

「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ねらいとしている。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。

これまでに、(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、以下の成果を得た。(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がほぼ理論値 (15~17 倍程度) まで達することを実証し、不要発光の除去にほぼ成功したこと、(2)2次元フォトニック結晶に、 $Q=3,000\sim 5,000$ 程度の光ナノ共振器を導入し、 $0.4\text{W}/\text{cm}^2$ 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したこと、さらには、(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たこと。(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、以下の成果を得た。(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したこと、(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取り組み、基本設計に成功するとともに、2方向エッチングの可能性を実験的に実証することに初めて成功したこと、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なったことなど。(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、以下の通りである。(1)格子点形状を楕円化するとともに、位相 (π) シフトの導入に

より、ドーナツビームが、単峰ビームへと変化させることが出来ることを、初めて実験的に示したこと、(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、面発光出力の増大の可能性を示したこと、(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こと、さらには、(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たことなど。

以上のような成果などに対し、ベルギー国ゲント大学から honorary degree を受賞（代表者野田）するとともに、多くの国内外の会議での招待講演の依頼や、各種学会誌における解説、講義等の執筆依頼を受けた。また、本 CREST の大本となっている、高 Q 値共振器に関する我々の論文が、物理分野で、最も多く引用され、Thomson ISI から、Fast Moving Front Article として顕彰されるという栄誉を得た。下記 web 参照：

(<http://www.esi-topics.com/fmf/2006/january06-SusumuNoda.html>)

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、H17年度の研究実績を纏める。

(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。H17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。17年度は、励起キャリア

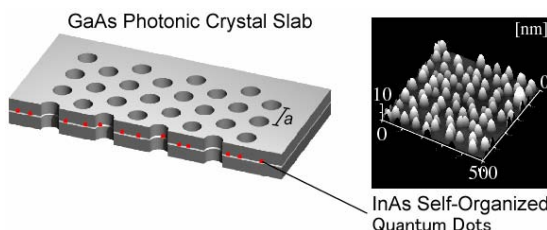


図1：自己形成 InAs 量子ドットを内蔵する2次元フォトニック結晶スラブの概念図と作製された量子ドットの原子力間顕微鏡像。

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）を実証することを目指した。具体的には、図 1 に示すような InAs/GaAs 系自己形成量子ドットを内蔵する 2 次元フォトニック結晶を作製し、図 2 に示すように、量子ナノ構造の導入により、確かに非発光プロセスが抑制され、ほぼ理論通り、（すなわち~15 倍）のキャリア寿命の増大を実証することに成功した。現在、より系統的にフォトニックバンドギャップ領域を変化させた試料を作製し、定量的かつ総括的な評価を行っている。特に、興味深い点は、量子ナノ構造の励起準位のみ、あるいは、基底準位のみフォトニックバンドギャップ効果を導入することにより、量子ナノ構造におけるキャリア緩和過程に関する深い理解が出来る可能性があることである。

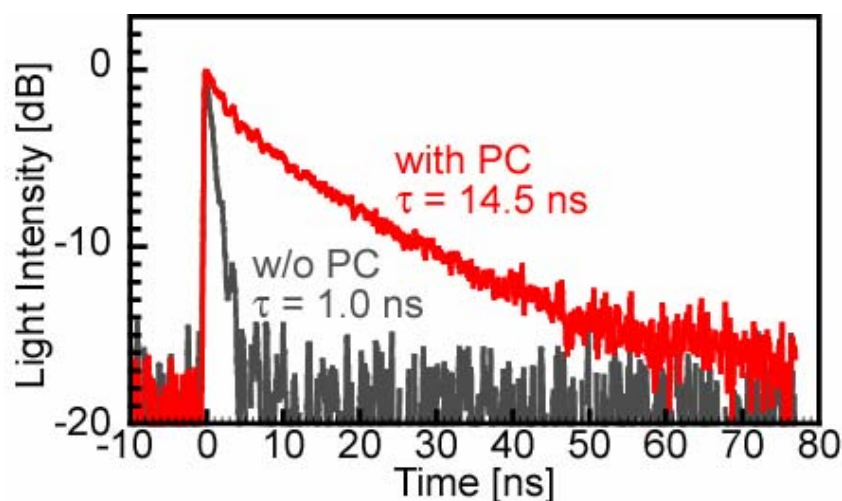


図 2：全発光スペクトルがフォトニックバンドギャップに含まれる 2 次元フォトニック結晶とフォトニック結晶のない未加工の量子ドットウエハの時間分解フォトルミネッセンス測定結果。測定温度は 4K。照射励起エネルギーは 1 パルスあたり $3.9\mu\text{J}/\text{cm}^2$ とした。

