

「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

京都大学大学院工学研究科 教授

フォトニ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

フォトニック結晶は、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、このフォトニ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ニ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。

まず、前年度まで(H17-18年度)の成果を簡単に纏めると以下のようなになる。

(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次元フォトニ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、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) 2次元フォトニック結晶に、 $Q=3,000$ ~ $5,000$ 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、ナノ共振器に存在する量子ドットの数が、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

を理論的に突き止めた。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（光子寿命約 1ns, $Q \sim 1,200,000$ ）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) 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、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、様々な知見を得た。さらに、(2)本CRESTでは、新たに左右45°斜めエッチングに基づく結晶作製技術の構築にも鋭意取り組み、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、上下方向の周期が1~2周期の3次元フォトニック結晶を実際に形成し、理論計算結果との比較から、確かに3次元結晶としての性質をもつことを示すことに成功した。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に、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した。(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、実際に、単一縦横モードで動作する面発光として世界最大の46 mW (CW) を達成することに成功した。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とともに、まず、TM波に対する解析を完成させた。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の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(H19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、まず、(1)2次元フォトニック結晶ナノ共振器と量子ナノ構造との弱結合状態での発光量子効率を様々な条件下で実験的に検討し、前年度の理論検討（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）を裏付ける結果を得ることに成功した。(2)ナノ共振器と量子ナノ構造の結合状態が、ナノ共振器の Q 値の増大とともに、弱から強結合へどのように遷移していくかを明らかにすることは、量子情報チップ実現への展開上極めて重要である。本年度は、理論的に弱から強結合状態への遷移の様子を始めて体系的に明らかにすることを試みた。さらに、以上の基礎として、(3)ナノ共振器の Q 値の更なる増大にも取り組み、世界記録をさらに更新し、250万という驚異的な Q 値実現に成功した。さらに、このような高い Q 値の超高速制御にも取り組んだ。**(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、積

層数の増大効果と構造揺らぎの影響の相関関係を明らかにしたが、本年度は、高精度多層 3 次元結晶実現を目指し、自動位置あわせ法の検討を行った。その結果、30-50 nm 程度以下という極めて高精度ながら、自動で位置あわせ・ウエハボンディングが可能な装置の開発に成功することが出来た。(2)本 CREST にて提案を行なっている左右 45°斜めエッチングに基づく 3 次元結晶作製においては、上下方向の周期数を倍増させ、フォトリックバンドギャップ効果-20dB を達成することに成功した。(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)ユニットセル構造として、新たに直角 3 角形が有効であることを見出し、室温パルス条件で、1 W に迫る出力強度を実現することに成功した。また、(2) レーザ特性の詳細な解析を可能とする 2 次元結合理論の構築にも鋭意取り組み、本年度、TE モードに対する理論構築に成功した。さらに、(3)本レーザの動作波長の短波長化にも取り組み、世界で初めて、青紫色領域での電流注入発振に成功した[1]。

以上のような成果により、研究代表者が米国電気電子学会(IEEE) Fellow 表彰と応用物理学会 Fellow 表彰を受けた。また、IEEE LEOS Annual Meeting において、若手研究者の 1 人が、Best Student Paper Award を受賞した。その他にも、レーザー学会論文賞や EMS 賞など多くの賞を受けた。また、2 次元フォトリック結晶ナノ共振器の Q 値の増大やその制御に関する成果は、英国科学誌 Nature Photonics および Nature Materials にそれぞれ掲載され、また、青紫色フォトリック結晶レーザ実現の成果は、米科学誌 Science に掲載され、大きな注目を集めた。

今後も、引き続き、上記(A)-(C)の研究課題を 3 本柱として、フォトリ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

(文中にある参照番号は 4. (1)に対応する)

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リ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。以下に具体的に、H19 年度の研究実績を纏める。

(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

本研究項目は、2 次元フォトリック結晶スラブ(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。H19年度は、下記のような成果を得た。

(A-1) 量子ナノ構造をもつナノ共振器における弱結合状態での発光過程の検討 [論文 1-4] :

本項目は、2次元フォトニック結晶に人為的な欠陥共振器（ナノ共振器）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。前年度までに、点欠陥共振器モードへバンドギャップ効果により蓄積されたキャリアが効果的に再配分され、極低励起レベル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するとともに、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、その位置や、発光波長がランダムであっても、70~80%以上の高い量子効率を示す可能性があることを理論的に突き止めた。

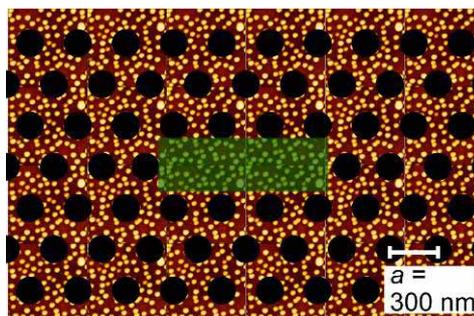


図 1: 量子ドットをもつフォトニックナノ共振器のイメージ図。測定に用いた試料と同様な量子ドットの原子間力顕微鏡像から作成した。緑の領域がナノ共振器部分であり、約 100 個のランダムな量子ドットが含まれている。

