



UDC 621.391.6

最近の光通信技術の進歩

末 松 安 晴*

Recent Progress of Optical Communications

Yasuharu SUEMATSU

1. は し が き

最近、光ファイバ伝送は、今世紀に開発された最高性能の通信技術であろう、とまで言われ出した。そのため、光ファイバ通信技術は研究者、製造メーカー、ユーザー等の広い分野から注目されて活発な研究開発が行われると共に、すでに第一世代とも称すべき最初のシステムが実用に共されている。

このように光ファイバ通信技術は大変に新しい技術であるが¹⁾²⁾、将来各方面に波及し家庭内にまで入り込み実生活にも貢献するものと考えられるので、その生い立ち、特徴、技術の現在と将来等について大略の解説を行わせていただく。

2. 光ファイバ通信技術の歴史

人類は目を有し、物体の動きや光の強弱等の手段で光線を媒介にした原始的な光通信を行って来たことはよく知られている。文献によると前6世紀のダリウス大王時代に光の点滅によつて荒野を横断して通信が行われたことになっている。より科学的なレンズが眼鏡として用いられたのは13世紀のイタリアであつたが、16世紀に入つてレオナルド・ダビンチが光の屈折現象を調べ、17世紀にはガリレオの天体望遠鏡の発明や、スネルの法則の確立等によつて、光学は科学的に成長し始めたのである。

18世紀初頭にリサーチによつて、有線通信の考えが出ると、その紀末には早くも光に対する技術的関心が見られフランスのシャップによつて光通信機のアイデアが出されている。

その後19世紀に入ると光波はマクスウェルによつて電磁気現象の一つとして統一されると共に、電波の存在が見出され、その結果はマルコニーによる無線通信技術の発明・実用化に繋がったのである。一方、材料側から見ると、この頃に光伝導効果がスミスによつて発見され

ると共に、ボルツマンにより熱力学の統計的基礎が確立された。

光を物体によつて導く現象はレイリーの導波管の解析をもつて初めとするが、光ファイバの基礎となつた電磁波を導くための誘電体導波路の研究はドイツのホンドロス、デバイにより20世紀の初頭に行われた。次いで量子力学がハイゼンベルクにより確立されて、さらに、半導体现象が解明されて、今日の光デバイスの基礎をなすに至っている。

具体的な石英ファイバは独のラムの創案になる。しかし、実用的に安定な今日のごときクラッド層付きファイバはカパニーにより実現された(英, 1958)。光ファイバ通信の考えは既に関(日, 1939)によつて出されていると言われるが、当時の光ファイバは数千 dB/km 以上の高損失であつたため、より損失の少ない伝送路開発を目的にレンズ列光導波路(米, 1958)等が検討された。この間においては、信頼できる高性能光源や伝送路が無く、光通信は空間の伝搬に頼る船舶間等の特殊簡易通信に限られて使われていた。

1960年、レーザが米のマイマンにより実現されるに及んで、光を本格的通信に用いる希望が現れ通信技術者の夢は大いにふくらんだ。2年後にパルス動作ながら米国の三研究所から半導体レーザ(米)が出現し、その後このレーザは高速度調が容易で光通信用の有力光源になりうる事が東北大、ベル研(米)、東工大等における研究で明らかにされた。一方、高速動作の半導体光検出器(APD)(米, 1966)も出現した。

ところで、光ファイバの通信用の可能性が西沢(東北大)らによつて検討されると共に、ガラスの不純物を除去すれば光ファイバは低損失化される可能性があるとの重要な指摘がカオ(英, 1967)³⁾によつてなされて以来、1969年日本板ガラス・日電によりSELFOCファイバが開発され⁴⁾、翌1970年にはコーニング社(米)のモー

昭和56年2月13日受付 (Received Feb. 13, 1981) (依頼解説)

* 東京工業大学工学部 (Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama Meguro-ku 152)