(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。17 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 ($<1\text{W}/\text{cm}^2$ 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を目指して研究を行った。具体的には、2 次元フォトニック結晶中に図 3 に示すような Q 値 3,000~5,000 程度のナノ共振器を形成し、共振器中に、量子ドットを~100 個程度導入した。その結果、図 4 に示すように、 $0.4\text{W}/\text{cm}^2$ という極めて低励起レベルから明確な点欠陥共振器モードを観測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。

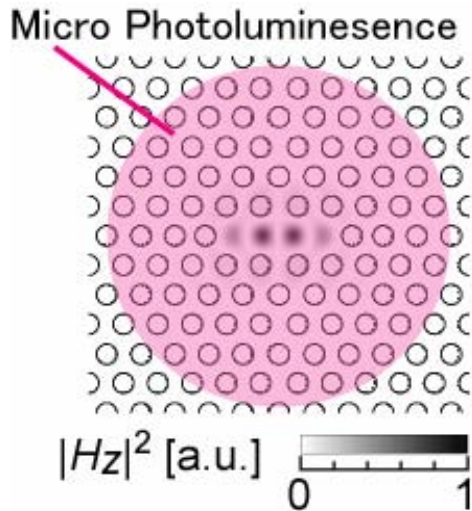


図 3 : 形成したナノ共振器の平面図および、共振モード分布とマイクロフォトルミネッセンスのイメージ。

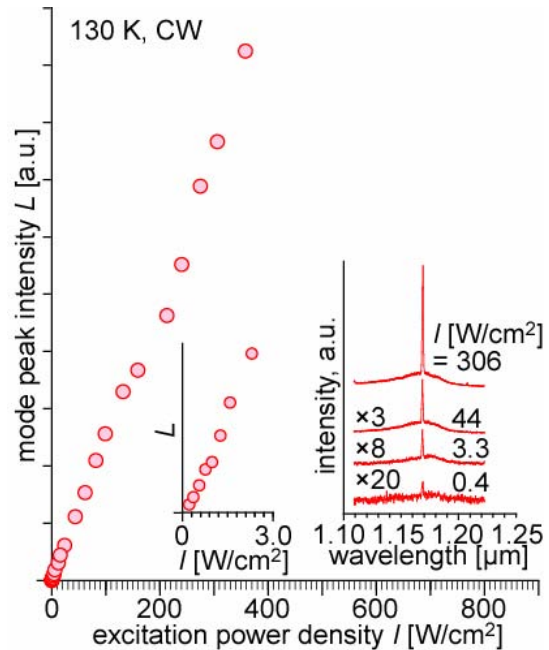


図 4 : 量子ドットを導入した 2 次元フォトニック結晶スラブナノ共振器(周期 300nm)の発光特性。測定温度 130K において、波長 850 nm の連続動作レーザーで光励起を行った。

本研究では、さらに、今後の強結合状態創出への展開に向け、光ナノ共振器の Q 値増大の検討をも行った。図 5 に示すような、マルチステップダブルヘテロ構造の新たな導入により、図 6 に示すように、 $Q \sim 1,000,000$ を実現し、自身のもつ世界最高記録をさらに更新することに成功した。この成果に関連して、1. でも述べたように、フォトニック結晶を用いた高 Q 値共振器に関する我々の論文が、物理分野で、最も多く引用され、Fast Moving Front Article として顕彰されるという栄誉を得た。

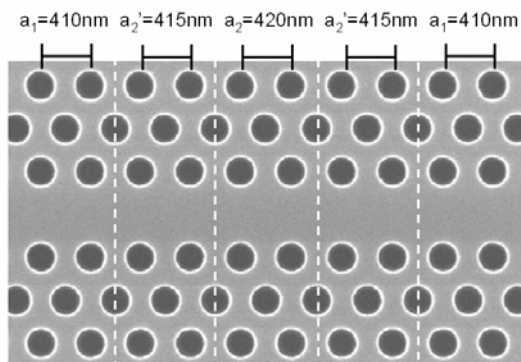


図 5 : 作製したマルチステップヘテロ構造の SEM 写真。周期 $a_1=410\text{nm}$ 、 $a_2'=415\text{nm}$ 、 $a_2=420\text{nm}$ の 3 種類の異なる周期をもつ 2 次元フォトニック結晶を多段接続してマルチステップヘテロ構造を形成している。

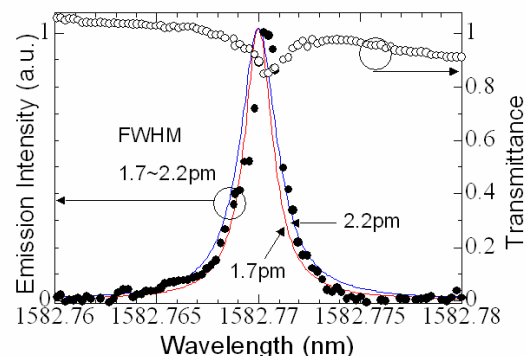


図 6 : 図 5 で示したマルチステップヘテロ構造共振器の共振スペクトルの測定結果。FWHM として 1.7~2.2 pm という非常に狭い値が得られ、 ~ 100 万という高い Q 値を実現することができた。

