

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18197

研究課題名（和文）ナノ結晶とメタマテリアル共振器を組み合わせた革新的な極小単一光子放出器の創生

研究課題名（英文）Creation of an innovative ultra-small single photon emitter combining nanocrystals and metamaterial resonators

研究代表者

向井 剛輝（Mukai, Kohki）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10361867

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：光子発生源であるナノ結晶と単一メタマテリアル共振器を人工的な操作によって極めて高精度に位置制御して組み合わせることで、ナノオーダーサイズの革新的な極小単一光子放出器を実現することを目的として研究を行なった。光子発生源としてコロイド型半導体量子ドットを用い、特にそのシリカコーティング技術を開発した。メタマテリアル共振器は、当初計画を変更し、より形状任意性の高い集束イオンビーム装置を利用する手法で作製した。最終的に、偏光制御した単一光子を放出できる素子の実現と性能実証、及びプレーナー型固体量子回路の実現に好適となる横方向に光子放出を行える単一光子放出器の提案と試作、などの成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究で我々は、光子源1個と単一メタマテリアル共振器とを組み合わせた、独自の単一光子放出器を提案し動作実証を行なった。本研究で用いたコロイド型量子ドットは量子もつれあい光子対の生成に必要な3次元構造対称性を持ち、安価に大量生産可能である。本研究では、量子演算の基底状態に利用される偏光を制御した光子放出が実現できることを示した。また、現在までに報告されたほとんどの単一光子放出器は基板面からの垂直放射であるが、本研究ではプレーナー型量子回路の実現に必要な横方向への光子放出が実現できることも示した。この新しい極小な光量子素子は既存技術との親和性も高く、量子情報処理技術の基盤技術となり得る。

研究成果の概要（英文）：The research was aimed at realizing an innovative, extremely small single-photon emitter of nano-order size by combining nanocrystals, which are photon generating sources, with a single metamaterial resonator, and controlling their positions with extremely high precision through artificial manipulation. As a photon generating source, colloidal semiconductor quantum dots and their silica coating technology were developed. The initial plan was changed to fabricate the metamaterial resonator using a method that utilizes a focused ion beam lithography, which allows for greater freedom in shape. Ultimately, we achieved results including the realization and performance verification of the device that can emit polarization-controlled single photons, as well as the proposal and fabrication of a single-photon emitter that can emit photons laterally, which is suitable for realizing planar solid-state quantum circuits.

研究分野：応用物理工学およびその関連分野

キーワード：単一光子放出器 量子ドット メタマテリアル 集束イオンビーム加工 シリカコーティング 微小光共振器 局所プラズモン 走査型プローブ顕微鏡リソグラフィ

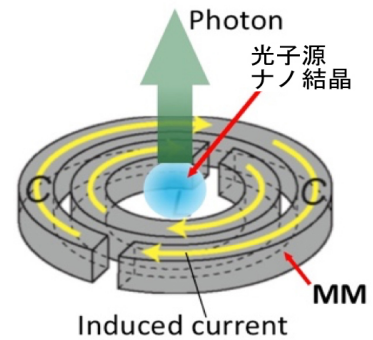
科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子通信・量子コンピューティングなどの量子情報処理技術を担う汎用量子ビットとして、超伝導、イオントラップ、量子ドット (QD)、ダイヤモンド窒素-空孔センター (NV センター) など様々な研究が行われているが、既存技術との親和性や実用上の利便性から固体素子化可能な構造の重要性は論を待たない。固体素子化可能な構造の中で最も開発が進んでいるのが超伝導量子ビットであるが、デバイスの動作温度は数十ミリケルビンと極低温であるため、実装のために大規模の装置が必要となり、普及に向けては課題が残る。ナノ結晶である QD や NV センターは、単一光子に量子情報を載せて情報制御を行うものであり、光子コヒーレンスの安定性や、光ファイバーを通した遠隔伝達容易性、極低温不要などの性質から、この分野における量子ビットとしての期待は高い。量子情報処理に用いる場合、単一光子 1 個を必要なタイミングで必要な方向に向けて簡便かつ確実に生成できることが求められており、また量子状態として光子の偏光、位相、スピンなどを制御する。QD や NV センターの発光は電子-正孔ペアの振動子強度で決まる速度で生じ、光放出は全方位に向けて等確率で起きる。実用化のためには、これらの光子源の発光特性を、要求を満たすように改善する必要がある。そのためこれまで、これら光子源をフォトニック結晶やメタマテリアルなどの共振器と組み合わせる研究が進められている。しかし、フォトニック結晶やメタマテリアルは製造に超高精度の電子ビームリソグラフィ技術を要する上、大面積の繰り返し構造であるため複雑な量子回路の形成には向かない。また、必ずしも共振器の理想的な位置に光子源を設置できないという技術上の困難がある。