ラーらにより気相成長 (CVD) 法によつて 20 dB/km という当時では信じ難いほどの低損失ファイバが出現した⁵⁾。この飛躍的ステップには半導体技術の影響が大きかつたと言われる。時を同じくして林, パニッシュらは (ベル研 (米)) AIG-aAs 二重ヘテロ接合を用いた波長 0.85 μm の半導体レーザを室温で連続発振させる事に成功した⁶⁾。かくして 1970 年は光通信の研究者仲間の中から広く産業界にも関心が高まり, 光ファイバ通信実用化への記念すべき幕開けになつたのである。

しかし, その後の半導体レーザの研究開発は種々の困難な問題に直面し順調ではなかつたが, その多くは日電, ベル研, 電々公社, STL (英), 大学等日米英等によつてに解決され⁸⁾⁹⁾, 一方, 三菱や日立等により単一モード GaAs レーザが開発された⁹⁾¹⁰⁾。それと共に電々公社, ベル研などを中心にレーザダイオード (LD) や発光ダイオード (LED) の性能・信頼性が向上し, 100 万時間以上の寿命が推定されるようになった¹¹⁾。

他方では, 電々公社や藤倉, 住友, 古河等の電線メーカー, コーニング社やベル研等による光ファイバ製造技術の改良と, 低損失化の努力が続けられてきた。この間, 電々公社は気相軸付け (VAD) 法と言う連続生産方式を開発し¹²⁾, 材料中の不純物除去が一層容易になり, また 100 km もの長尺ファイバが作られるようになった。1979 年には波長 1.55 μm 損失 0.2 dB/km の極低損失ファイバが電々公社, 藤倉電線により生み出された¹³⁾。また, 昨年にはファイバ中の水分除去に成功しほぼ完成されファイバ形態が誕生することになった。

同年, この極低損失波長帯 (波長 1.5~1.6 μm) の GaInAsP 長波長レーザが国際電々, 電々公社, 東工大より報告された^{14)~16)}。

この間, 大規模な光伝送システム実験が 1976 年頃より日米英等で進み始めた。現在は公衆通信, 産業情報伝送, CATV 或は移動体内通信等に應用されて実用化され世界的に活用され始めている¹⁷⁾。

そして, 初期に開発された波長 0.85 μm 帯の短波長光通信システムから, より性能の高い波長 1.3 μm 帯の長波長光通信システムの実用化が始まつている。

3. 光ファイバ伝送路の特徴

光ファイバはシリカを主材料にして作られ, 中心部には GeO_2 , P_2O_5 等の原素を添加して屈折率を 1% 程度増した直径数 μ から数 μ の芯 (コア) があり, その外側をシリカで囲み (クラッド), 最外径は約 125 μm 程度である。光ファイバはクラックを防ぐために外側を 10 μm 程度のプライマリーコートをつけ, さらに取り扱いを便利にするためにその外側をさらに直径 1 mm 程度のナイロンでコートしてある。このような光ファイバを数本から数十本束ねて光ケーブルにして利用する。

構造上 2 種類の光ファイバがある。現在最も広く利用

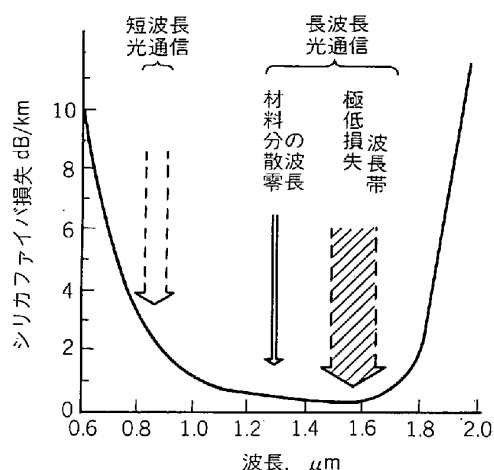


図 1 極低損失シリカ光ファイバの損失・波長特性 (損失曲線は森山, 技広らによる¹⁹⁾)

されているものはコアの直径が約 50 μm と大きな多モードファイバである。将来, 最も有力に用いられるであろうと考えられているのはコア径が数~十 μm 程度の単一モードファイバで一つのモードのみを伝送するので, 多モード光ファイバに比べて著しく大量の情報伝送ができる。

