

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05256

研究課題名（和文）圧力印加による量子ドット3次元超格子の創製とドット間協力現象に基づく光機能の開拓

研究課題名（英文）Pressure-induced fabrication of 3D quantum dot superlattices and development of novel optical functions based on interdot cooperative phenomenon

研究代表者

濱中 泰（Hamanaka, Yasushi）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：20280703

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：量子ドットとは半導体材料の超微粒子のことであり、そのサイズは1～10ナノメートル程度（10億分の1から1億分の1メートル）である。量子ドットは優れた光学特性を示し、新しい発光デバイス材料や太陽電池材料として注目されている。研究の目標は、原子を規則的に配列した結晶と同様に、多数の量子ドットを周期的に集積した超格子とよばれる人工的な構造体を作製し、単体の量子ドットでは見られない新規な光学特性を発現させることと、その特性の解明とした。本研究では、量子ドットから組み立てる超格子の作製法を開発した。また、圧力を加えて量子ドットの間隔を変化させ、ドット間の結合の強さを制御することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノテクノロジーの進歩は目覚ましいが、ナノサイズの超微粒子（量子ドット）を規則的に配列した超格子を作製することは、依然として難易度が高い。超格子的構造であっても、量子ドット間の電子的結合がないと新奇な特性は生まれない。本研究では、真の量子ドット超格子の新しい作製法の開発に成功し、ドット間の結合を精密に制御する技術の端緒を得た。この成果には、量子ドット超格子の特性解明を試料作製法と研究手法の提案によって強力に後押しする学術的意義がある。また、このような新規な人工材料の研究は、高効率な太陽電池や画期的な光・電子デバイスの実現に向け、材料開発の面からSDGsの目標達成に貢献する社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Quantum dot is an ultrafine semiconductor particle with dimensions in the 1-10 nanometer (1/1000000000-1/100000000 meter) range. Due to their outstanding optical and electronic properties, quantum dots attract attentions as potential materials providing novel photonics devices such as next-generation light emitting sources and solar cells. In this project, we have developed new construction methods of the quantum dot superlattice (artificial structure built from periodically and densely arranged quantum dots) with novel optical functions which are not characteristic of isolated quantum dot. Quantum dot superlattices were successfully constructed and interdot coupling could be controlled by precisely changing the interdot distance via mechanical compression.

研究分野：光物性、ナノ材料科学

キーワード：量子ドット 超格子 半導体ナノ粒子 3次元周期構造

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

半導体超微粒子は量子ドットと呼ばれ、ナノスケールの空間への電子の閉じ込めに起因する離散的なエネルギー準位構造および波動関数の対称性が原子のそれに類似するため、量子ドットを周期配列して人工結晶を作るアイデアが以前からある。この概念は1980年代に「スーパーアトム」として提唱された[1]。半導体超薄膜を多層に積層して作るいわゆる半導体超格子の周期性が一つの方向に限られているのに対して、このような人工結晶は全方位に渡って周期性を有する3次元超格子と見なすことができる。実験に先立って理論研究が進められ、秩序構造をもった「量子ドット3次元超格子」中のドット間には協力的な相互作用が働き、単体の量子ドットや量子ドットの無秩序な集合体には見られない新奇な電子物性・光学特性が現れることが指摘されている[2]。

約30年前から、逆ミセル法やホットインジェクション法などのコロイド化学の手法を使った量子ドット合成法が発展し、様々な半導体材料の良質な量子ドットを容易に大量合成できるようになってきた[3]。その結果、飛躍的に高い性能を持つ量子ドット太陽電池など様々な光デバイスが提案され、量子ドットは基礎物性の研究対象から実用的な材料応用の研究対象へと進化してきた[4]。すでに量子ドットを蛍光体として使った高演色ディスプレイ、蛍光バイオマーカーは市販されるに至っている。現在、コロイド量子ドットを使った様々な先進光デバイス・電子デバイスの研究が活発に進められているが、これらのデバイスにはコロイド状の量子ドットを集積した薄膜が使われる。量子ドット集積膜では、デバイス特性に関わる量子ドット間の励起エネルギー移動・励起キャリア移動といった現象が見出されている[5, 6]。一方、薄膜中の量子ドットが3次元超格子を形成すれば、波動関数の共鳴結合による超格子全体に渡るミニバンドの形成、多数の量子ドットのコヒーレント結合による協力的な超蛍光現象など、超格子特有の新しい電子状態や光機能が期待される[7]。量子ドット3次元超格子の電子物性・光物性の理解は次世代デバイスを実現するための光機能開拓の鍵となると考えられる。しかし、量子ドット3次元超格子の作製、および、その精密な構造制御の技術的ハードルは高いため、このような新奇な物性の観測例は極めて少なく、研究は進んでいない。

