

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」

平成 17 年度採択研究代表者

野田 進

(京都大学工学研究科 教授)

「フォトリック結晶を用いた究極的な光の発生技術の開発」

1. 研究実施の概要

フォトリック結晶は、様々な革新的な光制御を可能にする光ナノ構造として、現在、世界的な関心を集めている。研究代表者は、このフォトリック結晶の分野において、これまで、(i) 世界で最も理想的な結晶の開発、(ii) 自然放出制御の可能性の実証、(iii) 世界最大の Q 値をもつナノ共振器の実現、(iv) 大面積コヒーレントレーザの提案・実証など、世界をリードする様々な成果を挙げてきた。本研究は、光・光量子科学技術分野の重要戦略目標の 1 つである「究極的な光の発生技術」を、研究代表者等がこれまで培ってきたフォトリック結晶技術を用いて開発していくことを狙いとしている。具体的には、(A) 2次元フォトリック結晶による究極的な光の発生技術の開発、(B) 3次元フォトリック結晶による究極的な光の発生技術の開発、(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発を 3 本柱に設定して研究を進めている。

前年度(H17年度)は、(A) 2次元フォトリック結晶による究極的な光の発生技術の開発においては、(1) 量子ナノ構造の導入によるキャリアの3次元閉じ込め効果により、2次元フォトリックバンドギャップ効果により期待されるキャリア寿命の増大効果を理論値近く(15~17倍程度)まで到達させ、不要発光をほぼ除去することに成功するとともに、(2) 2次元フォトリック結晶に、 $Q = 3,000 \sim 5,000$ 程度の光ナノ共振器を導入し、 0.4 W/cm^2 という極微小励起レベルから、ナノ共振器モードに基づく明確な発光現象(弱結合状態での発光現象)の観察に成功し、蓄積キャリアの効果的な再配分効果の実証を行った。さらに、(3) 将来の強結合状態の創出に向け、自身のもつ光ナノ共振器の Q 値の世界記録の更新($Q \sim 1,000,000$)を達成するなどの成果を挙げることが出来た。(B) 3次元フォトリック結晶による究極的な光の発生技術の開発に関しては、(1) ウエハボンディング法による完全3次元結晶に関し、その積層数を9層から、17層へと増大し、透過率の減衰を-30dBから、-46dBと大幅に増大することに成功するとともに、(2) より多くの積層数を実現するために、本CRESTにおいて新たに提案した左右45°斜めエッチングに基づく結晶作製にも鋭意取り組み、基本設計とともに、2方向エッチングの可能性を実験的に実証することに成功した。さらに(3) 将来のナノ共振器の実現に向け、点欠陥共振器の基本設計を行うなどの成果を挙げた。(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発においては、(1) ビーム形状を変化させるための基礎的な知見を得ると共に、(2) バンド端効果に基づく共振器における上下

方向への光閉じ込め効果の制御により、面発光出力が増大する可能性を示した。また、(3) レーザ特性の詳細な検討を可能とする 2 次元結合理論の構築に着手し、TM 波、TE 波の両方の偏波に対応する結合方程式の導出を行うことに成功した。さらに(4)青色フォトニック結晶レーザへの展開のために、短波長域フォトニック結晶パターン形成条件を見出すなどの成果を挙げることが出来た。

本年度(H18 年度)は、上記のような成果をさらに発展させ、以下のような成果を得ることが出来た。(A) 2 次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発においては、(1) 様々なフォトニックバンドギャップ波長域をもつ試料を作製し、バンドギャップ波長域と、キャリア寿命増大の関係を系統的に調べ、フォトニックバンドギャップ全波長域にて、理想的なキャリア寿命増大効果が現れることを実証することに成功した。また、(2) 点欠陥共振器への蓄積キャリアの再配分効果に関する検討を行い、ナノ共振器に存在する量子ドットの数、100-200 程度以上であるとき、70~80%以上の高い量子効率を示す可能性があることを突き止めた。さらに、(3) 以上の基礎となるナノ共振器の時間領域での Q 値の評価を行い、世界に先駆けて ~ 1 ns の光子寿命をもつ共振器の実現に成功した。(B) 3 次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発に関しては、(1) 前年度に実現した結晶内部に発光層（量子井戸構造）を導入し、フォトニックバンドギャップ効果による発光抑制効果の増大を実証するとともに、点欠陥モードの Q 値において、3 次元フォトニック結晶では世界最大の ~ 350 を実現した。また、理論面での検討をも併せて行い、積層数、結晶揺らぎ等が、発光制御に与える影響等、様々な知見を得ることが出来た。さらに、(2) 本 CREST で新たに提案した左右 45° 斜めエッチングに基づく結晶作製においては、詳細なプラズマ条件の検討を行い、z 方向の周期が 1~2 周期の 3 次元フォトニック結晶を形成した。作製した結晶は、理論計算結果と良く一致する透過および反射特性を示し、確かに 3 次元結晶としての性質を示すことに成功した。(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発においては、(1) フォトニック結晶中へ、複数の位相シフトの導入、さらには、格子点形状の様々な制御を行い、単一縦・横モードを維持したまま、動径方向偏光および接線方向偏光をもつドーナツビーム、2 連および 4 連ドーナツビーム、さらには、単一ローブビームを得ることに成功するとともに、(2) 室温連続条件で、単一縦横モードで動作する面発光として世界最大の 42 mW を達成することに成功した。さらに、(3) 本デバイスの解析手法として、2 次元結合波理論の構築に務め、まず、TM 波に対する解析を完成させた。また、(4) 本レーザの青色領域への展開を図るための基礎研究も行った。

今後も、引き続き、上記(A)-(B)の研究課題を 3 本柱として、フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発を鋭意進めていきたい。

2. 研究実施内容

前節でも述べたように、本研究は、光・光量子科学技術分野の重要戦略目標の 1 つである「究極的な光の発生技術」を、研究代表者等がこれまで培ってきたフォトニック結晶技術を用いて開発していくことを目指すものである。具体的には、

(A) 2 次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発

(B) 3次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発

(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発

を3本柱に設定して研究を進めている。以下に具体的に、H18年度の研究実績をまとめる。

(A) 2次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発

本研究項目は、2次元フォトニック結晶スラブ(薄板)構造を基本とし、研究代表者等が世界に先駆け実証したバンドギャップ効果による自然放出制御と、世界最大の閉じ込め効果をもつナノ共振器の実現をもとに、究極の光の発生技術開発へと展開していくものである。H18年度は、下記のような成果を得た。

