

# フォトニック結晶による光制御の最新技術

井 上 久 遠

## Advanced Technology of Control of Light by Using a Photonic Crystal

Kuon INOUE

Recently, photonic crystals (PCs) that are periodically textured dielectric materials have inspired a lot of interest due to their potentials for controlling the radiation field and light propagation characteristics. In particular, it is expected that they can be used to develop an ultra-miniaturized integrated optical circuit for future optical telecommunications and interconnects. Since the planar one is most attractive, semiconductor-based PC slabs suited for this purpose have been extensively studied up until now. In this topics, current research works on such slabs and several novel devices thereby developed are surveyed, which include PC-waveguides, compact lasers, delay component, and others.

**Key words:** photonic crystal, photonic crystal waveguide, integrated optical circuit, control of light, optoelectronic device

屈折率が光の波長の大きさで空間的に周期的に大きく変化するフォトニック結晶 (PC) は、原理的に光の場の制御、すなわち輻射場ならびに光の伝搬特性を制御することが可能なために、最近の数年間で研究が急速に進んできた。PC は、新しい現象の探索など物理学、量子光学などの基礎科学分野においても重要であるが、現時点の大きな関心事は新奇なデバイスの開発にある。長期的な視野からの PC に対する期待はなんとといっても、未来の光通信のための集積光回路の開発にある (なお、より短期的には LSI のチップ間、あるいはチップ内の光インターコネクットの開発も期待されている)。しかも、生産ラインにおける作製工程を考えると、平面光回路が最も重要であろう<sup>1)</sup>。上記を勘案して、ここでは半導体をベースにした二次元 PC スラブとそれを用いた素子に関する研究の状況を概観し解説する。

### 1. 半導体フォトニック結晶スラブ

最初に基本となる PC スラブについて述べる。よく知られた通常の半導体光導波路では、光がコア層を伝搬できる

のは、いうまでもなく上下のクラッド層による屈折率閉じ込めのためである。スラブ内を伝搬できる光の固有モードの分散関係、すなわち、スラブ面内の波数ベクトルの大きさ  $k_{\parallel}$  に対する固有エネルギー ( $\omega$  は角振動数; 真空中の光速  $c$  とスラブの厚さ  $d$  を用いて規格化してある) は図 1(a) に示したようになる。図中の直線は、 $\omega = (c/n) \cdot k$  ( $k$ : 波数,  $n$ : クラッド層の屈折率) で与えられるライトラインである<sup>2)</sup>。この導波路に周期的に穴をあけた円孔 (エアホール) 型の、たとえば二次元正方晶 PC スラブ (配列したピラー型もある) では、周期性のために各バンドは第 1 ブリュアンゾーンに折り返される。図 1(b) では、ブリュアンゾーンの  $\Gamma$ -X 方向について (a) と比較してある。ここで、 $\Gamma$  および X は、対応したブリュアンゾーンにおける中心の位置と、ゾーンの端の対称性の高い 1 つの点であり、また、エネルギーの規格化には、 $d$  の代わりに格子定数  $a$  を用いた。穴をあけたことでバンド (ゾーン) 端ではエネルギー分離が生じるとともに、各バンドは穴の配置に関する対称性が加味された対称性をもつことになる。さら

北海道大学電子科学研究所 (〒060-0812 札幌市北区北十二条西 6 丁目)  
現所属: 千歳科学技術大学光科学部 (〒066-8655 千歳市美々々 758-65) E-mail: inoue@phys.spub.chitose.ac.jp

に一般的には、もとの様なスラブモード間の混合が起こる結果、コア層断面における電場、磁場の強度分布も複雑になる。ただし、コア層中央のミラー面は依然として存在するために、この面に関して偶、奇の対称性による分類は可能であるが、純粋な TE, TM モードはもはや存在しない。ミラー面上での電磁波のパターンから、PC スラブのモードを TE 的, TM 的モードとよぶ。上下のクラッド層が異なる物質の場合には、ミラー面も消失しモードはさらに複雑になる。もとへ戻って、ライトラインの上側のモードは導波モードではなく、放射モードになる<sup>2,3)</sup>。つまり、大なり小なりクラッド層から光は逃げていく。