(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

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次元結晶の利用が不可欠である。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行っている。H17年度の成果は以下の通りである。

(B-1) 17層結晶構造の作製

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する。17年度は、積層数をこれまでの倍、すなわち全部で17層積層された結晶（発光層を含んで上下8層ずつ積層した構造、図7(a)参照）の実現を目指して研究を進めた。作製法は、研究代表者等がこれまで提案してきたウエハ融着法を用い、半導体ストライプを順次積層する方法を用いた。その結果、幸いにも、17層結晶の実現に目処を付けることが出来た。透過率の基礎特性評価から、図7(b)、(c)に示すように、従来の9層結晶における透過率の減衰が、 -30dB であったものを、 -46dB へと、大幅に増大させることに成功した。

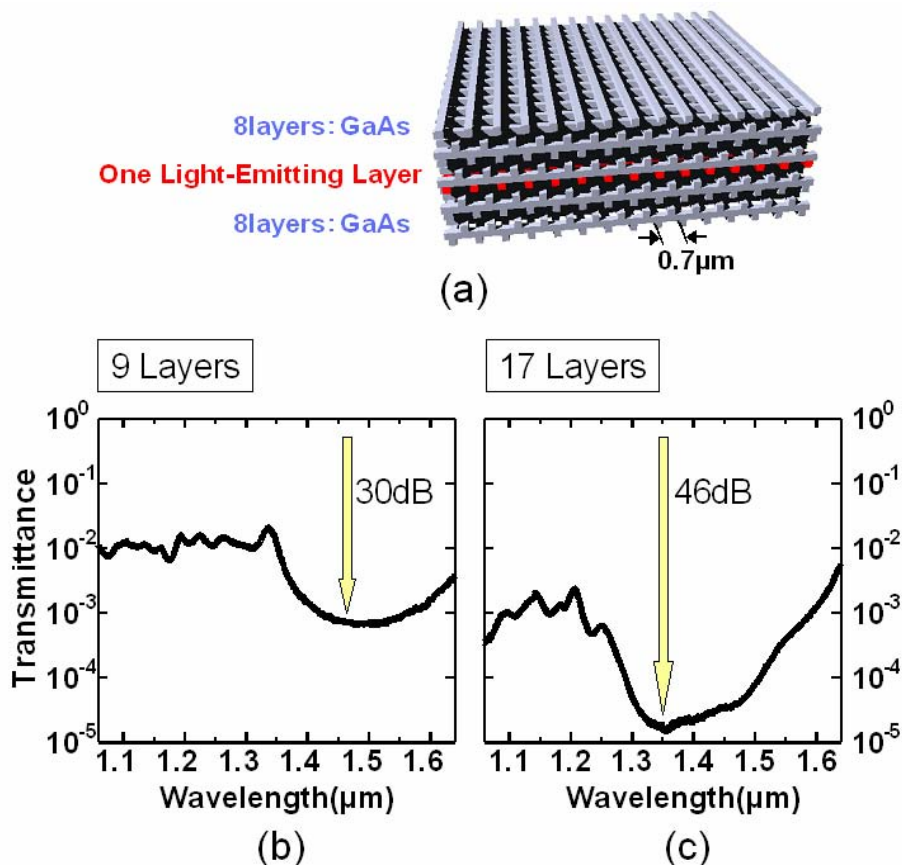


図7：(a)発光層を挟んで上下に8層フォトニック結晶を形成した、17層積層構造の模式図。(b)9層積層3次元フォトニック結晶の透過スペクトルの測定結果。(c)17層積層3次元フォトニック結晶の透過スペクトルの測定結果。

(B-2) さらなる多層化にむけた新たな作製法の検討

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。これまで用いてきた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、限界に達してくるために、新たな3次元結晶の実現方法を検討する必要がある。研究代表者は、極最近、新たな3次元結晶作製法を考案した [特願 2005-106729号]。これは、左右45°の斜め方向から、エッチングを2度繰り返し、基本結晶を作製するものである