(A-1) バンドギャップ効果による2次元面内への発光抑制と励起キャリアの蓄積

まず、2次元結晶のバンドギャップ効果に基づく不要発光の除去と励起キャリアの蓄積効果をさらに完全な状態へと導くことを目指している。このため、発光体として、3次元的なキャリア閉じ込めが可能な量子ドット(InAs/GaAs系)等の量子ナノ構造を用いている。H17年度は、励起キャリアの蓄積効果が、キャリアの3次元閉じ込めにより、理論的に予想される値に達しうること(すなわち発光寿命の増大が15~17倍程度となること)を実証することに成功した。H18年度は、様々なフォトニックバンドギャップ波長域をもつ試料を作製し、バンドギャップ波長域と、キャリア寿命増大の関係を系統的に調べた。格子定数 a を260 nmから400 nmまで変化させることで、フォトニックバンドギャップ波長域を発光波長の短波長側から長波長側まで変化させた。これらの試料からの時間分解フォトルミネッセンスおよび時間積分スペクトルを測定した結果を図1に示す。同図には、3次元時間領域差分法によって2次元フォトニック結晶スラブの光子状態を考慮し求めた、自然放出抑制効果で得られる理論値を実線で示している。同図より、理論上予測される2次元フォトニック結晶スラブの最大の自然放出抑制効果(~15倍)がバンドギャップ域全体で達成され、2次元フォトニック結晶スラブ・量子ドット融合系におけるフォトニックバンドギャップによる自然放出抑制効果を明快に示すことが出来たと言える。

(A-2) 点欠陥共振器への量子ナノ構造の導入と弱結合状態での発光過程の検討

本項目は、前項の2次元フォトニック結晶による発光制御の基礎技術の確立と平行して、人為的な欠陥共振器の導入を試み、弱結合状態での発光プロセスを明らかにすることを目指している。H17年度は、点欠陥共振器モードへ蓄積キャリアが効果的に再配分され、極低励起レベル(0.4 W/cm^2 程度以下)から点欠陥共振器での高効率発光が生じうることを実証することに成功した。この成果は、フォトニックバンドギャップ効果により蓄積されたキャリアが、点欠陥モードに高効率に再配分されることを強く示唆している。

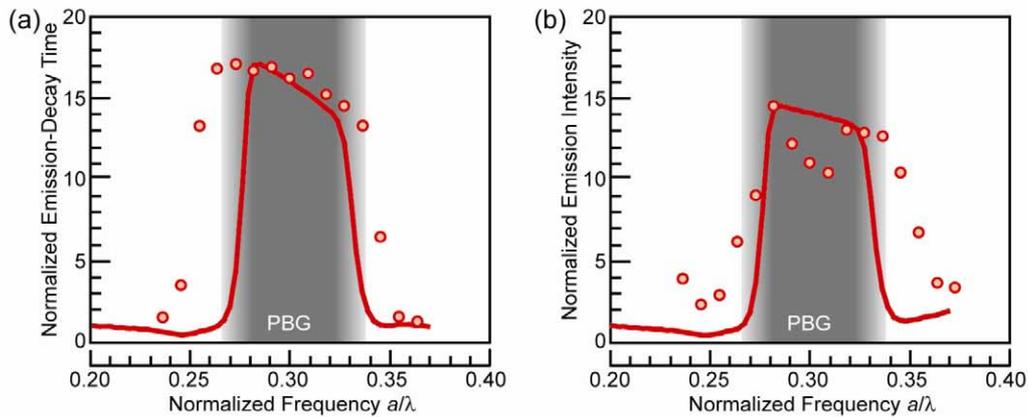


図 1: フォトニックバンドギャップ(PBG)による自然放出抑制効果。(a) 規格化周波数に対する規格化発光寿命 (b) 規格化周波数に対する規格化積分発光強度(プロット: 実験値、実線: 理論値)

しかしながら現段階で現実的に高品質な量子ドットが得られる自己形成法では、ランダムな位置に、ランダムなエネルギーをもつ量子ドットが導入されるため、その発光効率が量子ドットの位置、数にどのような影響を受けるかを明らかにする必要があります。そこで、H18年度はフォトニックナノ共振器中に様々な個数 m のランダムな量子ドットが導入された場合の発光効率を統計的に解析した。計算モデルを図 2 に示す。ここでは 2 次元円孔三角格子フォトニック結晶スラブにおいて、我々が最初に提案した直線上に 3 個、格子点を埋めたナノ共振器について考える。各量子ドットの発光波長は全量子ドットの発光スペクトルがガウス分布に従うようにランダムに定めた。ここで、各量子ドットは共振モードへの発光レート R_{cav} とスラブからの漏れモードへの発光レート R_{pc} をもつ。 R_{cav} は、量子ドット位置

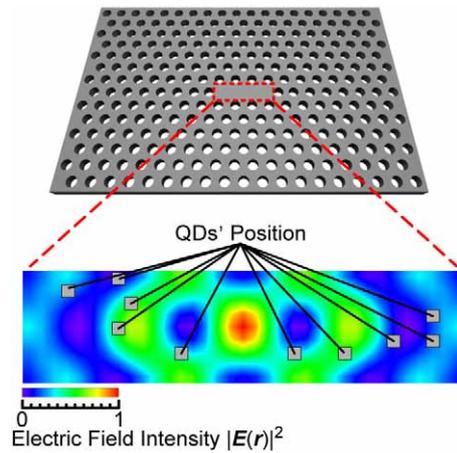


図 2: フォトニックナノ共振器中にランダムな量子ドットが導入された系の発光効率の解析モデル。ここでは共振器中の量子ドットの数 $m = 10$ の場合の一例を示す。

