

「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(H17-19 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、 $Q = 3,000 \sim 5,000$ 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、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実験的に突き止めた。また、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体系的に明らかにすることにも

成功した。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 値の大幅な増大を実現した。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、この結果を踏まえ、高精度多層3次元結晶実現を目指し、自動位置あわせ法を検討し、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とともに、-20dBのフォトニックバンドギャップ効果を達成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や、発光層導入の効果などを理論的に明らかにする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)また、ユニットセル構造の制御により、上下方向への光閉じ込め効果が制御され、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レーザとして世界最大の46 mW (CW) を達成することに成功した。さらに、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。一方、(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を目指し、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、上下方向への光の回折効果をも考慮した解析法を完成させた。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、AROGと名付けた新たなフォトニック結晶形成法を確立し、世界で初めて、青紫色領域での電流注入発振に成功した。

本年度(H20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、(1) 高 Q 値ナノ共振器と、量子ドットとの融合に関する深い検討を行い、両者の相互作用の本質を明らかにすることを目指した。その結果、パーセル効果、ラビ分裂に次ぐ、第3の発光メカニズムを見出すことに世界で初めて成功した。これは、量子アンチゼノ効果により、量子ドットとナノ共振器に大きな離調があっても、量子ドットからナノ共振器モードへ効率良く、エネルギー移動が可能であることを示すもので、これまで、謎とされてきた量子ドット・ナノ共振器系の発光現象を様々な説明できるものとして極めて重要と言える。さらに、(2)

相互作用の基礎与えるナノ共振器の Q 値のさらなる増大をも目指し、揺らぎの影響や、共振器表面の詳細な検討を行い、本年度、さらに 300 万を越える Q 値の実現、すなわち、世界記録の更新に成功した。(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) 発光制御に留まらず、3次元フォトニック結晶分野の新たな展開の基礎を築くため、3次元フォトニック結晶における表面モードの存在を実験的に初めて明らかにするとともに、3次元結晶ならではの立体光導波の実現にも成功した。特に、前者の表面モードの研究は、3次元結晶の新たな応用の道につながることを示す重要な成果とすることが出来る。また、(2) 本CRESTにて提案になる左右45°斜めエッチングに基づく3次元結晶作製においては、結晶の特性向上を図るために、プラズマ解析を行なった。自己無撞着シース解析法を開発し、イオン軌道とエッチング角度分布の導出に成功した。さらに、この新しい3次元結晶への発光体導入を試みた。発光層としては、極薄量子井戸層を用いた。様々な試行錯誤ののち、3次元結晶表面に、わずか、30 nm という極薄の発光層の導入に成功し、フォトニック結晶を持たない試料に比べ、40倍以上の発光強度の増大の観察に成功した。これは、3次元結晶による効果により、光の3次元結晶への進入をほぼ完全に遮断することが可能になったことを強く示唆している。(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発においては、まず、(1) 本レーザの特徴である様々なビーム発生に関して、特に径偏光ドーナツビームの集光特性について深い検討を行った。その結果、ドーナツビームの内径と外径を調整し、両者の大きさを近づけるにつれ、焦点位置でのビームの大きさが大幅に縮小し、かつ焦点距離が伸びることを見出した。これは、ニアフィールド光学を始め、様々な応用に向けて極めて重要な成果と言える。また、(2) 本レーザのもう一つの大きな特長である、高出力化を図るため、格子点形状の一層の最適化を目指すと共に、デバイス内部の光帰還作用を利用するという新しい方法を考案し、0.85W/A という極めて高いスロープ効率を実現することに成功した。さらに、(3) 昨年度、世界で初めて、青紫色領域での電流注入発振に成功した GaN 系フォトニック結晶レーザに関し、本年度は、より詳細な評価を行なうとともに、デバイス特性の大幅向上（しきい値の低減）を目指した。その結果、これまで、65 kA/cm²であったしきい値電流密度を、5.4 kA/cm²と大幅に低減することに成功した。

以上のような成果は、Nature Photonics 誌を始めとする各種国内外のメディアに取り上げられるとともに、CLEO、IEEE LEOS、ICEM、GaN International Workshop を始めとする多く（全部で、10 件以上）の国際会議で、基調講演や招待講演を行なうという栄誉を得た。また、フォトニック結晶レーザに関する成果は、シーテック（エレクトロニクスショー）での展示をも行い、好評を博した（日経 BP などでも報道された）。さらに、本研究の推進は、若手研究者の育成にもつながり、2件の応用物理学会奨励賞や、その他を受賞した。また、2009年4月には、研究代表者が、文部科学大臣表彰を受賞するという栄誉を得た。

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(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、H20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。本研究目の中で挙げていた、

- (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¹³⁾、
- (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

の2つの課題については、前年度までの研究で、ほぼ完了させることが出来、H20年度は、次に挙げる、(A-3)の課題に主として取り組み、以下のような成果を得た。

(A-3) 高 Q 値点欠陥共振器の実現と量子ナノ構造との融合による弱結合～強結合状態での発光過程の解明・制御：

本項目は、これまでの(A-1)、(A-2)に関する成果を踏まえつつ、ナノ共振器の Q 値を高めることにより、量子ナノ構造とナノ共振器の相互作用を明らかにし、さらに高度な発光制御(量子状態の形成を含めて)を目指すものである。ここで、重要なことは、(1) 高 Q 値ナノ共振器と量子ナノ構造の融合による光子-電子系の結合状態の体系的な理解、さらに、(2) これらの研究のベースとなる、ナノ共振器について、如何に高い Q 値を実現していくかということである。以下、(1)、(2)について、本年度、得られた成果について述べる。

(1) 高 Q 値ナノ共振器と量子ナノ構造の融合による光子-電子系の結合状態の体系的な理解

これまで、ナノ共振器と、量子ナノ構造との融合系においては、ナノ共振器の共振波長と量子ナノ構造の遷移波長がほぼ一致しているとき、弱結合状態においては、“パーセル効果”が生じ、強結合状態においては、“ラビ分裂”が起こるということが知られていたが、本年度、両者の波長が大きく離調している時において、第3の発光メカニズムが存在することを見出した^{6,9)}。これは固体系に特有の、発光体(量子ドット)とその周辺物質との相互作用(弾性的なクーロン散乱やフォノン散乱)に基づく純位相緩和あるいは意図しない観測が生じることにより、量子ドットからナノ共振器モードへのエネルギー移動が効率的に生じるというメカニズムである。これは、最近、各所で論争を呼んでいる量子ドット・ナ

ノ共振器系の発光現象、すなわち、「量子ドットとナノ共振器に大きな離調があるにもかかわらず、直感に反してナノ共振器から強い発光が起こる」という不可思議な現象の理由を初めて解き明かしたものであり、極めて重要な成果と言える。また、このメカニズムが発現するためには上述の純位相緩和に加えて、1)量子ドットとナノ共振器との電磁氣的結合が非常に強く、かつ、2)量子ドットの自然放出が抑制されており、さらに3)ナノ共振器の Q 値が高いことが必要であり、そのため、これはフォトニック結晶ナノ共振器だからこそ生じる効果と言える。一般に、このように観測によって状態の遷移が加速される現象はアンチゼノ効果と呼ばれるが、今回の発見は「ナノ共振器により強調されたアンチゼノ効果 (Nanocavity-Enhanced Quantum-Anti-Zeno Effect)」とも、名付けることの出来る発光メカニズムである。以下、本メカニズムについて、より詳細に説明する。

