

# ブラッググレーティング導波路を用いたシリコンフォトニックデバイス

シンガポール マイクロエレクトロニクス研究所  
光 電 子 技 術 研 究 所

Hwee-Gee Teo · Ming-Bin Yu · Guo-Qiang Lo  
五 井 一 宏<sup>1</sup> · 佐久間 健<sup>2</sup> · 小 川 憲 介<sup>3</sup>  
官 寧<sup>4</sup> · Yong-Tsong Tan<sup>5</sup>

## Development of Silicon Photonic Device Based on Bragg Grating Waveguide

H. G. Teo, M. B. Yu, G. Q. Lo, K. Goi, K. Sakuma, K. Ogawa, N. Guan, and Y. T. Tan

シリコンフォトニクスは、小型・高集積・電気による特性制御など多くの特長から注目を集めている。ブラッググレーティングは多様な光フィルタを実現できる構造であるが、シリコン基板上に作製する場合、導波路の複屈折性が課題となる。そこでわれわれは新たに複屈折性を解消できる導波路構造を開発した。逆散乱法を用いた、複雑な光学特性を実現するブラッググレーティングパターンの設計手法と共に、新規断面構造を用いたシリコンフォトニックデバイスの開発について紹介する。

Silicon photonics has attracted considerable attention for fascinating features such as compact size, integration of various functional devices, and controllability by electronics. Bragg grating is used for various optical filters. One of the problems in the development of Bragg grating as silicon photonic device is birefringence of the waveguide. Therefore, we developed a new design of nonbirefringent waveguide. Additionally, an inverse scattering method enables realization of Bragg grating pattern for complicated optical characteristics. The development of the silicon photonic device using the nonbirefringent waveguide and the design by inverse scattering method is introduced.

### 1. ま え が き

近年の情報通信量の増加に応じて、光通信網では一つのファイバの中に波長の異なる複数の光信号を伝送させる高密度波長分割多重 (DWDM) 方式が利用されている。DWDM 方式では、一部の波長のみを出し入れする光アドドロップフィルタを始め、複数の波長チャネルに応じた広い帯域にわたって利用される光フィルタが多用される。このような複雑な光フィルタを実現する技術の一つとしてブラッググレーティングが注目されており、各チャネルに対応したブラッググレーティングを複数重ねて形成した波長分散補償デバイスが実現されている<sup>1)</sup>。

一方、光部品をシリコン基板上に実現するシリコンフォトニクスが近年注目を集めている。シリコンは比較的大きな屈折率を持つ材料であり、シリカ等の比較的小さな屈折率を持つ材料と組み合わせることで高屈折率差導波路を構成できる。高屈折率差導波路では、光の閉じ込めが強いため、急峻な曲げが可能であり、また導波路自体も小さいため、デバイスの小型化が可能である。

さらに、半導体材料であることから、電気により制御可能な光部品の実現や、エレクトロニクス分野で培われてきた加工技術、量産技術の利用など、数多くの長所を持つ。このような背景から、ブラッググレーティング導波路を用いたシリコンフォトニックデバイスについての研究が行われている<sup>2)</sup>。

シリコンフォトニクスのように平面基板上の導波路を使用したデバイスにおける課題の一つとして、導波路の複屈折性がある。平面基板上の導波路は一般的に、断面構造において水平方向、垂直方向で異なる構造であることが多い。このため、水平方向に偏向した導波光と、垂直方向に偏向した導波光では、導波路中での等価的な屈折率である実効屈折率が異なる。結果として、光学特性に偏光依存性が生じる。この課題に対して、導波路の幅、厚みを適切に形成することで、導波路の複屈折性を解消できることが知られている。しかし、導波方向に複雑な変化を持つブラッググレーティング導波路では、複屈折性を解消することは困難である。

当社では、シリコンフォトニクスに着目してデバイスの開発を行ってきた<sup>3)</sup>。本報告では上述の課題に対応した、シリコンフォトニクスを始めとする平面基板型導波路に適用可能なブラッググレーティング導波路の開発について紹介する。

1 応用電子技術研究部  
2 応用電子技術研究部 主席研究員 (博士 (工学))  
3 応用電子技術研究部 主席研究員 (理学博士)  
4 応用電子技術研究部 上席研究員 (学術博士)  
5 応用電子技術研究部 (Ph. D)

