

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」
平成18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(H17-20年度)の成果を簡単に纏めると以下ようになる。(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、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高効率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) ナノ共振器と量子ドットの相互作用の本質を明らかにするべく検討を進めた結果、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、量子ドット・ナノ共振器系の発光現象を体系的に説明できるものとして極めて重要な成果と言える。さらに、(4) ナノ共振器の Q 値の更なる増大にも取り組み、300 万という驚異的な Q 値実現に成功した。また、(5)このようなナノ共振器の Q 値を、超高速に制御する方法についても提案・実証を行い、次世代量子情報処理、通信に向けた基礎を築くことに成功した。

(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) 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、これら結果を踏まえ、高精度多層 3 次元結晶実現を目指し、30-50 nm 程度以下という極めて高精度な自動位置あわせ・ウエハボンディング装置の開発に成功した。(2) 本 CREST では、また、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、完全バンドギャップを得るための構造設計とともに、2 方向エッチングの可能性を実験的に実証した。さらに、上下方向の周期が 2-3 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。また、さらなる特性向上へ向けたプラズマ解析にも取り組み、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を行なった。さらに、(3)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した。これらに加え、(4) 3 次元フォトニック結晶分野の新たな展開の基礎として、3 次元フォトニック結晶における「表面モード」の存在を明らかに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) まず、格子点形状や、格子構造を変化させることにより、様々なビームの発生が可能なることを実証した。(2) こうして得られた様々なビームの利点についても検討を行い、例えば、径偏光ドーナツビームにおいては、ビームの内径と外径を調整し、両者の大きさを近づけると、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。これらの成果は、ナノ光学を始め、様々な応用に向けて極めて重要な成果と言える。(2) 一方、格子点形状の制御は、上下方向への光閉じ込め効果の制御にも有効であり、面発光出力を増大させるために有効であることを見出し、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 60 mW (CW) を達成することに成功した。さらに、格子点形状構造として、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 に迫る出力強度を得ることに成功した。また、デバイス内部の光帰還作用を利用するという新たな手法により、0.85 W/A という極めて高いスロープ効率を実現した。一方、(3)レーザ特性の解析に必要な 2 次元結合理論の構築にも取り組み、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含めた解析法を完成させた。さらに(4)本レーザの動作波長範囲を拡大するため、青色フォトニック結晶レーザの開発にも取り組み、微細なフォトニック結晶パターンの形成技術の開拓や、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。また、デバイス特性の大幅向上(しきい値の低減)を目指した検討の結果、しきい値電流密度を 65 kA/cm² から、5.4 kA/cm² へと大幅に低減することに成功した。

本年度(H21 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) 最近、論争を呼んでいる量子ドット・ナノ共振器系の不可解な発光現象、すなわち「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に単なるラビ分裂による双峰性のスペクトルではなく、3つのピークをもつスペクトルが観測される」という現象の解明に取り組み、量子ドット中の電子が取り得る様々なスピン状態を考慮することが重要であることを指摘し、トリオンやバイエキシトン状態からのアンチゼノ効果がその核となっていることを見出した。さらに、(2) 光子系閉じ込めに重要なナノ共振器の Q 値のさらなる増大にも精力的に取り組み、本年度、360 万という Q 値の世界記録の更新に成功した。さらに、ナノ共振器・量子ドット系の結合状態を制御するため、 Q 値の動的制御の深化にも取り組んだ。本年度は、時間領域での Q 値の変化の観察を試み、ピコ秒という超短時間に、一桁以上 Q 値が変化可能なことを示すことに成功した。さらに、 Q 値の制御による量子ナノ構造・ナノ共振器結合系状態制御にも成功した。(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、見出した新たな展開、すなわち表面における光制御の研究を進展させた。特に、本年度は、表面構造を変化させることにより、表面に状態が存在しない表面モードギャップを生成するとともに、人為的な表面欠陥を導入し、3次元フォトニック結晶として、世界最大の Q 値 (>9000) をもつ表面欠陥モードの形成に成功した。また、(2) 本 CREST にて提案した左右 45° 斜めエッチングに基づく3次元結晶作製においては、昨年度開発したプラズマ解析法を用いて、大面積プロセス技術開発にとって重要な電界制御板の設計を行うとともに、3次元フォトニック結晶表面および内部への発光体導入し、発光の増強、抑制が可能であることを明瞭に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) フォトニック結晶レーザから放出されるベクトルビームという新たな学術分野の構築に向けた研究を進めた。まず、ベクトルビームの表現式を導くとともに、ビーム断面での位相を制御することにより、集光点での強度分布を制御できることを見出した。一方、(2) フォトニック結晶レーザのさらなる高出力化にも取り組み、室温パルス条件において、35 W という極めて高い出力動作を実現することに世界で初めて成功した。これは、本 CREST 研究開始時点での光出力に比べ、1000 倍の増大を示す結果と言える。また、今後のさらなる高出力化へ向けた設計に重要なフォトニック結晶の垂直方向への回折効果を厳密に与える光結合係数を、解析的に導出した。さらに、(3) 青紫色領域 GaN 系フォトニック結晶レーザに関しては、その特性向上に向け、フォトニック結晶効果の増強が見込める構造として、フォトニック結晶を p 側クラッド層へ導入する新たな構造の検討を行った。

以上の成果は、英科学誌 Nature および Nature Materials などの極めてインパクトファクターの高い雑誌に複数掲載されるとともに、各種の国内外のメディアに数多く取り上げられた。また、MRS Fall Meeting、IEEE Nano 2009、CLEO、UK Semiconductor 2009 を始めとする多くの国際会議で、基調講演や招待講演を行なうという栄誉を得た。また、産業展開という観点からは、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)などでの展示も行い、好評を博した。さ

らに、IEEE Nanotechnology Pioneering Awards, 文部科学大臣賞, 江崎玲於奈賞などの多くの賞を受賞した。また、本研究の推進は、若手研究者の育成にもつながり、IEEE Photonics Society 2009 Best Student Paper Award や応用物理学会講演奨励賞などを若手研究者が受賞した。

§ 2. 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。

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(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、H21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、挙げている、

- (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
- (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、H19年度までの研究で、ほぼ完了させることができた。H20年度より、次に示す(A-3)の課題に主として取り組んでいる。(A-3)の課題に対して、H21年度は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⁸⁾、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、いかに高い Q 値を実現し、その Q 値を制御し、新しい量子状態制御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) 量子ドット・光共振器結合系の物理の深化

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。さらに、我々は前年度、両者の波長が大きく離調している場合には、第3の発光メカニズムである「アンチゼノ効果」が存在することを見出した。これは共振器の Q 値が十分高く、かつ結合定数が十分大きい場合において、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。これによって、各所で論争を呼んでいた量子ドット・ナノ共振器系の不可解な発光現象、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、ナノ共振器から強い発光が起こる」という現象の理由を初めて解き明かした。さらに、本年度はもう一つの不可解な発光現象、すなわち「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に単なるラビ分裂による双峰性のスペクトルではなく、3つのピークをもつスペクトル(Triplet)が観測される」という現象を解明するべくこのアンチゼノ効果に加えて、量子ドット中の電子が取り得る様々なスピン状態を考慮した計算を行い、明快なメカニズムを見いだした⁹⁾。以下、その内容についてより詳細に説明する。

前年度までの検討においては量子ドットを2準位電子系として近似した上で、純位相緩和に基づくアンチゼノ効果を導入し、離調時における共振器準位の発光の起源を明らかにした。しかしながら、このモデルにおいては共鳴時に通常のラビ分裂に起因する双峰性のスペクトルが得られ、実験で観測されている Triplet を再現することはできない。今年度、

さらに理論モデルを精緻にすることで、この実験を理論的に説明すべく検討を行った。そのために、量子ドットを単純な 2 準位電子系で近似するのではなく、スピン状態を考慮したモデルを導入した。量子ドットに注入されるキャリアはスピン角運動量をもつため、注入されるキャリアの数やスピンの向きに応じて電子および正孔の最低エネルギー準位からなる **S-shell** だけを考慮しても 16 通りの電子・正孔の配置が図 1 のように存在する。そして、それぞれの電子や正孔は **Coulomb** 相互作用や交換相互作用を生じるため、**S-shell** 内部の電子・正孔の配置に応じて発光の遷移エネルギーや偏光方向が変化する。さらに、量子ドット