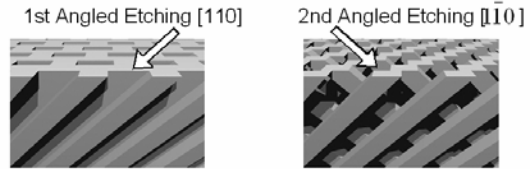


図8：左右45°の斜め方向から、エッチングを2度行うことによる3次元フォトニック結晶作製方法の模式図。

(図8参照)。17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。まず、平面波展開法、FDTD法に基づく理論計算により、結晶作製のための具体的なパラメータの抽出を行った。図9には、FDTD法で計算した結晶の垂直方向(z方向と定義)へ伝搬する光の透過率の計算結果(入射光がx、y方向にそれぞれ偏光する2つの場合の結果)を示している。これより、 $2a_z$ 以上の厚みがある場合、20dB程度以上の透過率の減衰が得られることが判明した。また、波長 $1.55\mu\text{m}$ 域に完全バンドギャップを実現するためには、 $a_z \sim 0.8\text{--}0.9\mu\text{m}$ 程度が適切であることが分かった。以上の設計をもとに、実際に、サブミクロン周期の斜めエッチングの試みを行った。その結果、図10(a)に示すように、確かにこのような斜めエッチングが可能であることを実証することに成功した。さらに、図8に従って、実際に2次元パターンに対し、2方向から斜めエッチングをも試み、初期的ながら、図10(b)、(c)に示すように、初めて2方向エッチングの可能性を示すことに成功した。現在、さらに、その作製技術の向上とともに、得られた結晶の光学特性の測定を鋭意進めているところである。

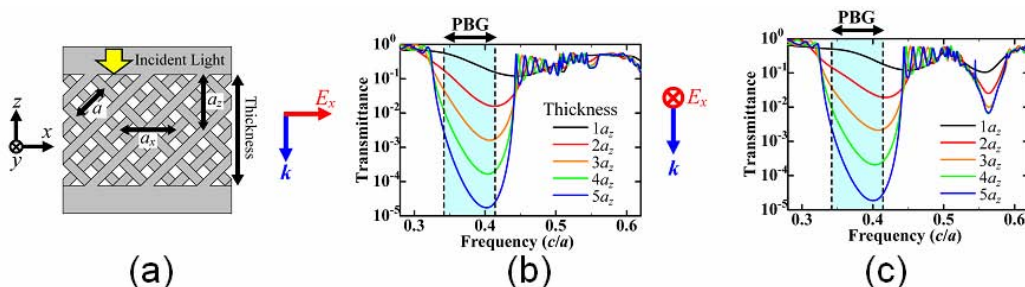


図9：3次元FDTD法による透過率の計算結果。(a)計算に用いた構造の模式図。(b)入射光がx方向に偏光する場合、および(c)入射光がy方向に偏光する場合について、z方向の厚さを様々に変化させたときの透過率の計算結果。 $2a_z$ 以上の厚みがある場合20dB以上の減衰が得られていることが分かる。

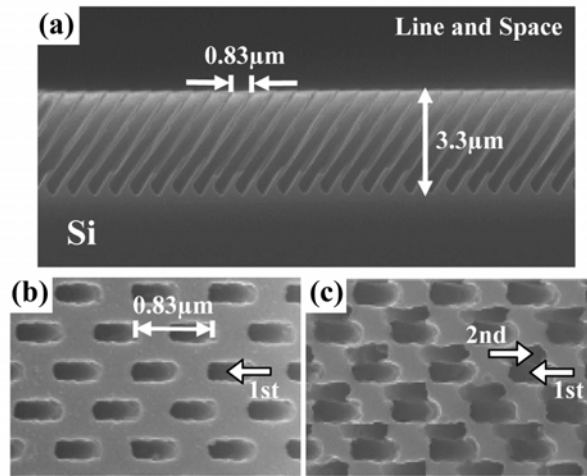


図 10 : (a)サブミクロン周期構造を斜めエッチングした試料の断面 SEM 観察像。(b)2 次元パターンに対して 1 回目の斜めエッチングを行った後の平面 SEM 写真。(c)2 次元パターンに対して、2 回の斜めエッチングを行った後の平面 SEM 写真。

(B-3) 新たな 3 次元結晶への発光体、点欠陥ナノ共振器の導入に向けた欠陥共振器の設計

(B-2)において、極めて強いフォトリックバンドギャップ効果をもつ 3 次元結晶の作製条件が確立されるようになると、今度は、いよいよ結晶内部に発光体や欠陥共振器を導入することが可能となる。H17 年度は、以上に先立ち、新 3 次元結晶中央部へ点欠陥を導入し、その基礎特性の解析を平面波展開法、FDTD 法等を用いて行った。図 11 にその一例を示す。同図(a)に示すように、斜めエッチングを一部行わない層を挿入することにより、確かに 3 次元ナノ共振器として動作しうることが分かった。同図(b)より、 z 方向の全周期が、 $4a_z$ を超えるときに、 Q 値は、数 1000 程度以上になることが判明した。3 次元結晶による自然

