが商品化されている．この光アイソレーターの特性として，挿入損失0.5 dB，アイソレーション20 dB以上の性能が得られている²²⁾．同様にYIG結晶のファラデー回転素子を用いた光サーキュレーターも試作されており，通過損失が1.6 dB，光アイソレーション16 dB以上の特性が得られている²³⁾．今後，YIG結晶の強磁性薄膜を用いた導波路形式の光アイソレーターも開発されつつあり，小形・高性能光アイソレーターの出現により，よりいっそう用途の拡大も行われるであ

ろう。

3. 放送用光通信システム

放送分野における光通信の導入は、従来方式にはない多くの利点を有しているが、表1に示すように、伝送すべき信号の種類が多いことと、使用場所や使用形

表1 放送用光通信システムの適用領域と特徴

項	適用分野	局 間	局 内	現場中継
伝送信号	ベースバンド	○	○	○
	VSΒ-IF	○		
	FM-IF			○
	VHF-TV	○		
	多chオーディオ	○	○	○
項	使用形態	固 定	固 定	臨時移動
光ファイバー使用の利点	低 損 失 性	○		○
	広 帯 域 性	○		
	耐 雷 性	○		○
	無 誘 導 性	○	○	○
	細 芯 性	○	○	○
	軽 量 性			○

態が多様化している。

信号の種類は、主に音声信号またはビデオ信号があり、伝送帯域もベースバンド帯だけでなく、IF帯からVHF帯まで広い範囲に及んでいる。また、その使用形態も固定回線だけでなく、現場中継のように、臨時回線で、かつ移動用まで含んでいる。このように広範多岐にわたる適用領域に適した放送用光通信システムがすでに数多く導入、実用化されている²⁴⁾。

3.1 ベースバンドビデオ信号伝送

ベースバンドの映像を光ファイバー伝送する方式として、①伝送すべき信号によって光の強度を直接強度変調する直接IM方式、②伝送信号をパルス列に変換し、このパルス列で光強度変調する方式などがある。

①の方法は、発光源の電流-光出力特性の直線性が問題となりレーザーダイオードよりも発光ダイオードが光源として多く用いられる。比較的直線性の良いLEDの場合でも、各種ひずみ補償方式を採用する必要がある。簡単な構成であるプリディストーション法が広く用いられる。このプリディストーション回路は、PN接合の順方向特性あるいはFETのゲート電圧-ドレイン電流特性のわん曲部を利用して、LEDの2次ひずみを補償するものである。

一方、ビデオ信号をパルス化する方法として、一般にPCM方式があるが、光ファイバーの広帯域性を有効に活用し、かつ回路構成が簡易なパルス間隔変調(PIM)方式²⁵⁾やパルス化FM変調(PFM)方式²⁶⁾な

どがある。これらは通常LDの非直線性が温度によって大きく変化するため、ビデオ信号をパルス化して長距離光ファイバー伝送するものである。

ベースバンド信号伝送用光通信装置として、光源にLEDを用いたとき、光ファイバーとの結合効率を高める必要があり、コア径80 μm ないし100 μm の大口径光ファイバーがよく用いられる。また、長波長帯LEDは原理的に非直線性が極端に悪いので、アナログ直接変調は好ましくない。

一例として、1.3 μm 帯LDを使用して単一モード光ファイバーで伝送すると、PIM-IM方式では、約30kmの無中継伝送が可能となる。一方、PFM-IM方式では、0.8 μm 帯LDを用いるとLDのモード分配雑音によりS/Nが劣化し、S/Nを52dB以上良くすることができない。また、1.3 μm 帯単一モードレーザーを用いて、マルチモードファイバー伝送すると、レーザーのコヒーレンシーが良いため、モダグノイズが発生し、長距離伝送ができない。

音声信号を映像信号と同時に伝送する方法には、波長多重方式、多芯光ケーブルによる個別伝送、主信号への重畳伝送方式などがあるが、現状では、音声副搬送波を映像信号帯域外に挿入したり、音声信号をパルス化して、映像パルス信号とパルス非同期多重化する方法が広く用いられている。局内・局間伝送用光通信装置は、放送用標準19インチラックにマウントされ、光入出力インターフェイスは、バックプラグイン形の光コネクタが用いられている。

現場中継用光通信装置は、小形で耐環境特性の優れたユニット形式で、防水・防塵構造の現場光コネクタが使用されている。また、従来のカメラケーブルに比較して光ケーブルを軽量化し、かつ伝送距離を3~4kmまで長くできるカメラ組込形光通信装置が実用化されており、その外観を写真2に示す。この光送受信器は、HIC化により小形化され、ハンディーカメラの側板に実装されている。最近、1チップ化されたA/Dコンバーターが実現され、8ビット程度の量