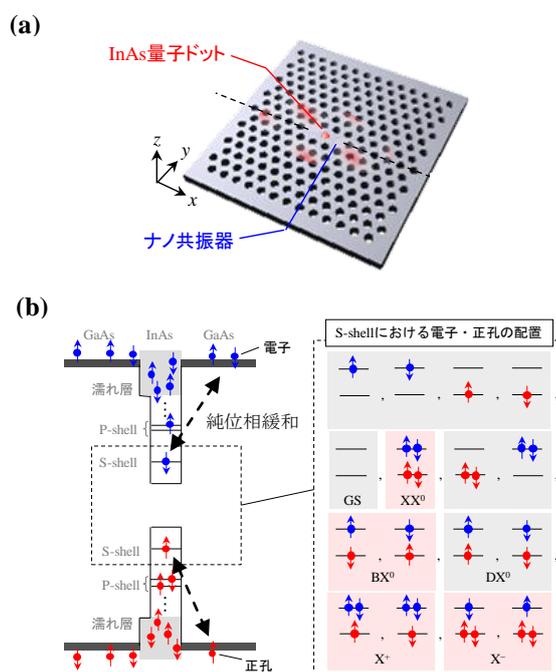


図 1: 量子ドット・光共振器結合系の模式図。
(a) 2次元フォトニック結晶ナノ共振器と InAs 量子ドット。
(b) 量子ドットの様々な状態。

にはより高次の準位も存在するが、今回の検討では **S-shell** についてのみ 16 通りの配置と注入キャリア間の相互作用を厳密に考慮し、他の準位の影響は従来のモデルと同様にクーロン相互作用および交換相互作用による純位相緩和として取り扱った。またナノ共振器は図 1 中の **y** 方向に偏光した電界をもち、自由空間への光子放出に伴うダンピングで決まる Q 値をもつ共振モードとして取り扱った。量子ドットはナノ共振器モードと相互作用するだけでなく、ナノ共振器内に染み込んでいる自由空間モードとも相互作用する。より具体的には、**S-shell** 内の電子および正孔がもつ合成角運動量とキャリア同士のクーロン相互作用および交換相互作用によって、光学的に活性な状態としては、逆方向のスピンをもつ電子・正孔対からなる **bright exciton (BX⁰)**、3 つのキャリアが注入された状態である **positively charged exciton (X⁺)**、**negatively charged exciton (X⁻)**、4 つのキャリアが注入された状態である **bi-exciton (XX⁰)**が生じ、これらの状態がナノ共振器および自由空間モードと相互作用する。そして、この量子ドット・ナノ共振器から自由空間に設定したスペクトルフィルターを通して光検出器に入射する光強度を量子マスター方程式をもちいて計算し、フィルターの中心周波数を変化させて行くことで発光スペクトルを計算した。

まず純位相緩和あるいはアンチゼノ効果が生じない場合において、共振器の共振波長を徐々に変化させながら計算した発光スペクトルを図 2(a)に示す。実際には **x** 偏光成分および **y** 偏光成分が得られるが、ここではナノ共振器との相互作用に着目しているため後者のみを示す。量子ドットからの発光スペクトルは短波長側から順番に **X⁺**、**BX⁰**、**XX⁰**、および **X⁻**からの 4 つの発光ピークから構成されていることが分かる。ここで **X^{+/-}**の発光ラインは右回

り、および左回りに円偏光した2つの発光ピークが、2重縮退のために重複して1つの発光ピークとなっている。一方、 BX^0 と XX^0 の発光ラインにおいては閉じ込めポテンシャルの異方性による微細構造分裂で生じた x 方向および y 方向に直線偏光した2つの発光ピークのうちの y 方向のピークが現れている。このような状況において、まず共振器 (C) が X^+ の発光ラインと共鳴すると、発光ピークは2つに分裂していることが分かる。これは共振器と X^+ による Rabi 分裂である。さらに、共振器の共振波長が長波長側へと移動して BX^0 の発光ラインと共鳴すると、再度、ラビ分裂が生じていることが分かる。両者の分裂幅の違いは前者が円偏光であるのに対して、後者が直線偏光であることに起因する。また共振器が BX^0 の発光ラインに共鳴した際、 XX^0 の発光も同時にラビ分裂していることが分かる。この現象は、 XX^0 の発光遷移の終状態が BX^0 であることに起因する。このように、量子ドット中のスピン状態を考慮することで、量子ドットの性質が発光スペクトルに詳細に再現されている。しかしながら、この純位相緩和が存在しない状況では、共鳴時にはラビ分裂が生じるのみであり、実験で観測されている Triplet は生じていない。

次に純位相緩和あるいはアンチゼノ効果が存在する場合 (位相緩和による線幅広がり $30 \mu\text{eV}$) における発光スペクトルの計算結果を図 2(b) に示す。同図から共振器準位が量子ドットの全ての発光準位 ($XX^0, BX^0, X^{+/-}$) とも離調しているにもかかわらず、共振器準位の発光

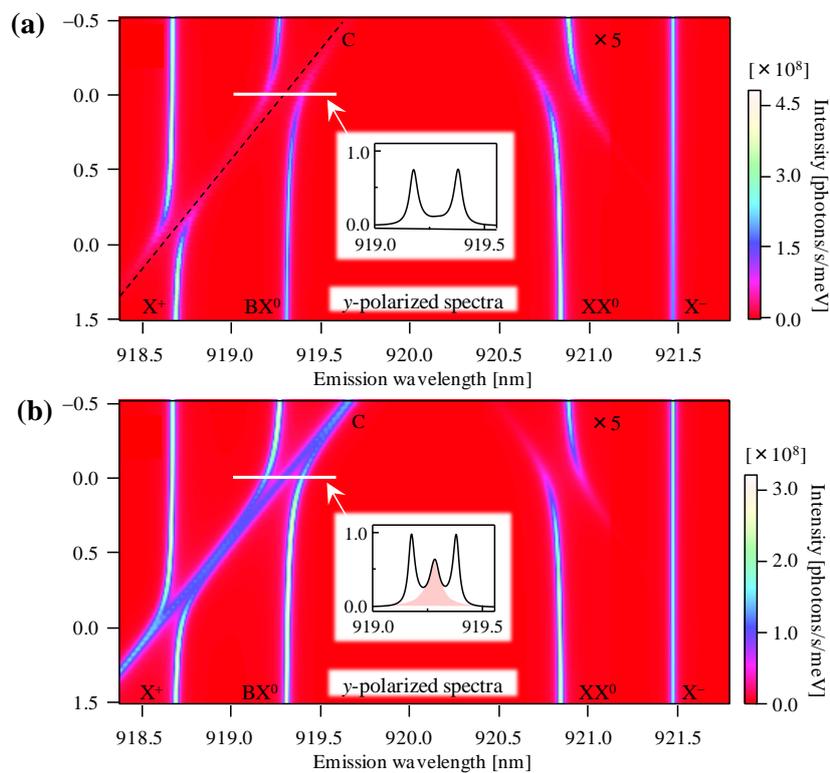


図 2: 量子ドット・光共振器結合系の y 偏光発光スペクトル。(a)純位相緩和あるいはアンチゼノ効果がない場合。(b) 純位相緩和あるいはアンチゼノ効果がある場合 (線幅広がり $30\mu\text{eV}$)。

を確認することができる。これはアンチゼノ効果によって離れた量子ドットの準位から共振器準位へとエネルギーが供給されるためである。さらに、共振器が X^+ 、および BX^0 と共鳴する際には、ラビ分裂した 2 つの発光ピークの中央に共振器の共振波長に沿って発光するピークが存在し、共鳴時の **Triplet** が再現されていることが図 2(b)の挿入図のように分かる。この **Triplet** の形成は下記のように説明できる。本モデルにおいては **S-shell** 内部における図 1 に示す様々な電子・正孔の配置を考慮して計算をしているが、ある特定の時刻において **S-shell** 内部に生じる電子状態は 1 つに限られる。このため、例えば BX^0 と共振器とが共鳴した際には、ランダムなキャリア注入により BX^0 が形成された場合には、共振器との相互作用によりラビ分裂が生じる。その一方で、 X^+ 、 X^- 、および XX^0 が生じた場合には、アンチゼノ効果によって共振器準位が発光する。この場合、共振器はラビ分裂することはできないので、共振器内の光子はそのまま自由空間へと放出され、発光スペクトルにおいては共振器の発光がそのまま現れる。ラビ分裂と純粋な共振器準位の発光はランダムに生じるため、時間的に平均された発光スペクトルは **Triplet** を形成する。さらに詳細な検討によると、アンチゼノ効果以外にも共振器と相互作用している BX^0 に対して、別のキャリアがさらに注入することで生じる高次過程によっても **Triplet** は生じうるが、これは強励起状態でのみ生じることが分かった。よって弱励起状態で観測される共鳴時の **Triplet** は主にアンチゼノ効果の帰結であることが明らかにされた。ここで、共鳴時の **Triplet** は全ての実験において観察されているわけではなく、通常の Rabi 分裂だけが得られている実験報告も存在することを述べておく必要がある。これは共鳴時の **Triplet** は基本的にアンチゼノ効果に起因しているため、共振器の Q 値が十分高く、かつ結合定数が十分大きい場合にしか発現しない現象であるためと考えられる。以上のように量子ドット・ナノ共振器結合系を精密

