

補助事業番号 2023M-380

補助事業名 2023年度 単一コロイド量子ドットの電気伝導現象の解明と高機能光電子デバイスへの展開 補助事業

補助事業者名 東北工業大学 柴田憲治

1 研究の概要

コロイド量子ドット(CQD)は、直径が数ナノメートルの半導体結晶であり、近年、特に太陽電池などの光電子デバイスへの応用が期待されている。しかし、CQDのサイズや配列様式の揺らぎにより、素子応用において重要となる電子輸送特性の理解は十分に進んでいない。

本研究では、高機能光デバイスへの応用が期待される様々なCQD材料について、単一CQDレベルでのキャリア伝導特性を明らかにすることを目的とする。具体的には、単一CQDレベルでの電子状態の解析を行うとともに、CQDの有機配位子(リガンド)の影響を評価する。得られた結果をもとに、次世代太陽電池、高感度光検出器、高輝度・省電力LEDなど、さまざまな高機能光デバイスへの応用に最適なCQD材料とリガンド材料の組み合わせを検討する。

2 研究の目的と背景

コロイド量子ドット(CQD)は、直径が数ナノメートルの半導体結晶であり、近年、特に太陽電池への応用が期待されている。例えば、硫化鉛(PbS) CQDは、従来の太陽電池が苦手とする赤外光領域において、広い吸収波長範囲を制御できる有望な光電変換材料である。しかし、CQD間のキャリア伝導の理解と制御が不十分であるため、高効率な電力変換の実現には至っていない。

これまで、CQDのキャリア伝導特性は、多数のCQDアンサンブルにおける平均の評価にとどまっており、単一CQDレベルでの伝導特性の評価は十分に行われていない。単一CQDのキャリア伝導特性を明らかにすることは、太陽電池をはじめとする革新的な光電子デバイスの開発に大きく貢献する可能性がある。

本研究では、異なる材料系のCQDに対して、単一CQDレベルでの電気伝導特性を解明し、さまざまな高機能光電子デバイスへの応用に適した材料系を特定することを目的とする。そのために、以下の2項目に関する研究を推進する。

1. 単一CQDトランジスタ素子の作製と基礎的な電気伝導評価
2. 各CQD材料に対する詳細な伝導特性評価と高機能光電子素子に向けた材料系の特定

3 研究内容

本研究では、異なる材料系のコロイド量子ドット(CQD)に対して、単一CQDレベルでの電気伝導特性を解明し、さまざまな高機能光電子デバイスへの応用に適した材料系を特定することを目的として、以下の2項目に関する研究を推進した。

(1) 単一CQDトランジスタ素子の作製と基礎的な電気伝導評価

(URL: <https://www.tohtech.ac.jp/dept/topics/press-media/3044.html>)

様々な材料からなる直径2~10ナノメートルのCQD1個に電氣的にコンタクトするためのナノギャップ金属電極対を形成し、これを単一CQDで架橋することで単一CQDを介する電流を測定した(図1)。更にCQD内の電子状態と各電子軌道を介した電流の評価を可能とするために、ゲート電極を用意し、単一CQDの電子状態と電流をゲート電界で変調可能なトランジスタ構造を実現した。素子の基礎的な伝導特性を評価し、素子構造へとフィードバックすることで素子構造の最適化を行った。

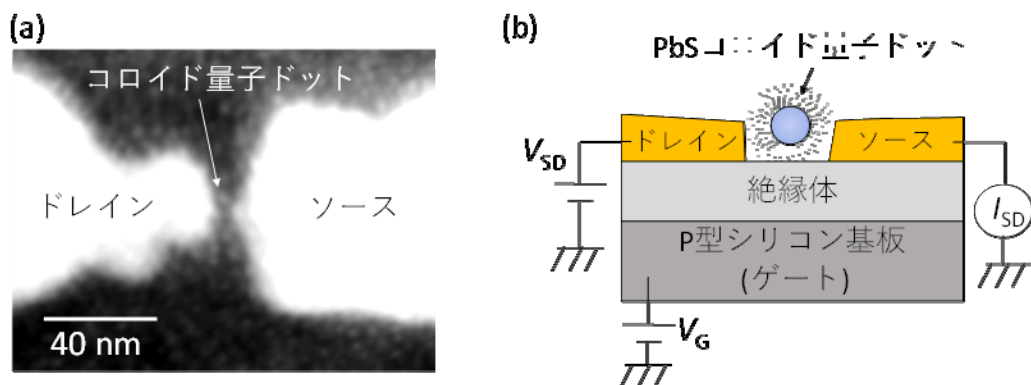


図1 単一のCQDを用いた単一電子トランジスタの試料構造。(a)間隔がナノメートルサイズの金属電極(ナノギャップ金属電極)と電極間に分散したPbS CQDの電子顕微鏡写真。(b)PbS CQD 1個を用いたトランジスタの試料構造と測定回路を示す模式図。

