

超高 Δ ・低損失導波路用ガラス薄膜と 光回路形成技術

(株)ニューガラスフォーラム ナノガラス研究本部
ナノガラスつくば研究室

井本 克之

Fabrication Technology of Glass Films and Photonic Circuits for Super High Δ and Low Loss Waveguide

Katsuyuki Imoto

New Glass Forum, Tsukuba Research Laboratory NANOTECHNOROLOGY GLASS PROJECT

1. はじめに

光ファイバ通信システムへの波長分割多重 (WDM) 伝送方式の導入に伴い, AWG (Arrayed Waveguide Grating), 光 Add/Drop フィルタ, 光ビームスプリッタ等の光受動部品がガラス導波路構造で製造され, 実用化されるようになってきた^{1)~6)}。また LD や PD などをハイブリッド実装した光伝送モジュールも導入期に入ってきた。上記光部品の普及に伴い, それらの価格の急速な低下及び高性能化が要求されるようになり, より一層の低価格化, 超小型化, 低損失化技術の開発が必要になってきた。これらの要求に対応していくためには, ガラス導波路のコア層とクラッド層との比屈折率差 Δ の超高 Δ 化とガラス膜の超低損失化, 超高 Δ ガラス導波路と低 Δ ファイバとのスポットサイズ変換回路の実現化等を検討していかなければ

ならない。

本論文は, 導波路型光部品の低価格化及び高性能化を目指して, Δ が 3% 程度の超高 Δ 導波路構造とそれに用いるガラス薄膜の形成技術, それを用いた低損失光回路形成技術を開発した結果をまとめたものである。まず, 導波路の超高 Δ 化を図ることによって導波路型光部品の超小型化を狙う構想に対するメリットとその課題及び対策案について概説する^{7)~9)}。次に提案した超高 Δ 導波路構造及びそれに用いるガラス薄膜の形成技術, 光学特性について述べる¹⁰⁾。ついで上記導波路の低損失化を目指して開発したガラス薄膜の低損失化技術, 大面積・高寸法精度電子線直接描画技術, 及びドライエッチング技術を用いることによって実現した低損失導波路 (損失 < 0.05 dB/cm, 波長 1.55 μm) 及び光回路試作例について記述する¹¹⁾。

2. 導波路の超高 Δ 化に伴うメリットと課題及びその対策案

高屈折率の矩形状コア層を低屈折率のクラッ

〒300-2635 つくば市東光台 5-9-9
筑波研究コンベンション
TEL 029-848-1880
FAX 029-848-1882
E-mail: imoto@ngp.trc-net.co.jp

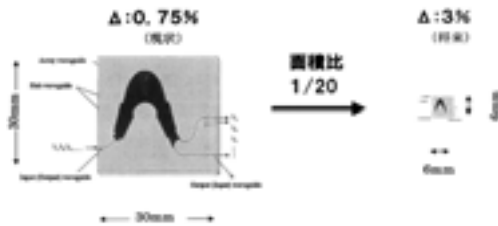


図1 AWGの超高Δ化による超小型化の可能性

表1 導波路の超高Δ化に伴うメリットと課題、対策案

メリット	課題	対策案
光部品 の超小型化 ↓ 超低コスト化	<ul style="list-style-type: none"> 損失の増大 (Δに依存) 散乱損失の増大 屈光分散損失の増大 低Δファイバとの接続にスポットサイズ変換回路が必要 基板の反りによるプロセスの再現性の低下 コア層とクラッド層との軟化温度のミスマッチング 	<ul style="list-style-type: none"> ガラス層の超低損失化 (新しい製造方法の開発) 導波路製造方法の改良 導波路構造と屈折率制御用ドーパントの探索 新方式スポットサイズ変換回路の開発 軟化温度の接近したコア層とクラッド層の材料の探索