以上を考慮して、図2に示した3つのタイプの半導体 PC スラブがおもに研究されている。(a) のタイプ (semiconductor clad: SC 型) では、コア層とクラッド層の屈折率の差を比較的小さくして、穴を下のクラッド層の中まで十分にあける。厳密な意味では導波モードは存在しないが、エネルギーの低い第1, 第2バンド近傍で放射損失を小さくできるので限定的に実際に使用できると考えられている。試料作製上は最も簡単でよいが、格子定数  $a$  が小さくなると穴のアスペクト比を大きくすることが難しくなってくる。(b) はエアブリッジ型 (air bridge: AB 型) とよばれるもので、クラッド層が空気のためにコア層との屈折率の差が最も大きく、また対称性も高く、原理的には最もすぐれている。ただし、クラッド層のみを選択的にエッチングして除去できる材料に限られる。(c) は酸化クラッド型 (oxide clad: OC 型), すなわち、上のクラッド層は空気、下のクラッド層を酸化して屈折率を小さくしたものである。導波モードの存在範囲を広くするため、屈折率の比の大きい Si と  $\text{SiO}_2$ , GaAs と  $\text{Al}_x\text{O}_y$  などの組み合わせで作られている。

筆者らは、AlGaAs を材料に用いて、上記の3つのタイプの、いずれも三方格子のスラブ試料を作製して詳しい透過スペクトルの測定を行い、それぞれの光学特性を調べた<sup>4)</sup>。図3(a) に作製した AB 試料の SEM 写真を示す。穴の列数  $N$  は三方格子のブリュアンゾーンの  $\Gamma$ -M 方向に10列で、入出力信号用に幅  $3\ \mu\text{m}$  の  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$  の導波路が付いている。例として、AB 試料の透過スペクトルを図3(b) に示した<sup>5)</sup>。なお、PC スラブの研究は非常にたくさんあるが、コア層の厚さが薄い (200~400 nm) ので、外部からの通常光源を用いてこのように透過スペクトルを測定した例はほとんどない。測定波長範囲は AlGaAs の吸収バンド端の 850 nm から 1100 nm である。これらのスペクトルは、TE 的, TM 的モードともに、それぞれのパラメーターを用いて三次元的に計算した

フォトニックバンド構造 (PBS) でよく説明できる。また、FDTD (有限差時間領域) 法で計算した透過スペクトルともよい一致を示している。すなわち、TM 的モードでは、高エネルギー側の大きな透過減衰は  $\Gamma$ -M 方向の奇の対称性をもつモードの第2, 第3バンド間のバンドギャップによるもので、わずか10列で30 dB 以上の減衰である。1000 nm 以上の波長では、透過率はほぼ100%であるが、この領域はライトラインの下の第2バンドの導波モードに対応しているためである。なお、別の試料で、第1バンドでの透過率も同様に100%になっている。また、 $\Gamma$ -M 方向の第1バンドギャップは狭いが、観測されている。一方、TE 的モードでは、測定波長領域は広い第1ギャップにあるために透過率が小さくなっている。バンド構造を図4に示す。外部の光で通常は励起されない高次モードも含めたために複雑になっているが、重要なことは TE 的モードでは二次元の全方位に対して広いフォトニックバンドギャップ (PBG) が存在する事実である<sup>5)</sup>。OC 型試料でも同様の結果が得られている<sup>4)</sup>。ただし、導波モードの透過率は60%程度であるが、この事実が試料の不均一性に起因するのかわかからない。SC 型では、筆者らが調べた限りでは、穴の列数  $N$  が大きくなるとやはり放射損失が無視できず、実用上は問題になる<sup>6)</sup>。