本年度は試料の測定温度を変化させることで、実効的にナノ共振器と量子ドットの結合状態を変化させた際の発光状態の変化を検討した。測定した試料は、2次元円孔三角格子フォトニック結晶スラブにおいて、最初に提案した直線状に 3 個格子点を埋めたナノ共振器である。厚さ 200 nm の GaAs の中心部分に密度 $4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ の自己形成 InAs 量子ドット[1,3,4]をもつ周期 300 nm のナノ共振器のイメージ図を図 1 に示す。共振器中には約 100 個の量子ドットが含まれることになる。この試料を測定温度 3 K から 49 K まで変化させた際の発光スペクトルを図 2 に示す。ここではナノ共振器部分のみを励起するため、ナノ共振器の高次モードの共振波長・偏光と一致する波長 1061 nm の連続動作レーザーで励起した。温度を上記のように変化させることで、共振モードの波長は約 1 nm、量子ドットの波長は約 4 nm 変化するため、ナノ共振器と量子ドットの結合状態も変化するはずであるが、H18年度の解析結果に相当するよういづれの温度でも明確な共振モードピークが観察される実験結果が得られた。この結果は、確かに、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、極めて高い量子効率を得られる可能性を示している。今後は、これまでの解析では考慮してこなかった量子ドットの緩和

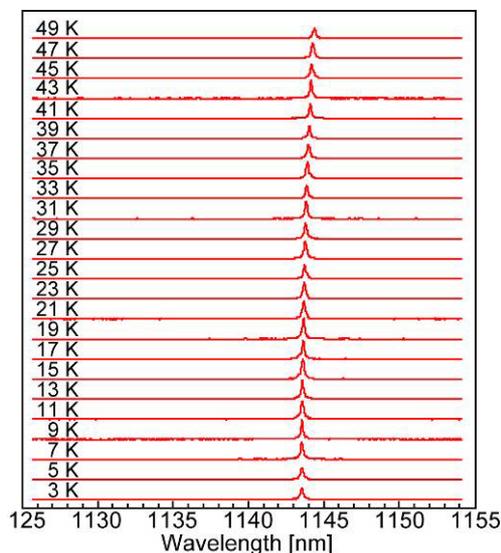


図 2: 測定温度を変化させたナノ共振器の発光スペクトル特性。励起レーザーの照射パワー密度は 90 W/cm^2 。

過程などを考慮することで、弱結合状態での詳細な発光過程を一層明らかにしていく。

(A-2) ナノ共振器と量子ナノ構造の弱から強結合への遷移に関する検討 [論文 1,3,5-7] :

上記は、ナノ共振器と量子ナノ構造の弱結合状態において、不要な発光モードをなくし、真に必要な共振モードのみを用いて、超高率の発光を目指すものであるが、結合状態が、弱から強へ向けて変化させることにより、所謂、量子通信用光源や量子情報処理チップへの展開が期待されるようになる。本年度は、ナノ共振器と量子ナノ構造との結合状態がどのように、弱から強結合状態へと遷移していくかの統一的な解析を行なった。その理由は、これまで、ナノ共振器と量子ナノ構造発光体の結合系の解析においては、弱・強結合領域のそれぞれにおける発光過程が摂動近似を用いて議論されていたが、両者の中間の遷移領域において発光過程がどのように変化していくのか不明であったためである。遷移領域ではどちらの領域から接続していても摂動近似が破綻していた。本年度、摂動近似を用いない解析を行うことにより、弱結合・強結合領域を統一的に解析し、その発光過程を全領域において明らかにすることに成功した。その解析モデルを図3に示す。ここで、量子ドットは近似的に2準位系と見なし、単一共振モードとの結合定数を g とした。この解析モデル

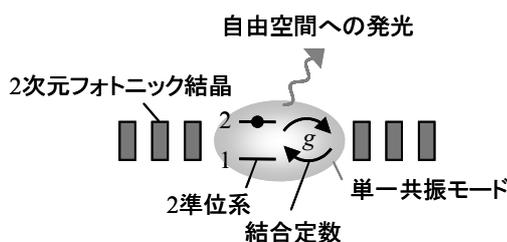


図3: 解析モデル

において、マルコフ近似を用いて電子系および光子系のシュレディンガー方程式を連立的に解くことにより、全結合領域において発光レート W , および発光の振動周波数 Ω を統一的に表す解析解を得た。この結果を、ナノ共振器の Q 値に対してプロットしたものを図4に示す。 Q 値が小さい領域(灰色領域)では発光レート W が Q 値に比例して増大(Purcell 効果)するのに対し、 Q 値が大きい領域(黄色領域)では、発光の振動周波数が真空 Rabi 周波数 Ω_{Rabi} に漸近する(真空 Rabi 振動)ことがわかる。これらの結果は、それぞれ弱結合、強結合領域における摂動近似の結果と一致した。一方、これらの中間領域では発光レートに極値が存在することがわかった。発光レート W はナノ共振器の Q 値が $Q = \omega_{\text{cav}}/4g$ に一致するとき、最大値 $W_{\text{max}} = 2g$ をと

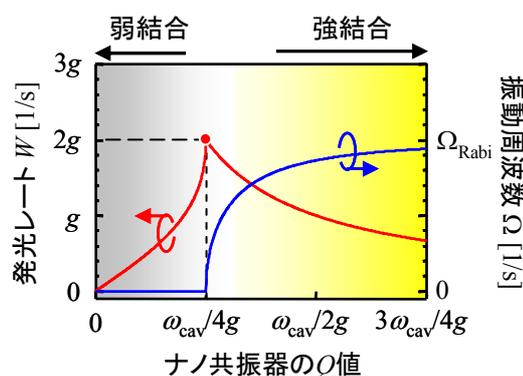


図4: 発光レート W と振動周波数 Ω の Q 値に対する依存性。

る。また、この条件式 $Q = \omega_{\text{cav}}/4g$ は、共振モードの光子寿命 τ_{cav} と真空 Rabi 振動の周期 T_{Rabi} を用いて $1/\tau_{\text{cav}} = 2\pi \times (2/T_{\text{Rabi}})$ と表現できることがわかった。これは、共振モードの光子寿命 ($=\tau_{\text{cav}}$) と、2準位系が共振モードに光子を放出する時間 ($=2/T_{\text{Rabi}}$) とが整合するとき、最も速いレート $W_{\text{max}} (=2g)$ で光子放出が生じることを意味する。したがって、高効率単一光子光源などの応用を考えた場合、 $Q = \omega_{\text{cav}}/4g$ をもつ共振器を設計することが有効であることが

