

「マイクロ-optics」

(その1. ガラス材料からの振り返り)

(財)日本板硝子材料工学助成会

小泉 健

“Micro-Optics” Part 1. A Review of The Glass Materials Technology

Ken Koizumi

Nippon Sheet Glass Foundation for Materials Science and Engineering

1. はじめに

マイクロ-opticsあるいは微小光学とよぶ光学分野が注目を集めている。光ファイバー通信の研究が胎動した時代の1969年に光デバイスも電子デバイスと同様に集積化が進むとして集積光学の概念が提唱された¹⁾。しかし光学素子を同一基板上に集積するのは容易ではなく、1970年代の実用化のための光部品開発は要素素子を小型化する方向で進んだ。カプラ、波長分割多重器(WDM)、スイッチなどの受動型光部品は、短尺のファイバーを加工するファイバー型素子と、微小なレンズやフィルターなどを組み合わせるマイクロ型素子とが競合して進歩した。当初の光通信システムはグレーデッドインデックス型マルチモードファイバーで実用化が始まったので、伝送容量拡大のためにはWDMが必要とされ、そのための種々の開発が行われた。

1980年代にはいると伝送容量の大きいシングルモードファイバーの特性が著しく向上し、1980年代中頃からの通信システム構築はシン

グルモードファイバーに大きく移行した。その結果、WDMの必要性は減退し、発受光に関わる素子が需要を拡大した。ガラス材料で特筆すべきは1980年代後半のエルビウムドープシリカファイバーアンプ(EDFA)の登場である²⁾。1990年代にはいって始まったグローバルなインターネット利用、特に1994年からの北米における爆発的な普及は通信回線容量の大規模な拡大につながり、EDFAを組み込んだ高密度波長分割多重伝送(DWDM)の急速な実用化が始まった。日本では各家庭のすぐ近くまで光ファイバーを敷設する π システムの導入が始まり、そこでは種々の光部品が大量に使用される。これらの実用化がマイクロ-opticsに注目を集め一層の進歩を促している。他方、日本におけるマイクロ-opticsの特長は事務用や情報家電用の民生機器への応用開拓である。これらの機器への実用化によってマイクロ-optics素子は大きな需要を生み出した。

マイクロ-opticsコンファレンス(MOC)、微小光学研究会など、今日のマイクロ-opticsの研究集会は対象分野を光学の受動部品ばかりでなくレーザーなどの能動部品へも拡大して開催されている。扱う材料もガラ

〒105-0022 港区海岸2-1-7 日本板硝子東京ビル
TEL 03-5443-9413
FAX 03-5443-9567

ス、結晶、半導体など多岐に及んでいる。しかし本稿では対象をガラス材料に絞り、本号でガラス材料からの振り返りを行い、次号でニューガラスとしての将来性を考察する。

2. ガラス材料からの振り返り

ガラス材料のマイクロ-opticsにも種々の応用があり網羅することは容易でない。そこで対象を通信と民生機器への応用で実用化が進んだ素子に限ることにし、Table 1のように、ファイバー型素子、マイクロ型素子、プレーナ型素子の三種に大別して振り返る。

2.1 ファイバー型素子

ファイバー型素子の最大の特長は光ファイバー本体との接続の容易さにあり、要素技術の原点はファイバースプライスの開発にある³⁾。光ファイバーを通信システムに導入するさいの重要な課題の一つは融着接続技術にあった。この課題は石英ガラスロッドをガラス旋盤で加熱融着する方法を細いファイバーに対して適用でき

るように精密化することによって解決された。アーク放電を使うファイバー用精密ガラス旋盤の開発によって、光ファイバーが殆ど損失を生じることなく互いに融着接続できるようになったばかりでなく、Fig. 1のように束ねた複数本のファイバーを部分的に延伸し相互に融着するファイバーカブラの製作が可能になった。シングルモード対応のファイバーカブラにはエッチングや精密研磨の技術も導入された。

ファイバーアンプは近年のガラス材料開発の大きな成果であってファイバー通信の今日の発展を支えている。Fig. 2にEDFAの基本構成を示す。EDFAの実用化によってファイバー通信システムの経済性が著しく向上し、その将来性はゆるぎないものになった。EDFAの開発には逆転の発想がある。シリカガラスはフォノンエネルギーが大きく、そのためレーザー活性イオンであるエルビウムイオンを従来のレーザーガラス並に添加すると濃度消光が生じる。EDFAでは添加量を極端に少なくして濃度消

Table 1 Micro-optics components, their functions, application devices and basic techniques.

