

マイクロオプティクス

(その2. ニューガラスとしての将来性)

(株)日本板硝子材料工学助成会

小泉 健

“Micro-Optics” Part 2. Prospective Importance as A Leading New Glass

Ken Koizumi

Nippon Sheet Glass Foundation for Materials Science and Engineering

前号では過去30年に及ぶマイクロオプティクスの進歩の過程をガラス材料の面から振り返った。本号はマイクロオプティクスの今後の発展を展望しニューガラスとしての将来性を考察する。

3. ニューガラスとしての将来性

ファイバーアンプを活用する高密度波長分割多重(DWDM)伝送方式の北米での急激な普及と日本で始まる加入者系通信回線への π システム導入は、マイクロオプティクスに光産業としての魅力を与えている。将来の情報通信技術の発展を展望すると、そこでは光技術が果たす役割がますます増大し、高度な光機能を備えたマイクロオプティクス系ガラス材料の実現に対する期待が非常に大きい。また、最近の近接場光学系やフォトニック結晶などの研究の進歩には新しいマイクロオプティクスの芽生えを見ることができる。

3.1 DWDMの重要性

DWDMは波長の異なる多数の光信号を一本のファイバーに多重化して伝送する技術で、 $1.55\mu\text{m}$ 帯では、 1530.33nm から 1563.86nm までの約 33nm の範囲で 0.8nm 間隔の多重を行うことが現在の国際標準になっている。つまり、数十の波長を一本のファイバーに多重化して伝送するので、一波長で 10G ビット/秒の高速伝送を行う場合は、多重化により数百 G ビット/秒の超高速伝送が可能になる。北米ではインターネットの爆発的な普及によってデータ通信基幹回線伝送容量の大幅な拡大が急務になったが、DWDM伝送方式は敷設済みのファイバーを利用して経済的に対応できるので、その導入が急速に進んでいる。

Fig. 5にDWDM伝送方式の構成例を示す¹⁶⁾。先ず高密度に分割した波長を持つ多数のレーザービーム信号を送信機側のDWDMで一本のファイバーに合波する。合波のさいの光損失が大きい場合は各波長の光量をファイバーアンプで一括増幅する。長距離をファイバーアンプで繰り返し増幅して伝送した多重化ビームは受信機側のDWDMで波長毎の信号に分

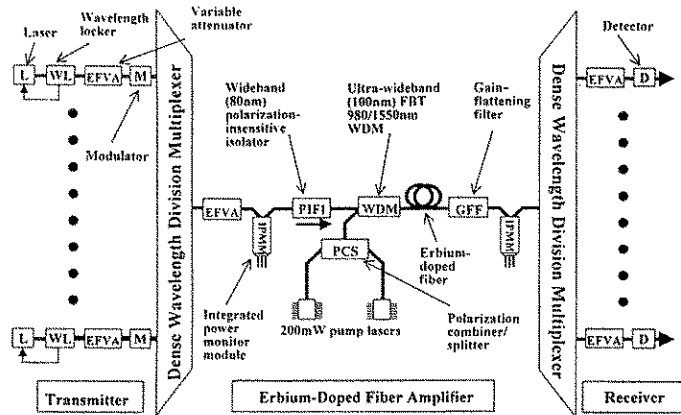


Fig. 5 Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) transmissions system¹⁶⁾.

波し検出する。分波前にファイバーアンプで増幅する場合もある。DWDM 本体の分波合波の光学系は、ファイバー型素子、マイクロ型素子、あるいはプレーナ型素子のマイクロオプティクスで構成する。図が示すように、DWDM 伝送方式は、DWDM 本体とファイバーアンプに加えて、波長ロッカー、アッテネーター、アイソレーター、利得平坦化フィルターなど各種の光部品で構成され、これらの部品はファイバークレーティング、ファイバーコーラ、マイクロレンズなど、各種のマイクロオプティクス素子を大量に使用する。

インターネットは北米のデータ通信ネットワークに新たな革新を生み、DWDM が重要な役割を担った。国内においても、インターネット利用がビジネスの仕組みを抜本的に革新し、新しいサービスとビジネスを創造する時代が迫っている。そこではデータ通信基幹回線の高速化が優先課題になり、DWDM とそれに関連する光部品の需要が立ち上がるであろう。データ通信ネットワークの次の大きな課題はルーターやスイッチのデータ交換速度の高速化である。テラビット/秒の高速速度を目指す交換処理においては光技術の導入が必至であり、DWDM を内蔵する高速 ATM スwitch などの開発が行われている。一方、加入者系回線に導入する光ファ

