

第 501 回 讲习会

机械工学における光应用技术

昭和 55 年 5 月 15-16 日



目 次

1. 光通信システムの現状と将来	1
東京電機大学教授 電気通信工学科 工博 荒谷 孝 夫 (元電々公社横須賀通研)	
2. 光応用計測制御システムの現状と将来	21
工業技術院 電子技術総合研究所 工博 柏 木 寛 企画室長	
3. レーザ・マシーニングの現状と将来	27
日本電気会社 レーザ装置開発本部 吉 川 省 吾 装置開発部長	
4. 計測制御への光応用	39
産業技術総合研究所 主任研究員 工博 斎 藤 弘 義 (元電々公社横須賀通研)	
5. 航空機のコンピュータ化技術の動向	53
東京大学助教授 工学部 工博 田 辺 徹	
6. レーザによる微細欠陥および微小粒子検出技術の動向	69
日立製作所 中央研究所第4部 工博 高 見 勝 己	
7. レーザによる電気鉄道用トロリ線の検測	83
住友電気工業会社 坂 口 勉 (元日本国有鉄道 鉄道技術研究所)	

1 光通信システムの現状と将来

東京電機大学(元電々公社横須賀通研) 荒谷 孝天

1 まえがき

光ファイバが出現したのは10年前であるが、半導体レーザと共にその後の技術の進展は著しく、最近の新技术の中で完全に主役の座を占めた感がある。それだけ光ファイバは数多くの素晴らしい特長をもっており、今後通信のあらゆる分野で従来の媒体である銅線に置換えられることは間違いなく、かつそれ以外の応用面で活躍することも確実でその期待は大きい。光を通信に使うことは古くは“のろし”が挙げられるが、近代では1960年のレーザの発明以後盛に研究されるようになった。最初は空間の伝搬が研究の対象となったが気象条件の影響を受け易く、損失とその変動の大きいことが問題となり、その後行なわれたレンズによるビームガイド方式も制御が困難で挫折した。1970年のアメリカのコーニンググラス社による低損失グラスファイバの試作成功は、 20 dB/km といえ当時としては画期的であり、以後のファイバ研究の導火線となった。また同年に扱い易い半導体レーザの連続発振が可能となり光通信のための基礎技術が揃った。以後はめまぐるしい進展があり、ファイバの超低損失化、広帯域化、経済化、半導体レーザの高性能化、高信頼化およびコネクタ等関連部品、伝送技術の進歩によりシステム実用化可能レベルに達し、1978年に電々公社により東京で、世界最大規模、最高レベルの現場試験が行なわれた。かくて1980年代は本格的実用の時代となり、公衆通信のみならず、光通信システムおよびその応用技術は多様な形で実用に供されることとなってきている。

本文では光ファイバを用いた光伝送技術に主体を置き、専門家でないオマに理解できるように平易な内容で技術の現状と将来を述べる。

2 光ファイバ伝送の特長

一般に光を伝送手段として用いる場合には、波長はおよそ $0.6 \sim 1.5 \mu\text{m}$ の可視から近赤外線領域を対象にすることが多い。周波数では数百THz からおよそ1PHz という非常に高い周波数領域である。(表1)

この領域はミリ波と較べて3~4桁以上も周波数が高く、このような広大な領域を無駄なく使いこなすことができれば超大容量の情報伝送が可能である。例えば、40~80 GHzを使うミリ波伝送では音声で30万チャンネル、カラーTVで300チャンネルが伝送可能であるので、光の伝送容量は抜群であることが分る。しかしそのためには単一周波数で十分安定な光を発振できる光源、分波器、光周波数変換器などが必要となる。ところが実際には光の周波数帯では部品技術が十分進んでいないし、またこのような超大容量の需要も今のところ顕在化していないので、超大容量通信は当分先の話となっている。現在のところ、光源の発振周波数は単一でなく、ある程度の幅をもっており、単に発光源(レーザ)の光量(強度)を変化させることにより情報伝送を行っているのが現状であり、またそれで後述するように従来の

伝送方式に比べ抜群の特長を有しており、十分の能力があるのである。

表1. 電磁波の種類と用途

周波数 [Hz]	波 長	呼 称	用 途
10^{18} (1 E)	10^{-9} (1 nm)	X 線	
		紫 外 線	
10^{15} (1 P)	10^{-6} (1 μ m)	可 視 光 線	
		近 赤 外 線	光 通 信
10^{12} (1 T)	10^{-3} (1 mm)	遠 赤 外 線	
		ミリメ ートル波	ミリ波通信
10^9 (1 G)	10^0 (1 m)	(SHF) } (UHF) } (VHF) } (HF) } (MF) } (LF) } (VLF) } (ELF) }	マイクロ波通信 移動無線 テレビ放送 ラジオ放送 電波航法
10^6 (1 M)	10^3 (1 km)		
10^3 (1 K)	10^6		

光伝送方式の基本構成は図1に示すとおりであるが、従来の伝送方式との基本的な差異は、伝送すべき情報を従来の方式では単に伝送し易い電気信号に変換して送っていたのに対して、光では電気信号を更にファイバの前で光信号に変換してやる装置が付加されたに過ぎない。(受信側は送信側の逆の操作) ファイバケーブルを伝送する光信号は当然ある程度の距離で損失により弱まるので、途中に中継器が必要となるが中継器の構成は従来の中継器の入力と出力の両側にそれぞれ光→電気、電気→光の信号変換器を付加したものとなる。電気信号と光信号の相互の間の変換素子は半導体レーザあるいは発光ダイオードを使う発光素子と、フォトダイオードよりなる受光素子である。両者共駆動電流の変化に応じて光出力を変化する直接変調、およびその逆が可能である。その他の構成部品としてはファイバと装置間およびファイバ間接続するコネクタ、光の分岐、結合のため分波器、合波器などがある。