分かる。このように、弱結合・強結合の中間領域における発光過程の解明し、ナノ共振器を用いた発光制御を行う上で、極めて重要な指針を得ることができたと言える。

また本研究では、前年度に引き続き、以上の基礎となるナノ共振器の機能を向上させるための検討も合わせて行った。具体的には(1)ナノ共振器の Q 値の増大[5, 6]、(2)ナノ共振器の Q 値の超高速制御[7]の 2 点に取り組んだ。

(1)のナノ共振器の Q 値の増大に関しては、既に昨年度までに光子寿命 1 ns の共振器を実現することに成功している。本年度はまず、フォトニック結晶の構造揺らぎが共振器の Q 値に与える影響について検討を行い、空気孔の位置および半径が標準偏差 $\sigma = 1 \sim 1.5$ nm の揺らぎをもつ場合においても Q 値が 100 万程度まで抑えられることが明らかにした。また、空気孔半径が小さいほど揺らぎが強くなることを見出し、実際に、その効果を実験的に調べた結果、図 5 に示すように光子寿命 2.1 ns の共振器を実現することに初めて成功した[6]。この共振器の Q 値は 250 万であり、従来のフォトニック結晶光ナノ共振器の Q 値の記録を 2 倍以上更新する結果である。なお、この成果は、8 月号の英国科学誌 *Nature Photonics* に掲載[1]され、あわせて国内外の新聞雑誌において報道され、大きな注目を集めた。

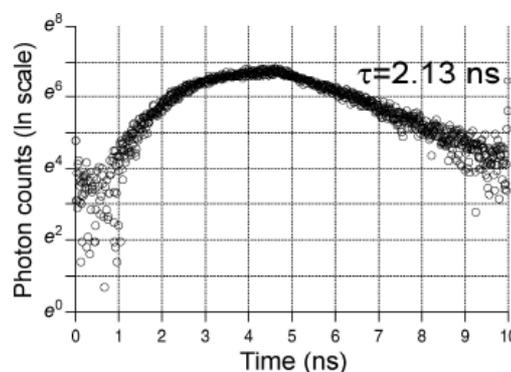


図 5：作製された共振器の時間分解測定結果。2.13 ns の光子寿命 (Q 値 250 万) を達成することに成功した。

さらに、(1)で述べたような高 Q 値光ナノ共振器に光を自由自在に出し入れするために、(2)のナノ共振器の Q 値を超高速に制御することをも試みた[7]。高 Q 値ナノ共振器では光を長時間閉じ込めることが可能となる半面、光の出し入れに長い時間が必要となる。これを克服するため、 Q 値の超高速制御を試みた。具体的には、図 6 に示すようなフォトニック結晶共振器と導波路、ヘテロ構造を用いた完全反射鏡からなる系を構築した。この系における共振器と導波路との結合は、共振器から導波路へ直接漏れる光とヘテロ界面を經由して漏れる光の干渉によって決まるため、共振器とヘテロ界面の間の屈折率を変化させることにより Q 値を超高速に変化させることが可能であると考えられる。実際にこの系を用いることで、図 7 に示すように共振器の Q 値を 3000 から 12000 まで数ピコ秒の非常に短い時間の間に増加させることに成功した[7]。これにより、ナノ共振器と量子ナノ構造の結合状態の超高速制御にも展開が期待され、今後の展開上、極めて重要な結果を得たと言える。なお、この成果は、11 月号の英国科学誌 *Nature Materials* に掲載[7]されるとともに、朝日、毎日新聞等で報道されるなど大きな注目を集めた。

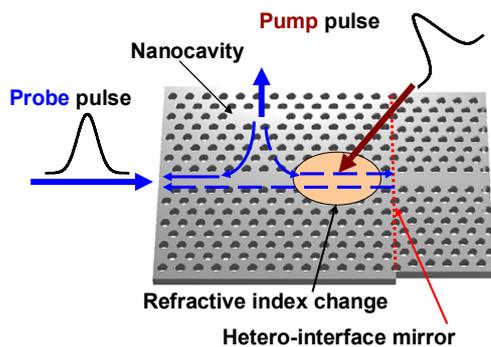


図 6：共振器 Q 値の動的制御のための系

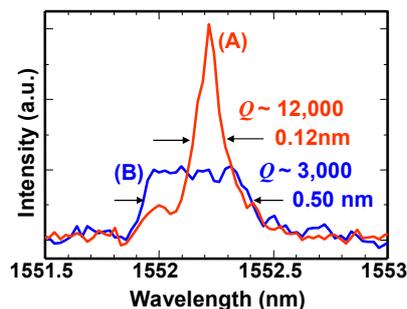


図 7：共振器 Q 値の動的制御の実験結果
(A):動的制御を行った場合 (B):動的制御を行わない場合

(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 [論文 8, 9]

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。H19年度の成果は以下の通りである。

(B-1) ストライプ積層型フォトニック結晶による発光制御の検討

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。昨年度、このようなフォトニック結晶を用いた発光制御について理論面から検討し、結晶構造の有限性と揺らぎの関係性を明らかにした。本年度は、結晶の層数を大幅に増大させるとともに揺らぎの影響を極力低減することにより完全な発光制御[1,8]を実現するため、精密自動化位置合わせ・ウエハボンディング装置の検討を行った[9]。開発した装置の概略を、図8に示す。位置合わせ用パターンを表面に形成した試料を相対・接近させた状態で、近赤外光を用いた透過観察により両試料の位置を評価し、位置合わせおよびボンディングを行うシステムである。