写真2 ハンディーカメラ組込形光通信装置

子化精度が得られている²⁷⁾。このように PCM 化されたビデオ信号を、長波長帯光源を用いることにより、50 km 以上の長距離無中継が可能である。

3.2 高品位 TV 伝送

従来の 4 MHz 帯域のテレビ方式よりも、高精細、高品質かつ大画面化を図った忠実度の高い高品位テレビ方式が検討されており、走査線数 1125 本、信号帯域幅 30 MHz のものが開発されている。このような広帯域テレビ信号を PCM 符号化すると、ビットレートは約 900 Mb/s と高速のデジタル信号になる。このため、光ファイバーで長距離伝送するには、レーザーダイオードを用いてアナログ直接変調する方法が装置構成が簡単で、経済的である。しかし、レーザーダイオードとマルチモードファイバーを用いた伝送系では、前節で述べたように、レーザー光の可干渉性によって生ずるスペックル雑音（モダルノイズ）のために伝送特性が著しく劣化する。さらに光ファイバー端面からの反射光によってレーザーダイオードの雑音が増加し、SN 比を 40 dB 以上高くとることができない。したがって、レーザーダイオードのアナログ直接変調方式では、温度特性を考慮した非直線ひずみ補償法の採用と、スペックル雑音が避けられる単一モードファイバーを用いる必要がある。

3.3 波長多重伝送

波長多重伝送システムは、光ファイバーの広帯域波長特性を利用して、波長の異なる複数の光を 1 本の光ファイバーを用いて伝送するもので、それぞれの波長をもつ光には独立な信号が伝送可能で、使用波長数倍の多重度が得られる。また、この波長多重伝送技術を用いて 1 本の光ファイバーで双方向伝送が可能とな

り、さらに将来、システム容量を増加する場合、光ファイバーを再度布設する必要がなく、容易に回線容量の拡張を行うことができる。一例として、図 7 に LED を光源に用いて 0.8 μm 帯の 2 波長多重化によって難視対策用サテライト局の送受分離用として、VSB-AM 変調された IF 帯のテレビ信号を 2 ch 片方向伝送している実用例を示す。これは、2 つの中心波長差が約 70 nm の LED を用いて光分波したとき、電気信号で 100~120 dB の ch 間アイソレーションが得られ、総合 ch 間クロストークも -60~-80 dB と良好な特性が実現されている²⁸⁾。

また、新交通における駅ホームの無人監視用として、CCTV の信号を 0.8 μm 帯の LED 4 波を用いて波長多重伝送する実験例もある。このとき、ch 間クロストークは 50 dB 以上とれている²⁹⁾。このような波長多重伝送方式では、最大伝送距離は S/N よりむしろ光分波器の挿入損失と隣接チャンネル間の分離度に支配され、ch 間クロストークで決定される。なお、この波長多重伝送技術を利用して、1 芯双方向伝送が可能であり、上り回線に映像および音声信号、下り回線でモニター用ビデオ信号とカメラ制御信号とを伝送できるシステムが実用に供せられている。

3.4 IF 伝送

光ファイバーによる IF 帯信号の伝送は、放送用サテライト局で用いられる VSB-AM 変調された IF 帯 (19 MHz) 信号やマイクロ波 FPU 装置に用いられている FM 変調された 130 MHz 帯 IF 信号を伝送するものである。VSB-AM 変調された IF 信号伝送では、ビデオ搬送波 f_0 、カラー副搬送波 $f_0+3.58\text{MHz}$ 、音声副搬送波 $f_0+4.5\text{MHz}$ などの 3 周波による 3 次ビ

ート雑音を小さくする必要がある。このため、発光源の非直線ひずみを IF 帯 (16.5~22.5 MHz) で充分なひずみ補償を行う必要があり、普通、光源として非直線ひずみが小さい通信用 LED が用いられる。

一方、FM 変調された 130 MHz 帯信号を光ファイバー伝送するには、LED の周波数特性がせいぜい 100 MHz と悪いため、主に LD が用いられる。光源に LD を用いたとき、光出力端における反射を充分小さくする必要があり、このため光アイソレーターを挿入して LD の過剰雑音を軽減し、C/N を改善して IF 伝送している³⁰⁾。

図 7 IF 帯テレビ信号 2 波長多重システム

しかし、光ファイバー自身による後方散乱光特性により C/N を約 65 dB 以上高くとれない。このため 140 MHz 帯 IF 信号を光伝送したとき、 C/N 45 dB (雑音帯域 10 MHz) 以上を確保できる伝送距離として 5 km 以上の特性が得られ、光ファイバーによる IF 信号伝送が実用化されている。

3.5 VHF-TV 伝送

VSF-AM 変調された VHF 帯テレビ放送波を LD で直接強度変調して光ファイバー伝送する方式がある³¹⁾³²⁾。周波数レスポンスの点から発光源に LD を使用しているが、十分な非直線ひずみの補償ができないため、多重度に応じて LD の変調度を下げて使用している。

