

フォトニック結晶

野 田 進

1. はじめに

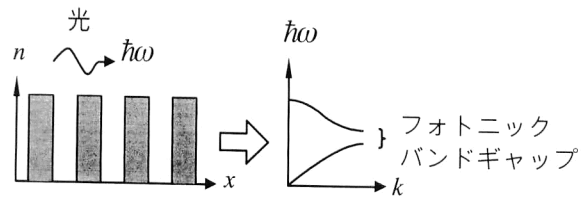
フォトニック結晶¹⁻⁷⁾とは、図1に示すように、その内部に周期的な屈折率分布を設けた新しい光材料である。通常の固体結晶においては、原子核が形成する周期的なポテンシャルの存在により、ある特定のエネルギーをもった電子はどの方向に対してもブラッグ反射を受け、結晶中を伝搬できない、あるいは存在さえできなくなり、いわゆるバンドギャップが形成される。これと同様に、フォトニック結晶においても、周期的な屈折率分布を設けることにより、ある特定の波長域の光がどの方向にも伝搬できない、さらには存在さえ許されないバンドギャップが形成されることになる。図1の構造は、屈折率分布が1次元の場合を表しており、バンドギャップは一方向にしか形成されず、また古くから多層薄膜として知られ、あえてフォトニック結晶とよばれることは少ない。図2に示すように、屈折率の分布が3次元になるとき、図3のバンド図（横軸は光のさまざまな伝搬方向に対応し、縦軸は周波数を表す）に示すように、どの方向に対しても光が伝搬し得ない周波数域が存在するようになる。これが、フォトニックバンドギャップである。

フォトニック結晶において最も興味深い点は、フォトニックバンドギャップの存在にある。バンドギャップ中では、光は状態を取り得ないため、通常生じ得る現象とはまったく異なった現象が生じることになる。例えば、通常、自然放出は避けることのできない現象と考えられているが、バンドギャップ中では、光は状態を取り得ないことから、自然放出の禁止が起こると考えられる。結晶中に人為的に点状欠陥を導入すると、その欠陥に光が強く局在するようになる。言い換えれば、欠陥単位において光の状態密

度が大幅に増大し、発光寿命が著しく短くなり、自然放出光なのか、レーザー光なのかの区別がつかない、いわゆるゼロ閾値レーザーにつながっていくと考えられる。さらにフォトニックバンドギャップの存在により、原子系を外場から遮断することが可能となり、いくつかの閉じ込められた原子系同士の純粋な相互作用を可能とし、近年注目を集めている量子コンピューティング素子の場等を提供するものとしても期待される。また、フォトニック結晶中に人為的に線状の欠陥列を導入することにより、曲げ導波路を形成することも可能である⁸⁾。この曲げ導波路の特長は、導波路以外の部分においては、バンドギャップの存在により、光が漏れないことにあり、従来の曲げ導波路、つまり曲げ損失を小さくするため、大きな曲率半径を用いて、できるだけゆっくと曲げる導波路に比べて、2~3桁程度小さな大きさで曲げが可能となり、その結果として、極微小の光回路の構成が可能となる。

図4は、フォトニック結晶の究極の姿のひとつとして、新しい超小型光回路を示す^{4,9)}。この図においては、100 μm 角という非常に小さな領域に、さまざまな発振波長をもつ極低閾値レーザーアレイ、急峻な曲げ導波路、光変調器、波長分波器などが、3次元フォトニック結晶中に、適当な欠陥導入をすることにより形成できることを示す。図4はあくまでも概念図であり、欠陥の導入法の工夫だけで、さまざまな微小デバイス・回路の構成が期待できる。このような超小型光回路を実現することを念頭に置いた場合は、3次元完全バンドギャップをもつ結晶が必要となる（ここで「完全」という言葉を使うのは、3次元的に周期的な屈折率分布をもつ結晶であっても、バンドギャップをもたない結晶が多く存在するため、それらと区別する意味である）。また任意の位置に欠陥導入が可能であること、高効率発光体の導入が可能であること、さらに電気を流すこと（あるいは電界印加が可能であること）等の条件が満

京都大学工学研究科電子物性工学専攻（〒606-8501 京都府左京区吉田本町）、CREST-JST
E-mail: snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp



周期的屈折率分布
図1 フォトニック結晶の概念図。

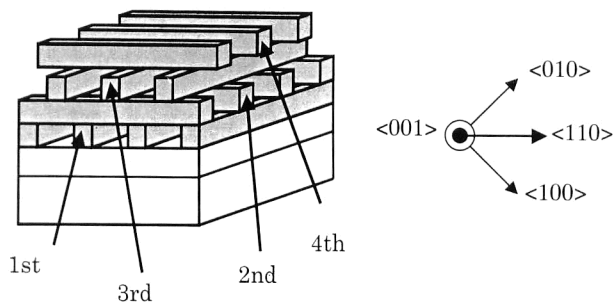


図2 3次元フォトニック結晶の例。屈折率の分布が3次元になるとき、光がどの方向に伝搬する場合でもバンドギャップが存在するようになる。

たされると、より理想的なものとなる。

一方、周期的な屈折率分布を2次元面内のみに設けた結晶、すなわち2次元フォトニック結晶は、上記のような理想的な3次元結晶に比べると、光閉じ込めの次元が1次元減るため、完全な光制御は望めないが、作製が容易であるというメリットをもつ。この2次元結晶においても、2次元面内の光閉じ込め・制御を利用することにより、各種の機能デバイスが実現可能である。

2. 完全3次元フォトニック結晶と超小型光回路

2.1 理想的な3次元フォトニック結晶の開発

現在までに、さまざまな興味深い3次元フォトニック結晶作製法が提案され、試作が進められているが、理想的な条件（すなわち、完全バンドギャップをもち、欠陥や発光体導入が可能で、かつ電流注入可能な）結晶は、これまで実現されていなかった。例えば、オパール法¹⁰⁾とよばれる自己形成による3次元周期構造（対称面心立方構造）では十分なバンドギャップが形成されない。現在、完全なバンドギャップが形成される構造は、面心立方構造の各格子点の対称性を崩した非対称面心立方構造およびダイヤモンド構造であると理解されている¹¹⁾。一方、完全バンドギャップをもつ結晶として、最近注目を集めているものに、表面マイクロマシーニング技術を用いた非対称面心立方構造ポリシリコンフォトニック結晶が挙げられる¹²⁾。この場合、構成材料がシリコンであるがゆえに、高効率発光体の