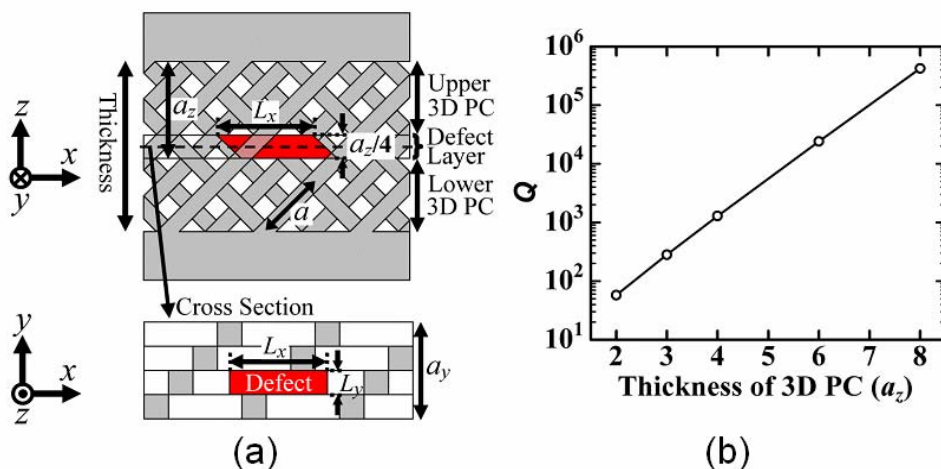


図 11 : 2 方向斜めエッチングによって形成した 3 次元フォトニック結晶内部に導入した点欠陥共振器の Q 値の 3 次元 FDTD 法による計算結果。(a)計算に用いた構造の模式図。(b) z 方向の周期に対する Q 値の依存性の計算結果。

放出の抑制効果を考えると、この程度の Q 値が達成されると、弱結合状態において、極めて高効率発光が得られるものと期待される。

(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。H17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

本デバイスの典型的なビームパターンは、図12(a)に示すように、ドーナツ形状である。このビームパターンは、吸収性の物質を始めとする不透明な微小物質までも操作可能な光ピンセット等への応用上重要である。また、全反射を利用したフォトニック結晶ファ

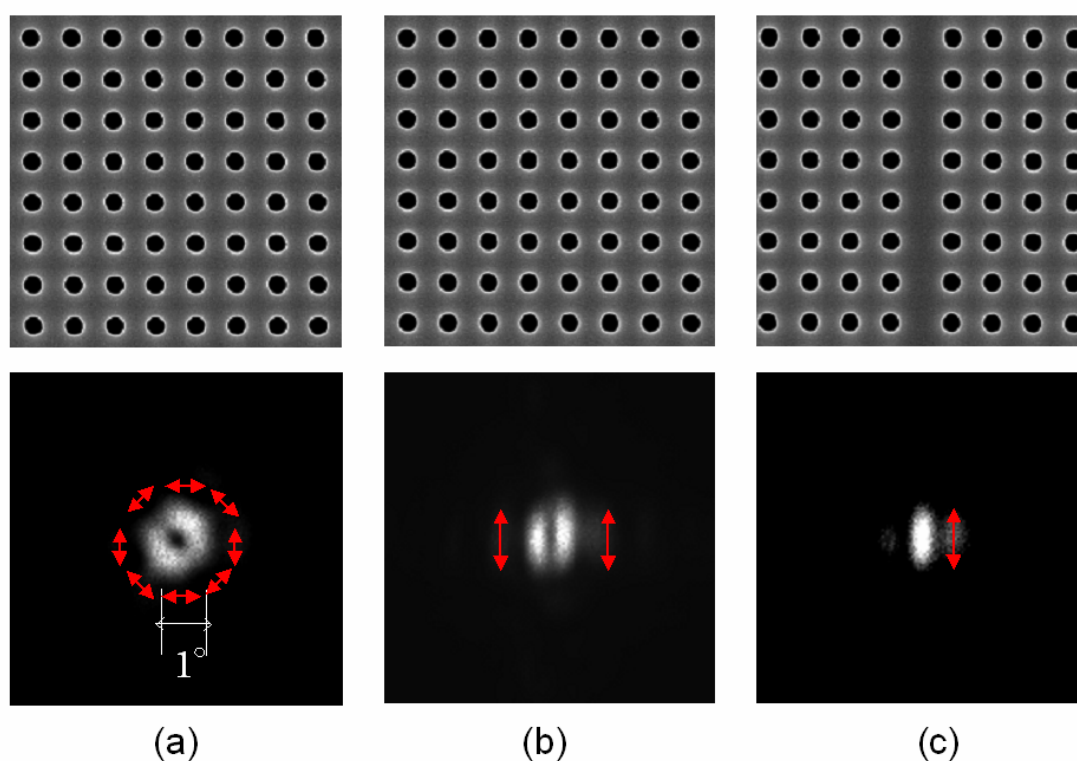


図 12 : 2次元フォトニック結晶の出射ビームパターン制御の実験結果。(a)真円格子点形状で位相シフトを導入していない2次元フォトニック結晶の平面SEM写真(上図)とその遠視野像の測定結果(下図)。ドーナツ形状の遠視野像が得られていることが分かる。(b)楕円格子点形状で位相シフトを導入していない2次元フォトニック結晶の平面SEM写真(上図)とその遠視野像の測定結果(下図)。双峰形状であるが、偏光方向がそろっていることが分かる。(c)楕円格子点形状で位相シフトを導入した2次元フォトニック結晶の平面SEM写真(上図)とその遠視野像の測定結果(下図)。単峰かつ単一偏向のビームが得られていることが分かる。