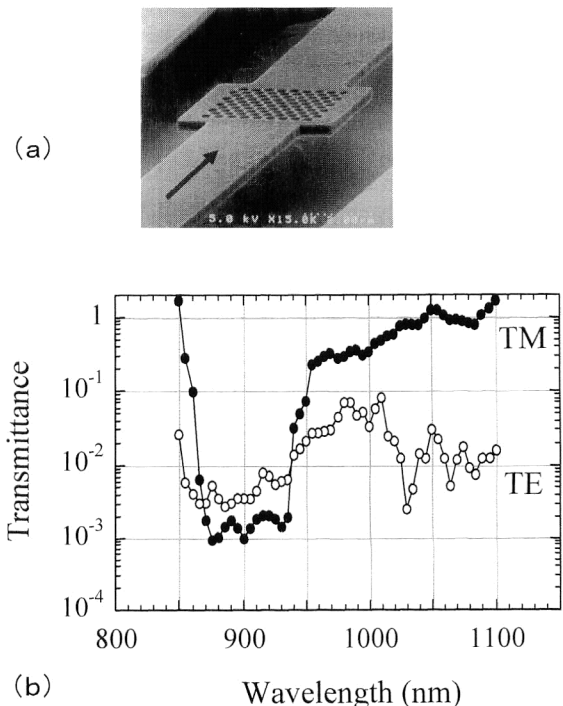


図3 AB 型 PC スラブ試料の SEM 写真 (a) と透過スペクトルの例 (b)。

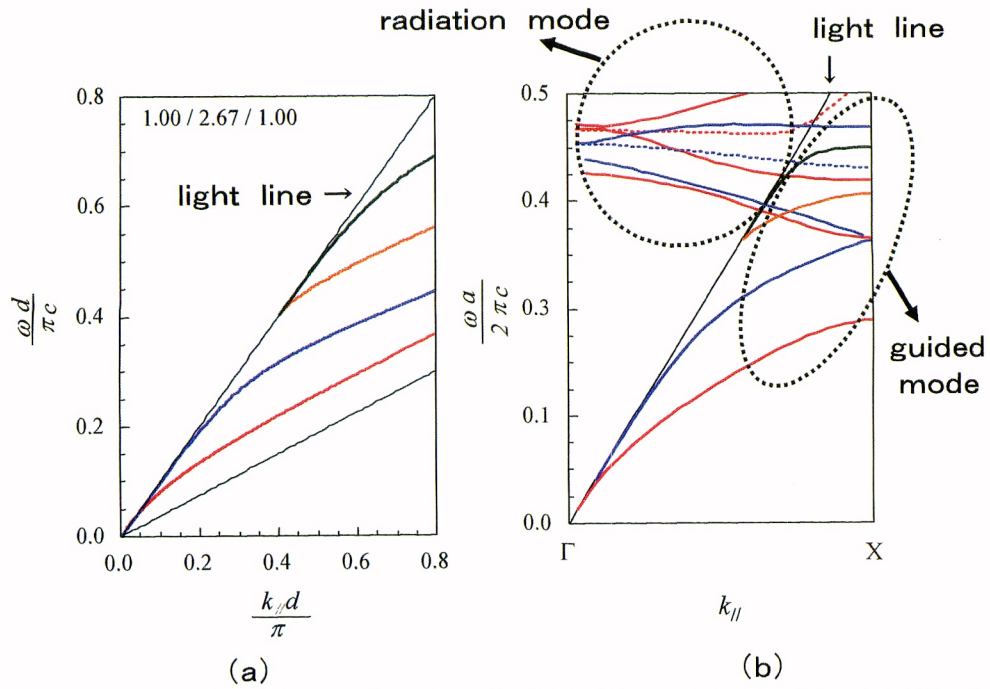
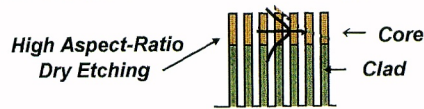


図1 一様スラブ (a) と PC スラブの導波モード (b) の比較. (a) 中の 1.00/2.67/1.00 はそれぞれ、上のクラッド (空気)/コア/下のクラッド (空気) の屈折率を示すが、コアについては (b) との比較のために穴の体積占有率を考慮した有効値を用いている。

(a) SC (Semiconductor Clad) -Type



(b) AB (Air Bridge) -Type



(c) OC (Oxide Clad) -Type



図2 いろいろな円孔型 PC スラブの例.

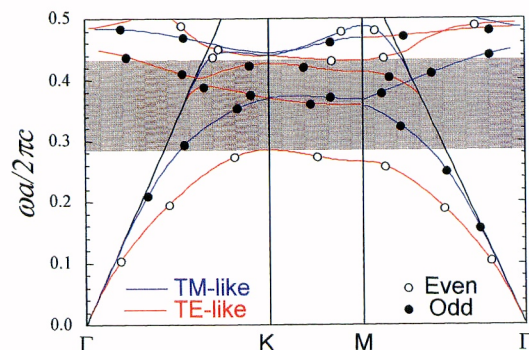


図4 AB型 PC スラブのフォトニックバンド図の例 (ハッチ領域: TE 的モードに対するバンドギャップ).