これまでに、コロイド量子ドットを集積して、数 $\mu\text{m}$ ～数 $10\mu\text{m}$ のサイズの3次元周期配列構造体を作製した例は少なくない。その作製法は、コロイド溶液の溶解度制御による量子ドットの凝集、もしくは溶媒の気化による量子ドットの凝集といった自己組織化である[8]。また、スピンコートやドロップキャストにより、量子ドットが周期的に配列した薄膜を基板上に作製した例もある[9, 10]。しかし、超格子に特有のミニバンドの形成が確認された例は、まだほとんどない[11]。その理由は、多くの場合に周期構造が形成されていても隣接する量子ドットの間隔が広いためであり、ドット間相互作用が弱く電子状態の結合が生じないせいである。また、3次元超格子に期待される集成的・協力的な電子物性・光物性の観測例はきわめて少ない[7]。量子ドットどうしを十分近づけてドット間相互作用を強化することが、協力的相互作用を発現させるために重要である。一般にコロイド量子ドットには表面保護のために有機配位子が表面に結合している。そのためもあり、先行研究で使われてきた量子ドットの自己組織化的な集積で得られる超格子では、量子ドット間隔が広く、精密にドット間隔を制御することが難しい。

### 2. 研究の目的

本研究申請時の当初の研究目的を述べる。本研究では、精密なドット間距離制御が可能な量子ドット3次元超格子の新規作製法を開発し、その光物性を研究する。精密な構造制御の特徴を活用して、超格子構造に特有の協力的な量子ドット間相互作用を深く理解し、新しい光機能を開拓する。そこで、高圧発生技術を応用し、量子ドット集積体を圧縮して量子ドットを配列させ、ドット間距離を精密に制御する方法を着想した。

- ・ 従来使われてきた自己組織化法では不可能な、精密に量子ドット間隔が制御された量子ドット3次元超格子を、圧力印加法により作製する。
- ・ 量子ドット3次元超格子に特有の光物性を観測し、その発現機構を解明して、量子ドット間の協力的相互作用を理解する。
- ・ 光デバイス応用のニーズに適した量子ドット3次元超格子構造の設計指針を確立する。

### 3. 研究の方法

本研究では、量子ドット3次元超格子の作製法として、高圧印加法と自己組織化法、およびディップコート法を選択した。

(1) 高圧印加法では、ダイヤモンドアンビルセル (DAC) を使って量子ドットの凝集体を圧縮して、最密充填構造に配列させることを狙いとした。圧力媒体には高圧下でも凍結しにくいエタ

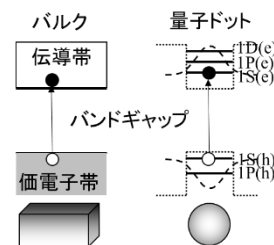


図1 量子ドットのエネルギーと波動関数

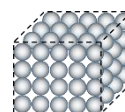


図2 人工結晶：  
量子ドット超格子

ノール/メタノール混合溶媒を使った。極性溶媒であるため、凝集体が分解しない利点もある。圧力測定はルビー蛍光法でおこなった。この方法ではダイヤモンドアンビルを通して X 線やレーザー光を導入できるので、高圧印加中に X 線回折測定、分光測定が可能である。そこで、圧力印加によって量子ドット間隔を精密に制御しながら量子ドット凝集体の発光スペクトルを測定して、ドット間相互作用に現われる影響を調査した。また、圧縮後に試料を取り出して、超格子の形成の成否を確認した。実験には、CdSe 量子ドット（合成法は渡邊厚介博士（現九州大学）より指導）と CuInS<sub>2</sub> 量子ドットを合成して用いた[12]。