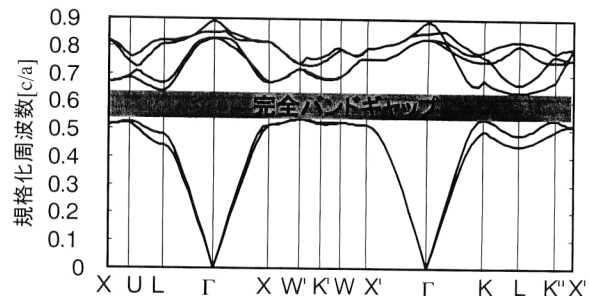


図3 図2の3次元結晶のバンド構造。横軸はさまざまな光の伝搬方向を表し、縦軸は、光の周波数（波長）を表す。

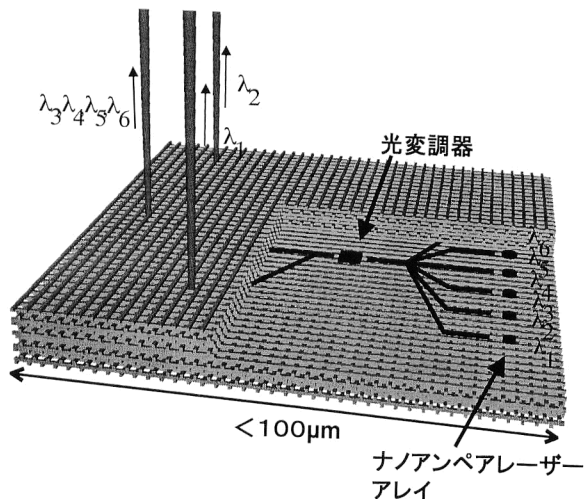


図4 フォトニック結晶を用いた超小型光回路の模式図。極低閾値半導体多波長レーザーレイ、極微小導波路、変調器、90°垂直曲げ導波路等が極微小領域に集積化されている。そのほかにも欠陥の導入法の工夫だけで、さまざまな微小デバイス・回路の構成が期待できる。

導入という条件が満たされなくなる。

筆者らは、上記の条件を満たす完全フォトニック結晶を得るため、ウェハー融着およびレーザー光回折アライメント法という独自のマイクロマシーニング技術を用いて高精度にIII-V族半導体ストライプを積層し、既出の図2に示すストライプ積層型結晶を作製するという方法を提案した¹³⁾（同図では、4層のストライプが積層された構造を示し、これはダイヤモンド構造の1周期に相当する。すでに図3に示したように、この構造は完全バンドギャップをもつ）。よく知られるようにIII-V族半導体は広く発光デバイスに用いられることから、発光体導入が容易となる。またウェハー融着法は、2枚のウェハーを重ねて水素や窒素雰囲気中で加熱処理することにより一体化する技術で、任意の構造が自在に形成でき、かつ融着界面に電気を流すことが可能であることから、上述の条件がすべて満たされることになる。

これまで、筆者らは、上述の方法にて、中赤外域

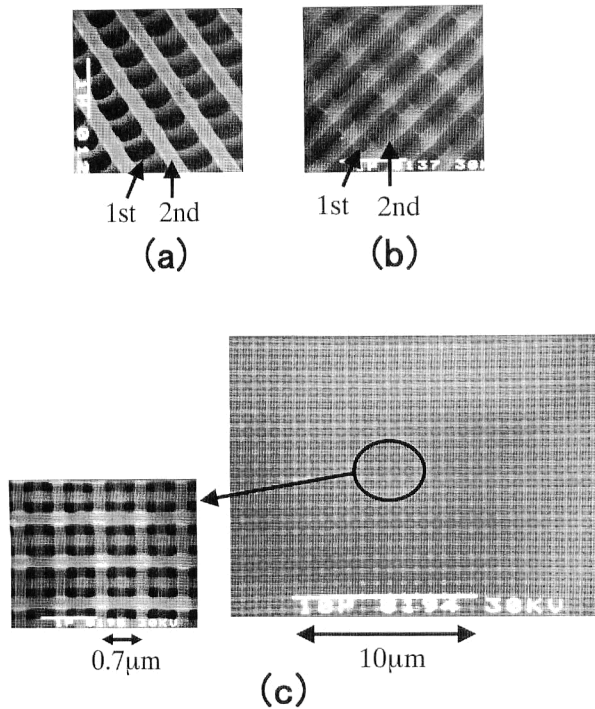


図5 (a) 従来のプロセス, および (b) 改良後のプロセスに基づいて, 2層のストライプを積層した後の表面のSEM写真. (c) 今回新たに開発した3次元結晶の表面SEM写真.

($5\sim 10\ \mu\text{m}$)^{9,14,15} および光通信波長域 ($1\sim 2\ \mu\text{m}$ 域)^{9,15} にバンドギャップをもつ3次元結晶を作製してきた. その詳細については, すでに本誌「光学」をはじめ, いくつかの解説書等^{2,4,7}) で述べている. 中赤外域にバンドギャップをもつ結晶においては, 十分な光遮断効果 (例えば, ストライプ4層および8層積層構造において, バンドギャップに相当する波長域でそれぞれ $-18\ \text{dB}$, $-30\ \text{dB}$ 程度の非常に大きな光の遮断) が得られている. しかし, 光通信波長域にバンドギャップをもつ結晶では, 光遮断効果はみられるものの, その特性が赤外域結晶に比べて1桁程度も劣るといふ問題点があった. これは, 実際に結晶をさまざまな光制御に用いる際, 大きな問題となる.

