

フォトニック結晶

京都大学工学研究科電子工学専攻

野 田 進

Photonic Crystals

Susumu Noda

Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University

1. はじめに

現在、「フォトニック結晶」という言葉は、様々なところで使われるようになり、十分に認知されるようになってきた。少し前までは、まだフォトニック結晶とは何か、あるいは、どのような現象が創出されるかという議論が主体であったが¹⁾、最近では、モデル化、計算手法、作製技術も大幅に進展し、より完成度の高いものが出来るようになってきた。以下では、最近のフォトニック結晶研究の進展の一端を示すため、我々の研究グループで行っている超小型波長合分波デバイス²⁾を例に、最近の研究状況について述べる^{3)~6)}。また、我々は、極最近、「面内ヘテロ構造」という概念を提唱したが³⁾、これは、フォトニック結晶を用いて、デバイスを構築する上で、極めて重要な概念となりうるので、この概念についても、紹介させて頂く。また、最後に、極最近の話題として、波長程度という極微小な大きさでありながら、そのQ値が、45,000 という極めて高い「光ナノ共振器」が実現出来たことについても触れる。

2. フォトニック結晶超小型波長合分波デバイスの動作原理と基本特性

図1に、2次元フォトニック結晶スラブ（薄板）を用いた超小型波長合分波デバイスの原理図を示す^{2),7),8)}。これは、2次元フォトニック結晶スラブ（薄板）中に設けた線状欠陥導波路に

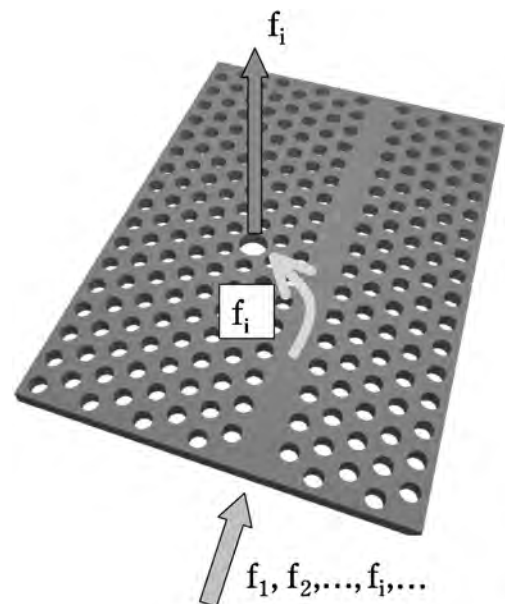


図1 2次元フォトニック結晶スラブ（薄板）を用いた超小型波長合分波デバイスの原理図。

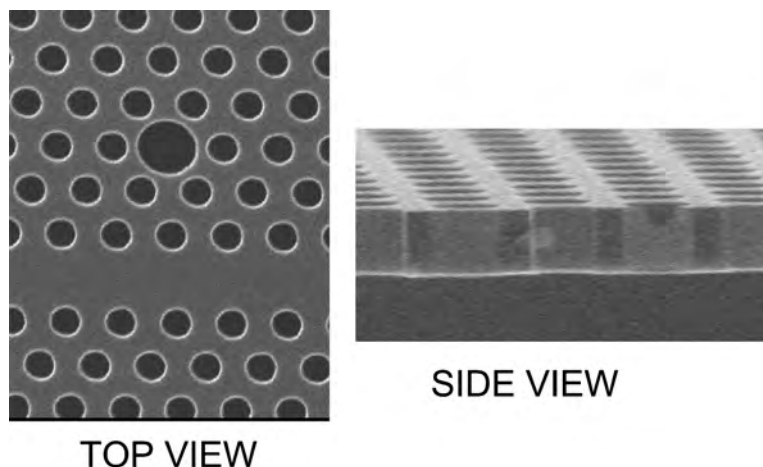


図2 デバイスのSEM写真。

様々な光子エネルギーをもつ光を導波させ、導波路の近傍に設けた点欠陥により、点欠陥単位に相当するエネルギーをもつ光子を捕獲し、点欠陥共振器中で共振している間に、垂直方向に光が取り出されるという原理で動作するものである。波長程度の極めて小さな欠陥1つで、光を捕獲・操作が可能となるため、超小型デバイスの実現が可能となるものと期待される。詳細な動作原理については、文献[8]に述べているので、併せてご参考頂ければ幸いである。