粒径約 3nm の CdSe 量子ドットと、これをコアとして ZnCdS/ZnS のダブルシェルを付与した CdSe/ZnCdS/ZnS コアシェル量子ドットを使用した。シェル全体の厚さは約 2nm である。これらの量子ドットの表面にはヘキサデシルアミン（HDA）配位子が結合している。一方、CuInS<sub>2</sub> 量子ドットの粒径は約 3nm で、配位子はドデカンチオール（DDT）である。これらの量子ドットは無極性溶媒によく分散するが、極性溶媒中では分散せず凝集する。高圧下での粉末 X 線回折（WAXS）と小角散乱（SAXS）測定を実施し、量子ドットの結晶構造および格子定数の変化と、ドット間距離を評価した。測定は KEK フォトンファクトリーの BL18C で実施した。同時に、同じ圧力印加条件での発光スペクトル測定をおこなった。また、ドット間相互作用以外の圧力効果の影響を調べるため、凝集していない分散状態の量子ドットの高圧実験もおこなった。その際の圧力媒体には、量子ドットをよく分散する石油エーテルを使用した。

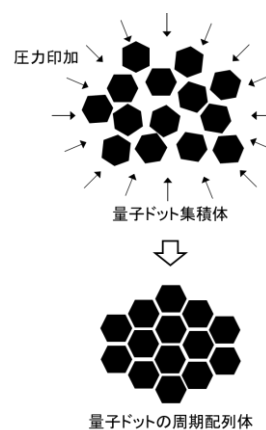


図3 圧力印加により作製する量子ドット3次元超格子

(2) 自己組織化法では、ハロゲン化鉛ペロブスカイトの CsPbI<sub>3</sub> 量子ドットを対象とした。既報を参照して立方体形状の CsPbI<sub>3</sub> 量子ドットを合成した[13]。表面配位子はオレイン酸（OA）、オレイルアミン（OLA）である。超格子作製に用いる前に、あらかじめ貧/良溶媒を使った再沈殿法を繰り返し量子ドットのサイズを揃え、15nm の量子ドットを選択した。量子ドットをトルエンに分散させシリコン基板に滴下し、トルエンを蒸発させて超格子形成を試みた。ハロゲン化鉛ペロブスカイトは湿気に弱く、室内の大気中では相変化する。そこで、超格子形成の工程は窒素ガスで置換したグローブボックス中の湿度 15%以下の環境でおこなった。基板上に形成された量子ドット3次元超格子の形状、サイズ、量子ドットの周期配列構造は FE-SEM で調べた。顕微分光で単一超格子を選択し、発光スペクトルと時間分解発光スペクトルを測定した。励起光源として、フェムト秒パルスチタンサファイアレーザーの第二高調波（波長 400 nm、パルス幅 ~100 fs、5 MHz 繰り返し）を使用し、分光器に取り付けた冷却 CCD 検出器でスペクトルを、ストリークカメラで時間分解スペクトルを測定した。試料の温度は、室温と 77K に制御した。

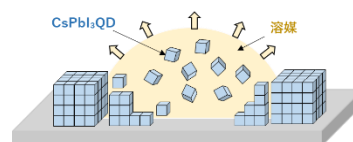


図4 自己組織化法により作製する量子ドット3次元超格子

(3) ディップコート法により、基板上に CdSe コア量子ドット（粒径 3.1 nm）と CuInS<sub>2</sub> 量子ドット（粒径 1.8 nm, 2.4 nm, 3.4 nm）を堆積し、3次元超格子の作製を試みた。ヘキササンなどの無極性溶媒に量子ドットを分散させてガラス容器に入れ、分散液中にガラス基板を垂直に浸漬させた。このガラス基板をディップコーターによって鉛直に引き上げて、基板表面に量子ドットを薄膜状に堆積した。基板の引き上げ速度は 1 μm/s とした。作製した量子ドット薄膜中の量子ドットの配列構造、ドット間距離を調査するため、斜入射小角 X 線散乱（GISAXS）測定をおこなった。GISAXS の測定には分子科学研究所・機器センターの多目的 X 線回折装置（Malvern Panalytical Empyrean）を使用した。また、量子ドット薄膜の吸収スペクトル、発光スペクトル、発光寿命を測定した。

