

1次元フォトリック結晶を用いた 小型分波素子の試作

^{*1}ニューガラスフォーラム, ²日本板硝子株式会社技術研究所
³産業技術総合研究所関西センター, ⁴京都大学大学院

大家 和晃^{*1}・中澤 達洋²・橋高 重雄²・常友 啓司²
金高 健二³・西井 準治³・平尾 一之⁴

Fabrication of ultra-small demultiplexer using one-dimensional photonic crystal

Kazuaki Oya^{*1}, Tatsuhiko Nakazawa², Shigeo Kittaka², Keiji Tsunetomo²
Kenji Kintaka³, Junji Nishii³, Kazuyuki Hirao⁴

^{*1}New Glass Forum

²Nippon Sheet Glass Co., Ltd.

³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

⁴Kyoto University

序 論

現在の大都市間を結ぶ幹線系光通信の主流は、一本のファイバーで波長の異なる多くの光信号を一度に伝送することができる WDM (wavelength division multiplexing) 方式である。さらに近年ではメトロ・アクセス系への WDM 方式適用が検討されており、そこでは Dense WDM に比較して粗い波長間隔 (20 nm) と少ないチャンネル数 (4~16) (Coarse WDM 方式) が要求されている¹⁾。近年、光導波路技術を応用したモノリシックかつ小型な合分波器が報告されている²⁾。これは入出力チャンネル導波路や回折格子を 1 枚の石英基板上に集積加工した

もので、サイズが 10 mm 角程度と非常に小型である。また石英系の導波路なので、温度や湿度に対する安定性も高く、リソグラフィーによる一括加工による低コスト化も期待できる。我々はこれまでに、格子周期が光の波長と同程度で高アスペクト比である深溝回折格子を、元の矩形形状の空隙を残したままスラブ導波路内に埋め込んだ回折格子を作製しており³⁾、この埋め込み型深溝回折格子を用いた小型の導波路型分波素子を開発している⁴⁾。深溝回折格子の角度分散をさらに大きくすることができれば、さらなるデバイスの小型化が可能である。そこで我々は、平面波展開法によるバンド計算と有限要素法 (Finite-Element Method: FEM) を用いた電磁波解析を行い、格子の入出射端面を周期方向に対して傾斜させることにより、角度分散が非常に大きく、効率の高い出射光が得られる条件を見出した。本研究では、分散の大き

*〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1 丁目 8 番 31 号
産業技術総合研究所 関西センター
TEL 072-751-7946
FAX 072-751-4027
E-mail: kazuaki-ooya@aist.go.jp

な1次元フォトリック結晶の設計と試作を行い、これらを用いた小型分波素子の特性評価を行った。

分散の大きな1次元フォトリック結晶の設計

矩形の深い溝を持つ深溝回折格子は SiO_2 と空気からなる1次元フォトリック結晶 (one-dimensional photonic crystal: 1D-PC) とみなせる。PCにはフォトリックバンドギャップによる光の閉じ込めや伝播光の群速度異常、特異なバンド構造による非常に大きな波長分散といった均質媒体にはない特徴的な性質があることがよく知られている。僅かな波長差や入射角度差に対して大きな屈折角度差を得ることができる、いわゆるスーパープリズム効果は異常分散を巧みに利用した例である^{5),6)}。1D-PCにおいても、特異なバンド構造に由来するPCとしての特性を生かすことは十分に可能であり、深溝回折格子を1D-PCとして利用することで、僅

かな波長差によって出射光の角度が大きく変化する高分散機能を発現させることが可能である。

図1は、 SiO_2 と空気からなる1D-PC (深溝回折格子) において平面波展開法を用いて計算したTE偏光における第1フォトリックバンドである^{7),8)}。 SiO_2 と空気の屈折率はそれぞれ1.45, 1.00, デューティー比は0.5とした。規格化周波数 $\omega a/2\pi c (=a/\lambda_0)$ が同じ値となる点を結ぶことで図中の等高線が得られる。ここで、 ω は光の角振動数、 a は格子周期、 c は真空中での光速である。入射端面が格子の周期方向に対して平行である場合は、出射角度はブラッグ回折に従う。しかし、入射光を第2ブリルアンゾーン内の点P, Qを通る直線に沿って第2ブリルアンゾーン内でフォトリックバンドと結合させることができれば大きな角度分散を得ることが可能である。このような結合は、入射端面を周期方向に対して傾けることにより実現させることができる。格子内における光波の伝搬方向は、図1中に示されたベクトル図を用いることにより容易に調べることができる。入