ド層で覆った構成の埋め込み型導波路構造で光信号処理回路を実現するためには、一例として、図1のAWGで示すように、光信号の伝搬するコア層パターン形状を所望の幅を持たせて直線状及び曲線状パターンで組み合わせて構成しなければならない。この際にこれらの回路を超小型化していくためには、上記曲線状パターンの曲率半径Rを小さくしていかなければならない。このRは、光信号の曲げ損失に影響するために、Δが小さい場合にはRを大きく、Δが大きければ小さくすることができる。上記AWGの例で示すように、Δを3%にまで高くすることにより、Δが0.75%の場合に比して面積比を1/20に超小型化することが可能となり、抜本的な低コスト化を期待できる^{12),13)}。しかし、超高Δ化しようとする時、表1に示すような幾多の未解決な課題があるため^{7)~9)}、現状の製品は、Δはまだ0.75%であり、研究レベルでも1.5%の段階である。

表2 超高Δガラス導波路への取り組み構想

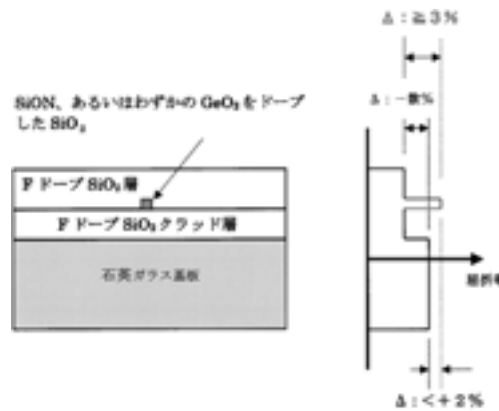
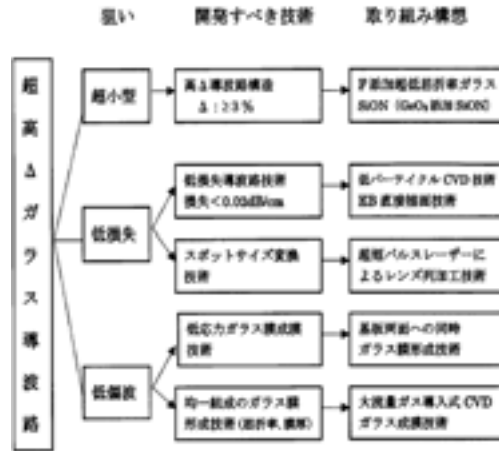


図2 超高Δガラス導波路構造

本研究は、表2に示すように、上記課題を解決することが可能な超高Δ・低損失ガラス導波路を実現することにある。

3. 超高Δ導波路構造とそのガラス材料

3.1 導波路構造

表1に示した課題を考慮に入れて提案した導波路構造を図2に示す¹⁰⁾。これは、石英ガラス基板上のFドープSiO₂クラッド層内にコア層としてSiON、あるいは、わずかのGeO₂をドーブしたSiO₂を用いた構造である。すな

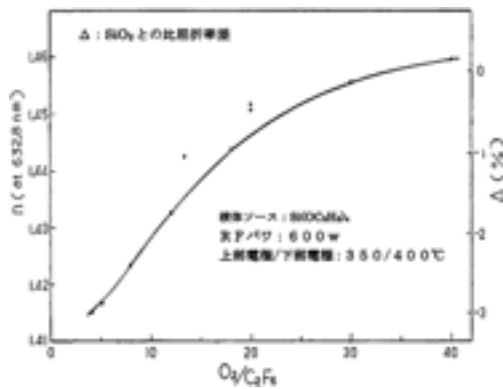


図3 Fドープガラス膜の屈折率, Δ のプロセス依存性

わち, Fドープ SiO_2 をクラッド層に用いることによって SiO_2 基板との Δ を一数%低下させるようにしてコア層の高屈折率化を緩和させるようにしたものである。これによりコア層とクラッド層との Δ を3%以上を実現するためにはコア層には Δ を1%程度高くする屈折率制御用添加物をドーピングすればよく, SiON , あるいは, わずかの GeO_2 をドーピングした SiO_2 で実現可能となり, 基板の反りを小さく抑えられる。