2. 研究の目的

本研究では、光子発生源であるナノ結晶と単一メタマテリアル共振器を人工的な操作によって極めて高精度に位置制御して組み合わせることで、ナノオーダーサイズの革新的な極小単一光子放出器を実現することを目的とした。具体的には、右の概念図に示すような構成で単一メタマテリアル共振器とナノ結晶光子源を最適に近接させ、量子光学における所謂弱結合状態を作る。共振器中のプラズモンの共鳴周波数と光子源の発光周波数を一致させると、パーセル効果による高速な光子放出、発光効率の増大、プレーナー回路実現に必要な指向性を持つ光放射、量子演算に必要な偏光方向の制御、などが実現できる。単一光子源として必要とされる性能を実現するために、本研究では様々な形状の単一メタマテリアルを提案・検討すると共に、化学合成によって作製するコロイド型 QD を光源としてするための材料開発を行う。



この新しい構成を持つ極小な光量子素子は、これまでには無かったコンパクトな固体光量子回路の設計を可能とするものであり、光マイクロマシン、フォトニック結晶、シリコンフォトニクスなど他の既存技術との親和性も高いことから、同分野の新たな基盤技術になり得る。

3. 研究の方法

本研究ではコロイド型 QD を発光源として用いた。その理由を説明する。これまで量子情報技術の分野で多くの実績を挙げてきた半導体 QD は、エピタキシャル成長型の QD である。しかしこのタイプの QD は基板の面方位に依存する結晶成長のために、垂直方向と面内方向の両方の構造対称性が損なわれている。光子を用いた量子情報技術では量子もつれあい光子対の生成がキー・テクノロジーであるが、その為には高い 3 次元構造対称性を持つ QD が必要である。一方、コロイド型 QD は基板に拘束されない結晶成長をすることから 3 次元的に対称な構造を持ち、安価に大量生産でき、様々な波長で発光させることが可能である。今後の光エレクトロニクスの発展に寄与することが期待される新材料であり、採用することとした。

本研究ではそのコロイド型 QD を、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を用いたリソグラフィでシリコン基板上に形成したナノホールにトラップしてその位置を制御するとともに、QD の周囲に同じく SPM リソグラフィによって単一メタマテリアル共振器を作製する計画で開始した。素子の製造技術の開発と試作素子の評価を繰り返しつつ、並行して、光学シミュレーションを用いた素子構造の検討、及び好適な QD 合成技術を含む QD の位置制御技術の開発なども行なった。

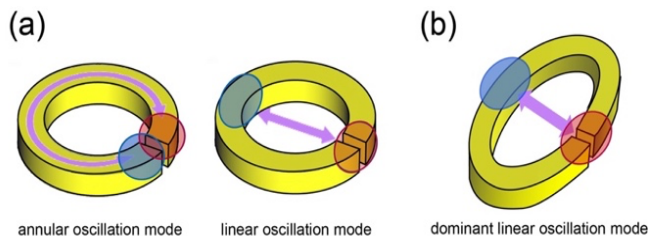
4. 研究成果

以下では、主な研究成果の概要を項目ごとに記述する。なお、当初はメタマテリアル共振器を製造するために SPM リソグラフィを利用していたが、3 年間の実施期間の中でより高い性能の素子を実現する研究を進める中で、最終的に選択したのは集束イオンビーム (FIB) 装置による Pt デポジションとそれをエッチングする製造方法であった。例えばこのような研究経緯の説明は重要度が低いため、スペースの都合で本報告書からは割愛する。