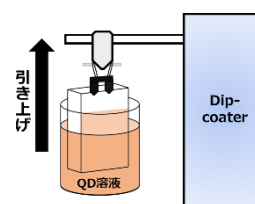


図5 ディップコート法

#### 4. 研究成果

(1) WAXS により圧縮に伴う CuInS<sub>2</sub> 量子ドットの格子定数の変化を測定し、体積変化率からドット径の収縮と圧力の関係を算出した。また SAXS によってドットの中心間距離の変化を求めた。両者を使って、ドットの表面間距離と印可圧力の関係を見積もった。その結果を図6に示す。約 2 GPa までにドット間隔が大幅に減少し、その後は緩やかに減少する。一方、圧縮に伴い、量子ドットの発光ピークエネルギーが増加した。しかし、凝集体と分散状態では、増加の挙動に差が見られた。同じ圧力で両者の発光ピークエネルギーの差をとると、ドット自体の格子収縮の影響が相殺され、凝集体に特有のドット間隔の減少に伴うエネルギー変化だけを抽出できると考えられる。このようにして得られた発光のエネルギー変化とドット表面間距離の関係を図7に示す。隣接するドットが接近する初期段階にエネルギー差が大きく増加している。これ

は凝集体内でのドット間の相互作用の強化を示唆している。今後、発光寿命の変化を調べれば、ドット間相互作用のメカニズムに関する詳しい知見が得られると考えられる。減圧後の量子ドットを DAC から取り外して超格子の形成の可否を評価することは技術的に困難であった。

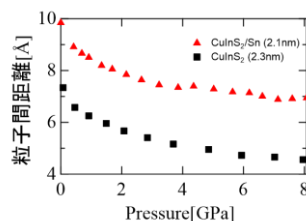


図6 ドット表面間距離の変化

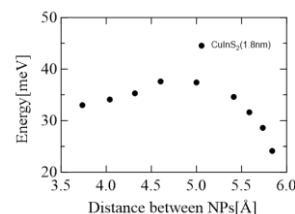


図7 ドット間距離とエネルギー

CdSe 量子ドットについては、6 GPa までの圧力印可時にコアシェルドットの凝集体の発光強度が加圧に伴って単調に3倍以上増加した。6 GPa を超えると急減したが、CdSe の構造相転移により岩塩構造に変化したためと考えられる。一方、分散体ではこのような発光強度の増強は観測されず、6 GPa まで強度はほぼ一定であった。この結果は、凝集体に限って加圧により非輻射再結合が抑制されることを示唆している。量子ドットの圧力による発光増強はほとんど報告がない新規な現象であり、メカニズムの解明が急務である。

(2) 図8のSEM画像からわかるように、基板には数 $\mu\text{m}$ 角の正方形板状の量子ドット集合体が形成されていた。各量子ドットが単純立方格子状に一定の周期で整然と配列した構造が確認できた。周期と量子ドットのサイズから見積もったドットの表面間隔は約2.2 nmであり、この値は配位子の長さに一致していた。このように、自己組織化法によるCsPbI<sub>3</sub>量子ドット3次元超格子の作製に成功した。

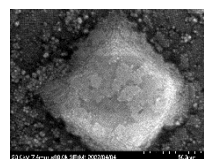


図8 SEM像

単一超格子を一つずつ選択して発光特性を評価した。室温で観測すると、発光スペクトルは溶媒に分散した孤立状態のドットと差がなく、基板の超格子が形成されていない箇所(非超格子)で得られるスペクトルとも差がなかった。しかし、77 Kに冷却して測定すると、非超格子のスペクトルがシングルピークなのに対して、超格子の発光スペクトルには約30 meV低エネルギー側に別のピークが存在し、ダブルピーク形状であった。図9に示す通り、超格子ごとに2つのピークの強度比は大きく異なっていた。

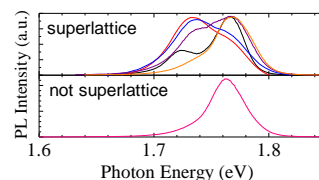


図9 発光スペクトル

超格子の時間分解発光スペクトルを図10に示す。超格子だけにみられる低エネルギーピークの発光が長く続くことがわかる。各遅延時間の発光スペクトルを2成分のガウス関数でフィッティングして分離し、それぞれのピークの発光寿命を求めた。多数の超格子のデータを解析して得られた発光寿命は、超格子特有の低エネルギーピークが2~4 ns、高エネルギーピークが1~1.8 nsであった。また、励起光強度依存性を調べると、低エネルギーピークは飽和閾値が高かった。これらの特徴から、超格子だけに観測される低エネルギーピークは、ミニバンド間の電子正孔の再結合によると結論した。超格子で期待される超蛍光の場合、励起強度を上げると発光寿命が短縮するが、そのような特徴は観測されなかった。超蛍光を観測したとしている先行研究では10 K以下で測定している [7]。各量子ドットの双極子のコヒーレントな結合を引き起こすには、さらに低温にしてフォノンによるコヒーレンスの乱れを抑制する必要があると考えられる。