2000～2001年頃、すでに、我々は、その動作原理を実験的に検証した結果を報告していた。その後、材料系をより加工の容易なSi/SiO₂系に変更し、電子ビーム露光技術およびドライエッチング技術の最適化により、図2に示すような非常に精度の高い結晶が形成出来るようになった。2次元フォトニック結晶スラブは、最上層のSi層に形成され、フォトニック結晶の各種のパラメータとしては、格子定数 $a = 0.42 \mu\text{m}$ を用いて以下のような値が用いられた。スラブ厚さ $d = 0.6a$ 、空気格子点の半径 $r = 0.29a$ 、導波路幅 $w = 1.73a$ 、点欠陥の半径 $R = 0.53a$ 。同図に示すような非常に揺らぎの少ない試料が出来たため、定量的な評価も可能となった。以下では、デバイスの基本特性に

ついて述べる。

図2に示すデバイスにおける線欠陥導波路の透過スペクトル、点欠陥から上部(自由空間)へのドロップスペクトルを測定した結果を図3(a),(b)に示す⁴⁾。同図(a)より、波長 $1.51 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 域において光が導波路を透過している様子が明確に見てとれる。また、この透過スペクトルには鋭いフリンジが乗っているのが見られるが、これは、導波路端面でのファブリー・ペロー共振に起因するもので、両端面の無反射化により除去できるものと考えられる。さて、同図(a)で、最も重要なのは、 $1.55 \mu\text{m}$ 近傍において透過強度が減衰している点である。これは、同図(b)のドロップスペクトルのピークと明確に一致しており、点欠陥による光の捕獲・放射により、透過スペクトルが減衰していることを意味している。同図(c)は、逆に、自由空間から点欠陥へ向けて光を入射し、欠陥により光を捕獲し導波路へ導き、導波路端からの出力光強度を観測した結果を示している。これより、光合波動作が確かに実現出来ていることが分かる。

図3(a)の透過スペクトルの減衰量から、点欠陥による光の取り出し効率を定量的に求めることが出来る。図4は、透過率(T)、ドロップ

効率(D)を理論計算により求めたものである⁷⁾。横軸には、点欠陥における面内方向のQ値($Q_{//}$)と、垂直方向の($Q_{\perp}$)の比がとられている。ここに、 $Q_{//}$ は、点欠陥と導波路との