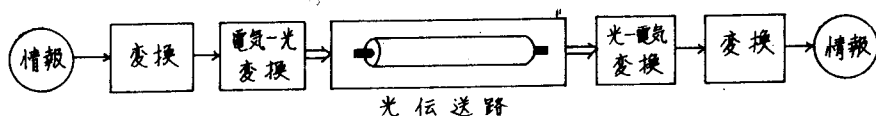


図1 光伝送方式の基本構成

光伝送方式の特長は光ファイバの特長に起因しており、光ファイバの特長を列記すると次のようになる。

- (1) 低損失 (2) 広帯域 (3) 細径 (4) 軽量 (5) 可撓性 (6) 無漏話
(7) 無誘導 (8) 省資源

このような数多くの特長を有し、かつこれを従来の銅の媒体(対線、同軸)と比較すると以下に述べるようにそれぞれが極めて優れた内容をもっている。

低損失 銅にせよファイバにせよ媒体の損失は周波数によって異なるので使用周波数を決めないとい概に比較し難いが、光ファイバの使用周波数帯では現在の $0.5 \sim 3 \text{ dB/km}$ 程度であり銅の媒体に比し桁違いに低い。損失の違いは中継間隔の違いとなって方式の有利性が明確となる。例を現用の公衆通信の伝送方式にとれば一層明白となる。すなわち C-60M 方式(アナログ変調、約 10,000 チャネル)および DC-400M 方式(デジタル変調、約 5,800 チャネル)の両方式は標準同軸ケーブル($2.6/9.5 \text{ mm}$)を用いて中継間隔は 1.5 Km であるが、これを光ファイバを使って実現すれば約 10 Km 程度となり飛躍的に増大する。これは現在中継器のマシホール設置を電話局等の局舎設置に切替える可能性につながり、建設、保守、経済性等への利点は大きい。長波長帯を使えば更に伸ばせる可能性もありメリットは大きい。

広帯域 周波数帯域を広く使えることは伝送できる情報量の増加を意味する。1本のファイバの中で光の波長をずらして重ねて伝送する波長多重伝送技術もほぼ確立しており、更に細径であることを利用し空間的に多芯にしてやればより多くの情報を送ることができる。厳密に言えば同一断面積で伝送できる情報量で比較することが適切であろうが、ここでは簡単に従来方式と比較してみる。現在伝送可能な各方式の最大電話チャネル数は、平衡ケーブルで約 1400/対、同軸ケーブルで約 11,000/対、マイクロ無線で 5800/無線チャネル、ミリ波導波管で 300,000/チューブとなっており、光では現在の技術で既に約 46,000/対であり、同一断面積に換算すればミリ波より一桁以上上回ることは確実である。

細径 髪の毛ほどよくいわれるようにファイバ素線の直径は現在 0.125 mm が標準となっており大変細い。これにプラスチック等の被覆を施しても 1 mm 以下である。このように細いことは後述の重量と可撓性に有利性をもたらし、かつ従来媒体と同一断面積で比較すると収容できる心線数は非常に大きなものとなる。例えば標準同軸ケーブルとの比較では約 26 倍、市内多対平衡ケーブルでも 3~5 倍となる。

軽量 ファイバの原料となっている石英の比重は銅の約 $1/4$ であり、かつ細径であることから従来のものに比べ軽量で、1m の当りの光ケーブルの 1 心当りの重量を標準同軸ケーブル、市内多対平衡ケーブルと比較すると、それぞれ約 $1/73$ 、 $1/8$ となり非常に軽い。これは輸送面で有利となり、また輸送機械への応用につながる。

可撓性 細径、軽量から可撓性もすぐれたものとなり、建設時の地下施設への布設工事が容易になる等のメリットが大きい。

無漏話 これまで多対平衡ケーブルの場合、対間の静電的、電磁的結合による漏話が方式設計上の重大な制約事項となっていたが、光ファイバケーブルではこれ

が無視できるので、多心化が容易で、方式設計も楽になる意義が大きい。

無誘導 雷電流や送電線を流れる高圧大電流からの誘導の問題がなくなるので、従来方式の障害の大きな原因が除かれることになる。電力会社ではこの特長に着目し電力施設の保守監視、制御に光ファイバを使う試みを盛に行なっている。

省資源 従来の銅は産地が限定されているが、光ファイバの主成分である石英(SiO_2)の原料は地球上に無尽蔵に存在するため資源問題が少ない。また40gの石英母材から約1kmの光ファイバの製造が可能であり、少量の原料ですむ利点も見逃せない。

3 光ファイバとケーブル

光ファイバは図に示すように2つの異なったガラスで作られている。1つは中心部を構成するコア、他の1つは周辺部を構成するクラッドと呼ばれる部分であり、コアの屈折率(n_1)がクラッドの屈折率(n_2)より少し大きく設計されている点が重要である。

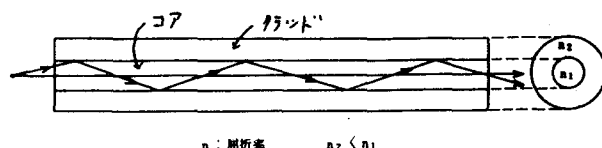


図2 光ファイバの構造と光の伝はん

ファイバの寸法は現在外径が $125\mu\text{m}$ 、コア直径 $50\mu\text{m}$ が標準的である。光にとってはコアとクラッドの境界における屈折率の差が壁の役目を果しており、光はこの境界で全反射を繰返しながらかコア内を進む。光ファイバはゆるやかに曲っていても光の上記境界面に当る角度が臨界角 $\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ より大きければ透過することなく全ての光が反射しファイバに沿って進むことになる。コア内には一般にいくつかの光の伝送モードがあり、このようなファイバをマルチモードファイバと呼ぶ。しかしコア径を数 μm 以下にすると基本モードしか伝送されなくなるが、このようなファイバをシングルモードファイバと呼んでいる。マルチモードファイバは更に屈折率分布の形により2種類に分れ、断面の屈折率が直径方向に向って階段状に変化しているものをステップ型、徐々に変化してゆくものをグレーデッド型と呼んでいる。以上述べた代表的なファイバ構造の種類と光伝はんの模様を図3に示す。ステップ型ファイバでは各光線の経路長が異なることからモード間に遅延時間差が生じ波形が広がる。つまり周波数帯域に換算すれば帯域は比較的狭い。これに対してグレーデッド型ファイバでは軸から遠回りをする光線は主に屈折率の小さい部分を通るため速く進み、屈折率が完全な2乗分布に従って変化する場合、各光線は周期的に集束され、集束点では同時に到達する。したがって波形のひろがりは少なくなり、帯域はステップ型より広い。シングルモードファイバは1つのモードだけを伝はんするので帯域は最も広い。しかしシングルモードファイバではコアが非