このような問題点を解決するため, 筆者らはまず, 光通信域の結晶において何が最も特性劣化に関与しているかについて検討を行った. その結果, 特性劣化に関与する最も重要な要因として, i) ストライプ積層のために用いるウェハー融着時に, 界面において原子が質量輸送現象により移動し, ストライプ形状が融着前に比べて崩れてしまうこと, ii) ストライプを形成した2枚のウェハーを融着後, 不必要な一方の基板を除去するプロセスが存在するが, このプロセスの際のわずかな過エッチングが形状を大きく変化させること, の2点が挙げられることがわかった. 図5(a) は, これらのプロセス後のストライプ形状の走査型

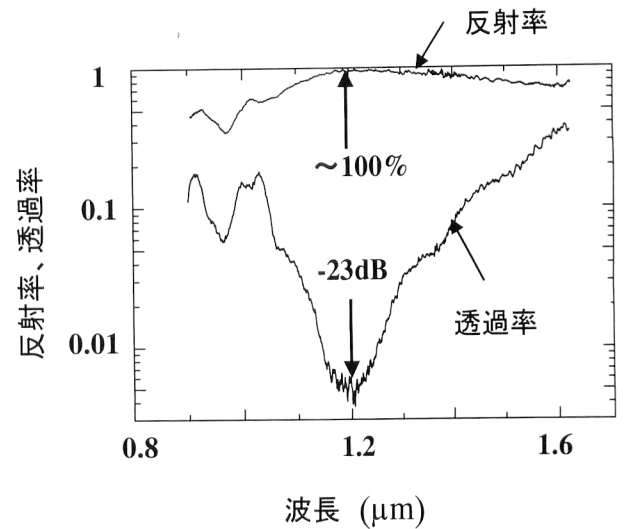


図6 図5(c) の結晶に対して, 垂直方向から光を入射した場合の透過, 反射スペクトル.

電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す. 同図より, ストライプ形状が大きく劣化していることがわかる. 特に, ストライプの中央付近が非常に薄くなっていること, またストライプの形状そのものが丸くなっていることがわかる. これらの形状劣化が光遮断効果に与える効果を理論計算したところ, 確かに10分の1程度に特性が劣化することがわかった¹⁶⁾. そこで, この問題点に対処するため, ウェハー融着温度の最適化, および基板剥離プロセスの際に干渉法を用いて, 厳密に基板を除去する方法を新たに導入することとした. その結果, 図5(b) に示すように, 2層のストライプ積層後の形状劣化は大幅に抑えられ, ほぼ完全な形状が得られるようになった. この結果をもとに, 新たに4層ストライプ積層構造結晶を作製した. その表面のSEM写真を図5(c) に示す. 同図から非常に一様で, 均一な結晶が大面積にわたって得られていることがわかる. また, その拡大図から, $0.7\ \mu\text{m}$ という非常に小さなストライプ間隔であるにもかかわらず, ほぼ完全 (形状のずれが $30\ \text{nm}$ 以内) な構造が形成できていることがわかる¹⁷⁾.

この構造に対して, 垂直入射の透過および反射スペクトルを測定した結果を図6に示す. 同図から, わずか4層という少ない積層数でありながら, バンドギャップの存在を示す $-23\ \text{dB}$ という大きな透過減衰量が得られており, それに対応して, ほぼ100%の反射率が得られていることがわかる. この結果は完成した結晶が光学的にも完全な特性をもつことを示している. 上記の結晶に対して, さまざまな入射方向から光を入射して, 透過スペクトルを測定した結果, $1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$ に完全バンドギャップをもつことが判明した. さらに最近では, 8層結晶の実現にも成功しており, 透過率の減衰量として $-40\ \text{dB}$ (99.99%の反射率

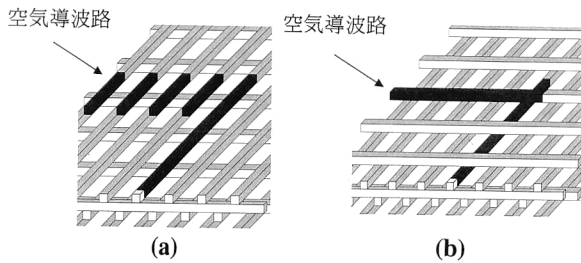


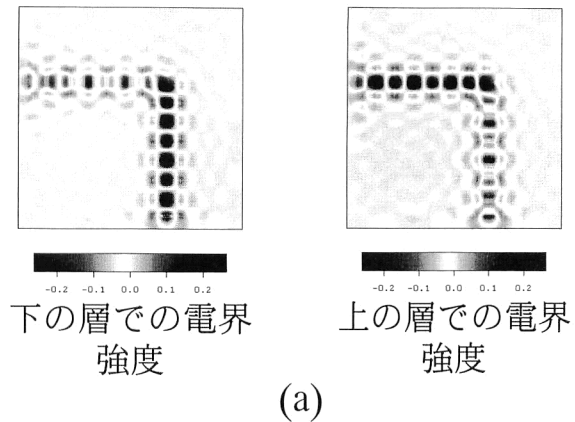
図7 (a) 欠陥層としてフォトニック結晶層1層を用いた90°曲がり導波路の模式図, (b) 欠陥層として2層のフォトニック結晶層を用いた90°曲がり導波路の模式図.

に相当) というほぼ理想的な値が達成され, フォトニック結晶として十分な特性をもつ結晶が得られるようになった¹⁷⁾.

2.2 超小型光回路実現へ向けて

以上のように, 3次元結晶実現のための基礎が固まったため, 図4に示すような光回路へと展開していくことが可能となった. しかしながら, 同図のような超小型光回路を実現するためには, 各部分の設計とその試作, 特性評価を経て, 集積回路へと進む必要がある. 無限の高さをもつ2次元フォトニック結晶においては, すでにその設計指針が示されているが, 現実的には, 2次元フォトニック結晶は無限の高さではなく, 有限の高さの結晶が作られることになろう¹⁸⁾. この場合, 上下への放射損失の問題が発生し, 損失の小さな曲げ導波路を広範な波長域で実現するためには相当の工夫が必要となる¹⁹⁾. 一方, 3次元においては, もともと完全な結晶構造をもつため, 放射損失の問題がなく, 3次元結晶において, きちっとした導波路構造が設計できれば, 広範な波長域において低損失曲げ導波路が実現できるものと期待される.

