

# シリコンナノフォトニックデバイス

光電子技術研究所  
シンガポールマイクロエレクトロニクス研究所

小川 憲介<sup>1</sup>・Tan Yong Tsong<sup>2</sup>  
My The Doan・Ming Bin Yu・Dim-Lee Kwong

## Silicon Nanophotonic Device

K. Ogawa, Y. Tan, M. Doan, M. Yu & D. Kwong

高速光ファイバ通信への応用に向け、シリコンナノフォトニックデバイスの検討を進めている。シリコンナノフォトニックデバイスは、シリコン薄膜中にシリカ極微円柱が周期配列したフォトニック結晶層とその上に置かれた窒化シリコン矩形導波路からなる複合導波路を基本要素とする。本デバイスでは、Cバンド全域という広帯域で、通常のシリコン光導波路より一桁以上大きな波長分散・位相シフトを発生させることができる。シリコンナノフォトニックデバイスの構造の特徴と光学特性について紹介する。

Silicon nanophotonic device has been studied for applications to high-speed optical fiber communications. The device has a composite waveguide as its core element, which consists of a photonic crystal layer formed by a periodic array of silica ultrasmall rods embedded in a silicon thin film and a silicon nitride rectangular waveguide on top of a nanostructured layer. The chromatic dispersion and the phase shift produced by the device are one order higher in their magnitudes than that produced by conventional silicon waveguides in a spectral range as broad as the full C-band. Structural characteristics and optical properties of silicon nanophotonic device are presented.

### 1. ま え が き

光ファイバネットワークの普及にともない、より高速かつ安定に信号を伝送することが重要となっている。より高速の光ファイバ伝送を行うには、時間幅がより短い光パルスを用いて、単位時間あたりに送信するビット数を増すことが必要である。そのため、データ伝送速度を10Gb/sから40Gb/sに増して光ファイバ伝送を行うべく、技術開発が進められている。また、光ファイバ中を伝搬する光パルスの時間幅が短くなると、光ファイバの持つ波長分散という性質によりデータ伝送の安定性が損なわれるおそれがあり、波長分散を補正する技術が求められる<sup>1)</sup>。波長分散は、光パルスの伝送速度すなわち群速度が波長により異なるために生じ、光パルスの波形を歪ませる。したがって、より高速の光ファイバ伝送を可能とするには、光デバイスの動作を高速化すると同時に、波長分散を補正するためのデバイスの開発が必須である。

光ファイバネットワークの分野では、データ伝送速度の上昇と同時に、設備の小型化・省エネ化・コスト削減を達成することが求められており、デバイス開発においても、小型化・低コスト化を念頭においた開発が必要に

なる。小型かつ低コストで光デバイスを実現するという観点から、加工性・量産性に優れるシリコンデバイス技術に基づく光デバイスの開発が進められている<sup>2)</sup>。シリコンは、シリカガラスに比べて屈折率が約3.5と高く、光導波路の小型化に有効であり、トランジスタなどの電子デバイスも含めた集積化にも適する。

フジクラではシリコンフォトニクスに基づく高速光デバイスの開発に着手した\*。小型化・低電力化を一層進める観点から、フォトニック結晶と呼ばれるナノスケールの周期構造薄膜を光導波路の一部に埋め込んだシリコンナノフォトニックデバイスという新規デバイス構造に着目し、波長分散補正素子などをターゲットとして検討を進めている。波長分散を補正するには、伝搬光の群速度を制御することが必要である。フォトニック結晶を用いることにより、均一な媒質を用いる場合に比べて、一桁以上大きな群速度変化を実現でき、デバイスのさらなる小型化・消費電力低減が可能となる。以下、シリコンナノフォトニックデバイスの特徴および光学特性について紹介する。