略語・専門用語リスト	正式表記	説明
略語・専門用語 DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	光ファイバ上で波長が異なる複数の光信号を高密度に多重化して伝送する技術。
シリコンフォトニクス		シリコン基板上に高屈折率導波路や各種光機能を持つ素子を作製する技術。本稿では光フィルタの開発について紹介する。
ブラッググレーティング		屈折率を周期的に変化させた回折格子。ブラッグの法則に基づく光の回折を利用する 一例として、コアの屈折率を周期的に変化させた導波路がある。
複屈折性		偏光方向の異なる光に対して異なる屈折率を持つ性質。
TE 型モード・TM 型モード		導波路を伝播する光の状態を示し、本稿では、電界方向が主に基板に対して水平方向のものを TE 型モード、垂直方向のものを TM 型モードと呼ぶ。TE は Transverse Electric, TM は Transverse Magnetic の略。
逆散乱法		ある領域で散乱された波や粒子の情報からその領域の構造や性質を求める手法。本稿では光の反射スペクトルから実効屈折率分布を求める。
実効屈折率		導波路を伝搬する光に対する実効的な屈折率。

## 2. 偏光無依存型導波路構造の設計

### 2.1 基板型導波路の制限

平面基板型導波路の製造プロセスにおける導波路パターン形成は、一般的にフォトリソグラフィを利用したエッチングマスクの形成と、このマスクを利用したエッチングによる基板の掘削により行われる。このとき基板水平方向の構造は、その構造を反映したマスクにより一度に実現される。一方、垂直方向の構造はエッチングにより全面一様に形成される。したがって、垂直方向に複雑な構造を形成するには、多数の工程を繰り返す必要がある。経済性を考えると垂直方向の変化は少ない方が望ましい。

平面基板上のブラッググレーティング導波路は、導波方向に導波路の構造を変えることで必要な実効屈折率分布を得る。複雑な光学特性を持つ光フィルタを実現するためには、導波方向に周期や振幅が多様に変化する実効屈折率分布が必要となる。したがって、実効屈折率分布は導波路構造に準ずるため、導波路構造も多様に変化させる必要がある。しかしながら、基板垂直方向に複雑な変化をもつ構造を製造することは難しいため、偏光依存性の解消と複雑な光学特性の両立したデバイスを作製することは困難である。

そこで、われわれは、導波路の複屈折性を水平方向の構造の変化のみで解消できる導波路構造を考案した。この構造ではブラッググレーティングに必要な実効屈折率分布を与える導波路構造を水平方向の構造変化のみで実現することができる。

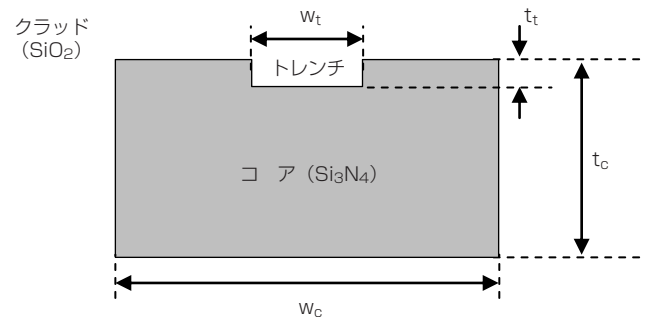


図1 導波路断面図

Fig. 1. Schematic cross-section of waveguide.

### 2.2 導波路構造

図1に断面構造の外形図を示す。導波路は、窒化シリコン ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) からなるコアと、シリカ ( $\text{SiO}_2$ ) からなるクラッドにより構成される。近年、コアに  $\text{Si}_3\text{N}_4$  を用いた導波路の低損失化が報告されている<sup>4)</sup>。コアは、矩形導波路を基に上部にトレンチを設けた形状である。

導波路を伝搬する TE 型モード、TM 型モードの実効屈折率は、図に示す各導波路寸法に依存し、一般的には両者で異なる値をとる。しかし、コア厚み  $t_c$  およびトレンチ深さ  $t_t$  を固定したまま、コア幅  $w_c$  およびトレンチ幅  $w_t$  を調整することで、両モードの実効屈折率を、特定の実効屈折率範囲に渡って一致させることが可能である。

