

## フォトニック結晶工学の進展

京都大学工学研究科 電子工学専攻 量子工学講座 野田研究室  
 教授 野田 進  
 准教授 浅野 卓  
 助教 富士田 誠之

### 1. はじめに

フォトニック結晶とは、周期的な屈折率分布をもつ光ナノ結晶であり、固体結晶において、周期的ポテンシャル分布により、電子のエネルギーバンド構造が形成されるのと同様に、光子のエネルギーに対してバンド構造が形成されるという特徴を持つ。特に、屈折率分布が3次元のダイヤモンド構造をもつとき、光がどのような方向にも伝播できない、完全バンドギャップが形成される。フォトニック結晶において最も興味深い点は、このフォトニックバンドギャップの存在にある。バンドギャップに相当する波長をもつ光は、結晶中に存在し得ないため、通常自由空間における現象とは全く異なる現象が生じることになる。例えば、物質からの発光現象を根本から抑制したり、逆に特定部分で強めたりする究極の発光制御が可能となる。また、原子系を外場から遮断することができるため、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演算が構成可能な量子場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点状欠陥や線状欠陥を導入することにより、極微小の光共振器や導波路を形成することも可能となる。これらの点、線欠陥を組み合わせることにより、従来に比べて2～3桁程度小さな極微小の光回路を構成できるものと期待される。その他にも、光の速度を極限的に遅くしたり、群速度零のバンド端における定在波状態を利用することにより、大面積コヒーレントレーザ動作を可能とするなど、様々な魅力的な応用可能性をもつと期待でき、近年、フォトニック結晶は、大きな注目を集めるに至っている。

本研究室では、上記フォトニック結晶の開発そのものから、それをを用いた様々な光制御の可能性の提案・実証を行ってきた。以下、その詳細を述べる。

### 2. 完全3次元フォトニック結晶

フォトニック結晶は、3次元的な超微細構造をもつ人工物質であるため、当初は、結晶そのものが世の中に存在せず、結晶の実現が急務の課題であった。本研究室では、'90年初頭から、全く独自の手法を用いて完全3次元フォトニック結晶の実現に着手し、'90年代半ばに、まず、4 $\mu\text{m}$ 周期のGaAsストライプを井桁状に積層したダイヤモンド構造3次元結晶を実現した。続いて、'99年には、700nm周期のGaAsストライプを30nm以下の超高精度で積層させた完全3次元結晶の実現に成功した(図1)。この結晶により、光通信波長域(1 $\mu\text{m}$ 帯)において透過率の減衰量として-40dB(反射率99.99%)という優れた光の遮断効果を達成することが出来た[1]。

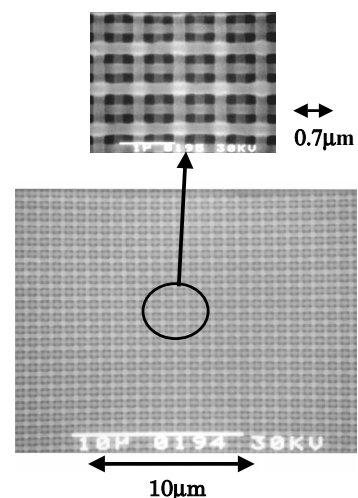


図1. 開発した3次元フォトニック結晶のSEM写真

### 3. フォトニック結晶による発光制御

フォトニック結晶研究において、その初期から最も興味をもたれた概念は、「発光可能な物質であっても、その物質が3次元フォトニック結晶へ導入されると、完全フォトニックバンドギャップ効果により、その発光は根本から抑制される。逆に、人為的に結晶の周期性を乱すと、その周期性の乱れの部分（欠陥）において、物質からの強い発光が可能となる」という発光現象の根本制御の可能性であった。本研究室では、2節で述べた3次元結晶実現の後、結晶内部への発光体および人為欠陥の導入に取り組み、幸いにも世界に先駆け、物質からの究極の発光制御の可能性を実証することに成功した（図2）[2]。

