

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：14501
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））
研究期間：2018～2023
課題番号：18KK0141
研究課題名（和文）Development of biophotonics and photochemical applications of silicon quantum dots in collaboration with a consortium established for the formation of "Silicon Nanomaterials Center" founded by US NSF
研究課題名（英文）Development of biophotonics and photochemical applications of silicon quantum dots in collaboration with a consortium established for the formation of "Silicon Nanomaterials Center" founded by US NSF
研究代表者
藤井 稔（Fujii, Minoru）
神戸大学・工学研究科・教授
研究者番号：00273798
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、研究代表者のグループが開発してきた新しいタイプの水分散性コア/シェルシリコン量子ドット及び可視光領域にMie共鳴を有する結晶シリコンナノ粒子の基礎物性解明と応用探索を目的とする。シリコン量子ドットについては、オーストラリア及び欧州のグループと共同で、構造解析、電子状態の解明、プラズモニックナノ粒子との複合構造の形成等の研究を実施した。Mie共鳴シリコンナノ粒子に関しては、USA及び欧州のグループと共同で、基礎物性の解明と2次元半導体との複合構造の形成等の研究を行った。本プロジェクトにより、欧米とオーストラリアの多数の研究機関と共同研究を行い共著論文を発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコンは、資源が豊富で生体親和性が高い高環境親和性材料である。シリコン結晶を10ナノメートル以下まで小さくしたものはシリコン量子ドットと呼ばれ、バルクシリコン結晶とは大きく異なる物性を示す。また、直径100～200ナノメートルのシリコン粒子は、Mie共鳴効果により、可視光を内部に強く閉じ込めたり、特定方向に強く散乱したりするナノアンテナとして機能する。本研究は、独自に開発した新しいタイプのシリコンナノ粒子の基礎物性の解明と応用探索を海外の多数の研究機関と共同で行ったものであり、環境親和性材料であるシリコンの新しい可能性を探求することにより環境にやさしい社会の構築に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：This research project focuses on the study of fundamental properties and application exploration of new type of water-dispersible silicon quantum dots and silicon nanoparticles having the Mie resonances in the visible range developed in our group. Concerning silicon quantum dots, detailed structural analyses, calculation of the energy level structures, formation of composite structures with plasmonic nanoparticles, etc. have been performed in collaboration with research groups in Australia and Europe. Concerning Mie resonant silicon nanoparticles, the study on the fundamental properties and the formation of composite structures with two-dimensional semiconductors have been performed in collaboration with research groups in USA and Europe.

研究分野：ナノ材料物性

キーワード：シリコン ナノ粒子 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドットは、蛍光材料として、従来の材料（有機色素，蛍光タンパク質）に比べて高い耐光性，狭い発光線幅，広い励起（吸収）バンド幅，広い発光波長制御範囲，高い表面機能化の自由度などの魅力的な特性を有しており，発展が著しいバイオフォトンクス分野の中心材料の一つである。特に，量子ドットを用いたバイオリベリング，細胞イメージング，医療診断，バイオセンサなど生体可視化計測技術と標的治療の高度化は，医療に革新をもたらすものとして期待されている。図1(a)に，生体分子で表面修飾した量子ドットの模式図を示す。量子ドットは一般にコア/シェル構造をしており，励起子がコア内に閉じ込められている。これにより，表面修飾の自由度が飛躍的に向上し，多様なバイオ応用が可能になった。しかしながら，実用化されている量子ドットの大部分がカドミウム (Cd) カルコゲナイド (CdSe, CdTe 等) であり，有害重金属元素の Cd を主成分としているため，その使用は研究室における細胞や動物レベルの実験に留まっている。

代表的な半導体であるシリコン (Si) は，地殻構成元素の約 25% を占める高環境親和性材料である。また，Si 量子ドットは，高い生体親和性と生分解性を有しており (Nature Materials 8(2009)331)，量子ドットバイオフォトンクス技術の爆発的普及をもたらす可能性を秘めた sustainable ナノ材料として期待されてきた。Si 量子ドットのコロイド溶液の開発は，特に北米で活発に行われ，この 10 年でその品質が飛躍的に向上している。特定の環境下では，発光量子効率，サイズ分布，溶液分散性に関しては，化合物半導体量子ドットに遜色のないレベルに達している。しかしながら，現実には化合物半導体量子ドットに取って代わることはできていない。その最大の原因は，Si は格子整合する半導体材料が存在しないためコア/シェル構造が形成できず，Si 量子ドットコアの表面が直接有機分子により修飾されていることである (図 1(b))。波動関数が表面修飾分子に浸みだしているため，発光特性が環境や化学反応に対して非常に敏感であり，分子吸着や化学反応により発光が消失することがしばしば見られる (ACS Nano 8(2014)9636)。バイオフォトンクス応用に不可欠な表面操作による生体分子との結合を，発光特性を毀損することなく実現する事が非常に困難であるため，汎用的に利用できるバイオフォトンクス蛍光材料になり得ていないのが現状である。