(2) 各CQD材料に対する詳細な伝導特性評価と高機能光電子素子に向けた材料系の特定
(URL: <https://labs.eis.tohtech.ac.jp/shibata/research.htm>)

作製した単一CQDトランジスタの電気伝導特性を詳細に測定した。検出される電流値とゲート変調の様子から、CQDと電極間のトンネル障壁の距離、電流に関与するCQDの電子軌道、CQD内での電子間のクーロン反発力の大きさ、電子・スピン相互作用の大きさなど、様々な特性を評価した(図2)。単一CQDを介する伝導特性の評価を様々なリガンドやCQD材料に対して行うことで、高機能光電子デバイスに最適なCQD材料とリガンド材料の組み合わせを明らかにする研究を行った。単一CQDをチャネルとする素子が室温でも単一の電子を制御可能な単一電子トランジスタとして機能することを示したほか、単一CQDレベルでの電気伝導のメカニズムを解明した。更に、様々な材料(PbS、InAs、ペロブスカイト、CeO₂)の単一ドットレベルでの電気伝導特性の評価を行った。最後に、強磁性電極と結合した単一CQDにおけるトンネル磁気抵抗効果の観測と制御や、光照射下での単一CQDトランジスタの伝導特性の観測に関する実験を行った。

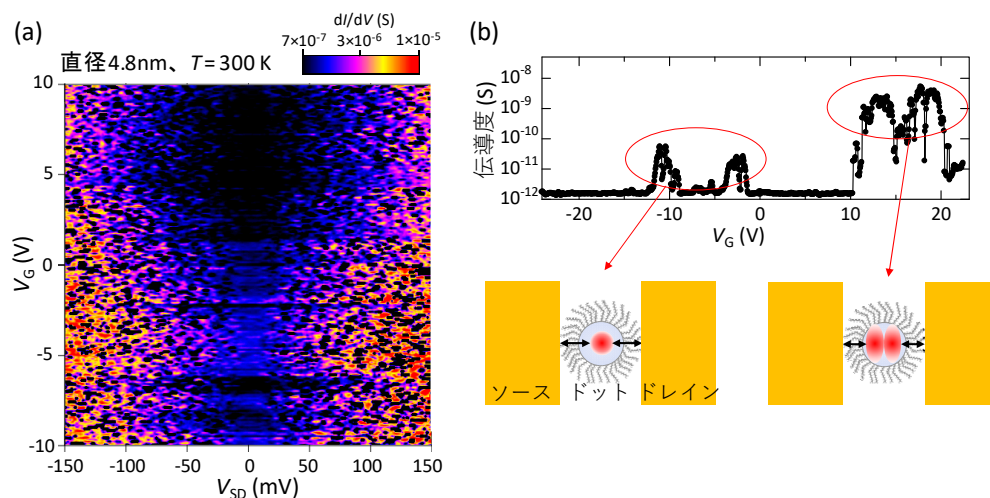


図2 (a) 単一 CQD トランジスタにおいて室温で観測されたクーロンダイヤモンド特性。室温でも素子が電子を1つずつ制御可能な単一電子トランジスタとして機能することが示された。(b) 電流が流れる電子軌道によって伝導度が大きく変化することを示す実験結果(上図)とトンネル伝導のメカニズムを示す概念図(下図)。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究では、高性能光デバイスへの応用が期待される様々なコロイド量子ドット(CQD)材料に対して、単一CQDレベルでのキャリア伝導を測定し、その伝導メカニズムを解明する。本研究は、単一CQDの伝導特性を直接評価する点で従来研究とは一線を画しており、太陽電池への応用に最適なCQD材料の選定に新たな指針を与える。本研究の成果は、次世代の高効率太陽電池の開発を加速させるとともに、再生可能エネルギーの利用拡大とカーボンニュートラル社会の実現に貢献することが期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究代表者はこれまで、極微ギャップを有する金属電極により、GaAs基板上に自己形成された直径数十ナノメートルの単一InAs量子ドットに電氣的にアクセスし、その電子状態の制御と読み出しを電氣的に行う技術の開拓と新規物性の解明に関する研究に従事してきた。本研究はこれまでに培ってきた技術を、より評価が困難な約1/10のサイズのコロイド量子ドット(CQD)にまで拡張した上で、高い歩留まりを実現した点で価値がある。本研究で開発した技術は様々なCQD材料系に適用できることから、本研究で対象とした材料系以外にも今後様々な機能性CQD材料系の単一レベルでの評価が期待される。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