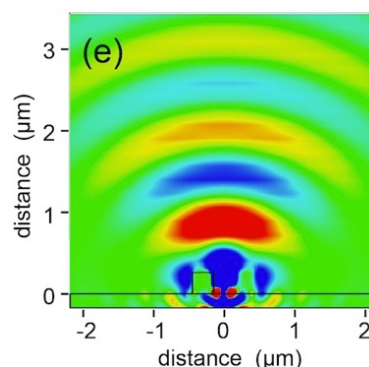
(1) 偏光制御型単一光子放出器の実現と性能実証

偏光は、単一光子を量子情報処理に用いる場合の主要な量子状態である。我々の提案している素子構造においては、放出光子の光学的な性質をメタマテリアル形状によって制御できる。本研究で我々は、コロイド型 QD と楕円形スプリットリング (SR) 型メタマテリアル要素を組み合わせた偏光制御型単一光子放出器を提案・試作し、予想される光学性能を実証した。

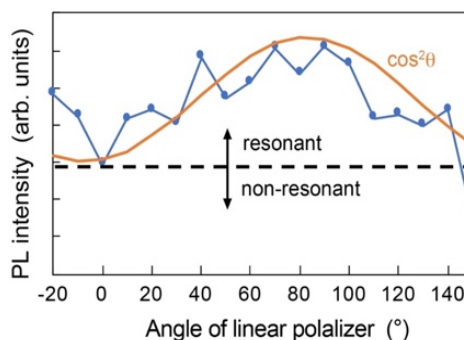
楕円形 SR 型メタマテリアル共振器で誘起される表面プラズモンは、円形 SR 型メタマテリアルと異なり、特定のモードが優先的に選択される点に特徴がある。円形 SR 型メタマテリアル要素では、円環状の電荷振動モードと面内における電気分極振動モードの 2 種類の電界振動が併存する (右図 (a))。円環状の電荷振動では面に垂直な振動磁場が発生し、面内方向に電磁波放出が生じる。面内電気分極では面内の振動電界が発生し、垂直方向に電磁波放出が生じる。楕円形 SR 型メタマテリアル要素では、等方的でない形状のため円環電流が流れにくく、面内の電気分極モードが優位となる (右図 (b))。その結果、偏光方向が制御された電磁波の垂直放射が生じると見込まれる。



波長 1.3 μm の光源を仮定し動作特性をシミュレーションして、素子の最適構造を設計した。最適化された楕円形メタマテリアル共振器の直上における単位面積あたりの電界強度は、最適化された二重円形メタマテリアル共振器の約 2.8 倍であった。また、右図のように、楕円形メタマテリアル共振器は発光の指向性も優良であることが確認された。3つの振動方向に対する電界強度の共振器厚への依存性を調べたところ、いずれの厚さにおいても、短軸方向の電界強度が他の2方向より強いことが示された。これは短軸方向の電界振動が優先的に生じるためであり、偏光が1方向に制御されることを示している。また、共振波長が同一の場合、楕円形メタマテリアル共振器の長軸は円形メタマテリアル共振器の直径より大きくなり、放出後の光モードの広がりが抑制され、指向性が向上する。更に短軸側で光源とメタマテリアル共振器が近接するため、電界とのカップリングが強まる。



以上の設計に基づき、FIB リソグラフィを用いて Pt 製メタマテリアル製の素子を作製した。試作した楕円形メタマテリアルの設計値との寸法誤差は 50 nm 以内であった。光源として、メタマテリアル共振器の内側に 2×10^6 個程度のコロイド型 PbS QD をトラップした。提案している素子では本来、メタマテリアル共振器内側の中心部にナノホールを形成し単一 QD 光源を配置するか、あるいは後述するシリカコート QD 1 個をメタマテリアルにトラップさせるところであるが、今回はメタマテリアル共振器の共振器特性を評価するためにこのような素子構造とした。素子の光学評価によって、メタマテリアル要素との共振によって QD 発光のスペクトル幅が狭くなったこと、発光寿命が短くなったことを確認した。右図には、発光する素子の光路上に置いた直線偏光子の角度と観察された光強度との関係を示した。ここで角度は、楕円メタマテリアルの長軸方向をゼロとした。 $\cos^2 \theta$ に従う強度変化が観察され、最大の発光強度が 90° 付近で得られた。これは、楕円形 SR 型メタマテリアル要素との共振によって、QD からの発光がシミュレーション通り短軸方向に偏光制御されたことを示唆している。測定データの最小強度がゼロでなかったのは、メタマテリアル要素の外側の共振しない位置に存在した QD に起因した発光であると理解される。