### 2. シリコンナノフォトニックデバイス

#### 2.1 デバイスの構成

フォトニック結晶は、屈折率の異なる材料を光の波長

1 応用電子技術研究部主席研究員（理学博士）

2 応用電子技術研究部（Ph.D）

の数分の一のスケールで周期的に配列した構造を持つ。実用上は、光の多重反射を制御することにより光デバイスの小型化・機能向上に応用することが関心のひとつとなっている<sup>3)</sup>。フォトニック結晶を含むシリコンナノフォトニックデバイスの断面の模式構造を図1に示す。シリコンナノフォトニックデバイスはシリコン(Si)基板上に形成された光導波路型のデバイスであり、その基本要素はSi薄膜中に埋め込まれたフォトニック結晶層とその上に位置する窒化シリコン(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)矩形導波路である。フォトニック結晶層は、厚さ0.1μmのSi薄膜中に直径約0.3μmのシリカ(SiO<sub>2</sub>)円柱を周期的に埋め込むことにより構成している。SiO<sub>2</sub>円柱は正三角形を単位とする二次元三角格子状に配列してある。三角格子の格子間隔、すなわち周期は約400nmである。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>矩形導波路の幅は1μm、厚さは0.4μmである。導波路コアの走査電子顕微鏡像を図2に示す。フォトニック結晶の領域において、明るい円形のパターンとして現れているものがSiO<sub>2</sub>円柱である。導波光はフォトニック結晶層およびSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>矩形導波路にまたがって閉じ込められ、これら二つの領域が複合コアとし

て機能する。上記複合コアはSiO<sub>2</sub>クラッドにより囲まれており、上部および下部クラッドの厚さはおのおの0.4および1μmである。

本デバイス構造では、群速度など波長分散に関連する特性を最適化するには、フォトニック結晶層の構造を調整すればよい。一方、単一モード制御や偏波依存性の低減など導波モードに関係する特性の最適化は、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>矩形導波路の形状を調整することにより可能である。つまり、導波モードの透過帯域に影響を与えずに波長分散の最適化をはかることができる。これは、従来のフォトニック結晶を用いたデバイスには見られない新たな特徴である。

波長分散を電圧印加により可変とするため、Si薄膜上に制御電極を設けて、フォトニック結晶の母体材料であるSi薄膜の屈折率を電圧によって変化させる。Siは反転対称を有する結晶構造を持つため、一次の電気-光学効果の源であるポッケルス係数はゼロであり、別の原理により屈折率を電気制御する必要がある。この点については次節で述べる。

2.2 デバイス原理

フォトニック結晶では、多重反射の結果、光波の伝搬が禁制となるスペクトル帯(フォトニックギャップ)が生じ、フォトニックギャップの両側のスペクトル領域では、群速度が伝搬光の周波数あるいは波長に依存して大きく変化する。波長分散とは光の伝搬速度が周波数に依存することにより生ずる。したがって、フォトニック結晶における群速度特性を最適化することにより、波長分散補正が可能となる。さらに、電圧印加などの手段により群速度特性を変化させることができれば、可変波長分散補正素子を実現することができる。

フォトニック結晶中の光の伝搬特性は、周波数-波数軸上で表示されたフォトニックバンドと呼ばれる分散曲線によって規定される。図3に、フォトニックギャップよ

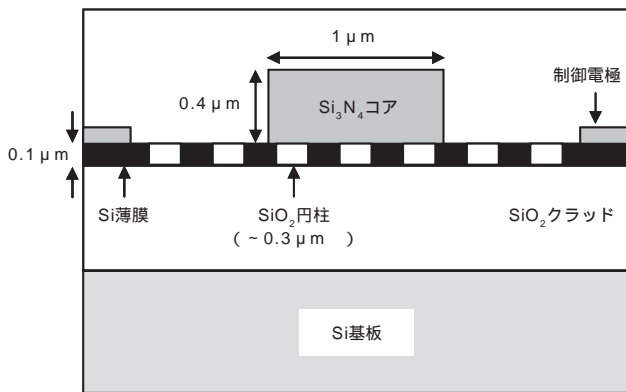


図1 シリコンナノフォトニックデバイスの断面模式図  
Fig. 1. Schematic cross-section of silicon nanophotonic device.