図1に理論検討に用いたモデルを模式的に示す。光ナノ共振器と2準位電子系が相互作用しており、散逸過程として2準位電子系が直接自由空間モードに緩和する過程と、光ナノ共振器の光子が自由空間モードに緩和する過程との2つを考慮している。このモデルにおいて、初期状態を2準位電子系のみが励起されている状態とし、マスター方程式を用いて系全体の時間発展と発光スペクトルを計算した。電子系(QD)と光ナノ共振器(Cavity)のエネルギー差を様々に変えつつ計算した発光スペクトルを図2(a)に示す。同図からわかるように、電子系と光ナノ共振器のエネルギーが一致している場合には、光ナノ共振器の波長において発光ピークが観測されるが、両者がずれている場合には光ナノ共振器からの発光は生じないという結果が得られた。

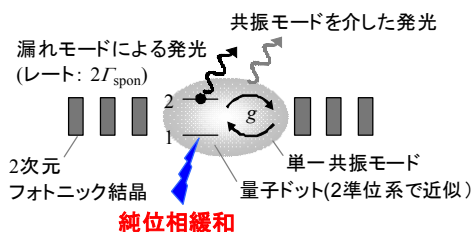


図1：2次元フォトニック結晶ナノ共振器と量子ドットの融合系の解析モデル

しかし、ここで固体系に特有の現象である、電子系の双極子の位相が周辺の物質（別の電子やフォノン等）による弾性散乱のために乱されるという過程（純位相緩和過程）を計算に取り入れたところ、エネルギーにずれがある場合にもナノ共振器からの発光が生じるという計算結果が得られることが分かった(図2(b))。さらにここでパラメータ γ_{phase} は純位相緩和過程が生じるレートであり、このレートを増やすほどナノ共振器からの発光が強くなることが分かる(図2(c))。この結果から純位相緩和が、エネルギー的に一致していない共振器からの発光を支配する過程であることが明らかとなった。これは前述のアンチゼノ効果という範疇の物理現象であり、その原理は、本系の場合、純位相緩和によって電子系のエネルギーが僅かにぼけて広がり、その僅かな裾が共振器のエネルギーと一致することにより電子系とエネルギー的にずれた共振器からの発光が可能になる過程と定性的には説明できる。しかし、実際に計算結果を見てみると、図2(b),(c)からわかるように電子系のエネルギー広がりが共振器と電子系のエネルギー差に比べて小さく、直感的にはその裾が共振器のエネルギーにかかっているようには見えない場合においても共振器からの発光が生じている。さらに詳しい検討の結果、これは光ナノ共振器と量子ドットの融合系ならではの現象であることが分かった。具体的には、(a)共振器体積が小さいことに起因して電子-光子相互作用が非常に強くなっていること、(b)フォトニック結晶のバンドギャップ効果に

よって電子系が共振器モード以外の光モードと結合する発光緩和過程が非常に抑制されており、また低温の量子ドットでは非発光緩和パスも抑制されていること、(c)電子系がナノ共振器を強制振動させて自由空間モードへ緩和するパスも、共振器の Q 値が高いために強く抑制されていること、という3つの効果に基づくものである。まず(a)によって電子系の励起エネルギーが共振器に移るレートが増強され、また(b)、(c)によって電子系の励起エネルギーが他の緩和過程を通じて失われるレートが極端に抑制される。このため電子系のエネルギーが共振器のエネルギーからずれている場合でも、エネルギー広がり裾を介して共振器にエネルギーが移ってから、そのエネルギーが自由空間に放出されるという過程が主要なエネルギー緩和過程となり、その結果共振器のエネルギーにおける強い発光が観測されることになる。ここで、エネルギー広がりを与える過程が純位相緩和ではなく、エネルギー緩和に付随するものであった場合、緩和レートの増大に伴って(a)と同時に(b)の過程も速くなるために、今回のような効果は生じ得ない。よって、エネルギー緩和を伴わない純位相緩和過程が生じていることが重要である。この結果は、今後の量子ドット-ナノ共振器結合系の研究に指針を与えるものであり、超高効率発光やナノ共振器レーザ等の実現においてきわめて有力な技術となる。また、量子ゲート等の応用を検討していく上では、このアンチゼノ効果による緩和過程を考慮することで、今後より精密な制御が可能になっていくものと考えられる。

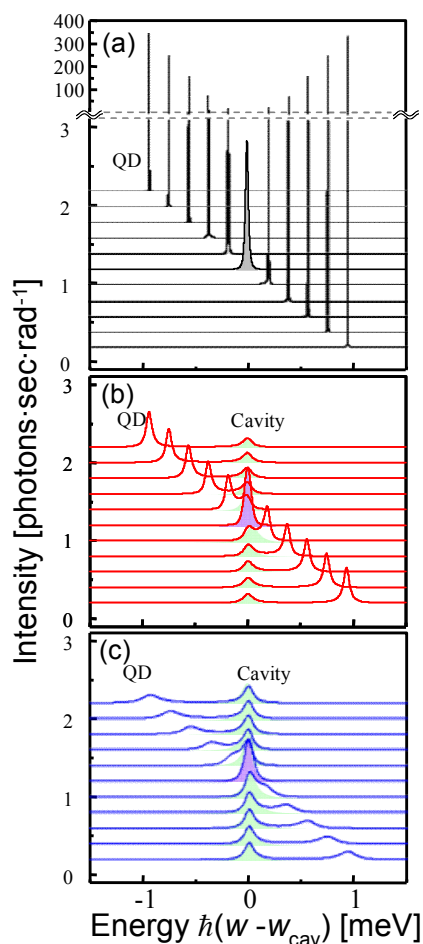


図 2:2 次元フォトニック結晶ナノ共振器と量子ドットの融合系の発光スペクトル。(a)純位相緩和なし、(b) $\hbar\gamma_{\text{phase}} = 33 \mu\text{eV}$ 、(c) $\hbar\gamma_{\text{phase}} = 94 \mu\text{eV}$

(2) 高 Q 値ナノ共振器の進展

本研究では、前年度までの研究に引き続き、以上の基礎となるナノ共振器の Q 値増大など、その機能を向上させるための検討^{1, 5, 7, 9, 11, 12})も合わせて行った。具体的には(i)ナノ共振器の Q 値の増大、(ii)ナノ共振器の Q 値制御に取り組んだ。

まず、(i)のナノ共振器の Q 値増大^{5, 7, 12})に関しては、ナノメートルオーダーの孔径の揺らぎ、格子間隔の揺らぎが共振器特性に与える影響について、詳細な検討を行った。 Q 値や、共振波長、電磁界分布、さらには、偏光特性などが受ける影響について、FDTD 法にて理論計算を行い、1 nm 程度の揺らぎが、これらの特性に大きな影響をもつことを示した。ま

た、揺らぎのパターンにも大きな影響を受けることを見出した。以上の詳細な検討とともに、本 CREST にて購入した電子ビーム露光技術をさらに、深化させることにより、前年度を上回る Q 値 300 万以上を実現し、世界最高記録を更新することに成功した。以下、そのポイントを説明する。