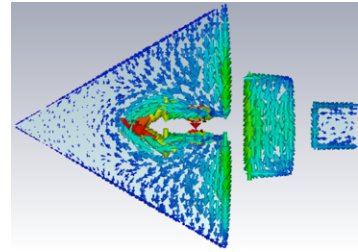
以上のように我々は、楕円形メタマテリアル要素を用いる偏光制御型単一光子放出器を新たに提案し、試作を行なって基本動作を確認した。この素子では円環共振モードが抑制され、短軸方向の電界振動が優先的に生じた結果、特定の偏光を持つ光放出が行われる。シミュレーションによって素子寸法を最適化した後、FIB リソグラフィによって素子を試作した。実際に QD 発光とメタマテリアル要素とが共振している光学特性が観察でき、発光の偏光方向が制御されたことも確認された。楕円形 SR 型メタマテリアル要素と単一の QD を組み合わせた構造は、量子演算に必要となる偏光制御型単一光子放出器として使用できる可能性が示された。

(2) 横方向に光子放出を行う単一光子放出器の提案と試作

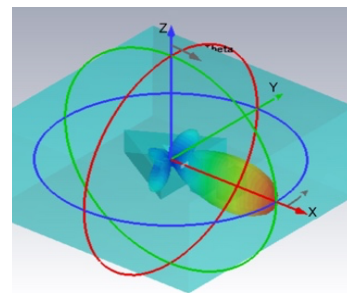
横方向へ光子を放出する単一光子源は、プレーナー型固体量子回路の実現に好適である。我々は以前に、光導波路に接続されたマイクロ光共振器と光子源としての単一 QD とを組み合わせた横方向への単一光子放出器を提案しているが、高度で複雑な製造技術が必要であった。また、スプリットリング (SR) 型メタマテリアル要素と単一 QD とを組み合わせた単一光子素子も提案しているが、光子の放出は上方に限られていた。我々は本研究において、三角形 SR とコロイド型 QD

を組み合わせ、それを光学ポリマー（PMMA：ポリメチルメタアクリレート）製の中空膜に担持させる構成によって、光導波路が不要で指向性よく光子放出する素子が製造できることを見出した。この素子構成は、FIB リソグラフィと犠牲層エッチングを利用して実現することができる。

まず、有限差分時間領域法を用いた光学シミュレーションによって素子構造の検討を行なった。その際に使用する光源として、現在の光通信帯波長である 1300nm (230.6THz) で発光する QD を想定した。共振器を構成する材料は FIB リソグラフィで実現可能な Pt とした。一重及び二重四角形 SR、円形ピラー型 SR、Euro-shaped resonator など、様々な形状の SR 構造を検討した結果、右図に示すような三角形 SRR が、作製が比較的容易で光放出の指向性も良いことがわかった。三角形の 1 辺にスリットが入っており、そのスリット間に光源を配置する場合、図のような電界共振が起こり、右方向に光が放出される。この三角形の一片の長さは約 700nm であり、FIB で作製することができる十分な大きさを有している。また図のように、ナノアンテナをスリットの出口に付けることで性能が向上することを確認した。ナノアンテナなしの場合は、最適化した構造で 227.8 THz に共振する光を 3.68 dBi の指向性で横方向に放出できる。ナノアンテナをつけた場合は、235 THz に共振する光を 7.63 dBi の指向性で横方向に放出できる。