これにより、ブラッググレーティングに必要な実効屈折率分布をもつ導波路を、コア幅  $w_c$  およびトレンチ幅  $w_t$  を変化させることにより構成することができる。コア厚み  $t_c$  およびトレンチ深さ  $t_t$  で決まる基板垂直方向の構

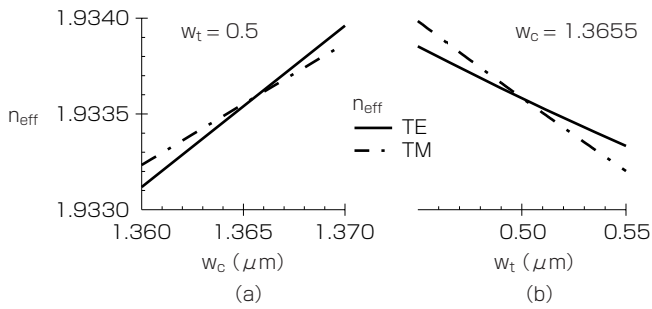


図2 実効屈折率の変化, (a)トレんチ幅  $w_t$  一定の場合, (b) コア幅  $w_c$  一定の場合  
 Fig. 2. Effective refractive index changes under the condition that (a)  $w_t$  is fixed and (b)  $w_c$  is fixed.

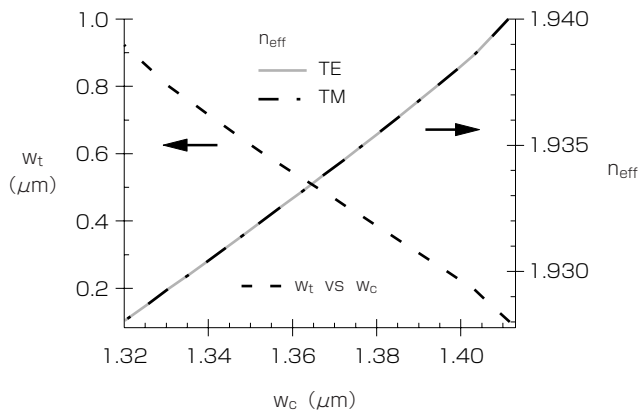


図3 導波路寸法と実効屈折率の関係  
 Fig. 3. Relation between each width and effective refractive indices.

造は導波路全体で一様なので、フォトリソグラフィとエッチングによる製造プロセスで作製することが可能である。

### 2.3 導波路寸法と実効屈折率の関係

コア厚み  $t_c = 1.4 \mu\text{m}$ , トレんチ深さ  $t_t = 0.1 \mu\text{m}$  とした場合についての設計例を示す。

図2では、コア幅  $w_c$  およびトレんチ幅  $w_t$  のうち一方のみ変化させた場合について、各導波モードの実効屈折率  $n_{\text{eff}}$  の変化を示している。(a)はトレんチ幅  $w_t = 0.5 \mu\text{m}$  としてコア幅  $w_c$  を変化させた場合、(b)はコア幅  $w_c = 1.3655 \mu\text{m}$  としてトレんチ幅  $w_t$  を変化させた場合である。それぞれの図からわかるように、コア幅  $w_c$  の変化はTE型モードの実効屈折率により大きな変化を与え、トレんチ幅  $w_t$  の変化はTM型モードの実効屈折率により大きな変化を与える。したがって、両者を同時に変化させることで、両モードの実効屈折率を一致させたまま増減させることができる。

図3に、実効屈折率範囲1.928～1.940に渡って、TE型モードとTM型モードの実効屈折率が等しくなるように求めたコア幅  $w_c$  およびトレんチ幅  $w_t$  と、その場合の各モードの実効屈折率  $n_{\text{eff}}$  の関係を示す。コア幅  $w_c$  を横軸に、トレんチ幅  $w_t$  を左の縦軸に、実効屈折率  $n_{\text{eff}}$  を右の縦軸にプロットしてある。コア幅  $w_c$  のトレんチ