これらの光ファイバ伝送路には次に述べる数々の特徴がある。

(i) 低損失性 光ファイバの損失は波長によつて異なるが, 性能の高いものでは波長 0.85 μm では 1.5 dB/km 程度あるいはそれ以上であり, 波長約 1.6 μm では 0.2 dB/km (1 km で約 4% の損失) にまで減少する。

代表的な金属製の同軸ケーブルと比べると損失が 2 桁ほど小さい。シリカ光ファイバの損失は主に屈折率の不均一性によるレイリー損失, 格子振動及び不純物の遷移金属元素と水成分による吸収によつて生じる。この不純物を十分除去 (1 ppB 程度またはそれ以下) した光ファイバは, 図 1 に示したように, 最小損失波長帯は 1.5~1.6 μm になる。ケーブル化の際には, 普通, 0.05~0.5 dB 程度の付加損失が加わる。

(ii) 大容量性 単一モード光ファイバの伝送周波数帯域幅は主に屈折率の波長分散に基づくものであり, 波長 1.3 μm 帯ではこの材料分散が零で著しく広帯域の大容量伝送になり¹⁸⁾, 波長 1.6 μm 帯では数十 GHz $\cdot\sqrt{\text{km}}$ の帯域幅を有する。波長がわずかに異なる光源を用いると, さらに光源の数だけ伝送容量が増加し理想的には, 数 THz $\cdot\sqrt{\text{km}}$ 程度の伝送帯域幅になる。これは同軸ケーブル等と比べると 3~4 桁も帯域幅が広い。

多モード光ファイバではモード間の群速度差によつて伝送容量が制限され, コア内屈折率分布によつて変わるが数 MHz $\cdot\sqrt{\text{km}}$ ~数百 MHz $\cdot\sqrt{\text{km}}$ になる。

(iii) 電気的絶縁性と電磁的無誘導性 絶縁体のガラスでできているので伝送路が電気的に絶縁されると共に, 電気的あるいは磁氣的な誘導がなくて電磁的な雑音

発生が除去され、雷障害にも強い。

(iv) 細くて軽くて曲げやすい。1 cm² の断面積で数千本のファイバを通せるので、これを束ねた光ケーブルは細く、空間的高密度伝送ができると共に、数 cm の半径で曲げられる。

以上述べたように、金属伝送路に比べて断面積が数百分の一に、損失が数千分の一に、そして伝送容量が究極的に数万倍にできるなどの特徴を持った高性能伝送路とすることができる。

4. 光ファイバ通信の現状

a) 光デバイス 発光あるいは吸収の波長帯は材料のエネルギー幅に依存するので、使用する波長に応じた適切な材料が用いられる。表1は応用分野と波長及び光デバ

表 1 光デバイス用半導体材料と波長

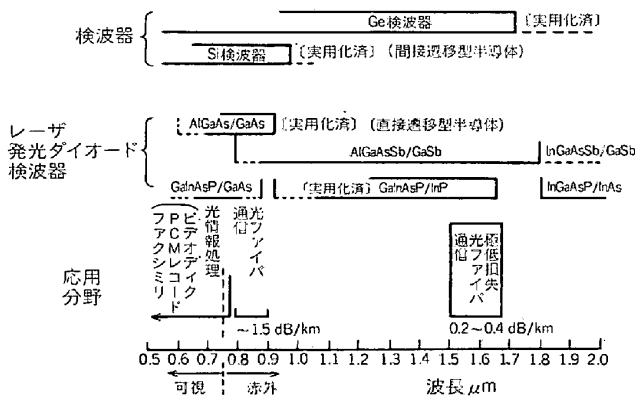


表 2 半導体レーザーと発光ダイオードの性能

特 性	レーザーダイオード (LD)	発光ダイオード (LED)
印 加 電 圧	約 1 V	
動 作 電 流	数十～数百 mA	
光 出 力	数 mW	数百 μW～数十 mW
スペクトル幅	小: <math>< 0.01 \text{ \AA}</math> 〔単一モード型〕 ～数十 Å 〔多モード型〕	大: 300 Å 〔波長 0.85 μm〕 1 200 Å 〔波長 1.3 μm〕
収 光 性	良: (2～3 μmφ) まで可	不良: (発光面積 〔数十 μmφ〕 まで)
コヒーレンス長 (干渉長)	m 程度	μm 程度
光ファイバへ結合する割合	一数十%	数～数十% 〔多モードファイバ〕 (単一モードファイバへは不可)
出 射 角	30～50°	70°以上
直 接 変 調	数 GHz	約十 MHz
効 率	数～数十%	数～数十%