3.2 ガラス材料

Fドープ SiO_2 を用いた実用例として, 光ファイバがあり, SiO_2 との Δ は -0.7% (屈折率: 約 1.447, 波長 632.8 nm での値) が得られている。また以前から導波路のクラッド層としての検討結果の報告があるが, 超低屈折率を得るまでに至っていなかった^{14)~18)}。そこで, アルコレート系液体ソースを用いたプラズマ CVD 法で更なる超低屈折率 (Δ 値: -3% 程度) のガラス膜を実現することを試み, 達成することができた (図3)。また図4に示すように, このガラス膜の屈折率の熱処理温度特性も 1200°C の高温まで熱処理を施しても屈折率の変化が小さいことから, 安定なガラス膜であり, 導波路のクラッド層として使える見通しを得ることができた¹⁰⁾。

次に, コア層として, わずかの GeO_2 をドー

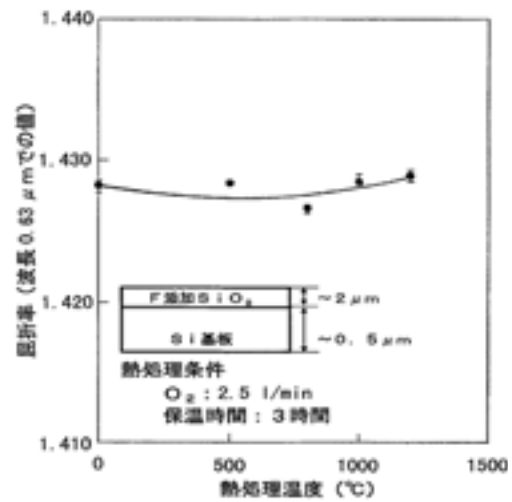


図4 Fドープガラス膜の屈折率の熱処理温度依存性

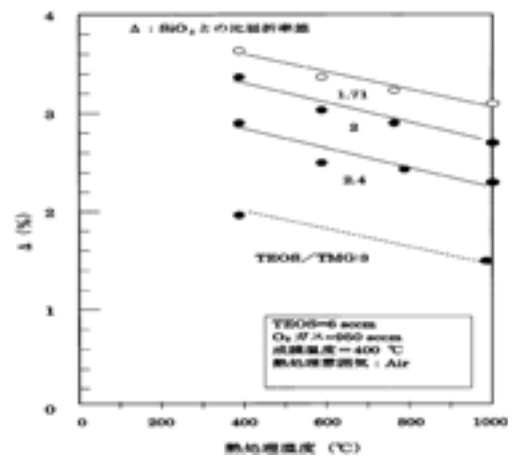


図5 Geドープガラス膜の Δ の熱処理温度依存性

ピングした SiO_2 ガラス膜の屈折率特性例について述べる。図5にアルコレート系液体ソースプラズマ CVD 法で実現した GeO_2 ドープ SiO_2 ガラス薄膜の Δ 特性の熱処理温度依存性を示す。図3と図5の結果から, 最大約6%の Δ を有する導波路構造 (図2) を得ることができる。

表3 基板表面にガラス膜を形成して構成したスラブ導波路及びそれを加工して得た埋め込み型導波路の損失要因



酸素流量/ソース ガスの総流量	パーティクルサイズ、数				伝播損失 @80nm, at 1.55 μ m
	90~8 μ m	M0~8 μ m	10~4 μ m	総数	
33.2	15	12	30	27	0.205
92.2	1	9	14	24	0.006