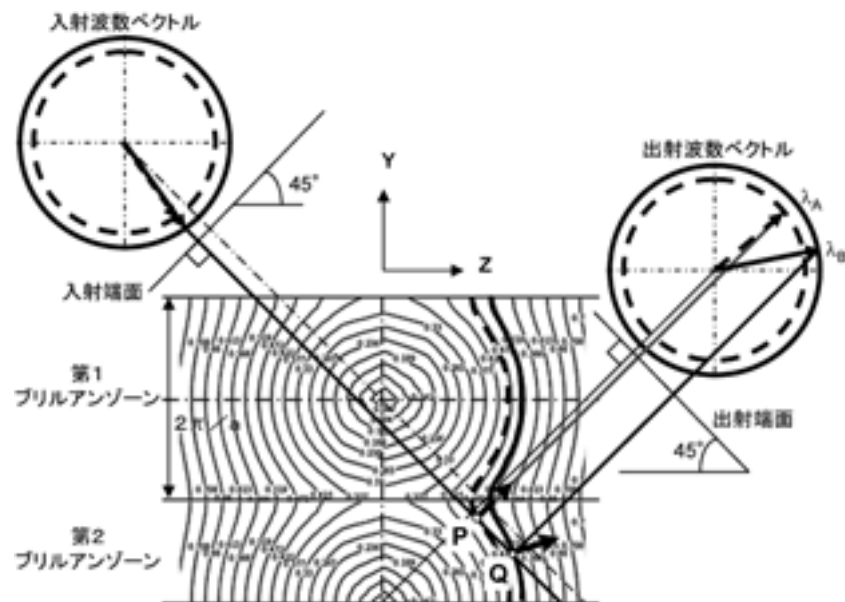


図1 1D-PC(SiO_2/Air) のTE偏光における第1フォトリックバンド

出射端面を周期方向に対して傾けた場合、角度 θ で格子に入射した波長 λ_A, λ_B の光は第2ブリルアンゾーン内の点 P, Q の位置でそれぞれバンドと結合し、格子内をバンドの法線方向に伝搬する。入射光はそれぞれ出射端面で屈折し、それぞれ異なる出射方向へ伝搬していく。格子外部に出射した2つの光の伝搬方向の差を高めるために、出射端面は入射端面に対して垂直でなければならない。本研究では、入射端面を周期方向に対して 45° 傾斜させた。

図2は、FEMで求めた格子内部の光波の伝搬イメージである。格子周期 a を 725 nm 、入射端面の傾斜角度をそれぞれ 45° とし、入射角度 θ は、単一の光波のみが格子内を伝搬するように $\theta = 15^\circ$ とした。図3(a)(b)は、規格化周波数 $a/\lambda_0 = 0.46, 0.48$ における電場の強度分布である。シミュレーション結果より、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯において 90% 以上の高い回折効率と、

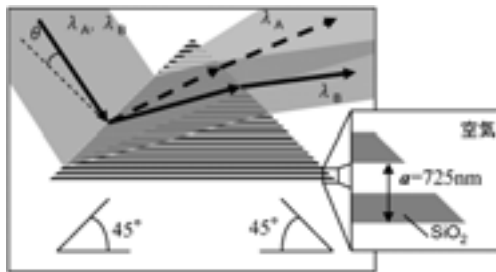


図2 光波の伝搬イメージ

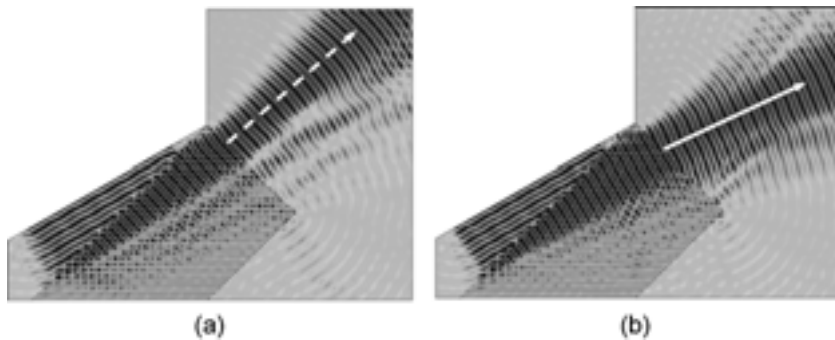


図3 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯における電場の強度分布 規格化周波数 0.46 (a), 0.48 (b)

1% の波長差に対する出射光の角度変化が 4.0° 以上となる大きな角度分散を得ることができた。この値は従来の回折格子(ブラッグ回折)に比べ約6倍の大きさに相当する。