素子	機能	応用部品	要素技術
ファイバー型素子 先端加工ファイバー ファイバーカブラ ファイバーレーザー ファイバー グレーティング	光結合 分岐、分波 光増幅 波長選択	発受光モジュール カブラ、WDM 光アンプ、WDM WDM 発光モジュール	熱加工、エッチング 熱加工、研磨 ガラス組成、CVD ガラス組成 水素処理
マイクロ型素子 屈折率分布型レンズ 非球面レンズ 球レンズ 干渉膜フィルター	光結合 平行ビーム形成 分岐、分波 等倍正立像形成 光結合 平行ビーム形成 光結合 波長選択 光量調節	発受光モジュール コリメータ カブラ、WDM ファクシミリ他 発受光モジュール コリメータ 発受光モジュール カブラ、WDM	ガラス組成 イオン交換、研磨 溶接 金型、研磨、溶接 研磨 成膜、研磨
プレーナ型素子 光導波回路 平板マイクロレンズ	分岐、分波 光結合、集光	スプリッター、カブラ WDM 並列発光デバイス 液晶プロジェクター	ガラス組成 イオン交換、CVD ガラス組成 イオン交換

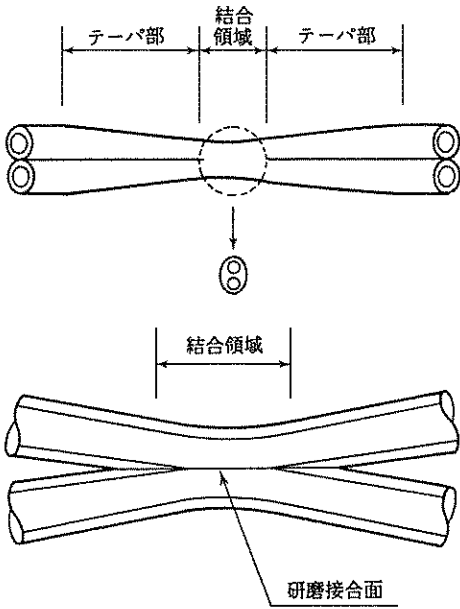


Fig. 1 Basic configuration of fiber couplers made by the stretch-fusion method (top) and the polish-fusion method (bottom).

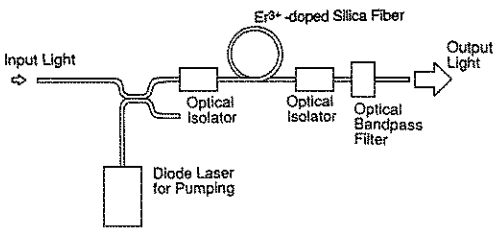


Fig. 2 Diagram of the erbium doped silica fiber amplifier (EDFA).

光を抑え、低い増幅利得はファイバーの長さを数十mにして、長さで必要な利得を確保している。ファイバーを長くすることによる損失増加は低損失ファイバーのCVD法を適用して抑制された。ファイバーへの励起光注入はファイバーカップラによって高効率化された。

ファイバークレーティングもファイバー型素子の大きな開発成果である。ファイバークレーティングはガラス材料の基礎的な研究成果が巧みに生かされ改良が進んだ。ゲルマニウムをドープしたシリカファイバーは紫外線を照射するとミクロに構造が変化して屈折率変化が生じることが見出された⁴⁾。さらに、高圧水素処理を行うと紫外レーザー照射で大きな屈折率変化が生じることがわかった⁵⁾。これらの現象に Fig. 3 の位相マスク法や干渉法を適用して精密な回折格子が製作できるようになり、波長選択フィルターなどに実用化された⁶⁾。