常に細いので光源から光を入れること、ファイバ間の永続接続、コネクタが難しくなる問題があり、現時点では取扱い易いマルチモード型のファイバが広く使われている。

光ファイバの材料は石英を主成分としてこれに屈折率を変化させるため添加物(ドーパント)を入れたもの、および多成分がラス系が主な研究対象となっている。その他、石英をコアとして、これにプラスチックを被せクラッドとする光ファイバや、コア、クラッド共にプラスチックからなるプラスチックファイバがある。それぞれの光ファイバが今後得意の領域を開拓して特長を発揮することになると思われるが、通信の場合には石英ファイバが有利であると考えられている。

光ファイバの損失は吸収損失と散乱損失に大別される。吸収損失はガラス中に含まれている不純物により光が吸収されることに基づくもので、このため高純度の石英が必要で、とくにファイバの製造過程で混入する水分(OH基)の除去が重要である。OH基による基本吸収は $2.7\mu\text{m}$ の波長で生じ、 $1.38\mu\text{m}$ 、 $0.94\mu\text{m}$ では $\times 2$ 、 $\times 3$ の高調波吸収がある。 $1\text{ppm}(10^{-6})$ の量でピーク損失は $1.38\mu\text{m}$ で $60\text{dB}/\text{km}$ 、 $0.94\mu\text{m}$ で $1.25\text{dB}/\text{km}$ にも達する。極低損失

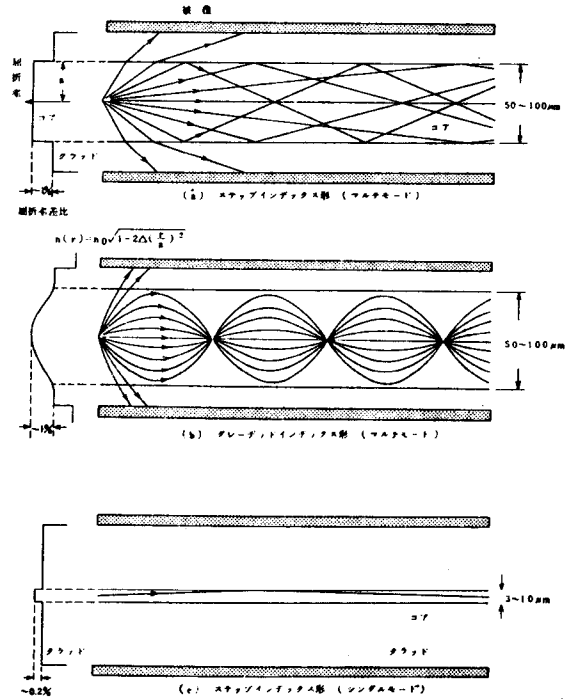


図3 代表的なファイバ構造の種類と光伝搬の様子

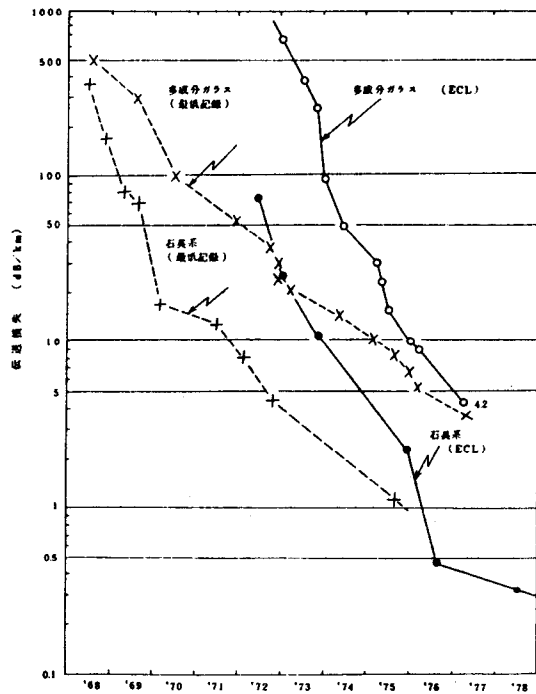


図4 光ファイバ低損失化の経過

ファイバでは数十 PPb (1 ppb は 10^{-9}) 以下に抑えられている。OH 基除去の研究により損失は 1970 年頃から急速に下ってきた。図 4 は電々公社通研 (ECL) における研究成果を示しており、1979 年春には待望は 0.2 dB/Km という理論的限界に到達している。

散乱損失は波長の 4 乗に逆比例するレーリ散乱による損失が主でその他に構造の不完全性による散乱損失もある。

損失の波長特性を図 5 に示す。長波長側にはガラス材固有の赤外吸収があり、損失の谷は波長 $1.1 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の間にくる。光ファイバの伝送では発光素子、受光素子の技術的問題もあり $0.8 \sim 1.7 \mu\text{m}$ の波長域が使われ、とくに光素子技術で容易な短波長帯の $0.85 \mu\text{m}$ が当面の実用化に向いている。

以上は石英系ファイバの場合であるが、前に述べたように他の多成分系、プラスチック系のもの等各種のファイバが考えられる。これらの損失と帯域幅の現状を図 6 に示す。特性は石英系、多成分系、高分子系の順で優れているが、製造のコストはその逆の順となっており、用途に応じて選択することとなる。通信用には特性のよい石英系が主体となるが、量産向きの製造法が後述するように進められており、使用量の増大と相まって低価格化が急速に進展し、従来媒体と同程度の価格となるのは時間の問題と見られている。

光ファイバがかくも発展することとなった理由は、数多くの特長を有していることは勿論であるが、とくに最近著しい低損失化に負うところが大きく、何度も繰返すだけの価値がある。すなわちガラス内の不純物を除き、透明度を上げることであるが、分り易く身近な例で比較すると、光の強さが半分になる距離は普通の窓ガラスで厚さ約 4 cm 、良質の光学ガラスで数 m であるのに対し光ファイバは約 10 km (トップデータでは 15 km) である。これから光ファイバの透明度が驚くべき良さをもっていることが容易に理解できよう。光の直進性からファイバの曲げによる損失増加が懸念される問題であるが、これも通常のものでは曲げ半径 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 以上なら何等損失増加がないので取扱い上もそれ程問題とはならない。