図 3 に構造揺らぎがナノ共振器の特性に与える影響を調べるために用いたモデルを示す。共

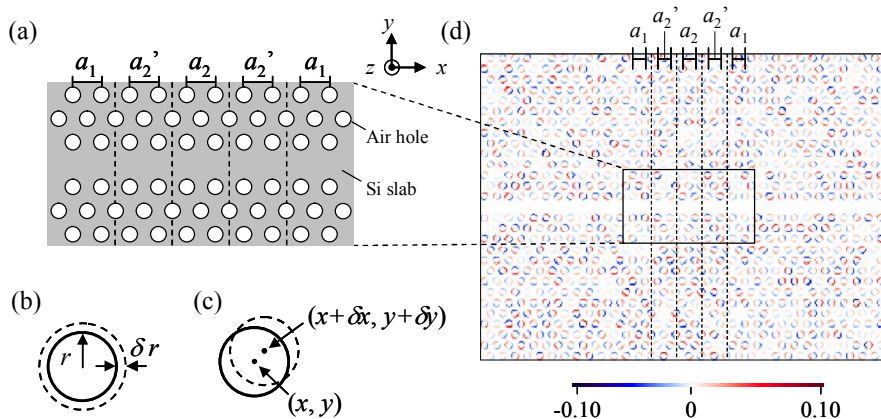


図 3 : 構造揺らぎがナノ共振器の特性に与える影響を解析するためのモデル。

(a)基本共振器構造、(b)孔半径揺らぎの模式図、(c)孔位置揺らぎの模式図、(d)誘電率分布の変化の一例。(位置揺らぎの標準偏差が 1 nm の場合。) 誘電率は空気を 0、スラブ材料を 1 として正規化してある。

共振器構造は三角格子状に円孔を配置した Si スラブからなる 2 次元フォトニック結晶に導入した線状の欠陥を基本としており、線状欠陥に沿って格子定数を変えることで、中心の格子定数の大きな領域に光を閉じ込めることができる。計算対象とした構造では格子定数が 410 nm、415 nm、420 nm と 3 段階に変化しており、空気穴の半径は 115 nm、スラブの厚さは 250 nm である。この構造を基本として、乱数ルーチンを用いて空気孔の位置および半径がランダムに揺らいだナノ共振器構造を設定し、マクスウェル方程式を差分法を用いて数値的に解いて行くことで、構造揺らぎによって共振器の特性がどのように影響を受けるかを計算した。特性としては Q 値、共振波長、電磁界分布、および偏光特性を評価したが、ここでは最も興味深い Q 値と共振波長についての結果を述べる。

まず揺らぎがないとき、この共振器の Q 値は約 1500 万、共振波長は 1589.28 nm と計算された。次に、26 種類の異なる構造揺らぎパターンを用意し、揺らぎの大きさを様々に変化させて Q 値と共振波長を計算し、その依存性を調べた。揺らぎの大きさは孔半径および位置のばらつきの標準偏差で表すことができ、一般に両者は独立であるが、本計算では孔半径および位置の揺らぎが同じ加工プロセスで決まることから、両者の標準偏差は同じ大きさをもつと仮定して計算を行った。図 4(a) に構造揺らぎの標準偏差に対する共振器 Q 値の計算結果を示す。揺らぎのパターンが異なると得られる Q 値は異なるが、どのパターンに対しても揺らぎが増加すると損失が構造揺らぎの大きさの 2 乗に比例して増大することが分かった。また、揺らぎの大きさを固定した場合、様々な揺らぎパターンに対して得られる Q 値はばらつきをもつものの、その分布は正規分布的なものとなることが分かった。例えば、構造揺らぎの標準偏差が 1 nm のとき、 Q 値のばらつきの平均値は 121 万となり、ばらつきの標準偏差内で取り得る Q 値は 84~212 万となる。構造揺らぎがないときの共振

器 Q 値は 1500 万であるので、この結果から 1 nm 程度の構造揺らぎであっても共振器特性に大きな影響を与えることが分かった。また、共振波長についての計算結果を図 4(b)に示す。同じ揺らぎパターンの場合、構造揺らぎの大きさに比例して共振波長がシフトすることが分かる。また、揺らぎの大きさを固定した場合、揺らぎパターンによって共振波長はばらつく。例えば構造揺らぎの標準偏差が 1 nm のとき、共振波長のばらつきの標準偏差は 0.73 nm 程度となる。共振スペクトルの線幅が 0.001 nm 程度であることを考慮すると、共振波長に関しても 1nm 程度の構造揺らぎが与える影響は無視できない大きさであると言える。

この結果を基に、電子ビーム露光装置による共振器パターンの描画方法を向上させて構造揺らぎをさらに低減させるべく様々な検討を行った結果、前年度を上回る実験 Q 値を得ることに成功した。作製された共振器の光損失を評価するために、共振器に光パルスを入力して光子寿命を測定した結果を図 5 に示す。同図より、光子寿命 2.56 ns が得られていることが分かる。これは Q 値に換算すると 310 万という非常に高い値であり、昨年度の結果を塗り替えて世界最高記録を更

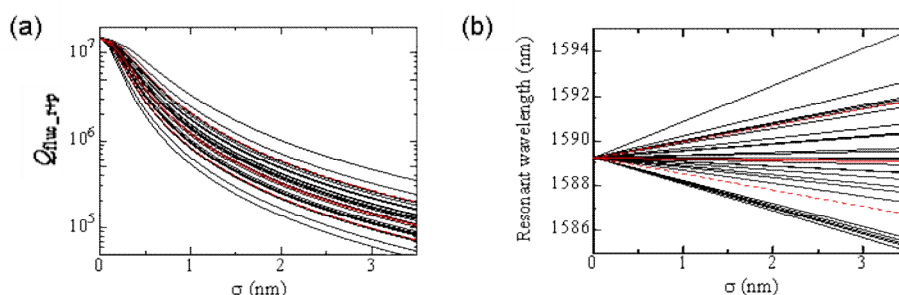


図 4：穴半径および位置の揺らぎの標準偏差に対する(a) Q 値および(b)共振波長。26 種類の揺らぎパターンに対して計算は行われており、各線は揺らぎパターンを固定して揺らぎの大きさを変化させていることに対応する。揺らぎパターンの違いに対する Q 値および共振波長の分布を見たときの平均が赤直線で、標準偏差分の範囲が赤波線で示されている。

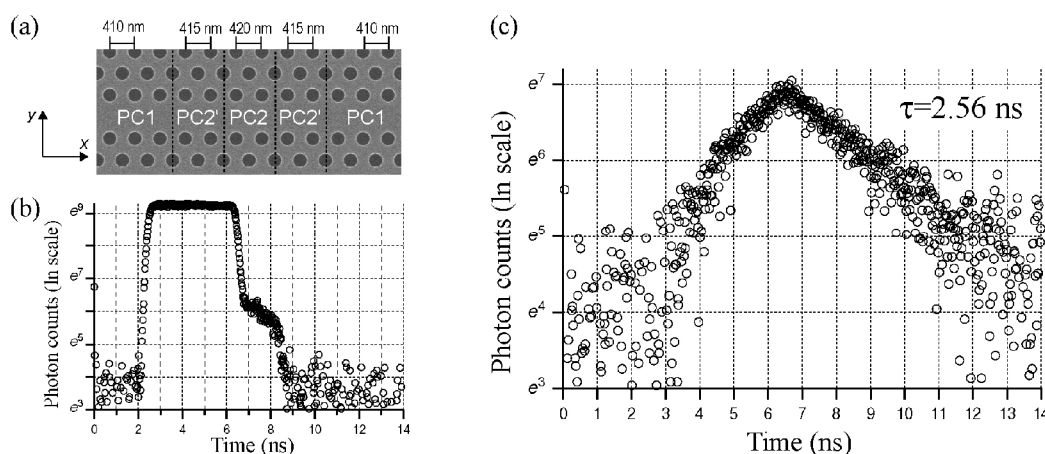


図 5：最大の Q 値が得られたナノ共振器に対する光子寿命測定の結果。(a)共振器の走査型電子顕微鏡写真。(b)共振器に導入した光パルスの形状、(c)共振器からの放射光の時間変化。光子寿命 2.56 ns が観測されており、これは Q 値にして 300 万に対応する。