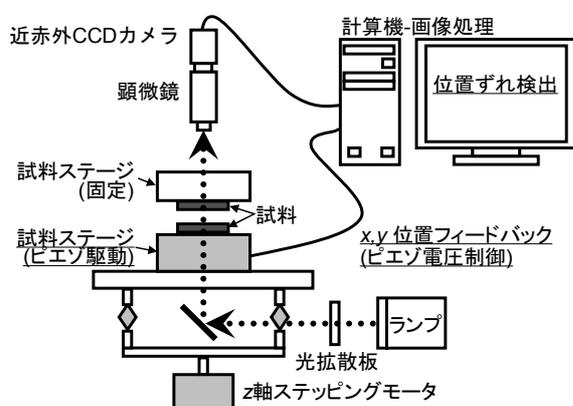


図 8：開発した装置の概略図。

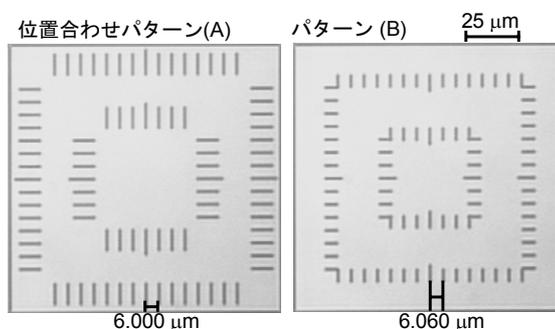


図 9：設計した位置合わせ用パターンの近赤外光透過観察結果。2つのパターンを対象にそれぞれ形成し、重ね合わせ画像を取得する。

積層位置ずれの評価においては、計算機を用いた画像パターン認識の導入により、計測精度の向上を試みた。図 9 のような、グレーティング構造を複数配置した位置合わせパターンを設計して画像認識により位置ずれを評価した結果、試料や観察用顕微鏡に多少の振動がある場合にも、安定して $3\sigma = 10 \text{ nm}$ 程度の高い位置ずれ計測精度が得られた。さらに、この計測結果を利用して、試料を保持するピエゾステージをフィードバック駆動することにより、自動位置合わせを可能とした。自動動作を実現した結果、図 10 のように、2 ステップ以内の迅速な位置合わせ動作が達成された。最終的に、以上のような計測/位置合わせを繰り返しながら試料を接触させてウエハボンディングを行ったところ、50 nm 以下の誤差範囲での再現性のよい積層が得られた[9]。今回開発したシステムにより、図 11 のような精密な 3 次元フォトニック結晶の形成にも成功しており、精密かつ多層の構造をもつストライプ積層型 3 次元結晶作製の基礎技術が確立したと言える。

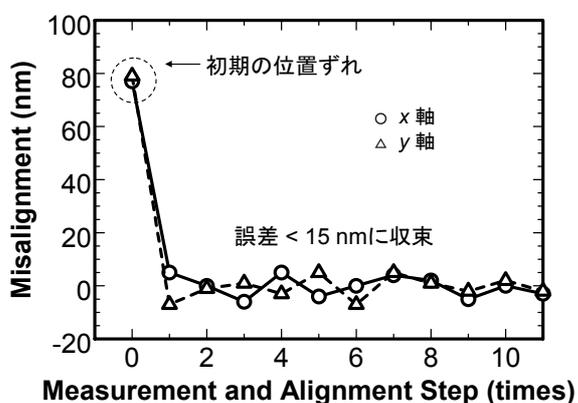


図 10：自動位置合わせ動作の一例。初期に生じていた 80 nm 程度の位置ずれが、およそ 2 ステップ以内に 15 nm 以下に抑えられている。

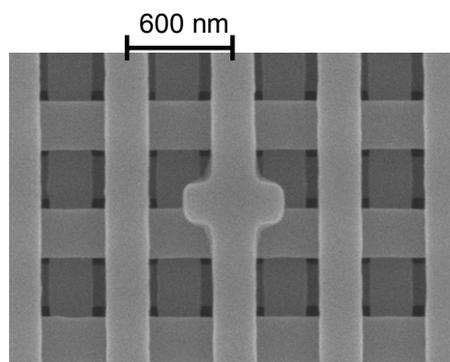


図 11：自動アライメント/ボンディングにより作製した 5 層積層フォトニック結晶。

(B-2) 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[1,8]。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。そのため本研究では左右 2 方向からの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、その基礎技術の開発を行っている。昨年度には、基板鉛直方向から 40 度の角度での斜めエッチングに成功し、3 次元フォトニック結晶の試作を行った。本年度は、さらにプロセス技術の検討を進め、図 12(a)に示すように、より理想的な角度 45 度、深さ 2 周期の斜めエッチングを実現した。また、エッチング孔幅が中央部で広がる現象（ボーイング）を抑制し、直線状のエッチング側壁を得ることに成功した。この斜めエッチング技術を用いて作製した 3 次元フォトニック結晶試料の SEM 観察像を同図(b)に、またその透過および反射スペクトルの測定結果を図 13(a)に示す。波長 1400 ~ 1600 nm 付近に明瞭な透過率の低下(-22dB)および反射

率の増大(97%)が確認され、また、この実験結果は同図(b)に示す理論計算結果ともよく一致した。一括作製された3次元結晶試料は、従来のストライプ積層型3次元フォトニック結晶に換算して約8層に相当し、得られた光学特性は3次元結晶として現状で世界でもトップクラスのものである。以上の成果は、斜めエッチングを用いた新たな作製法の有用性を明快に実証しているものと言える。

