

光エレクトロニクスの将来展望

東海大学開発技術研究所 内田 禎二

Technological trends of opto-electronics

Teiji Uchida
Institute of Research and Development, Tokai University

1. はじめに

今日の社会は高度情報化社会に向けて急速な発展をしております。そこは、コンピュータと通信が融合化 (C&C: Computer & Communications, or Telematique) して大量かつ複雑な情報を高速に処理する社会です。この C&C 技術は二つの共通基盤技術 (Generic Technology or Common Base Technology) によって支えられていると言われています。即ち、ME (Micro-Electronics) と OE (Opto-Electronics) です。ME は 1980 年代の初期に驚異的に進歩し、それ以後産業の米として諸分野に大きな影響を与えながら市場は爆発的な成長を続けております。ME に続いて OE がもう一つの共通基盤技術として登場してきました。そしてこの二つの基盤技術が相互に補完しあいながら C&C 技術を支えて行きます。さらに 21 世紀を考えると BE (Bio-Electronics) が C&C 技

術を支える第三の基盤技術になると予測されます。

光産業技術振興協会が纏めた調査報告¹⁾によると光産業の 1988 年度の国内生産規模は 2 兆円を越えるに至りました。ちなみにわが国の電子産業の 1988 年度の生産規模は 21 兆円強です²⁾。光エレクトロニクスは今後ともハイテクの一翼を担って急速な発展を続けるものと予測されます。Table 1 は光エレクトロニクスのいろいろな応用分野を示しています。以下に各応用分野及び光デバイスの技術動向について述べます。

2. 光通信

光エレクトロニクスの応用として光通信は最も重要な課題の一つで、多くの国において高度情報化社会への発展に大きく貢献しております。

例えば、NTT は 1985 年 2 月に波長 1.3 μm 帯

Table 1 Features and applications of lasers

HIGH FREQUENCY	LARGE CAPACITY OPTICAL COMMUNICATIONS...
DIRECTIVITY (FOCUSABILITY)	OPTICAL COMM., LASER RADAR, OPTICAL DISK...
HIGH BRIGHTNESS	LASER MACHINING, LASER FUSION, LASER OPERATION...
COHERENCY	HOLOGRAPHY, MEASUREMENT...
MONOCHROMATICITY	COHERENT OPTICAL COMM., ISOTOPE SEPARATION, SPECTROSCOPIC MEASUREMENT...
NON-INDUCTION	OPTICAL COMM. ...
NON-CONTACT	LASER MACHINING, OPTICAL DISK, PHOTO-COUPLER...

の 400 Mb/s (TEL 5700 回線/sys) の日本縦断光ファイバー通信システム (FOTS: Fiber-Optic Transmission System) の建設を完成しました。このケーブルの全長は 3400 km に達します。更にこのシステムはその後の需要増に伴い、1.6 Gb/s (TEL 23,000 回線/SYS) に置き換えられている。Fig. 1 にその様子を示す。

米国では AT&T をはじめとする企業が、FOTS を全国的に敷設しています。欧州その他の諸国でも同様です。

海底光ケーブルシステムとしては昨年完成し、今年サービスインの TAT-8 (Trans-Atlantic の第 8 番目の回線) や TPC-3 (Trans-Pacific) に続いて多くの計画が進行中である。今後の海底ケーブルシステムは殆どすべて光ケーブル方式と考えてよい。

LAN (Local Area Network) や CATV については紹介し切れないほど多くのシステムが世界中で利用されています。

一方、加入者用の FOTS 回線の設置については経済面から先ず企業用に導入される。日本では BUSINESS 地域への建設が 1989 年から始まっています。

FOTS に使われる技術の動向としては、単一モードファイバー (SMF) および $1.3\mu\text{m}$ 帯の波長が従来使われてきたが、最近では光ファイバーの伝送損失が一層低い $1.5\mu\text{m}$ 帯が使われ始めた。例えば、400 Mb/s の信号を伝送する場合、電気と同軸方式では実用システムとしての中継間隔が数 km であるのに対し、 $1.5\mu\text{m}$ の光ファイバー方式

では 100 km 以上です。光ファイバー方式はこのような低損失性に加えて細口径・軽量、無誘導、周波数特性補償の不要などの数多くの特長を有している。また、幹線系のみならず、加入者系についても多モードファイバーでなく超広帯域の単一モードファイバーが導入される。