光ファイバの機械的強度については、その抗長強度が元来銅よりはるかに強く、

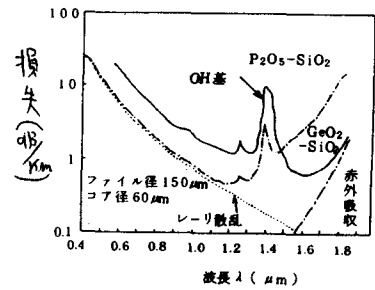


図 5 低損失ファイバの損失-波長特性

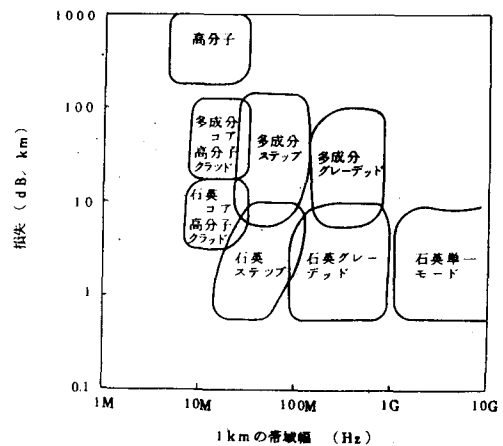


図 6 ファイバの種類と特性

鋼と同程度以上である。しかし石英の破壊は塑性変形を伴わない脆性破壊であり、表面にわずかでも傷があるとそこから破断し易い。そのため光ファイバの引張強度は、ファイバ表面の欠陥により決定されている。ガラス表面のきずがでできないようにするため、紡糸直後の光ファイバにウレタン樹脂などのプラスチックを、5 μ m程度の薄さに被覆する。最近の報告ではその引張り強度は約10kgといわれており非常に強くなっている。

次に光ファイバの製造法を簡単に説明する。石英系ファイバの代表的な製造法として内付け法、外付け法、軸付け法の3つがあり、これらの方法についての概念図

を図7に示す。

内付け法 石英円管がガラス施盤に保持回転され、管内に酸素などをキャリアガスとして主原料の四塩化硅素(SiCl_4)と屈折率を制御するための原料(POCl_3 , GeCl_4 など)を導き外から加熱することにより原料同志を化学反応させ微粒子状のガラスの石英(SiO_2)と添加酸化物(P_2O_5 , GeO_2 など)を生成させ、管内に多孔性のすゝを堆積させる(CVD技術)。これを加熱熔融して透明ガラス化する。石英管を回転させると同時にバーナーを移動させて反応を進める。これを繰返した後高温

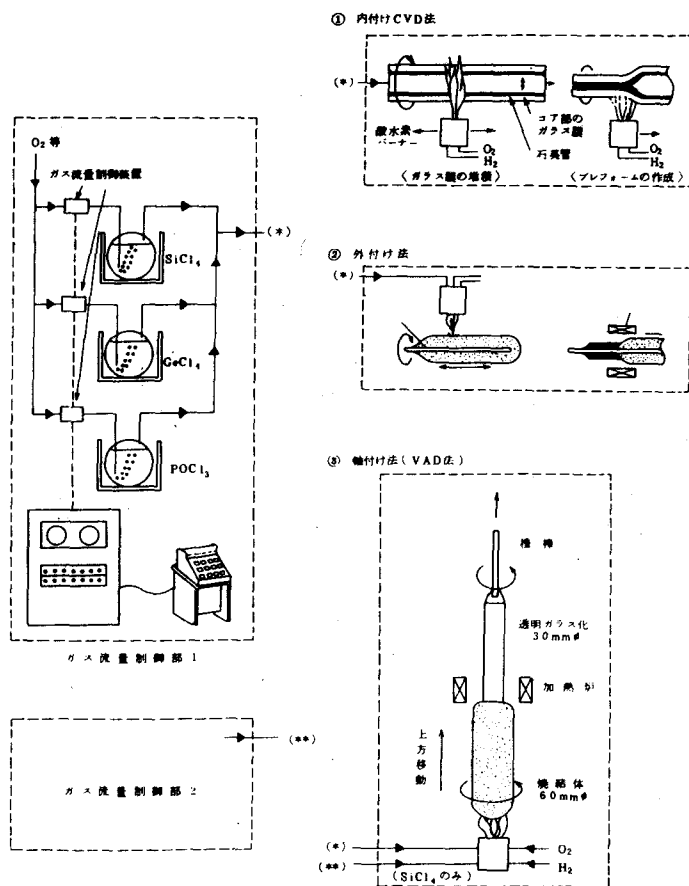


図7 代表的な光ファイバ製造法(その1)

で加熱した石英管全体をつぶして円い棒の母材(Preform)を得る。プリフォームの先端から高温で細く延伸、紡糸すれば光ファイバができる。内付け法は反応系が閉じて不純物混入が避けられること、水素が直接関与しないのでOH基の含有量を著しく低減できることから低損失ファイバが得られ易く主流の1つとなっている。

外付け法 内付け法と同様の原料を使い、直接酸素炎バーナーで燃焼させるこ

とにより火炎加水分解し、心材の上にすゝ状の石英と添加物をつもらせ、後適当な熱処理してから、加熱しガラス化し、心材を取除きつづけて母材とする方法である。外付け法は低損失の面では内付け法にやや劣るが、量産性、コア径の大きなもの等の点で有利な製造法である。

軸付け法 原料面は上記2方法と同一であるが、石英棒の端にコア用のすゝをつけ、また円周からフラット用のすゝを同時につけ軸方向に成長させて行く方法である。ガラス微粒子が堆積した白墨のような多孔質ガラスを高温加熱によりガラス化に導く。軸付け法は一連の作業で連続的に長尺の母材が製造可能であるため、外付け法以上に量産性がすぐれている。

多成分系ガラスファイバの製法 SiO_2 の紡糸系には 1800°C 以上という高温を必要とするが、 SiO_2 に B_2O_3 、 Na_2O 、 Ti_2O_3 、 CaO 、 K_2O などのうち数種類の他の成分を加えると $900\sim 1300^\circ\text{C}$ 程度の低い温度でよく、そのため SiO_2 では使えないつぼを使うことができる。所定の割合で混合がつ熔融してガラスを作り、コア材とフラット材が同心円状に引出せる構造の2重つぼに入れ加熱し紡糸する。この方法は連続紡糸による量産性にすぐれているが、特性面では石英系よりも劣る。