埋め込み型 1D-PC の試作

図4は、傾斜した入射端面を有する深溝回折格子をスラブ導波路内部に埋め込んだ埋め込み型 1D-PC の模式図である。入射端面の辺の長さはそれぞれ 1.5 mm である。PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) により石英基板上にクラッド層 SiO_2 、コア層 Ge-SiO_2 の成膜を行い、厚さはそれぞれ $10\ \mu\text{m}, 5\ \mu\text{m}$ とした。コア層の屈折率が 1.46 となるように液体ソース原料 TEOS (tetra-ethoxy-silane), TMGe (tetra-methoxy-germanium) の流量をそれぞれ調節して成膜を行った。スピコートによりコア層上に塗布したレジストに電子線描画によって格子形状をパターンニングした後、真空蒸着により Ni マスクを成膜した。真空蒸着装置は抵抗加熱式を用い、Ni の膜厚が 200 nm 以上となるよう水晶振動子でモニターしながら成膜した。次にレジスト剥離液に浸漬することでリフトオフを行い、Ni マスクパターンを作製した。得られた Ni マスクパターンを用いてドライエッチングを行い、1D-PC を作製した。エッチングには ICP-RIE (induc-

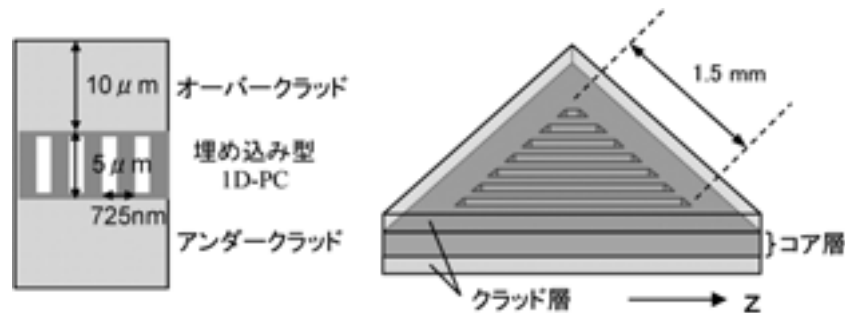


図4 深溝回折格子をスラブ導波路内部に埋め込んだ埋め込み型 1D-PC の模式図

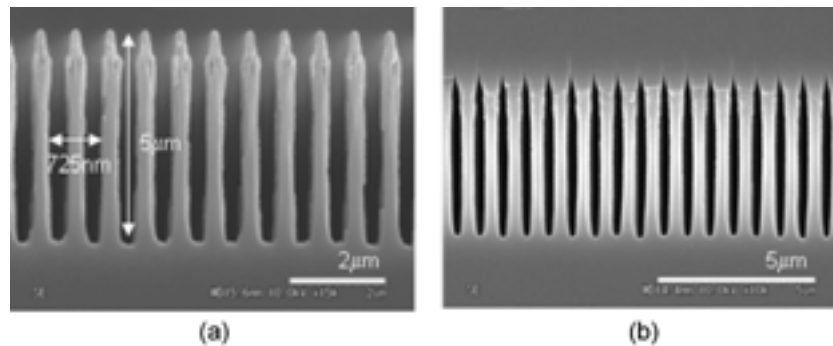


図5 埋め込み前(a)と埋め込み後(b)の 1D-PC の断面 SEM 写真

tive coupled plasma reactive ion etching) を、プロセスガスには C_3F_8 を用いた。Ni マスクを除去した後、1D-PC に PECVD でオーバークラッド層の成膜を行った。埋め込み前および埋め込み後の 1D-PC の断面 SEM 写真を図 5(a), (b) に示す。図 5(a) に示されているようにコア層に格子周期 725 nm、溝深さ約 $5 \mu m$ の深溝を作製することができた。また図 5(b) に示されているように溝をほぼ埋めることなくオーバークラッド層を成膜することができた。

小型分波素子の試作と特性評価

作製した埋め込み型 1D-PC における角度分散について特性評価を行った。光源には $1.51 \mu m \sim 1.59 \mu m$ の赤外光源を用い、偏波保持ファイバからの出射光が深溝回折格子に対して TE

偏光となるようにした。スラブ導波路のコア径は約 $5 \mu m$ であるため、偏波保持ファイバから出力された TE 偏光をセルフロックマイクロレンズ (SML) とロッドレンズ (BK7) を用いて線状に集光し、スラブ導波路へ入射させた。SML の焦点距離とロッドレンズの直径はそれぞれ 2.9 mm, 2.0 mm であり、ビームスポット形状は $5 \times 220 \mu m$ と見積もられる。出射端面には $f-\theta$ レンズと赤外 CCD カメラを配置し、図 6 に示す波長と出射角度の関係を求めた。図 6 のように波長と出射角度は良好な比例関係を示し、1% の波長差における出射角度の変化は 3.4° と見積もられた。これは、ブラッグ回折に比べ約 4 倍に相当する角度分散である。シミュレーションで予想された変化量よりもやや小さいが、その原因は、格子部分における作製誤差およびコアとクラッドにおける屈折率の