での電界強度および波長から求められ、 R_{pc} はフォトニック結晶自体で決定される。共振モードの発光効率 η_{cav} は点欠陥部分のみにキャリアが発生し、非発光過程がなく、かつ量子ドット間でキャリアのやりとりがある場合を考えると、 $\eta_{\text{cav}} = \frac{\sum R_{\text{cav},i}}{\sum [R_{\text{cav},i} + R_{\text{pc},i}]}$ で表される。10 万回計算を試行した際の発光効率 η_{cav} の統計分布の例を図 3 に示す。 $m = 1$ では高効率を得られる可能性は極めて低い、 $m = 100$ となると、どのような試料でも発光効率は高くなるのがわかる。これは量子ドットの数 m が増加すると共鳴条件に近い量子ドットが発生する確率が高くなり、多くの非共鳴の量子ドットが存在してもそれらの発光レートはフォトニックバンドギャップ効果で抑制され、発光効率は共鳴条件に近い量子ドットで決定されるためと考えられる。ここで、図 3 の計算では、量子ドットの不均一幅に相当する 57 meV の場合を想定したが、これを 3 分の 1 の 19 meV まで低減した場合には、図

4に示すように約8割の試料で $\eta_{\text{cav}} > 0.9$ の超高効率が期待されることも明らかになった。

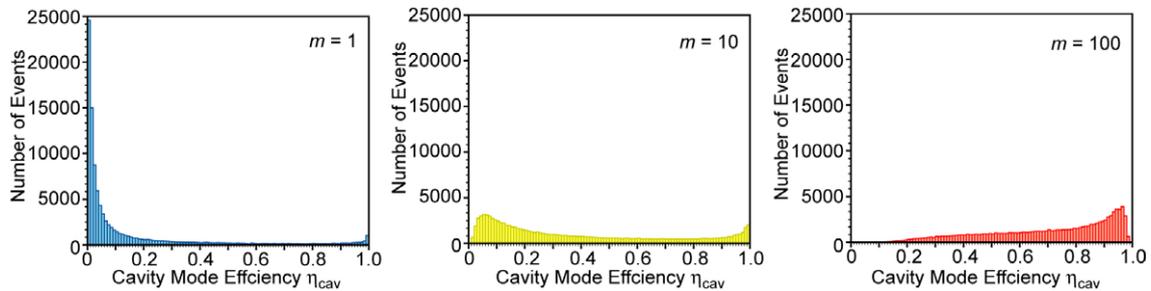


図 3: 計算された発光効率の統計分布。縦軸は効率 0.01 ステップごとに含まれる頻度を示す。 m はナノ共振器中に含まれる量子ドットの数。

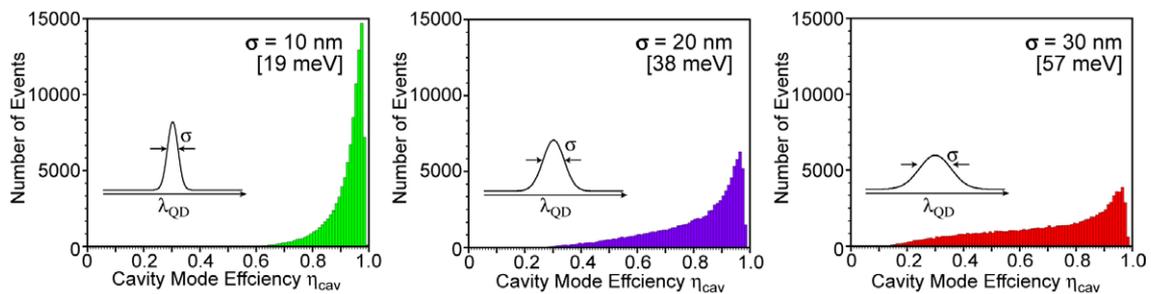


図 4: 量子ドット集団からの発光不均一幅を変化させた場合の発光効率の統計分布。縦軸は効率 0.01 ステップごとに含まれる頻度を示す。 σ は量子ドット発光波長の標準偏差。

本研究では、また、以上の基礎となるナノ共振器の Q 値増大にも取り組んだ。これまでのスペクトル領域での Q 値評価から、本年度は、時間領域での Q 値の評価を行い、図5に示すように、世界に先駆け1 nsの光子寿命をもつ共振器の実現に成功した(*IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* Nov./Dec., 2006)。さらに、導波路からナノ共振器へと光パルス(パルス幅 < 共振器の光子寿命)を入射する際、入射光パルスのピークはパルス幅分だけ遅延することをも実験的に示し、*Appl. Phys. Lett.* (April, 2006)にて報告した。

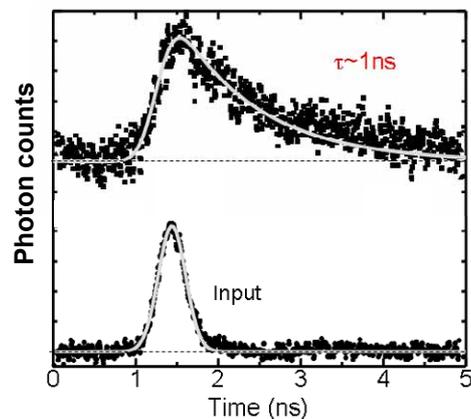


図 5: 本研究で開発した高 Q 値ナノ共振器の時間領域での Q 値の測定結果。下図が、入射パルス波形、上図が、共振器から放射光強度の時間変化を表す。1 nsの光子寿命を世界に先駆け測定することに成功。

(B) 3次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発

2次元結晶における発光制御においては、バンドギャップ効果の存在しない上下方向へのわずかな光の漏れが最終的なボトルネックとなると考えられる。従って、真の意味で、究

極的な発光制御を実現するためには、全方向にバンドギャップをもつ完全3次元結晶の活用が不可欠である。本研究項目に於いては、このような3次元結晶を用いた究極的な光の発生技術の開発を進めている。H18年度の成果は以下の通りである。

(B-1) ストライプ積層型17層フォトニック結晶による発光制御の実験的・理論的検討

フォトニック結晶としては、これまで研究代表者等が取り組んできたストライプ積層型3次元結晶構造を基本としている。H17年度は、積層数17層の結晶（発光層を含んで上下8層ずつ積層した構造、図6(a)参照）を実現し、透過スペクトル測定により、従来の9層結晶に比べ、17層へと総数を増大することにより確かにバンドギャップ効果が増大することを示した。H18年度は、結晶内部に導入した発光層に与える3次元結晶の効果の評価を行った。まず、完全結晶部では、図6(b), (c)に示すように従来の9層結晶における発光の抑制効果が-20dB程度であったものが、17層結晶では-30dBへと大幅に増大することが判明した。