研究代表者は，2013 年にバイオフォトンクス分野で非常に高いポテンシャルを持つことが期待できる新しいタイプの Si 量子ドットを開発した。この量子ドットは，ホウ素 (B)，Si，リン (P) で構成されるアモルファス $B_xSi_yP_z$ シェルを有している。図 1(c) にこの量子ドットの透過型電子顕微鏡写真を示す。結晶性の高い Si 量子ドットコアの周囲を厚さ約 1.5nm のアモルファスシェルが覆っている。シェルの表面電位 (ζ 電位) が 30mV 程度であるため，この量子ドットは静電反発により広い pH 範囲で高い水分散性を示す。これは，量子ドットのバイオ応用において非常に大きいアドバンテージである。このコア/シェル Si 量子ドットでは，波動関数が粒子内に閉じ込められているため (図 1(c) 右)，発光特性が環境や表面の化学反応に対して鈍感であり，様々な環境下で生体分子の透過率の高い近赤外領域にサイズにより制御可能な高効率な発光を示す (直径 1nm→9.5nm，発光波長 670nm→1460nm) (図 1(c) 下)。以上の特性と，生体に無害な元素のみ (Si, B, P) で構成されているという事実から，この Si 量子ドットは，汎用性の高い新ナノバイオフォトンクス材料とな

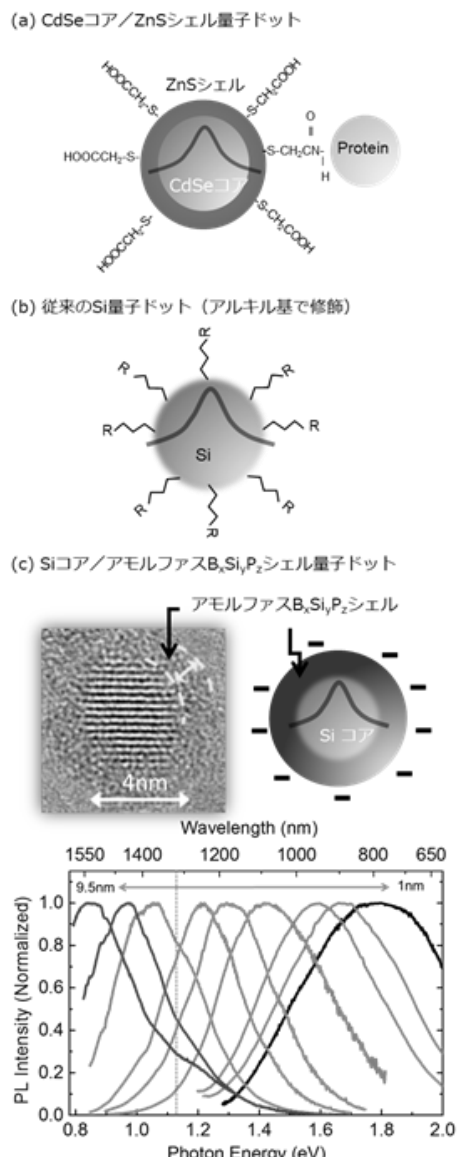


図 1 (a) 従来のヘテロ接合コア (CdS) /シェル (ZnS) 量子ドット。波動関数が粒子内に閉じ込められているため，表面修飾の自由度が高い。(b)従来の Si 量子ドット。Si コア表面が直接有機分子で修飾されており，波動関数がリガンドに浸みだしている。(c) コア/シェル Si 量子ドット。Si コアの表面を厚さ 1~2nm のアモルファス $B_xSi_yP_z$ シェルでカバーしており，波動関数は粒子内に閉じ込められている。また，シェル表面が負に帯電しており，表面修飾無しで水に分散する。

る可能性を秘めている。

研究代表者のグループは、海外の研究機関と共同で前述の水分散性コア/シェル Si 量子ドットの基礎物性の解明、細胞毒性の検証、蛍光バイオイメージングの実証等の研究を行ってきた。一方、USA では、Si 量子ドットをはじめとする Si ナノ材料の様々な分野への応用展開研究と、それに関わる人材育成を担うコンソーシアムが、UC San Diego の M. Sailor 教授が中心となり設立されている。このコンソーシアムは、National Science Foundation (NSF) の Science and Technology Center (STC) 事業に “Silicon Nanomaterials Center” として採択されることを目標に活発に活動を行っている。我々が開発した新しいタイプの Si 量子ドットやその他のシリコンナノ材料の応用研究を分野横断的に推進する上で、このコンソーシアムに参画し最新の研究動向・成果について情報収集を行うこと非常に有意義である。

2. 研究の目的

本プロジェクトの目的は、研究代表者のグループが開発してきたコア/シェル Si 量子ドットやその他の Si ナノ粒子材料について、分野を問わず海外の研究機関と共同研究を実施し、シリコンナノ材料を中心とした国際研究ネットワークを構築する事である。これにより、多くの国際共著論文を発表すると共に、国際的に活躍する若手研究者を育成する。

3. 研究の方法

本研究の要は、研究代表者のグループで開発した独自の Si 量子ドット及び Si ナノ粒子である。これらの材料に関して、分野を問わず基礎から応用まで広く国際共同研究を実施する。共同研究にあたっては、双方の若手研究者が互いの研究室を行き来し、各研究テーマの目的に適合した材料の開発、評価方法の開発、データの解析、論文執筆を行う。尚、国際共同研究の相手先は、USA の研究機関に留まらず、各テーマでトップクラスの研究成果を挙げている世界中の研究機関を対象とする。