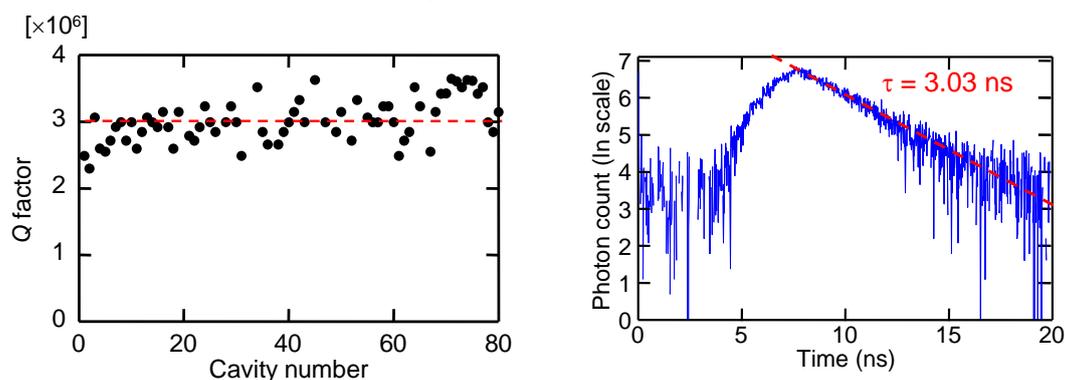


図 3: (a) 80 個の共振器の Q 値の測定結果。平均 Q 値 300 万を実現した。(b)最高 Q 値をもつ共振器の時間分解測定結果。光子寿命 3 ナノ秒、 Q 値 360 万を達成した。

に表現できるようになったことは、今後、この系を用いて超高効率発光やナノ共振器レーザ等を実現し、また量子ゲート等の応用を検討していく上できわめて有用であると考えられる。

(2) 高 Q 値ナノ共振器の進展と Q 値の制御

本研究では、前年度までの研究に引き続き、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も合わせて行った^{6,7,11)}。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、(iii)量子ナノ構造をもつナノ共振器の Q 値制御に取り組んだ。

まず、(i)のナノ共振器の Q 値増大に関しては、本 CREST にて購入した電子ビーム露光の技術をさらに、深化させることにより、昨年度に 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。本年度は、多数作製した共振器の統計的評価を行い、平均 Q 値 300 万、最高 Q 値 360 万を達成し、さらに世界記録を更新した。以下にそのポイントを説明する。

昨年度、構造揺らぎがナノ共振器の特性に与える影響を、マクスウェル方程式を差分化して数値的に解く時間領域差分法(FDTD 法)を利用して検討を行った。その結果、孔半径および位置の揺らぎの標準偏差が 1 nm と小さな場合でも、期待される平均 Q 値は 121 万程度と大きく低減することが分かった。本年度、本解析をさらに発展させ、フォトニック結晶の空気孔半径を小さくし、スラブの厚さを薄くすることにより、構造揺らぎの影響が抑制され、より高い平均 Q 値が得られる可能性があることが判明した。

この結果を踏まえ、空気孔半径を従来の 115 nm から 110 nm に、スラブの厚さを 250 nm から 220 nm とし、80 個のマルチステップヘテロ共振器の Q 値測定を行った。 Q 値の測定結果を図 3(a) に示す。同図より、80 個の共振器に対して平均 Q 値で 300 万が実現できていることが分かる。さらに、最も Q 値が高い共振器について、時間分解測定を行った結果を図 3(b) に示す。光子寿命 3.03 ns、 Q 値にすると 360 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、 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ている。本年度は、このような Q 値の動的制御を、時間領域で確認することを試みた。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 4 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_m)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_m 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_m 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、ヘテロ界面がない場合の面内 Q 値を Q_{in0} として

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

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 $Q_{\text{in0}}/2$ 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 $Q_{\text{in0}}/2$ まで変化させることが可能である。

昨年度は、信号光を導入すると同時に Q 値を動的に増加させ光を保持させ、さらに任意の時刻に Q 値を動的に低下させ光を取り出す

ということを、強度やスペクトル観測により実証した。本年度は、新たに時間分解測定系を立ち上げ、 Q 値の動的制御をより直接的に評価した。図 5 に、新たに構築した、相互相関法による測定系の模式図を示す。入力パルスの一部を分岐させ、試料を透過した光との相互相関を取ることで、共振器内のエネルギーの時間変化を評価することができる。

本測定系にて、共振器の Q 値が $Q_v = 50000$, $Q_{\text{in}} = 2500$ の試料を用いて、共振器内の光エネルギーの時間分解測定を行った。図 6 に、導波路から信号光を導入し、同時に制御光を導入して Q 値を動的に増大した場合の共振器内光エネルギーの時間変化を示す。黒線で示す、 Q 値の動的制御を行わない場合には、共振器に結合した光がすぐに漏れ出す。これに対し、 Q 値の動的制御を行うと、赤線で示すように、共振器に光を効率的に導入し、かつ保持することに成功していることが分かる。 Q 値の動的制御を行わない場合の Q 値が 2500 であり、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

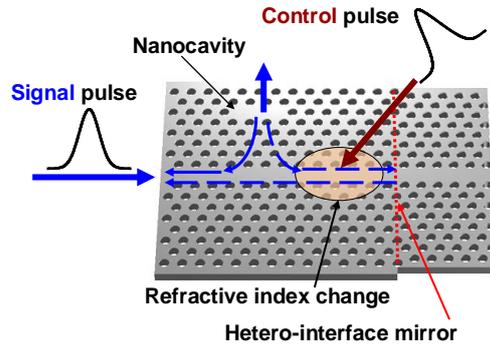


図 4: 共振器 Q 値の動的制御のための系

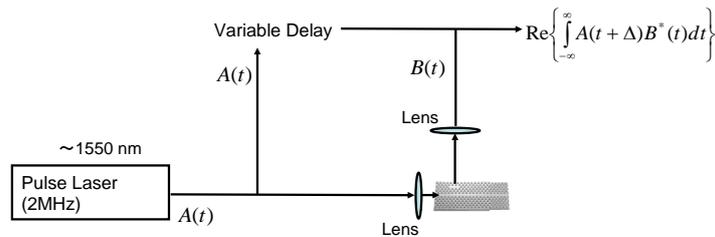


図 5: 時間領域測定のための相互相関測定系の模式図。

値を動的に低減させ、共振器中に保持されている光を取り出す解放動作に関しても時間領域での観測を行った。図 7 の黒線は、前述の光保持のためのパルスのみが照射された状態である。これに対し、図 7 中の矢印で示すタイミングで 2 番目の制御光を照射した場合には、共振器のエネルギーの変化が照射タイミングにより図中の色つきの直線ようになる。

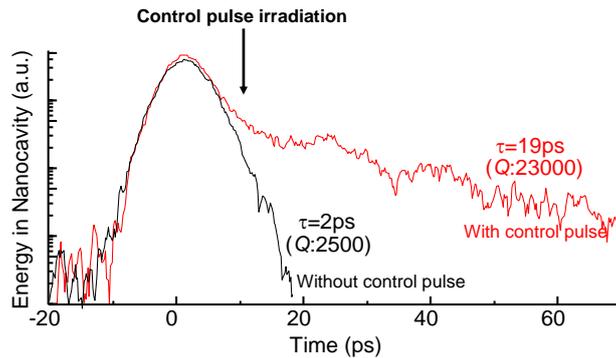


図 6: 光保持動作時の共振器エネルギーの時間変化の測定結果 黒線が Q 値の動的制御を行わない場合、赤線が Q 値の動的制御を行った場合を表す。

このように、2 番目の制御光の照射により、共振器のエネルギーが減少しており、制御光を利用して光を任意の時刻に解放するという動作を直接観測することに成功したといえる。