イバーの π システムはパッシブダブルスター方式を採用し、プレーナ型素子の多分岐光導波回路を大量に使用する。加入者系回線の光化が進むと、やがては加入者系回線にも DWDM を基軸にする広帯域技術が導入され、光波ネットワークあるいはフォトリックネットワークと呼ぶ次世代ネットワークの構築が始まると予測されている。これら情報通信ネットワークの将来動向は DWDM 関連の光部品群を魅力の大きい光産業に位置づけるであろう。

3.2 光機能性ガラス材料の高度化

Table 3 は最近の情報通信分野における光機能性ガラス材料の主要な開発成果を示している¹⁷⁻²⁸⁾。ファイバーアンプとファイバークレーティングの開発成果は波長多重利用の拡大を目的にしたもので、それらの高度機能化が利用拡大の鍵の役割を果たしている。また光導波回路を使う光機能デバイスの開発が活発になった。なかでも Fig. 6 に示すアレイ光導波回路グレーティングの基本構成²⁹⁾から発展した合波分波器の市場性は高く、すでに種々の DWDM 伝送システムに使用されている。光導波回路をプラットフォームにしたデバイスの多くは光波ネットワークの核になる光クロスコネクトノードや光分岐挿入ノードを目的にした開発である。

Table 3 Current R&D output of advanced glass components for optical communications system.

ファイバーアンプ Er-Yb 共ドープシリカファイバー ¹⁷⁾ (1.55 μm 帯高出力化) Er-Al 共ドープシリカファイバー ¹⁸⁾ (1.55 μm 増幅帯域拡大) Er ドープふっ化物ガラスファイバー ¹⁹⁾ (1.55 μm 帯利得平坦化) Er ドープテルライト系ガラスファイバー ²⁰⁾ (1.55 μm 増幅帯域拡大) Pr ドープふっ化物ガラスファイバー ²¹⁾ (1.3 μm 帯総合特性改善) Pr ドープ In 系ふっ化物ガラスファイバー ²²⁾ (1.3 μm 帯利得改善) Pr ドープカルコゲナイドガラスファイバー ²³⁾ (1.3 μm 帯利得改善)
ファイバークレーティング チャーフトファイバークレーティング ²⁴⁾ (波長分散補償) 長周期ファイバークレーティング ²⁵⁾ (増幅利得平坦化) 狭帯域ファイバークレーティング ²⁶⁾ (波長多重間隔縮小)
光導波回路 アレイ導波回路グレーティング ²⁷⁾ (分波合波器, 波長選択スイッチなど) 光導波回路プラットフォーム ²⁸⁾ (光スイッチ, WDM 送受信モジュール, 波長変換器, 高速波長フィルター等へのハイブリッド集積化)

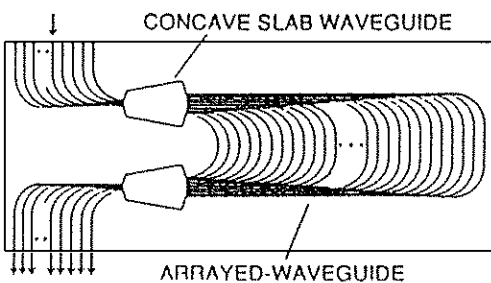


Fig. 6 Basic structure of Arrayed-Waveguide Grating Multiplexer²⁹⁾.

(注)光産業技術振興協会の調査研究は、分散化しマルチメディア化する利用形態の潮流を背景にして、情報通信技術がテラビット級の伝送速度、テラフロップス以上の処理速度、テラバイ

ト以上のファイル容量からなる超大容量情報システムの構築に向かうとしている。光技術に関しては、通信ネットワークでは波長多重と光スイッチング、情報処理では光インターコネクションと光スイッチング、情報ファイルでは新しい原理に基づく記録方式がそれぞれの鍵であると指摘している。この光技術の方向から見ると、新規なガラス材料が登場して主役になり、それもマイクロオプティクスの形態で高度な光機能を果たす機会がきわめて多い。なかでも光スイッチングを超高速度化するガラス材料の実現が強く期待されている。端的に言えば、現在活躍している光機能性ガラス材料の多くが屈折率分布を精密に形成して機能しているのに対して、将来の活躍が期待されているのは屈折率が超高速度に変化するガラス材料であって、この屈折率変化を利用して光スイッチング、すなわち光ビームの方向や位相を超高速度に変えたいということである。

3.3 最近の研究成果と新しい芽生え

国内における光機能性ガラスに関する研究は一層活発になった。基礎的な研究に対する関心も高く、例えば、科学技術振興財団の平尾誘起構造プロジェクトでは強い光や電界などの外部場がガラスに誘起する構造の発現機構と機能応用の研究を系統的に展開している。また最近は文部省の私立大学整備事業によって豊田工業大学に先端フォトンテクノロジー研究センターが開設され、シリカ系ガラスの光機能高度化に関する研究が始まった。以下に前述した光技術の方向にとって重要なガラス材料研究成果のいくつかを紹介する。