4. 研究成果

本プロジェクトの推進により多数の国際共同研究を実施した。ここでは最終的に国際共著論文として発表した成果についてのみ報告する。尚、研究期間の前半は背景で詳しく述べた Si 量子ドットを主な研究の対象にしているが、後半はそれよりもサイズが大きい直径 100 nm から 200 nm の Si ナノ粒子を主な研究対象としている。このサイズの Si ナノ粒子は可視領域にシャープな Mie 共鳴を持つことから、最近光ナノアンテナ材料として非常に注目されている。

1. Atom Probe Tomography (APT) による Si 量子ドットの評価

シドニー大学のグループと共同で、研究代表者のグループが開発した新しいタイプの水分散性 Si 量子ドットの構造を APT 法により原子レベルの分解能で解明した。コロイド状 Si 量子ドットをシリカ中に埋め込み、それを FIB 加工により APT 用の試料とした。コロイド Si 量子ドットの作製とそのシリカマトリクスへの埋め込みは研究代表者のグループで行い、APT 測定及びデータの解析はシドニー大学のグループで行った。図 2 に測定結果の一例を示す。各元素の分布から、Si ナノ結晶に B と P がドーピングされていることがわかる。また、本研究により、Si 量子ドット内の B と P の分布についても明らかになった。得られた成果は、2019 年に Acta Materialia 誌に発表した。また、Si 量子ドット開発の過程で発見した新ナノ材料である、Si, B, P からなるナノ粒子についても APT 測定による構造評価を実施した。その結果、この粒子もコアシェル構造を有しており、コアは Si と Cubic BP の間の格子定数を持つ結晶、シェルは Si リッチ、B リッチ、P リッチの領域からなるアモルファス構造であることが明らかになった。得られた結果は、2020 年に Nanoscale 誌に発表した。

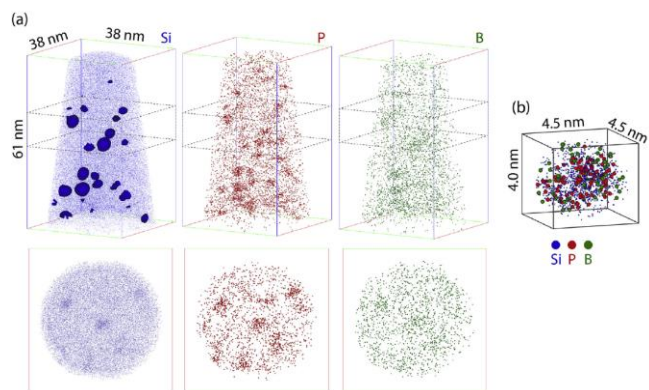


図 2 B と P を同時ドーピングしたコロイド Si 量子ドットの APT 測定結果

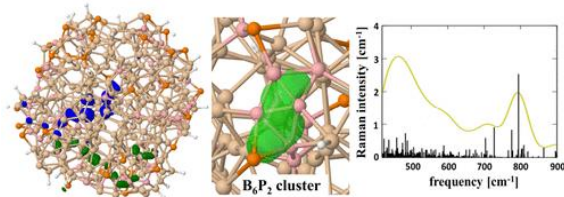


図 3 B と P を同時ドーピングした Si 量子ドットの構造とラマン散乱スペクトル (計算)。

2. B と P を同時ドーピングした Si ナノ粒子の構造及び電子状態の理論解析。

研究代表者らが開発した新しいタイプの水分散性 Si 量子ドットは、結晶コアとアモルファ

スシェルからなるコアシェル構造であり、アモルファスシェルの存在がその化学的、物理的性質に大きな影響を及ぼしていることが実験で明らかになっている。しかしながら、不純物分布等の詳細を実験のみで解明するのは困難であり、詳しい理論解析が必要である。ナノ構造の第一原理計算が専門の 2 つのグループ（スロバキア科学アカデミー Institute of Physics, ハンガリー科学アカデミー Institute for Solid State Physics and Optics,）と共同で、Si 量子ドットの構造と電子状態の評価に関する研究を実施した。神戸大学グループが実験データを提供し、理論グループがモデルの構築と計算手法の開発を行った。その結果、B 原子をナノ結晶内部に固定するための P 原子の役割等について明らかにすることができた。得られた成果は、2021 年に The Journal of Physical Chemistry C 誌に発表した。

3. Cubic BP ナノ結晶の光触媒効果

コロイド状シリコン量子ドットを開発する過程で、直径数ナノメートル程度の Cubic BP の作製方法を偶然発見した。Cubic BP は化学的に非常に安定であるため様々な分野への応用が考えられているが、作製が困難なため量子サイズ効果が発現するサイズのナノ結晶に関する研究はほとんど行われていなかった。ハンガリー科学アカデミー Institute for Solid State Physics and Optics のグループと共同で、その構造評価、電子状態の解明、光触媒特性の評価に関する研究を行った。理論面は主にハンガリー側グループが担当し、実験面は主に神戸大学グループが担当した。その結果、量子サイズ効果により Cubic BP ナノ結晶の光触媒特性が向上することを初めて見出した。図 3 に Cubic BP ナノ結晶の構造モデル、TEM 像、エネルギー準位構造のサイズ依存性の計算結果を示す。得られた成果は、2019 年に The Journal of Physical Chemistry C 誌に発表した。