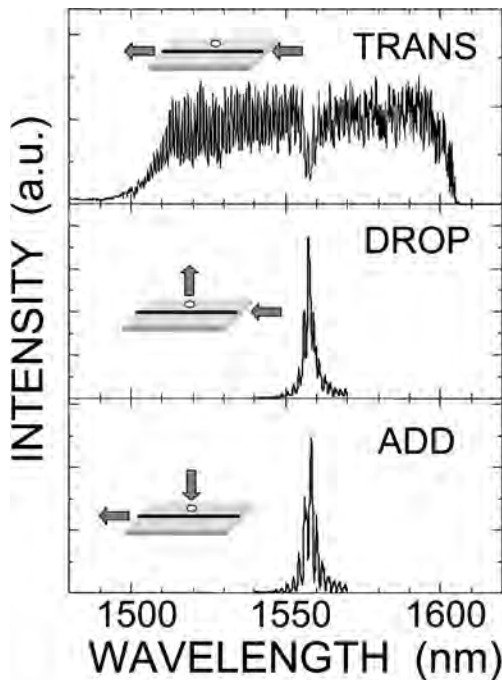


図3 デバイスの特性：(a)透過スペクトル，(b)ドロップ（分波）スペクトル，(c)合波スペクトル。

距離で決まり、距離が大きいほど、 $Q_{//}$ が大きくなり、逆に、距離が小さいほど、 $Q_{//}$ は小さくなる。一方、 $Q_{\perp}$ は、欠陥の上下の光閉じ込めの強さに依存し、欠陥の形状等が決まると、導波路との距離にはほぼ関係なく一定値をとることになる。図4の意味するところは、横軸 $Q_{//}/Q_{\perp}$ が大きいとき（すなわち、相対的に $Q_{//}$ が大きいとき）は、導波路と点欠陥の距離が大きく、結果として導波路を伝播する光はあまり点欠陥を感じずに導波路をそのまま光が伝播し、Tが大きくなる。一方、 $Q_{//}/Q_{\perp}$ が小さい（すなわち $Q_{//}$ が相対的に小さい）ときは、導波路と点欠陥の距離が近く、導波路から点欠陥へと光がトラップされやすくなるが、上下の光閉じ込めが相対的に強くなるため、上下方向へは光が放射されにくくなり、結果として、光は再び、導波路へと反射され、TもDも小さくなる。以上より、最もドロップ効率が大きくなるのは、 $Q_{//}/Q_{\perp}=1$ の時となる。同図の透過率と、図3(a)で実験的に得られた透過率を比較することにより、欠陥による光取り出し効率45～50%が得られることになる。これは、ほぼ理論的に得られる最大値と一致し、作製した試料は、ほぼ理想的な振る舞いをしていると判断出来る。

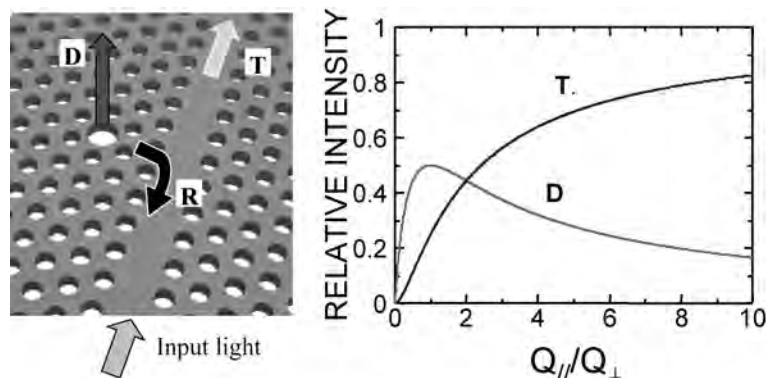


図4 デバイスの透過率，ドロップ（分波）効率の計算結果。（点欠陥の共鳴周波数に入射光波長が一致した場合。）

3. 波長分解能（Q 値）の大幅な増大 —ドナー型欠陥の導入—

2 節で述べたように、ほぼ理想的な構造の試料が作製出来、かつまた、図 3 に示すように、理論最大効率に近いドロップ効率が得られることが、実験的に証明出来たと言える。今後、この機能を波長分合波デバイスとして、さらに深く展開していく際、重要なことの 1 つは、波長分解能を大幅に向上させることである。図 3(b) のドロップ・スペクトルの半値幅から、波長分解能は、3~4 nm と見積もることが出来る。波長分解能を決めているのは、欠陥共振器の Q 値であり、Q が大きいほど、分解能が向上する。3~4 nm の半値幅から Q 値は、400~500 程度と見積もられる。Q 値を大幅に増大させるためには、より詳細な欠陥エンジニアリングを行っていく必要がある。これまで、我々は、図 5(a) に示すように、欠陥のタイプとして、まわりの格子点よりも、半径を大きくした欠陥、所謂アクセプタ型欠陥を用いてきた。この欠陥は、主に空気から構成されているため有効屈折率が低く、上下の光閉じ込めを十分に大きくすることが困難である。このことは、欠陥共振器の上下方向の Q 値 ($Q_{\perp}$) が十分大きく出来ないことを意味する。そこで、今回、欠陥タイプをこれまでのアクセプタ型から、格子点を半導体で埋めたドナー型欠陥を採用することにした^{5),6)}。つまり、図 5(b) に示すように、格子点を半導体で埋めた構造（同図は、3 つの格子点を埋めた場合）について、検討を行った。

まず、理論計算を行った。その結果を図 6 に示す。横軸は、点欠陥と導波路との距離である。縦軸は、2 節で述べた、 $Q_{//}$ 、 $Q_{\perp}$ の値である。同図から、点欠陥と導波路の距離が離れるにつれ、 $Q_{//}$ が増大していくことが分かる。この理由は、すでに述べたとおりである。重要なのは、 $Q_{\perp}$ であり、ほぼ 6,000~7,000 程度の値が得られることが分かる。全体の Q は、