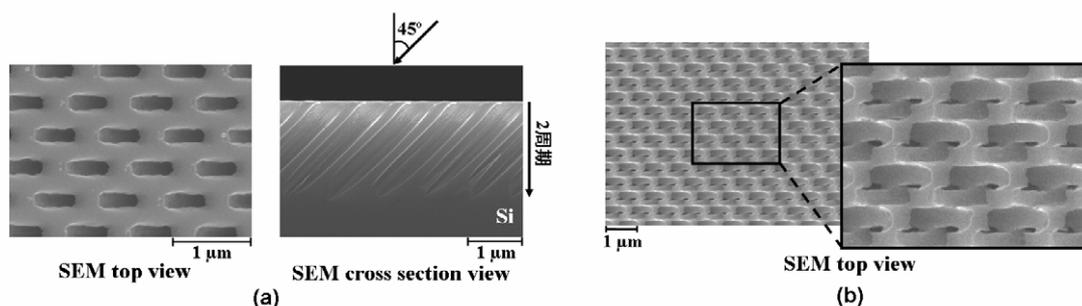


図 12 : (a) 1 回目の斜めエッチング後の平面および断面 SEM 観察像。
(b) 2 回の斜めエッチングによって作製された 3 次元フォトニック結晶の平面 SEM 写真。

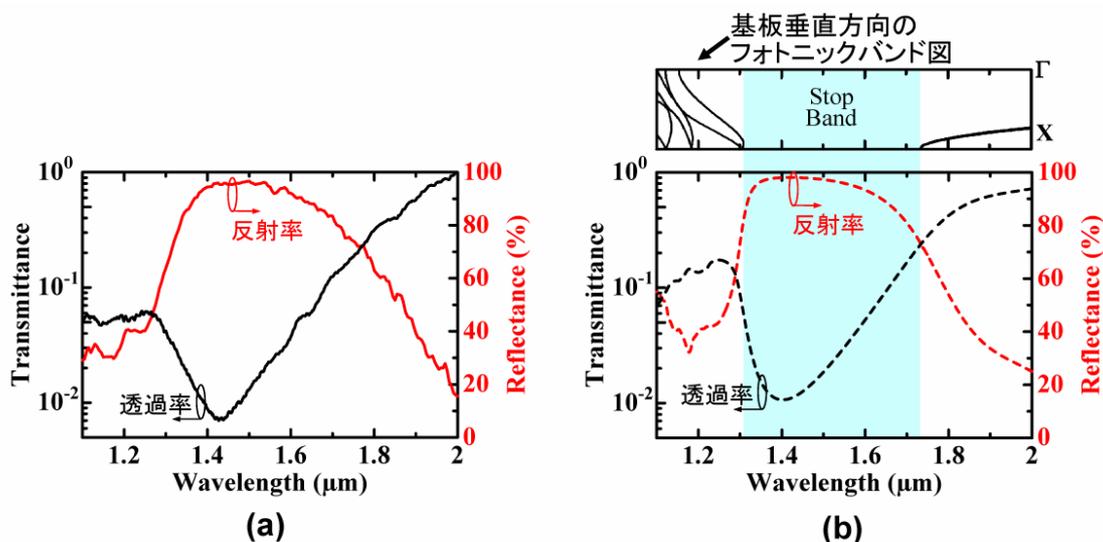


図 13 : (a) 3 次元フォトニック結晶試料の透過、反射特性。(b) 透過、反射特性の理論計算結果。上部に基板垂直方向のフォトニックバンド図を併せて表示している。

(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発 [論文 10-13]

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。H19年度の成果は以下の通りである。

(C-1) 格子点形状の制御と高出力動作への展開

本レーザの大きな特長の1つは、大面積で完全な縦横単一モード発振による高出力動作が可能であるという点であるが、本研究課題を始める時点で得られていた出力は、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。これに対し、H17年度およびH18年度の検討により、出力増大にはフォトニック結晶格子点形状の非対称化が効果的であることを見出した。これは定在波の電界分布が、非対称な格子点形状を反映し、その対称性が崩れることによって結晶面に対し垂直方向の光閉じ込めの強さが低減することに起因する。実際に、正方格子2次元フォトニック結晶において格子点形状を従来の真円から正三角形に置き換えることにより室温連続条件で、46 mWもの光出力を得ることに成功した。H19年度は、格子点の非対称性[10-11]をさらに強調した直角二等辺三角形(図14(a))を採用し、光取り出し効率の向上を図った。その結果、図14(b)に示すように、パルス駆動で最大で1 Wという高出力を得ることに成功した。700 mWまでは単一モードで動作しており、この時点での発振スペクトルは、図14(c)に示すように、単一のピークを示した。また、ビーム形状は、図14(d)に示すように、単峰性であり、汎用性の高さにも期待ができる。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。