続いて、点欠陥共振器からの発光特性の評価を行なった。従来の9層積層3次元フォトニック結晶に導入した各種の点欠陥共振器からの発光スペクトルから見積もった Q 値と、17層積層結晶に導入した点欠陥共振器の Q 値を比較・評価した結果を図7に示す。図8には、17層積層結晶に導入した点欠陥共振器の発光スペクトルの一例を示している。これらの図から分かるように、積層数の増加により Q 値が大きく増大し、最大で $Q=350$ の点欠陥モードが得られた。この Q 値は、3次元フォトニック結晶では世界最大の値である。

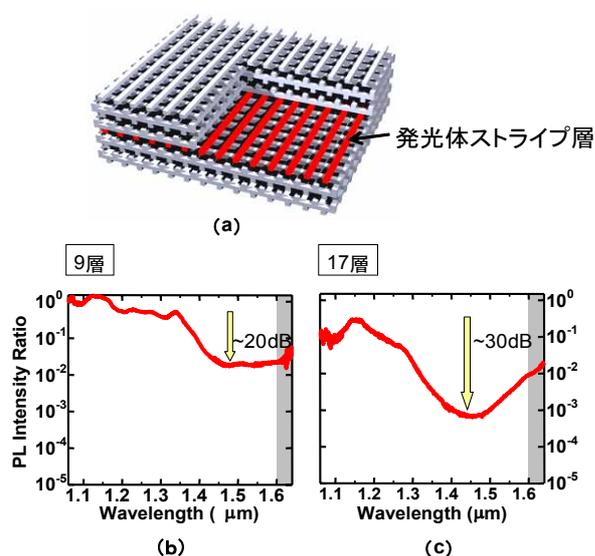


図6：(a)発光層を挟んで上下に8層フォトニック結晶を形成した、17層積層構造の模式図。(b)9層積層3次元フォトニック結晶の発光スペクトルの測定結果。(c)17層積層3次元フォトニック結晶の発光スペクトルの測定結果。

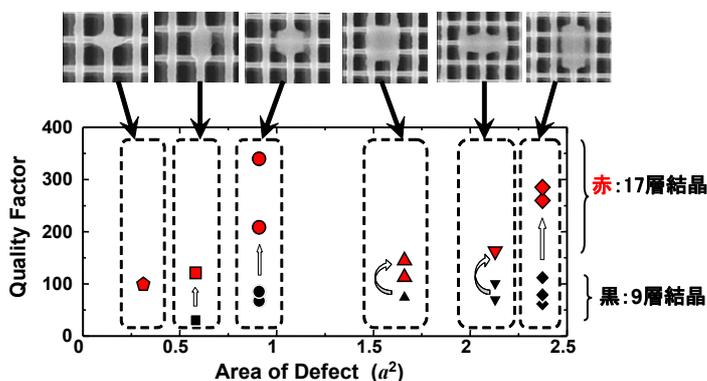


図7：17層および9層結晶に導入された種々の点欠陥共振器と Q 値。

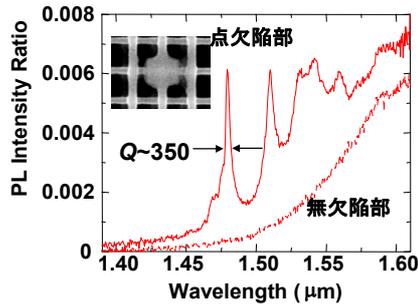


図 8 : 17 層積層フォトニック結晶に導入した点欠陥共振器の発光スペクトルの一例。図中に点欠陥共振器の電子顕微鏡写真を示す。

理論面では、ストライプ積層型 3 次元フォトニック結晶のもつ発光抑制効果（完全結晶部の発光制御効果）に与える積層数、構造揺らぎの影響を検討した。計算モデルを、図 9(a) に示す。作製工程における揺らぎを再現するために中心層のストライプ位置が平行にずれるモデルとなっている。また、ダイポールは中央層に導入されている。積層数としては、様々なものを検討したが、ここでは、代表的なものとして、9 層および 25 層の計算結果を図 9(b)、(c) に示す。まず、同図(b) に示すように、25 層の結晶においては、揺らぎのない場合、40 dB 以上の発光抑制効果（発光寿命増大）が見られるのに対し、構造揺らぎが増大するとともに、フォトニックバンドギャップの両側から発光抑制効果が減少することが分かる。ただし、揺らぎが、 $0.3a$ (a :格子定数)までは、バンドギャップ中央付近で、40 dB を越えるバンドギャップが存在するが、揺らぎが $0.4a$ に達すると、発光抑制効果が、全バンドギャップ域で、10-20 dB 程度に減少することが分かる。一方、図 9(c) に示すように 9 層の

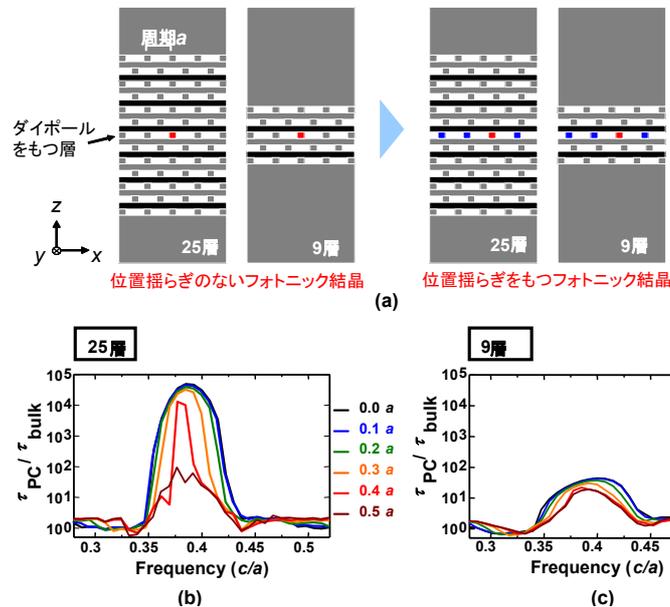


図 9 : (a) フォトニック結晶の積層数およびストライプ位置の揺らぎが、発光抑制効果に与える影響の検討するための理論モデル。作製工程における揺らぎを再現するために中心層のストライプ位置が平行にずれるモデルとなっている。(b)、(c) 25 層および 9 層積層フォトニック結晶に揺らぎを導入した際の発光再結合寿命の抑制の変化。縦軸は構造のない誘電体中の発光再結合寿命で規格化している。