波長多重利用を拡大するファイバーアンプ用ガラスでは、テルライト系ガラスに大きな進歩があった。1994年に $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ 三成分系ガラスが光アンプに適するとの報告があったが³⁰⁾、その後のエルビウムドープテルライト系ガラスファイバーの開発によって、最近では Fig. 7 に示すように 1530 から 1610 nm までの 80 nm の波長域において一括増幅できるよう

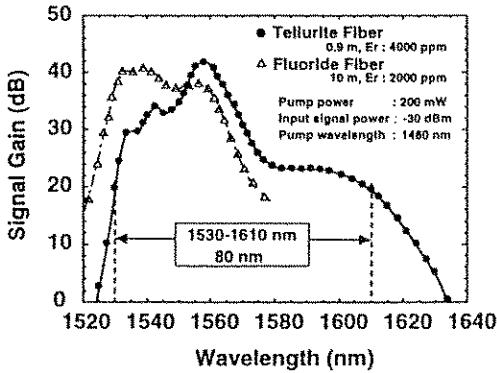


Fig. 7 Gain spectrum of Er^{3+} doped Tellurite glass fiber amplifier²⁰⁾.

になり²⁰⁾, ファイバーの光損失も 0.054 dB/m の低い値になった³¹⁾。この広い波長域は 100 波の波長多重が可能になることを意味している。また $\text{TeO}_2\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 三成分系の結晶化ガラスが透明化しファイバー化できることも報告され、ファイバーアンプ用テルライトガラス組成の選択領域が広がった³²⁾。波長変換や光スイッチングを行うガラスでは、酸化ゲルマニウム含有シリカガラスに紫外線を照射しながら高電場を印加することによって、光学結晶に匹敵する大きな二次非線形性の発現が見出された³³⁾。紫外光ポーリングという新規な手法でガラスに大きな二次非線形性が付与できることは、ガラス材料にも電気光学効果を利用する光スイッチへの可能性があることを意味している。全光式スイッチングを可能にする三次非線形ガラス材料の研究は依然として基礎研究の段階にあるが、ビスマス系ガラスで大きな三次非線形光学定数が得られ、光通信の実用波長域で 200 フェムト秒以下の高速応答性が確認された³⁴⁾。光導波回路の分野では、フェムト秒レーザーの超短パルス光をガラスに照射することによって、シングルモード伝搬可能な埋め込み型回路が形成できるようになった³⁵⁾。この技術には深さ方向にも曲がりをもつ三次元光回路が描画の手法で容易に製作できる新規性がある。超短パルス光が誘起する新しいガラス構造

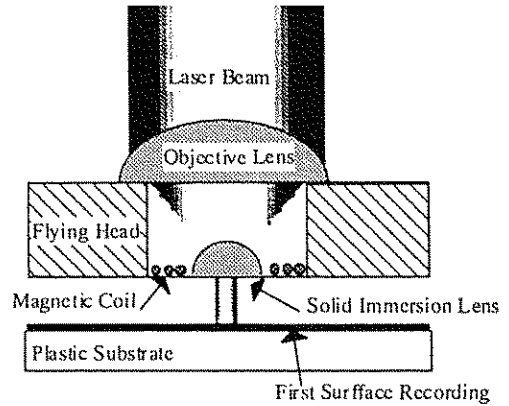


Fig. 8 Near field recording optical head using solid immersion lens³⁷⁾.

は、光導波回路形成ばかりでなく、コヒーレントフォノン生成、超高速屈折率変化、希土類イオン励起状態形成などを可能にし、ガラス材料の革新的な応用を拓く可能性がある³⁶⁾。

一方、光学や半導体材料の分野では、近接場光学系やフォトニック結晶など、ガラス材料系のマイクロオプティクスに大きな波及効果を持つ斬新な研究が展開されている。近接場光学系は波長以下の分解能を持つ光学顕微鏡に応用されたが、数十 G ビット/平方インチ級の超高密度光記録を行う次世代光ディスクにも応用される可能性がある。光学顕微鏡の近接場光学系は先端を針状に加工した光ファイバーを使用しているが、高速度で記録再生を行う光ディスクでは機械的信頼性の高い光学系が必要になる。そこで、Fig. 8 に示すような直径 1 mm 程度の半球状レンズを採用する光学系が考案された³⁷⁾。その後、二枚の対物レンズの組み合わせや球面と非球面の反射鏡で構成する方式なども考案され³⁸⁾、次世代光ディスクの開発は活発化している。フォトニック結晶は周期が光の波長と同程度の多次元周期構造を持つ結晶状の全く新規な概念の材料である。例えば Fig. 9 のような超微細構造が作製できると、内部に光が強く閉じ込められ、超低しきい値レーザーや超微小光回路が実現できるようになる³⁹⁾。現在の研究