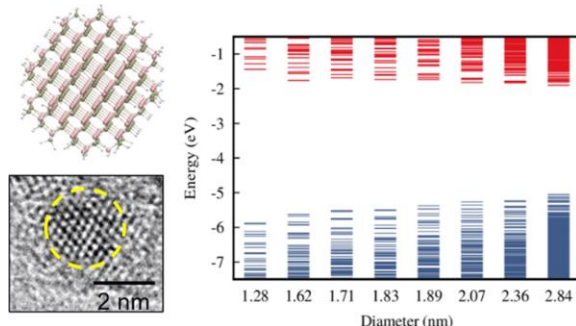


図 4 Cubic BP ナノ結晶の構造モデル、TEM 像、エネルギー準位構造のサイズ依存性。

4. Si 量子ドットと Au ナノロッドとの複合構造の形成。

Si 量子ドットは、間接遷移型半導体であるため可視領域で光吸収係数が小さく、発光再結合レートが小さい。この問題を解決する方法として、Si 量子ドットと Au ナノ粒子の複合構造の形成が考えられている。Au ナノ粒子は局在表面プラズモン共鳴により近傍の電場を増強するため、Au ナノ粒子の近傍に Si 量子ドットを配置すると、光吸収係数及び発光再結合レートを増大することが可能になる。一方、大きい効果を得るためには Au ナノ粒子と Si 量子ドット間の距離を精密に制御する必要があり、適切に配置しない場合は Si 量子ドットの発光がむしろクエンチする。本研究では、高い発光増強効果が期待できる Au ナノロッドと Si 量子ドットの複合構造の形成とその評価を行った。Si 量子ドットの作製は神戸大学グループで行い、複合構造の形成と評価はカレル大学（チェコ）のグループが行った。図 5 に作製した複合ナノ粒子の TEM 像を示す。Au ナノロッドの周囲に Si 量子ドットが形成されていることがわかる。研究の結果、Au ナノロッドと Si 量子ドット間の距離が 5 nm の時に発光強度が最大となり、Au ナノロッドが無い時と比べて 7.2 倍の発光増強が得られた。得られた成果は、2021 年に Nanoscale 誌に発表した。

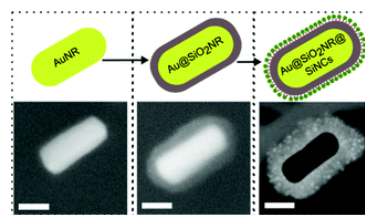


図 5 Si 量子ドットと Au ナノロッドとの複合構造の模式図と TEM 像。

5. Mie 共鳴 Si ナノ粒子のアナポール状態

直径 100 nm から 200 nm 程度の Si ナノ粒子は可視光領域にシャープの Mie 共鳴を示す。Si ナノ粒子の Mie 共鳴は、電気的モードと磁氣的モードの両方を持つためモード間の干渉により光に対して多彩な応答を示す。その一つに、電気双極子モードとトロイダル双極子モードの干渉により生じる非輻射のアナポール状態が挙げられる。アナポール状態では、光が構造内部に強く閉じ込められるため、非線形光学応答の増大などへの応用が考えられている。一方、球状 Si ナノ粒子では、電気的モードに加えて磁氣的モードが存在するため、通常の光の照射では完全なアナポール状態を生成できない。本研究では、ベクトルビームの照射により電気的モードだけを励起する方法で Si ナノ粒子にアナポール状態を励起できることを初めて実験的に示した。図 6 にそのコンセプトを示す。Si ナノ粒子の作製は神戸大学

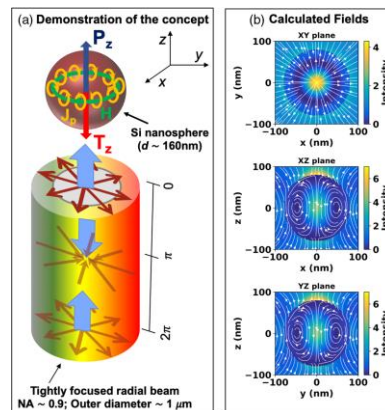


図 6 (a) ベクトルビームによる Si ナノ粒子のアナポール状態の励起の模式図。(b) 電場分布の計算結果。

グループが行い、測定はイリノイ大学のグループが行った。データの解析は両グループで共同して行った。得られた研究成果は、2020年にPhysical Review Letters誌に発表した。

6. Mie共鳴Siナノ粒子による2次元半導体の発光増強

Mie共鳴を示す直径100nm~200nmのシリコンナノ粒子は、2次元半導体の発光を増強するナノアンテナとして機能することが知られている。そこで、Siナノ粒子ナノアンテナを用いた遷移金属ダイカルコゲナイド単層膜の発光増強に関して、Stanford大学のグループと共同で研究を行った。理論と実験の両面からの研究の結果、Siナノ粒子の磁気共鳴を用いる事により、2次元半導体の発光を大きく増強できることが明らかになった。さらに、Siナノ粒子の磁気双極子モードと磁気四重極子モードをフォトルミネッセンスの発光波長と励起波長にチューニングすることにより、励起と発光の2重共鳴を実現可能である事を示した(図7参照)。本研究は、当初は代表者のグループの博士学生がStanford大学で実施し、その後神戸大学において実験と理論計算を行った。得られた成果は、2022年にACS Photonics誌に発表した。

