

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02549

研究課題名(和文)半導体量子ドットナノ秩序構造体の創成と新規光機能の解明

研究課題名(英文)Creation of nano-ordered structures of semiconductor quantum dots and elucidation of novel optical functions

研究代表者

金 大貴 (Kim, DaeGwi)

大阪公立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00295685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：水熱合成法により合成した量子ドット(QD)を用いて、Layer-by-layer法により面内および積層方向の距離が精密に制御されたQDナノ秩序構造体を作製し、量子共鳴の次元を制御できることを明らかにした。QD秩序構造体における光吸収、発光スペクトルと発光減衰プロファイルの温度依存性に関する系統的な研究から、ミニバンド形成に基づく新たな発光モデルを提案した。フェムト秒過渡吸収分光システムにより、QD秩序構造体では励起状態吸収に由来する信号がQD分散試料よりも大幅に短寿命化していることが明らかとなった。これは、QD秩序構造体において期待される高い電荷伝達特性の起源を解明する糸口を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、ナノスケール物質間の相互作用を積極的に利用・制御し、新たな物質機能を得る道筋を探求するものであり、対象とするQD秩序構造体の新規光機能を利用した新しい光デバイスや光学材料などの創出はもとより、ナノスケール物質単位を空間制御して配列することの難しさから、これまで機能設計に「秩序性」の概念を積極的に取り入れてこなかった分野(例えば金属ナノ粒子を利用したプラズモニックデバイスや光触媒など)に新たな学術の視点を吹き込むことにより、1~数nmを機能単位としたナノスケール物質科学のブレークスルーを生み出すものである。

研究成果の概要(英文)：We have fabricated quantum dot superlattices (QDSLs) with precisely controlled in-plane and stacking distances by a layer-by-layer method using hydrothermally synthesized QDs and demonstrated that the dimension of quantum resonance can be controlled. Systematic investigation of the temperature dependence of absorption and photoluminescence (PL) spectra, as well as PL decay profiles, enabled us to propose a new PL model based on the miniband formation in the QDSLs. Furthermore, a femtosecond transient absorption spectroscopy system revealed that the signal originating from excited-state absorption is much shorter in QDSLs than in QD-dispersed samples. This provides a clue to the origin of the high charge-transfer properties expected in QDSLs.

研究分野：ナノ材料工学

キーワード：半導体量子ドット ナノ秩序構造体 フェムト秒超高速分光 水熱合成法 Layer-by-layer法

1. 研究開始当初の背景

シングルナノメートルサイズの半導体量子ドット (quantum dots: QDs) は、ナノスケール物質に特有の量子サイズ効果により、バルクにはない特異な光物性と高い制御性を有しているため次世代光機能性物質の構成要素として期待されている。現在までにII-VI族 (例えばCdSe, CdTe, ZnSe) 元素などを組み合わせた光機能性 QD が数多く報告されており、蛍光材料、光電変換デバイス、低閾値レーザーなどの分野で幅広く応用研究が展開されている。

0次元物質として取り扱われる個々の QD が高い秩序性をもって配列し高次構造体 (QD ナノ秩序構造体) を形成すると、近接した QD 間の相互作用に伴う波動関数の結合により新たな電子状態が形成され、特異な光機能性が発現することが知られている。例えば、QD ナノ秩序構造体を光電変換デバイス (太陽電池) に応用した場合、新たに形成された電子状態 (中間バンド) を介した効率的な光キャリア生成により、光電変換効率が飛躍的 (60%以上) に向上することが示されている[1]。

また、QD 間の相互作用の程度は QD 配列の格子間隔をボトムアップ的に調整することで精密に制御することが可能である。従って QD ナノ秩序構造体を新しい光機能材料として応用する際に、その機能を高い自由度で設計できることも大きな利点である。