新することができた。

一方、(ii)の Q 値制御は、ナノ共振器（量子ナノ構造を内蔵）における光子—電子系の結

合状態を、弱結合から強結合状態へ動的に変化させることや、チップ上に集積された共振器間の光子のやり取り等の実現に向けて、極めて重要である。昨年度、その基本概念の提唱と、その実証 (Q 値のピコ秒の時間スケールでの増大) に成功したが、本年度は、より詳細な検討を行うと共に、 Q 値の動的増大と動的減少の 2 つをピコ秒の時間スケールで同時に実現することに成功した¹¹⁾。以下、そのポイントを説明する。

まず、我々が提唱する Q 値制御の概念図を図 6 に示す。本システムは、共振器と導波路、ヘテロ界面を利用した完全反射鏡からなる。このシステムでは、共振器の Q 値は、共振器と導波路との結合により決まる面内 Q 値(Q_{in})と、共振器と自由空間との結合により決まる面垂直方向の Q 値(Q_v)に分けることができる。この系における Q_{in} は、共振器から導波路右方向へ漏れる光と左方向へ漏れ、ヘテロ界面を経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_{in} を動的に変化させることが可能である。屈折率変化は、スラブ上方の自由空間から共振器-ヘテロ界面間の導

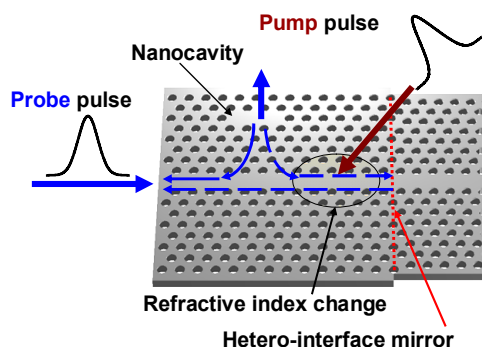


図 6 : 共振器 Q 値の動的制御のための系

波路に光パルス(制御光)を照射し、自由キャリアを生成する方法を利用する。共振器全体の Q 値(Q_{total})は、前述の 2 波の位相差を θ 、ヘテロ界面がない場合の面内 Q 値を Q_{in0} として

$$1/Q_{total} = (1 + \cos \theta)/Q_{in0} + 1/Q_v$$

と表せる。この式より、 θ を 0 から π に変化することで Q_{total} を最小値の $Q_{in0}/2$ から最大値の Q_v まで変化させることが可能である。また逆に θ を π から 2π まで変化させることで Q 値を最大値の Q_v から最小値の $Q_{in0}/2$ まで変化させることが可能である。

本年度は、まず Q 値の動的変化(増加)に関して、昨年度の結果を、詳細に分析することから始めた。前述のように共振器の Q 値の動的制御には自由空間からの光パルス照射による自由キャリア生成を利用しているが、このパルス光の一部が共振器に直接照射されると、共振器内にトラップされた光が自由キャリアにより吸収され、 Q 値の最大値が低く抑えられることが判明した。また、実際、昨年度の実験では、この自由キャリア吸収が起っていたことが判明した。そこで、動的制御に利用する制御光の照射位置を、より精密に制御し、その結果、図 7 に示すように Q 値を 3800 から 22000 まで増加させることに成功した。これは昨年度と比較してほぼ 2 倍の Q 値の動的制御に成功したことを意味する。

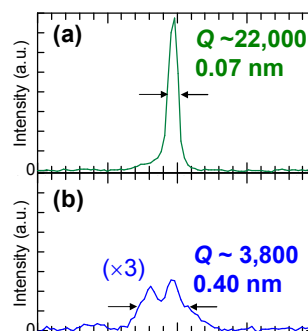


図 7 : 共振器 Q 値の動的制御の実験結果 (a):動的制御を行った場合 (b):動的制御を行わない場合。

本年度は、さらに、 Q 値を動的に増加させた後に、新たにもう 1 つのパルスを照射することで、 Q 値を動的に低減させることを試みた。このため、 Q 値増大のための制御光パルス 1 の照射の後、 Q 値低減用の制御パルス 2 を照射するタイミング、すなわち両者の時間差 T を様々に変化させ、共振器から自由空間へ放射される全光強度を測定した。

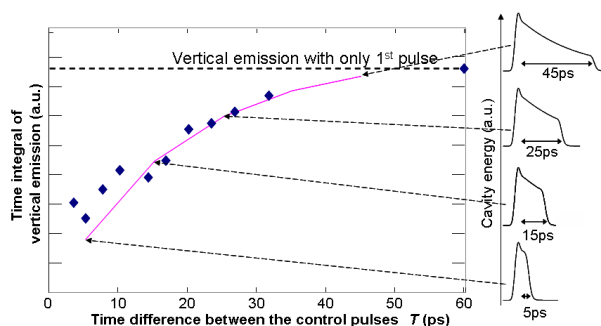


図 8: 2 つのパルスの照射時間間隔を変えた場合の共振器からの放射エネルギーの時間積算結果。赤線は FDTD 計算結果を表し、青点は実験結果を示す。

図 8 の青点にその結果を示す。両制御パルス時間差 T が小さいほど、自由空間へ放射される光の強度が減少することが分かる。これは、制御パルス 2 により、面内 Q 値 (Q_{in}) が低減したことにより、共振器から上下方向への放射過程が停止し、導波路へ急激に光パルスが放射されたことを意味する。図 8 の右側には、FDTD 法により計算した各制御光タイミングにおける共振器内部エネルギーの時間変化を示している。また、図の赤線は、上下方向への全出射光強度を FDTD 法で計算した結果を示す。これらの結果から、実験と理論は非常によく一致しており、共振器 Q 値をピコ秒という超高速で、動的な増加・減少と、それによるナノ共振器への光の捕獲および解放が確かに達成されたと言える。

(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、究極的な光の発生および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/制御技術の開発を進めている。H20 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究極的な光の発生 / 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。これまで、幸いにも、世界最大の自然放出抑制効果 (-30dB) の実現に成功するとともに、結晶揺らぎが、発光制御に与える影響について、系統的に検討し、有限性と揺らぎの関係を明らかにすることに成功している。また、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開発をも進めてきた。H20 年度は、発光制御に留まらず、3 次元フォトニック結晶分野の新たな展開の基礎を築くことを目指し、3 次元フォトニック結晶における表面モードの存在を実験的に初めて明らかにすることに成功した。この表面モードの研究は、これまで 3 次元フォトニック結晶においては、その内部における光制御が主であったことを考慮すると、3 次元結晶の新たな応用の道につながることを示す重要な成果と言うことが出来る。また、金属表面にお