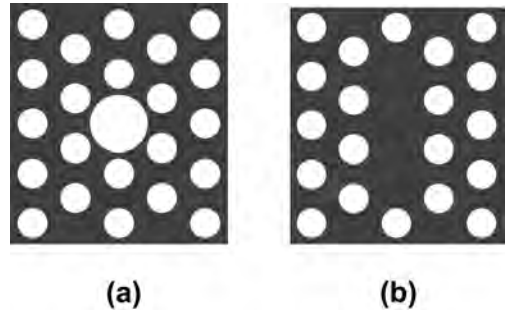


図 5 (a)アクセプタ型点欠陥, (b)ドナー型点欠陥。

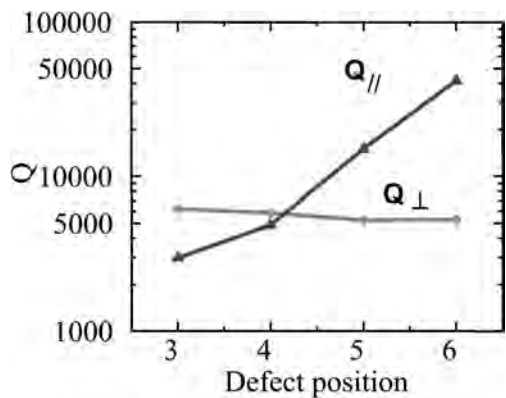


図 6 ドナー型欠陥における $Q_{//}$ および $Q_{\perp}$ の計算結果。

$$1/Q = 1/Q_{//} + 1/Q_{\perp}$$

の関係から決まるため、最大効率を得られる $Q_{//}/Q_{\perp} = 1$ の条件を考慮すると、取り出し効率を最大に保ったまま期待出来る最大の Q は、3,000~4,000 程度となる。つまり、ほぼ従来の 10 倍の Q 値が期待出来、結果として、波長分解能は ~0.4 nm とかなり高精度な分解能が期待出来る。以上の理論的検討ののち、図 7 (a) に示すような試料を実際に作製した。その試料に対し、ドロップスペクトルを測定した結果を図 7(b) に示す。同図より、Q 値として、3,800 と極めて高い値が得られていることが分かり、波長分解能として、理論通り 0.4 nm が実現出来たことが分かる。(なお、4 節では、点欠陥構造のさらなる工夫により、一桁高い Q

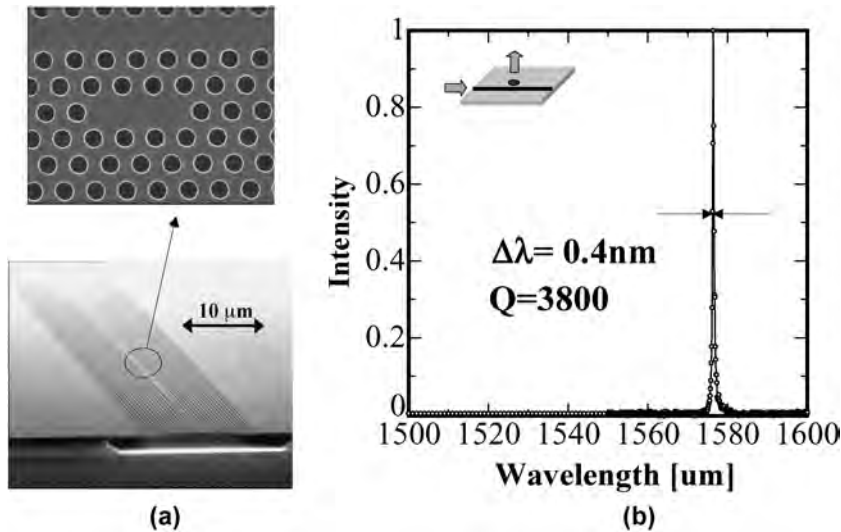


図7 (a)ドナー型欠陥をもつ試料のSEM写真。(b)ドロップスペクトル。

値を得ることに成功したことについて触れる。)

3. 多波長動作

—新概念「面内ヘテロ構造」の導入—

前節に示したように、点欠陥の Q 値として従来の10倍もの値が得られた。次のステップとしては、この高い Q 値を保ちながら多波長動作を実現することである。この際、次の2つのことを考える必要がある。1つは、図7(a)に示すようなドナー型欠陥の場合、そもそも欠陥周波数をチューニングするために、欠陥の大きさを変化させることが従来のアクセプタ型欠陥のように簡単ではないこと。もう一つは、仮に、欠陥の大きさを何らかの方法で変化させることが出来たとしても、その際に次のような問題が生じる。それは、すでに述べたように、欠陥の Q 値は、面内方向の $Q_{//}$ と上下方向の $Q_{\perp}$ により決められるが、取り出し効率を最大にするためには、 $Q_{//}=Q_{\perp}$ の条件を満たす必要がある。欠陥部分のみの大きさを変化させた場合、 $Q_{//}$ はほぼ一定に保たれるが、欠陥部分の有効屈折率が変化するために上下方向の