精密に作製された QD における光機能性の起源は、光励起を起点として生成した自由キャリアや励起子の振る舞いであり、特に光励起直後からフェムト秒—ピコ秒の時間スケールで展開される励起状態の超高速ダイナミクスがその後の光学的機能を支配している。これまでに、分散状態や凝集状態の QD における超高速光励起ダイナミクスは、フェムト秒パルスレーザーを用いた超高速分光により詳細に調べられており、例えば QD の光機能を応用する上で重要な多重励起子生成過程などの超高速現象が明らかにされつつある[2]。

QD 間の電子的相互作用、すなわち組織体における波動関数の結合の程度は、隣接 QD との間隔や配列の秩序性に極めて敏感であるため、高次構造体を利用した新規光機能性の創出には、QD の配列を精密に空間制御したナノ秩序構造体を作製することが極めて重要である。しかし、一般的に原子や分子が自己集合化して結晶固体を形成するのとは異なり、QD 構造体の空間制御を達成し、電子バンドを形成することによる新たな機能を理解する上では、そのナノスケールでの QD 秩序配列を能動的に促進する技術の確立が不可欠である。しかし、従来の QD 構造体作製手法では電子的相互作用が期待できる sub-nm 程度に QD を近接されて秩序配列させることは困難であり、秩序構造化した際に現れる効果を積極的に利用し、機能設計に応用する試みは十分に進められていない。また、先述のように精密に作製された QD ナノ秩序構造体における超高速光励起ダイナミクスを高度な方法論により明らかにし、その秩序性の効果を見出すことは、物質科学の視点から QD ナノ秩序構造体の光機能の起源を普遍的に理解し、さらに先鋭化する上で不可欠なアプローチである。

2. 研究の目的

本研究では、sub-nm で空間制御された QD ナノ秩序構造体を精密に作製すること、さらに、QD ナノ秩序構造体に発現する光機能の本質を理解し、制御・高度化する指針を得るために、フェムト秒レーザー分光を基盤とした時間分解計測により当該構造体の超高速光励起ダイナミクスを明らかにすることにより、QD を基盤とした組織体としての新規光機能を創出することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、(1) QD ナノ秩序構造体の作製と構造・光学特性の評価、(2) フェムト秒超高速分光による光励起ダイナミクスの評価、の2項目を並行して推進した。

本研究においては、QD ナノ秩序構造体における新しい光機能性を見出すため、基板上に QD

を sub-nm に近接させた上で精密に秩序配列する技術を確認することを目指した。CdTe、ZnSe、CdSe などの QD について、水熱合成法による QD 合成と Layer-by-Layer (LBL) 法を組み合わせた QD 積層構造の作製を推進した[3-5]。

一般的に、QD における波動関数の浸みだしは大きくても 1~数 nm 程度であり、これらの混成により生じる電子状態は近接物質との距離に極めて敏感であることから、QD 間の近接距離とその空間制御は sub-nm の精度が求められる。現在の主流である QD 合成法 (ホットソープ法) では比較的長い分子骨格 (~数 nm) をもつ保護配位子が必要であり、QD 間を 5 nm 以下に近接させることや、配位子の構造揺らぎによる QD 間隔の制御が困難である。本研究ではこの課題を解決するために、より短い配位子 (例えば N-アセチル-L-システイン) を用いることができる水熱合成法を採用することにより、sub-nm の精度で空間制御可能な QD を作製した。

LBL 法は正あるいは負の極性をもつ物質を交互に吸着させることにより、静電相互作用を利用して均一な多層積層膜を作製する手法である。この方法では、単層膜内の QD 最密構造を得る溶液濃度を規定することにより、それ以下の濃度において膜内の QD 密度を線形的にコントロールできるとともに、それ以上の濃度で多層膜の形成を抑えることができるため、QD 層の面内方向の 2 次元配列制御が可能である[6]。さらに積層方向には QD を化学的に保護する配位子としてアニオン性の配位子に対して、カチオン性のバッファー層 (例えばポリジアリルジメチルアンモニウムクロリド: PDDA など) を交互積層することで、簡便な溶液プロセスにも関わらず、層間間隔の揃った QD ナノ秩序構造体を精密に作製することができる[6]。さらに、保護配位子やバッファー層の分子骨格を適切に選択することで積層構造の間隔をサブ nm の精度で制御することも可能である[5]。上記のような LBL 法を用いた試料作製技術の確立により、面内方向と膜厚方向が精密に空間制御された、QD ナノ秩序構造体を構築した。