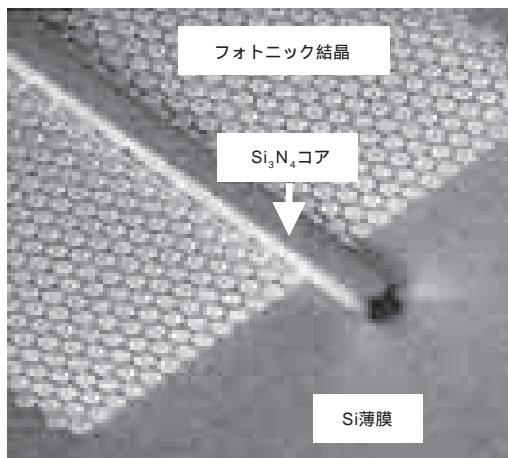


図2 シリコンナノフォトニックデバイスの導波路コアの走査電子顕微鏡像

Fig. 2. Scanning electron microscope image of waveguide core in silicon nanophotonic device.

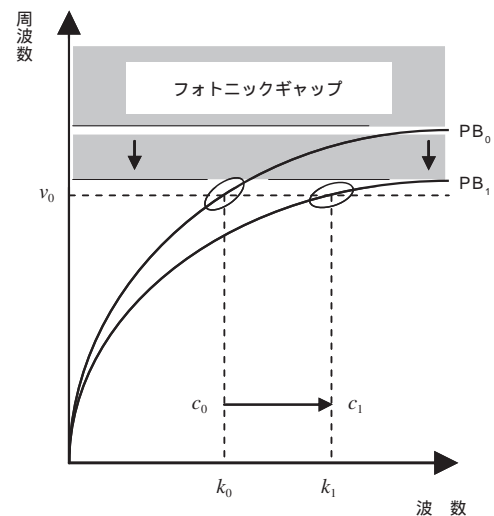


図3 フォトニックバンドの分散曲線の模式図  
Fig. 3. Schematic dispersion curves of photonic band.

り低い周波数におけるフォトニックバンドの分散曲線を模式的に示す． $PB_0$ から $PB_1$ への変化は、母体材料であるSi薄膜の屈折率が増加した場合の分散曲線の変化を表す．分散曲線 $PB_0$ を例にとり、フォトニックバンドの分散特性の概要を説明する．入射光の周波数 $\omega_0$ がフォトニックギャップの低周波端よりも十分低い場合、フォトニック結晶における多重反射は弱く、均一な媒質と同様に伝搬光の群速度は周波数によらず一定となり、直線状の分散曲線となる． $\omega_0$ が上昇しフォトニックギャップ端に接近してくると、多重反射の影響は強まり、群速度は周波数に強く依存する．フォトニックギャップ端では、もはや光は伝搬できず群速度はゼロとなる．分散曲線の勾配（微係数）が群速度に対応するため、 $\omega_0$ がフォトニックギャップ端に接近するにともない、伝搬光の群速度は次第に低下し、分散曲線の勾配はゼロに漸近する．

母体材料の屈折率が増加すると、フォトニックギャップは低周波側にシフトし、分散曲線は図3のように $PB_1$ となる．分散曲線が $PB_0$ から $PB_1$ に変化すると、入射光周波数での波数は $k_0$ から $k_1$ に、群速度は $c_0$ から $c_1$ に変化する．フォトニックギャップ近傍の周波数帯では分散曲線の曲率が大きく勾配が小さいため、分散曲線が $PB_0$ から $PB_1$ にシフトしたとき、波数および群速度の変化が非常に大きくなる．よって、均一な媒質を使用する場合に比べて、波長分散補正に必要な素子長を大幅に短縮することが可能となる．本報告では、導波路長はわずか2～3mmである．母体材料の屈折率を変化させる手段は、高速化が容易な電圧印加を選択した．Siでは前述のようにポッケルス係数がゼロであるため、キャリアをドーピングし、キャリア密度変化にともなう屈折率変化を利用する<sup>4)6)</sup>．図1の制御電極に印加する電圧を変化させると、フォトニック結晶層に流れる電流が変化しキャリア密度が変化する．電圧を上げると、電流は増加するがキャリアの伝導速度が増すことによりキャリア密度は逆に減少し、屈折率は増加する．よって、電圧を上げると、フォトニックバンドの分散曲線は図3のように低周波側へと移動する．