(iii)の量子ナノ構造をもつナノ共振器の Q 値制御に関しては、本年度は、外部制御光を連続的に導入し、量子ドット・ナノ共振器結合系におけるパーセル効果の制御に適用することを試みた。InAs 量子ドットを $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 程度の密度で含むウェハを用い、図 8 のような

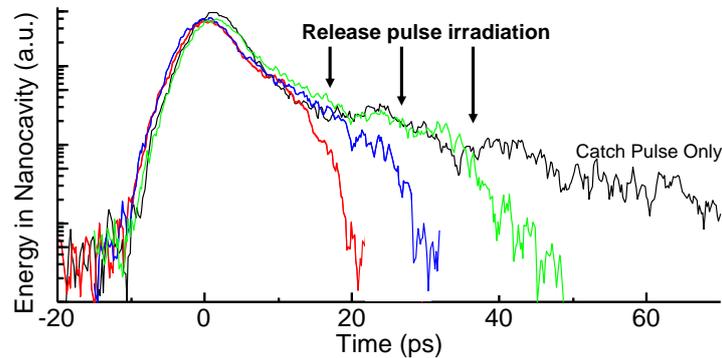


図 7: 光解放動作の測定結果 黒線が光保持のみを行った場合の共振器内エネルギーの測定結果である。ここで矢印のタイミングで光解放用の 2 番目の制御光を導入すると、共振器内エネルギーは色つきの線のように変化する。

ナノ共振器および導波路の複合系を設計・作製した。本構造を用いることで、ナノ共振器と導波路の結合を外部からの制御光によって調整することが可能となり、 Q 値が制御できる。特性評価にあたり、ナノ共振器内の量子ドットを波長 830 nm の励起光にて発光させ、発光スペクトルを、波長 405 nm の外部制御光の強度を変化させながら測定した。

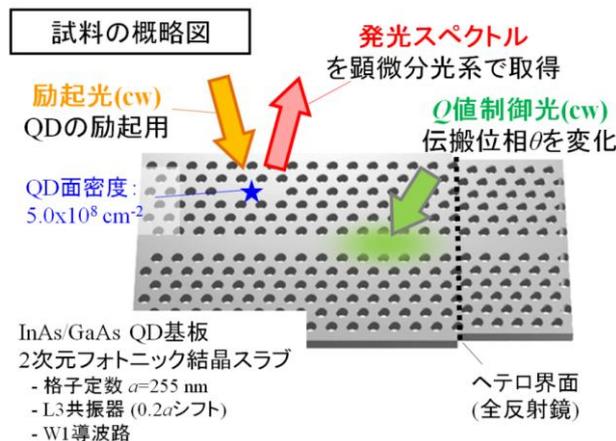


図 8 : Q 値制御に向けた量子ドット(QD)をもつナノ共振器系の概略図

量子ドット・ナノ共振器結合系からの発光スペクトルを制御光強度ごとに測定した結果を図 9(a)に示す。制御光がない 0 mW の場合、発光スペクトルは 946.8 nm 付近にピークを持つ単峰性の形状をもつ。一方、制御光強度が、約 3 mW までは、制御光強度の増加に伴って、ピークが 2 つに分裂・レッドシフトする現象が観測された。さらに制御光強度を増加させると、長波長側のピークが消滅し、新たに 946.5 nm 付近の短波長側にピークが出現した。制御光強度が 6 mW 程度になると、2つのピークは重なり、その時の発光強度は非常に強く観測された。

実験結果を理論解析するために、純位相緩和の影響をとりいれた量子ドット・ナノ共振器結合系の光学応答を数値計算にて詳細に検討した。実験結果を再現するために最適なパラメータは以下の通りである。

- 量子ドットの内自然放出寿命 : 15 ns
- 純位相緩和 : 70 μeV
- ナノ共振器の最大 Q 値 Q_v : 13000
- ナノ共振器と導波路の結合を表す Q 値 Q_{in} : 3000
- 結合定数 : 50 μeV

図 9(b)に得られた理論計算の結果を、図 9(c)に見積もられた制御光強度に対応する伝搬位相差と Q 値の関係を示す。図 9(b)から、制御光強度、すなわち伝搬位相差に対して比較的敏感に変化する発光ピークは共振器に由来し、逆に位相差に対してほぼ線形に変化するピークは量子ドットに由来することが分かる。ここで、量子ドットは、制御光照射時に生じる試料の温度上昇によって、若干発光波長のレッドシフトを生じたと考えられる。また、図 9(c)から、試料の発光が低下する制御光強度 2~4 mW の領域は、伝搬位相差が $1.5\pi \sim 2.5\pi$ に相当し、 Q 値が 1500~3000 と低い状態であり、発光強度が強い領域は、 Q 値が 10000 以上と高い状態であることが判明した。発光強度が最も弱くなる制御光強度 2.5 mW と、発光強度が最も強くなる制御光強度 5.5 mW の結果を比較すると、発光スペクトルの積分強度

は約 4 倍変化しており、外部制御光によって Q 値を変化させることで、パーセル効果を変化させることが可能であることが明らかとなった。

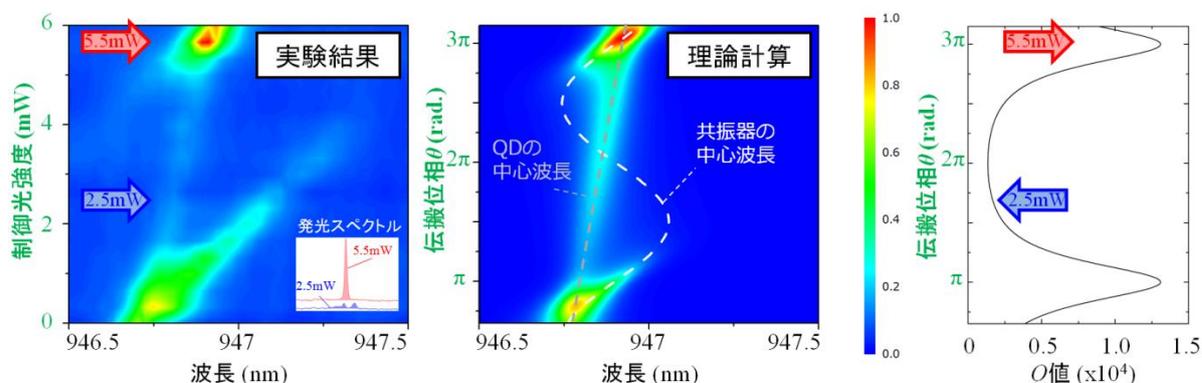


図 9 : (a) 試料の発光スペクトルと制御光強度の関係(実測結果), (b) 理論解析結果, (c) 伝搬位相と Q 値の関係。

(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。H21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/制御の実現

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も、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¹⁾。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¹⁰⁾。昨年度、新たな展開として、発光制御に留まらない、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、1)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、2)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、(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の制御の議論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することが出来る。今年度は、前年度、見出した新たな展開の基礎を踏まえ、3次元結晶の表面モードの制御を目指し、これによるフォトニック結晶における表面科学の進展を目指した³⁾。

まず、3次元フォトニック結晶表面において、表面モードが形成される様子を検討した結果を示す。図10(a)に3次元フォトニック結晶の模式図を示す。この図には、光のさまざまな伝播方向が示されている。図10(b)には表面が存在しない場合、すなわち3次元フォトニック結晶の大きさが無限であると仮定した場合のフォトニックバンド図を示す。この図から、規格化周波数0.29~0.34近傍において、光の状態が存在しないフォトニックバンドギャップが形成され、結晶中に光が存在できないことが分かる。しかし、表面を形成した場合には図10(c)のように、これまでフォトニックバンドギャップが形成されていた周波数域に赤色で示される状態が形成されること、またこの状態では同図・左の挿入図が示すように、光が確かに表面に存在していることが分かる。