イスと半導体材料の関係を表す。光源用には直接遷移型の材料が、検波器用に直接あるいは間接遷移型の材料が用いられる。

光源用としては、波長 0.75～0.9 μm 用の AlGaAs/GaAs 結晶を用いたレーザーダイオード (LD) と発光ダイオード (LED)²⁰⁾ が開発され実用化・高性能化されている。波長 1.3～1.6 μm 用の光源は GaInAsP/InP 結晶を用いて実用化され高性能化に向けた開発が進んでいる。表2に光源用の LD と LED の性能比較を行つているが、いずれも印加電圧約 1 V で動作し、光出力は数 mW 程度である。

光源の電流を変えると光出力が変化するので、光出力を変調するには信号の強弱に応じて電流を変化させる直接変調の手法が用いられている。実用的にはパルス変調や、アナログ変調が行われており、レーザーダイオード LD では 1～2 GHz まで LED では約十 MHz までの直接変調ができる。この直接変調は簡便であり半導体光源の大きな利点になつている。

LED はレンズによつても十分集光できないので、コア径の大きな多モードファイバ用の光源として用いられる。しかし、LED の出力光は LD に比べてスペクトル幅が広いので伝送容量の大きな通信には用いることができない。

LD はレンズで十分に小さく集光できるので、コア径が小さい単一モードファイバ用の光源として使用する。もちろん、多モードファイバ用にも用いられる。

光検波器には接合ダイオード (PIN) と、百倍程度の電流増倍作用を有するアバランシ光ダイオード (APD) とがある²¹⁾²²⁾。長波長光源へ対応する長波長光検波器も開発されている²³⁾²⁴⁾。

光検出器の受光レベルは伝送信号の周波数帯域幅に反比例し、100 Mbits の信号では約 1/10 μW の受信ができる。

b) 光コンポーネント 光ファイバの永久接続は放電加熱や V 溝法を採用し、0.1～0.2 dB (8～4%) 程度の低損失接続が行われている。普通の接続には同軸ケーブル用に酷似したコネクタが用いられている。

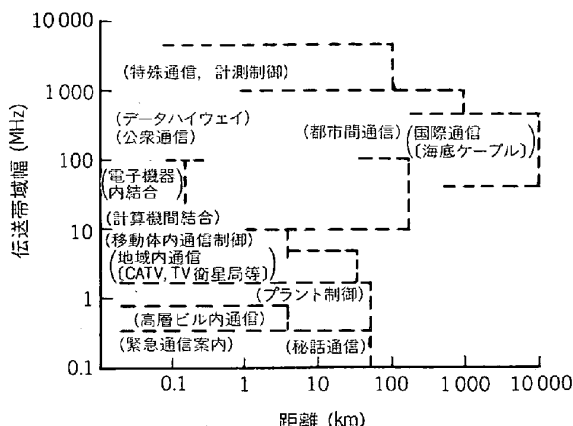
光源とファイバの結合は、直径 200 μm 程度のガラス球レンズや収束型ファイバレンズ等によつて行われ、数十% 以上の結合効率が得られる。

光スイッチは光ファイバを磁石で移動させたり、プリズムの反射鏡を移動させるなどの方法で実現されている。LiNbO₃ のような電気光学結晶に電圧や超音波を加える電氣的なスイッチの研究も行われている。

一方、波長多重通信方式に用いる回折格子や干渉膜フィルタを用いた光分波器や合波器も開発されている。

さらに、LD の発振特性を安定するために YIG 結晶や重フリントガラスを用いた一方向にのみ光を通す光アイソレータも開発されている。

表 3 ファイバ通信の応用



c) 伝送システム 典型的な光ファイバ伝送システムは次の二つに分けられる：

(i) 多モード光伝送システム；発光ダイオード(LED)を光源とし、この出力を多モード光ファイバに結合させて、光検波ダイオード(PIND)で検波する方式である。信号電流に従ってLEDの光強度を変調し、PINDでこれを検波する。この方式は、コア径の大きな多モード光ファイバを用いるので、光源とファイバの結合やファイバ間の接合が容易であり、伝送容量は数十MHz・kmで小さいが、取り扱いの容易な簡易光伝送システムである。