### 2.3 デバイスの作製プロセス

シリコンナノフォトニックデバイスの作製は、シンガポール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．作製プロセスは図4に概要を示した通りで、Si集積回路量産用の製造プロセスを応用したものである．使用したウエファは、厚さ1 $\mu\text{m}$ の $\text{SiO}_2$ 膜上に厚さ0.1 $\mu\text{m}$ のSi薄膜が形成済みのsilicon-on-insulator（SOI）ウエファで、サイズは8インチである．Si基板はP型の導電性を有する．

まず、このウエファにホウ素イオンを打ち込み、Si薄膜にP型キャリアすなわち正孔をドーピングする．キャリア密度は約 $10^{19}\text{cm}^{-3}$ である．ドーピング後、フォトニック結晶の $\text{SiO}_2$ 円柱を形成するため、マスク露光により極微細円柱パターンを描画し、ドライエッチングにより円柱状の空孔をSi薄膜中に形成する．空孔に $\text{SiO}_2$ を埋め込み表面を平坦化することによりフォトニック結晶層が形成

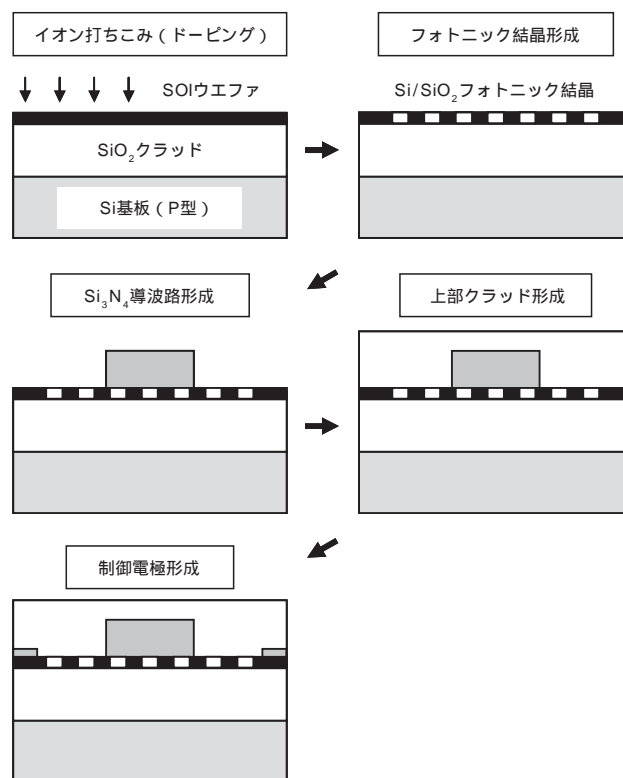


図4 シリコンナノフォトニックデバイスの作製プロセス  
Fig. 4. Fabrication processes of silicon nanophotonic device.

される．その後、厚さ0.4 $\mu\text{m}$ の $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜を積層し、マスク露光およびドライエッチングにより、幅1 $\mu\text{m}$ の矩形導波路をフォトニック結晶層上に形成し、さらに上部 $\text{SiO}_2$ クラッドを積層する．最後に、マスク露光、金属蒸着、熱処理により制御電極を形成する<sup>7)</sup>．個別のデバイスはダイシングによりウエファから切り出す．