一例として図 8 に VHF 帯テレビ放送波を 7 ch 同時伝送するときの構成を示す。特に光ファイバー端面などからの反射光による動作不安定性にもとづく雑音増加を抑制するため、小形の光アイソレーターを用いたり、LD の発振閾値電流が周囲温度とともに変化して最適動作点からずれることにより非直線ひずみが増大したり、雑音が増加しないように、ペルチエ素子によって LD の周囲温度を一定にする自動制御回路を採用している。

さらに、入力 VHF 信号のレベル変動によって LD への過変調あるいは、逆に変調度低下による受信 C/N の劣化を防ぐために、パイロット信号を用いた AGC 回路を設ける必要がある。また、LD の出力変動を安定化する APC 回路などを採用している。

また、前章で述べたように、光ファイバーのモードルノイズの影響をさけるため、シングルモードファイバーを用いる必要がある。これにより VHF テレビ信号 7 波を同時に光ファイバー伝送したとき、 C/N (雑

音帯域 6 MHz) 42 dB 以上を確保する伝送距離は、2 km 以上である。

4. 放送用光通信の適用

放送機器への光通信の応用は、早くから光ファイバーの広帯域性と耐干渉雑音特性に着目して検討されてきたが、主に放送局内、局間用光伝送システム、野中外継用光伝送システムなどの広帯域映像信号、音声信号、制御信号を高品質に伝送する用途に用いられてきた。図 9 に、国内において光通信による映像信号伝送の導入件数を示すが、道路・交通の監視システムや防犯・防災 ITV 監視が多く、CATV への導入件数は非常に少ない。このうち代表的な放送分野への適用例から、その導入理由を抽出すると以下の点があげられる。

① 光通信の導入により、大地電位差、中波放送のかぶりなどによる干渉妨害は皆無であり、かつ雷害対策も全く不要である。また、放送局自家用電力設備の近傍、あるいは各種信号・制御信号ケーブルが輻輳するダクト内に光ケーブルを布設しても全く干渉の影響がない。

② 伝送距離を延長しても、光ファイバーの帯域が広いので周波数特性の劣化はなく、周波数レスポンスの等化が不要である。

③ ケーブル外径の細い多芯光ケーブルが使用でき、ダクトや管路を占有する容積が小さい。さらに、ケーブル重量が軽く、布設工事が容易であり、架空布設のとき、電柱共架の負担が軽減される。

国内外における放送用光通信の具体例³³⁾として、放送局の別々の建物であるマスタールームと VTR 室との間を光伝送するもの、難視解消のためのサテライト局における雷害対策用光伝送システム、ゴルフ、マラソン、競馬などスポーツ実況中継に用いる野外用光通

図 8 VHF テレビ伝送のブロック図

図 9 我国における光通信による映像サービス

信, CATV 施設の幹線伝送路などに光ケーブルを採用した例が多い。

一方、電電公社通研では、横須賀地区において一般加入者を対象とした画像サービス (4 MHz テレビ, 高品位テレビ, VHF テレビ) の実験を開始している³⁴⁾。これは横須賀統制電話中継所と横須賀通研間約 8.5 km で、将来、事業所などの大口加入者への適用を考えた広帯域光加入者システムの導入を狙っている。

同様な光加入者回線への実験回線として、東生駒における Hiovis やベルカナダの Yorkville 地区でのテレビ伝送システムや、米国の Lompoc 地区における CATV システムや、西独ベルリンにおけるテレビ再送信実験やオランダの Arnheim における CATV 実験など、各国で精力的に開発、実用化が進められている。

今後、電々公社における電話、データ、ファクシミリ、映像などのサービスを統合した INS 網、カナダのサスカチュワン州における総延長 3500 km におよぶ光加入者線網、フランスのビアリッツにおけるビデオホンサービス、西ドイツにおけるビッグホン計画など、光通信による映像サービスを構築しようとしている国々が多い。今後の発展が期待される。

5. む す び

放送分野での光通信の適用は、短距離のアナログ伝送が主体であるが、LSI 化された 1 チップ A/D コンバーターの出現やスタジオ機器のデジタル化の進展につれてデジタル伝送用光通信システムの導入が増大するであろう。さらに、長波長帯発光・受光素子の実用化と量産化とが相まって、単一モードファイバーが低価格化されることなどにより、今後 CATV 分野における VHF 多重信号を長距離伝送できるようになるであろう。また、モノリシック光 IC や光スイッチ、光分岐の開発が急テンポで行われており、近い将来、スタジオ内部の各種機器に光デバイスがビルトインされる日はそう遠くない。今後、光通信の放送分野への適用形態が広範多岐にわたり、放送機器のデジタル化と光化とが車の両輪のように研究開発が進んでゆくであろう。