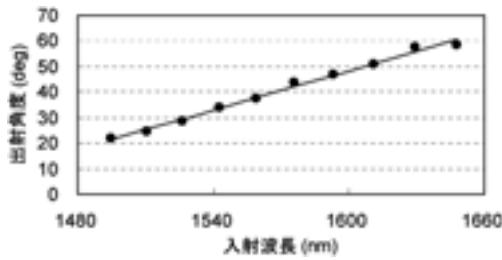


図6 入射波長と出射角度の関係

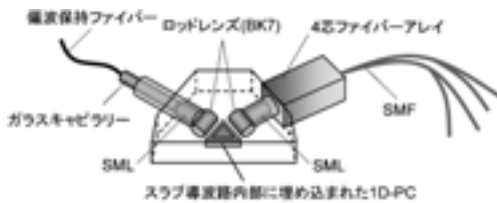


図7 埋め込み型 1D-PC を用いて作製した小型分波素子の模式図

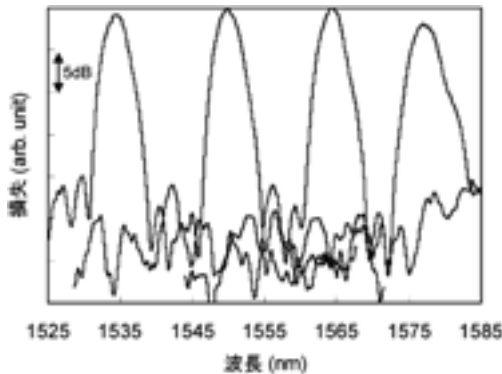


図8 小型分波素子の透過出力

不一致であると思われる。

次に、図7のように出射端面に入射端面と同様のレンズを配置し、コア間隔 $127 \mu\text{m}$ の4芯シングルモードファイバーアレイに出射光を結合させた小型分波素子を作製した。出力光を光ベクトルアナライザで評価したところ、図8に示されているようなピーク間隔 15 nm の透過出力を得ることができた。

まとめ

平面波展開法によるバンド計算と有限要素法を用いた電磁波解析を行い、分散の大きな1次元フォトニック結晶について詳細な検討を行った。計算結果より、格子の入出射端面を周期方向に対して傾斜させ、入射光を第2ブリルアンゾーン内のフォトニックバンドと結合させることにより、1%の波長差に対する出射光の角度変化が 4° 以上となる条件を見出した。ドライエッチングによりスラブ導波路のコア層に溝深さ $5 \mu\text{m}$ の1D-PCを作製し、PECVDにより溝を埋めることなくオーバークラッド層を成膜することができた。作製した埋め込み型1D-PCの角度分散を評価したところ、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯において1%の波長差に対する出射光の角度変化は 3.4° であり、入出射端面が格子に垂直な場合に比べて約4倍であった。また、埋め込み型1D-PCを用いて作製した小型分波素子の特性を評価したところ、ピーク間隔 15 nm の透過出力が得られた。今後は、入出力チャンネル導波路、凹面ミラーを同一基板に集積し、挿入損失などの光学特性の改善に取り組む予定である。

謝辞

本研究は、ナノテクノロジープログラム（ナノマテリアル・プロセス技術）「ナノガラス技術」の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託を受けて行われた。

参考文献

- 1) B. R. Eichenbaum and S. K. Das, "Economics for Choosing a Coarse WDM Wavelength Grid," in *Technical Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1444-1448 (2001).
- 2) C. N. Morgan, S. Yu and R. V. Penty, "Compact Integrated Silica Wavelength Filters", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14**, 1303-1305 (2002).

- 3) J. Nishii, K. Kintaka and T. Nakazawa, "High-efficiency transmission grating buried in a fused-SiO₂ glass plate," *Appl. Opt.* **43**, 1327–1330 (2004).
- 4) T. Nakazawa, S. Kittaka, K. Tsunetomo, K. Kintaka, J. Nishii and K. Hirao, "Compact and monolithic coarse wavelength-division multiplexer-demultiplexer fabricated by use of a high-spatial-frequency transmission grating buried in a slab waveguide," *Opt. Lett.* **29**, 1188–1190 (2004).
- 5) H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato and S. Kawakami, "Superprism phenomena in photonic crystals," *Phys. Rev. B* **58**, R10096–10099 (1998).
- 6) T. Baba, T. Matsumoto and M. Echizen, "Finite difference time domain study of high efficiency photonic crystal superprisms", *Opt. Express.* **19**, 4608–4613, (2004).
- 7) J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn, *Photonic crystals* (Princeton Univ. Press, Princeton, NJ 1995).
- 8) M. Plihal and A. A. Maradudin, "Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice", *Phys. Rev. B* **44**, 8565–8571 (1991).