紡糸直後の光ファイバは薄いプラスチック樹脂を被覆し(素線)、更に取扱い易くするためナイロンやポリエチレンで被覆する(心線)。ケーブル化はこのような光ファイバ心線を集合する技術である。ケーブル構造は多種類あるが大別すると (i) 層形、(ii) ユニット形、(iii) リボン形となる。層形はケーブル軸に対し同心円状に層状に心線を配置したものであり、ユニット形は数本の心線を撚って集合したユニットを更に数ユニット撚って集合したもので代表的となり図8にその様子を示す。リボン形はファイバ心線を横一列に並べてプラスチック成形し、これを多層に重ねた構造である。

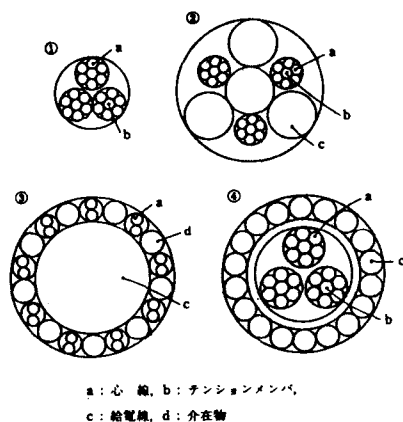


図8 光ファイバケーブル例

これらのケーブル化の過程ではマイクロベンディングと呼ばれる応力がかかりファイバの損失が若干増加する。心線化技術、ケーブル化技術は低損失のための高速化と伝送特性の劣化防止の観点で重要となっている。

ケーブルを布設してゆく時にはケーブル長が限られているので長くなるときは永久接続 (Splicing) により延長せねばならない。永久接続の代表的方法を図9に示す。スリーブ法もV溝法も接着剤を使うので実験室

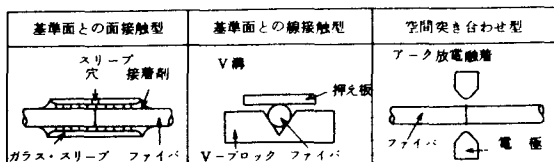


図9 光ファイバの代表的な永久接続法

的には便利な方法である。融着法は加熱装置を必要とするが、経時劣化の心配が少ないので今後の主力となりつつある。接続損失は平均 0.3 dB 以下といずれの方法でも使用上問題とならないところまできている。スプライシング以外の接続法としては着脱可能なコネクタがあるが、これも接続損失は平均 0.5 dB 以下で現在使用上の問題はない。これらの接続は単一モードファイバの時は $1\mu\text{m}$ 以下の加工精度が要求されるので、今後に残された難しい研究課題となっている。

4. 光素子

われわれが日常慣れている光源は白熱電球や蛍光灯で多くの波長の光線から成立っているが、通信のために必要な光線は一定の波長のみを出す光源でかつ情報によりその強度が容易に制御できるものでなければならない。レーザ、発光ダイオードはその期待に応える素子である。図10に代表的なレーザの発振波長と受光素子の検出波長域を示す。

レーザは用いるレーザ媒質の違いによって気体レーザ、固体レーザ、半導体レーザに分類できる。光ファイバによる通信はファイバの低損失波長領域である $0.8 \sim 1.1\mu\text{m}$ 帯を発振波長にもつこと、および電気信号で容易に強度変調がかけられることからレーザについては GaAlAs 系化合物

半導体を用いた半導体レーザ、および発光ダイオードが中心となっている。

1976年に極低損失ファイバが開発され、 $1.0 \sim 1.3\mu\text{m}$ 帯および $1.5 \sim 1.6\mu\text{m}$ の新しい波長域が発見されるに伴い、この領域の光素子が注目を浴びるに至った。この波長帯では3元および4元の化合物半導体が構成材料の組成比を変えることで、その発光波長を自由に選択できるため、インジウム・ガリウム・砒素・燐 (InGaAsP) 系等の化合物半導体を用いたレーザ、発光ダイオードが開発されつつある。

一方光信号を検出する受光素子は紫外領域から、遠赤外領域まで種々の材料および構造のものがある。 $1\mu\text{m}$ 以下では Si を用いた半導体受光素子が、 $1\mu\text{m}$ 以上の長波長域では Ge を用いた半導体受光素子が一般的である。しかし Ge は雑音が大きいのので最近では In、Ga、As 等の化合物半導体の低雑音受光素子が有望となってきている。

次に発光および光検出の原理について簡単に述べることにする。物質を構成する原子がエネルギー準位 E_i より低いエネルギー準位 E_j へ遷移すると $\Delta E = E_i - E_j$

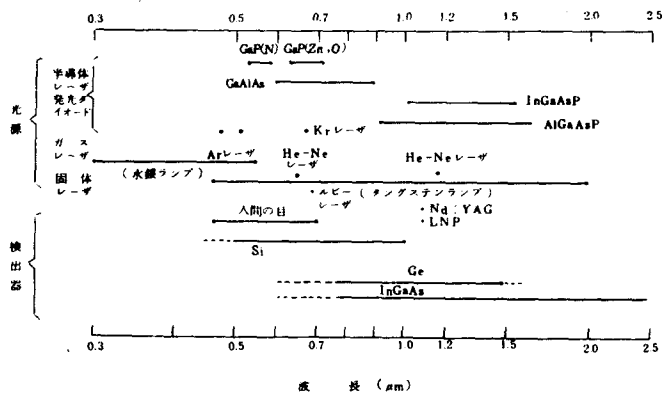


図10 発光源と光検出器一覧

なるエネルギーを光の形で放出する。この時エネルギー準位 ΔE と、放出される光の振動周波数 f との間には $\Delta E = hf$ なる関係がある。（ h はプランクの定数、 $6.625 \times 10^{-34} \text{Joul} \cdot \text{sec}$ ）逆に低いエネルギー準位 E_j にある原子に hf に等しいか、近いエネルギーをもつ光を照射すると、このエネルギーを吸収して電子は励起されてより高い準位 E_i に移る。ファイバ通信用の発光素子や受光素子は、このような2つのエネルギー準位の差 ΔE に比例した周波数の光を放出したり吸収する現象を利用している。図11はこのような過程を示したもので（イ）光受光器、（ロ）レーザ、（ハ）発光ダイオードにそれぞれ対応している。