$Q_{\perp}$ が変化することになる。この場合、 $Q_{//}=Q_{\perp}$ の条件が崩れてしまうため、光の取り出し効率が減少し、デバイス特性が大きく劣化するという重要な問題が生じることになる。我々はこの重要な問題に対処するため、「面内ヘテロ構造」という新しい概念を提唱した³⁾。この概念は、全てのフォトニック結晶デバイスへ適用出来るものと確信する。

この概念を理解するために、まずフォトニック結晶のバンド構造について考えてみる。これは言うまでもなくフォトニック結晶中の光子の周波数 f と波数 k の分散関係を示すものである。ここで、 f と k は、結晶の格子定数 a で規格化される。この規格化により、格子定数 a が様々に異なる結晶においても、結晶の構造が比例的に変化する場合には、バンド構造は全く同じものとなる。この場合、それぞれの結晶中に、様々な欠陥（線欠陥や点欠陥）を導入した場合でも、欠陥間の光結合の大きさを一定に保つことが可能となる。一方、動作波長そのものは、格子定数 a の絶対値で決定されることになる。以上の議論により、格子定数の異なる結晶（それぞれは、比例的な大きさを持ち、同じ欠

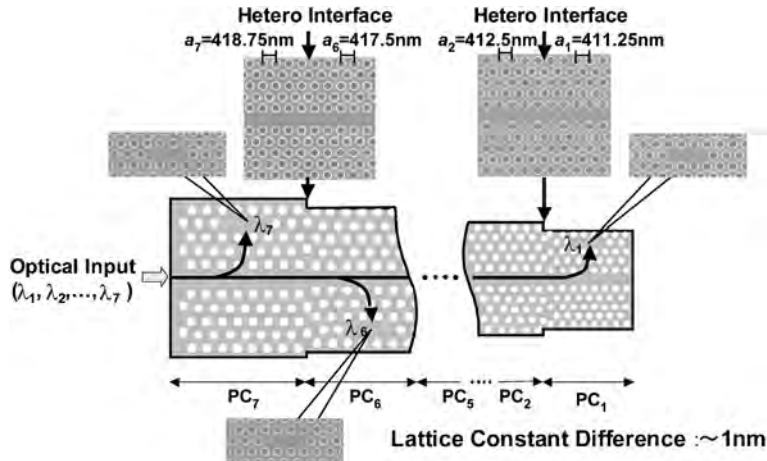


図8 面内ヘテロ構造をもつデバイスの構造模式図および各部のSEM写真。各部の格子定数差は、1.25 nm と極めて小さい。

陥群が導入されている)ものを順次並べて、「面内ヘテロ構造」を作ることにより、それぞれの結晶領域で、同じ動作を得つつ、波長をチューニングすることが可能となる。以上が、「面内ヘテロ構造」の原理である。

以上の考えに基づき、実際に図8に示すような7つの異なるフォトニック結晶領域からなる「面内ヘテロ構造」を作製した。各領域の格子定数は、 $a_7=418.75$ nm, $a_6=417.5$ nm, $a_5=416.25$ nm, $a_4=415$ nm, $a_3=413.75$ nm, $a_2=412.5$ nm, $a_1=411.25$ nmであり、また、それぞれの領域に線欠陥導波路とドナー型点欠陥共振器が導入されている。各領域は、線欠陥が一行につながるように配置されている。格子定数の差は、1.25 nm と極めて小さいため、図8に添付されたヘテロ界面部分の電子顕微鏡写真から分かるように、その差は全く区別することが出来ない。この試料に対して、領域7(PC₇)の導波路端から光を入射し、その波長を様々に変化した場合の各領域の点欠陥からの光ドロップの様子を図9(a)に示す。また、それぞれのドロップスペクトルを同図(b)に示す。同図の上部には、領域1(PC₁)の導波路端部から測定した透過スペクトルが添付されている。