イバへの入射光源としても非常に有力である。一方で、偏光状態やビームパターンを制御し、例えば、単一偏光状態や、単一ローブのビームパターンなどを得ることは、本レーザの応用範囲をさらに広げる上で重要と言える。H17年度は、単峰性ビームの実現を目指して研究を行った。そのために、格子点形状の楕円化と位相シフトの導入を試み、両者の作用により、確かに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。同図 12 には、それぞれ、(b)楕円化および(c)楕円化+位相シフト効果を示しており、両者の相互作用により、単峰かつ単一偏光のビームが得られることを示している。さらに年度後半には、円形の格子点をもつフォトニック結晶に、複数の位相シフトを導入することにも踏み込み、現在、様々な興味深いビームパターンが得られる可能性を実証しつつあるところである。

(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出来ることにあり、高出力動作が期待出来るが、現在のところ得られている出力は、CW 状態では、10mW 程度であり、出力の増大が重要な課題である。H17年度は、出力増大の可能性の理論的検討を第 1 の目標として研究を行った。具体的には、共振器の上下方向への光閉じ込めの強さの制御について検討し、面内電界分布の対称性を一部崩すこと（例えば、三角格子点形状（図 13）を用いること）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すとともに、実験的な検討をもスタートさせ、面発光出力増大を示唆する結果を得つつある。

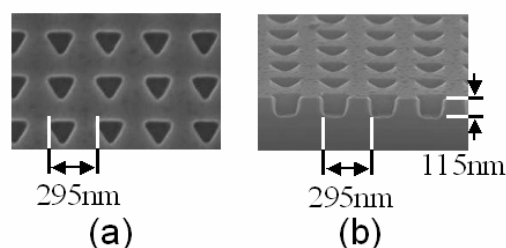


図 13 : 試作した三角格子点形状をもつ 2 次元フォトニック結晶の(a)平面、および(b)断面 SEM 写真。

(C-3) 2次元結合波理論の確立

上記の高出力化を始め、様々なデバイス特性を設計する上で、これまでは、主として平面波展開法やFDTD法などのシミュレーションを行ってきたが、レーザ物理を深く理解し、より使いやすい解析法を得るためには、2次元結合波モデルによる解析法を確立することが重要である。H17年度は、まず、正方格子 2次元フォトニック結晶における TM 波、TE 波のそれぞれに対する 2次元結合波モデルの基礎方程式を導くことを第 1 の目標として研究を進めた。その結果、TM 波に対しては、4つの等価な Γ -X 方向に伝搬する光波の結合により、また TE 波については、この 4波に加え、 Γ -M 方向に伝搬する高次の 4波を加えることで基礎方程式が導かれることを見出した。以下に、TM 波および TE 波に対する導出した基礎方程式を示す。特に、正方格子に対しては、TE 波においては、2次元結合を示すことが従来出来ないとされていたが、本研究で、初めて、高次の項を用いることで、2次元結合を記述することに成功した。

(TM モードに対する基礎方程式)

$$-\frac{\partial}{\partial x} R_x + (\alpha - i\delta)R_x = i\kappa_3 S_x + i\kappa_2(S_y + R_y)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} S_x + (\alpha - i\delta)S_x = i\kappa_3 R_x + i\kappa_2(S_y + R_y)$$

$$-\frac{\partial}{\partial y} R_y + (\alpha - i\delta)R_y = i\kappa_3 S_y + i\kappa_2(S_x + R_x)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} S_y + (\alpha - i\delta)S_y = i\kappa_3 R_y + i\kappa_2(S_x + R_x)$$

(TE モードに対する基礎方程式)

$$-\frac{(\beta - 2i\alpha)}{\beta_0} \frac{\partial}{\partial x} R_x + \{\alpha - i(\beta - \beta_0)\}R_x = i\kappa_3 S_x - i\kappa_1(F_2 + F_4),$$

$$\frac{(\beta - 2i\alpha)}{\beta_0} \frac{\partial}{\partial x} S_x + \{\alpha - i(\beta - \beta_0)\}S_x = i\kappa_3 R_x - i\kappa_1(F_1 + F_3),$$

$$-\frac{(\beta - 2i\alpha)}{\beta_0} \frac{\partial}{\partial y} R_y + \{\alpha - i(\beta - \beta_0)\}R_y = i\kappa_3 S_y - i\kappa_1(F_3 + F_4),$$