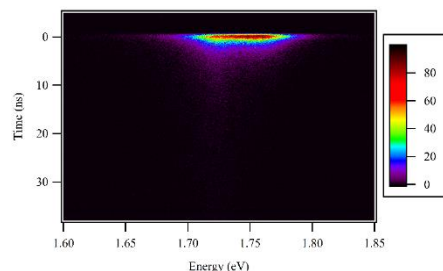


図10 時間分解発光スペクトル

(3) ディップコート法により作製したCdSe量子ドット薄膜のGISAXSパターンを図11挿入図に示す。リング状に規則的な回折点が現れた。これは量子ドットの周期配列構造からの回折と考えられ、回折点の出現は広い範囲に渡って方位がそろっていることを示している。図11に示す全方位に渡り積分した回折パターンには最密充填のfccの特徴が見られる。 $2\theta = 2^\circ$ 付近のピークを(111)ピークとして解析し、最近接の量子ドットの中心間距離を5.25 nmと決定した。これより表面間距離は約2.2 nmと見積もられ、有機配位子の長さとも矛盾がない。したがって、fccの格子点に量子ドットが配置した周期構造の量子ドット3次元超格子であると結論した。一方、ディップコート時の量子ドット分散液濃度が低い場合には、回折線が連続なリング状で回折点は見られなかった。微小な超格子ドメインが様々な方位をとって集合した構造と推測された。

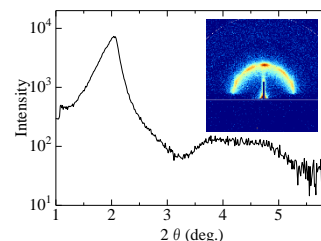


図11 GISAXSの結果

量子ドット薄膜と溶媒に分散した量子ドットの、発光励起(PLE)スペクトルを図12に示す。分散状態では、検出エネルギーの変化に伴ってPLEスペクトルピークがシフトした。これは、

バンドギャップに分布がある量子ドットの集団から、特定のバンドギャップのドットの発光だけを選択的に検出しているためである。しかし、薄膜の PLE スペクトルにはこのような顕著な差はない。つまり、薄膜は、どの量子ドットを励起しても同じエネルギーで発光した。薄膜が超格子となっていて、全体に広がったミニバンドが形成されているならば、この結果は妥当である。量子ドット 3次元超

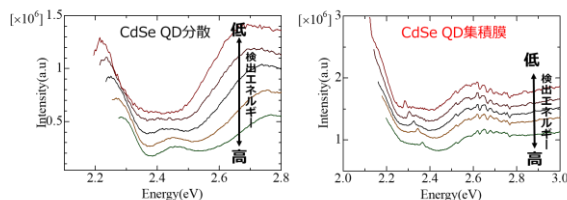


図 1 2 PLE スペクトル

格子のミニバンドの観測例は少ない。しかし、ドット間の励起エネルギー移動によって、どのドットを励起しても常に最もバンドギャップの狭い量子ドットにエネルギーが集まって発光していると解釈することもできる。量子ドット薄膜中では配位子が量子ドット間隔を制限しているため、HDA (C16) よりも短い配位子に交換すればドット間隔を詰めた量子ドット薄膜を作製することができる。ドット間距離を可変パラメータとすれば、量子ドット間相互作用について新たな知見が得られ、超格子のミニバンド形成の有無を判定できると考えられる。

CuInS<sub>2</sub> 量子ドット薄膜の GISAXS パターンには  $2\theta = 2\sim 3^\circ$  付近にリング状の 1 本の回折線が現れた。量子ドットの粒径に応じて回折線の角度は異なった。回折パターン全体の形状には CdSe 量子ドットと同様に最密充填の fcc の特徴が見られたため、このピークを(111)ピークとして解析し、最近接ドットの中心間距離から表面間距離を見積もった。その値は 1.3~1.6 nm となり DDT 配位子の長さに近い。したがって、CuInS<sub>2</sub> 量子ドット薄膜についても、fcc の格子点に量子ドットが周期的に配置されていると結論した。GISAXS パターンが連続なリング状なので、薄膜中にはこのような超格子ドメインがランダムな方位をとって存在すると考えられる。