光の放出には（ロ）に示したようにエネルギー準位差 $\Delta E = hf$ に等しいエネルギーの光に刺激されて、その光と同位相同一周波数の光を放出する誘導放出と、（ハ）に示したように高いエネルギー準位にある原子が自然に光を放出して低いエネルギー準位に移る自然放出とがある。レーザ発振は光共振器内で誘導放出を行なわせるもので、共振器から出た誘導放出光は波面がそろった波であり、レンズで波長の数倍の大きさに絞れる。このような光を空間的にコヒレントな光という。一方発光ダイオードの出力光は、波面が不揃いでレンズで一点に絞ることができない。このような光を空間的にインコヒレントな光という。（イ）で示した受光器では、入射光で高いエネルギー状態に励起された電子を光電流として検出する。

半導体レーザは、pn 接合に注入されたキャリアによる誘導放出により発光を得る事はすでに述べた。ここでは、比較的低電流で動作する二重ヘテロ構造半導体レーザの構造と、その特性について述べる。図12は、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}-\text{GaAs}$ 二重ヘテロ構造の動作説明図である。

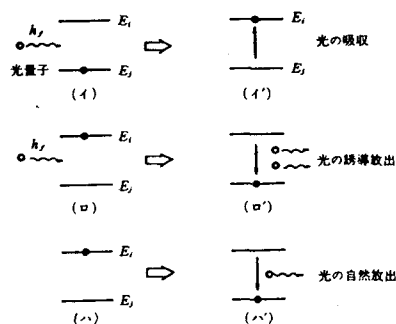


図11 光の吸収と放出

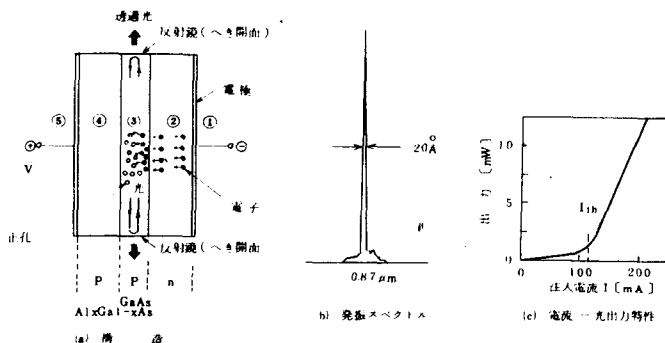


図12 半導体レーザ

図(a)の①はn形のGaAs基板で、この表面に②のn形Ga_{1-x}Al_xAs層、③のp形GaAs層、④のp形Ga_{1-x}Al_xAs層、⑤のp形GaAs層の4層を成長させたGa_{1-x}Al_xAs-GaAsウェハから切り出したものの両端をへき削りによって平行な反射鏡面にしてある。この2面の反射鏡は、帰還作用を持った共振回路を構成しており、反射鏡の方向へ進む光は誘導放出作用によって増幅されながら反射鏡の間を往復する。注入電流を順次増加していくと、途中の半導体材料による吸収や反射鏡からの透過などで失われる電力と、誘導放出によって増幅される電力が釣りあって発振を開始する。その電流値をしきい値電流という。このように、レーザ発振が起っている状態では、レーザ共振器の中で光が往復して、反射鏡と平行な等位相面を持つ光の定在波ができています。③のGaAs層がレーザ発振させる活性層である。p側に④、n側に①の電圧を加えて順方向の電流を流すと、③のGaAs層に大量の電子が注入されてレーザ発振を生ずる。

この時、③層を取り囲んでいるGa_{1-x}Al_xAsの②、④層の屈折率は、③層の屈折率よりも数%小さいので、光波は活性層③内に強く閉じこめられる。又、活性層③に注入された電子は③-④層間のヘテロ障壁のため活性層のみに閉じこめられて、発光に有効に利用される。このように二重ヘテロ構造にすると、キャリア（この場合には電子）と光波の両方の閉じ込め効果があり、レーザの動作電流密度を下げ、さらに発光効率を上げるので、多くの半導体レーザはこの構造を用いている。

図12(b)、(c)には、発振スペクトルと、電流-光出力特性の典型的な例が示してある。注入電流量がレーザ発振しきい値 I_{th} 以下の電流の時は、自然放光が主であり、数百Åの広いスペクトル幅を持つ。電流がしきい値 I_{th} 以上では誘導放光が主になり(b)に示したように発振スペクトルは数Å以下になる。レーザを使う立場からすると低電流で動作するのが望ましく、しきい値は低いほど良い。通常のものは、しきい値は100~200mAである。又、レーザ出力は1~20mW程度である。

最近、レーザ構造に工夫を加えたレーザが開発され、しきい値電流50mA以下、発振スペクトル幅数Åにする事も可能になった。

(光ファイバと半導体レーザの結合)

レーザの出力光を光ファイバに効率よく結合させることはシステム構成上重要な課題である。レーザの発光部は普通は $0.5\mu m \times 10\mu m$ 程度の楕円であり、特にヘテロ構造の膜厚方向は数十度以上の広がり角で広がってしまう。この光を効率よく光ファイバに結合させるには、何らかの方法で、光出力を集束させる必要がある。図13は、半導体レーザと光ファイバとの結合方法の例を示す。

(a)は集束形ファイバレンズで集束するもので、結合効率50~60%程である。(b)は光ファ

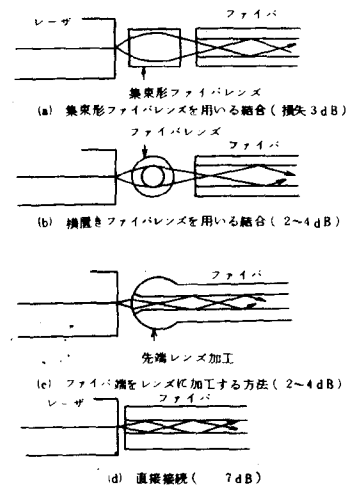


図13 半導体レーザとファイバの結合

イバを横向きにおいて膜厚方向の光のみを集束する方法で結合効率30~60%である。(c)は、ファイバ端画を球状に加工し、レンズ作用をもたせたもので結合効率30~60%。(b)は半導体レーザに直接ファイバを接着する方法である。