2.2 マイクロ型素子

マイクロ型素子では屈折率分布を有するマイクロレンズが種々の光部品開発を容易にした。1968年に登場したセルフフォーカスレンズは、細いガラスロッドを熔融塩に浸漬して一価イオンの交換を行いロッド内に軸対称の放物線状屈折率分布を形成している⁷⁾。急峻で滑らかな屈折率分布の超短焦点レンズ作用によって、ファイバーを伝搬した光のコリメーションや半導体レーザーから出射した光のファイバーへのカップ

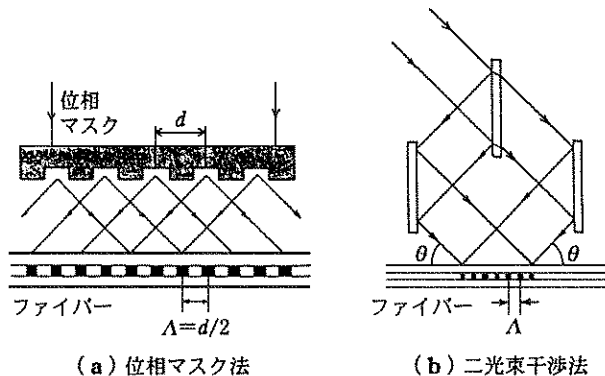


Fig. 3 Formation of the fiber Bragg grating using ultraviolet laser beam.

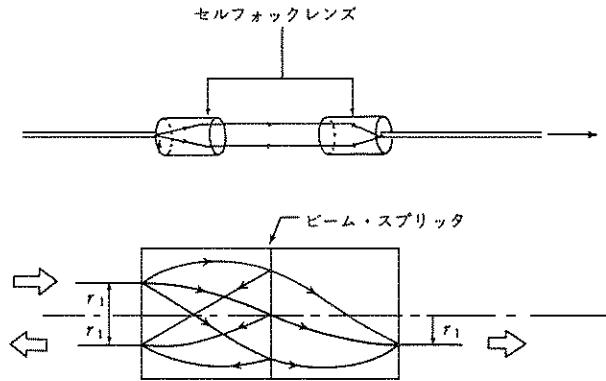


Fig. 4 Basic configuration of fiber collimators (top) and beam splitters (bottom) using graded index micro-lenses.

リングなどをコンパクトな部品構成で行うことができる⁸⁾。マイクロ型素子で光部品を構成するさいの課題は光軸合わせと信頼性である。屈折率分布型レンズは外周部を利用して軸合わせができ、またファイバーとレンズやフィルターを空間を設けずに密着できる。これらの利点がWDM やスイッチなどの部品製作を容易にした。Fig. 4 に屈折率分布型レンズで行う分岐結合の光学原理を示す。マイクロ型素子では、収差の少ない小型非球面レンズや開口数の大きい微小球レンズも開発され、半導体発受光素子とファイバーとのカップリングに数多く使用されている。また微小な多層膜干渉フィルターがWDM など多くの用途に使われている。


マイクロ型素子の大きな特長は、光通信ばかりでなく、各種の民生機器にも応用を開拓したことである。セルフフォーカスレンズアレイは複写機、ファクシミリ、プリンター、スキャナなどの光学系に広く採用された。これらの光学系ではアレイ状に配列した屈折率分布型レンズが短い距離で正立等倍の実像を結像する⁹⁾。民生機器への応用開拓によって生産量が大幅に拡大し、生産技術が確立するとともに低価格化が可能になった。また、照明光源のLED化、イメージセンサーの高密度化など、レンズアレイに関連する半導体デバイスが進歩し、これらの半