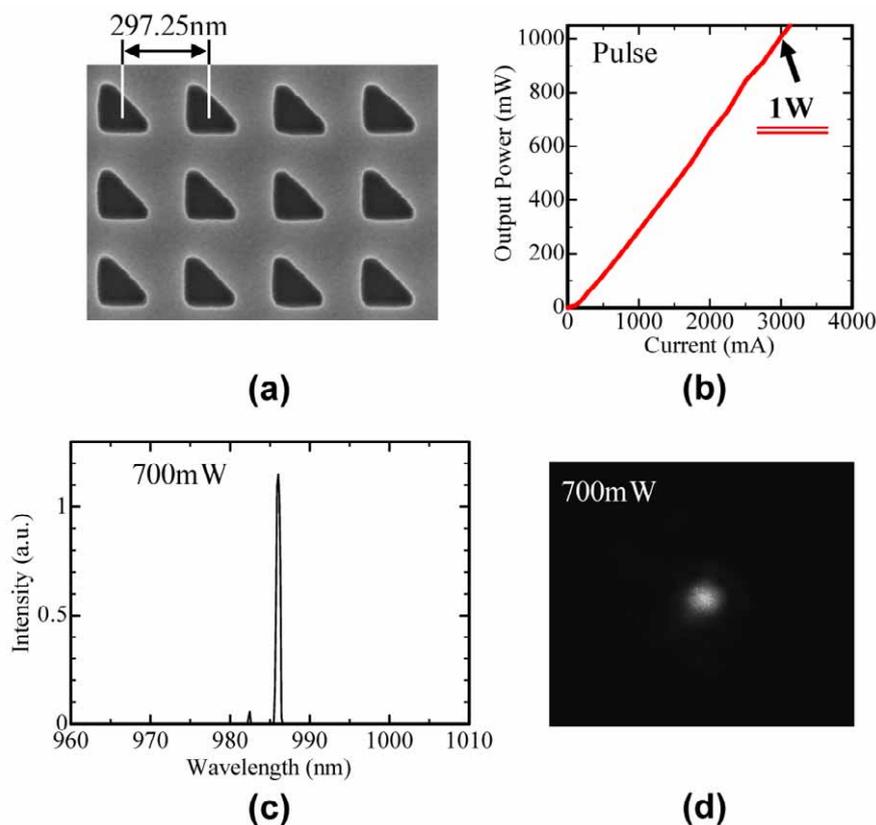


図 14: (a)非対称性を強調した格子点形状。(b)電流-光出力特性。(c)発振スペクトル(700 mW 時)。(d)ビーム形状(700 mW 時)。

(C-2) 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。そこで前年度までに、デバイス動作を見通しよ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波に対する結合波方程式を導出した。さらに、TM波に対して実際に共振モードの解を求め、境界条件による閾値利得の変化を明らかにすることにも成功した。H19年度は、TE波に対して、共振モードの解を求めることを試みた。図15(a)に、作製しているデバイスの構造に対して計算し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、A, B, C(or D)と示すモードが、各バンド端の共振モードに対応する。図15(b)に、各モードの共振器全体に渡る強度分布を示すが、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。以上の解析から、各モードのうち、発振は閾値利得の最も低いモードAで起こることが導かれるが、この結果は、実験結果と良く一致している。さらに、図15(c)に示すように、各モードのスペクトル線幅から実験的に見積られる閾値利得と、今回の計算により得られた閾値利得(格子点占有率:18%)も良く一致しており、実際のデバイスにおける閾値利得が良く表現できていることが分かる。以上、平面波展開法や時間領域差分法という既存の方法では困難であったフォトニック結晶レーザの解析が2次元結合波理論で可能となった[11]ことは、本レーザの設計・解析を進める上で、特筆すべき成果である。

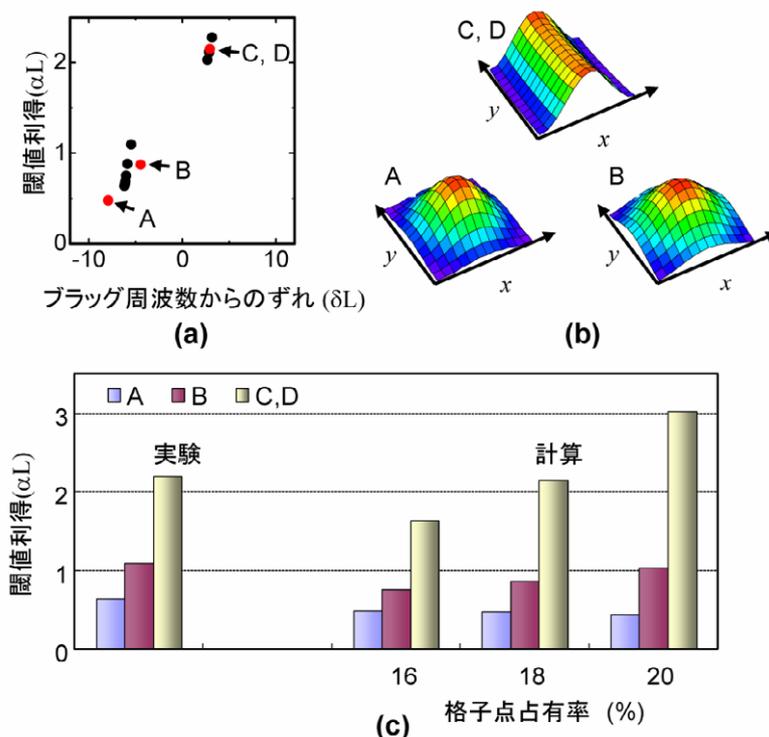


図 15 : TE 波に対する 2 次元結合波方程式の解析結果。(a)共振モードの周波数と閾値利得の関係。(b)代表的なモードの電磁界分布の包絡線関数。(c)代表的なモードに対する閾値利得の実験結果と計算結果。

(C-3) 青色レーザ等への展開

フォトニック結晶面発光レーザの発振波長を青紫色域まで、短波長化することが出来る
と、その応用可能性は、格段に広がるものと期待される。例えば、次々世代の高密度光
ディスク用光源や、極微小物質の観測・操作用光源として活躍出来るものと期待される。ま
た、単一縦横モードで、かつ偏光まで制御した大出力青紫面発光レーザとして動作が期待
され、かつ2次元的にアレイ化することも可能となる。つまり、情報記憶、処理、加工、
ナノバイオ等を始めとする様々な分野における新しいキー光源としての展開が期待される。