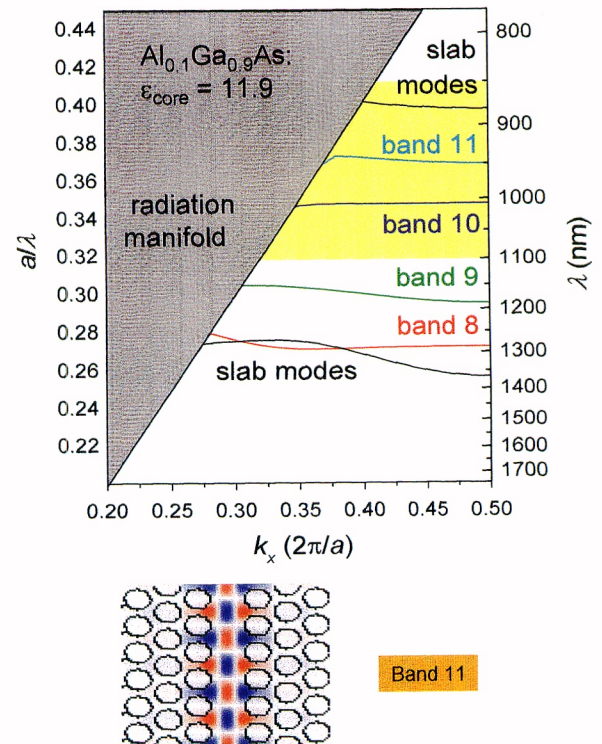


図5 線欠陥の導入による局在モードとモードパターン (バンド 11) の例 (青と赤では  $E_y$  の符号が異なる).

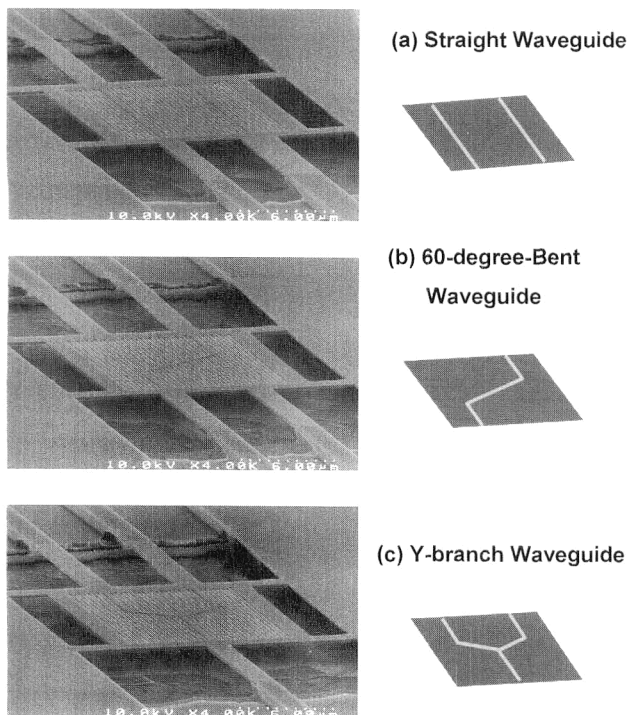


図6 いくつかのPC導波路試料のSEM写真.

## 2. PC導波路

PCスラブから1列の穴を取り去ったもの、すなわち、線欠陥を導入したものは、新しいタイプのすぐれた光導波路として機能する。スラブの上下方向は従来通り屈折率による閉じ込めであるが、面内ではPBGにより線欠陥内に光が閉じ込められるので、波長程度、あるいはそれ以下のサイズで急峻に曲げることができる<sup>2,7)</sup>。円孔-三方格子で、穴の最近接方向( $\Gamma$ -K方向; なお、面内で、この方向および垂直方向をそれぞれ $x$ ,  $y$ 方向とする)に穴を1列除去した線欠陥の場合の局在モードの例を、もとの $\Gamma$ -K方向の還元ブリュアンゾーンで記述したものが図5である(縦軸は $a$ で規格化したエネルギー;  $\lambda$ は波長)。PC導波路はこの方向に一次元の周期性をもつこと、および、ゾーン端はKではなく、M点をこの方向に投影した $K'$ 点になることに注意されたい。図でスラブモードとは、もとの二次元のバンドをこの方向に投影したものであり、また、斜めの直線はライトラインである。ライトラインの下側の領域で、スラブバンド間に生じたエネルギーギャップ中に4つの局在(欠陥)モードが出現していることがわかる<sup>8)</sup>。すなわち、すでに述べたように、スラブの上下には屈折率閉じ込めにより、面内ではPBGにより閉じ込められたモードである。なお、8, 11と9, 10のモードは、面に垂直でかつ $x$ 軸に平行な対称面に対して、電場成分 $E_y$ がそれぞれ偶、および奇の対称性をもつモードである。この例の1列の代わりに、