るプラズモン効果との類似性の存在など、関連分野の研究にも大きな影響を与える可能性がある。以下、表面モードの存在を初めて明らかにした成果について、説明する。

まず、ストライプ積層型 3 次元結晶の表面(図 9(a))の電磁界解析を行うことにより、同図(b)に示すように、表面に局在し、伝搬可能なモードが形成されることが明らかになった。続いて、実験的に、表面モードの存在を明らかにするため、全反射減衰法を用いて、その分散特性を測定した。その結果を、図 10 に示す。同図赤線には、解析結果が示されているが、実験と計算は、よく一致することが分かる。

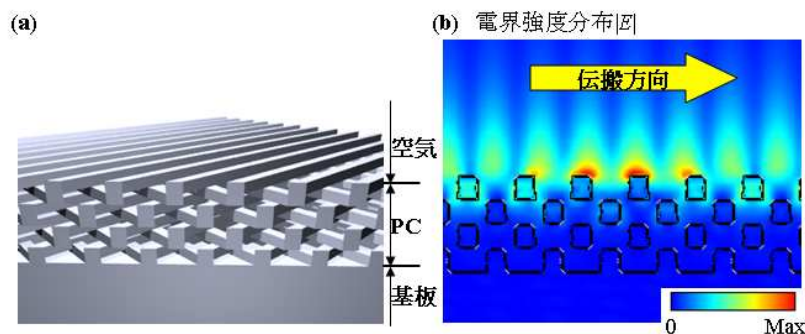


図 9: (a) 3 次元フォトニック結晶表面。(b) 表面伝搬光の解析結果。

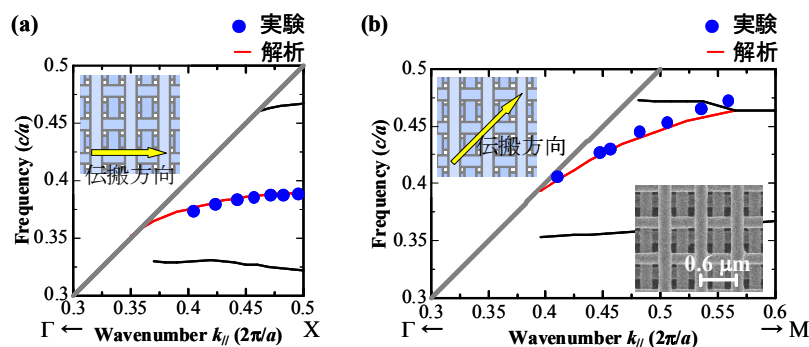


図 10: 3 次元フォトニック結晶表面におけるバンド構造の実測結果。(a), (b)は、代表的な 2 方向 (Γ-X 方向およびΓ-M 方向) に対する測定結果を示している。挿入図は試料表面の電子顕微鏡写真。

次に、図 11(a), (b)のように、プリズム結合法を用いて、エバネッセント光を、3 次元フォトニック結晶表面に入射することにより、結晶表面での光伝搬の観察を試みた。その結果、図 11(c)に示すように、波長 1.35~1.45 μm の光に対して、照射部から右側へと光が伝播する様子が観察された。この結果は、特定の波長の光のみが表面モードに結合可能であること、さらに結晶表面内を 100 μm 以上を直線状に伝搬可能であることを、直接的に示す結果である。以上により、初めて、3 次元フォトニック結晶の表面モードの存在と、表面モードによる光の伝播現象の観測に成功したと言える。

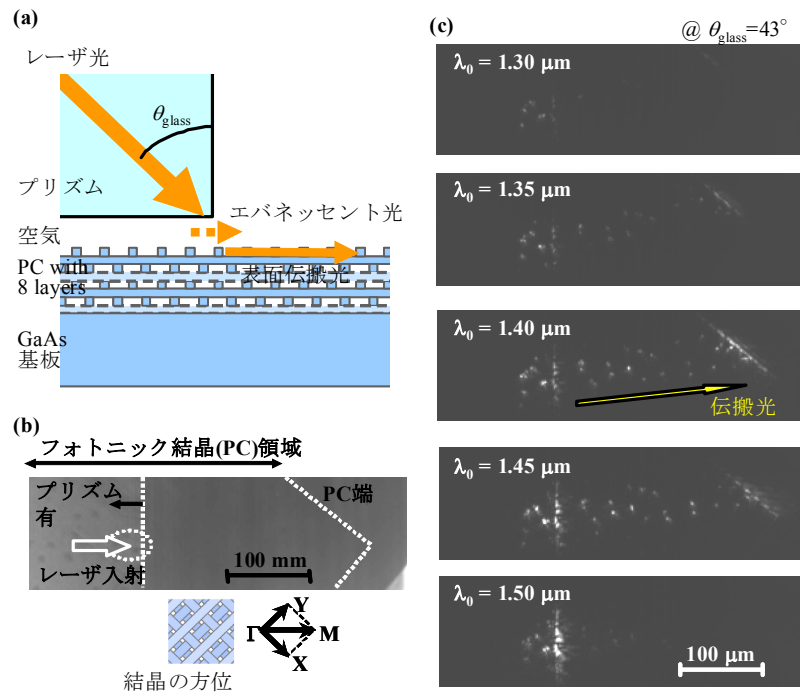


図 11: (a) プリズム結合を利用した 3 次元フォトニック結晶表面へのレーザー光の結合法。(b) フォトニック結晶の顕微鏡写真（上方から観察）と結晶方向。(c) レーザ光の照射時の様子。表面モードが形成される波長近傍(1.35~1.45 μm)においてのみ、光が面内方向に伝搬し、フォトニック結晶の端部で強く散乱されている。

(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。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。その結果、幸いにも、エッチング法による 3 次元フォトニック結晶の中で、世界最大のフォトニックバンドギャップ効果 (1.5 μm 帯域で、20 dB 以上の減衰率と、>97%の反射率) を実現した。H20 年度は、結晶の特性向上を図るために、斜めエッチングプロセスのプラズマ解析を行なった。自己無撞着シース解析法と名づける計算手法を開発し、イオン軌道とエッチング角度分布の導出に成功した。これにより、より深く、垂直性の良い斜め 45° エッチングを行なうための知見を得ることが出来るようになった。以下、その成果について説明する。

プラズマエッチングにおけるイオンシース長の値は数十 μm ~数十 mm であり、基本的にシースは半導体ウエハ表面に沿って形成されるため斜めエッチングは不可能である。そこで本研究では、電界制御板をウエハ上方に設置し、ウエハ表面に形成されるイオンシースおよびシース電界を直接制御するという独自の技術を用いている。この技術を解析する

ために求めるべき情報は、シース端位置、シース内の電荷分布（イオン軌道）、シース内の電位分布、の3つであるが、これらの間には相互依存関係が存在するため、量子力学の第一原理計算等で使用される自己無撞着法を適用することによって解を導出することが可能となる。解析結果を図 12 に示す。図 12 (a)の電荷分布に示すとおり、電界制御板の周囲を