本研究室では、この研究を、さらに次元の1つ低い2次元フォトニック結晶による発光制御の研究へも展開し、2次元結晶の特徴を反映した極めて興味深い成果を得ている。2次元フォトニック結晶においては、2次元面内の発光は禁止されるが、上下方向の発光は、許容されると考えられる。従って、発光体の面内方向の発光の禁止により、蓄えられた励起キャリアが、上下方向への発光にのみ使用され、その結果上下方向の発光効率が大幅に増大するという、極めて興味深い現象が起こることが予測される。我々は、このような2次元フォトニック結晶によるユニークな発光制御の可能性を示すことに成功した[3]。この成果は、次世代の固体照明への応用が期待される発光ダイオードの外部量子効率の大幅な向上にも寄与するものと考えられる。

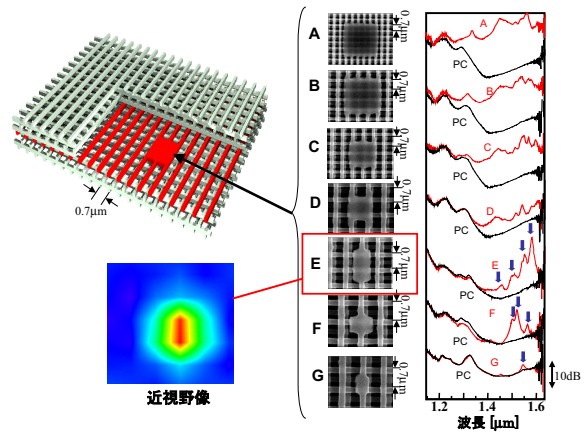


図2. 3次元フォトニック結晶による発光制御。完全結晶部では、発光が抑制され、人為的な欠陥を導入した部分では、強い発光が得られ、かつ欠陥の大きさに応じた共振ピークが観測された。

### 3. 2次元フォトニック結晶による光ナノデバイス

前項でも述べたように、本研究室は、理想的な3次元フォトニック結晶の研究と平行して、2次元フォトニック結晶の研究にも取り組んできた。2次元結晶においては、周期屈折率分布の存在しない上下方向の光閉じ込めをどのように行うかが大きな課題（注：前項における発光制御の場合は、上下方向の漏れを逆に積極的に利用している）となる。例えば、2次元結晶に線状欠陥を導入すると一見、光導波路となるが、実際には上下方向の光の漏れが問題となり、導波路として用いることは出来ない。そのような中、我々は、結晶の厚さを光波長程度に薄くしたスラブ（薄板）構造を用いるとともに、上下媒質、格子点の大きさの適切な設計により、上下方向の全反射条件を満たすことが可能となり、無損失導波路が実現可能であることを見出した[4]。

さらに、我々は、上記、導波路の近傍に、点状欠陥共振器を導入し、線欠陥導波路を伝播する光のうち、点状欠陥共振器に共鳴する光を、点状欠陥により捕獲するとともに、全反射条件の破れにより、上下方向に放出可能なことを実証した[5]。この現象は、極微小点状欠陥により、結晶から光を出し入れ可能なことを示している。我々は、さらにヘテロ構造の概念をフォトニック結晶に導入し、1.25nmという極小の格子定数差をもつヘテロフォトニック結晶を開発し、従来の10万分の1という超小型光合分波デバイス機能を実証した（図3）[6]。