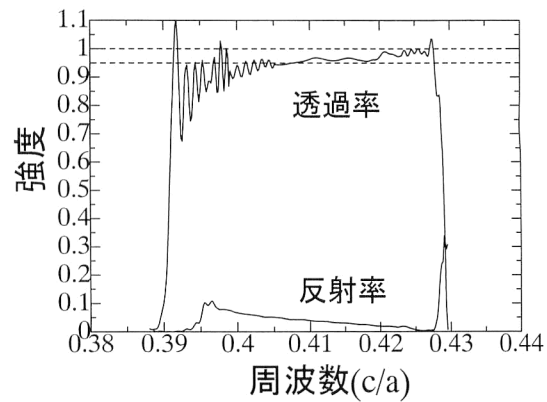
さて, 3次元結晶中に導波路を形成することを考えた場合, 非常に多くの自由度が存在するが, 結晶作製の立場からは, できるだけ導波路を形成する層の数は少ないほど好ましい. そこで例えば, 欠陥層としてフォトニック結晶層のうち1層を用い, この中に曲げ導波路を形成することを考えると, 図7(a)のようなものがすぐに思いつく. この場合, 90°曲げの前後での伝搬モードの不一致が存在するため, 曲げ損失はかなり大きくなる. 実際, 3次元FDTD (finite-difference time-domain) 法を用いて計算してみると, 50%程度の反射損失が存在することがわかった. 結局, 3次元中の曲がり導波路として有効な構造は, 図7(b)に示すように, 導波路層として2層のフォトニック結晶層を用い, 曲げの前後で導波モードが一致するようにした構造が有効であることがわかった²⁰⁾. 図8(a)はFDTD法で計算した光導波の様子を示している. 曲げの



下の層での電界強度

上の層での電界強度

(a)



(b)

図8 (a) 図7(b)の構造の90°曲がり導波路における光伝搬の様子計算結果. (b) 透過スペクトルの計算結果.

前では, 下の層を主として伝搬し, 曲げ部に達したとき, 上の層へと上がり, その後上部の層を伝搬していく様子が見てとれる. 図8(b)には曲がり導波路における透過スペクトルを示すが, これより, 幅広い波長域において, 95%以上の透過率が得られることがわかり, この曲がり導波路の有効性が理解される. 以上の考えはさまざまな光回路へと展開可能であり, 例えば一方の導波路を延長するだけで, 超小型T字分岐導波路の形成が可能となる. ごく最近, 上記の設計に基づく実際の回路の試作にも成功している¹⁷⁾.

3. 2次元フォトニック結晶とその応用

3.1 2次元フォトニック結晶レーザー

図9は筆者らの開発した2次元フォトニック結晶構造レーザーの構造を示す^{9,21)}. 同図において, ウェハーAは, InGaAsP/InP多重量子井戸活性層(波長1.3 μ m)をもち, 一方ウェハーBは, その表面に空気/半導体三角格子構造をもつ2次元フォトニック結晶を形成したInP基板である. 両基板をウェハー融着法により, 一体化してデバイスが完成する. 基本的に, 光は活性層部分に閉じ込めら

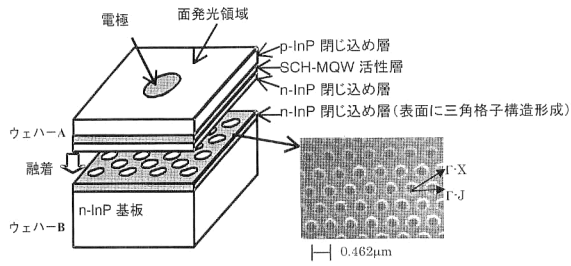


図9 2次元フォトニック結晶レーザーの模式図と、三角格子構造の表面写真。

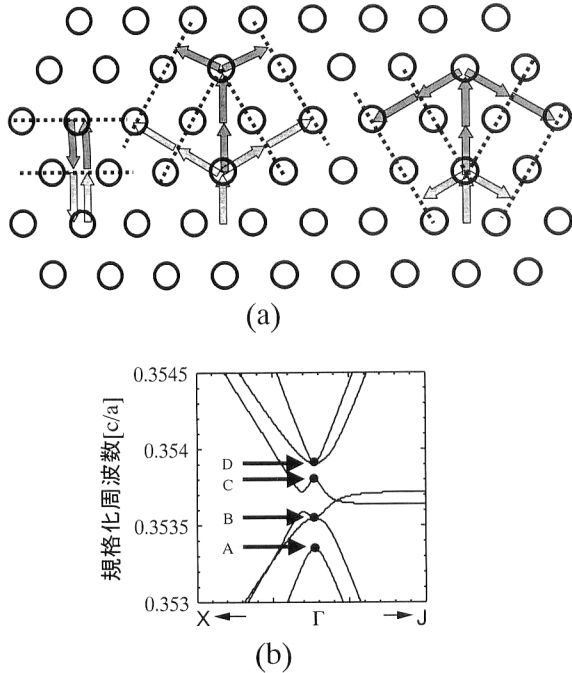


図10 (a) 2次元三角格子構造における回折現象. 等価な6つの Γ -X方向に進む波が互いに結合し合うことになる. (b) バンド端近傍の様子.

れるが、エバネセント波がフォトニック結晶を感じるようになる。2次元結晶の格子定数は、 $0.46 \mu\text{m}$ と設計した。この値は、三角格子構造の代表的な方向の一つである、 Γ -X方向における周期が、ウェハーAの量子井戸層の発光波長に一致するように選んだものである。したがって、このデバイスにおいては、量子井戸から発せられた光は、 Γ -X方向において2次の分布帰還作用を受けることになる。ここで注意すべきことは、2次元三角格子結晶の場合、全部で6つの Γ -X方向が存在するため、それぞれの Γ -X方向に伝搬する光波は、反対方向に回折を受けるだけでなく、図10(a)に示すように、他の4方向にも回折されることになり、6つの光波が互いに結合し合うことである。その結果、フォトニックバンド構造におけるバンド端近傍の様子は図10(b)に示すように、6つの光波の結合に基づき、2つの縮退を含む4つのバンド端が Γ 点に形