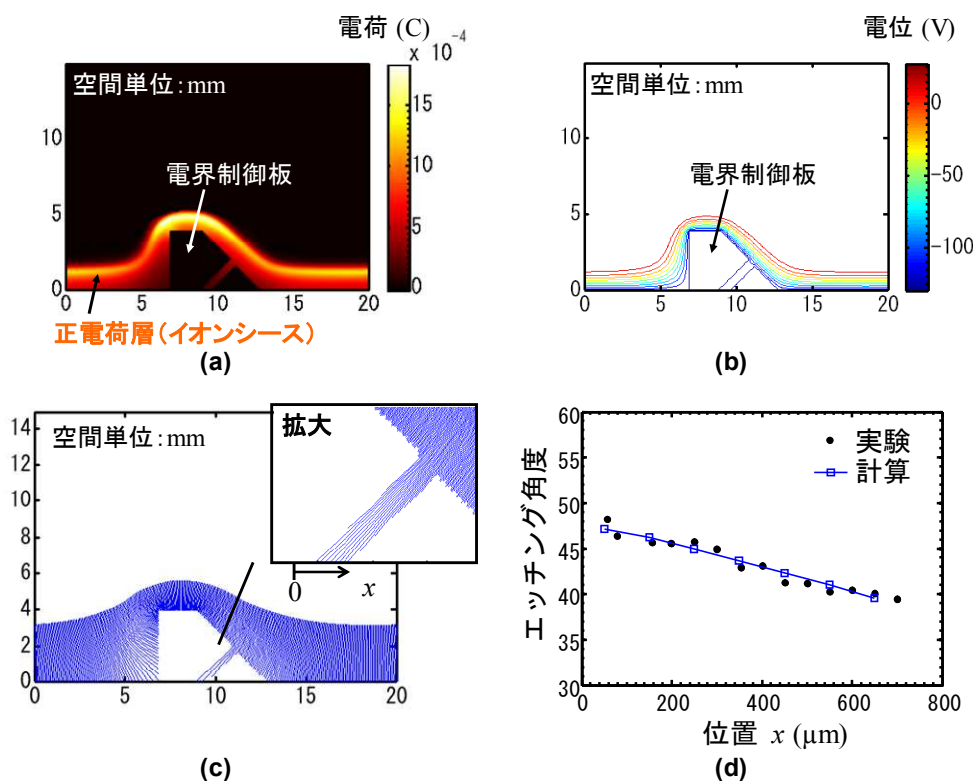


図 12 : 斜めエッチング技術の解析結果。(a)電荷分布。(b)電位分布。(c)イオン軌道。(d)エッチング角度。

取り囲むようにして正電荷層、すなわちイオンシースが形成され、同図(b)に示すようにシース中では急激に電位が変動して加速電界が発生する。同図(c)はこのシース電界によって加速されたイオンの軌道をプロットしたものであり、おおよそ 45 度の角度で制御板中に入射していく様子がわかる。同図(d)は、同図(c)で定義した位置 x を横軸としてエッチング角度をプロットしたものであり、実験結果を定量的に説明することに成功した。このように、自己無撞着イオンシース解析法によって、電界制御板の効果を効率的にシミュレートすることが可能となった。今後は計算機上での幅広い検討と深い物理的洞察により、斜めエッチング技術のさらなる向上が期待される。

さらに、本年度はいよいよ、結晶への発光体導入を試みた。発光層としては、前年度検討を行った極薄量子井戸層を用いた。これは、3次元 Si フォトニック結晶と、III-V 族半導体量子井戸の融合という意味でも非常に興味深いと言える。様々な試行錯誤ののち、3次元結晶表面に、わずか、30 nm という極薄の発光層の導入に成功し、フォトニック結晶を持たない試料に比べ、40 倍以上の発光強度の増大の観察に成功した。これは、3次元結晶による効果により、光の3次元結晶への進入をほぼ完全に遮断することが可能になったこ

とを強く示唆している。以下、発光層導入の成果について説明する。

3次元 Si フォトニック結晶と III-V 族半導体量子井戸の融合には、本研究で以前より開発を続けているウエハボンディング法を用い、Si 系でのプロセス開発に取り組んだ。異種材料同士のボンディングであるため、熱膨張係数差に起因したウエハの剥離が大きな問題となる。そこで、以前本研究室で開発された GaAs と InP のウエハボンディング技術をヒントに、段階的に温度を上昇させながら加熱処理と基板薄膜化を繰り返すサイクルプロセスを考案した。その結果、図 13 に示すように、Si ウエハ表面に厚さ 30 nm の InGaAsP 単一量子井戸をボンディングし、さらにその量子井戸層のみを残して基板を除去することに成功した。30 nm という驚異的な薄さのため、一連のプロセスによる光学特性の劣化が懸念されたが、フォトルミネッセンス測定による評価を行ったところ、図 14 に示すように、量子井戸としての発光特性は保ったまま、3次元フォトニック結晶の存在する領域では無い場合に比べて約 40 倍の発光強度増大が観測された。この結果は 4 K の冷却測定時のものであるが、室温においても同様の発光強度の増大が得られた。これらは、3次元結晶のフォトニックバンドギャップにより、基板方向への無駄な放射が禁止な

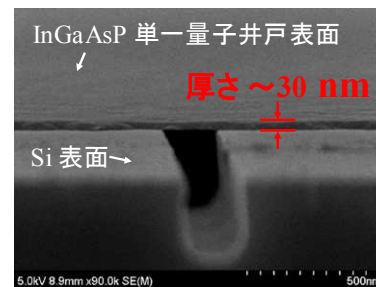


図 13: Si 基板上にボンディングされた InGaAsP 単一量子井戸層 (厚さ 30 nm) の電子顕微鏡像俯瞰図。

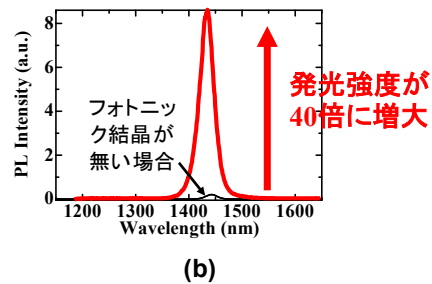
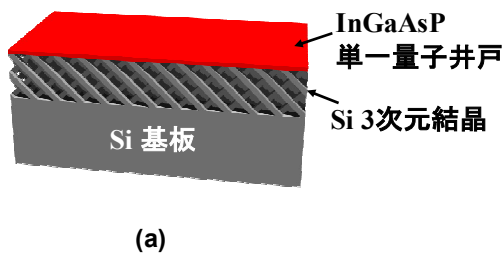


図 14: フォトルミネッセンス測定結果。(a)試料の模式図。(b)量子井戸のフォトルミネッセンススペクトル (4K 時)。

った結果であると考えられる。なお、この効果は、例えば、LED 等、不要な放射が損失原因となっている発光素子で大幅な効率向上にも適用することが可能と考えられる。

(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。H20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制御

これまでの研究により、フォトニック結晶レーザによって、フォトニック結晶の構造を様々に変化させることにより、ドーナツから、円形に至る様々なビームが得られることを示してきた。本年度は、特に径偏光ドーナツビームの集光特性について、そのビームの特徴を明らかにするべく、理論、実験面から検討を進めた^{3,4)}。そのために、ナイフエッジを内蔵した受光デバイスを内作し、高 NA レンズでの焦点位置でのビーム特性を調べる新たな測定システムを立ち上げる場所から始めた。以上により、ドーナツビームの内径と外径を調整し、両者の大きさを近づけるにつれ、焦点位置でのビームの大きさが大幅に縮小し、かつ焦点距離が伸びることを見出した。これは、ニアフィールド光学を始め、様々な応用に向けて極めて重要な成果と言える。以下、その成果について説明する。