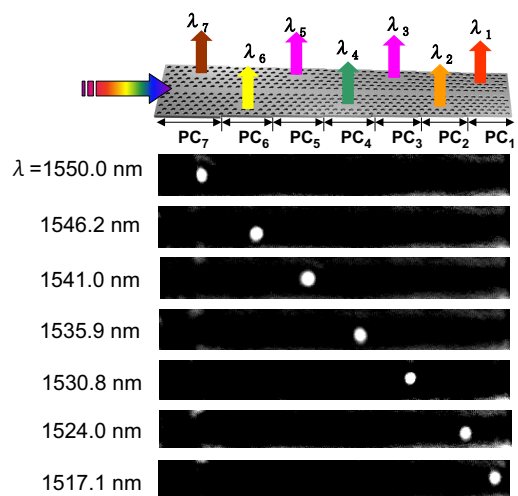


図3. フォトニック結晶によるナノデバイスの例。従来の10万分の1の大きさの光アッドドロップ機能が実現

#### 4. 光ナノ共振器

前項において述べたように、2次元フォトリック結晶においては、極微小点欠陥共振器に光が捕獲されると、全反射条件が満たされなくなるため、光は上下方向に放出されるようになる。このような極微小点欠陥共振器においても、光の漏れの極めて少ない共振器が形成されるようになると、上記、光ナノデバイスの高性能化のみならず、様々な新しい応用の道が開ける。例えば、光を光のまま蓄える光メモリ、量子光チップ、超高感度センサ、バイオ応用など。これらは、強い光閉じ込め効果により光の滞在時間が十分に長くなること、極微小域に光を強く閉じ込めることにより光と物質との相互作用が極限的に強くなること、極微小共振器ゆえ大規模集積が可能となること等の効果に基づくものである。本研究室は、光を極微小域で強く閉じ込めるためには逆に緩やかな光閉じ込めが重要であるという逆説的な概念を提唱し、2次元結晶スラブの点欠陥端部の空気孔をほんのわずか(60nm)シフトすることで、従来の100倍、すなわち5万を越すQ値をもつ光ナノ共振器を実現した[7]。さらに、その後、2005年には、数ナノメートル毎に格子定数を変化させたフォトリック・ダブルヘテロ構造の概念を提唱し、Q値として、さらに10倍、すなわち60万という値を達成した[8]。なお、2007年には、200万を越えるQ値を実現することに成功している(図4)[9]。

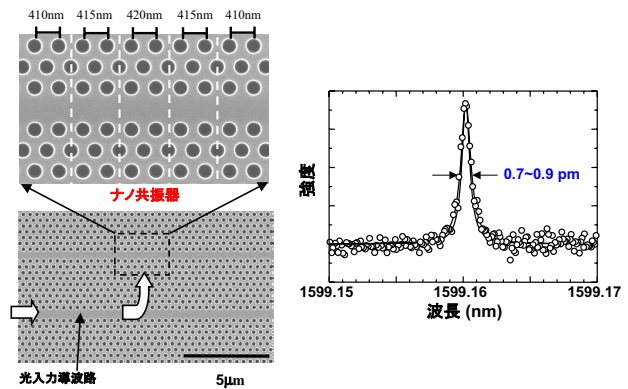


図4. 世界最大のQ値をもつナノ共振器。  
Q>2,000,000が得られている。

ナノ共振器のQ値が大きくなっていくと、次に、重要になるのは、このような高いQ値をもつナノ共振器に光をどのように出し入れするかである。高Q値ナノ共振器は光を長く閉じ込めることを可能にするが、当然、光を導入するためにも、より長い時間がかかるようになる。すなわち、高Q値ナノ共振器はそのままでは、ゆっくりと光を導入し、ゆっくりと光を放出させることしか出来ない。重要なことは、光をナノ共振器に導入する時にはQ値を低くしておいて光をすばやくナノ共振器に導入し、光がいったんナノ共振器に導入されると、速やかにQ値を増大させ、光を無駄なくナノ共振器に留めることである。また必要とあれば、さらにQ値を低下させ、光をすばやく取り出せるようにすることが重要である。我々は、2007年に、Q値の動的制御のための新たな基本概念を提唱し、その基本動作を実証することに成功した[10]。

#### 5. 2次元フォトリック結晶を用いた大面積コヒーレントレーザー

前述の3, 4は、如何に光を微小域で制御するかという観点からの研究であるが、一方、フォトリック結晶を用いて、大面積で光を制御することも可能である。1でも述べたように、フォトリックバンド構造のバンド端に注目すると、光の群速度が零、すなわち、定在波が形成されることになる。本研究室は、このバンド端を用いることにより、大面積で、コヒーレント動作可能なレーザーの実現が可能であることを提唱するとともに、実際に、大面積で、完全な単一波長、単一偏光で面発光動作するデバイスの実現を目指してきた[11,12]。このレーザーは、同一面内に複数個並べること(アレイ化)も可能であり、出力光は非常に狭い拡がり角で出射され、かつまた出力も極めて大きく取ることが可能であり、従来にない新しいレーザーと言える。さらに、我々は、数ナノ~数10nmの精度でフォトリック結晶構造を様々に制御することにより、ドーナツ形状から、真円形状に至る様々な形状のビームを発生させることが可能であることを見出した[13]。特に、ドーナツビームは、金属微粒子などの不透明物質の操作や、さらには波長の数分の1程度にまで集光可能なビームとして期待され、マイクロフレイディスクや、次世代の光ディスク用光源、近接場光源として重要と考えられる。