フォトニック結晶においては、揺らぎ量に関わらず発光抑制効果に変化しないという極めて興味深い結果が得られた。これらの結果は、ある程度の積層数（ここでは、9層）までは、揺らぎの有無に関わらず、積層方向のバンドギャップ効果が支配的で、揺らぎが存在しても、発光抑制効果に影響を与えないことを示すが、積層数がある程度以上（ここでは、25層）になると、積層方向のバンドギャップ効果が十分に大きくなり、揺らぎの影響が無視出来なくなることを意味している。このような積層数と揺らぎの影響を明解に示したのは本研究が初めてである。特に興味深いのは、9層積層数程度までは、揺らぎの有無に関わらず、10-20dB程度の発光抑制効果が得られることであり、3次元結晶の有効性を示していると言える。もちろん、25層のように（ここでは示していないが、17層の場合も同様に）、積層数が十分に増えると、揺らぎを十分に押える必要があることは言うまでもない。

(B-3) 斜めエッチングによる3次元フォトニック結晶の一括形成とその光学特性

3次元結晶における上下方向のバンドギャップ効果をさらに強めるためには、積層数のさらなる増大が望まれる。上述のウエハ融着の繰り返しによる作製方法では、積層数および位置合わせ誤差の蓄積の点から、積層数の増大に限界があると考えられるために、新たな3次元結晶の実現方法を検討する必要がある。そのため本CRESTでは左右45°斜めエッチングに基づく新たな3次元フォトニック結晶作製方法を提案し、H17年度は、この新しい3次元結晶作製の基礎技術を開発するための研究を開始し、基本設計や、斜めエッチング技術の検討を行った。H18年度はさらに詳細なプロセス条件の検討を行い、図10(a)に示すように角度40度において深さ1.8 μm (フォトニック結晶2周期に相当)の斜めエッチングを行う技術を確認することが出来た。さらに、2回の斜めエッチングを互いに逆方向から行うことで同図(b)に示すようなz方向の周期が2周期の3次元フォトニック結晶を形成することに成功した。作製した結晶の透過および反射スペクトルの測定結果を同図(c)に示す。波長1600~1700nm付近に明瞭な透過率の低下(-11dB)および反射率の増大(86%)が確認され、フォトニック結晶の特性を反映する結果が得られた。また実験で得られた透過スペクトルは理論計算結果と良く一致しており、確かに3次元フォトニック結晶としての性質を示す構造を作製することに成功したと言える。

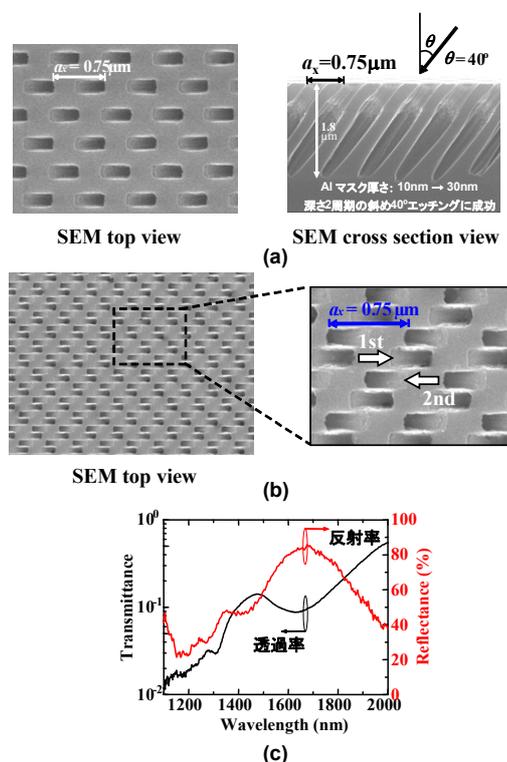


図10: (a) 1回目の斜めエッチング後の平面および断面SEM観察像。(b)2回目の斜めエッチング後の平面SEM写真。(c)作製した3次元フォトニック結晶の透過、反射特性。

さらに作製誤差が特性に与える影響について理論的な検討をも行った。2方向斜めエッチング方による作製においては、ストライプ同士の相対位置関係は表面の開口パターンの形成精度で決まると考えられるので、現状の技術で十分に精度良く作製することが出来る。従って、斜めエッチングの精度がストライプの形状を決定するため、その影響を検討しておくことは極めて重要である。現在までの検討によると、斜めエッチングによる穴の形状は図 11(a)に模式的に示すように中央部で広がっている(ボーイングしている)ため、この効果を取り入れた計算を行った。計算モデルは同図(a)に示すような深さ 2 周期にボーイングをもつ構造をスーパーセルとしたモデルである。同図(b)に示すようにマスク形状を固定した時には、深さ方向の中央部でストライプ幅が 60%程度までボーイングするとフォトニックバンドギャップが消滅するという結果が得られた。同図(c)に示すようにボーイングに合わせて充填率が一定になるようにマスク形状を変化させていく場合、0.9 程度までボーイングが生じててもフォトニックバンドギャップが維持されるという極めて有望な結果が得られた。これらの結果は結晶作製上、極めて重要な指針を与えるものと言える。