半導体レーザを実用の立場で考えると最大の問題は寿命である。GaAlAs-GaAsのレーザでは劣化機構がかなり解明され、高速加速寿命試験を行なえるようになった。試験結果を25℃におき換えて推定すると、130万時間、40℃は27万時間の寿命ということになる。しかし、ここで得られた推定寿命は活性層のバルク劣化を原因とするものである。ところが現実のレーザにはバルク劣化以外に端画劣化やレーザ素子化工程中に発生する劣化要因など温度上昇による劣化加速の度合いが少ないものがあり得る為、寿命についてはなお研究が必要である。

発光ダイオードは前に述べたようにpn接合に注入された電子で光の自然放出行なわれ発行が得られる。その構造は省略し以下に特性のみ述べる。

発光ダイオードの発光スペクトル幅は広く、GaAs LEDの例では、中心波長0.89μmで、400Åのスペクトル幅になっている。このようなスペクトルの広い光をファイバに伝送すると、ファイバの材料分散によってパルス広がりが生じるため、長距離、大容量の伝送には適さない。一方、発光ダイオードは、レーザダイオードにくらべ歩留りがよく、低価格であり、しかもより長寿命なため加入者線や大容量の伝送に向いている。

発光ダイオードは注入電流をかえることにより発光出力を制御する直接変調ができるという特長があるが、その3dB低下しや断周波数は、通常数10~100MHz程度である。この変調速度の限界は接合部の電荷蓄積によるものであるが、駆動波形を工夫することで、250MHz程度までの変調が行なえる。

半導体レーザにくらべ、駆動電流対出力光の関係において直線性が比較的良好、駆動回路を工夫すれば、高調波歪を十分抑えることができる。したがって、発光ダイオードを用いたアナログ伝送方式も検討されている。

発光ダイオードがレーザと異なるもう一つの点は、出力光が自然発光によるインコヒーレントであることである。したがって、光ファイバとの結合損失が大きく、これを改善するため出力と輝度の増大をめざしていくつかの構造が考えられている。p-n接合面に垂直方向に光出力をとり出すドーム形、バラス形、平行方向にとり出すカイト形などが開発されている。いずれにしても、光ファイバとの結合効率は数%以下であり、結合される光電力は0.5mW程度以下である。

後で述べる半導体レーザでは、寿命の問題が完全に解決されたとはいえない状況であるが、それに比べて、発光ダイオードは比較的問題は少なく、100万時間程度の寿命であると推定されている。

表1 半導体光源の現状

	発光ダイオード		半導体レーザ	
	0.85	1.2~1.3	0.85	1.2~1.3
波長帯(μm)	0.85	1.2~1.3	0.85	1.2~1.3
ファイバ入力(dBm)	~-15		~0	
ファイバ結合効率(dB)	-10~-15		-2~-3	
出力効率(注)(%)	1~3	1~2	~10	数%
変調速度(b/s)	数10M		数G	
スペクトル幅(Å)	300~400	1,000~1,300	≤20	
寿命(時間)	100万	?	数万	?

(注) (電流入力)対(全光出力)

表1に半導体光源の現状をまとめた。

受光素子には、

- (1) 光源の波長域で高感度であること。
- (2) 情報伝送速度に対して十分広い帯域と速い応答速度を有すること。
- (3) 付加雑音が少ないこと。
- (4) 動作電圧が低いこと。
- (5) 温度等の外部条件に対して安定であること。

といった条件が要求される。

このような観点から現在では、 $1\mu\text{m}$ 以下の波長域では、シリコンを用いたもの、 $1\mu\text{m} \sim 1.7\mu\text{m}$ の波長域では、ゲルマニウムを用いたものが主として用いられている。シリコンに比べゲルマニウムは雑音が多く、ゲルマニウム素子の特性改善や、InGaAsを材料とする新しいものの開発がすすめられている。

これまでに実用化されている主な半導体受光素子としては、フォトダイオード(PD)、アバランシフォトダイオード(APD)、フォトトランジスタ等がある。数MHz以上の帯域での微弱光を受ける場合は、APDが最も高感度で、次いでPDが良い。 $0.85\mu\text{m}$ 帯及び $1.2 \sim 1.3\mu\text{m}$ 帯用のAPD、PDの特性を表2にまとめて示した。

表2 受光素子の現状

	0.85 μm 帯		1.2 $\sim$ 1.3 μm 帯	
	PD	APD	PD	APD
材 料	Si		Ge/InGaAs(P)	
量子効率(%)	$\sim 80\%$		$\sim 80\%$	
応答速度(GHz)	$\sim 1\text{GHz}$		$\sim 2\text{GHz}$	
増 倍 度	1	~ 1000	1	~ 100
通帯雑音指数	-	~ 0.4	-	?

5 光ファイバ伝送の技術

以上述べたように光ファイバや光素子は種々のものが研究されており、それぞれの特長をもっているため、これらを組合わせて構成する伝送方式もいろいろの形式が考えられる。伝送技術は光ファイバや光素子の素材技術のもつ特性を如何にうまく利用し遠隔の場所へ効率よく情報を伝達するかという技術であり、変調形式、多重化形式、中継器技術に大別される。

変調形式は一般にアナログとデジタルの両形式がある。アナログは更に情報信号をそのまま送るベースバンド形式と搬送波を別に準備しこれに信号に応じた振幅変調や周波数変調等をかける搬送形式に分けられるが、半導体光源はレーザでも現在未だ周波数まで自由に制御できる段階にきていないのでいまのところはベースバンド形式に限られる。デジタルはPCMが中心であり、他に種々のものがある。しかしレーザは直線性があまり良くないので時間軸方向に情報を持たせるPFM等の形式が有力である。アナログ、デジタルの何れの変調形式にせよ光の変調は、半導体光源の駆動電流に信号電流を重ねるだけで光の強さを比例的に変える、い