(ii) 単一モード光伝送システム；レーザダイオード(LD)を光源とし、この光出力を単一モードファイバで伝送し、アバランシヨ光ダイオード(APD)又はPINDで検波する方式で、伝送容量が著しく大きく、本格的な光伝送システムである。

波長 0.85 μm のいわゆる短波長多モード光伝送システムは現在最も普及しているシステムである。また、光源にLD、検波器にAPDを用いて数百 MHz・√km の高性能システムとして用いる。これを波長 1.3 μm 程度の長波長光源を用いたより低損失の長波長伝送システムも普及しようとしている。

さらには 1.5~1.6 μm のLDを用いる極低損失の長波長単一モード光伝送システムは、目下研究開発が進みつつある将来のシステムである。

国内の代表例では、電力会社の電力系統制御通信(数Mbits)、東生駒市における生活映像情報協会の家庭内映像情報サービスプロジェクト、電々公社による東京都内川崎、厚木等における全ファイバ長 1000 km の本格的公衆通信(主に 32 Mbits)、NHKによるTV衛星局の雷防止システム、およびCATV伝送や工場間の通信制御用等がある。

米国のディズニールランド内通信も光伝送を用いている。また、公衆通信用にも多用されつつある。その他、航空機や船等の移動体、あるいは軍関係の用途も大き

表 4 光ファイバ通信の将来展望

(光伝送の将来展望は極めて困難であるが、表の様に世代分けをしてみた)

世代	要素	光源：検出器	ファイバ	付 記
1) 第一世代 短波長光通信 (現在実用化)		0.85 μm (GaAs) Si, APD PIND	多モード (SiO ₂) (多成分)	10km
2) 第二世代 長波長光通信 (現在実用化)		1.3 μm (InGaAsP) Ge 又は InGaAsP APD PIND	多モード (SiO ₂) 単一モード	波長多重 50km
3) 第三世代 長波長光通信 (研究開発中)		1.5~1.6 μm "	単一モード	波長多重 (平面光回路, 光集積回路) 100km
4) 第四世代 (全光システム) (研究 中)		"	"	光交換 光計算
5) 第五世代 (研究 中)		波長数 μm (?)	?	数百 km?

い。

しかし、光ファイバ伝送技術はようやく揺籃期に入つたところでまだコスト高の状態にあるのが実状である。将来普及が進むにつれてこれらの問題は、しだいに解決されるであろう。表3には今後の進展を含めて応用分解を一覧的にまとめた。計算機間結合や数年後の実用化を目指した海底ケーブル等への応用も検討されつつある。また、波長の異なる多数の光源を一本のファイバで伝送する波長多重通信による大容量化やヘテロダイン通信の研究等により高性能の研究等が積極的に行われている。

5. 将来への展望

極めて新しい技術である光ファイバ通信は、表4にその一例を示したように今後数段階の技術的飛躍をへて固有の超高性能を具体化した超高性能光通信システムに発展するものと考えられている。すでに、光ファイバの極低損失波長 1.5~1.6 μm を用いる超広帯域で低損失伝送の単一モード光伝送システム、第三世代システム、の実用化が電々公社等により進められつつある。特にこの第二・第三世代システムの研究は我が国が最も進歩している。一方、多数の光デバイスや光素子を平面光回路を用いて一体に集積する光集積回路の研究も進みつつあつて、デバイスの観点から高性能化、低コスト化が図られる可能性がある。その上、光デバイス用結晶を気相成長法で製造する技術が進展しつつあり、量産性向上と低コストに継がるものと信じられている。

また、光交換の開発によつて電気信号変換の仲介なし

に交換伝送を行う全光システムの実現を目指した第四世代システムの研究も始まっており、来世紀に継続される大きな課題に進展する可能性を秘めている。さらには、シリカより低損失な材料で光ファイバが作れないかという第五世代の可能性の検討も一部で行われ、今後の大きな夢として残されている。