(昭和 57 年 3 月 25 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 特集 光通信, テレビ誌, **32**, 4 (1978)
- 2) 光伝送技術特集, 信学誌, **63**, 11 (1980)
- 3) 特集: 放送機器への光ファイバー通信の応用, 放送技術, **31**, 5 (1978) 59-92
- 4) R.E. Epworth: Modal Noise-Causes and Cures, Laser

- Focus, Sept. (1981) 109-115
- 5) 松村ほか: 光ファイバの偏光特性, 応用物理, **50**, 11 (1981) 1221-1224
- 6) 浜口ほか: 1 μm 帯高出力, 高速応答 LED, 信学技報, OQE 81, 231 (1982) 29
- 7) 南日, 米津: 半導体レーザ, 分光研究, **29**, 5 (1980) 341
- 8) T. Matsuoka, et al: CW Operation of DFB-BH GaInAsP/InP Lasers in 1.5 μm Wavelength Region, Electronics Letters, **18**, 1 (1982) 27
- 9) S. Akiba, et al: Low Threshold Current Distributed Feedback InGaAsP/InP CW Lasers, ibid, **18**, 2 (1982) 77
- 10) S. Sakai, et al: InGaAsP/InP Dual Wavelength Lasers, ibid, **18**, 1 (1982) 17
- 11) T. Fukuzawa, et al: Monolithic integration of a GaAlAs injection laser with a Schottky gate field effect transistor, Appl. Phys. Lett., **36** (1980) 181
- 12) A.C. Carter, et al: Monolithic integration of optoelectronics electronic and passive components in GaAlAs/GaAs multilayers, Electronics Letters, **18**, 2 (1982) 72
- 13) 首藤ほか: 1.3 μm /1.55 μm 帯受光回路の設計と特性, 昭 56 信学総合全大 (1981) 2239
- 14) 須佐ほか: 気相成長 InP/InGaAs-APD の製作, 昭 56 信学半導体材料部門全大 (1981) 386
- 15) 酒井ほか: 波長分波機能を有する InGaAsP/InP 光検出器, 信学会電子デバイス研資 ED 79-69 (1979)
- 16) 小山ほか: 高精度光ファイバコネクタの開発および実用化, 精密機械, **47**, 3 (1981) 368
- 17) 長岡ほか: 磁性体クラッド光ファイバとその光部品への応用, 信学技報 CS 81, 122 (1981)
- 18) 杉元ほか: マイクロオプティックス (微小光学デバイス), 信学誌, **16**, 10 (1978) 1114-1121
- 19) 関ほか: マイクロオプティックス多 CH 回折格子型光分波回路, 昭 56 信学総合全大 (1981) 829
- 20) 佐脇ほか: Ti 拡散 LiNbO₃ 交叉型導波路を用いた光スイッチ, 同上 (1981) 994
- 21) R.I. Macdonald, E.H. Hara: Optoelectronics switching matrices break GHz barriers, Microwave-Optics, **11** (1981) 97-104
- 22) 関ほか: 1.5 μm 帯同軸構造形 LD-アイソレータ光マイクロモジュール, 昭 55 信学光電波部門全大 (1980) 281
- 23) 白崎ほか: 偏光依存性のない小型光サーキュレータ, 信学技報, OQE 79, 100 (1979)
- 24) 梶谷ほか: 放送用光ファイバ通信装置, テレビ学技報, **4**, 25 (1980) IT 45-10
- 25) 上野, 安木: パルス間隔変調による半導体レーザ通信方式, 信学誌, **59-C**, 4 (1976) 193
- 26) 米田ほか: PFM 変調による光ファイバ TV 信号伝送の検討, 信学技報, CS 77, 153 (1977)
- 27) T. Sekino, et al: 1982 IEEE ISSCC, WAM 3.6 (1982)
- 28) 梅地ほか: TV 中継所雷害対策システム, 電子技術, **21**, 1 (1979) 48
- 29) 梶野ほか: 光波長多重 CCTV 監視システム, 信学技報, CS 80, 72 (1980)
- 30) 鯨島ほか: IF 帯光通信方式の一検討, 同上, CS 78, 43 (1981)
- 31) 滝沢ほか: マルチモードファイバを用いた VHF テレビチャンネル多重伝送, 同上, CS 81, 81 (1981)
- 32) 佐藤ほか: 高品位 TV 及び VHF 帯 TV 信号の架空光ケーブル伝送実験, 同上, CS 81, 110 (1981)
- 33) 塩野ほか: 光画像伝送システム, NEC 技報, **34**, 6 (1981) 30
- 34) 浅谷ほか: 横須賀地区光加入者系システムの構成と特性, 信学技報, CS 81, 62 (1981)