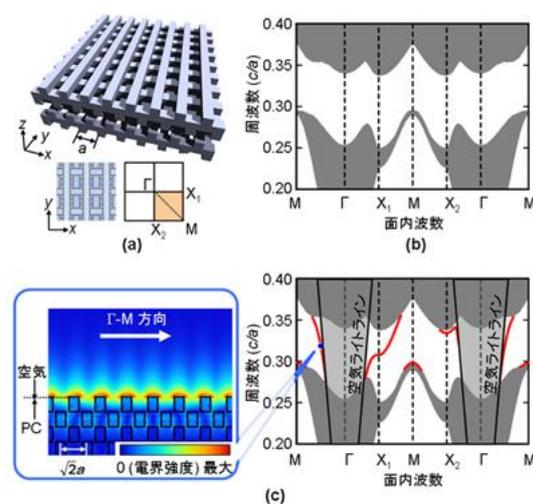


図10: 3次元フォトニック結晶の構造とバンド構造。(a) フォトニック結晶の構造模式図。(b) 表面を持たない無限の3次元結晶のバンド図。規格化周波数0.29~0.34近傍において、光の状態が存在しないフォトニックバンドギャップが形成され、この周波数においては、結晶中に光が存在できないことが分かる。(c) 表面が存在する場合のバンド図。赤い線が、表面に形成されるモードを表す。左の添付図は、表面に光が局在している様子を示す。なお、空気ライトラインと書かれている灰色領域は、光が表面から自由空間へ逃げていく領域を示す。

この結果を踏まえて、フォトニック結晶の表面を用いて光を自在に制御する方法を検討した。そのためには、任意の表面位置に光を強く閉じ込めることなどが自由自在にできるようになることが重要である。そこで今度は、まずフォトニック結晶表面に全く光の状態が存在しない状況「表面モードギャップ」を形成することを考えた。さまざまな試行錯誤の結果、図11(a)のようにフォトニック結晶表面の構造を変化させる方法が有効なことを発見した。具体的には、もともとのストライプ状の表面に対して、これと直交する方向に誘電体を付加すると有効であることを見出した。図11(b)から(d)は、実験結果を示している。図11(b)は、もともとの表面構造であるため、全ての周波数域(波長域)に表面状態が存在するが、図11(c)のように幅0.08 μm の直交する誘電体を付加すると、波長1.3~1.4 μm 域に表面モードギャップが形成されることが分かった。さらに、図11(d)のように、幅0.2 μm の誘電体を付加すると、波長1.4~1.5 μm 域に、表面モードギャップが形成されることが分かった。このように、表面に光が全く存在できない状態を作り上げることに成功した。

続いて、一部分だけ構造を乱して人為的な「表面欠陥」を形成すると、その位置に光が局在するとの予想から、実際に表面を図12(a)のように変化させた。具体的には、誘電体の幅をわずかに増加させた。電磁界シミュレーションを行ったところ、図12(b)のように、幅を増加させた部分にだけ光が点状に局在することが分かった。そこで実際に、幅をもと

の $0.2 \mu\text{m}$ から $0.275 \mu\text{m}$ に増加させた欠陥構造を作製し、実験を行った。人為的に導入した欠陥を中心とした領域について、光の局在の様子を観察した結果を図 12(c)に示す。わずか数 μm 以下の非常に狭い欠陥領域のみに、光が局在していることが確認できた。

さらに、さまざまな大きさの欠陥を作製したところ、図 12(d)のように欠陥の大きさに依存して異なる波長の光を欠陥部に蓄えることが分かった。図 13 に示すように、 Q 値は最大で 9000 以上にも達した。この値は、3次元フォトニック結晶として世界最大であった。表面を利用したにもかかわらず、フォトニック結晶の中に埋め込んだ場合よりもよい性能

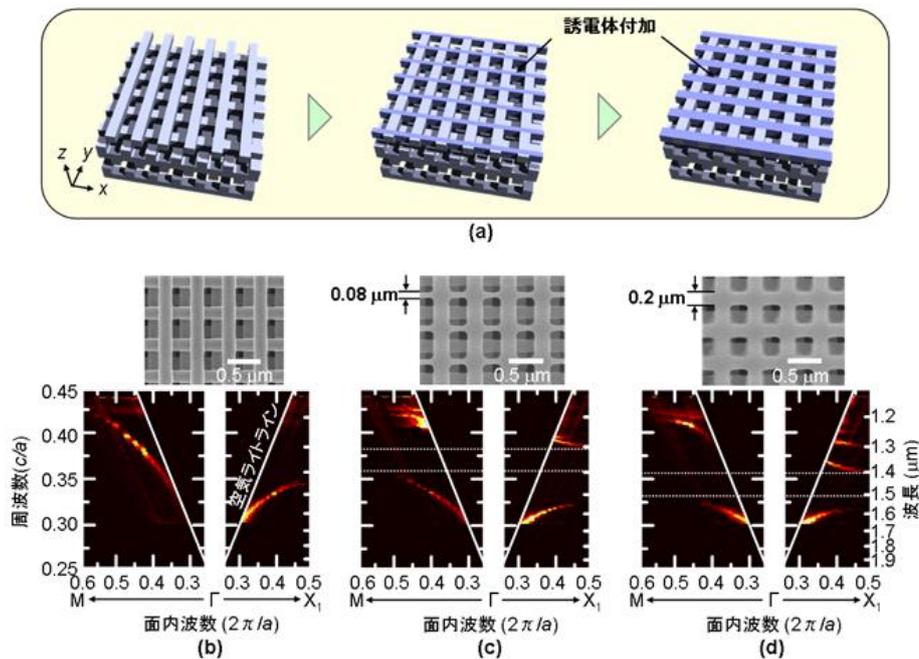


図 11: 3次元フォトニック結晶の表面構造の制御による表面モードギャップの形成。(a) 表面構造の制御の概念図。もともと最表面に存在するストライプと直交する方向に、誘電体を少しずつ付加していく。(b) もともとの表面構造と表面状態のバンド構造。表面モードは、バンドギャップ全域に存在する。(c), (d) 誘電体を付加した場合の表面バンド構造の変化。(c)のように、幅 $0.08 \mu\text{m}$ の誘電体を付加すると、波長 $1.3\sim 1.4 \mu\text{m}$ 域に表面モードの存在しない状況(表面モードギャップ)が形成され、(d)のように幅 $0.2 \mu\text{m}$ の誘電体を付加すると、波長 $1.4\sim 1.5 \mu\text{m}$ 域に表面モードギャップが形成されることが分かる。

が得られたことは予想を上回る結果であった。今回の結晶の積層数は 8 層であるが、この積層数を増やしていくと指数関数的に Q 値が増大していくものと期待される。例えば、積層数を 16~18 層程度にすることなどにより、 Q 値は 1000 万近くに達するものと期待される。以上の結果は、表面の構造を工夫することにより、さまざまな光制御の可能性が広がることを示している。

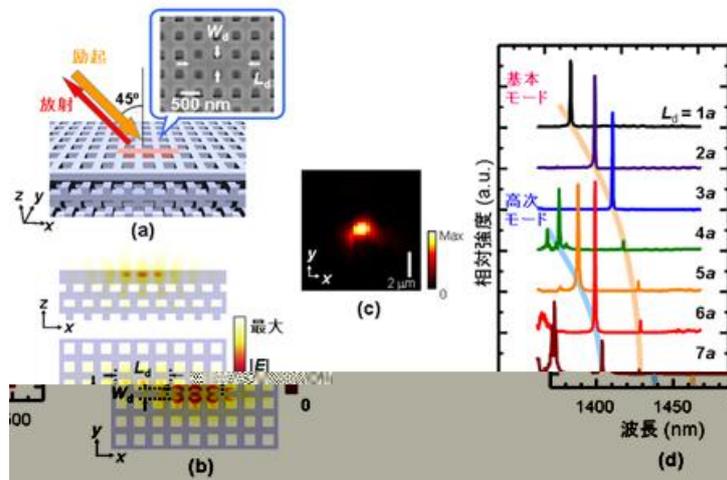


図 12: 3次元フォトニック結晶表面への人為的な表面欠陥モードの導入とその特性。(a) 表面における人為欠陥(ピンク色の部分)の導入。挿入図は、表面欠陥部の電子顕微鏡写真を示している。通常の部分よりも、わずかにその幅(W_d)を増加させている。(b) 表面局在モードの計算結果。表面欠陥部分に光が局在し、欠陥モードが形成されていることが分かる。(c) 表面欠陥モードの測定結果。わずかに数 μm 以下の部分に光が強く局在している様子が分かる。(d) 表面欠陥モードの共振スペクトル。表面欠陥の長さ L を長くすると、欠陥モード波長が長波長側へシフトし、かつ高次のモードが現れてくることが分かる。