幅  $w_t$  に対する対応曲線に従うことで、両モードの実効屈折率を図の範囲に渡って一致させることができる。

## 3. ブラッググレーティングパターン設計

### 3.1 逆散乱アルゴリズムを用いた設計手法

ブラッググレーティングパターンとして光の導波方向の実効屈折率の変化である実効屈折率プロファイル  $n_{\text{eff}}(z)$  を設計する。実効屈折率プロファイルが分かれば、図3に例示した実効屈折率  $n_{\text{eff}}$  とコア幅  $w_c$  およびトレんチ幅  $w_t$  との対応関係により、これらの幅の光の導波方向の分布である導波路寸法プロファイル  $w_c(z)$  および  $w_t(z)$  へと変換することができる。

実効屈折率プロファイルの導出には、逆散乱アルゴリズムを利用する<sup>5)</sup>。グレーティング導波路における光の進行波、後退波を考えると、Maxwell方程式は結合モード方程式へと変形される。波のポテンシャルによる散乱を考えると、散乱された波の情報からポテンシャルを求める問題を逆散乱問題という。結合モード方程式における逆散乱問題では、Gel'fand-Levitan-Marchenko (GLM) 方程式を利用した解法が知られている<sup>6)</sup>。この方程式はインパルス応答と実効屈折率から変換したポテンシャルプロファイルを対応づける。反射スペクトルはインパルス応答のフーリエ変換であるので、反射スペクトルからGLM方程式を利用して最終的に実効屈折率プロファイルを求めることができる。

以上の手順を整理すると、以下ようになる。

- (1) デバイスに要求される反射スペクトルを定義する。
- (2) 反射スペクトルを逆フーリエ変換によりインパルス応答へ変換する。
- (3) インパルス応答から、GLM方程式を用いた逆散乱アルゴリズムを利用して、数値計算によりポテンシャルプロファイルを求める。
- (4) ポテンシャルプロファイルを実効屈折率プロファイルへ変換する。
- (5) 実効屈折率プロファイルを導波路寸法プロファイルへ変換する。

### 3.2 波長分散補償素子グレーティング設計

波長分散補償素子の設計を例として示す。目的とする波長分散補償素子の特性は、Lバンド50チャンネルに対応したものである。各チャンネル間隔は100 GHzであり、分散補償量はDispersion Shifted Fiber (DSF) 40 kmに対して、分散スロープも含めて対応するものである。この波長分散補償素子が備えるべき特性として、反射スペクトルを図4に示す。図には簡単のため群遅延スペクトルのみを表してある。電界反射率は50チャンネル全領域に渡り一定で0.9である。

この反射スペクトルより逆散乱アルゴリズムを用いて求めた実効屈折率プロファイルを図5に示す。同時に表している右上部の図は、ブラッググレーティングの入射端を  $z = 0 \text{ mm}$  とした  $z = 4.294 \text{ mm}$  付近の拡大図で

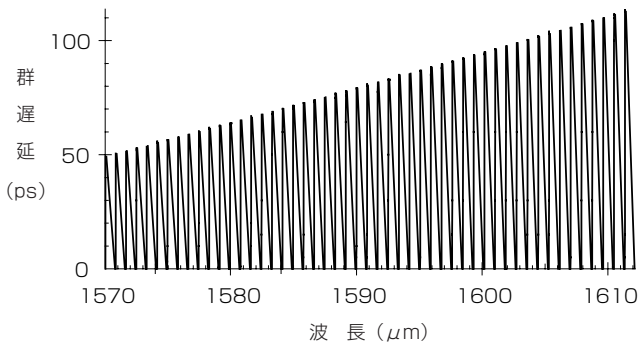


図4 分散補償素子に必要とされる群遅延スペクトル  
Fig. 4. Group-delay spectrum required for the chromatic dispersion compensator.