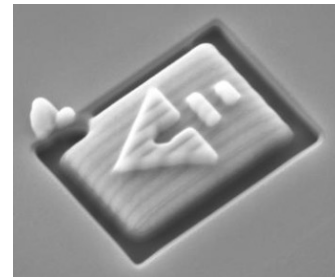


ここまでの光学シミュレーションでは SR の周囲を真空と仮定していたが、実際に作製可能な構造として、SR を PMMA 製の薄膜内に担持させる構成を検討した。その結果、PMMA 膜に担持させる構成によって更に性能が向上することが判明した。構造を最適化した結果、229.2 THz に共振する光を 8.36 dBi の指向性で横方向に放出できることが判明した。この際の光放出の様子を右図に示す。光が放出される方向は、PMMA の厚さよりかなり狭い領域であることが示されている。また、光導波路などの横方向の光閉込め構造が無いのにもかかわらず、光は非常に狭い領域に向かって指向性よく放出されることが分かる。



スピンコートによって PMMA

素子の試作を行なった。まず Si 基板の表面を熱酸化したのち、膜を形成しておく。三角形 SR を FIB リソグラフィによって PMMA 膜上に形成したのち、さらに PMMA 膜で覆い、最後に犠牲層エッチング法に従って酸化膜を除去して、PMMA 膜を浮遊させた中空構成を持つ素子を作製した。最終的に三角形 SR のスリット位置の PMMA 膜上に FIB によってナノホールを形成し、そこに後述するシリカコート量子ドットをトラップすることで、光子源を位置制御することができる。右図は、PMMA 膜上に形成した三角形 SR の SEM 像である。非導電性膜の PMMA 上でも適切にキャリアのチャージアップを防ぐことで、FIB リソグラフィが実施できることを確認した。



以上のように我々は、QD と SRR を組み合わせる構造において、横方向に指向性を持つ良好な光子放出器が実現できることを見出した。シリコン基板上に形成できることも含め、簡便な構造で横方向に量子ドットからの光を指向性よく放出できる本構造は、光子を利用したプレーナー型固体量子回路を実現する際に有効であると期待される。

(3) コロイド型 QD のシリカコーティング技術

単一のコロイド型 QD をシリカコーティングする技術は、QD 中における電子波動関数の状態をほとんど変えることなく、QD をハンドリングしやすい大きなサイズのものへと改良する技術である。本研究においても、メタマテリアル要素と単一 QD の結合状態制御を容易にし、将来的には電子状態の異なる QD を基板上の任意の位置に配列させることで量子回路の実現を可能にする技術となるなど、コロイド型 QD の応用可能範囲を拡大する重要な要素技術の一つである。以下では、我々が本研究のために実施したシリカコート QD に関する技術開発の成果を述べる。

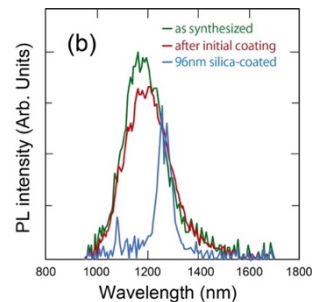
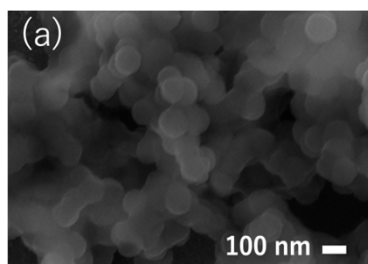
① 熱分解法によるコロイド型 QD の保護コーティング技術の検討

我々は、テトラエトキシシラン (TEOS) を有機溶媒中で熱的に強制分解して QD 表面をシリカコーティングしたのち、よく知られた逆ミセル法で厚いシリカシェルを形成することで、大きなサイズのシリカコート QD を、発光効率を維持したまま作製できることを見出した。

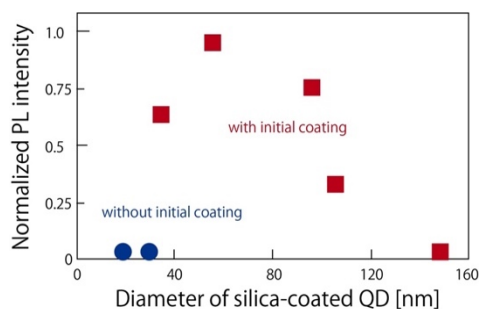
コロイド型 QD は一般に、シリカコーティングによって発光強度が低下する。我々はシリカコーティングによる光学特性劣化の原因が、逆ミセル法を実施する際に水が QD 表面に直接接触することにあると考え、逆ミセル法の実施前に表面を保護する多段階コーティングを試みた。まず、トルエン溶媒にオレイルアミンと TEOS を加え 110°C で熱的に TEOS を強制分解することで、オレイン酸配位子を有する PbS QD に初期的な保護コーティングを施す。次いでこの QD に、逆ミセル法を追加実施する。この多段階シリカコーティングで作製された試料の構造及び光学特性を、逆