本成果は、フォトニック結晶の応用範囲と自由度を格段に広げるもので、幸いにも、2009年7月16日発行の英国科学雑誌「Nature」に掲載された³⁾。本研究で得られた知見は、金属における表面プラズモンとも類似性があるため、物理的にも大変興味深い内容あり、金属表面の欠点である光吸収の影響が完全に排除できることから、高感度かつ高度な光-物質相互作用が実現でき、従来よりも桁違いに高い感度を持つバイオセンサーなどへの応用も考えられる。さらには、NEMS と呼ばれる微小な機械素子と3次元フォトニック結晶表面との融合により、ナノオプトメカニカル素子の実現など新たな分野開拓も期待される。

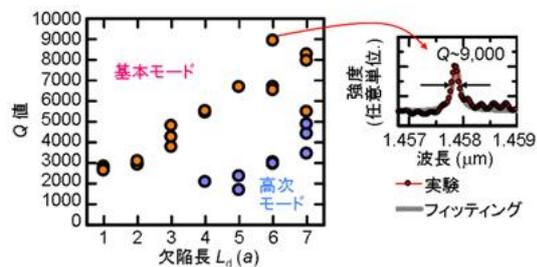


図 13: さまざまな表面局在モードの Q 値の測定結果。

(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。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、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を実現してきた。さらに、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。また、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。

今年度は、昨年度開発したプラズマ解析法により、大面積処理へ向けて、効果的な電界制御板の設計を行った³⁾。異方性の高い斜めエッチングを実現するには、イオンの平均自由行程よりも小さな領域で軌道を曲げ、同時に加速する必要がある。そのために電界制御板をシース中に挿入し、イオンに対する発散レンズを形成することに本技術の核心がある。制御板の候補は多々考えられるが、大面積処理を視野に入れると、図 14 に示すような斜め孔(溝)を並列に形成した電界制御板が有望である。孔の横幅をシース長と同程度にすることによって発散レンズが形成され、所望の角度にイオン軌道を曲げることができることが判明した。

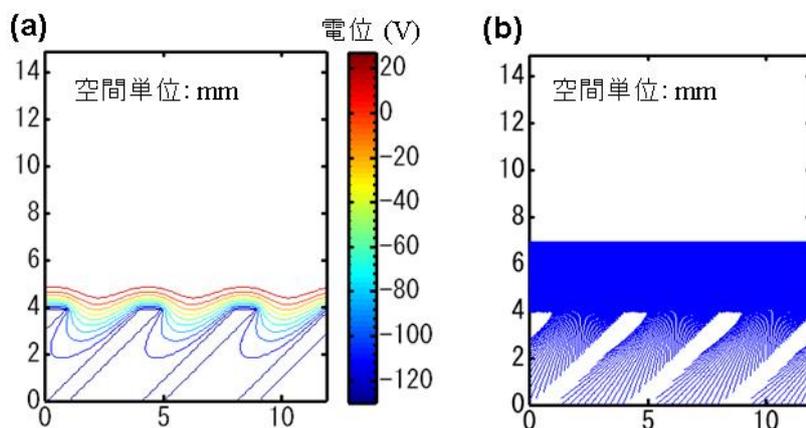


図 14: 電界制御板とその周囲での(a) 電位分布と(b) イオン軌道の解析結果。

(B-3) 新たな 3 次元結晶への発光体の導入と発光制御への展開

(B-2)において、極めて強いフォトニ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。昨年度までに、斜めエッチングによる新 3 次元結晶中央部へ点欠陥を導入した際の基礎特性の解析を平面波展開法、FDTD 法等を用いて行い、確かに 3 次元ナノ共振器として動作しうることを示すことに成功した。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行い、斜めエッチング面がボーアリングする場合でも、完全バンドギャップが維持されうる、すなわち点欠陥として作用しうることを示した。また、結晶内部への発光体導入に向けた理論検討を行ってきた。まずは、発光層として、結晶中央部へ、極薄の量子井戸層（平坦層）を導入することを想定し、完全フォトニックバンドギャップを保った状態で、自然放出の抑制を行なうためには、結晶の基本構造をどのように設計すべきか等の理論的検討を進め、結晶への極薄量子井戸層発光体の導入を試みた。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。今年度は、発光体の上下方向を3次元結晶でサンドイッチした構造、すなわち、完全バンドギャップ効果を導入し、発光状態の変調の様子も調べ、2方向斜めエッチング3次元フォトニック結晶による発光制御の基礎を築いていった⁴⁾。

図15(a)に新たな斜めエッチング法により作製された3次元フォトニック結晶上に、厚さ30nmのInGaAsP量子井戸発光体を貼り付けた際の発光スペクトルを示す。このとき、発光体からの発光は、フォトニック結晶上に形成していない参照用の発光体に比べて、約40倍にも強く発光することが判明した。これは、3次元フォトニック結晶の効果により、発光が上部方向にしか許されなくなったことに起因する。一方、この発光体を2つの3次元フォトニック結晶で挟み込んだ場合には、図15(b)に示すように、逆に、発光は40分の1以下にまで抑制された。これは、上下を3次元フォトニック結晶で覆われ、発光できる経路がなくなったためである。以上の結果は、本研究で開発した作製法によって、非常に質の高い3次元フォトニック結晶が作製可能であり、さまざまな用途に合わせて、時には光を効率よく外部へ放出し、時には不要な放出を抑制するという制御が可能であることを示している。以上により、半導体に斜め2方向からエッチングするという極めてシンプルな作製法により一括形成される3次元フォトニック結晶の光制御の可能性を示すことに成功した。本成果は、3次元フォトニック結晶の実用化に向けての大きな一歩と言え、幸いにも、英国科学雑誌「Nature Materials」に掲載⁴⁾され、2009年8月10日にオンライン速報版で公開された。

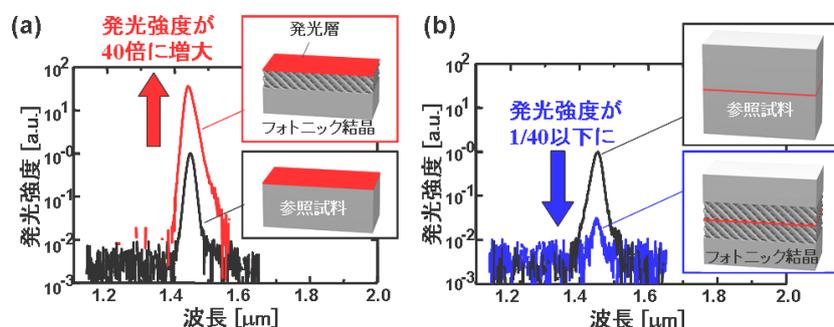


図15: 斜めエッチング3次元フォトニック結晶による発光制御。(a) フォトニック結晶上に貼り付けられた量子井戸発光体の発光スペクトル。フォトニック結晶の無い参照試料に比べて発光が約40倍に増強されている。(b) 量子井戸層を2つの3次元フォトニック結晶で挟み込んだ場合の発光スペクトル。今度は逆に、100分の1程度にまで発光が抑制されている。

(C) 大面積コヒーレント動作可能なレーザ技術の開発

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。H21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

本デバイスは、位相シフトや格子点形状など結晶構造により、ビームパターンの制御が可能である⁵⁾。これまでの研究において、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。さらに、応用可能性の検討結果から、接線方向偏光のドーナツビームに関しては、不透明物質（金属微粒子）の捕獲、操作が可能であることを示すことに成功している。また、動径方向偏光のドーナツビームについては、ドーナツビームの内径と外径を同程度の大きさにすることにより、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という極めて興味深い現象を見出している¹²⁾。

本年度は、以上のドーナツビームを包含する”ベクトルビーム”という新たな学術分野の発展を目指し、ベクトルビームの表現式を導くとともに、ビームモードとして一般的に知られているラゲールガウスビームとの関係を明らかにした。さらに、ビーム断面での位相を調整することにより、集光点での強度分布を制御できることを見出した。以下、そのポイントを詳細に説明する。