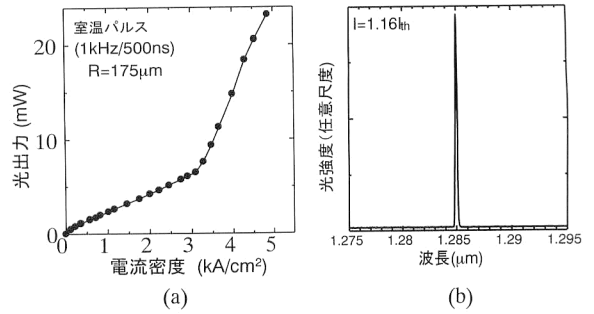


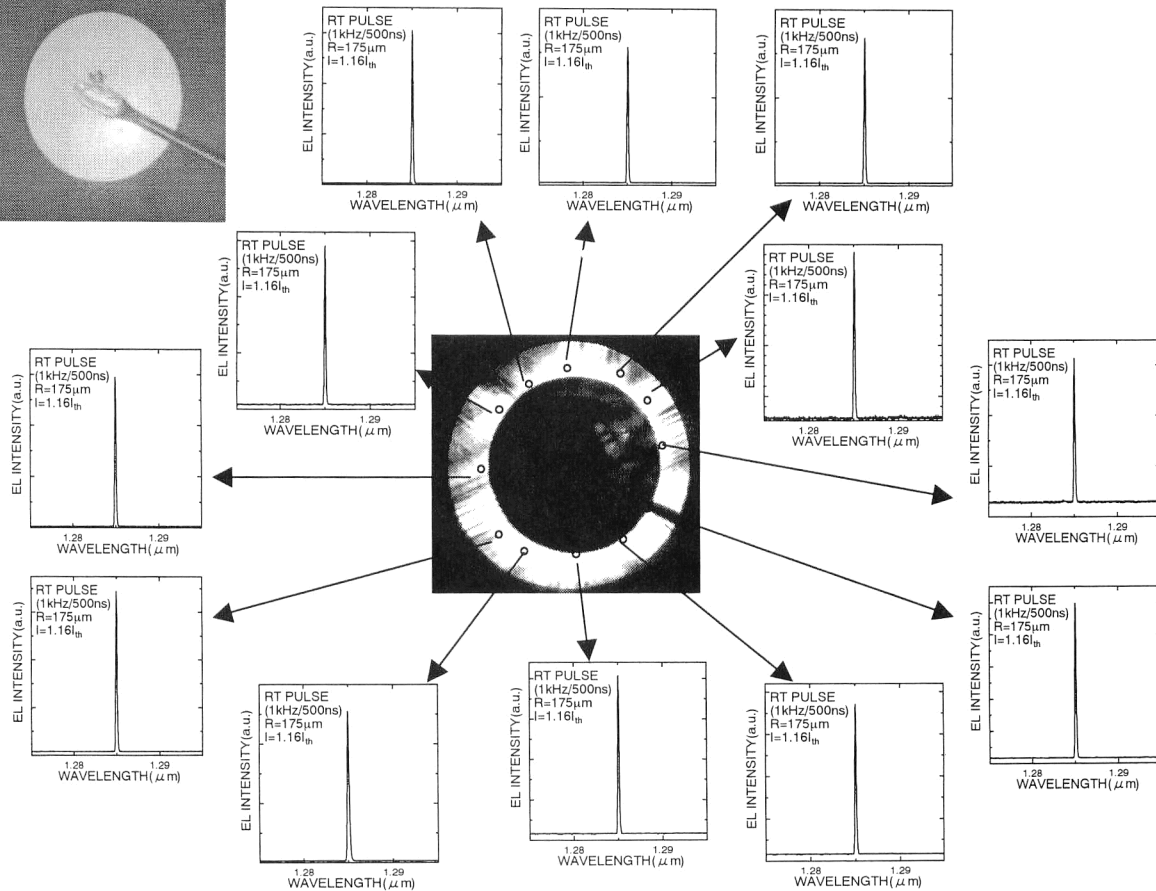
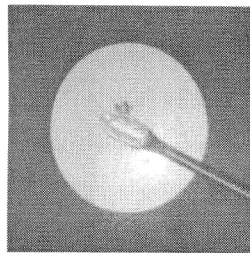
図11 (a) 電流-光出力特性の一例と、(b) 発振スペクトル。

成されることになる。 Γ 点は定在波が立つ点を表しており、発振はこの4つの点のどれかで起こることが期待される。ちなみに、通常の1次元の分布帰還型レーザーにおいては、左右に進む2光波の結合により、発振状態に達する。この意味では、2次元のフォトニック結晶レーザーは6つの光波が面内で結合した多次元分布帰還型レーザーとよぶこともできる。しかしながら、結合波理論で解析するよりも、2次元のバンド解析の手法を用いて発振周波数や電界分布を求めたほうがより正確である。このようにフォトニック結晶の性質がより強く現れるという意味でフォトニック結晶レーザーとよんでいる。なお、レーザー光の一部は1次の回折作用により、上部への回折を受け、面発光レーザーとして動作し得るのが特長である。

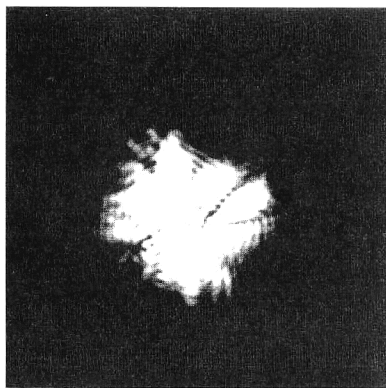
図11(a), (b)には、デバイスの電流-光出力特性の一例と、発振スペクトルを示す。同図から、本デバイスは室温で確かに発振し、単一モードで動作していることがわかる。図11(b)のように単一縦モード動作しているのは、上述のバンド端のうち1つが偶然選ばれたものと想像される。図11(a)の光出力は、基板面に垂直な方向に取り出された出力を示しており、高效率の面発光レーザーとして動作することがわかる。

図12(a)には、発振後の近視野像と、局所スペクトルを、同図(b)には遠視野像を示している。図12(a)は、作製したデバイスは、デバイス全面で発振し、各部の発振スペクトルはすべて同じ単一波長で動作し、2次元面内での発振が、コヒーレントに起こっていることを表している。その結果、遠視野像も同図(b)に示すように、 1.8° 以下と、相当狭いものとなっている。以上において強調したい点は、測定に用いたデバイスの直径は、 $350 \mu\text{m}$ と非常に大きいにもかかわらず、発振は単一縦モードで起こっていることである。通常のレーザーの場合、そのようなブロードエリアの場合、必ず多モード発振する。その違いは、本デバイスが、縦モードのみならず、横モードまでも2次元結晶構造を用いることにより制御している点であ