CuInS<sub>2</sub> 量子ドット薄膜と溶媒に分散した量子ドットでは、吸収スペクトル形状は一致しており、バンド端付近の電子状態に差は見られなかった。つまり、薄膜においてミニバンドの形成は確認できなかった。一方、発光スペクトルを比較すると、薄膜の発光スペクトルは全体に低エネルギー側にシフトしていた。また、薄膜の発光寿命は分散状態の 1/3~1/7 程度と短かった。この 2 つの実験結果は、量子ドットに励起されたキャリアの緩和が、分散状態では同じドット内に限られるのに対して、薄膜では他のドットへのキャリア移動や励起エネルギー移動による緩和も競合して起きることを示唆している。薄膜と分散状態の、スペクトル分解して決定した発光寿命を使い、独自の手法でキャリア移動レートとエネルギー移動レートを切り離して評価した。その結果、この系のキャリア移動レートを、室温でおよそ  $2 \times 10^7 \sim 3 \times 10^7$  1/s と決めることができた。CuInS<sub>2</sub> 量子ドットに対してキャリア移動レートを示したのは本研究が初である。

#### <引用文献>

- [1] 井下 猛、渡辺 久恒、スーパーアトムの概念とその電子構造、日本物理学会誌、42 巻、1987、653-656.
- [2] O. L. Lazarenkova, A. A. Balandin, Miniband formation in a quantum dot crystal, J. Appl. Phys. 89, 2001, 5509-5515.
- [3] C. B. Murray, D. J. Norris, M. B. Bawendi, Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = S, Se, Te) semiconductor nanocrystallites, J. Am. Chem. Soc. Vol. 115, 1993, 8706-8715
- [4] F. P. G. de Arquer, D. V. Talapin, V. I. Klimov, Y. Arakawa, N. Bayer, E. H. Sargent, Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges, Science Vol. 373, 2021, caaz8541.
- [5] C. R. Kagan, C. B. Murray, M. Nirmal, M. G. Bawendi, Electronic energy transfer in CdSe quantum dot solids, Phys. Rev. Lett. Vol. 76, 1996, 1517-1520.
- [6] Y. Liu, N. Gibbs, J. Puthussery, S. Gaik, R. Ihly, H. W. Hillhouse, M. Law, Dependence of carrier mobility on nanocrystal size and ligand length in PbSe nanocrystal solids, Nano Lett. Vol. 10, 2010, 1960-1969.
- [7] G. Rainò, M. A. Becker, M. I. Bodnarchuk, R. F. Mahrt, M. V. Kovalenko, T. Stöferle, Superfluorescence from lead halide perovskite quantum dot superlattices, Nature Vol. 563, 2018, 671-675.
- [8] C. B. Murray, C. R. Kagan, M. B. Bawendi, Self-organization of CdSe nanocrystallites into three-dimensional quantum dot superlattices, Science Vol. 270, 1995, 1335-1338.
- [9] Y. Yu, C. A. Bosoy, C. M. Hessel, D. Smilgies, B. A. Korgel, ChemPhysChem Vol. 14, 2013, 84-87.
- [10] R. H. Gilmore, E. M. Y. Lee, M. C. Weidman, A. P. Willard, W. A. Tisdale, Charge carrier hopping dynamics in homogeneously broadened PbS quantum dot solids, Nano Lett. Vol. 17, 2017, 893-901.
- [11] D. G. Kim, S. Tomita, K. Ohshiro, T. Watanabe, T. Sakai, I. Chang, Kim H., Evidence of quantum resonance in periodically-ordered three-dimensional superlattice of CdTe quantum dots, Nano Lett. Vol. 15, 2015, 4343-4347.
- [12] T. Kino, T. Kuzuya, K. Itoh, K. Sumiyama, T. Wakamatsu, M. Ichidate, Synthesis of chalcopyrite nanoparticles via thermal decomposition of metal-thiolate, Mater. Trans. Vol. 49, 2008, 435-438.
- [13] F. Liu, Y. Zhang, C. Ding, S. Kobayashi, T. Izuishi, N. Nakazawa, T. Toyoda, T. Ohta, S. Hayase, T. Minemoto, K. Yoshino, S. Dai, Q. Shen, Highly luminescent phase-stable CsPbI<sub>3</sub> perovskite quantum dots achieving near 100% absolute photoluminescence quantum yield, ACS Nano Vol. 11, 2017, 10373-10383.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Yokoi Rin, Hamanaka Yasushi, Kuzuya Toshihiro	4. 巻 252
2. 論文標題 Size-dependent radiative recombination characteristics of isolated CuInS <sub>2</sub> nanocrystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Luminescence	6. 最初と最後の頁 119353 ~ 119353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jlumin.2022.119353	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 Suzuki Koichiro, Kuzuya Toshihiro, Hamanaka Yasushi	4. 巻 126