$$\frac{(\beta - 2i\alpha)}{\beta_0} \frac{\partial}{\partial y} S_y + \{\alpha - i(\beta - \beta_0)\}S_y = i\kappa_3 R_y - i\kappa_1(F_1 + F_2),$$

$$\frac{(\beta - 2i\alpha)}{\beta_0} \left(\frac{\partial}{\partial x} F_1 + \frac{\partial}{\partial y} F_1 \right) + \{2\alpha - i(\beta - 2\beta_0)/2\}F_1 = -i\kappa_1(S_y + S_x)$$

$$\frac{(\beta - 2i\alpha)}{\beta_0} \left(-\frac{\partial}{\partial x} F_2 + \frac{\partial}{\partial y} F_2 \right) + \{2\alpha - i(\beta - 2\beta_0)/2\}F_2 = -i\kappa_1(S_y + R_x)$$

$$\frac{(\beta - 2i\alpha)}{\beta_0} \left(\frac{\partial}{\partial x} F_3 - \frac{\partial}{\partial y} F_3 \right) + \{2\alpha - i(\beta - 2\beta_0)/2\}F_3 = -i\kappa_1(R_y + S_x)$$

$$\frac{(\beta - 2i\alpha)}{\beta_0} \left(-\frac{\partial}{\partial x} F_4 - \frac{\partial}{\partial y} F_4 \right) + \{2\alpha - i(\beta - 2\beta_0)/2\}F_4 = -i\kappa_1(R_y + R_x)$$

(式の説明) R_x, S_x, R_y, S_y は、等価な 4 つの Γ -X 方向に伝搬する光波を表し、 F_1 - F_4 は Γ -M 方向に伝搬する高次の 4 波を表す。また、 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ は、各波の結合を表す重要な係数であり、順に Γ -X 方向に伝搬する光波と Γ -M 方向に伝搬する高次の光波との結合、 Γ -X 方向に伝搬する光波同士の 90 度方向の結合、180 度方向の結合を与える。計算の結果、発振に必要な閾値利得 α と共振周波数 δ が得られることになる。(正確には： R_x, S_x, R_y, S_y は、それぞれ $+x, -x, +y, -y$ 方向へ伝搬する光波の振幅であり、 F_1, F_2, F_3, F_4 は $(-x, -y), (x, -y), (-x, y), (x, y)$ 方向へ伝搬する光波の振幅である。 α は構造に一樣に与えられる利得、 δ はブラッグ波数からのずれ ($\delta = \beta - \beta_0$)、 β はモードの波数、 β_0 はブラッグ波数、 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ は、順に Γ -X 方向に伝搬する光波と 45 度異なる Γ -M 方向に伝搬する高次の光波との結合、 Γ -X 方向に伝搬する光波同士の 90 度方向の結合、180 度方向の結合を与える光結合係数である (図 14 参照)。計算は固有値問題となり、光波の振幅は固有ベクトル、 α と δ は固有値として得られる。)

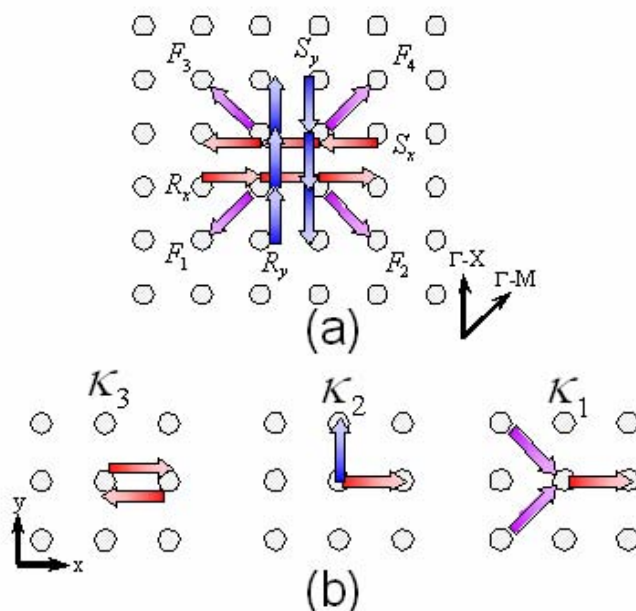


図 14 : (a) 正方格子構造において Γ -X 方向に伝搬する光波 R_x, S_x, R_y, S_y と Γ -M 方向に伝搬する高次の光波 F_1 - F_4 . (b) 光結合係数 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ と対応する光波の結合。

(C-4) 青色レーザ等への展開

材料系としては、現在の InGaAs/GaAs の他、短波長材料の InGaN/GaN 系へ展開を図っている。H17 年度は、短波長化の第一歩として、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を目標に研究を進め、図 15 に示すように、サブミクロン周期の 2 次元フォトニック結晶構造の作製に成功した。同図 (a) は、GaN 層に形成したもので、同図 (b) は、GaN 上の SiO_2 層に形成したもので、どちらも良好な結晶が形成出来ていることが分かる。現在、これらの結晶を用いて、フォトニック結晶レーザへの展開を進めているところである。