## 3. シリコンナノフォトニックデバイスの光学特性

### 3.1 基礎光学特性

デバイスの光学特性について理解を容易にするため、図1に示した断面形状において $\text{Si}_3\text{N}_4$ コアを平板状のスラブ導波路と単純化し、周期境界条件を適用した平面波展開法により伝搬モードの数値計算を行った．フォトニックギャップの低周波および高周波側に存在する伝搬モードの分散曲線を図5に示す．縦軸および横軸はフォトニック結晶の周期（400nm）で規格化された周波数および波数である． $\omega_0$ は入射光の規格化周波数を示し、対応する実周波数および波長は193.5THzおよび1,550nmである．図5でフォトニックギャップの低周波側にあらわれている分散曲線は、図3の $PB_0$ に対応し、これが最低次の導波モードとなる．フォトニック結晶の配列に対する光の伝搬方向は、挿入図の矢印で示してある．ライトラインとして示された直線は、屈折率1.45の $\text{SiO}_2$ クラッド中を伝搬する光の特性をあらわす．ライトラインより上側の領域では、実効屈折率は $\text{SiO}_2$ クラッドより低くなるため、コア/クラッドの境界面で伝搬光は全反射されず、導波モー

ドは存在しない．よって，フォトニックギャップより低周波側では，導波モードは $PB_0$ のみの単一モードとなり，波長分散特性およびその電圧依存性は分散曲線 $PB_0$ によって決まる．

シリコンナノフォトニックデバイスの波長分散特性を評価するため，透過率および位相のスペクトル特性を調べた．透過率スペクトル測定には広帯域光源および光スペクトルアナライザを用い，スペクトル位相測定には波長可変光源と二波長ヘテロダインファイバ干渉計を用いた．図6に，フォトニック結晶を構成する $SiO_2$ 円柱の直径 $2R$ が $0.26 \sim 0.28 \mu m$ と異なる場合および $Si$ 薄膜中に円柱がない場合（PhCなし）の透過スペクトル特性を示す．デバイス長は $2mm$ である．横軸は波長であり（a）に $1,530 \sim 1,560nm$ （Cバンド）で測定した位相，（b）に $1,430 \sim 1,600nm$ での透過率をプロットしてある．

フォトニック結晶がない場合，透過率は波長に依存せずほぼ一定である．一方，フォトニック結晶が存在するとフォトニックギャップ領域の光は伝搬できず，長波長側からフォトニックギャップ端に近づくにつれて透過率が急激に減少する． $SiO_2$ 円柱の直径が小さくなるほど，フォトニックギャップ端は長波長側に移動している．この傾向は数値計算により確認できる．図5に示した分散曲線では，直径を減少させるとフォトニックギャップ端は長波長側に移動する．

図6（a）の位相の波長依存性を見ると係数が正の放物線形となっている．群速度の波長依存性すなわち波長分散は位相の二階微分に比例するため，測定結果よりシリコンナノフォトニックデバイスでは正の波長分散が生じていることがわかる<sup>8)</sup>．これは，図5の分散曲線 $PB_0$ において，傾きが正でフォトニックギャップに接近するにつれて傾きが減少することに等しく，実験結果と計算結果は合致している．また， $SiO_2$ 円柱の直径が小さくなるほど，正の波長分散はより大きくなる．これは，図5の分散曲線の直径依存性によって説明でき，有限要素法などの数値計算によっても確認している<sup>7)</sup>．導波路にフォトニック結晶を導入することにより，伝搬光の波長分散および位相を一桁以上増大することができると同時に，フォトニック結晶の構造設計により，それらの特性を最適化することが可能となるのである．

3.2 電気 - 光学特性

シリコンナノフォトニックデバイスに電圧を印加することによって，波長分散および位相が可変となる．それを実証した実験結果を図7に示す．（a）はCバンド領域で測定した位相，（b）はフォトニックギャップ付近（ $1,455 \sim 1,530nm$ ）での透過率である．フォトニック結晶を含む導波路部の長さは $3mm$ であり，その長さにわたって制御電極が設けられている．