さらに、本レーザーの発振波長を青紫色領域(~400nm)まで短波長化することが出来ると、その応用範囲は格段に広がるものと期待される。極最近、GaNを材料として用い、独自のフォトリック結晶形成技術(AROG)を開発することにより、レーザー内部に、良質のGaN/空気2次元フォトリック結

晶を形成することに成功し、青紫色領域で、初めてフォトニック結晶面発光レーザーの電流注入動作に成功した（図5）[14]。

## 6. まとめ

以上述べたように、本研究室は、フォトニック結晶の開発から、本結晶がもたらす新しい現象・応用可能性を提案・実証してきた。今後、フォトニック結晶とエレクトロニクスの融合も進み、所謂、シリコンフォトニクスとしての展開も考えられ、電子回路による制御により、光の切り替えやチューニング機能、光ディレイ機能等をもたせた光・電子融合回路への展開なども期待される。また、アクティブ機能の付加による超小型波長多重光源、Q値の高さやスローライト効果を利用した超高感度センサーや光バッファメモリー機能、さらには、量子ナノ構造との融合による電子・光子強結合状態の創出等、次世代通信・情報処理デバイスへの展開を含む数多くの応用へと発展するものと期待される。また、フォトニック結晶のバンド端効果を利用したレーザーは、大面積で、完全な単一波長、単一偏光、単一スポットで面発光動作することが可能であり、ビームパターンとしても、結晶構造の制御により、自在に制御されるようになると期待され、今後、情報処理、通信、加工をはじめ、バイオ等の様々な幅広い分野に応用可能であると確信する

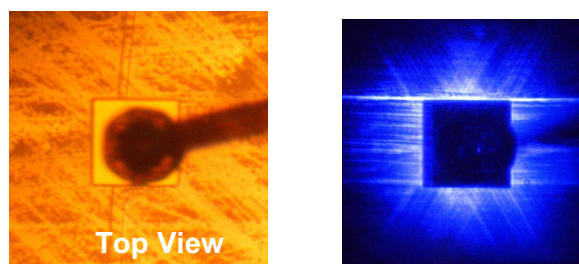


図5. 青紫色領域での大面積面発光動作。

## [文献]

- [1]"Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths," Science, vol.289, No.5479, p.604 (2000).
- [2]"Control of light emission by 3D photonic crystals," Science, vol.305, No.5681, p227 (2004).
- [3]"Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals," Science, vol.308, No.5726, p.1296 (2005).
- [4]"Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs", Phys. Rev. B, vol. 62, No.7, p.4488 (2000).
- [5]"Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure," Nature, vol.407, No.6804, p.608 (2000). [377 times cited].
- [6]"Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals," Science, vol.300, No.5625, p.1537 (2003). [95 times cited].
- [7]"High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal, Nature, vol.425, No.6961, p.944 (2003).
- [8]"Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity," Nature Materials, vol.4, No.3, p.207 (2005). [158 times cited].
- [9]"Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities", Nature Photonics, vol.1, No.8, p.449 (2007).
- [10]"Dynamic control of the Q factor in a photonic crystal nanocavity", Nature Materials, vol.6, No.11, p. 862 (Nov 2007).
- [11]"Coherent 2D lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure", Appl.Phys.Lett., vol.75, No.3, p.316 (1999).
- [12]"Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design", Science, vol.293, No.5532, p.1123 (2001).
- [13]"Lasers producing tailored beams", Nature, vol.441, No.7096, p.946 (2006).
- [14]"GaN Photonic-Crystal Surface-Emitting Laser at Blue-Violet Wavelengths", Science, (Just Published Online, December 20, 2007, Science DOI: 10.1126/science.1150413)