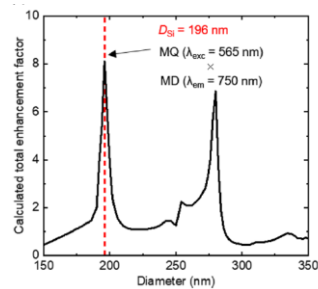


図7 Siナノ粒子ナノアンテナによる2次元半導体の発光増強度のサイズ依存性(計算結果)。

7. Mie共鳴Siナノ粒子コア/2次元半導体シェル構造の形成と光学特性評価

Northwestern大学(USA)のグループと共同で、Mie共鳴Siナノ粒子と2次元半導体である二硫化モリブデン(MoS₂)のシェルからなるコアシェルナノ粒子の形成と光学特性に関する研究を行った。神戸大学のグループがSiナノ粒子を形成し、そこにNorthwestern大学のグループがシェルを形成し構造評価を行った。その後、神戸大学グループが光学測定と理論計算を行った。研究の結果、二硫化モリブデンの電子遷移とシリコンナノ粒子のMie共鳴の結合を観測することができた。得られた結合の強さは、これまでに報告されているものより1.5倍大きく、コアシェル構造の有用性を実証することができた。また、コア/シェルナノ粒子のダイマー構造についても研究を行った。得られた成果は、2022年にSmall誌に発表した。

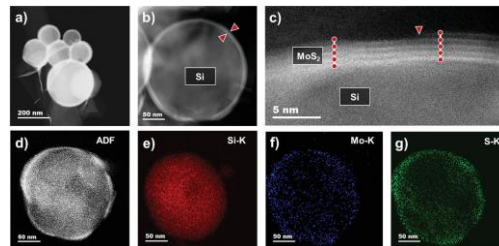


図8 Siナノ粒子コア/MoS₂シェル構造のTEM像。(a-c) TEM像, (d) HAADF像, (e-g) EDSマッピング像。

8. Mie共鳴Siナノ粒子コア/Auシェル構造の形成と光学特性評価

Siナノ粒子のMie共鳴モードとAuシェルの局在表面プラズモンモードの結合によるハイブリダイゼーションモードの発現について理論と実験の両面から研究を行った。図9にコアシェル構造の形成方法と、作製したコアシェルナノ粒子のTEM像を示す。光学測定の結果、モード間の結合により、いずれの共鳴よりも長波長の1400nm付近に吸収性のモード(ダークモード)が現れる事が明らかになった。また、構造パラメーターによりこのダークモードの波長を制御できることを示した。本研究は、神戸大学グループがSiナノ粒子の形成、コア/シェル構造の形成、光学測定、理論計算を行い、デンマーク工科大学のグループがTEM EELSによるハイブリダイゼーションモードの観測及びその理論計算を行った。得られた結果は、2022年にSmall誌に発表した。

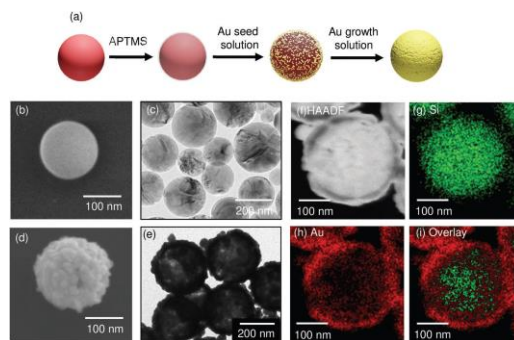


図9 Siナノ粒子コア/Auシェル構造。(a)作製方法, (b, d) SEM像, (c, e) TEM像, (f) HAADF像, (g-i) EDSマッピング像。

9. シリコンナノ粒子分散メタフルイドの開発

ラ・ラダナ大学(スペイン)と共同で、シリコンナノ粒子を分散したメタフルイドが特定状況下で入射光の円偏光を保存し、円偏光近接場を形成することを理論と実験で示した。神戸大学のグループがシリコンナノ粒子コロイド溶液の作製、測定系の構築、測定を行い、ラ・ラダナ大学のグループが測定のベースとなる理論の構築とデータ解析、実験と理論の比較を行った。得られた結果は、2024年にLaser & Photonics Reviewsに発表した。