論文発表:

K. Shibata, M. Yoshida, K. Hirakawa, T. Otsuka, S. Z. Bisri, and Y. Iwasa

“Single PbS colloidal quantum dot transistors”

Nature Communications 14, 7486 (2023).

学会発表:

K. Shibata, M. Yoshida, K. Hirakawa, T. Otsuka, S. Z. Bisri, and Y. Iwasa

“Gate-tunable carrier transport through single PbS colloidal quantum dots”

The 25th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-25) and 21st International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-21), Grenoble, France, 9–14th July 2023.

柴田憲治、吉田政希、平川一彦、大塚朋廣、Satria Bisri、岩佐義宏

「単一コロイドPbS量子ドットトランジスタの電気伝導特性」

第84回応用物理学会秋季学術講演会 熊本城ホール・オンライン 2023年9月21日

柴田憲治、吉田政希、平川一彦、大塚朋廣、Satria Bisri、岩佐義宏

「単一PbS量子ドットトランジスタの電気伝導特性」

日本物理学会第78回年次大会 東北大学 2023年9月17日

湯本俊輔、早坂拓真、柴田憲治

「単一電子デバイスのための強磁性ナノギャップトンネル接合の作製」

令和6年東北地区若手研究者研究発表会 日本大学郡山キャンパス 2024年3月1日

西村公希、金子大晟、柴田憲治

「単一PbS量子ドットトランジスタの室温特性とゲート変調」

令和6年東北地区若手研究者研究発表会 日本大学郡山キャンパス 2024年3月1日

K. Shibata, M. Yoshida, K. Hirakawa, T. Otsuka, S. Z. Bisri, and Y. Iwasa

“Single PbS colloidal quantum dot transistors”

The 12th International Conference on Quantum Dots (QD2024), Munich Germany, March 18–24th March 2024.

高橋央輔、大塚朋廣、柴田憲治

「単一ペロブスカイト量子ドットの電気伝導特性」

第71回応用物理学会春季学術講演会 東京都市大学 2023年3月24日

K. Shibata, M. Yoshida, K. Hirakawa, T. Otsuka, S. Z. Bisri, and Y. Iwasa

Single PbS colloidal quantum dot transistors

The Materials Research Society (MRS) spring meeting, Seattle, USA, April 22-26, 2024.

K. Shibata, M. Yoshida, K. Hirakawa, T. Otsuka, S. Z. Bisri, and Y. Iwasa

“Single PbS colloidal quantum dot transistors“

International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2024), Ottawa, Canada, July 28 – August 2, 2024.

滝口智稀、高橋央輔、大塚朋廣、柴田憲治

「単一PbS量子ドットトランジスタへの電気二重層ゲートの適用」

第85回応用物理学会秋季学術講演会 朱鷺メッセ新潟 2024年9月16日

高橋央輔、大塚朋廣、柴田憲治

「単一ペロブスカイト量子ドットに対する電気伝導特性評価」

第85回応用物理学会秋季学術講演会 朱鷺メッセ新潟 2024年9月16日

佐藤明、佐々木悠人、滝口智稀、柴田憲治

「単一InAsコロイド量子ドットトランジスタ」

令和7年東北地区若手研究者研究発表会 東北学院大学 2025年3月8日

齋藤龍世、児玉聖馬、滝口智稀、柴田憲治

「単一コロイド量子ドットを用いた磁気抵抗素子の作製と評価」

令和7年東北地区若手研究者研究発表会 東北学院大学 2025年3月8日

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

該当なし。

(2) (1)以外で当事業において作成したもの

該当なし。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 東北工業大学工学部(トウホクコウギョウダイガクコウガクブ)

住 所： 〒982-8577

宮城県仙台市太白区八木山香澄町35-1

担 当 者： 教授 柴田憲治(シバタケンジ)

担 当 部 署： 電気電子工学科(デンキデンシコウガクカ)

U R L: <https://labs.eis.tohtech.ac.jp/shibata/>