ミセル法だけで作製された試料と比較した。

右図(a)は、2段階シリカコーティングによって作製した試料の SEM 像の例である。直径 100~120 nm のシリカコート QD が観察される。右図(b)は、この試料の各製造段階におけるフォトルミネッセンス (PL) スペクトルを比較したものである。第1段階の熱強制分解コーティングの段階で発光強度はほとんど低下しておらず、第2段階のコーティング後も波長はシフトしたものの発光強度の劣化がこれまでに比べて格段に抑制された。



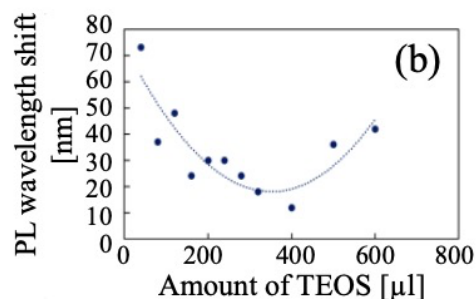
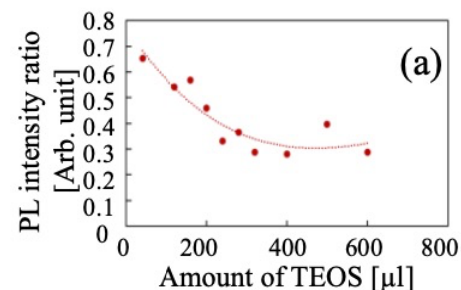
様々な粒径のシリカコート QD の PL 測定を行った。粒径と PL 強度との関係を右図に示す。粒径 90nm 以上の試料は全て、3段階シリカコート試料である。初期的保護コーティングを行った場合、発光強度は粒径が大きくなるにつれて徐々に低下し、110nm を超えたあたりから急激に低下した。粒径が 150 nm 程度の試料では発光が見られなかった。一方、保護コーティングをしない比較試料では、粒径 20nm 程度でも発光がほとんど観察されなかった。



② 保護コーティング条件の改良

初期的な保護コーティングを施すことで QD へのダメージを抑える技術を改良するため、熱強制分解法における各種条件の影響を調査した。

熱強制分解法における加熱温度を 100°C~170°C、加熱時間を 1h~4h の範囲で変化させた場合の、QD の PL 強度の変化を調べたところ、加熱温度が高く加熱時間が長いほど PL 強度が低下する傾向が確認された。右図(a)には、加熱時間 130°C、加熱時間 1 時間における、TEOS 量と PL 強度の関係を示す。TEOS 量が増えるほど PL 強度は低下するが、特定の TEOS 量で下げ止まった。右図(b)には、保護コーティング前後の PL 波長変化を示す。保護コーティングによって PL 波長はレッドシフトしたが、波長変化の極小値が得られる TEOS 量があることが判明した。また、強度低下が下げ止まり、波長シフトが極小値を取る TEOS 量以上では、QD が沈殿せず数日にわたり安定して分散状態が保たれた。保護コーティングが QD 表面全体に形成したことで、QD 同士の凝集が起こり難くなったと考えられる。

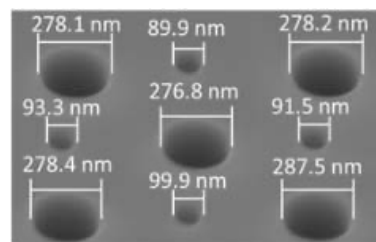


安定して分散状態が保たれる QD を低温保存し経過観察したところ、3 日程度で PL 強度と波長が共に保護コーティング前と同程度まで回復する現象がみられた。この現象を利用することで、今後、シリカコート QD の発光効率をさらに改善することが可能であると考えられる。