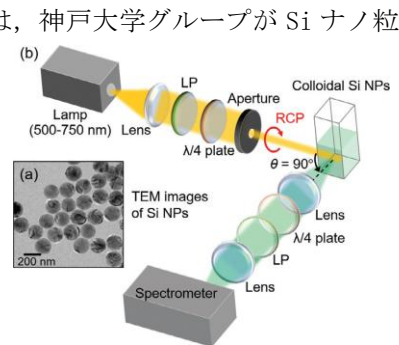


図10 Siナノ粒子分散メタフルイドの光散乱測定セットアップ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計40件（うち査読付論文 40件 / うち国際共著 20件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Olmos Trigo Jorge, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Far Field Detection of Near Field Circular Dichroism Enhancements Induced by a Nanoantenna	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Laser & Photonics Reviews	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lpor.202300948	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 該当する
1. 著者名 Yoshikawa Hiroki, Ueshima Taiki, Sugimoto Hiroshi, Xu Jingchao, Mizuhata Minoru, Fujii Minoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Single-Nanometer-Sized Boron and Phosphorus Co-Doped Silicon Nanoparticles for Negative Electrode of Lithium-Ion Batteries	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.3c04824	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 Negoro Hidemasa, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru	4. 巻 12
2. 論文標題 Circularly Polarized Scattering Radiation From a Silicon Nanosphere	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2301850-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202301850	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 Matsumori Akira, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru	4. 巻 17
2. 論文標題 Unidirectional Transverse Light Scattering in Notched Silicon Nanosphere	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Laser & Photonics Reviews	6. 最初と最後の頁 2300314-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lpor.202300314	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 Negoro Hidemasa, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru	4. 巻 23
2. 論文標題 Helicity-Preserving Optical Metafluids	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 5101 ~ 5107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.3c01026	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 Shima Daisuke, Sugimoto Hiroshi, Assadillayev Artyom, Raza S?ren, Fujii Minoru	4. 巻 11
2. 論文標題 Gallium Phosphide Nanoparticles for Low Loss Nanoantennas in Visible Range	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2203107-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202203107	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 該当する

1. 著者名 Adachi Masato, Sugimoto Hiroshi, Nishimura Yuya, Morita Kenta, Ogino Chiaki, Fujii Minoru	4. 巻 19
2. 論文標題 Fluorophore Decorated Mie Resonant Silicon Nanosphere for Scattering/Fluorescence Dual Mode Imaging	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2207318-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202207318	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 Shinomiya Hiroto, Sugimoto Hiroshi, Hinamoto Tatsuki, Lee Yan Joe, Brongersma Mark L., Fujii Minoru	4. 巻 9
2. 論文標題 Enhanced Light Emission from Monolayer MoS ₂ by Doubly Resonant Spherical Si Nanoantennas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 1741 ~ 1747
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.2c00142	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 該当する

1. 著者名 Svendsen Mark K., Sugimoto Hiroshi, Assadillayev Artyom, Shima Daisuke, Fujii Minoru, Thygesen Kristian S., Raza S?ren	4. 巻 10
2. 論文標題 Computational Discovery and Experimental Demonstration of Boron Phosphide Ultraviolet Nanoresonators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2200422-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202200422	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 該当する

1. 著者名 Wang Yinggang, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru	4. 巻 126
2. 論文標題 Size-Dependent Mutual Charge Transfer between B- and P-Codoped Si Quantum Dots and Monolayer MoS ₂	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 16401 ~ 16408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.2c04509	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 Sugimoto Hiroshi, Hinamoto Tatsuki, Kazuoka Yusuke, Assadillayev Artyom, Raza S?ren, Fujii Minoru	4. 巻 18
2. 論文標題 Mode Hybridization in Silicon Core?Gold Shell Nanosphere	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2204890-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202204890	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 該当する

1. 著者名 Hinamoto Tatsuki, Lee Yea Shine, Dereshgi Sina Abedini, DiStefano Jennifer G., dos Reis Roberto, Sugimoto Hiroshi, Aydin Koray, Fujii Minoru, Dravid Vinayak P.	4. 巻 -
2. 論文標題 Resonance Couplings in Si@MoS ₂ Core-Shell Architectures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2200413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202200413	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 該当する

1. 著者名 Fiedler Saskia, Stamatopoulou P. Elli, Assadillayev Artyom, Wolff Christian, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru, Mortensen N. Asger, Raza Soren, Tserkezis Christos	4. 巻 22
2. 論文標題 Disentangling Cathodoluminescence Spectra in Nanophotonics: Particle Eigenmodes vs Transition Radiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2320 ~ 2327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c04754	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 該当する

1. 著者名 Turansky R., Brndiar J., Pershin A., Gali A., Sugimoto H., Fujii M., Stich I.	4. 巻 125
2. 論文標題 Structure and Properties of Heavily B and P Codoped Amorphous Silicon Quantum Dots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 23267 ~ 23274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c06527	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 該当する

1. 著者名 Assadillayev Artyom, Hinamoto Tatsuki, Fujii Minoru, Sugimoto Hiroshi, Raza Soren	4. 巻 10
2. 論文標題 Thermal near-field tuning of silicon Mie nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 4161 ~ 4169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2021-0424	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 該当する

1. 著者名 Fujii Minoru, Sugimoto Hiroshi, Kano Shinya	4. 巻 61
2. 論文標題 Colloidal solution of boron and phosphorus codoped silicon quantum dots -from material development to applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA0807 ~ SA0807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac1c3f	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 Takada Miho, Inoue Kosuke, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru	4. 巻 32
2. 論文標題 Solution-processed silicon quantum dot photocathode for hydrogen evolution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 485709 ~ 485709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/ac09e0	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 Assadillayev Artyom, Hinamoto Tatsuki, Fujii Minoru, Sugimoto Hiroshi, Brongersma Mark L., Raza Soren	4. 巻 8
2. 論文標題 Plasmon Launching and Scattering by Silicon Nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 1582 ~ 1591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.0c01554	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 該当する

1. 著者名 Okazaki Takuma, Sugimoto Hiroshi, Hinamoto Tatsuki, Fujii Minoru	4. 巻 13
2. 論文標題 Color Toning of Mie Resonant Silicon Nanoparticle Color Inks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 13613 ~ 13619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaami.1c01692	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 Pavelka Ondrej, Dyakov Sergey, Vesely Jozef, Fucikova Anna, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru, Valenta Jan	4. 巻 13
2. 論文標題 Optimizing plasmon enhanced luminescence in silicon nanocrystals by gold nanorods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 5045 ~ 5057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1NR00058F	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 該当する