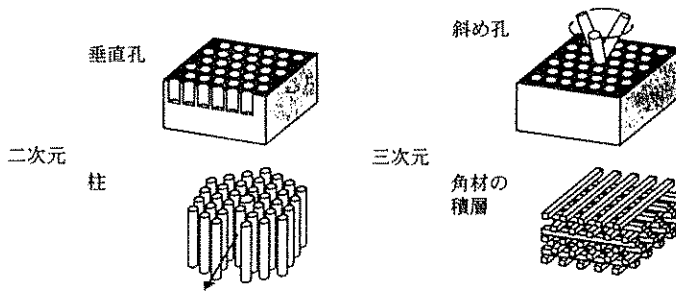


Fig. 9 Second and third dimensional structures of photonic crystals³⁹⁾.

は半導体材料と微細加工技術を用いて研究が行われているが、微細な構造が超短パルス光などを用いてガラス内部に精密に形成できるようになると、ガラスもフォトニック結晶の重要な材料になる。フォトニック結晶からは次世代のマイクロオプティクスに相当するナノ構造オプティクスが生まれる可能性がある。

4. おわりに

ガラス材料のマイクロオプティクスに対して、前号ではその進歩の過程を振り返り、本号ではニューガラスとしての将来性を考察した。ガラス材料系のマイクロオプティクスはファイバー型素子、マイクロ型素子、プレーナ型素子の三種に大別でき、種々の通信用光部品の要素素子として実用化された。特に、ファイバー型素子ではファイバーアンプとファイバグレーティングが光通信システムの高度化に大きく貢献し、マイクロ型素子では屈折率分布型レンズがWDMや光スイッチなどの光部品開発を容易にし実用化を促した。

近年のインターネットの爆発的な普及によって北米では通信回線容量の大規模な拡大が急務になり、DWDM伝送方式の急速な導入が始まった。国内においても同様な事態が近々始まるであろう。DWDMはガラス系のマイクロオプティクスを大量に使用する。その結果、DWDMに関連するマイクロオプティクスの光部品群は、光ファイバーケーブルと並ぶ重要な

光産業になるであろう。将来の情報通信技術は超大容量情報システムの構築に向かい、そこでは光技術の一層の活用、特に、波長多重の高度利用、光導波回路の高機能化、高速光スイッチングの実現等が鍵になる。光機能性ガラスの研究が活発化しているなかで、テルライト系ガラスによる増幅波長領域拡大や超短パルスレーザーによる光回路試作等は最近の重要な研究成果である。また、近接場光学系は次世代光ディスクを生む可能性があり、フォトニック結晶の研究は未来のマイクロオプティクスに発展するであろう。

参考文献

- 16) E-TEK Dynamics publication "Conection", 5, no. 2 (1998).
- 17) J. M. P. Delavaux et al.; ECOC'96, ThB3.6 (1996).
- 18) S. Yoshida et al.; OFC'96, TuD6 (1996).
- 19) S. Artigaud et al.; OFC'96, PD27 (1996).
- 20) A. Mori et al.; OFC'97, PD1 (1997).
- 21) M. Yamada et al.; IEEE Photon Technol. Lett., 7, no. 8, 869 (1995).
- 22) E. Ishikawa et al.; OAA'96, ThC2 (1996).
- 23) H. Tawarayama et al.; OAA'97, PD1 (1997).
- 24) L. Dong et al.; OFC'97, PD6 (1997).
- 25) P. F. Wysocki et al.; OFC'97, PD2 (1997).
- 26) T. A. Strasser et al.; OFC'96, PD8 (1996).
- 27) 鈴木他; 光学, 26, no. 8, 418 (1997).
- 28) 加藤他; '98年信学会総合大会予稿集, SC-3-1 (1998).
- 29) 高橋他; '92年信学会春季大会予稿集, C-230

- (1992).
- 30) J. S. Wang et al.; *Opt. Mater.* **3**, 187 (1994).
- 31) 森他 ; '98 年信学会総合大会予稿集, C-3-43 (1998)
- 32) K. Komatsu et al.; *Inorganic Materials*, **33**, no.10, 1069 (1997).
- 33) T. Fujiwara et al.; *J.J.A.P.*, **37**, Suppl. 37-1, 15 (1998).
- 34) 藤原他 ; 第 44 回応物連合講演会予稿集, no. 3, 1067 (1997).
- 35) 三浦 ; Hirao Active Glass Project NEWS, no. 2, 36, (1997).
- 36) 平尾 ; ERATO '97 研究報告会第三部講演要旨集, 51 (1997).
- 37) <http://www.terastor.com>.
- 38) 日経エレクトロニクス, no. 718, 47 (1998).
- 39) 馬場他 ; 応用物理, **67**, no. 9, 1041 (1998).