システム技術としては直接検波受信方式が現用されているが、受信感度が一層改善される光ヘテロダイン受信方式の研究が進展している。このヘテロダイン方式はさらに高密度周波数分割多重 (波長分割多重) を可能にする。敷設された長尺の光ファイバーケーブルを伝送する光ビームの偏光は不規則な楕円偏波になるが、自動偏光補償器を用いれば、無損失で元の直線偏光に戻し得ることが判った。受信信号光と局部発振光との偏光面を一致させる必要のある光ヘテロダイン方式には特殊な偏光保存ファイバーを用いる必要はなく、従来の単一モードの光ファイバーを使用できる。

中継間隔を更に拡大する方法として、光増幅器を用いる方法がある。半導体レーザの光増幅器や Er^{3+} イオンをドープしたシリカの光ファイバーを 0.9 あるいは $1.4\mu\text{m}$ 帯の半導体レーザで励起する $1.5\mu\text{m}$ 帯の光ファイバー増幅器とがあるが、後者が光ファイバーとの接続や安定性の点で当面有望と考えられる。電力消費の点では半導体レーザ増幅器の方が少ない。また最近では光パルス幅の広がらないソリトン伝送やラマン増幅等の光ファイバーの非線形伝送も研究されている。

弗化物系や硫化物系の遠赤外波長用 ($\text{数}\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$) の光ファイバーでは理論的には現在のシリカファイバーの数十倍の中継間隔が可能になるほど低損失と推定されるので、不純物除去やファイバー化技術などが基礎的に研究されている。

宇宙空間には光を吸収するガスが存在しないので衛星間やスペースステーション間の通信には宇宙光通信が有望と考えられる。指向性等の点から短波長の半導体レーザが適している。しかし、衛星は非常に高速で移動するので、光ビームの捕捉・追尾・予測指向などの研究が不可欠です。

3. 光交換

伝送路は光ファイバーの導入により超広帯域に

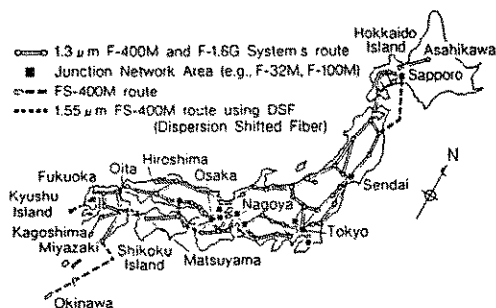


Fig. 1 Fiber optic long haul transmission system route in Japan (NTT)

なりました。そこで交換機の超広帯域化が望まれ、光交換が研究されるようになりました。

光交換の特長は (1)広帯域、(2)低クロストーク (隣接回路への漏話が少ない) 等であります。

光交換技術は、次の3種類に分類されます。

- (1) 空間分割型：これは LiNbO_3 等の光マトリックススイッチで構成され、切り替え速度は Gb/s 位まで上げられます。
- (2) 時分割型：現在のパケット交換に対応するものです。各加入者の信号は時分割的に送られます。
- (3) 波長分割型：光交換独特の方式で、各加入者の信号は異なる波長に乗せられ、波長切り替えにより交換されます。この場合、波長選択デバイスと波長変換デバイスが必要になります。
- (4) 上記の組合せ型：上記を組み合わせることにより多重度を上げられます。

光交換は光ファイバー通信に続く光の重要な応用分野になると期待されています。

4. 光情報処理

2次元の演算処理に光が向いていると言われますが、現在の電氣的 CPU (Central Processing

Unit) にとって代わるものとは当面考えられませんが、なぜなら、Si デバイスが超小型、低消費電力、高速、低価格と非常に優れたデバイスであるからです。それ故、近い将来に CPU や内部メモリーに光技術が導入されるとは思われない。

一方、光ディスクは磁気ディスクに比べて、一般に大容量で、取り外し可能であるため、File Memory として大変有用です。Table 2 に各種の光ディスクを示す。1988 年度の日本の光ディスク関連の生産額は実に 8600 億円に達したり。その過半は Compact Disk であるが、この 4-5 年での市場の急成長を考えると新技術の開発を怠ると企業にとって致命傷になることが理解されると思う。

昨年後半頃から書換え可能の光ディスク装置が市場に出始め、パソコン用で約 3000\$ の価格で、ディスクも単価 3 万円位である。Access Time も約 100 ms 位から急速に改善され、研究的には 30 ms 台まで達している。今後フロッピーはもとよりハードディスクへも大きな影響を与えられると考えられる。ハードディスクの容量も 1-2 年の内に 3.5 および 5 インチでそれぞれ 500 MB および 2 GB 程度に達すると予測され、光ディスクと比べて遜色ないが、交換可能、経済性、さらに将来の技術発展性と言う点で光ディスクが優れている。