デバイス表面



(a)



$$J = 1.56 J_{th}$$

$$\text{H} \quad 1.8^\circ$$

(b)

図 12 (a) 発振後の近視野像と局所スペクトル、および (b) 遠視野像。

り、大面積であっても、単一縦横モードが期待できるところに最大の特長がある。現在、その発振モードの同定や、バンド端との対応にも成功しており、また偏光も自在に制御できる見通しを得ている。

3.2 2次元結晶への欠陥導入によるフォトンの捕獲とその応用

筆者らが見いだした2次元結晶を用いた興味深い現象とその応用について述べる²²⁾。まず、基本となる結晶の構造

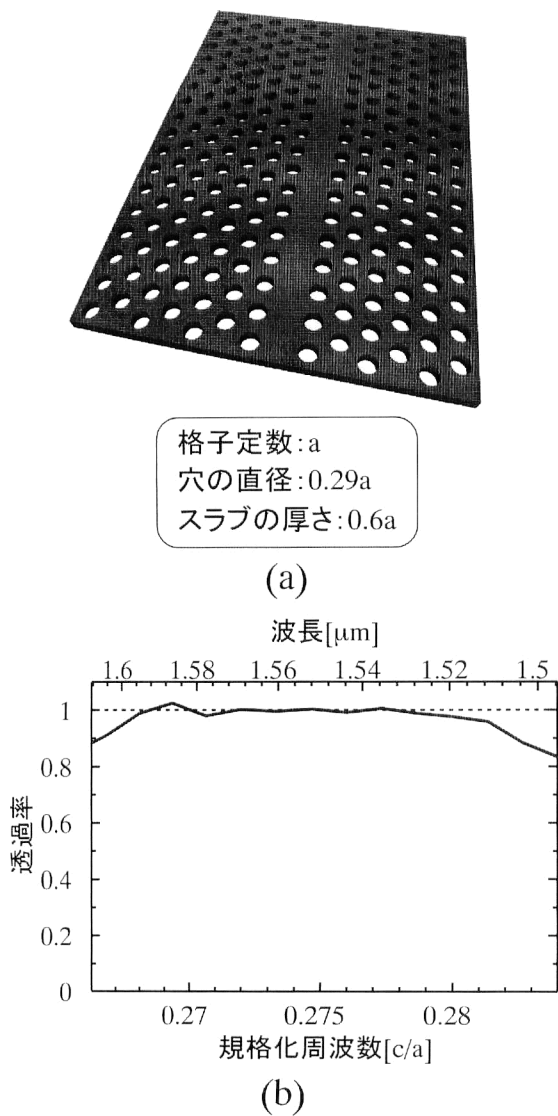


図13 (a) 線状欠陥（導波路）を設けた2次元フォトニック結晶スラブの模式図，および (b) 透過特性。

は，図13(a)に示すような，2次元フォトニック結晶スラブ（薄板）に直線状の欠陥（導波路）を導入したものである。この場合，上下方向の光の閉じ込めは，上下の空気クラッドで行う。この構造の導波路においても，曲げを伴わない場合は図13(b)に示すように，ある特定の周波数域において損失なく光は伝搬する。

この基本構造に対し，図14(a)に示すように2つの欠陥を導入することを考える。これらの欠陥を i, j とする。また，それぞれの欠陥周波数を f_i および f_j とする。ここで，導波路の入射端から，これらの欠陥周波数に相当する光子エネルギーをもつ光子を導入したとする。このとき，それぞれの周波数に相当する光子はそれぞれの欠陥に捕獲されることになる。これは，ちょうど，半導体に欠陥が導入された場合，その欠陥に電子や正孔が捕獲されるのとまったく同じ現象である。捕獲された光子

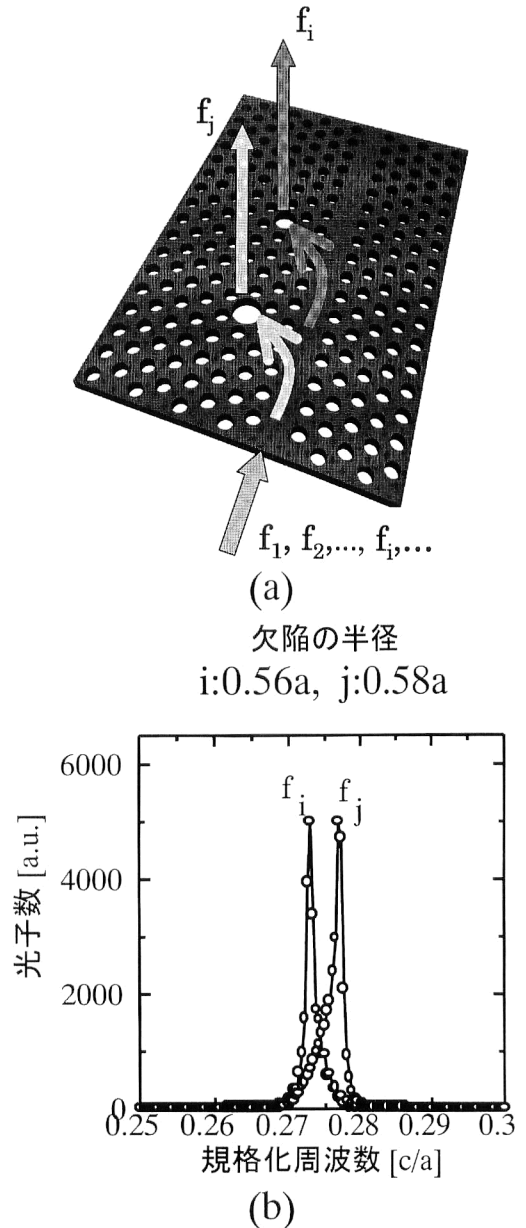


図14 (a) 図13のスラブへの2つの欠陥導入。2つの異なる欠陥により，それぞれの欠陥周波数に相当するエネルギーをもつ光子が捕獲される。捕獲後は，自由空間へと放射される。(b) 計算結果。