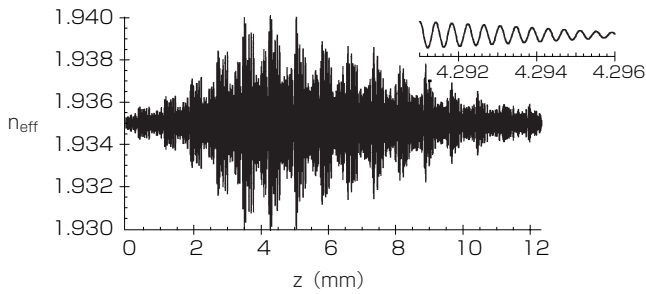


図5 計算により得られた分散補償素子の  
実効屈折率プロファイル  
Fig. 5. Calculated effective refractive index profile for CDC.

ある。なお、図では、逆散乱アルゴリズムにより得られた結果を Whittaker Shannon の内挿公式により 10 倍に補間してある<sup>7)</sup>。結果的にサンプリング周波数はブラッググレーティング周期の約 1/50 となっている。

拡大図にみられる局所周期は、今回設計した L バンド帯をブラッグ波長とした場合のグレーティング周期に対応していることがわかる。

3. 3 設計した実効屈折率プロファイルの反射特性

逆散乱アルゴリズムにより求められた複雑な実効屈折率プロファイルに対して、スペクトログラムによる解析

を行う。

スペクトログラムは、所定の時間波形に時間ゲート関数を乗じてフーリエ変換を行い、変換後の強度分布を時間ゲート関数の遅延時間と周波数に対して表示する手法である<sup>8)</sup>。導波路の座標軸は、光速度を係数として除することで時間に等価な次元となり、実効屈折率プロファイルは一種の時間波形とみなすことができ、スペクトログラムを適用することができる。

図 6 (a) に、実効屈折率  $n_{eff}$  を、平均屈折率  $n_{av}$  と振動成分  $\Delta n_{eff}$  に分解し、振動成分  $\Delta n_{eff}$  に対して求めたスペクトログラムを、振動成分  $\Delta n_{eff}$  の分布と共に示す。図 6 (b) には、中心波長 1591.255 nm のチャンネルに対応する部分についての拡大図を示す。スペクトログラムの縦軸である遅延時間は、導波路位置座標より変換されたもので、そのフルスケールが導波路長に等しい。スペクトログラムの横軸は、周波数から光速度で換算して得られるブラッググレーティングの局所周期  $\Lambda$  に対応したブラッグ波長である。時間ゲート関数には、半値半幅約 10 ps のガウス関数を用いた。

図 6 (b) に見られるように、一つの波長チャンネルに注目すると、ブラッググレーティング導波路は前方から後方に向かって局所周期、即ち対応するブラッグ波長が変化しており、分散補償素子のスペクトルを反映していることがわかる。全体では、図 6 (a) からわかるように、50 個の各チャンネルに渡って同様の傾向が見られる。このことから、得られたブラッググレーティングパターンは各チャンネルに対して分散を与えるブラッググレーティングパターンが、同一箇所に重ね合わせられたものであると考えることができる。また、チャンネル間でブラッグ波長と遅延時間の対応関係に変化が見られ、分散スロープも含めた特性が反映されていることがわかる。

3. 4 ブラッググレーティングプロファイルの導出

次に、実効屈折率プロファイルより最終的な導波路構造を表す、コア幅  $w_c$  およびトレンチ幅  $w_t$  の光の導波方向の分布である導波路寸法プロファイル  $w_c(z)$  および  $w_t(z)$  を求める。デバイスの製造を考えると、曲線を多分