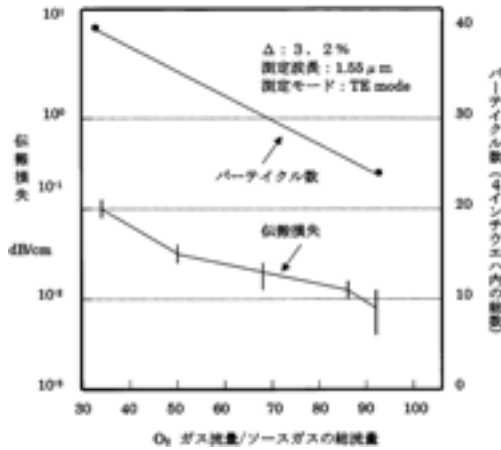


図6 超高 Δ スラブ導波路の伝播損失のプロセスによる低減

4. 超高 Δ 導波路の低損失化の検討

従来、超高 Δ 化に伴ってスラブ及び埋め込み型導波路の損失は大幅に増大するという問題点があり、超高 Δ 化を実現していく上での障害となっていた。この損失増大の要因は、表3に示すように、一つは、高 Δ 化させるためにコア層に屈折率制御用ドーパントを高濃度添加することによる材料固有の吸収損失及び散乱損失によるものであり、用いる材料に依存する。もう一つの要因は、作成プロセスに依存する損失である。すなわち、導波路は、コア層用ガラス膜を基板上に形成してスラブ導波路を形成するプロセスと、そのコア層用ガラス膜をフォトリソグラフィ、ドライエッチングプロセスで矩形状にパターン加工し、その加工面全体をクラッド層で覆って埋め込み型導波路を形成するプロセスからなる。スラブ導波路形成プロセスにおいては、ガラス膜中でのパーティクル混入による散乱損失、ガラス膜のOH基及び酸素欠陥による吸収損失がある。埋め込み型導波路

を形成するプロセスにおいては、上記パターンニングプロセスによって生じるコア層側面の荒れによる散乱損失とクラッド層形成プロセスの際のコア層とクラッド層界面の構造不整による散乱損失が要因として考えられる。すなわち、上記作成プロセスに依存する損失を如何に低減するかが課題であり、これらの損失低減に取り組んだ^{19)~21)}。

4.1 ガラス薄膜の低損失化

高 Δ 化に伴う損失増大を抑制する方法として、プラズマCVD法によるプロセス条件の最適化を図ることにより、ガラス膜成膜の際におけるパーティクル数の付着、混入を大幅に低減し、低損失特性を実現できる方法を見出した²¹⁾。すなわち、ガラス膜の成膜中のソースガス総流量に対する酸素ガス流量を大幅に増加させる方法であり、これにより損失を低減できることを見出した。図6にその一例を示すように、ソースガス総流量に対する酸素ガス流量を大幅に増大させることにより損失は低減して

いる。これは熱酸化反応の際の未反応物を大幅に低減することに寄与した結果としてパーティクル数を低減でき、これによって超高 Δ (Δ : 3.2%) スラブ導波路の低損失化が達成されたものと考えている。上記従来方法と本提案方法とのスラブ導波路へのパーティクル数混入量の比較結果からわかるように、本提案の方法を用いることにより、パーティクル数を $2/3$ に低減でき、しかも 1 から $3\ \mu\text{m}$ の S サイズのパーティクル数が 15 個から 1 個に激減されていることから、熱酸化反応時の未反応物が大幅に低減されて低損失化が達成されたものと考えられる。また本提案方法を用いることにより、波長 $1.39\ \mu\text{m}$ 付近の OH 基による吸収損失も低減しており、これもソースガス流量に対する酸素ガス流量を増大させることが寄与していると考えられる。

4.2 超高 Δ 導波路の低損失形成技術

石英基板上に形成した F ドープ SiO_2 の下部クラッド層上のコア層を矩形状に加工するため

には、まずコア層上にレジストパターンを形成し、そのレジストパターンをマスクにしてドライエッチングによりコア層を矩形状に加工しなければならない。図 7 にレジストパターンを形成する方法を示す。低損失導波路を実現していく上では、上記 3 つの方法の中でコア層側面の荒れを抑えて散乱損失を低くすることができる加工方法を選ばなければならない。紫外線露光やレーザー描画方法は紫外線の光を用いる方法であり、これを用いて露光、あるいは描画する方法では、コア層の側面荒れ、構造不整を生じさせ、その後のドライエッチングプロセスでさらに上記コア層の側面荒れ、構造不整が増して導波路損失を増大させる要因になっていた。