作製した QD ナノ秩序構造体における QD 密度と秩序性は X 線構造解析 (XRD)、X 線光電子分光 (XPS)、原子間力顕微鏡 (AFM)、走査型電子顕微鏡 (SEM) などにより評価し、得られた情報を元に、試料作製パラメータの最適化を図る。さらに発光分光 (PL) 法および発光励起分光 (PLE) 法により、試料の定常状態およびナノ秒・ピコ秒領域の光学特性を明らかにする。

4) フェムト秒超高速分光による光励起ダイナミクスの評価

作製した QD ナノ秩序構造体の発光特性をより詳細に明らかにするために、新たにフェムト秒過渡吸収分光システムを構築した。この際、信号強度と試料損傷に関する課題を克服するために、対物レンズを用いた独自の顕微光学系とフォトニック結晶ファイバを用いた波長変換機構 (450-1000 nm のスーパーコンティニュームプローブ光) により、高繰り返し (80 MHz) 低損傷の光励起ダイナミクスの観測を実現した。システムの時間分解能はおよそ 150 fs であり、レーザーによる QD ナノ秩序構造体の劣化が起こらないように観測条件を最適化した。

4. 研究成果

LBL 試料作製時における、QD 溶液の濃度を変えることで、量子ドット面内密度の制御を試みた。図 1 は、単層試料の吸収ピークの光学密度を、溶液試料の吸収ピークの光学密度に対してプロットしたものである。溶液濃度が薄い領域 (溶液ピーク O.D. 0.15 以下) に着目すると、単層試料の吸収強度は線形的に増加していることがわかる。これは、QD 溶液の濃度を変えることで、単層試料の面内密度を制御できることを表している。また、溶液濃度が濃い領域 (溶液ピーク O.D. 0.15 以上) においては、単層試料の吸収強度が飽和しており、これは面内に QD が密

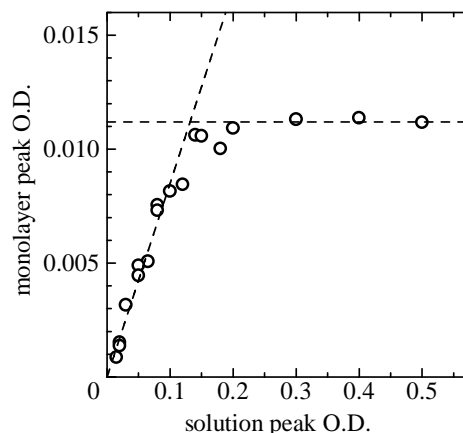


図 1. 単層試料における吸収ピークの光学密度と溶液試料の光学密度の関係。

に吸着し、これ以上吸着しないことを反映している。これらの結果から、浸漬時間を固定し QD 溶液の濃度を変えることで、QD 単層試料の面内密度を制御できることがわかる。QD が密に吸着する条件で作製した QD 単層試料の in-plane XRD 測定結果から、QD が面内に周期的に配列していること、つまり QD 二次元秩序構造体を作製できていることを明らかにした。なお、溶液試料と吸収エネルギーが一致する孤立した QD の単層膜 (O.D. <0.005) と 2D-QDSL (O.D. >0.005) で吸収ピークエネルギーがシフトしたのは、面内方向の量子共鳴に起因していると考えられる。そして、吸収エネルギーのシフト量は 19 meV であり、この値は、2 次元的に量子共鳴が生じた際の結合エネルギーに対応していると考えられる。すなわち、LBL 法において浸漬させる QD 溶液の濃度によって、面内の QD 間距離及び QD 面内密度を変えることができ、面内の量子共鳴が生じていない QD 孤立系と、面内の量子共鳴が生じている QD 二次元秩序構造体を作製できることを示した。