ビームモードの表現式は、近軸波動方程式から導出される。そこでまず、近軸波動方程式に立ち戻り、電界の分布をも含めて扱うことにより、ベクトルビームの表現式を導いた。その結果、動径方向偏光および接線方向偏光を有するビームをはじめ、電界の分布がより複雑なベクトルビームをも含めて解析的に扱うことを可能とすることに成功した。さらに本研究では、フォトニック結晶レーザから出射可能な様々なベクトルビームに、新たに位相回転を加えることを試みた。図 16(a)に、次数の異なる様々なベクトルビームに光軸周りの位相の回転を与えた際の、集光点での電界強度分布を示す。ベクトルビームの次数(l)と位相の回転数(l')が等しい場合、中心に強い強度が現れることが判明した。また、この効

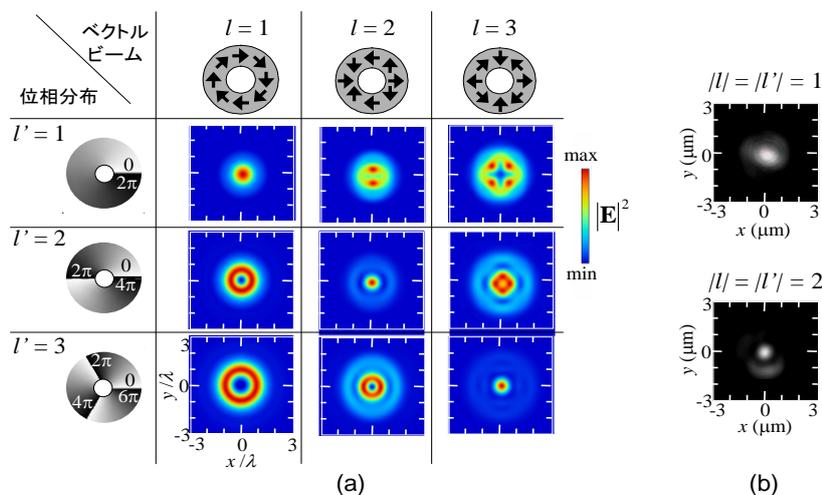


図 16: (a) 位相回転を与えたベクトルビームの集光点での電界強度分布. (b) フォトニック結晶レーザより得られたベクトルビームに、位相回転を与えた際の集光点の強度分布.

果を実験的に検証することにも図 16(b)のように成功した。以上の成果は、“ベクトルビーム”という新たな分野のさらなる発展の可能性を示すものであると言える。

(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、従来の半導体レーザの枠を大きく超えた、高出力な単一縦横モード動作の実現が、本課題の大きな挑戦である。これまでの研究により、本 CREST をスタートとした時点に比べ、極めて大きな出力向上を実現しており、1 W に迫る極めて高い値まで達成している。これらは、結晶を構成する格子点の形状を真円から三角形へと変化させることで、結晶面に垂直方向への消失性の干渉を低減した結果である²⁾。さらに、デバイス下方へ回折された光を上方へ反射させ有効に活用することにより、スロープ効率 0.85 W/A という極めて高い値を実現することにも成功した。本年度は、これまでに開発した様々な手法を総合的に活用し、かつデバイスの集積化により、W 級を超える高出力動作の実現に取り組んだ。図 17(a)に作製したデバイスの模式図を示す。一つのチップ内に、上述の工夫を加えたデバイスを、5×5 のアレイ状に配置したデバイスである。本デバイスにより得られた電流-光出力特性および発振スペクトルを図 17(b)、(c)に示す。室温パルス条件のもと、光出力は 35W という極めて高い値にまで到達した。また、個々のデバイスの積極的な同期を行っていないにもかかわらず、発振スペクトル幅は、測定限界の 0.2 nm 以下と単一デバイス相当の狭い値であった。

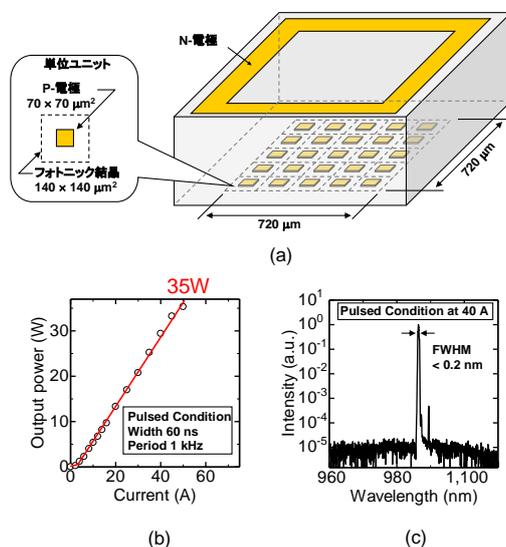


図 17: 作製したアレイデバイスの(a) 模式図、(b) 電流-光出力特性、(c) 発光スペクトル。

(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レーザ物理の深い理解に役立ち、見通しよく使いやすい解析法が必要である。これまで、こうした解析法として、2次元結合波理論の確立を目指し、TM 波および TE 波の双方についての解析をほぼ完成へと

導き、TE 波に対しては、実験結果との比較を行い、本解析法の有効性を示すことに成功した¹³⁾。また、具体的なデバイス設計に活用し、高出力化へ有効な垂直方向の格子点形状を見出している。しかし、本デバイスの特徴である面発光機能については、その取り扱いが不十分であった。具体的には、結晶面に対して垂直方向への回折効果は、実験に合うよう調整した値を用いてきた。本来、この値は、結晶構造により一意に決定されるべき量である。

格子点の形状による出力の違いなど、今後の高出力化へ向けた検討には、この垂直方向への回折効果を解析的かつ一意に与えること必要である。そこで、本年度は、垂直方向への回折効果を与える光結合係数を、解析的に導出した。図 18(a)に結合波方程式と垂直方向への光結合係数を示す。 $H_{i,j}$ および $h_{i,j}$ ($i, j = 0, \pm 1$) は、垂直方向への光結合係数であり、格子点形状に対して解析的に決定される。この光結合係数を用いることにより、格子点の形状に対する垂直方向への放射係数の比較が可能となった。図 18(b)に格子点形状が真円、正三角形、および直角二等辺三角形の場合に対するしきい値利得のもっとも小さなモードの放射係数を示す。横軸は格子点が結晶に占める割合である。真円から正三角形、直角二等辺三角形へと変化するほど、放射係数が向上することが分かる。これまでの実験により、格子点形状の非対称性を増すほど、垂直方向への光出力が増加することが知られており、本

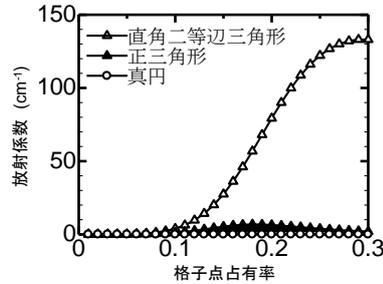
結合波方程式

$$\begin{aligned} (\alpha - i\delta)R_x &= \left(H_{1,0} + i\frac{4|k_{1y}|^2}{\beta_0} \right) R_x + (-h_{-1,0} + ik_{-2x})S_x + i\frac{2\kappa_{-1x}\kappa_{1y}}{\beta_0} R_y + i\frac{2\kappa_{-1x}\kappa_{-1y}}{\beta_0} S_y \\ (\alpha - i\delta)S_x &= (-h_{1,0} + ik_{2x})R_x + \left(H_{-1,0} + i\frac{4|k_{1y}|^2}{\beta_0} \right) S_x + i\frac{2\kappa_{1x}\kappa_{1y}}{\beta_0} R_y + i\frac{2\kappa_{1x}\kappa_{-1y}}{\beta_0} S_y \\ (\alpha - i\delta)R_y &= i\frac{2\kappa_{1x}\kappa_{-1y}}{\beta_0} R_x + i\frac{2\kappa_{-1x}\kappa_{-1y}}{\beta_0} S_x + \left(H_{0,1} + i\frac{4|k_{1x}|^2}{\beta_0} \right) R_y + (-h_{0,-1} + ik_{-2y})S_y \\ (\alpha - i\delta)R_x &= i\frac{2\kappa_{1x}\kappa_{1y}}{\beta_0} R_x + i\frac{2\kappa_{-1x}\kappa_{1y}}{\beta_0} S_x + (-h_{0,1} + ik_{2y})R_y + \left(H_{0,-1} + i\frac{4|k_{1x}|^2}{\beta_0} \right) S_y \end{aligned}$$