これに対して、今回開発した電子線描画方法では、電子ビームの波長が $0.07\ \text{\AA}$ 程度になり²²⁾、上記紫外線の波長 $310, 413\ \text{nm}$ に比して極超短波長で加工できる。しかも極細径 ($< 10\ \text{nm}$) のポイントビームで描画できる。したがって、図 8 のフォトリソグラフィと電子線

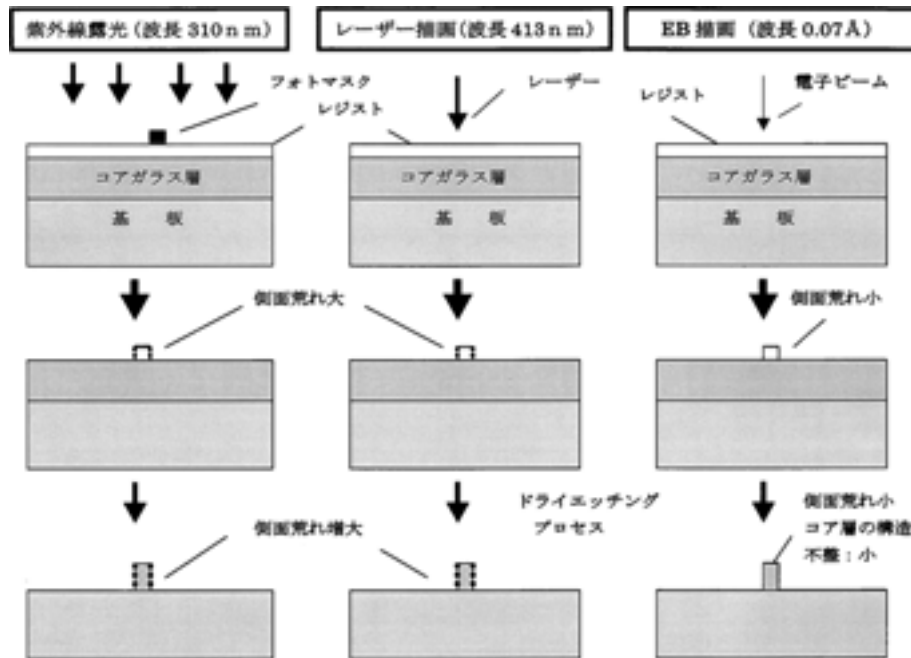


図 7 導波路コア層パターンの形成方法の比較

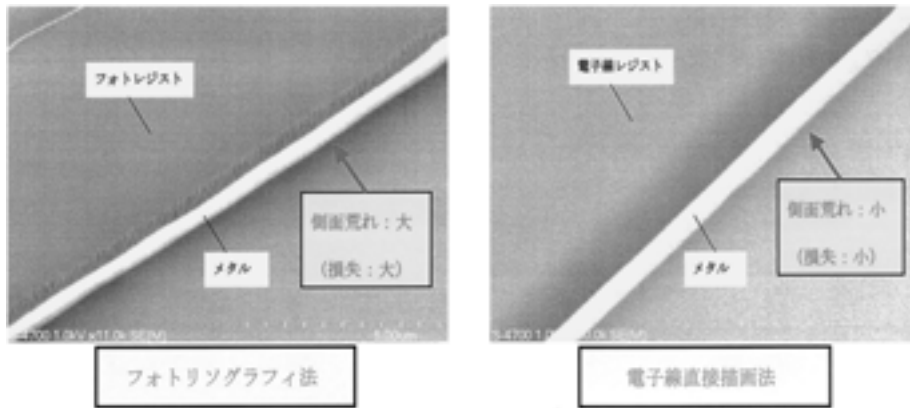


図8 フォトリソグラフィ法及び電子線描画法によるレジストパターンをマスクにしたメタル膜のドライエッチングパターンの比較

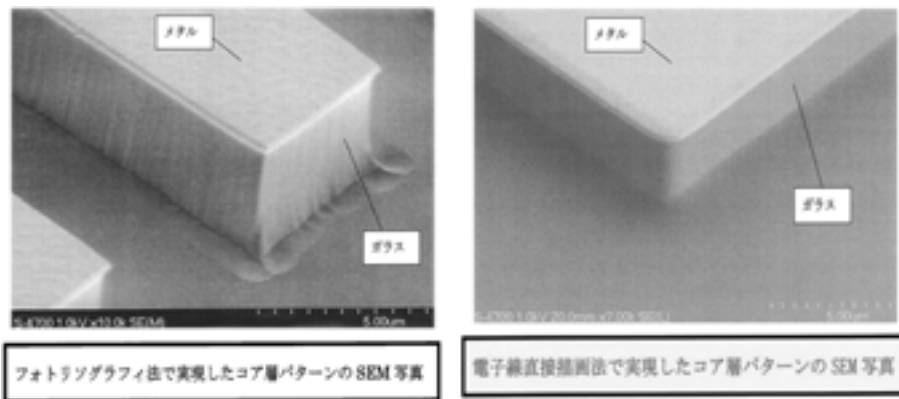


図9 フォトリソグラフィ法及び電子線描画法によるメタルパターンマスクによるコア層のドライエッチングパターンの比較

描画プロセスで作成したレジストパターンの比較結果からわかるように、電子線描画ではレジストパターン描画のプロセスでの側面荒れ、構造不整を大幅に低減することができた。またその後のドライエッチングプロセスでのコア層の側面荒れ、構造不整も小さく抑えることができ、均一な導波路を実現することができた(図9)。

電子線描画のもう一つの特徴は、超高 Δ 化していくと、図1に示したような光回路を極微小曲げ半径で構成することになり、電子線描

画はこのような極微小曲げ光回路を高寸法精度で滑らかな曲面に描画ができるので、その曲げ部での光散乱損失を大幅に低減できる可能性があることである。なお、開発した電子線描画装置は、レーザー干渉計、Z軸オートフォーカシング機構、電子ビーム回転抑制及びその補正技術、高精度温度制御機構などを導入しており、 $4\text{''}\phi$ の大面积基板面内で50nm以下のつなぎ精度でパターンを描画することができた。なお、上記超高 Δ 光回路用導波路の入、出力端に接続する低 Δ ファイバとのスポットサイズ