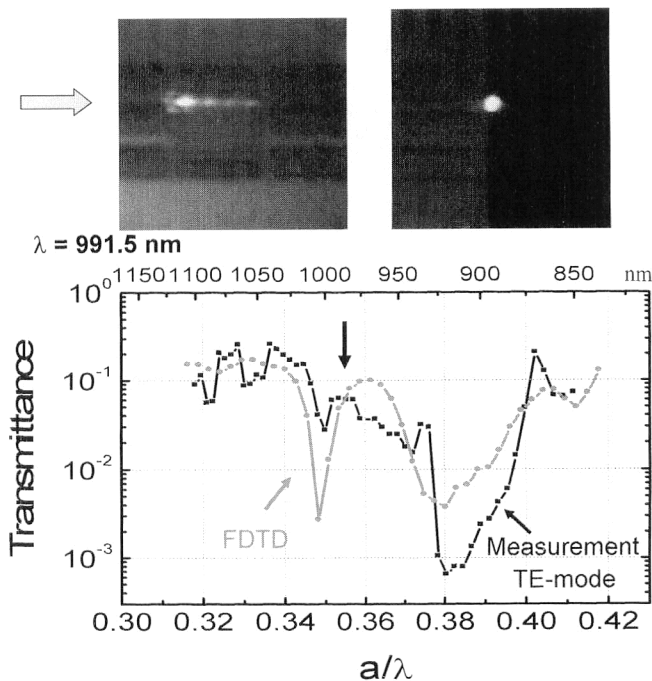


図7 直線PC導波路の観測結果。(上)局在モード領域の波長の光(波長:991.5 nm)に対する赤外ビデオ観察,上からみた散乱光(左)と出力端子での透過光(右)の様子。(下)透過スペクトル.

2, 3, ...列を取り除いてもよいが、多くの局在モードがエネルギー的に接近して生じるために実用には適さない。AB型円孔PCをベースにして作製した、直線, 60°曲がり, Y-ブランチの試料の例を図6に示す<sup>1)</sup>。PCスラブの場合と同様に、定量的に透過スペクトルを測定し、FDTD計算によるスペクトル、ならびにバンド構造との比較を行った。図7に直線PC導波路の例を示す<sup>10)</sup>。矢印の位置の局在モードの波長で光がよく通っているのに対して、欠陥のない同様なPCではPBGの領域にあるので、測定でも光はまったく通らない。長さを3倍長くした試料では、伝搬損失の有意差はなかった。伝搬損失は数dB/mm程度と考えられ、実用上は問題ないものと思われる。問題は、むしろ通常の光導波路との結合損失である。シミュレーションによると、テーパをつけて徐々に幅を狭くする方法で80%以上の結合定数が得られている<sup>10)</sup>。

60°曲がり, Y-ブランチの試料でも同様の良好な結果が得られている<sup>11)</sup>。ただこの場合には、曲がり部分の散乱損失が実際には無視できないことが問題になる。筆者らは最近、曲がりの部分を工夫することにより損失を大幅に低減することができた。