図 15(a)(b)には、ドーナツビームの外径に対する内径の比($r_{out}:r_{in}$)が 10:2、および 10:8 の場合の集光特性の実験結果を示している。同図より、内径を外径に近づけることにより、集光点の大きさが大幅に減少することが分かる。これは、径偏光ドーナツビームの特長である光軸方向の成分(図 15 中の赤矢印)が、内径を外径に近づけることで、強調されるためと考えられる。さらに、同図から、焦点深度についても興味深い振る舞いが見られることが分かる。図 15(a)では、焦点から前後 $1.0 \mu m$ 離れると光強度分布が大幅に変化するのに対して、図 15(b)では、焦点とほぼ等しい強度分布を示すことが分かる。この結果は、内径を外径に近づけることにより、焦点深度が伸びることを示すものである。図 16(a)、(b)に内径、外径比 10:2 および 10:9 の理論解析結果を示す。同図から明らかなように、内径を外径に近づけることによって、確かに焦点深度が伸びることが分かる。図には示していないが、図 16(b)の場合には、焦点深度は波長の 10 倍程度まで伸びることが判明した。このような、集光点の大きさが極めて小さく、かつ長い焦点深度は、様々な光学システム、例えば、高集積度の光メモリや超高分解能な光学顕微鏡などへの応用上、非常に有効な特長と言える。

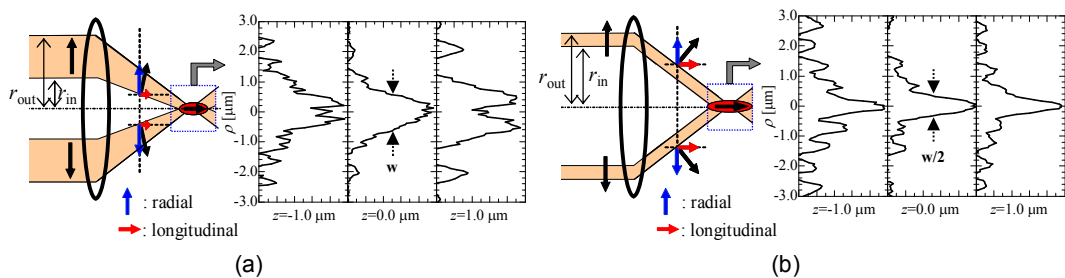


図 15: 高 NA レンズでの集光の概念図と焦点での光強度分布の測定結果。
(a) $r_{out}:r_{in}=10:2$ の場合。(b) $r_{out}:r_{in}=10:8$ の場合

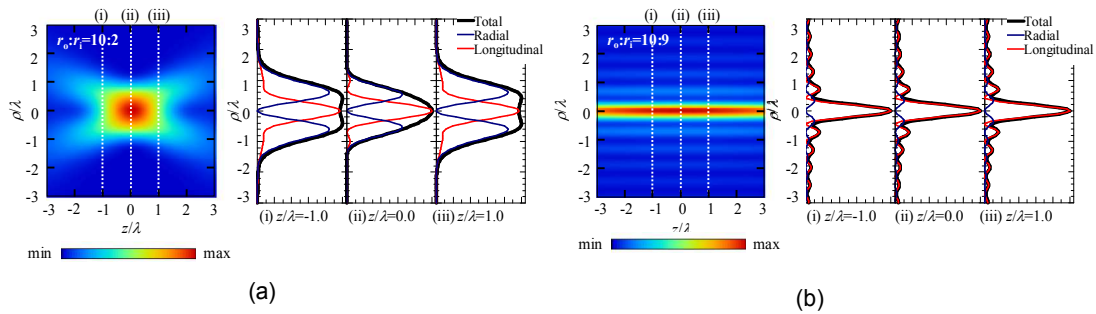


図 17: 数値解析による集光点での光強度分布。(a) $r_{out}:r_{in}=10:2$ の場合、(b) $r_{out}:r_{in}=10:9$ の場合。内径が外径にほぼ等しい場合(b)、小さく焦点深度の長い焦点が形成される。

(C-2) 高出力動作への展開

さらに、本レーザーの特長は、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。これまで、CW 状態では、42 mW、パルス状態では、1 W に迫る 700 mW までの単一縦横モード動作を実現している。本年度は、さらなる高出力化を目指し、格子点形状の一層の最適化を目指すと共に²⁾、デバイス内部の光帰還作用を利用するという新しい方法を考案し、85 W/A という極めて高いスロープ効率を実現することに成功した。

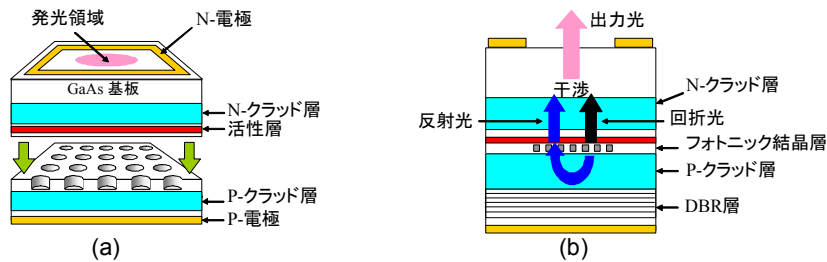


図 18: (a) フォトニック結晶レーザーの構造。(b)DBR を加えたデバイスの断面構造

図 18(a)に、本レーザーのデバイス構造を示す。フォトニック結晶により、2 次元的に発振したレーザー光は、結晶面に対して上下方向へ回折され、出力光となる。デバイス下方に回折された光を上方へ反射させ、さらに双方の光の位相差を調整することで出力効率の向上が期待されるが、本年度は、こうした光帰還作用を、より積極的に利用するため、p 側クラッド層下部に分布帰還型ミラー構造(DBR)を導入した(図 18(b))。p 側クラッド層の厚みを調整することにより、上下方向へ回折された光の位相差を制御できる。p 側クラッド層の厚みを変化させた複数のサンプルの外部微分量子効率を、図 19(a)に示す。外部微分量子効率は、波長の半分の長さに対応する周期(約 150 nm 程度)で大きく変動することが分かる。図 19(b)に作製したデバイスの電流-光出力特性を示す。図より明らかなように、0.85 W/A 以上という極めて高い外部微分量子効率を得ることに成功した。今後は、面積の拡大をも行うことで、極限的に高出力な単一モード半導体レーザーが実現可能であると考えられる。

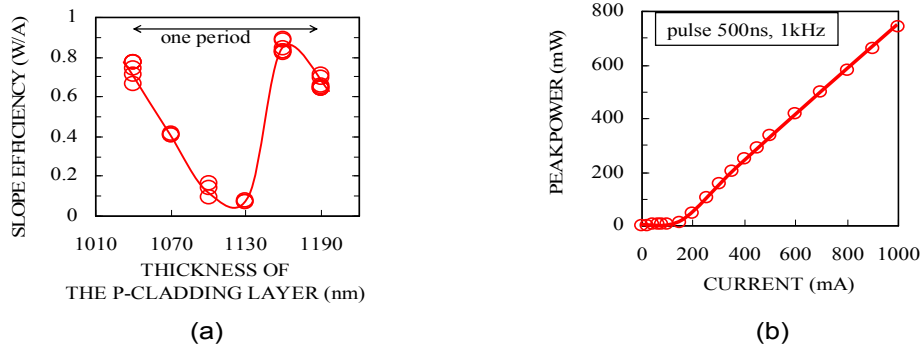


図 19: (a) p クラッド層厚に対する外部微分量子効率。(b) DBR を加えた p 側クラッド層厚が、1060 nm のデバイスの電流－光出力特性。

(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、本研究において、平面波展開法や FDTD 法に代わって、レーザ物理を良く反映し、より使いやすい解析法を得るため、2次元結合波モデルによる解析法を確立してきた。前年度までの研究で、TM および TE 両偏波に対する結合波理論の構築に成功し、面発光の効果をも取り込めるようになった。H20年度は、さらに、これまで考慮してこなかった、より高次の回折効果の導入などを行い、さらに厳密な解析法へと発展させるとともに、実際に、新たな設計へと適用を行なった¹²⁾。具体的には、効率向上に関わるデバイス上部への回折効果を、これまでの2倍以上に増大させることの可能な新しい構造を考案した。以下、デバイス上部への回折効果を取り込んだ、計算結果について、述べる。