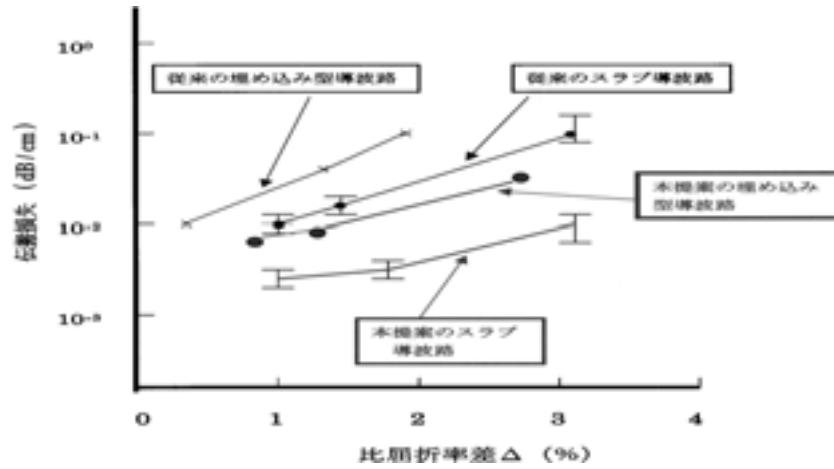


図 10 従来方法及び本提案方法のスラブと埋め込み型導波路の損失の Δ 依存性

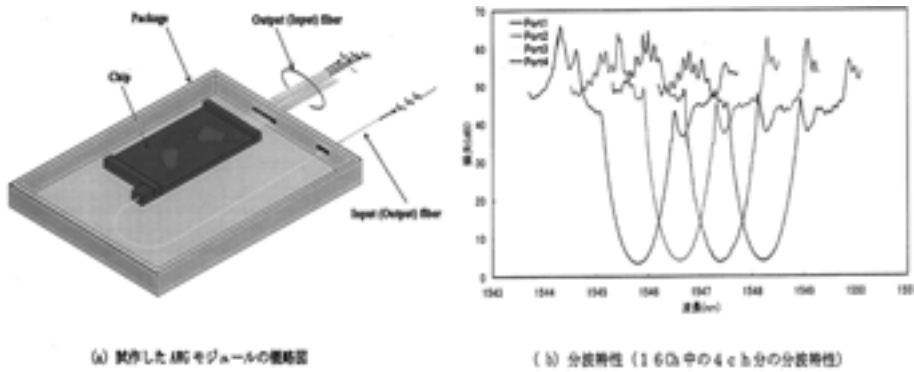


図 11 試作した AWG モジュールの概略図及び分波特性測定例

変換回路に関しては^{23)~27)}, 細径の超短パルスレーザービームを導波路入出力端面側か, フェイバ側のどちらかの内部に集光, 照射することによって屈折率の異なるレンズ状媒質を複数個形成する方法を検討している²⁸⁾。

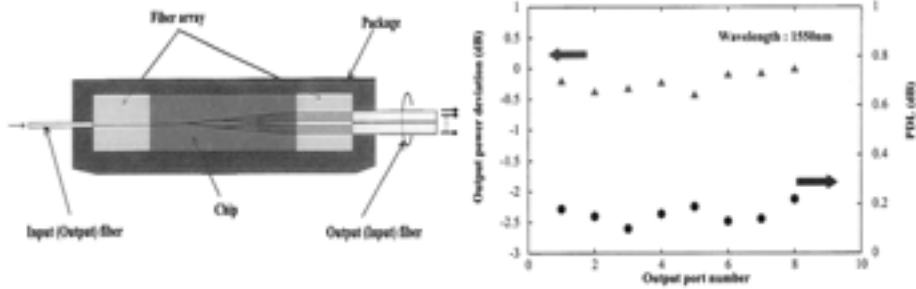
4.3 超高 Δ 導波路とそれを用いた光回路の試作例

石英ガラス基板上に低パーティクル, 低 OH 基, 低酸素欠陥のガラス膜を形成してスラブ導波路とし, それを加工して埋め込み型導波路を作成した。

図 10 に従来方法及び本提案方法で作成した

スラブと埋め込み型導波路の損失の Δ 依存性をまとめて示す。本提案方法で作成した導波路は, スラブ及び埋め込み型導波路のいずれも低損失特性であり, 超高 Δ 化による損失増大が抑制されている。また同図に示したように, Δ が約 3% の埋め込み型導波路において, 低損失特性 (< 0.05 dB/cm, 波長 $1.55 \mu\text{m}$) を達成することができた。

上記埋め込み型導波路を用いて試作した AWG モジュールの概観図及び分波特性の一例 (16 ch の分波特性における 4 ch 分の分波特性の測定例) を図 11 に示す。また図 12 に 1×8



(a) 試作した1×8ビームスプリッタモジュールの概略図 (b) 分岐偏差及びPDL特性の測定結果

図12 試作した1×8ビームスプリッタモジュールの概略図及びその光学特性

ビームスプリッタモジュールの概観図及び光学特性の測定結果を示す。いずれの場合もファイバとの結合損失を除いた過剰損失は従来よりも低損失特性（AWGの過剰損失：2 dB，ビームスプリッタの過剰損失：0.8 dB）を実現することができた。