1. 著者名 Hinamoto Tatsuki、Hamada Mikihiko、Sugimoto Hiroshi、Fujii Minoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Angle , Polarization , and Wavelength Resolved Light Scattering of Single Mie Resonators Using Fourier Plane Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2002192 ~ 2002192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202002192	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 Sugimoto Hiroshi、Fujii Minoru	4. 巻 2
2. 論文標題 Colloidal Mie Resonators for All Dielectric Metaoptics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Photonics Research	6. 最初と最後の頁 2000111 ~ 2000111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adpr.202000111	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 Inoue Asuka、Sugimoto Hiroshi、Sugimoto Yozo、Akamatsu Kensuke、Hubalek Kalbacova Marie、Ogino Chiaki、Fujii Minoru	4. 巻 10
2. 論文標題 Stable near-infrared photoluminescence from silicon quantum dot?bovine serum albumin composites	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MRS Communications	6. 最初と最後の頁 680 ~ 686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/mrc.2020.83	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 該当する

1. 著者名 Hinamoto Tatsuki、Hotta Shinnosuke、Sugimoto Hiroshi、Fujii Minoru	4. 巻 20
2. 論文標題 Colloidal Solutions of Silicon Nanospheres toward All-Dielectric Optical Metafluids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7737 ~ 7743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c03295	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 Sugimoto Hiroshi、Imaizumi Ryosuke、Hinamoto Tatsuki、Kawashima Takahiro、Fujii Minoru	4. 巻 3
2. 論文標題 Silicon Nanowire on Mirror Nanoantennas: Engineering Hybrid Gap Mode for Light Sources and Sensing Platforms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 7223 ~ 7230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.0c01559	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 Fujii Minoru、Fujii Riku、Takada Miho、Sugimoto Hiroshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Silicon Quantum Dot Supraparticles for Fluorescence Bioimaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 6099 ~ 6107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.0c01295	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 Sugimoto Hiroshi、Okazaki Takuma、Fujii Minoru	4. 巻 8
2. 論文標題 Mie Resonator Color Inks of Monodispersed and Perfectly Spherical Crystalline Silicon Nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2000033 ~ 2000033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202000033	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 Fujii Minoru、Minami Akiko、Sugimoto Hiroshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Precise size separation of water-soluble red-to-near-infrared-luminescent silicon quantum dots by gel electrophoresis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 9266 ~ 9271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0NR02764B	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 Yanagawa Hiroto, Inoue Asuka, Sugimoto Hiroshi, Shioi Masahiko, Fujii Minoru	4. 巻 9
2. 論文標題 Antibody-conjugated near-infrared luminescent silicon quantum dots for biosensing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MRS Communications	6. 最初と最後の頁 1079 ~ 1086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/mrc.2019.98	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 Sugimoto Hiroshi, Somogyi B?lint, Nakamura Toshiyuki, Zhou Hao, Ichihashi Yuichi, Nishiyama Satoru, Gali Adam, Fujii Minoru	4. 巻 123
2. 論文標題 Size-Dependent Photocatalytic Activity of Cubic Boron Phosphide Nanocrystals in the Quantum Confinement Regime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 23226 ~ 23235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b06487	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 該当する

1. 著者名 Nomoto Keita, Sugimoto Hiroshi, Cui Xiang-Yuan, Ceguerra Anna V., Fujii Minoru, Ringer Simon P.	4. 巻 178
2. 論文標題 Distribution of boron and phosphorus and roles of co-doping in colloidal silicon nanocrystals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 186 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2019.08.013	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 該当する

1. 著者名 Sugimoto Hiroshi, Zhou Hao, Takada Miho, Fushimi Junichiro, Fujii Minoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Visible-light driven photocatalytic hydrogen generation by water-soluble all-inorganic core-shell silicon quantum dots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0TA01071E	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 Nomoto Keita, Sugimoto Hiroshi, Ceguerra Anna V., Fujii Minoru, Ringer Simon P.	4. 巻 12
2. 論文標題 3D microstructure analysis of silicon-boron phosphide mixed nanocrystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 7256 ~ 7262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0nr01023e	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 該当する

1. 著者名 Manna Uttam, Sugimoto Hiroshi, Eggena Daniel, Coe Brighton, Wang Ren, Biswas Mahua, Fujii Minoru	4. 巻 127
2. 論文標題 Selective excitation and enhancement of multipolar resonances in dielectric nanospheres using cylindrical vector beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 033101-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5132791	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 該当する

1. 著者名 Parker John A., Sugimoto Hiroshi, Coe Brighton, Eggena Daniel, Fujii Minoru, Scherer Norbert F., Gray Stephen K., Manna Uttam	4. 巻 124
2. 論文標題 Excitation of Nonradiating Anapoles in Dielectric Nanospheres	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 097402-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.097402	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 該当する

1. 著者名 Inoue Kosuke, Kojima Takuya, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru	4. 巻 123
2. 論文標題 Charge Transfer-Induced Photobrightening of Silicon Quantum Dots in Water Containing a Molecular Reductant	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 1512 ~ 1518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b11359	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27件(うち招待講演 8件/うち国際学会 18件)