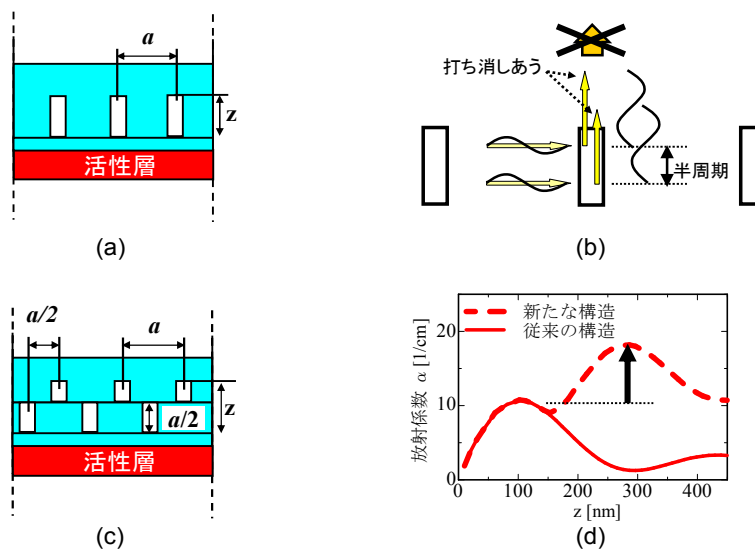


図 20: (a) 従来の構造 (b) 半周期離れた格子点の上部と下部の光は打ち消しあう。(c) 新たな構造。(d) 格子点深さに対する放射係数。従来の構造に比べて、新たな構造では、2倍以上の回折効率が得られる。

図 20(a)に、従来の構造におけるフォトニック結晶の断面図を示す。活性層に平行な方向

に共振したレーザー光は、結晶格子点で上下方向へ回折される。この際、格子点の上部と下部で回折される光の間には位相差が生じ、互いの位相が半周期ずれる場合には打ち消し合いの干渉のため (図 20(b))、回折効果が大幅に低下する。これに対して、今回、結合波理論に基づき検討を行った結果、図 20(c)に示す新たな構造が、回折効果の向上へ非常に有効であることを見出した。本構造では、結晶格子点の上部を下部に対して半周期ずらすことにより、上部および下部より回折される光の位相を等しくすることが可能となる。図 20(d)にデバイス上下方向への回折効率(放射係数)を示す。実線で示す従来の構造に対し、点線で示す新たな構造は、2 倍以上の回折効率を有することが分かる。ここで提案する新たな構造に加え(C-2)で述べたデバイス内部の光帰還作用や、およびこれまで報告している格子点形状の非対称性を組み合わせることで、さらなる効率の向上が期待できる。

(C-4) 青紫色レーザー等への展開

フォトリック結晶面発光レーザー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ー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。前年度、GaN フォトリック結晶形成のために、新たに、AROG(Air-hole retained overgrowth)と命名した形成法を開発し、本原理に基づく GaN フォトリック結晶面発光レーザーの電流注入による発振に世界で初めて成功した。本年度は、前年度実現したデバイスの詳細な評価を行なうとともに、デバイス特性の大幅向上(しきい値の低減)を目指した。その結果、これまで、65 kA/cm²であったしきい値電流密度を、5.4 kA/cm²と大幅に低減することに成功した。本 GaN 系フォトリック結晶面発光レーザーの研究も、世界的に大きな関心を集め、GaN 国際会議、CLEO、IEEE LEOS など多くの国際会議で、Plenary 講演や招待講演を行なうという栄誉を得た。その他、英国科学誌 Nature Photonics や、Optics Org、SPIE Press roomなどで、大きく取り上げられた。

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)」

①研究分担グループ長：野田 進(京都大学、教授)

②研究項目

京都大学が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ー技術の開発に関与している。特に、ロームは、2次元フォトリック結晶レーザー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次元フォトリック結晶レーザーの 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次元フォトリ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. B. S. Song, T. Nagasima, T. Asano, and S. Noda: "Resonant-wavelength control of nanocavities by nanometer-scaled adjustment of two-dimensional photonic crystal slab structures", *IEEE Photonic Technology Letters*, vol.20, no.7, pp.532-534 (2008).
2. K. Sakai, L. Yue, S. Noda: "Coupled-wave model for triangular-lattice photonic crystal with transverse electric polarization", *Optics Express*, Vol.16, No.9, pp.6033-6040 (2008).
3. E. Miyai, K. Sakai, T. Okano, W. Kunishi, D. Ohnishi, and S. Noda: "Linearly-Polarized Single-Lobed Beam in a Surface-Emitting Photonic-Crystal Laser", *Applied Physics Express*, vol.1, no.6, pp.62002-1-62002-3 (2008).
4. 宮井英次、野田進: "フォトリック結晶面発光レーザ", *電気学会論文誌 C*, Vol.128, No.5 (2008).
5. Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: "Design of photonic crystal nanocavity with Q-factor of $\sim 10^9$ ", *Journal of Lightwave Technology*, vol.26, no.11, pp.1532-1539 (2008).
6. M. Yamaguchi, T. Asano, M. Fujita, and S. Noda: "Theoretical analysis of light emission from a coupled system of a photonic nanocavity and a quantum dot", *Physica Status Solidi c*, vol.5, no.9, pp.2828-2830 (2008).
7. Y. Takahashi, Y. Tanaka, H. Hagino, T. Asano, and S. Noda: "Higher-order resonant modes in a photonic heterostructure nanocavity", *Applied Physics Letters*, vol.92, no.241910, pp.1-3 (2008).
8. M. Fujita, Y. Tanaka, and S. Noda: "Light emission from silicon in photonic crystal nanocavity", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.14, no.4, pp.1090-1097 (2008).
9. M. Yamaguchi, T. Asano, and S. Noda: "Photon emission by nanocavity-enhanced quantum anti-Zeno effect in solid-state cavity quantum-electrodynamics", *Optics Express*, Vol.16, No.22, pp.18067-18081 (2008).
10. Y. Kurosaka, K. Sakai, E. Miyai and S. Noda: "Controlling vertical optical confinement in two-dimensional surface-emitting photonic-crystal lasers by shape of air holes", *Optics Express*, Vol.16, No.22, pp.18485-18494 (2008).
11. J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: "Dynamic increase and decrease of photonic crystal nanocavity Q factors for optical pulse control", *Optics Express*, Vol.16, No.26, pp.21721-21730 (2008).
12. H. Hagino, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: "Effects of fluctuation in air hole radii and positions on optical characteristics in photonic crystal heterostructure nanocavities", *Physical Review B*, Vol. 79, pp.085112-1-085112-8 (2009).
13. S. Noda and M. Fujita: "Photonic crystal efficiency boost", *Nature Photonics*, Vol.3, No.3,

pp.129-130 (2009).

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 4 件 (CREST 研究期間累積件数 : 19 件)