は欠陥中で共振する。しかし，上下方向は，空気クラッドで閉じ込めているだけであるから，やがて自由空間に放射されることになる。図14(b)は，上下方向に放射された光子フラックスを3次元FDTD法にて計算した結果である。同図から，確かに，欠陥 i, j に相当する周波数において，光子が捕獲され自由空間に放射されることがわかる。これらの理論予測をもとに，実験的に確かに欠陥により光が捕獲され，上下方向に放射されることの実証に成功した²²⁾。このようにフォトニック結晶における単一欠陥による光子の捕捉現象を観測したのは，筆者の知る限り

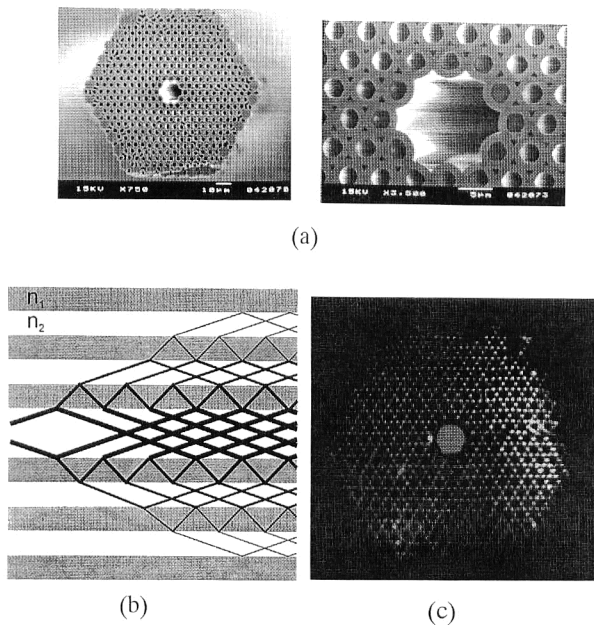


図15 (a) フォトニック結晶ファイバーの断面図。下図は拡大図。(b) 光の伝搬の原理図。(c) 赤色の光が空気部分を伝搬している様子。

この研究が初めてである。この結果は、導波路の近傍に大きさの異なる点欠陥を複数個導入することにより、現在の波長多重通信における超小型の光のアッド・ドロップデバイスを提供することができることを示唆する。さらに上部への光取り出し効率を逆に減少させることにより、超小型波長モニターとして応用することも可能である。さらには、欠陥への強い光の局在現象に注目すると、高非線形現象への応用や、さらには微粒子の捕捉といった新しい分野への展開も期待される。

3.3 その他の2次元結晶利用の例

図15(a)は、フォトニック結晶ファイバー²³⁾とよばれるもので、微小な中空ファイバーを束ねて、2次元結晶を構成したものである。さらにその中央部においては微小ファイバーを設けず、空洞とし光の伝搬路を設けている。光は、図15(b)の模式図に示すように束ねたファイバーからなるクラッドの部分でブラッグ反射を受けながら、中央の空洞部分を伝搬することが可能となる。図15(a)の構造はまだサイズ自体は大きすぎるが、この場合でも、図15(c)に示すように赤色の光が、空気部分を伝搬していく様子が観察された。このような空気部分での光伝搬が可能となると、今後、波長多重等で光ファイバー中を伝搬する光の強度が大幅に増加した場合にも、非線形効果が生じにくいと考えられる。

一方、図16(a)は、2次元結晶を偏光分離素子として用いたものである²⁴⁾。これは、TE波とTM波に対して、

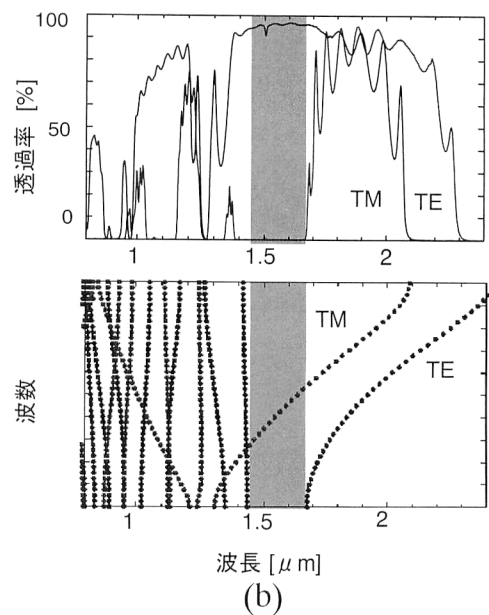
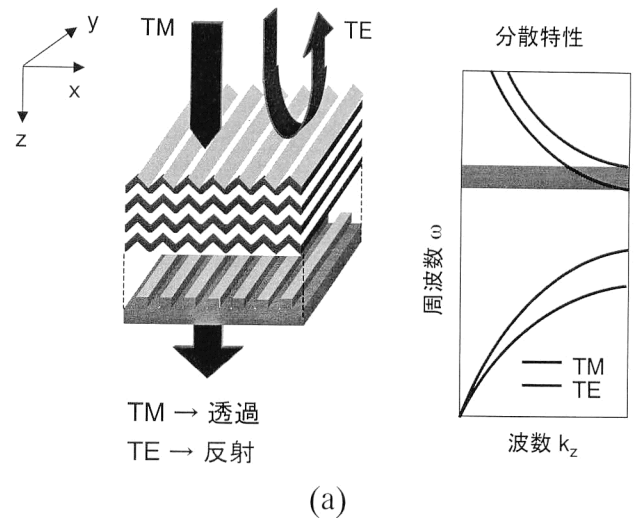


図16 (a) 偏光分離素子の原理図、(b) 素子の特性。

バンドギャップ波長が異なることを利用している。つまり、TE波はバンドギャップ効果により反射し、TM波はバンドギャップ域となっていないことから透過可能であるという性質を利用し、偏光分離を行おうとするものである。試料は、もともと基板の上に形成された凹凸部分にアモルファスシリコンとSiO₂を交互に形状を維持したまま堆積していく技術、つまりオートクローニングと呼ばれる自己形成技術を用いて作製される。同図(b)に示すように実験的にも確かに偏光分離が高い分離比で実現できている。非常に薄型の偏光分離素子として注目される。