なお、領域7(PC₇)の欠陥からのドロップスペクトルは、入射導波路端部での散乱光の影響を大きく受けたため示されていない。図9から、5~7 nmの波長間隔で、各領域の欠陥から光がドロップされていることが明確に見て取れる。また、それぞれの欠陥のQ値は、~3800で、前節で得られたQ値が全ての欠陥に対して、維持されていることが分かる。これは、我々が提案した「面内ヘテロ構造」の利点を実証されたことを意味する。また、図9(b)より、領域1-4の欠陥から放出された光の強度は、一定であることも分かる。これは、やはり「面内ヘテロ構造」の採用により、線欠陥、点欠陥および自由空間の結合状態が一定に保たれ、光取り出し効率が一定に保たれていることを意味している。同図(b)でさらに興味深い点は、領域5,6からのドロップ光が、Q値を~3800と一定に保ちつつ、そのドロップ光強度が、他の領域1-4からのドロップ光強度に比べて、かなり大きくなっていることである。また、透過スペクトルを見ると、領域5,6のドロップ波長において、透過光強度がほぼ零に近づいている様子が見られる。これは、領域5,6でドロップされきれなかった光が、ヘテロ界面(領域1,2

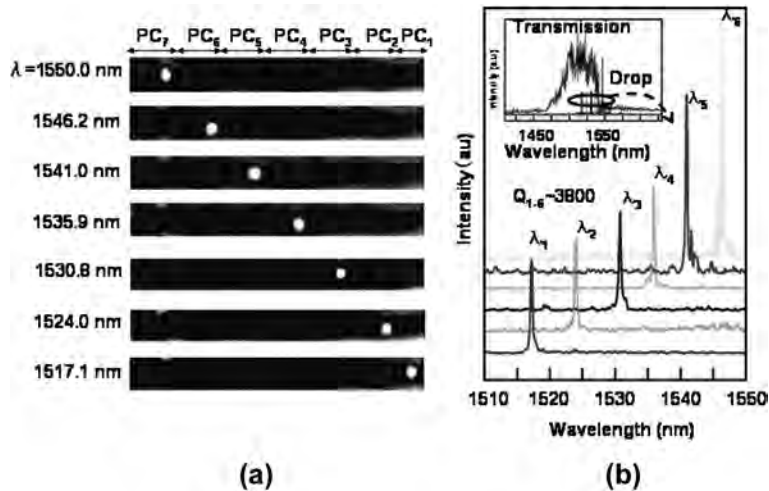


図9 (a)導波路への入射波長を変化させた場合の、各領域の点欠陥からのドロップの様子。(b)各欠陥からのドロップスペクトル。挿入図は、PC1の近傍の端面から測定した透過スペクトル。

の界面)で反射され、再び、領域5,6へ戻り、再度ドロップされ、結果として、ドロップ光強度が大幅に増大したものと考えられる。現在、ヘテロ界面の反射によるドロップ効率の大幅に増加の可能性をより詳細に検討しているところである。

4. 点欠陥構造の高度化と世界最大閉じ込め効果をもつ光ナノ共振器の実現

2節では、図7(a)に示すドナー型欠陥の導入により、数千という高いQ値が得られたことを述べた。ここでは、さらに高いQの実現を目指し、点欠陥の構造の工夫を行った結果について述べる。図7(a)の構造において、Q値を決めている要因は、共振器端部での光の反射時の上下方向への光の漏れであることが判明した。このような端部での光の漏れを減少させるために、我々は「点欠陥共振器に光を強く閉じ込めるためには、逆に緩やかな光閉じ込めを行うべきである」という重要かつ逆説的な概念を見出した⁹⁾。

具体的に行ったことは、図7(a)に示す点欠

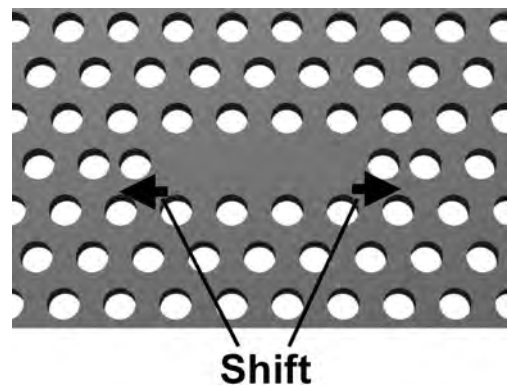


図10 より高いQを得るための点欠陥共振器構造の工夫。共振器端部の空気穴をほんの少し(60 nm)シフトさせるだけで、45,000という高いQ値が得られる。

陥共振器の端部の空気穴の位置をほんのわずか(60 nm)、通常位置よりも外側へシフトさせただけである(図10参照)。その結果、Q値がこれまでと比較して、1桁も向上し、45,000という値を実現することに成功した⁹⁾。この空気穴のシフトは、端部におけるブラッグ反射条件を変化させることに対応し、これにより端部での電磁界分布がより緩やかに変化することが