6. む す び

最近著しく進展した光ファイバ通信についてその一端を展望させていただいた。この技術はすでに実用化されているが、まだ揺籃期にあり今後ますます高性化され発展するものと考えられている。特に、ビデオ情報や高速ファクシミリ等の画像通信への社会的要求は光ファイバ通信の普及を加速するであろう。21世紀初頭からは新設の通信はすべて光になるとも言われている。このような意味から、本拙文が何らかのご参考になれば望外の幸いである。

なお、本文中で引用した文献は比較的初期のものに属し、最近の文献は17)等にくわしいので略したことを付記したい。

文 献

- 1) 末松安晴, 伊賀健一: 光ファイバ通信入門, (1976) [オーム社]
- 2) 野田健一編著: 光ファイバ伝送, (1978), [電子通信学会]
- 3) K. C. KAO and G. A. HOCKHAM: Proc. Inst. Elect. Engrs, 53 (1965), p. 2148
- 4) T. UCHIDA, M. FURUKAWA, I. KITANO, K. KOIZUMI, and H. MATSUMURA: IEEE Jour., QE-6 (1970), p. 606
- 5) F. P. KAPRON, D. B. KECK, and R. D. MAURER: Appl. Phys. Lett. 17, (1970), p. 423
- 6) I. HAYASHI, M. B. PANISH, P. W. FOY, and A. SUMSKI: Appl. Phys. Lett., 17 (1970), p. 109
- 7) H. YONEZU, I. SAKUMA, T. KAMEJIMA, M. UMEMO, N. NISHIDA, Y. NANNICHI, and I. HAYASHI: Appl. Phys. Lett., 24 (1974), p. 18
- 8) B. G. DELOACH Jr., B. W. HAKKI, R. L. HARTMAN, and L. A. DASARO: Proc. IEEE, 61 (1973), p. 1042
- 9) H. NAMIZAKI, H. KAN, M. ISHII, and A. ITO: J. Appl. Phys. 45 (1974), p. 2785
- 10) T. TSUKADA: J. Appl. Phys., 45 (1974), p. 4899
- 11) Y. FURUKAWA, T. KOBAYASHI, K. WAKITA, T. KAWAKAMI, G. IWANE, Y. HORIKOSHI, and Y. SEKI: Japan J. Appl. Phys. 16, (1977), p. 1495
- 12) T. IZAWA, S. SUDO, and S. HANAWA: Trans. IECE Japan, E62 (1979), p. 779
- 13) T. MIYA, Y. TERUNUMA, T. MIYASHITA: Electron. Lett. 15 (1979), p. 106
- 14) S. AKIBA, K. SAKAI, Y. MATSUSHIMA, and T. YAMAMOTO: Electron. Lett. 15 (1979)
- 15) H. NAGAI, H. KWAGUCHI, T. TAKAHEI, Y. TOYOSHIMA, and G. IWANE: Electron. Lett., 15 (1979)
- 16) S. ARAI, M. ASADA, Y. SUEMATSU, and Y. ITAYA: J. Appl. 18 (1979), p. 2333
- 17) 電子通信学会, 光伝送技術特集号, 63 (1980)
- 18) D. N. PAYNE and W. A. GAMBLING: Electron. Lett., 11 (1975), p. 8
- 19) T. MORIYAMA, O. FUKUDA, K. SANADA, K. INADA, T. EDAGIRO, and K. CHIDA: Electron. Lett., 16 (1980), p. 698
- 20) C. A. BURRUS and R. W. DAWSON: Appl. Phys. Lett., 17 (1970), p. 370
- 21) R. J. MCINTYRE: IEEE Trans. ED-13 (1966), p. 164
- 22) H. MELCHOIR and W. T. LYNCH: IEEE Trans., ED-13 (1966), p. 829
- 23) T. P. PERSALL, R. E. NAHORY, and M. A. POLLACK: Appl. Phys. Lett. 27, (1975), p. 330
- 24) H. ANDO, H. KANBE, T. KIMURA, T. YAMAOKA, and T. KAKEDA: IEEE J. OE-14 (1978), p. 804