Table 2 Types of optical disks

TYPES	STORAGE CAPACITY
CD/CD SINGLE	540/151 MB
CD GRAPHICS	540 MB
CD-ROM	540/620 MB
CD-I	540/610 MB
CD-V	304 MB : VIDEO 5 min. 144 MB : VOICE 20 min.
DV-I	540 MB
LASER VIDEO-DISK	A FEW GB : ANALOG
DRAW	A FEW GB
REWRTABLE DISK	~GB

今後、超大型コンピュータあるいはスーパーコンピュータにおいては配線の信号伝搬時間が処理時間の大きな部分を占めると予測される。そこで光のインターコネクションが研究されている。

5. その他の応用

その他のレーザの応用は枚挙にたえないが、その中で半導体製造工程へのレーザ応用に今後注目すべきである。それは低温プロセスと局所プロセス等の点において有利である。レーザ光を当てながら結晶・薄膜生長、ドーピング、アニーリング、酸化・窒化、エッチング、光洗浄などが考えられる。

6. 光デバイス

光半導体デバイスは光技術の中でも非常に重要なキーデバイスです。それは半導体電子デバイスと同様に小型で低消費電力であるためです。

光通信レーザダイオード (Laser Diode: LD) の波長は通常 $1.2\text{--}1.6\ \mu\text{m}$ の長波長帯で、発振部の材料は $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ で構成されている。単一モードファイバーと組み合わせて用いるので出力光ビームが単一横モードになるように埋め込み二重ヘテロ構造 (DH: Double Hetero-Structure) が採用されている。この LD の典型的な特性は Fabry-Perot 型の共振器をもつ長波長帯の LD の場合、その光出力は実験室的には最大 200 mW 位に達しているが、実用システムでは 5-10 mW の範囲で使用されている。

最近、単一周波数で動作する LD が重要になってきました。このような LD を送信器に用いると①単一モードファイバーの分散特性の影響が軽減されて光パルスの広がりが少なくなるため長距離伝送が可能になる。②ヘテロダインやホモダイン方式を含む光コヒーレント通信を可能にします。

この単一周波数動作を実現するには回折格子とレーザ構造を同一半導体素子中に組み込んだ分布帰還型レーザ (DFB: Distributed Feed-Back) や分布ブラッグ反射型レーザ (DBR: Distributed Bragg Reflector) が主に採用されています。

さらにこの単一周波数レーザを周波数可変にすることが光コヒーレント通信の実現に不可欠です。

このために電極を 2~3 分割した DFB あるいは DBR 半導体レーザが用いられる。現在波長 $1.5\ \mu\text{m}$ で約 1000 GHz の波長可変幅が得られている。

半導体レーザは通常数 10 MHz の発振スペクトル幅を有しており、これを狭くすることがコヒーレント通信の信号対雑音比の点から重要です。半導体レーザに外部共振器を付加することで数 10 kHz のスペクトル幅が得られますが、安定性に問題が生じます。そこで外部共振器もレーザと同じ半導体上にモノリシックにつくことで 1 MHz 以下のスペクトル幅が実現されている³⁾。さらに MQW (多重量子井戸: Multi-Quantum Well) 構造の DFB 半導体レーザにより発振スペクトル幅の一層の低減が期待できる。

DFB や DBR 半導体レーザも実用的には 5-10 mW 程度の出力で使用されている。

なお、前述の高密度周波数分割多重方式には半導体レーザの問題以上に高波長選択性の極めて安定な光フィルタが不可欠であることを特記しておく。

次に光交換デバイスについて述べてみます。空間分割型光交換では光マトリックススイッチが必要になり、現在 LiNbO_3 結晶上に光ガイドと電極を設けるデバイスが開発されていますが、この場合は特性安定化に留意が必要です。将来は半導体の光マトリックススイッチが光レベル再生の点から重要になってきます。

時分割光交換では光の bit shift メモリとして双安定半導体レーザが実験的に使われていますが、消費電力の点から大規模システムには不向きです。そこでメモリ保持電力が低い光デバイス、たとえば VSTEP (Vertical to Surface Transmission Electro-Photonic device) のようなデバイスが研究されています⁴⁾。これは前述の DH 構造の LD に PN-PN のサイリスタ構造を組み合わせた光 DRAM と呼ばれるべきデバイスで、メモリ保持電力が数 μW 程度まで改善されていますが、実用光交換機用には一層の低電力デバイスが必要です。