面内の量子共鳴が生じない条件 (QD 溶液の吸収ピーク O.D. 0.02) と面内の量子共鳴が生じる条件 (QD 溶液の吸収ピーク O.D. 0.20) で、QD 積層試料を作製し、その吸収特性を測定した。図 2 は、層数に対して吸収ピークエネルギーをプロットした図であり、どちらの試料においても、層数が増えるにつれて、吸収ピークが低エネルギー側にシフトしていることが分かる。この結果は、面内密度の異なるどちらの試料においても、積層方向の量子共鳴が生じていることを表している。また、QD 単層試料から、吸収ピークエネルギーのシフトが止まるまでのエネルギーシフト量に着目すると、面内密度が低い試料と高い試料において、それぞれ 22 meV、20 meV であった。

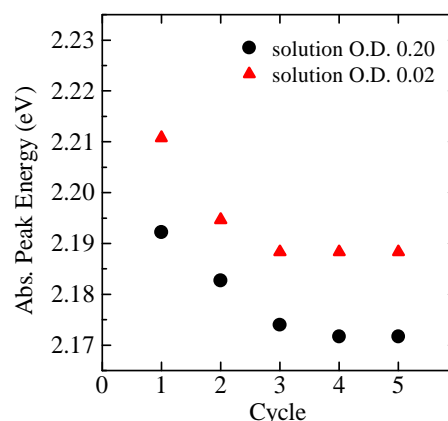


図 2. 吸収ピークエネルギーの積層数依存性。

ここで、面内密度が低い条件と高い条件で積層した QD 積層試料の吸収ピークエネルギーの値はそれぞれ、2.188 eV、2.172 eV であり、そのエネルギー差は 16 meV であった。このエネルギー差は、面内の量子共鳴による差だと考えられ、面内密度が低い QD 積層試料においては、面内方向の量子共鳴は生じておらず積層方向のみに量子共鳴が生じているのに対し、面内密度が高い QD 積層試料においては、面内積層両方向の量子共鳴が生じていることを示唆している。

このように、LBL 法を用いて、QD 溶液濃度による面内の QD 密度制御と、積層というプロセスを組み合わせることで、積層方向のみの量子共鳴が生じた一次元 QD 積層試料や、面内方向にのみ量子共鳴が生じた二次元 QD 単層試料、積層面内両方向に量子共鳴が生じた三次元 QD 秩序構造体を作製することができ、量子共鳴の次元性を制御することに成功した。

QD 溶液試料と QD 秩序構造体において、PLE スペクトルの受光エネルギー依存性を測定した。QD 溶液試料においては、受光エネルギーが高くなるにつれて、PLE ピークエネルギーが高エネルギー側にシフトする、サイズ選択性が明確に観測された。一方で、CdTe QD 秩序構造体においては、受光エネルギーに依らず PLE ピークエネルギーは一定である。各発光エネルギーを受光したときに、PLE ピークエネルギーが一致したことは、QD 秩序構造体が一つのエネルギー状態を共有していること、つまりミニバンドが形成していることにより直接的な証拠であると言える。

さらに、一次元、二次元、及び三次元的な量子共鳴が生じている QD 秩序構造体において発光寿命の温度依存性がそれぞれ $T^{0.5}$ 、 $T^{1.0}$ 、及び $T^{1.5}$ に比例することを明らかにした。この発光寿命の温度依存性は、発光寿命が $T^{0.5}$ に比例する一次元系[7, 8]や $T^{1.0}$ に比例する二次元系[7]の結果と

一致しており、LBL 法により作製した QD 秩序構造体においてミニバンドが形成されていることを実証した[6]。

新たに構築したフェムト秒過渡吸収分光システムを図 3 上に示す。フェムト秒過渡吸収分光では、QD ナノ秩序構造体におけるフェムト-ピコ秒スケールの光励起ダイナミクスを観測することに成功した。このことは、通常は試料の劣化を防ぐために溶液フロー状態の試料で行う同計測を、基板に凝集させ固定化した状態で可能にしたという点で重要である。その成果の一例として、図 3 下に CdTe QD を 5 層積層した試料の過渡吸収スペクトルを示している。定常状態の吸収(点線)と対応する波長においてみられる負のシグナルは、基底状態のブリーチング信号であり、光励起直後に最低励起状態へと緩和していることを表している。一方で、長波長 (>580 nm)側に現れる正の信号は生成された励起状態からの光吸収(励起状態吸収)が起きていることを示しており、ブリーチング信号の遅延時間に伴う変化と対応した励起状態の時間発展を追跡することに成功