垂直方向への光結合係数

$$\begin{aligned} H_{1,0} = H_{-1,0} &= \frac{k_0^4 |\xi_{1,0}(x)|^2}{4\beta_0^2} \left| \int dx \exp(i\beta_0 x) \phi(x) \right|^2 & h_{-1,0} &= \frac{k_0^4 \xi_{-1,0}(x)^2}{4\beta_0^2} \left| \int dx \exp(i\beta_0 x) \phi(x) \right|^2 \\ H_{0,1} = H_{0,-1} &= \frac{k_0^4 |\xi_{0,1}(x)|^2}{4\beta_0^2} \left| \int dx \exp(i\beta_0 x) \phi(x) \right|^2 & h_{0,1} &= \frac{k_0^4 \xi_{0,1}(x)^2}{4\beta_0^2} \left| \int dx \exp(i\beta_0 x) \phi(x) \right|^2 \\ h_{1,0} &= \frac{k_0^4 \xi_{1,0}(x)^2}{4\beta_0^2} \left| \int dx \exp(i\beta_0 x) \phi(x) \right|^2 & h_{0,-1} &= \frac{k_0^4 \xi_{0,-1}(x)^2}{4\beta_0^2} \left| \int dx \exp(i\beta_0 x) \phi(x) \right|^2 \end{aligned}$$

(a)



(b)

図 18: (a) 結合波方程式と垂直方向への光結合係数. (b) 各種の格子点形状に対する最低しきい値モードの垂直方向への放射係数.

解析はこうした経験と良く一致する結果を示している。

(C-4) 青紫色レーザ等への展開

材料系としては、赤外波長域の InGaAs/GaAs 系に加え、短波長材料の InGaN/GaN 系へも展開を図ることは、極めて重要である。これまでに、AROG 法と名付けた結晶再成長プロセスにより、フォトニック結晶を GaN 系デバイス内部に埋め込むことに成功し、GaN フォトニック結晶面発光レーザの電流注入による発振に、世界で初めて成功した。さらに、発振しきい値の低減にも取り組み、n 側クラッド層に形成したフォトニック結晶層と活性層の距離を近づけることにより、しきい値電流密度 5.4 kA/cm^2 を達成することにも成功している。しかし、n 側クラッド層にフォトニック結晶層を形成する場合には、AROG 法を用いた結晶再成長を行った後に活性層を成長させる必要があり、フォトニック結晶と活性層との間には AROG 法により再成長を行う結晶層が一定の厚み分、存在することになる。そのため、フォトニック結晶層と活性層との距離には一定の制限があり、フォトニック結晶効果のさらなる増強には、困難が存在していた。そこで、本年度は、こうした制約を取り払い、フォトニック結晶の効果の増強が見込める構造として、図 19(a)に示すようなフォトニック結晶の p 側クラッド層への作製を検討した。この構造では、AROG 法による再成長を活性層上にフォトニック結晶を形成後に行なうことになるため、活性層・フォトニック結晶間の距離を近づけることが可能になると期待される。さらに、図 19(b)に示すように、今年度、

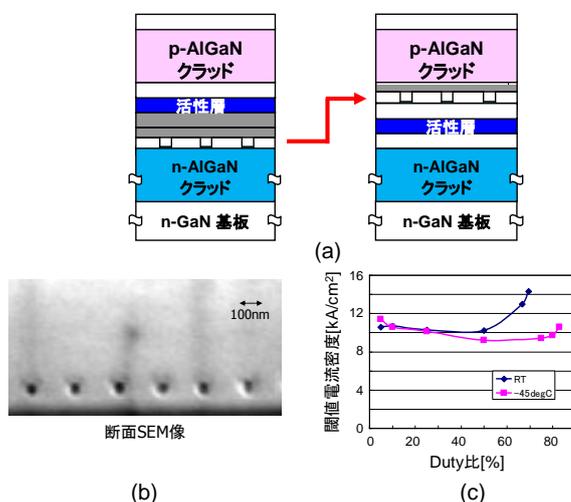


図 19: (a) 新たな青紫色レーザの断面構造図。フォトニック結晶を、n 側クラッド層から p 側クラッド層へ移動した。(b) 新たな構造で作製した GaN 系フォトニック結晶の断面走査型電子顕微鏡像。(c) パルス駆動電流の duty 比に対する、発振しきい値電流密度。

AROG 法の際、SiO₂ 成長ブロック層を設けずとも、フォトニック結晶が良好に形成出来ることを見出した。このように、フォトニック結晶を n 側クラッド層から、p 側クラッド層変化させた結果、フォトニック結晶と活性層間の距離を、従来の 90 nm から 60 nm へと低減することに成功した。作製したデバイスに対し、パルスの duty 比を変化させながら駆動したところ、室温では duty 比 70%、-40 °C では duty 比 83 % までの発振が確認でき、ほぼ cw

に近い発振を達成することに成功した(図 19(c))。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. K. Ishizaki, M. Okano, S. Noda: “Numerical investigation of emission in finite-sized, three-dimensional photonic crystals with structural fluctuations”, *Journal of the Optical Society of America B*, vol.26, no.6, pp.1157-1161 (2009), doi:10.1364/JOSAB.26.001157.
2. Y. Kurosaka, S. Iwahashi, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi, and S. Noda: “Band structure observation of 2D photonic crystal with various V-shaped air-hole arrangements”, *IEICE ELECTRONICS EXPRESS*, Vol.6, No.13, pp.966-971 (2009), doi:10.1587/elex.6.966.
3. K. Ishizaki, S. Noda: “Manipulation of photons at the surface of three-dimensional photonic crystals”, *Nature*, Vol.460, No.16, pp.367-370 (2009), doi:10.1038/nature08190.
4. S. Takahashi, K. Suzuki, M. Okano, T. Nakamori, Y. Ota, K. Ishizaki, and S. Noda: “Direct creation of three-dimensional photonic crystals by a top-down approach”, *Nature Materials*, Vol.8, No.9, pp.721-725 (2009), doi:10.1038/nmat2507.
5. 酒井恭輔, 野田進: “フォトニック結晶面発光レーザーの多様なビームパターン”, *レーザー研究*, Vol.37, No.9, pp.689-693 (2009).
6. B. S. Song, T. Nagashima, T. Asano, and S. Noda: “Resonant-wavelength tuning of a nanocavity by subnanometer control of a two-dimensional silicon-based photonic crystal slab structure”, *APPLIED OPTICS*, Vol.48, No.26, pp.4899-4903 (2009), doi:10.1364/AO.48.004899.
7. Y. Takahashi, Y. Tanaka, H. Hagino, T. Sugiya, Y. Sato, T. Asano, and S. Noda: “Design and demonstration of high- Q photonic heterostructure nanocavities suitable for integration”, *Optics Express*, Vol.17, No.20, pp.18093-18102 (2009), doi:10.1364/OE.17.018093.
8. T. Asano, K. Mochizuki, M. Yamaguchi, M. Chaminda, and S. Noda: “Spectrally selective thermal radiation based on intersubband transitions and photonic crystals”, *Optics Express*, Vol.17, No.21, pp.19190-19203 (2009), doi:10.1364/OE.17.019190.
9. M. Yamaguchi, T. Asano, K. Kojima, and S. Noda: “Quantum electrodynamics of a nanocavity coupled with exciton complexes in a quantum dot”, *Physical Review B*, Vol.80, No.15, pp.155326-155335 (2009), doi:10.1103/PhysRevB.80.155326.
10. S. Kawashima, K. Ishizaki, and S. Noda: “Light propagation in three-dimensional photonic crystals”, *Optics Express*, Vol.18, No.1, pp.386-392 (2010), doi:10.1364/OE.18.000386.
11. Y. Tanaka, S.-I. Takayama, T. Asano, Y. Sato, and S. Noda: “A Polarization Diversity Two-Dimensional Photonic-Crystal Device”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum*

Electronics , Vol. 16, No. 1, pp. 70-76 (2010), doi:10.1109/JSTQE.2009.2026588.

12. K. Kitamura, K. Sakai, and S. Noda: “Sub-wavelength focal spot with long depth of focus generated by radially polarized, narrow-width annular beam”, *Optics Express*, Vol.18, No.5, pp.4518-4525 (2010), doi:10.1364/OE.18.004518.
13. K. Sakai, E. Miyai, S. Noda: “Coupled-wave Theory for Square-lattice Photonic Crystal Lasers with TE Polarization”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 46, No. 5, pp. 778-795 (2010), doi:10.1109/JQE.2009.2037597.

(4-2) 知財出願

- ① 平成21年度特許出願件数(国内 5 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 24 件)