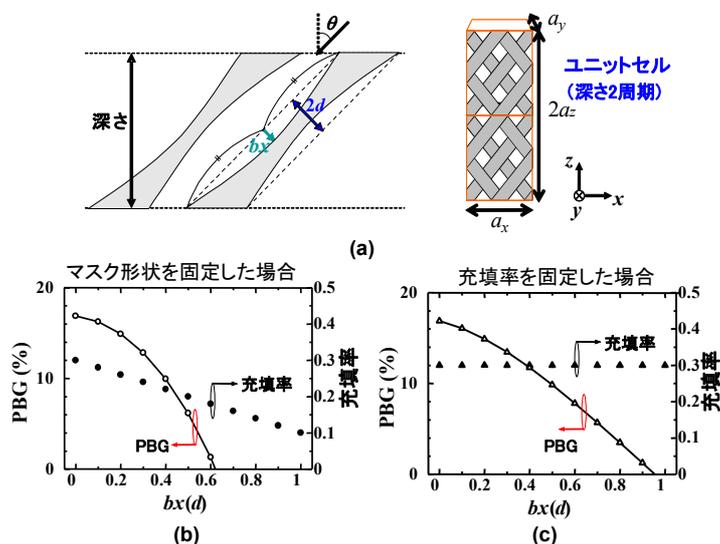


図 11: (a)フォトニック結晶の積層数およびストライプ位置の揺らぎの影響の検討するための理論モデル。作製工程における揺らぎを再現するために中心層のストライプ位置が平行にずれるモデルとなっている。(b) マスク形状を固定した場合のボーイングパラメータとフォトニックバンドギャップの関係。(c) 充填率を固定した場合のボーイングパラメータとフォトニックバンドギャップの関係。

(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発

本レーザは、2次元フォトニックバンドギャップ端での定在波状態を共振器として利用するという研究代表者独自のアイデア(2001年 Science)に基づくものである。これまでの研究で、この定在波状態を用いて、大面積での単一縦横モードでの室温連続発振に成功している。現在の重要な課題としては、出射ビームパターンの制御、高出力動作の実証、波長範囲の拡大、さらにデバイス理論の確立などが挙げられ、これらを本研究にて深く検討していく。H18年度の成果は以下の通りである。

(C-1) 出射ビームパターンの制御

H17年度は2次元フォトニック結晶の格子点形状の楕円化と位相シフトの導入により、単峰性ビームが実現可能なことを実証することに成功した。H18年度は、前年度の成果をさらに発展させ、本レーザ（模式図を図12(a)に示す）のビームパターンの系統的制御に取り組んだ。ビームパターンは、2次元フォトニック結晶共振器面内の電磁界分布のフーリエ変換で与えられるため、ビームパターン制御のためには、結晶面内の電磁界分布を様々に変化させることが重要である。電磁界分布を変化させる方法としては、2次元面内の様々な方向に伝播する光の結合状態を変化させれば良い。フォトニック結晶の格子点の形状や結晶格子の間隔を変えることが、その有効な方法と考えられる。図12(b), (c)には、それぞれ、格子点形状が、真円および3角形の場合の結晶一周期（単位格子）における電磁界分布が示されている。同図より、格子点を真円から三角形に変化することにより、完全な回転対称性をもつ電磁界分布から、回転対称性が崩れx方向に非対称性をもつ電磁界分布に変化することが分かる。一方、同図(d)-(h)には、格子点形状を真円に保ったまま、フォトニック結晶に格子間隔のシフトを導入した場合の結晶全体の電磁界分布を示している。同図(d)は、シフトなしの場合で、同図(e)-(h)は、シフトを1つずつ増やして行った場合の電磁界分布を示す。これらより、格子間隔のシフトを行うと、シフト位置において、電磁界分布が反転することが分かる。シフトの本数を増やすにつれ、電磁界の反転が繰り返されることが分かる。以上を組み合わせることで、面内の電磁界分布を様々に制御出来るものと予測される。

以上をもとに、実際に、フォトニック結晶レーザを作製した。フォトニック結晶構造としては、上述の議論をもとに、図13(a)-(f)の左パネルの電子顕微鏡写真に示すような6種類の結晶を作製した。(a)は格子点形状が真円で格子間隔のシフトなし、(b)は真円格子点であるが、格子間隔のシフトを1本導入したもの、(c)は真円格子点形状で、格子間隔のシフト

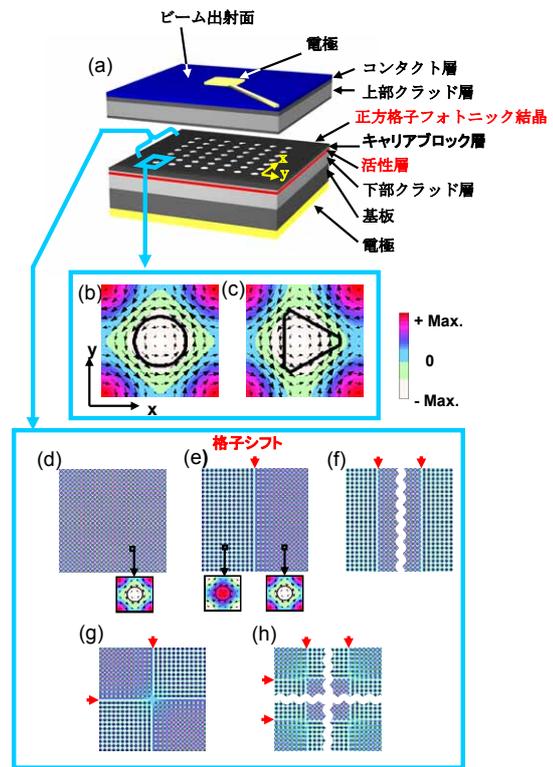


図12: 開発したフォトニック結晶レーザ。(a) デバイス構造の模式図。(b)、(c) 真円格子点、三角格子点に対する単位格子中の電磁界分布。磁界は色で表され、面内の電界ベクトルは矢印で表されている。(d)-(h) 様々な格子シフトの導入と電磁界分布を表す。(d) 格子点形状が真円で格子シフトなし、(e) 真円格子点で、格子シフトを1本導入したもの、(f) 真円格子点形状で、格子シフトを2本平行に導入したもの、(g) 真円格子点形状で格子シフトを十字状に導入したもの、(h) 真円格子点で、2本の平行格子シフトを直交させて導入したもの。(d)、(e)の中には、単位格子中の電磁界分布の拡大図を示す。

を2本平行に導入したものの、(d)は真円格子点形状で格子間隔のシフトを十字状に導入したもの、(e)は真円格子点で、2本の平行格子シフトを直交させて導入したもの、さらに、(f)は格子点形状を三角形としてもので、格子間隔のシフトなしである。なお、デバイスの構成材料は、InGaAs/GaAs 半導体で、発振波長は 980 nm 近傍になるように設定されている。作製したデバイスは全て室温で連続発振し、安定な単一モードで動作した。得られたビームパターンを図 12(a)-(f)の右パネルに示す。単一ドーナツから2連、4連ドーナツ、さらには真円形状のパターン等の非常に興味深いビームパターンが得られた。ビーム拡がり角は、大面積コヒーレント発振を反映して2度以下と極めて狭いことが判明した。