制御電極に電圧が印加されると，前述したようにシリコン薄膜の屈折率が増加し，フォトニックギャップ端は低周波数側すなわち長波長側に移動すると予想される．

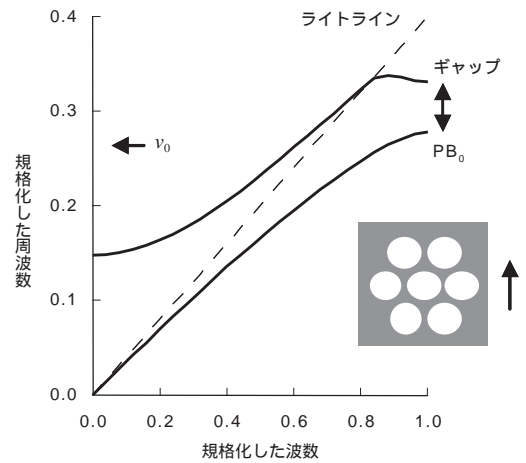


図5 シリコンナノフォトニックデバイスの伝搬モードの分散曲線（挿入図はフォトニック結晶の配列と光の伝搬方向）  
Fig. 5. Dispersion curves of propagation modes in silicon nanophotonic device. Inset: array of photonic crystals and direction of propagated light.

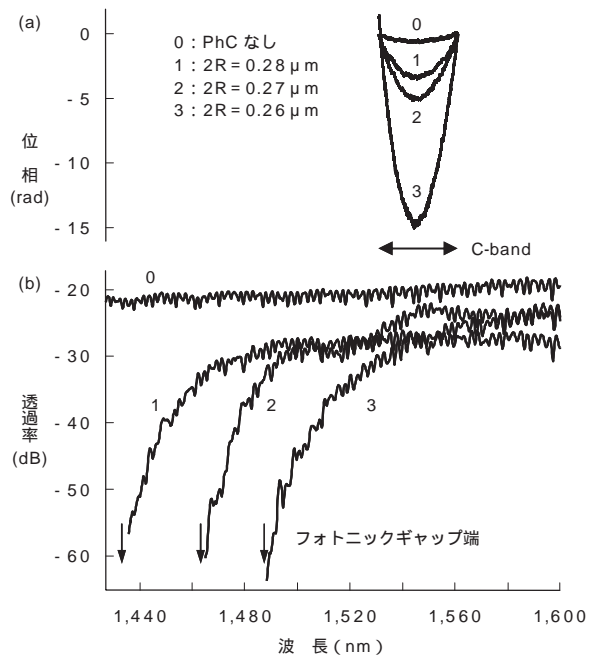


図6 異なる直径（ $2R$ ）の $SiO_2$ 円柱を有するシリコンナノフォトニックデバイスの電圧ゼロでの透過スペクトル（a）：位相，（b）：透過率  
Fig. 6. Transmission spectra of silicon nanophotonic devices with  $SiO_2$  cylinders of different diameter ( $2R$ ) under zero voltage. (a): phase, (b): transmittance.

図7（b）での電圧印加にともなう透過率の変化より，電圧がゼロから $25V$ に変化したときフォトニックギャップ端は約 $4nm$ ほど長波長側に移動し，電圧の印加によりフォトニックギャップ端の波長を制御できることがわかる．図5の分散曲線を求めた方法に基づき屈折率増加分を見積ると， $0.008$ 程度である．