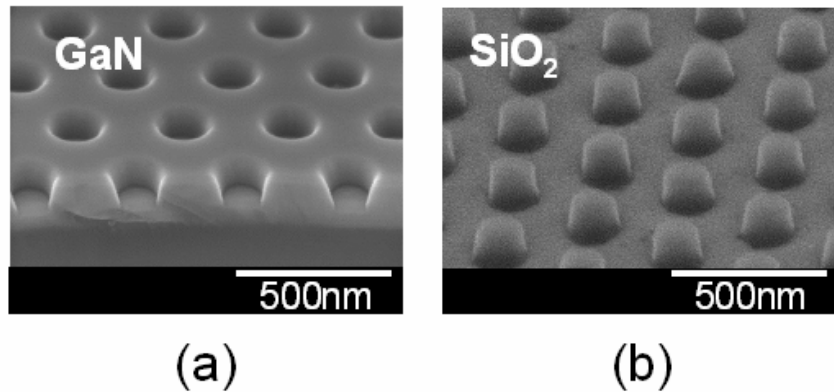


図 15 : GaN 系半導体に形成した 2 次元フォトニック結晶の SEM 写真。(a)GaN 層にフォトニック結晶を形成したもの。(b)GaN 上の SiO₂層にフォトニック結晶を形成したもの。どちらも良好な結晶が形成出来ていることが分かる。

3. 研究実施体制

総合研究推進グループ（京大＋ローム＋住友電工＋三菱電機）

- ① 研究分担グループ長：野田 進（京都大学大学院工学研究科、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参与している。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参与し、住友電工は、2次元フォトニック結晶レーザの GaN/InGaN 系への展開に参与している。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参与した。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. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- M. Imada, S. Ogawa, S. Yoshimoto, and S. Noda, “Introduction of an InP-based light emitter into a GaAs-based 3D photonic crystal by improved wafer bonding of dissimilar materials,” *Sensors and Materials*, vol.17, no.6, pp.343-353 (2005).
- S. Kawashima, L. H. Lee, M. Okano, M. Imada, and S. Noda, “Design of donor-type line-defect waveguides in three-dimensional photonic crystals,” *Optics Express*, vol.13, no.24, pp.9774-9781 (2005).
- S. Noda, “Photonic-crystal lasers - Photonic crystals promise unprecedented lasers and efficient LEDs,” *Laser Focus World*, vol.41, no.12, pp.82

(2005) (Invited).

- K. Kounoike, M. Yamaguchi, M. Fujita, T. Asano, J. Nakanishi and S. Noda, “Investigation of spontaneous emission from quantum dots embedded in a two-dimensional photonic-crystal slab,” *Electronics Letters*, vol.41, no.25, pp.1402-1403 (2005).
- Y. Tanaka, T. Asano, R. Hatsuta, and S. Noda, “Investigation of point-defect cavity formed in two-dimensional photonic crystal slab with one-sided dielectric cladding,” *Applied Physics Letters*, vol.88, no.1, pp.011112-1-011112-3 (2006).
- T. Uesugi, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda, “Investigation of optical nonlinearities in an ultra-high-Q Si nanocavity in a two-dimensional photonic crystal slab,” *Optics Express*, vol.14, no.1, pp.377-386 (2006).
- T. Asano, B.-S. Song, and S. Noda, “Analysis of the experimental Q factors (~ 1 million) of photonic crystal nanocavities,” *Optics Express*, vol.14, no.5, pp.1996-2002 (2006).
- M. Fujita, S. Takahashi, T. Asano, Y. Tanaka, K. Kounoike, M. Yamaguchi, J. Nakanishi, W. Stumpf, and S. Noda, “Controlled spontaneous emission phenomena in semiconductor slabs with a two-dimensional photonic bandgap,” *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol.8, no.4, pp.S131-S138 (2006) (Invited) (SPECIAL ISSUE ON FUNDAMENTAL ASPECTS OF NANOPHOTONICS, IOP Select).
- 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* (10 April 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* (2006) (in press).
- T. Asano, B.-S. Song, Y. Akahane and S. Noda, “Ultrahigh-Q Nanocavities in Two-Dimensional Photonic Crystal Slab,” *IEEE Journal of Quantum Electronics* (2006) (Invited, submitted).
- K. Sakai, E. Miyai, and S. Noda, “Coupled-wave model for square-lattice 2D photonic crystal distributed-feedback laser with TE-like mode,” *Applied Physics Letters* (2006) (submitted).
- 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* (2006) (submitted).

(2) 特許出願

平成 17 年度特許出願件数：9 件 (CREST 研究期間累積件数：9 件)