上記のようなビームパターンが得られる理由は以下のように説明出来る。まず、図 13(a)の場合は、格子点形状が真円であり、その電磁界分布は、図 12(b)に示されるように回転対称性の良い電磁界分布となる。この電磁界分布が遠視野で干渉しあうと、中央部において電磁界のキャンセルが起こり、ドーナツ形状のビームとなる。ドーナツビームの偏光状態は、半径方向あるいは接線方向に揃えることが出来ることも本研究により判明した。次に、図 13(b)のように、格子点間隔のシフトを導入すると、図 12(e)に示すように、シフト位置において、電磁界分布の反転が起こるために、遠視野での干渉条件が反転し、ドーナツビームが2つ現れるようになる。シフトを増やしていくと、さらに遠視野での反転が繰り返され、図 13(b)-(e)に示すような、様々なドーナツビームが現れていくことになる。さらに、格子点形状を図 13(f)のように、3角形にすると、今度は、電磁界分布が、図 12(c)に示すように、回転対称性が崩れるため、中央部でのキャンセルがなくなり、円形ビーム形状へと変化していくことになる。特に、図 13(a)のドーナツビームは、接線方向偏光および動径方向偏光をもつことを突き止めており、これらは、それぞれ光ピンセットや、波長以下に集光可能な超波長光源として、極めて魅力的な応用可能性を含んでおり、今後引き続き、その有効性を調べていく予定である。

(C-2) 高出力動作への展開

本レーザの最大の特長は、大面積でコヒーレント発振が可能なことにあり、高出力動作が期待出来るが、これまで得られた出力は、CW 状態で 10 mW 程度であり、出力の増大が重要な課題となっていた。H17 年度の検討により面内電界分布の対称性を一部崩すことにより、上下方向への光閉じ込めの強さが低減され、結果として面発光出力の増大が可能となりうることを見出した。H18 年度は、前項(C-1)で述べた図 13(f)の構造、すなわち、正方

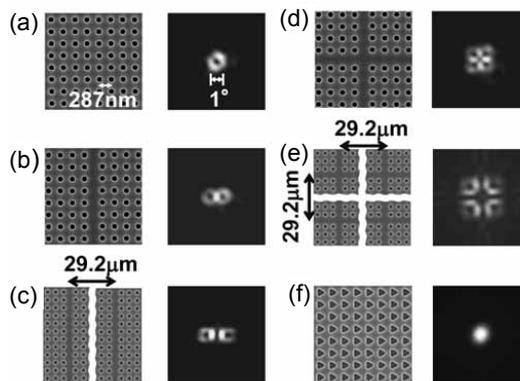


図 13：フォトニック結晶パターンを変化させたときのレーザ出射ビームパターンの変化。(a) 真円格子点、格子シフトなし。(b) 真円格子点、格子シフト1本。(c) 真円格子点、平行格子シフト2本。(d) 真円格子点、交差格子シフト2本。(e) 真円格子点、交差格子シフト4本。(f) 三角格子点、格子シフトなし。

格子 2 次元フォトニック結晶の格子点形状として、三角形を用いることが高出力化にとって極めて有効であることを突き止めた。また、デバイス構造として、図 14(a)に示すようなアップサイドダウンの構造とし、デバイス下部へ出射された光を下部電極により、デバイス内部へとフィードバックし、内部干渉を誘発することが極めて有効であることを見出した。その結果、図 14(b)に示すように、室温連続発振条件で、46 mW もの光出力を得ることに成功した。最大パワー時のスペクトルを同図(c)に示すが、53 dB を越える縦モード抑圧比という極めて良好な単一モード動作が得られていることが分かる。以上の結果は、単一モードで動作するあらゆる面発光レーザの中で、世界最大値が達成されたことを意味する。

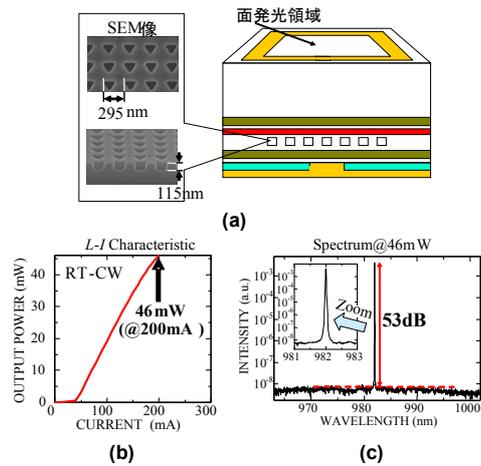


図 14 : (a)高出力化を達成したフォトニック結晶レーザの構造。(b)光出力と注入電流の関係。(c)46 mW 出力時の発光スペクトル。

(C-3) 2 次元結合波理論の確立

これまで、本レーザの解析は、平面波展開法あるいは時間領域差分法といった見通しのあまり良くない解析法のみしか存在しなかった。前年度、デバイス動作を見通し良く解析できる可能性のある 2 次元結合波理論の構築を試み、TE 波および TM 波に対する結合波基礎方程式を導出することに成功した。H18 年度は、TM 波に対する結合波方程式に境界条件を設定して実際に共振モードの解を求めることを試みた。図 15(a)に得られた共振モードの周波数(横軸)および閾値利得(縦軸)を示す。各点が共振モードを表しており、それぞれに対して、閾値利得が示されている。このうち、I, II(or III), IV と示すモードが、各バンド端の

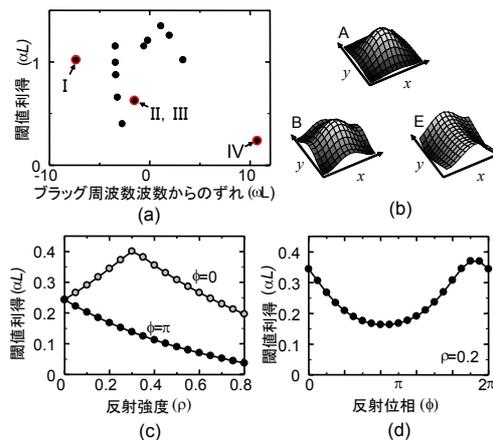


図 15 : 大きさ $L \times L$ の共振器に対する TM 波に対する 2 次元結合波方程式の解析結果。(a) 端面反射がないときに得られる共振モードの波数と閾値利得の関係。(b) 代表的なモードの電磁界分布の包絡線関数。(c) 反射位相 0 と π の場合のモード A の閾値利得の反射率依存性。(d) 反射率 0.2 のときのモード A の閾値利得の反射位相依存性。