1. 発表者名 Hiroshi Sugimoto
2. 発表標題 Functional Silicon Nanoparticles with Sizes Ranging from Single Nanometers to Sub-Micrometetrs
3. 学会等名 2023 MRS Spring Meeting (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Sugimoto, Hiroaki Hasebe, Taniyuki Furuyama, Minoru Fujii
2. 発表標題 Promoting Excitation of Triplet State of Molecule by Enhanced Magnetic Field of Dielectric Metasurfaces
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hidemasa Negoro, Hiroshi Sugimoto, Minoru Fujii
2. 発表標題 Template-Assisted Capillary-Assembly of Crystalline Silicon Nanoparticles for All-Dielectric Nanoantenna
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minoru Fujii
2. 発表標題 Silicon nanoparticle nanoantenna for the enhancement of light-matter interaction
3. 学会等名 Light emission and photonics of group IV semiconductor nanostructures (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minoru Fujii, Hiroshi Sugimoto
2. 発表標題 Enhancement of magnetic dipole transition of molecules by silicon nanoparticle nanoantenna
3. 学会等名 241st Electrochemical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Sugimoto, Minoru Fujii
2. 発表標題 Experimental Demonstration of Magnetic Purcell Enhancement by Magnetic Resonance of Silicon Nanospheres
3. 学会等名 2021 MRS Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 2021 MRS Fall Meeting
2. 発表標題 Near Infrared Absorption and Photocurrent Enhancement by Coupled Toroidal Dipole Modes in Silicon Metasurfaces
3. 学会等名 2021 MRS Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 新司、高田 三穂、杉本 泰、藤井 稔
2. 発表標題 シリコン量子ドット光触媒による水素生成 () ~シリコン量子ドット-白金ナノ粒子複合光電極~
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田 三穂、杉本 泰、藤井 稔
2. 発表標題 シリコン量子ドット光触媒による水素生成 (III)
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高田 三穂、杉本 泰、藤井 稔
2. 発表標題 シリコン量子ドット光触媒による水素生成
3. 学会等名 光化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Minoru Fujii and Hiroshi Sugimoto
2. 発表標題 Colloidal solutions of silicon nanoparticles -from material development to applications
3. 学会等名 ISPlasma 2021/ISPLANTS 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minoru Fujii, and Hiroshi Sugimoto
2. 発表標題 Luminescence property of boron and phosphorus co-doped silicon quantum dots
3. 学会等名 The 7th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA2019) in Optics & Photonics International Congress 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Sugimoto, Minoru Fujii
2. 発表標題 Size Dependent Donor and Acceptor Pair Recombination in Colloidal Silicon Quantum Dots
3. 学会等名 2019 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Sugimoto
2. 発表標題 All-Inorganic Colloidal Silicon Quantum Dots Codoped with Boron and Phosphorus
3. 学会等名 European Materials Research Society 2019 Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Fujii, and Hiroshi Sugimoto
2. 発表標題 Donor and Acceptor Pair Luminescence in Colloidal Silicon Quantum Dots
3. 学会等名 SemiconNano2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuki Hinamoto, Yan Joe Lee, Soren Raza, Hiroshi Sugimoto, Minoru Fujii, and Mark L. Brongersma
2. 発表標題 Controlling Emission of WS ₂ Monolayer with a Spherical Silicon Mie Resonator
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高田 三穂、周 昊、杉本 泰、藤井 稔
2. 発表標題 シリコン量子ドット光触媒による水素生成(II)
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 晃輔、杉本 泰、藤井 稔
2. 発表標題 サイクリックボルタンメトリーによるシリコン量子ドットのエネルギー準位構造評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南 晶子、杉本 泰、藤井 稔
2. 発表標題 シリコン量子ドットの電気泳動
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 周 昊、杉本 泰、藤井 稔
2. 発表標題 シリコン量子ドット光触媒による水素生成(I)
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本 泰、藤井 陸、藤井 稔
2. 発表標題 不純物をドーブした単分散シリコン量子ドットの発光特性 (II)
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 飛鳥、杉本 洋蔵、杉本 泰、藤井 稔
2. 発表標題 シリコン量子ドット-タンパク質間相互作用によるプロテインコロナ形成
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Fujii
2. 発表標題 Boron and Phosphorus Co-Doped Colloidal Silicon Quantum Dots
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Asuka inoue, Hiroshi Sugimoto, Byungji Kim, Michael J. Sailor, Minoru Fujii
2. 発表標題 Silver Core/Silicon Nanocrystal Shell Hybrid Nanoparticle as Antimicrobial Agent
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Mesoscopic Materials Research
<https://www.lab.kobe-u.ac.jp/eng-nano/index.html>

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	杉本 泰 (Sugimoto Hiroshi) (40793998)	神戸大学・工学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	加納 伸也 (Kano Shinya) (20734198)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員 (82626)	

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1件

国際研究集会 “Deployment of environmentally-friendly nanoparticles to bionics, photonics and electronics” Kick-off meeting	開催年 2019年～2019年
---	--------------------

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			
米国	Stanford University	Northwestern University	Illinois State University	
デンマーク	Technical University of Denmark	University of South Denmark		
スロバキア	Slovak Academy of Sciences			
ハンガリー	Inst. for Solid State Physics and Optics			

共同研究相手国	相手方研究機関			
チェコ	Charles University			
オーストラリア	The University of Sydney			
米国	UC San Diego			
チェコ	Charles University			