## 3. PCレーザー

スラブ型に限らず、すでに数種類のPCレーザーが報告

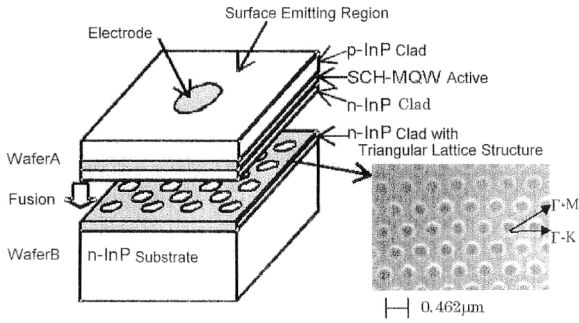


図8 二次元フォトリック結晶レーザーの概念図(京都大学野田進教授の提供による)。

されている。小さな群速度を利用するものと、局在モードを利用するものとの2つに大きく分類される。まず前者について述べる。バンド端、およびブリュアンゾーン内の逆交差したバンドで群速度  $V_g$  が極端に小さくなる。これとは別に二次元 PC では、非常に平坦なバンドが生じる事実が知られており、ここでも群速度が小さい。光の増幅利得は近似的に  $(V_g)^2$  に比例するから、非常に短い共振器でレーザー作用が起こるはずである<sup>12)</sup>。実際、二次元 PC の光励起<sup>13)</sup>、および電流励起<sup>14)</sup>の双方で実証されている。一般に、ブリュアンゾーンの対称性の高い点では、逆格子ベクトル(ブラッグ回折)により、方向の異なる等価なモードの光が互いに結合するので、いろいろなタイプのレーザー作用が起こる。たとえば三方格子の場合では、 $\Gamma$ 、 $M$ 、 $K$ の各点の縮退の度合いに応じて2、3、6つの方向モードが結合する。また二次元面に平行な方向のほかに、面に垂直な方向の光も取り出せる。ここでは後者の例について簡単にふれておく。京都大学の野田教授らは図8に示したように、薄い二次元三方格子のPCとInGaAsP/InPの多重量子井戸(MQW)の発光層とから成る構造の試料を作製して、電流注入によるレーザー作用を観察した。この場合、三重縮退した $\Gamma$ 点における6つの $\Gamma$ -M方向のモードの結合を利用した結果、面に垂直な方向に指向性の高いコヒーレントな光が得られている<sup>14)</sup>。次に、局在モードを利用するもうひとつのタイプについて述べる。前の節で述べた線欠陥の場合と類似で、たとえば円孔PCスラブの1つの穴を大きくすると、空間的にはこの点欠陥の周りに局在し、エネルギー的にはPBG中に局在したモードが生じる。共振器としての $Q$ 値は1000程度に作れるので、レーザー作用が起こる。このような方法で、SchererらはInGaPAs系を材料に用いてAB型で局在モードを作り、光励起でパルスのレーザー作用を観測した(ただし、143Kの低温での実験である)<sup>15)</sup>。現在のところ、世界最小サイズのレーザーとのことである。面発光型を別にして、上記の双方のタ

イプともに、集積光回路内に埋め込んだ光源、あるいは光増幅器として原理的に使えると考えられる。この目的には、ほかにもPCのバンドギャップを両側、あるいは片側のミラーとして用いたレーザーも考えられ、実際にシングルモードのレーザーが得られている<sup>16)</sup>。

#### 4. その他の素子

集積光回路に必要な他のいくつかの素子に簡単にふれておく。偏光素子、狭帯域バンドパスフィルターはすでに開発されていてまったく問題ない。前者は、PC自身のバンドが顕著な異方性を示す事実、後者は、ギャップ内の局在モードを利用すればよい。最も重要な素子として光-光スイッチと光遅延素子の開発が不可欠であるが、前者ははまだ研究が進んでいないので、後者に関する筆者の研究にふれておく<sup>4,17)</sup>(なお、光-光スイッチの開発の概念については文献1)を参照されたい。また、スーパープリズム効果を利用した波長分別素子も有望視されているが、ここでは省略する)。PC自身がこの目的に適している。すでに述べたように、適当に平坦なバンドの小さな群速度を利用すればよい。バンド端の利用は、透過率が悪く、またパルスの波形の保存の観点からもこの目的には適さない。AB型の $\Gamma$ -K方向の比較的平坦な第2バンドで、フェムト秒パルス(200 fs)の伝搬時間遅れを直接測定した。その結果、長さが10  $\mu\text{m}$ の試料で、400 psの遅れを観測している<sup>17)</sup>。群速度にすると、真空中の値の25分の1程度である。同様な結果が、SC型の第4バンド(透過率が60%程度の3  $\mu\text{m}$ の長さの試料)についても得られている。さらに試料設計を工夫すれば光速の100分の1程度の群速度の値も可能である。したがって、パルスの遅延素子として十分に使用できる見通しが得られたと考えている。

円孔型PCスラブ試料は、輻射場、および光伝搬の制御のために最もすぐれた特性を示すこと、ならびに、通常のPBGによる制御には光の伝搬方向に10層もあれば十分であることがわかった。このスラブをベースにした新しいタイプのPC導波路、レーザー、遅延素子、その他の素子が有用であることも明らかにされつつある。