そのほかにも、フォトニック結晶の分散性が非常に大きいことを利用して、波長や入射角度に非常に敏感に光の伝搬方向が変化するスーパープリズムと呼ばれる光学素子の実現例もある²⁵⁾。また、2次元フォトニック結晶スラブの

点欠陥を用いて、低温ではあるが光励起発振を実現した例もあり²⁶⁾、フォトニック結晶のここ数年の進展はめざましいものがある。

4. ま と め

まず、3次元フォトニック結晶について、その開発の現状について紹介した。今後、結晶内部にさまざまな欠陥を導入することで、さまざまな超小型の光回路へと展開していくものと期待される。一方、2次元フォトニック結晶においても、2次元面内の光閉じ込め・制御を利用することにより、さまざまな興味深い現象、デバイス応用が期待できることを示した。今後のますますのフォトニック結晶における新しい現象の発見や、その利用の進展を期待して、この講義の結びとしたい。なお、本講義では、数式をできるだけ使わずに説明したため、定量的な議論を望まれる読者は、各所に挙げた文献をぜひ参考にさせていただきたいと思う。

文 献

- 1) E. Yablonovich: "Photonic band-gap structure," J. Opt. Soc. Am. B, **10** (1993) 283-295.
- 2) 野田 進: "光波長域3次元フォトニック結晶実現に向けて—自然放出の完全制御のために—", 光学, **27** (1998) 6-10.
- 3) 馬場俊彦, 池田充貴, 神澤尚久, ハンス ブロム: "フォトニック結晶とその応用", 応用物理, **67** (1998) 1041-1045.
- 4) 野田 進: "ウエハーボンディング技術による新しい光材料—フォトニクス結晶の創製—", 電子情報通信学会誌, **82** (1999) 232-241.
- 5) バーバラ・ゴス・レビー: "光を自在にあやつる人工結晶—急進展する3次元フォトニック結晶—", パリティ, **14**, 10 (1999) 57-63.
- 6) 迫田和彰, 井上久遠: "フォトニック結晶のレーザー動作", 応用物理, **68** (1999) 1372-1375.
- 7) 特集「フォトニック結晶」, O plus E, **21** (1999) 1524-1582.
- 8) A. Mekis, J. C. Chen, I. Kurland, S. Fan, P. R. Villeneuve and J. D. Joannopolous: "High transmission through sharp bends in photonic crystal wave guides," Phys. Rev. Lett., **77** (1996) 3787-3790.
- 9) S. Noda, N. Yamamoto, M. Imada, H. Kobayashi and M. Okano: "Alignment and stacking of semiconductor photonic bandgaps by wafer-fusion," IEEE J. Lightwave Technol., **17** (1999) 1948-1955.
- 10) H. Miguez, C. Lopez, F. Meseguer, A. Blanco, L. Vazques, R. Mayoral, M. Ocana, V. Fornes and A. Mifsud: "Photonic crystal properties of packed submicrometric SiO₂ spheres," Appl. Phys. Lett., **71** (1997) 1148-1150.
- 11) K. M. Ho, C. T. Chan and C. M. Soukoulis: "Photonic gaps for electromagnetic waves in periodic dielectric structures: Discovery of the diamond structure," *Photonic Band Gaps and Localization*, ed. C. M. Soukoulis (Plenum Press, New

York, 1993) pp. 235-245.

- 12) S. Y. Lin, J. G. Fleming, D. L. Hetherington, B. K. Smith, R. Biswas, K. M. Ho, M. M. Sigalas, W. Zubrzycki, S. R. Kurtz and J. Bur: "A three-dimensional photonic crystal operating at optical wavelength region," Nature, **394** (1998) 251-253.
- 13) S. Noda, N. Yamamoto and A. Sasaki: "New realization method for three-dimensional photonic crystal in optical wavelength region," Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) L909-L912.
- 14) N. Yamamoto, S. Noda and A. Chutinan: "Development of one period of a three-dimensional photonic crystal in the 5-10 μm wavelength region by wafer fusion and laser beam diffraction pattern observation technique," Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) L1052-L1054.
- 15) S. Noda, N. Yamamoto, H. Kobayashi, M. Okano and K. Tomoda: "Optical properties of three-dimensional photonic crystals based on III-V semiconductors at infrared to near-infrared wavelengths," Appl. Phys. Lett., **75** (1999) 905-907.
- 16) A. Chutinan and S. Noda: "Effects of structural fluctuations on the photonic bandgap during fabrication of a photonic crystal," J. Opt. Soc. Am. B, **16** (1999) 240-244.
- 17) S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto and A. Chutinan: "Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths," Science, **289** (2000) 604-606.
- 18) T. Baba, N. Fukaya and J. Yonekura: "Observation of light transmission in photonic crystal waveguides with bends," Electron. Lett., **27** (1999) 654-655.
- 19) A. Chutinan and S. Noda: "Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs," Phys. Rev. B, **62** (2000) 4488-4492.
- 20) A. Chutinan and S. Noda: "Highly-confined waveguides and waveguide bends in three-dimensional photonic crystal," Appl. Phys. Lett., **75** (1999) 3739-3741.
- 21) M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, H. Kobayashi 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.
- 22) S. Noda, A. Chutinan and M. Imada: "Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure," Nature, **407** (2000) 608-610.
- 23) R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, P. J. Roberts and D. C. Allan: "Single-mode photonic bandgap guidance of light in air," Science, **285** (2000) 1537-1539.
- 24) 川嶋貴之, 大寺康夫, 佐藤 尚, 川上彰二郎: "2次元フォトニック結晶偏光分離素子の高性能化", 2000年電子情報通信学会総会全国大会講演論文集 (2000) C-3-1.
- 25) H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Sato and S. Kawakami: "Superprism phenomena in photonic crystal," Phys. Rev. B, **58** (1998) 10096-10099.
- 26) O. J. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus and I. Kim: "Two-dimensional photonic bandgap defect mode laser," Science, **284** (1999) 1819-1821.

(2000年11月8日受理)