5. 終わりに

Δ が3%程度の超高 Δ の低損失ガラス薄膜形成技術とそれを用いた埋め込み型光回路形成技術を開発した。まずガラス薄膜形成技術として、アルコレート系液体ソースを用いたプラズマCVD法により低パーティクルの高屈折率及び低屈折率ガラス薄膜形成技術を開発し、 Δ が2.5%以上の超高 Δ 導波路を実現できるようになった。また大面積にわたり高寸法精度の電子線直接描画技術と、ドライエッチング技術の開発により超低損失導波路（損失<0.05 dB/cm，波長1.55 μ m）を達成することができた。

今後は超小型光回路の実現を目指して更なる技術開発を進めていくと共に、上記光回路を光通信分野以外に、光信号処理，光計測・センサ，情報家電などへの応用を目指していかなければならない。

謝 辞

本研究は、NEDOの委託による「材料ナノ

テクノロジープログラム」の一部である「ナノガラス材料技術プロジェクト」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) T. Izawa, et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 38, p. 483, 1981.
- 2) M. Kawachi, et al., Electron. Lett., Vol. 19, 583, 1983.
- 3) K. Imoto, et al., ECOC 88, Sept., pp. 577-580, 1988, London.
- 4) K. Imoto, et al., 41st ECTC, May, Atlanta, Georgia, p. 483-488, 1991.
- 5) K. Imoto, et al., Ceramic Transaction, Vol. 33, pp. 43-56, 1993.
- 6) Y. Hida, et al., Electron. Lett., Vol. 36, 9, 821, 2000.
- 7) 井本, OPTRONICS, No. 260, pp. 116-121, 2003年8月号.
- 8) 井本, 月刊 MATERIAL STAGE, Vol. 3, No. 29, pp. 73-82, 2003年8月号.
- 9) 井本, 工業材料, Vol. 51, No. 8, pp. 36-41, 2003年8月号.
- 10) 井本, 第51回応用物理学関係連合講演会, 29a-ZC-3, 2004年3月.
- 11) 井本, 機能性ナノガラスの最新技術と応用, 榊シーエムシー出版, 2003年12月発行, pp. 138-174.
- 12) K. Imoto, Integrated Photonic Research, Topical Meeting, 62/ThE1-1-62/ThE1-3, Februry, 1994, San Francisco.

- 13) K. Imoto and A. Hori, *Electronics Lett.*, Vol. 28, no. 17, pp. 1665–1666, 1992.
- 14) 松村, 他, 1996年電子情報通信学会総合大会 C-224.
- 15) 松本, 他, 1996年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会 C-151.
- 16) 井本, 他, 1997年電子情報通信学会総合大会 C-3-4.
- 17) 井本, 他, 1997年電子情報通信学会総合大会 C-3-5.
- 18) 井本, 他, 1997年電子情報通信学会総合大会 C-3-6.
- 19) 井本, 他, 2002年電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-3-67, 2002年9月.
- 20) 井本, 他, 第43回ガラスおよびフォトニクス材料討論会, P-18, 2002年11月.
- 21) 井本, 他, 日本セラミックス協会ガラス部会フォトニクス分科会, 2003年1月.
- 22) 光・薄膜技術マニュアル, オプトロニクス社発行, pp. 250–253.
- 23) 井本, 堀, 信学技報 MW94-28, OPE94-21, pp. 37–42, 1994-6.
- 24) M. Mspuhler, et al., *IEEE J. Lightwave Tech.*, Vol. 16, no. 9, pp. 1680, 1998.
- 25) 水野, 他, 2001年電子情報通信学会エレクトロニクス大会 C-3-97.
- 26) 鈴木, 他, 2001年電子情報通信学会エレクトロニクス大会 C-3-98.
- 27) 井藤, 他, 2001年電子情報通信学会エレクトロニクス大会 C-3-67.
- 28) 特許出願番号, 特願 2002–301890, 2003–038569, 2003–038568, 2003–042475, 2003–058763.