この解説は、北海道大学電子科学研究所(現、日立中央研究所)の河合紀子博士、ならびにフェムト秒テクノロジー研究機構の浅川 潔、杉本喜正、Niclas Carlssonの各博士、および池田直樹氏との共同研究を基にして記述した。これらの諸氏に感謝します。また、文部科学省の科学研究費補助金“特定領域研究(B)”の援助に謝辞を述べます。

## 文 献

- 1) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai and K. Inoue: "Light propagation characteristics of photonic crystal waveguide for miniaturized ultra-fast optical-pulse control/delay devices," *Proc. of SPIE Symp. on Photonic Technology in the 21th Century*, **4598** (SPIE, Washington, 2001) pp. 58-72.
- 2) J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn: *Photonic Crystals* (Princeton University Press, Princeton, 1995).
- 3) S. G. Johnson, S. Fan, P. D. Villeneuve, J. D. Joannopoulos and L. A. Kolodjejski: "Guided modes in photonic crystal slabs," *Phys. Rev. B*, **60** (1999) 5751-5758.
- 4) K. Inoue, N. Kawai, Y. Sugimoto, N. Carlsson, N. Ikeda and K. Asakawa: "Optical properties of different types of GaAs-based photonic crystal slabs and their application to devices," *Microphotonics-Materials, Physics and Applications*, eds. K. Wada *et al.* (MRS, Pennsylvania, 2001) pp. E. 3.2.1-12.
- 5) N. Kawai, K. Inoue, N. Carlsson, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Asakawa and T. Takemori: "Confined band gap in air-bridge type of two-dimensional AlGaAs photonic crystal," *Phys. Rev. Lett.*, **86** (2001) 2289-2292.
- 6) N. Kawai, K. Inoue, N. Ikeda, N. Carlsson, Y. Sugimoto, K. Asakawa, S. Yamada and Y. Katayama: "Transmittance and time-of-flight study of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-based photonic crystal waveguides," *Phys. Rev. B*, **63** (2001) 153313 : 1-4.
- 7) T. Baba, N. Fukaya and J. Yonekura: "Observation of light propagation in photonic crystal optical waveguides with bends," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 654-655.
- 8) S. G. Johnson, P. R. Villeneuve, S. Fan and J. D. Joannopoulos: "Linear waveguides in photonic-crystal slabs," *Phys. Rev. B*, **62** (2000) 8212-8222.
- 9) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai and K. Inoue: "Theoretical and experimental investigation of straight defect-waveguides in AlGaAs-based air-bridge-type two-dimensional photonic crystal slabs," *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 4286-4288.
- 10) A. Mekis and J. D. Joannopoulos: "Tapered couplers for efficient interfacing between dielectric and photonic crystal waveguides," *J. Lightwave Technol.*, **19** (2001) 861-865.
- 11) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai and K. Inoue: "Light propagation characteristics of Y-branch defect-waveguide in AlGaAs-based air-bridge two-dimensional photonic crystal slabs," *Optics Lett.*, **27** (2002) 388-390.
- 12) 迫田和彰, 井上久遠: "フォトリック結晶のレーザー作用", *応用物理*, **68** (1999) 1372-1375.
- 13) K. Inoue, M. Sasada, J. Kawamata, K. Sakoda and J. W. Haus: "A two-dimensional photonic crystal laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) L157-L159.
- 14) M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, M. Murata and G. Sasaki: "Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure," *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 316-318.
- 15) O. Painter, R. K. Lee, A. Yariv, A. Scherer, J. D. O'Brian, P. D. Dapkus and I. Kim: "Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser," *Science*, **284** (1999) 1819-1821.
- 16) J. Moosburger, M. Kamp, F. Klopff, J. P. Reithmaier and A. Forchel: "Semiconductor lasers with 2D-photonic crystal mirrors based on a wet-oxidized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-mask," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **13** (2001) 406-408.
- 17) K. Inoue, N. Kawai, Y. Sugimoto, N. Carlsson, N. Ikeda and K. Asakawa: "Observation of small group velocity in two-dimensional AlGaAs-based photonic crystal slabs," *Phys. Rev. B*, **65** (2002) 121308 : 1-4.

(2001年12月14日受理)