した。ナノ秩序構造体の形成によるの効果を明らかにするために、高分子フィルムに分散した QD について同様の計測を行った。その結果、LBL 試料では励起状態吸収に由来する信号がフィルム分散試料よりも大幅に短寿命化していることが明らかとなった。これは、QD 秩序構造体におけるミニバンドの形成により QD 間の電子移動が可能となることで、エネルギー緩和チャネルが増大したことに由来すると考えられる。さらに、QD のサイズや積層数依存性などのデータの取得、解析を進めており、これらの結果から QD 秩序構造体において期待される機能を見い出し、その起源を解明することができると考えられる。

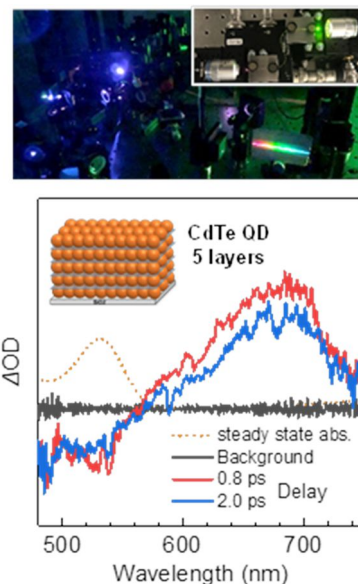


図 3 (上) 開発した過渡吸収分光システムとフォトニック結晶ファイバによる supercontinuum プロブ光の発生。(下) CdTe QD ナノ秩序構造体 (5 層) の過渡吸収スペクトル。