青紫色フォトニック結晶面発光レーザを実現する上で鍵となるのは、GaN系材料[12]を
用いて、いかに良質のフォトニック結晶をデバイス内部に形成するかという点、つまり、
100-200 nm という極めて小さな周期の GaN/空気2次元フォトニック結晶構造を、活性層(光
増幅を行う層) 近傍にいかに形成するかが重要になる(図16(a))。この目的のために、新
しいフォトニック結晶形成技術「再成長空気孔形成法(Air-hole Retained Over-Growth、
AROG)」を開発した[13]。AROGは、半導体の結晶成長法の1つである有機金属気相成長
(MOCVD)法において、GaNの結晶成長が横方向に極めて速く進むという現象に着目したも
のである。まず、AlGaIn層(光閉じ込め層)およびGaIn層(フォトニック結晶となる層)
をGaIn基板上に成長させる。続いて、最上部のGaIn層に、ドライエッチング法にて、直
径85 nm、深さ100 nm、周期185 nmの円形空気孔を三角格子状に形成する(図16(b))。そ
の空気孔の底部に極薄SiO₂層を形成し、引き続きMOCVD法にてGaIn層を再成長させる。
このとき、空気孔底部の極薄SiO₂層により空気孔内の結晶成長が阻止され、空気孔の存在
しないGaIn最上面にのみGaInが成長するようになる。GaInの成長は横方向へより速く進
むため、空気孔上部を覆うように成長し、やがてそれらが融合し、空気孔が結晶内部に埋
め込まれるようになる(図16(c))。こうして、GaIn/空気2次元フォトニック結晶を形成し
た後、活性層であるInGaIn量子井戸層、AlGaIn光閉じ込め層などを成長させ、デバイスの
基本構造を完成させる。透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた詳細な観察により、再成長した空

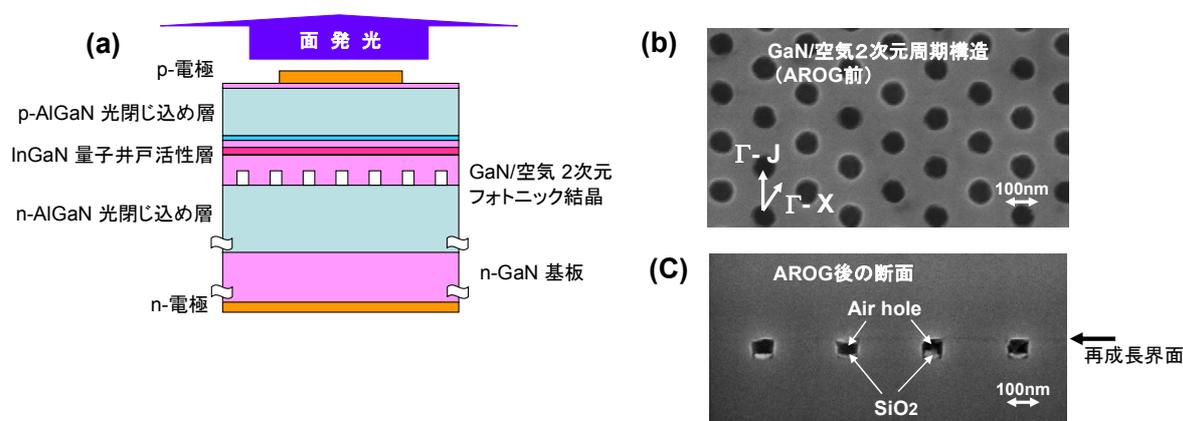


図16: (a)フォトニック結晶面発光レーザの模式図。(b)GaN/空気2次元周期構造の表面電子顕微鏡写真(AROG前)。(c)AROG後の2次元周期構造の断面電子顕微鏡写真。

気孔上部の結晶中には転位などの欠陥は発生していないことを確認した。さらに、形成した GaN/空気 2 次元周期構造が 2 次元フォトニック結晶としての性質を持つことを確認するために、バンド構造を実験的に測定するとともに (図 17 (a))、バンド構造を理論的に計算した (図 17(b))。両者は、よく一致することから、形成した GaN/空気 2 次元周期構造が 2 次元フォトニック結晶としての性質を示すことが判明した[13]。こうして作製したデバイスに、室温にて、パルス条件 (パルス幅 : 500 ns、繰り返し周波数 1 kHz) で、電流注入を行った。その結果、青紫色領域で、初めてフォトニック結晶面発光レーザの電流注入動作が実現された[13]。図 18(a)には、デバイスの発振の様子(発振後の近視野像)を示している。中央部が電極 ($100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$) で、大面積での青紫色発振が得られていることが分かる。図 18(b)には、発振時の遠視野像 (ビームパターン) を示されている。大面積コヒーレント発振を反映して、非常に拡がり角の小さなビーム ($<1^\circ$) が得られ、かつ、ビーム形状は、特徴的なドーナツビームが得られていることが分かる。

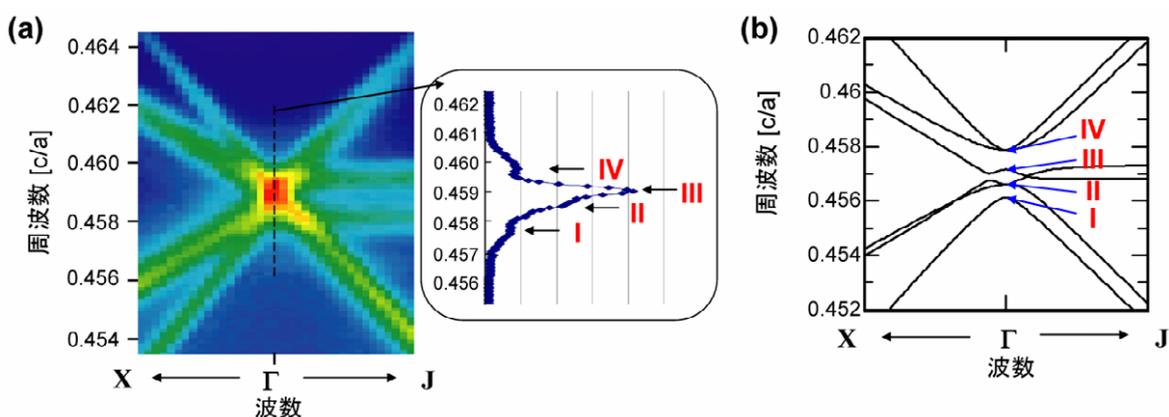


図 17 : (a) デバイス内部に埋め込まれた GaN/空気 2 次元周期構造のバンド構造の測定結果。挿入図は、バンド端におけるスペクトル。(b)バンド構造の計算結果。(A)(B)の比較により、作製した構造は、2次元フォトニック結晶としての性質をもつことが分かる。