導体デバイスとの相性に恵まれたことも幸いした。

2.3 プレーナ型素子

プレーナ型素子は集積光学へのアプローチから生まれたマイクロオプティクスである。ファイバー型素子やマイクロ型素子に比べると、プレーナ型素子は研究開発と応用開拓に長い年月が必要であった。近年になってようやく基本になる製作技術が仕上がりに、光導波回路と平板マイクロレンズで実用化が始まった。光導波回路の試作研究は1970年代の初頭に開始されたが、1980年代の後半になって加入者系の通信回線にもシングルモードファイバーが採用されることが明白になり、技術開発はシングルモードが導波できる素子と応用部品に移行した。マルチモード回路に比べ、シングルモード回路が要求する仕様は格段に難しかったが、イオン交換法とCVD法による開発がそれぞれ行われた。イオン交換法ではシリカファイバーに近い低屈折率を有する高純度ガラス基板が開発され、銀とナトリウムのイオン交換による埋め込み型低損失シングルモード回路が製作できるようになった^{9),10)}。CVD法によるシングルモード回路も製作技術が完成し実用されるようになった¹¹⁾。光導波回路素子を用いてTable 2に示す種々の部品が開発され多彩な分野に応用が期待されて

Table 2 Optical waveguide circuit devices and their applications.

デバイス	用途
1×N分岐デバイス	公衆通信
2×N分岐デバイス	—アクセスネットワーク
	—基幹ネットワーク
アクセスカプラー	ケーブルテレビ
スターカプラー	ローカルエリアネットワーク
波長多重デバイス	コンピューター光応用機器
スイッチ	自動車光応用機器
マハツェンダー干渉デバイス	計測機器
	センサー

いるが、その最大の特長は多分岐を一括して行えることにある。北米における DWDM 伝送方式の本格化と国内における加入者系回線の π システム導入開始によって多分岐デバイスは実用段階に入ったが、光導波回路には次世代高度通信システムを実現する鍵の素子としての将来性がある¹¹⁾。

平板マイクロレンズはガラス基板上に微小なレンズをマトリックス状に配列している。イオン交換法による開発が 1980 年代の初頭に始まり¹²⁾、続いて感光性ガラスを熱処理する方法での開発が行われた¹³⁾。近年になってイオン交換法による平板マイクロレンズが二種の用途に使用されるようになった。一つはコンピュータや交換機の高速度大容量化を光ファイバー並列伝送で行うさいの光結合素子であり、他の一つは液晶カラープロジェクターへの応用であ

る^{14),15)}。後者の場合はプロジェクター光学系の簡素化と投射画像の明るさ向上に役立った。将来は光インターコネクションが重要な用途になり、そのための技術開発が進むであろう。

参考文献

- 1) S. E. Miller; B. S. T. J., 48, 2059 (1969).
- 2) R. J. Mears et al.; Electron. Lett., 22, 159 (1986).
- 3) D. L. Bisbee; B. S. T. J., 50, 3153 (1971).
- 4) G. Meltz et al.; Opt. Lett. 14, 823 (1989).
- 5) P. J. Lemaire et al.; Electron. Lett. 29, 1191 (1993).
- 6) 水波; 応用物理, 67, 1029 (1998).
- 7) I. Kitano et al.; Suppl. J. J. A. P., 39, 63 (1970).
- 8) 小泉; 光通信微小光学系システム設計応用の要点, 日本工業技術センター, 13, (1985).
- 9) N. Fabricius et al.; Proc. EFOC/LAN '88 (1988).
- 10) K. Grosskopf et al.; Proc. EFOC/LAN '92, 148 (1992).
- 11) M. Kawachi; Workshop Digest '94 Asia-Pacific Microwave Conf. 39 (1994).
- 12) K. Nishizawa and M. Oikawa; Microlens arrays, IOP Publishing, 17 (1991).
- 13) N. F. Borrelli; Microlens arrays, IOP Publishing, 1 (1991).
- 14) K. Kishimoto et al.; Proc. 16th Int. Cong. on Glass, 3, 103 (1992).
- 15) H. Hamada et al.; Conf. Rec. '94 Int. Display Res. Conf., 422 (1994).