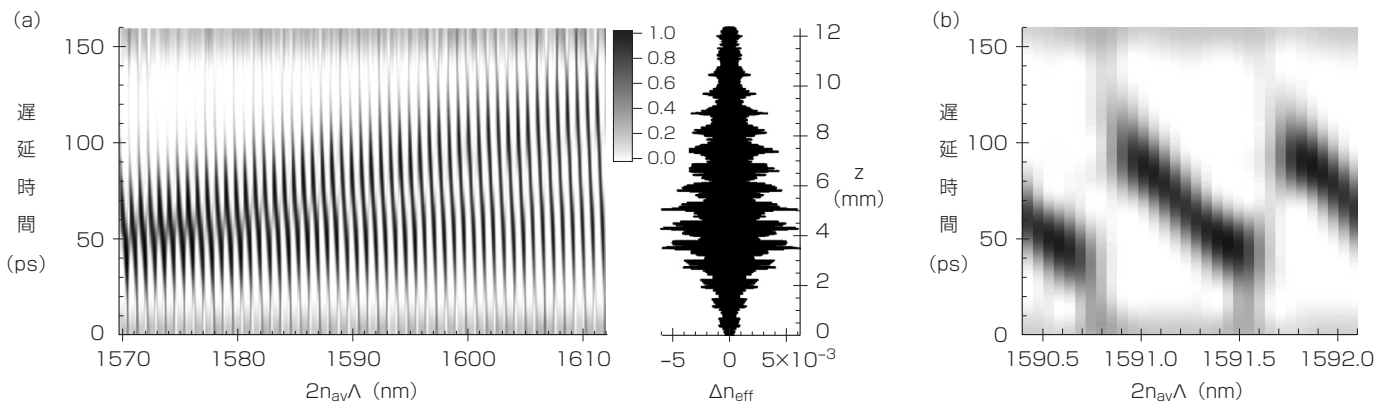


図6 ブラッググレーティングのスペクトログラムと実効屈折率プロファイルの振動成分  
Fig. 6. Bragg grating spectrogram and oscillation component of effective refractive index profile.

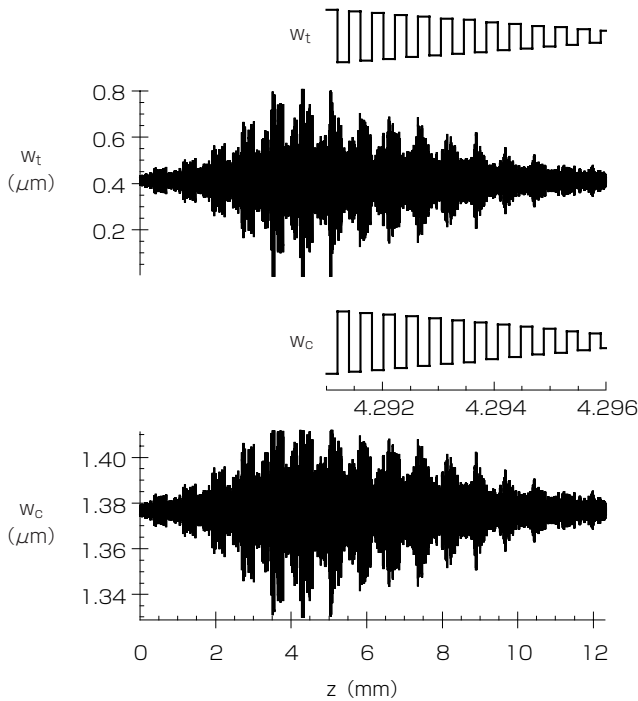


図7 計算により得られた分散補償素子の導波路寸法プロファイル

Fig. 7. Calculated waveguide widths profile for CDC.

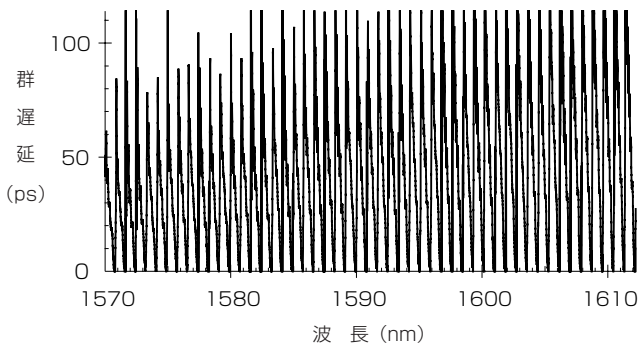


図8 設計した実効屈折率プロファイルから計算された群遅延スペクトル

Fig. 8. Group-delay spectrum calculated from designed effective refractive index profile.