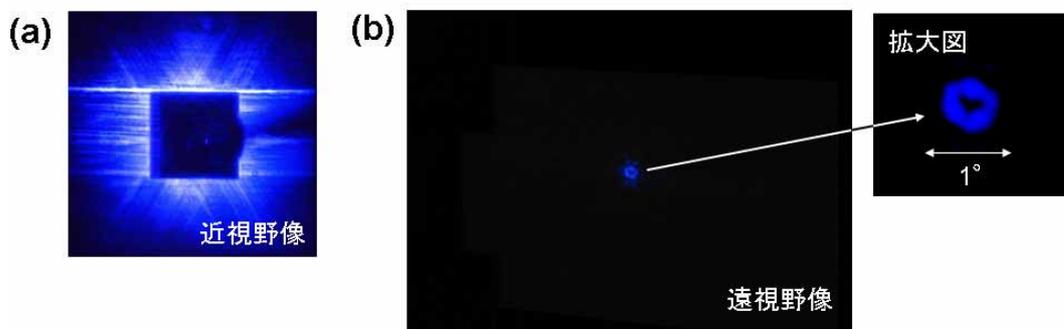


図 18 : GaN フォトニック結晶レーザの発振の様子。(a)青紫色発振時の近視野像。(b)遠視野像。

3. 研究実施体制

(1) 「総合研究推進グループ (京大+ローム+住友電工+三菱)」グループ

①研究分担グループ長：野田 進 (京都大学、教授)

②研究項目

本研究グループが、全ての研究項目を、責任をもって推進している。特に、京都大学は全研究項目に責任をもって研究を推進している。ロームと住友電工は、研究項目(C)、すなわち、大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発に関与している。特に、ロームは、2次元フォトニック結晶レーザにおけるビームパターンの制御や、高出力化に関する項目に関与し、住友電工は、2次元フォトニック結晶レーザの GaN/InGaN系への展開に関与している。一方、三菱電機は、研究項目(A)、すなわち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関与した。3社とも、京都大学へ来て、大学設置の装置を使用して、研究を進めている。

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

1. S.Noda, M. Fujita, and T. Asano: "Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities", *Nature Photonics*, Vol.1, No.8, pp.449-458 (2007) (Review Article).
2. 野田進: "フォトニック結晶の進展と展望", 電子情報通信学会会誌, Vol.90, No.9, pp.783-786 (2007).
3. W. Stumpf, M. Fujita, M. Yamaguchi, T. Asano, and S. Noda: "Light-emission properties of quantum dots embedded in a photonic double-heterostructure nanocavity", *Applied Physics Letters*, Vol.90, No.231101, pp.1-3 (2007).
4. W. Stumpf: "Quantenpunkte als Photonenquellen (Quantum Dots as Photon Sources)", *Physik in unserer Zeit* (Contemporary Physics), Vol.39, No.2, pp.71-76 (2008).
5. 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*, Vol.40, No.9, pp.2629-2634 (2007).
6. Y. Takahashi, H. Hagino, Y. Tanaka, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda: "High- Q nanocavity with a 2-ns photon lifetime", *Optics Express*, Vol.15, No.25, pp.17206-17213 (2007).
7. Y. Tanaka, J. Upham, T. Nagashima, T. Sugiya, T. Asano and S. Noda: "Dynamic control of the Q factor in a photonic crystal nanocavity", *Nature Materials*, Vol.6, No.11, pp.862-865 (2007).
8. S. Ogawa, K. Ishizaki, T. Furukawa, and S. Noda: "Spontaneous emission control by 17 layers of three-dimensional photonic crystals", *Electronics Letters*, Vol.44, No.5, pp.377-378 (2008).

9. S. Kawashima, M. Imada, K. Ishizaki, and S. Noda: "High-precision alignment and bonding system for the fabrication of 3-D nanostructures", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.16, No.5, pp.1140-1144 (2007).
10. 宮井英次、酒井恭輔、岡野誉之、國師渡、大西大、野田進: "様々な形のビームを出社できる半導体レーザー=フォトリソグラフィによるフォトニック結晶エンジニアリングによるビーム制御=", 光アライアンス, Vol.5 月号, pp.20-23 (2007).
11. K. Sakai, E. Miyai, and S. Noda: "Two-dimensional coupled wave theory for square-lattice photonic-crystal lasers with TM-polarization", *Optics Express*, Vol.15, No.7, pp.3981-3990 (2007).
12. H. Kitagawa, T. Suto, M. Fujita, Y. Tanaka, T. Asano, S. Noda: "Green photoluminescence from GaInN photonic crystals", *Applied Physics Express*, Vol.1, No.3, pp.32004-1-32004-3 (2008).
13. H. Matsubara, S. Yoshimoto, H. Saito, Y. Jianglin, Y. Tanaka, and S. Noda: "GaN photonic-crystal surface-emitting laser at blue-violet wavelengths", *Science*, Vol. 319, no. 5862, pp. 445-447, (2008). (published online Dec. 20 2007 (10.1126/Science.1150413)).

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:2 件 (CREST 研究期間累積件数:18 件)