わゆる光強度変調が容易にかけられるので現在は専らこの方法で変調を行なっている。ただし一般にはアナログは直線性が重要となるので発光ダイオード中心になっており、レーザが使えるデジタルに比べると光の強さ、スペクトルの広がり、高速変調の点で不利となる。半導体レーザはこのように主にデジタルに使われるが、そのときにはパルス変調特性が重要である。その時の問題点はパルス印加時の緩和振動、スペクトルの異常な広がり等であり、そのためレーザの構造の改良によって対策を施している。また発光ダイオードを使ってアナログ変調する際の駆動電流対光出力特性の非直線性についても若干問題があり、この場合には主に簡単な補償回路を使うことが広く行なわれている。受光素子については変調特性としてとくに問題となることは殆どない。

多重化形式は遠隔地への通信に際し1本のファイバを多重に利用し多くの回線を同時に確保することであり経済性の点での意義が大きい。これにはデジタルの場合に通常のPCMで使われている時分割多重がある外、アナログとデジタルのどちらにも向く波長多重とがある。波長多重は光独特のもので1本のファイバを使って多くの光の波長をずらして重畳し伝送する方法である。

この技術はまた多数の信号を一方向に多重伝送できるばかりでなく、双方向に伝送することもできるので非常に効率の高い多重形式である。例えば加入者系にこれを使えば1本のファイ

バさえ最初設備しておけば顧客の要望に応じて随時、種々のサービスのための回線を後から付加できるわけで融通性に富んだシステムを構成することができる。波長多重形式を図14に示す。この図にあるように波長多重伝送では光結合器と光分波器が必要である。いろいろの波長の光を分波したり結合したりする方法としては (i) プリズムを利用するもの、(ii) 光の干渉特性を利用するもの、(iii) 光の回折効果を利用するものとに分けることができる。表3はこれらの原理の簡単な説明と長所、短所の比較を示

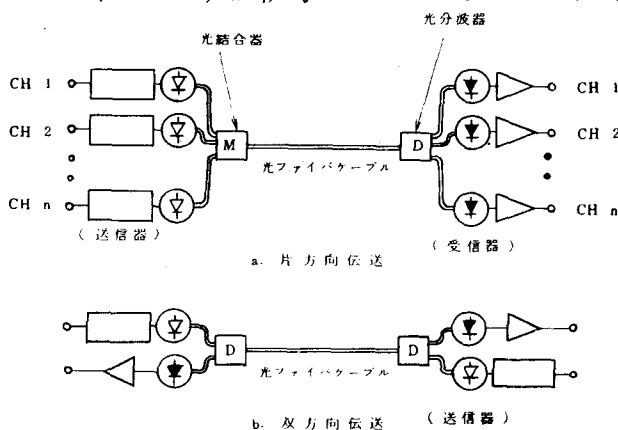


図14 波長多重(WDM)伝送系の形式

表3 光分波器の比較

	光分波器	光損失	可能なチャンネル数	価格	生産性
プリズム型フィルタ		3	大	高	難
干渉膜型フィルタ		2~3	中	安	容易
グレーティング型フィルタ		2	大	安	容易

したものである。今後は干渉膜型とグレーティング型とが実用の方角と考えられる。以上の他の多重化形式としては当然のことながら空間分割多重がある。これは多対ケーブルにほかならないのでこゝでは省略する。

最後に中継器のに関する伝送技術について述べる。中継器は信号が伝送路を伝送し損失により減衰したときに伝送路の途中に設置され、信号を増幅し元の大きさにして再び伝送路に送出した機能をもつ。中継間隔はなるべく長い方がよいが、中継伝送系全体の信号対雑音比すなわち S/N を最低限決められた値以上に確保する必要がある。全体からみて個々の中継器への配分を経済性の点から考慮して決められる。中継器もアナログとデジタルがあり、アナログの場合の中継器の機能は増幅と等化であり、デジタルの場合の中継器は増幅、等化の外パルスの再生、リタイミングの機能をもつことは媒体の如何を問わず必要である。このような機能を光信号のまゝで行なわせることは現在不可能であるので、今は電気信号の状態で行なわせている。すなわち光ファイバを介して伝送されてき光信号は、中継器入力で受光器により電気信号に変換され、上記の機能を行なわせた後、再び発光素子により光信号に変換して光ファイバに送出するわけである。したがって基本的には光中継器の構成は従来の中継器の入出力側に光と電気の相互変換素子を付加させた形となっている。しかしこのような構成は電気回路のLSI化により経済化、小型化が可能となり、必ずしも光信号のみの形の完全な光中継器を志向することがよいとは限らない。

図15はごく標準的な光中継器の構成を示す。ここでは受光器に一般的なアバランシュフォトダイオード (APD)、発光素子に半導体レーザ (LD) あるいは発光ダイオード (LED) を使った場合を示した。光中継器として光独特な部分はこれらの素子と点線に示した AGC、APC のループである。

AGC は受光電力の変動、フォトダイオードの

特性変動 (温度変化、経時変化)、増幅器の利得変動を補償するために用いる。増幅器を可変利得増幅器にしておき、出力パルスの振幅が一定となるように利得を変えるのが普通である。APD を用いるときはそのバイアス電圧を制御してやる。APC ループは LD のしきい値電流が温度によって変化するのを防ぐための安定回路である。

S/N は中継間隔を決める際の重要な設計パラメータである。雑音は増幅器で発生する熱雑音、フォトダイオードで発生するショット雑音であり、後者は受光電力に

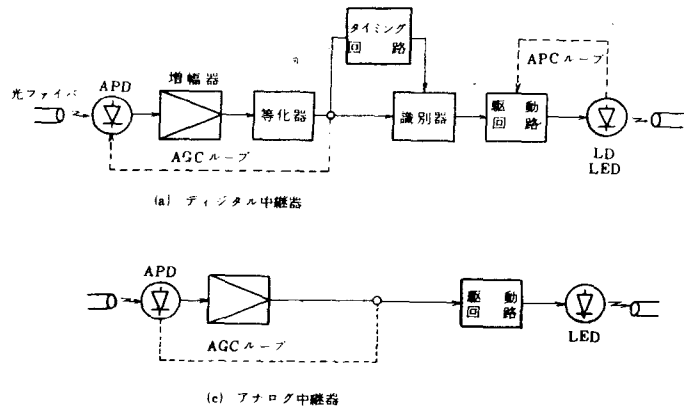


図 15 光中継器の構成