に含んだ構造は工程管理が困難である。そこで、局所的な平均実効屈折率を保ったまま、振動成分を矩形形状で近似する。このようにして得られた実効屈折率プロファイルから、図3に示したコア幅、トレンチ幅と実効屈折率の関係を用いて、最終的に図7に示す導波路寸法プロファイルを得る。

得られたブラッググレーティング導波路の反射特性を調べるため、実効屈折率プロファイルから Transfer Matrix Method (TMM) を用いた計算を行った<sup>9)</sup>。得られた群遅延スペクトルを図8に示す。これは、今回設計したブラッググレーティング導波路で実現できると予想される反射特性である。図4で定義したスペクトルが、逆散乱アルゴリズムにより導出された導波路構造によ

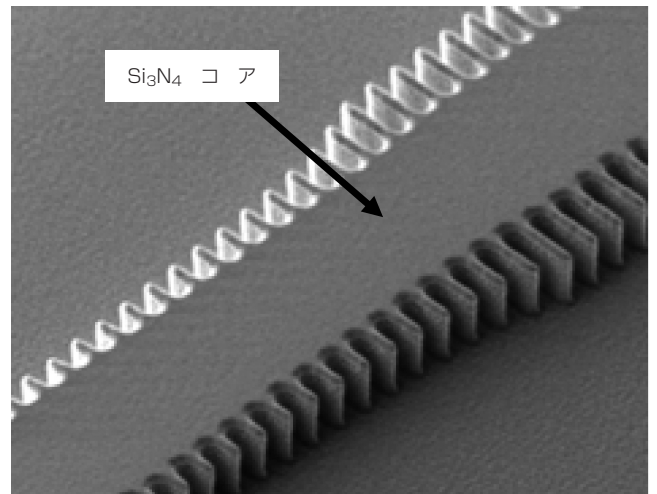


図9 側部ブラッググレーティングパターン形成工程後のSEM写真

Fig. 9. SEM image taken after process for Bragg grating pattern in side of waveguide.

り、再現されていることがわかる。

#### 4. デバイスの作製

デバイスの作製は、シンガポールのマイクロエレクトロニクス研究所 (IME) との共同開発により、IME の製造設備ラインを使用して行った。リソグラフィでは248 nm の KrF エキシマレーザによる露光機を使用した。

側部ブラッググレーティングパターン形成工程後に得たSEM観察写真を図9に示す。この写真では、工程上、上部が  $\text{SiO}_2$  に覆われているため、トレンチ部のブラッググレーティングパターンは見えていない。

#### 5. むすび

本報告では、ブラッググレーティング導波路を用いたシリコンフォトニックデバイスの開発について紹介した。複屈折性を解消した導波路断面構造と、複雑な光学特性を持つブラッググレーティングパターンを設計する逆散乱アルゴリズムを組み合わせた手法は、ここで挙げた分散補償素子以外にも、多種の光フィルタへの適用が可能である。今後は、今回作製したデバイスの評価を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) Y. Painchaud, et al.: "Superposition of chirped fibre Bragg grating for third-order dispersion compensation over 32 WDM channels", Electron. Lett., Vol. 38, No. 24, pp. 1572-1573, 2002
- 2) T. E. Murphy, et al.: "Fabrication and characterization of narrow-band Bragg-reflection filters in silicon-on-

- insulator ridge waveguides”, J. Lightwave Technol., Vol. 19, No. 12, pp. 1938-1942, 2001
- 3) 小川ほか：「シリコンナノフォトニックデバイス」, フジクラ技報, 第112号, pp. 1-5, 2007
  - 4) S. C. Mao, et al. : “Low propagation loss SiN optical waveguide”, Opt. Express, Vol. 16, No. 25, pp. 20809-20816, 2008
  - 5) K. Ogawa, et al. : “New design and analysis of Bragg grating waveguides”, Opt. Express, Vol. 18, No. 3, pp. 2002-2009, 2010
  - 6) G. H. Song, et al. : “Design of corrugated waveguide filters by the Gel’ fand-Levitan-Marchenko inverse-scattering method”, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 2, No. 11, pp. 1905-1915, 1985
  - 7) C. Shannon : “Communication in the presence of noise”, Proc. IEEE, Vol. 86, No. 2, pp. 447-457, 1998
  - 8) L. Cohen : “Time-frequency distributions - a review”, Proc. IEEE, Vol. 77, No. 7, pp. 941-981, 1989
  - 9) K. A. Winick : “Effective-index method and coupled-mode theory for almost-periodic waveguide gratings: a comparison”, Applied Optics, Vol. 31, No. 6, pp. 757-764, 1992