③ QD の位置制御技術の開発

Si 基板にナノホールを形成してシリカコート QD をトラップし、位置制御する技術の検討を行なった。

研究開始当初は SPM リソグラフィを利用してナノホールを形成する技術に取り組む計画であったが、上記に示した 2 種類の単一光子放出素子の製造方法を考慮し、FIB 加工を用いる方法に切り替えた。良好に発光する 100 nm を超えるサイズのシリカコート QD が得られる可能性が確認できたため、Si 基板と PMMA 基板に直径 300 nm、深さ 300 nm、及び直径 100 nm、深さ 100 nm のナノホールアレイを作製した (右図)。この加工基板に対して、平均粒径 120 nm と平均粒径 50 nm のシリカコート QD を、この順番にトラップさせた。その結果、大きな QD は大きなナノホールに、小さな QD は小さなナノホールへと、所望の位置制御ができることが確認された。完全には埋まらなかった大きなナノホールに小さな QD がごく少量トラップされた様子も観察されたが、今後、より適切なサイズの組み合わせによって、位置制御性は比較的容易に改善できると思われる。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mukai Kohki, Wanibuchi Ryosuke, Nunomura Yuto	4. 巻 35
2. 論文標題 Improved performance of solar cells using chemically synthesized SnSe nanosheets as light absorption layers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science: Materials in Electronics	6. 最初と最後の頁 680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10854-024-12366-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mukai K., Ikeda S., Pribyl I., Sato H., Masuda I.	4. 巻 685
2. 論文標題 Improvement of solar cell performance using PbS quantum dot superlattices with iodine ligands	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects	6. 最初と最後の頁 133285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.colsurfa.2024.133285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mukai K., Pribyl I., Nakagawa T., Uchiyama K.	4. 巻 63
2. 論文標題 Polarization-controlled ultrasmall single photon emitter combining a quantum dot and an elliptical split ring metamaterial element	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 02SP37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad1256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mukai Kohki, Suzuki Sena, Roppongi Haruto	4. 巻 62
2. 論文標題 Improvement of emission intensity of PbS quantum dots in thick silica shell by initial coating in organic solvent	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 108001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acfb63	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mukai Kohki, Nakayama Kevin	4. 巻 61
2. 論文標題 Study on chemical synthesis of SnS ₂ nanosheets and nanocrystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3d0d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mukai Kohki, Hirota Keishiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Decrease in crystallization temperature of Ga ₂ S ₃ in nanowire structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 60901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac6a34	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mukai Kohki, Masuda Ibuki	4. 巻 61
2. 論文標題 Theoretical study of multi-band solar cells with a single PbS quantum dot superlattice film as a light absorption layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 102005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac8aeb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mukai Kohki, Hirota Keishiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Study on the chemical synthesis process of Ga ₂ S ₃ nanowires and their ultraviolet light sensor properties	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CrystEngComm	6. 最初と最後の頁 7427 ~ 7439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2CE01060G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Jun, Suzuki Sena, Hatta Reo, Mukai Kohki	4. 巻 62
2. 論文標題 Improvement of monodispersity of PbS quantum dots by filtration with organic solvent-resistant polyamide hollow fiber membranes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb26e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 向井剛輝	4. 巻 31
2. 論文標題 超高効率なタンデム型太陽電池の構造の簡素化とその製造技術 <タンデム型量子ドット超格子太陽電池>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 クリーンエネルギー	6. 最初と最後の頁 27-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 向井剛輝	4. 巻 33