2. 論文標題 Luminescence Enhancement in CuInS <sub>2</sub> Nanoparticles through the Selective Passivation of Nonradiative Recombination Sites by Phosphine Ligands	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 16751 ~ 16758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.2c05187	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 Sato Kenshiro, Kuzuya Toshihiro, Hamanaka Yasushi, Hirai Shinji	4. 巻 62
2. 論文標題 Synthesis and Analysis of Highly Monodispersed Silver Copper Sulfide Nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 731 ~ 737
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2020395	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 Hirase Akemitsu, Hamanaka Yasushi, Kuzuya Toshihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Ligand-Induced Luminescence Transformation in AgInS <sub>2</sub> Nanoparticles: From Defect Emission to Band-Edge Emission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 3969 ~ 3974
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c01197	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 Yasushi Hamanaka	4. 巻 1016
2. 論文標題 Non-vacuum Fabrication of Bandgap-Controlled CZTGS Alloy Films Using CZTS+CZGS Mixed Nanoparticle Inks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 509-515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.509	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31件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 武田 圭生, 丹羽 正貴, 林 純一, 葛谷 俊博, 関根 ちひろ, 濱中 泰, 若林 大佑, 佐藤 友子, 船守 展正
2. 発表標題 高圧下における半導体ナノ粒子間の相互作用
3. 学会等名 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Niwa, K. Ohno, J. Hayashi, T. Kuzuya, C. Sekine, K. Takeda, Y. Hamanaka, D. Wakabayashi, N. Funamori, T. Sato
2. 発表標題 Optical properties and inter-particle spacing of CuInS <sub>2</sub> nanoparticles
3. 学会等名 Muroran-IT Rare Earth Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田 圭生, 大野 圭太, 林 純一, 葛谷 俊博, 関根 ちひろ, 濱中 泰, 若林 大佑, 佐藤 友子, 船守 展正
2. 発表標題 カルコパイライト構造をもつ半導体ナノ粒子の高圧下 X 線回折
3. 学会等名 2020年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keita Ohno, Jyunichi Hayashi, Toshihiro Kuzuya, Chihiro Sekine, Keiki Takeda, Yasushi Hamanaka, Daisuke Wakabayashi, Tomoko Sato, Nobumasa Funamori
2. 発表標題 Luminescent characteristics and structure of AgInS2 nanoparticles under high pressure
3. 学会等名 Muroran-IT Rare Earth Workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田圭生, 清原基生, 林純一, 葛谷俊博, 濱中 泰
2. 発表標題 高圧力下におけるSnドーブCuInS2ナノ粒子の発光と構造
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀬戸 貴大、中 智也、鈴木 孝一朗、濱中 泰、葛谷 俊博
2. 発表標題 配位子を使った AgInS2ナノ粒子の表面改質と発光機構の転換
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増田 拓真、濱中 泰、葛谷 俊博、武田 圭生、近藤 政晴、出羽 毅久
2. 発表標題 CsPbI3量子ドット超格子の発光特性
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 武田圭生, 清原基生, 林純一, 葛谷俊博, 濱中 泰
2. 発表標題 高压下におけるSnドーブCuInS <sub>2</sub> ナノ粒子の構造
3. 学会等名 2022年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清原 基生、武田 圭生、林 純一、葛谷 俊博、関根 ちひろ、濱中 泰
2. 発表標題 高压下における Sn ドーブ CuInS <sub>2</sub> ナノ粒子の光学特性と構造
3. 学会等名 第63回高压討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱中 泰
2. 発表標題 半導体ナノ粒子の光物性：量子ドットとプラズモニクス
3. 学会等名 ムロランマテリア講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichiro Suzuki, Takahiro Seto, Tomoya Naka, Yasushi Hamanaka, Toshihiro Kuzuya
2. 発表標題 Passivation of Surface Defects on Colloidal CuInS <sub>2</sub> Nanoparticles via Post-Synthetic Ligand Exchange