分かった。それにより、端部での上下方向への散乱による光の漏れが大幅に抑えられ、結果として共振器内部への光の閉じ込めが極めて強くなることが分かった。得られた単位体積あたりの Q 値は、世界最大の値である。今後、上記の概念に基づき、端部の設計をより工夫することで、さらに強い光閉じ込め効果をもった光ナノ共振器の実現も可能である。

この成果は、光通信応用のみならず、極微小電流で動作可能なナノサイズのレーザ、光を一個一個放出可能な次世代量子通信用光源、光をそのままの状態で記憶することの出来る光メモリ、超小型かつ高分解能のフィルター、分子数個をも検知できるような超高感度センサー、新しいバイオ応用等々の様々な魅力的な応用への道につながるものと確信する。

5. ま と め

以上、フォトニック結晶デバイスの最近の進展に関して紹介した。2次元フォトニック結晶スラブにおける線欠陥導波路、点欠陥共振器を用いた超小型波長合分波デバイスの特性が、1)ナノ加工技術の進展、2)ドナー型欠陥の導入、および、3)「面内ヘテロ構造」という新しい概念の導入により、大幅に進展したことを述べた。さらに、極最近、45,000という極めて高い Q 値をもつ光ナノ共振器の実現にも成功したことを述べた。今後は、デバイス特性のさらなる高度化や、その特性の動的制御、さらには、欠陥部分への強い光の集中に注目し、センサー、バイオとの融合等々、様々な新しい領域に展開可能であると考えている。また、「面内ヘテロ構造」は、フォトニック結晶の世界を大きく広げていくと期待される。ちょうど、半導体分野でヘテロ構造が欠くことが出来ないと同様に、光を様々な操作する上で、面内ヘテロ構造は、やがて欠くことの出来ない概念になっていくものと信じる。

また、ここでは、説明出来なかったが、我々

はさらに完全3次元フォトニック結晶による光制御、2次元フォトニック結晶レーザ、さらに有機フォトニック結晶などの様々な展開を行っており、その最近の進展に関する詳細は別途報告したい。

最後に、フォトニック結晶に関するロードマップの英語版 (“Roadmap on Photonic Crystals” edited by Noda and Baba) が、最近、Kluwer Academic Publisher より出版されたことを紹介させて頂く。これは、光産業技術振興協会との協力により完成したもので、最新のフォトニック結晶の現状(応用その他も含めて)が詳述されているので、是非、ご参考頂ければ幸いである。また、2004年3月7~11日には、京都国際会議場にて、フォトニック結晶に関する国際シンポジウム (<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab05/pecs-v.html>) が開催され、世界中のフォトニック結晶の研究者が一同に集まる予定である。

謝 辞

本研究は、京都大学助手浅野氏、博士2年の宋氏、社会人博士1年(住友電工研究員)赤羽氏等と共同して行ったものである。また、科学技術振興事業団CREST、文科省科学研究費補助金、文科省ITプログラム、京都大学21COE等の援助のもとに行われた。ここに深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、オプトロニクス2001年7月号 特集「フォトニック結晶」。
- 2) S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, *Nature*, 407 (2000) 608.
- 3) B. Song, S. Noda, and T. Asano, *Science*, 300 (2003) 1537.
- 4) T. Asano, T. Tanaka, K. Kiyota, Y. Tanaka, Y. Akahane, B. S. Song, and S. Noda, *Appl. Phys. Lett.* (in press).
- 5) Y. Akahane, M. Mochizuki, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda: *Appl. Phys. Lett.*, 82 (2003) 1341.

- 6) Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, Appl. Phys. Lett. 83 (2003) 1512.
- 7) A. Chutinan, M. Mochizuki, M. Imada, and S. Noda: Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 2690.
- 8) 野田, 日本物理学会誌 57 (No. 1) (2002) 46.
- 9) Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. noda: Nature, 425 (2003) 944.