波長分割光交換では波長変換や波長選択デバイス（波長可変フィルター）等の研究開発が不可欠で、現在いろいろな基礎研究が行われています。

光情報処理用デバイスとして可視の短波長半導体レーザが望まれています。光デバイスの場合は短波長になるほど記憶容量が増加します。CDでは、 $0.78\text{ }\mu\text{m}$ のGaAlAs半導体レーザが用いられますが、これをInGaAlPレーザ（現在 $0.67\text{ }\mu\text{m}$ が商品化、最近 $0.63\text{ }\mu\text{m}$ も発振）に切り替えると記憶容量が上がります。また、プリンター・コピーのような場合、一般的に感光剤は短波長になるほど感度が上がります。今後、緑から青に至る半導体発光デバイスが研究されて行くでしょう。

発光ダイオードや光ディテクターも光技術应用到不可欠のデバイスです。発光ダイオードは半導体レーザと同じ材料を一般的に用います。通信用光ディテクターとしてはInGaAsのpin型やアバランシェ型が使用されており、50-100 GHz程度まで動作するものが開発されています。

7. 将来の光デバイス

現在の光通信や光情報処理等に使われるレンズ・フィルター等の光受動デバイスには従来の光学素子では大きさ、安定性等の点から対応し切れませんでした。また半導体光デバイス、光ファイバー等を含めた総合的接続が問題になってきます。

そこで著者は1969年にMicro-Opticsデバイスを提案し、1975年代からこれが使われてきました。しかし、生産量の増加と共に製造・組立（光軸調整等）の工数が大問題になってきました。一方、OEIC（Opto-Electronic IC）も進歩してきましたが、電気系のLSIと比べると集積度を含めて非常に初歩的段階です。電気系LSI技術の進歩は通信技術よりもシステムの規模の大きい情報処理技術の発展により、促進されました。光情報処理はOEIC技術の発展により、促進されました。光情報処理はOEIC技術を促進させるにはいまだしで、現在基礎研究の段階に留まっています。他方、光通信はそれほど複雑なOEICを必要としませ

ん。

そこでMicro-OpticsとOEICを補完する新しい光デバイスとして著者は光SMT（Surface Mount Technology：表面実装技術）デバイスを1988年暮以来提唱しています。現在、電気系ではHybrid ICからSMTへの移行が進んでいます。パソコンなどはその適例です。今後、光SMTデバイスの研究開発の進展を期待しています。

8. まとめ

以上述べたように光エレクトロニクスはマイクロエレクトロニクスとともに高度情報化社会を支える共通基盤技術（Generic Technology）として技術発展をしており、市場も急拡大しています。

光通信は電気通信と同様に、直接検波方式からヘテロダイン方式へ、さらに高密度周波数分割多重方式への道をたどると考えられます。

光ディスク分野も一大産業へと成長してきました。これらに続く光の大きな応用として光交換が考えられます。それは技術的に見て、巨大な潜在市場性を有しながら、アクセスがまだ容易でない光情報処理へのGate-Wayにもなるからです。

今後、光エレクトロニクスの新しい応用への突破口として新しい光デバイスの研究開発も非常に重要です。

最後に、個人の着想そして組織としてのNETWORK化が世界の最先端に立つ研究に不可欠だとの日頃の考えを述べて終わりにします。

参考文献

- 1) “1988 Trends of Opto-Electronics Industry”, Optoelectronic Industry and Development Association, March 1989 (in Japanese).
- 2) “Vision of Electronics Industry in 1990's”, Tsuushousangyouchousakai, August 1989 (in Japanese).
- 3) Y. Kotaki et al., 9th IOOC, 19A2-4, July 1989
- 4) K. Kasahara et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 52, No. 9, p 679, 29 February 1988.

(Journal of Advanced Science, Vol.2, No.1 より許可を得て転載)

【筆者紹介】



内田 禎二 (うちだ ていじ)
昭和 29 年 東京大学工学部電気
工学科卒業、日本電気
(株)に入社
昭和 37 年 フランス・グルノーブ
大 学 より
Ingénieur-Dr.
昭和 42 年 東京大学より工学博
士
昭和 51 年 日本電気(株)レーザ
装置開発本部長に就
任
昭和 55 年 同社光エレクトロニ
クス研究所長に就任
昭和 59 年 同社取締役(研究開発グループ担当)
昭和 63 年 東海大学開発技術研
究所教授に就任、現在
に到る、

【連絡先】

〒151 東京都渋谷区富ヶ谷 2-28
東海大学開発技術研究所
TEL 03-467-2211

Abstract

Since lasers were first realized in 1960, significant amounts of resources have been invested in order to develop opto-electronics technologies. After about 30 years of such efforts, the opto-electronics industry has grown to an important partner of micro-electronics in supporting our society to advance into an information-intensive society. A technological overview on opto-electronics, including a variety of applications with respect to communication, switching, information processing and other uses, as well as device technology, is described.