共振モードに対応するが、発振は閾値利得の最も低いモード IV で起こることがこの結果より導かれる。図 15(b)に共振器内での強度分布を示すが、いずれも共振器中央で強度が大きくなる特徴を持つことが分かる。解析では、さらに、デバイス端面での反射や位相の効果を導入し、デバイス特性がどのように変化するかをも明らかにすることが出来た。図 15(c)に、反射強度(ρ)を変化させた場合のモード IV の閾値利得を示す。閾値利得の変化は、反射位相(ϕ)に大きく依存することが分かる。反射位相(ϕ)に対して閾値利得の計算を行ったところ、図 15(d)に示すように、 $\phi \sim 0.9\pi$ で閾値利得が小さくなることが明らかになった。以上、これまで、平面波展開法あるいは時間領域差分法といった見通しのあまり良くない解析法のみしか、存在しなかったフォトニック結晶レーザの解析法に1つの方向性を与えることが出来たことは、特筆に値すると言える。現在、これらに加えて、TE波に対する解析の検討もスタートさせ、前項までに述べた実験結果を説明出来る理論体系を構築しつつある。

(C-4) 青色レーザ等への展開

2次元フォトニック結晶レーザを現在の InGaAs/GaAs 系だけでなく、短波長系材料の InGaN/GaN へと展開する取り組みを開始している。前年度は第1段階として GaN 系半導体へのフォトニック結晶パターン形成技術の確立するべく研究を行い、周期 150~160 nm の正方格子および三角格子2次元フォトニック結晶パターンの作製に成功した。本年度は、このように作製したフォトニック結晶構造と InGaN 活性媒質との集積化を進めた。作製したデバイスのバンド構造を実測し、確かに2次元フォトニック結晶のバンド構造を反映した分散曲線をもつところまで、確認することに成功している。今後、青色領域での初めてのレーザ発振を目指して研究を加速していく予定である。

3. 研究実施体制

(1) 野田 進 (京大+ローム+住友電工+三菱) グループ
研究項目

- ・2次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発
- ・3次元フォトニック結晶による究極的な光の発生技術の開発
- ・大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

- E. Miyai, K. Sakai, T. Okano, W. Kunishi, D. Ohnishi, and S. Noda: "Lasers producing tailored beams", *Nature*, Vol.441, No.7096, pp.946-946 (2006).
- S. Noda: "Seeking the ultimate nanolaser", *Science*, Vol.314,, pp.260-261 (2006).
- T. Asano, W. Kunishi, B.-S. Song, and S. Noda : "Time-domain response of point-defect cavities in two-dimensional photonic crystal slabs using picosecond light pulse", *Applied Physics Letters*, Vol.88, No.151102, pp.1-3 (2006).
- M. Imada, L. H. Lee, M. Okano, S. Kawashima, and S. Noda: "Development of

- three-dimensional photonic crystal waveguides at optical-communication wavelengths", *Applied Physics Letters*, Vol.88, No.171107, pp.1-3 (2006).
- H. Takano, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda: "Highly efficient multi-channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal", *Optics Express*, Vol.14, No.8, pp.3491-3496 (2006).
 - S. Kawashima, M. Okano, M. Imada, and S. Noda: "Design of compound-defect waveguides in three-dimensional photonic crystals", *Optics Express*, Vol.14, No.13, pp.6303-6307 (2006).
 - K. Sakai, E. Miyai, and S. Noda: "Coupled-wave model for square-lattice 2D photonic crystal with TE-like mode", *Applied Physics Letters*, Vol.89, No.2, pp.021101-1-021101-3 (2006).
 - Y. Tanaka, M. Tymczenko, T. Asano and S. Noda: "Fabrication of Two-Dimensional Photonic Crystal Slab Point-Defect Cavity Employing Local Three-Dimensional Structures", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, No.8A, pp.6096-6102 (2006).
 - H. Takano, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda: "Highly Effective In-Plane Channel-Drop Filters in Two-Dimensional Heterostructure Photonic-Crystal Slab", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, No.8A, pp.6078-6086 (2006).
 - S. Takahashi, M. Okano, M. Imada, and S. Noda: "Three-dimensional photonic crystals based on double-angled etching and wafer-fusion techniques", *Applied Physics Letters*, Vol.89, No.123106, pp.1-3 (2006).
 - B. S. Song, T. Asano, and S. Noda: "Physical origin of the small modal volume of ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavities", *New Journal of Physics*, Vol.8, pp.209 (2006).
 - T. Asano, B.-S. Song, Y. Akahane and S. Noda: "Ultrahigh-Q Nanocavities in Two-Dimensional Photonic Crystal Slab", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.12, No.6, pp.1123-1134 (2006) (Invited).
 - S. Noda: "Recent progresses and future prospects of two and three-dimensional photonic crystals", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol.12, No.6, pp.1123-1134 (2006) (Invited).
 - K. Sakai, and S. Noda: "Optical trapping of metal particles in a doughnut-shaped beam emitted by a photonic-crystal laser", *Electronics Letters*, Vol.43, No.2, pp.107-108 (2007).
 - B. S. Song, T. Asano, and S. Noda: "Heterostructures in two-dimensional photonic-crystal slabs and their application to nanocavities", *Journal of Physics D: Applied Physics*, (2006).
 - 大西大、野田進: "2次元フォトリック結晶レーザー開発の現状", レーザー研究, Vol.34, No.11, pp.736-739 (2006).
 - 杉立厚志、野田進: "フォトリック結晶線欠陥レーザー", レーザー研究, Vol.34, No.11, pp.740-744 (2006).
 - 富士田誠之、野田進: "フォトリックバンドギャップを利用した発光制御技術", レーザー研究, Vol.34, No.11, pp.761-766 (2006).

(2) 特許出願

平成18年度特許出願：7件（CREST研究期間累積件数：16件）