2. 論文標題 超高効率のマルチバンド量子ドット超格子太陽電池 --- 提案とその性能予測 ---	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 クリーンテクノロジー	6. 最初と最後の頁 29-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mukai Kohki, Ikeda Kosuke, Hatta Reo	4. 巻 61
2. 論文標題 Improvement of monodispersity and shape symmetry of silica shell for PbS quantum dots by introducing surface silanization and adjusting reverse micelle size	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 15001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3d19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 田中潤、中村亮太、向井剛輝
2. 発表標題 ナイロン中空系膜を用いた量子ドットの膜分離・分級技術
3. 学会等名 第69回高分子研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Ikeda, I. Pribyl, I. Masuda, and K. Mukai
2. 発表標題 Improvement of PbS quantum dot superlattice solar cells by using iodide ligands
3. 学会等名 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 I. Pribyl, T. Nakagawa, K. Uchiyama, and K. Mukai
2. 発表標題 Polarization-controlled single-photon emitter combining a colloidal quantum dot and an elliptical split-ring metamaterial element
3. 学会等名 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田征弥、増田伊吹、向井剛輝
2. 発表標題 ヨウ素配位子置換によるPbS量子ドット超格子太陽電池の高性能化
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤友哉、吉國希望、池田征弥、増田伊吹、向井剛輝
2. 発表標題 PbS量子ドット超格子太陽電池の実現に向けたバンドダイアグラムの検討
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉國希望、池田征弥、増田伊吹、向井剛輝
2. 発表標題 ヨウ素配位子を用いたPbS量子ドット超格子太陽電池実現のための諸検討
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 城詰大翔、プリブル一、内山恭介、向井剛輝
2. 発表標題 PbS量子ドットの厚膜シリカコーティング形成のための初期シラン化とTEOS熱強制分解法の検討
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 プリブル一、内山 恭介、向井 剛輝
2. 発表標題 量子ドットと楕円形スプリットリング型メタマテリアルを組み合わせた偏光制御単一光子放出器
3. 学会等名 ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 池田征弥、増田伊吹、向井剛輝
2. 発表標題 ヨウ素配位子置換によるPbS量子ドット超格子太陽電池の高性能化
3. 学会等名 ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中潤、中村亮太、向井剛輝
2. 発表標題 ナイロン中空糸膜を用いた量子ドットの膜分離・分級技術
3. 学会等名 第69回高分子研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jun Tanaka, Sena Suzuki, Reo Hatta, Kohki Mukai
2. 発表標題 High monodispersity of PbS quantum dots separated using hollow fiber membranes
3. 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hayato Sato, Yuto Nunomura, Kohki Mukai
2. 発表標題 Study on The Coated Solar Cells using Chemically Synthesized SnSe Nanosheets
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内山 恭介、中川 大樹、プリブル 一生、向井 剛輝
2. 発表標題 スプリットリング型微小光共振器とコロイド型量子ドットとの組み合わせによる横方向単一光子放出器
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 六本木 陽登、向井 剛輝
2. 発表標題 TEOS熱強制分解を用いた2段階シリカコーティングによるPbS量子ドットのサイズ制御と高発光効率化
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 プリブル 一生、中川 大樹、内山 恭介、向井 剛輝
2. 発表標題 量子ドットと楕円形スプリットリング型メタマテリアルを組み合わせた偏光制御単一光子放出器
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 内山 恭介、中川 大樹、プリブル 一生、向井 剛輝
2. 発表標題 スプリットリング型光共振器と量子ドットを組み合わせた横方向単一光子放出器
3. 学会等名 ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増田伊吹、向井剛輝
2. 発表標題 PbS 量子ドット超格子構造をもつ中間バンド型太陽電池の理論的検討
3. 学会等名 ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増田伊吹、向井剛輝
2. 発表標題 PbS量子ドット超格子膜を光吸収層として用いた中間バンド型太陽電池の理論的検討
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山ケビン、向井剛輝
2. 発表標題 毒性金属を含まない赤外発光コロイド型量子ドットとしてのSnSeナノ結晶の検討
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木聖七、八田伶音、向井剛輝
2. 発表標題 中空糸膜を用いたコロイド型量子ドットの簡便な高均一化
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣田奎史郎、向井剛輝
2. 発表標題 Ga203ナノワイヤーの比較的低温熱処理における結晶構造の変化
3. 学会等名 春期応用物理学会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kevin Nakayama and Kohki Mukai
2. 発表標題 Study on chemical synthesis of SnSSe nanosheets and nanocrystals
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 向井剛輝 含む共著者54名	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 量子ドット分級用多孔膜、該多孔膜を用いた量子ドットの分級方法	発明者 向井剛輝、田中潤、 安藤秀仁、正木辰 典、中村亮太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-009572	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------