位相は図7（a）のように印加電圧にともない増加する．

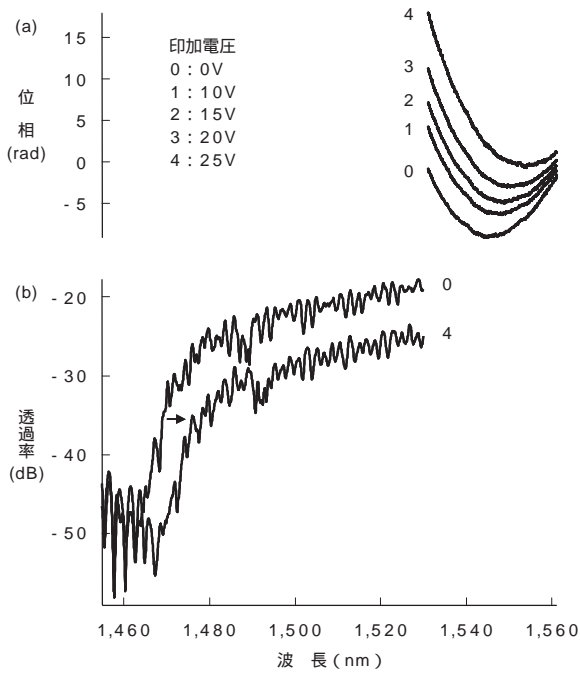


図7 シリコンナノフォトニックデバイスの透過スペクトルの電圧依存性 (a): 位相, (b): 透過率  
Fig. 7. Voltage dependence in transmission spectra of silicon nanophotonic device. (a): phase, (b): transmittance.

さらに、波長分散を規定する二次の係数も大きくなっており、波長分散も増大している。二次関数を用いたカーブフィッティングを行うと、電圧0Vでは二次の係数は $0.034\text{nm}^2$ 、25Vでは $0.037\text{nm}^2$ と、電圧印加により波長分散は約10%増加することがわかる。

位相の変化分を見ると、印加電圧を0Vから10Vに増したとき、以上増加している。光強度変調器への応用という観点では、光信号のオン/オフに必要な位相変化分をわずか3mmの導波路長で発生することができ、素子長の大幅な短縮が可能となる。これらは、図3の模式図から予想されるように、電圧印加にともないフォトニックギャップ端が長波長側に移動することにより生ずる結果に他ならない。

位相の二次関数的変化はCバンド全域で保持されている。すなわち、波長分散を与える二次の係数はCバンド全域で一定であり、シリコンナノフォトニックデバイスは広帯域なスペクトル領域での波長分散補正に応用することが可能である。

#### 4.むすび

シリコン薄膜中に周期的に配列したシリカ円柱からなるフォトニック結晶と窒化シリコン矩形導波路とを組み合わせた複合コアからなるシリコンナノフォトニックデバイスを考案し、その光学特性を評価した。Si薄膜に電圧を印加し屈折率を変化させることにより、フォトニックギャップ端の波長を電圧で変化させることを可能とした。その結果、Cバンド全域にわたるスペクトル領域で、波長分散および位相の制御が小型の電気-光学デバイスで可能となることを実証した。今後、以下の課題に取り組む予定である。

- (1) 電極構造の最適化と接触電気抵抗の低減をはかり、5V以下の電圧での動作を可能とする。
- (2) 導波路の構造に改良を加え、1cm以下の導波路長で単一モード光ファイバ数10km相当の波長分散の補正を可能とするデバイスを開発する。

#### 参考文献

- 1) A. E. Willner and B. Hoanca: Fixed and Tunable Management of Fiber Chromatic Dispersion, in Optical Fiber Telecommunications Vol.IV-B ( Academic Press, 2002 ) Chap. 14
- 2) G. T. Reed and A. P. Knights: Silicon Photonics ( John Wiley & Sons, 2004 )
- 3) 日本人研究者によるフォトニック結晶の研究に関する総合報告として以下の文献がある: Roadmap on Photonic Crystals ( Kluwer Academic Press, 2003 )
- 4) H. Y. Fan, et al.: Infrared absorption in n-type Germanium, Phys. Rev., Vol.101, pp.566-572, 1956
- 5) R. A. Soref: Electro-optical effects in silicon, IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-23, pp.123-129, 1987
- 6) L. Liao, et al.: High-speed silicon Mach-Zehnder modulator, Opt. Express, Vol.13, pp.3129-3135, 2005
- 7) K. Ogawa, et al.: Optical Fiber Communication Conference Technical Digest ( 2006, Anaheim ) OThE4
- 8) J-C. Diels and W. Rudolph: Ultrashort laser pulse phenomena ( Academic Press, 1996 ) p.16

注: \*本研究開発は、昨年7月に(株)物産ナノテク研究所よりフジクラに継承されたものである。