<引用文献>

- [1] A. Martí, E. Antolín, C. R. Stanley, C. D. Farmer, N. López, P. Díaz, E. Cánovas, P. G. Linares, and A. Luqueref, Phys. Rev. Lett. 97, 247701 (2006).
- [2] J. Huang, Z. Huang, Y. Yang, H. Zhu, and T. Lian, J. Am. Chem. Soc. 132, 4858 (2010).
- [3] D. Kim, S. Okahara, K. Shimura, and M. Nakayama, J. Phys. Chem. C 113, 7015 (2009).
- [4] D. Kim, S. Okahara, M. Nakayama, and Y. Shim, Phys. Rev. B 78, 153301 (2008).
- [5] D. Kim, S. Tomita, K. Ohshiro, T. Watanabe, T. Sakai, I-Ya Chang, and H. Kim, Nano Lett. 15, 4343 (2015).
- [6] T. G. Lee, K. Enomoto, K. Ohshiro, D. Inoue, T. Kikitsu, H.-D. Kim, Y.-J. Pu, and D. Kim, Nature Commun. 11, 5471 (2020).
- [7] H. Akiyama, S. Koshiba, T. Someya, K. Wada, H. Noge, Y. Nakamura, T. Inoshita, A. Shimizu, and H. Sakaki, Phys. Rev. Lett. 72, 924 (1994).
- [8] A. Takahashi, T. Ueda, Y. Bessho, Y. Harada, T. Kita, E. Taguchi, and H. Yasuda, Phys. Rev. B 87, 235323 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Iida Kazutaka, Uehigashi Yota, Kim DaeGwi	4. 巻 11
2. 論文標題 Origin of photoluminescence of water-soluble CuInS ₂ quantum dots prepared via a hydrothermal method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 33186 ~ 33191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1ra05761h	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 Shimura Kunio, Lee TaeGi, Ito Tatsuya, Kim DaeGwi	4. 巻 94
2. 論文標題 Selective Hydrothermal Synthesis of Water-Soluble CdTe and CdTe/CdS Colloidal Quantum Dots by Controlling the Te/Cd Molar Ratio of the Precursor Solution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 2880 ~ 2885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210251	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 Nishimura Hisaaki, Enomoto Kazushi, Pu Yong-Jin, Kim DaeGwi	4. 巻 12
2. 論文標題 Hydrothermal synthesis of water-soluble Mn- and Cu-doped CdSe quantum dots with multi-shell structures and their photoluminescence properties	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 6255 ~ 6264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1RA08491G	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 Lee TaeGi, Ohshiro Kazuma, Watanabe Taichi, Hyeon Deuk Kim, Kim DaeGwi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Temperature Dependent Exciton Dynamics in CdTe Quantum Dot Superlattices Fabricated via Layer by Layer Assembly	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2102781 ~ 2102781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202102781	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 Y. G. Shim, A. Kitano, K. Wakita, and D. Kim	4. 巻 128
2. 論文標題 Spectroscopic ellipsometry of monolayered CdS nanoparticles assembled by layer-by-layer method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 075303 (7pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0007740	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 T. G. Lee, K. Enomoto, K. Ohshiro, D. Inoue, T. Kikitsu, H.-D. Kim, Y.-J. Pu, and D. Kim	4. 巻 11
2. 論文標題 Controlling the dimension of the quantum resonance in CdTe quantum dot superlattices fabricated via layer-by-layer assembly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5471 (10pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-19337-0	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 H. Nishimura, T. Maekawa, K. Enomoto, N. Shigekawa, T. Takagi, S. Sobue, S. Kawai, and D. Kim	4. 巻 9
2. 論文標題 Water-soluble ZnSe/ZnS:Mn/ZnS quantum dots convert UV to visible light for improved Si solar cell efficiency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 693-701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0tc04580b	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8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 TaeGi Lee, Kazushi Enomoto, Kazuma Ohshiro, Daishi Inoue, Tomoka Kikitsu, Kim Hyeon-Duk, Yong-Jin Pu, and DaeGwi Kim
2. 発表標題 One-, two-, and three-dimensional quantum resonance in CdTe quantum dot superlattices fabricated by layer-by-layer assembly
3. 学会等名 11th Asian Photochemistry Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 64.Hisaaki Nishimura, Naoteru Nigekawa, and DaeGwi Kim
2. 発表標題 Synthesis of water-soluble ZnSe/ZnS:Mn/ZnS Quantum Dots and Application to Si Solar Cells as a Wavelength Conversion Materials
3. 学会等名 11th Asian Photochemistry Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李太起, 金大貴
2. 発表標題 CdTe量子ドット超格子における光学特性の温度依存性
3. 学会等名 第32回光物性研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 悠陽, 金 大貴
2. 発表標題 水熱合成法によるCdSe/ZnS:Mn/ZnS ナノ粒子の作製 と光学特性
3. 学会等名 第32回光物性研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 ヨンシン、伊藤 達也、金 大貴
2. 発表標題 CdTe量子ドット超格子の発光ダイナミクス
3. 学会等名 第31回光物性研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村 悠陽、前川 貴哉、高木 知己、祖父江 進、川井 正一、重川 直輝、金 大貴
2. 発表標題 波長変換ナノ粒子ZnSe/ZnS:Mn/ZnSの付加による太陽電池特性の向上 II
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 2020年

1. 発表者名 李 太起、榎本 航之、大城 一馬、井ノ上 大嗣、喜々津 智郁、金 賢得、夫 勇進、金 大貴
2. 発表標題 CdTe量子ドット超格子における量子共鳴の次元制御
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 2020年

1. 発表者名 李 ヨンシン、伊藤 達也、金 大貴
2. 発表標題 CdTe量子ドット超格子におけるミニバンドの形成と光学特性
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 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ナノ材料を利用した次世代デバイスの実現に期待！半導体量子ドット超格子における量子共鳴の次元制御を実現
<https://www.osaka-cu.ac.jp/ja/news/2020/201030>

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	渋田 昌弘 (Shibuta Masahiro) (70596684)	大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授 (24405)	

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