3. 学会等名 11th International Conference on Fine Particle Magnetism (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀬戸 貴大、中 智也、鈴木 孝一朗、濱中 泰、葛谷 俊博
2. 発表標題 配位子を使ったAgInS <sub>2</sub> ナノ粒子の表面改質と発光機構の転換
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内彰汰、葛谷俊博、濱中泰、松島永佳
2. 発表標題 Zn添加CuInS <sub>2</sub> ナノ粒子の合成とその発光特性
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋季第171回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田 拓真、濱中 泰、葛谷 俊博、武田 圭生
2. 発表標題 自己組織化法によるCsPbI <sub>3</sub> ナノ結晶超格子の作製
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱中 泰
2. 発表標題 非金属ナノ粒子の近赤外プラズモニクス
3. 学会等名 ナノ学会第20回大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤健士朗, 武田一郎, 葛谷俊博, 濱中泰
2. 発表標題 単分散 AgxCu <sub>2</sub> -xS ナノ粒子の合成とその物性
3. 学会等名 ナノ学会第19回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木孝一朗, 平瀬明光, 濱中泰, 葛谷俊博
2. 発表標題 - - 2族半導体ナノ粒子の表面改質による発光特性の改善
3. 学会等名 ナノ学会第19回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasushi Hamanaka
2. 発表標題 Non-vacuum fabrication of bandgap-controlled CZTGS alloy films using CZTS+CZGS mixed nanoparticle inks
3. 学会等名 Thermec'2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshihiro Kuzuya, Kenshiro Sato, Takahiko Kuwada, Hidetaka Inukai, Yasushi Hamanaka, Shinji Hirai
2. 発表標題 The synthesis of metal-semiconductor hybrid nanoparticles by reductive cation exchange method
3. 学会等名 Thermec'2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenshiro Sato, Toshihiro Kuzuya, Yasushi Hamanaka
2. 発表標題 Synthesis of nearly monodispersed AgxCu <sub>2</sub> -xS nanoparticles
3. 学会等名 Thermec'2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎 晴香, 濱中 泰, 葛谷 俊博, 武田 圭生
2. 発表標題 超格子構造を目標とするCuInS <sub>2</sub> ナノ粒子周期配列膜の作製
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 孝一郎, 平瀬 明光, 濱中 泰, 葛谷 俊博
2. 発表標題 カルコバイライトナノ粒子の発光特性に及ぼす表面改質の影響
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤木 光, 濱中 泰, 葛谷 俊博
2. 発表標題 Zn-Ag-In-Sナノ粒子の合成と発光特性
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丹羽 正貴, 大野 圭太, 林 純一, 葛谷 俊博, 関根 ちひろ, 武田 圭生, 濱中 泰, 若林 大佑, 佐藤 友子, 船守 展正
2. 発表標題 CuInS <sub>2</sub> ナノ粒子の粒子間隔と光学特性 II
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱中 泰
2. 発表標題 多元系半導体量子ドットの光物性とナノ構造制御
3. 学会等名 第1回ムロランマテリア講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田拓真、濱中泰、葛谷俊博
2. 発表標題 自己組織化法によるCsPbI <sub>3</sub> ナノ結晶超格子の作製
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平瀬 明光、濱中 泰、葛谷 俊博
2. 発表標題 リガンド添加に伴うAgInS <sub>2</sub> ナノ粒子のバンド端発光
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹羽 正貴, 大野 圭太, 林 純一, 葛谷 俊博, 関根 ちひろ, 武田 圭生, 濱中 泰, 若林 大祐, 佐藤 友子, 船守 展正
2. 発表標題 CuInS <sub>2</sub> ナノ粒子の粒子間隔と光学特性
3. 学会等名 第61回高圧討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野 圭太, 林 純一, 葛谷 俊博, 関根 ちひろ, 武田 圭生, 濱中 泰, 若林 大祐, 佐藤 友子, 船守 展正
2. 発表標題 AgInS <sub>2</sub> ナノ粒子の高圧下光学特性と構造
3. 学会等名 第61回高圧討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤健士朗、葛谷俊博、濱中 泰、古川慎悟、高瀬 舞、平井伸治
2. 発表標題 AgCuS三元ナノ粒子の合成とその光触媒能
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋季第167回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤木 光、Chen Shijia, 濱中 泰、葛谷俊博
2. 発表標題 Zn-Ag-In-Sナノ粒子の合成と発光特性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究 分担者	葛谷 俊博  (Toshihiro Kuzuya)  (00424945)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授   (10103)	
研究 分担者	武田 圭生  (Keiki Takeda)  (70352060)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授   (10103)	

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
---------	---------