

研究終了報告書

「量子分割によるヘテロ接合ナノ粒子光触媒の超高効率化」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：亀山 達矢

1. 研究のねらい

“量子ドット”と呼ばれる直径数ナノメートルの半導体微粒子では、バルクと異なる光励起キャリアの緩和過程により、多励起子生成が起こる確率が高まる。これは、バンドギャップの2倍よりもエネルギーの大きな光から、ひとつの粒子内に複数の励起子を生成する過程であり、例えば波長310 nm (4 eV) の光子1つを吸収して、最低励起状態の電子-正孔対(2 eV (波長620 nm 相当))を2つ生成することができる。量子分割とも呼ばれる、このような非線形現象を利用すると、それまで熱として放出していた、バンドギャップよりも大きな光のエネルギーの有効な利用が可能になり、分割した励起子を化学反応に利用することができれば、理論的には量子収率が100%を超える光触媒の超高効率化が期待できる。しかし、現状これらは一部の量子ドットにおいて超高速分光などの高度な手法により、現象として捉えることはできているものの、デバイスで有効に利用した報告はない。例えば、量子ドットを組み込んだ太陽電池では、短波長光照射時の光電変換の外部量子収率が100%を超えるといった実験的な報告はあるものの、素子全体の変換効率を上げるには至っていない。

量子ドットはコロイド合成法の確立により、現在では欠陥が少なく高品質なものが合成可能になってきている。しかし、そのような単結晶で高品質な量子ドットにおいても、量子分割によりドット中に生成した多励起子は、非常に狭い空間の中に複数の励起子が生成することにより、オージェ再結合が起こりやすく、サブナノ秒の寿命で非常に素早く失活する。すなわち、生成した多励起子を反応のために電荷キャリアとして粒子から取り出すことが困難である。本研究のねらいは、この多励起子を再結合させることなく、いかにして反応に利用できる状態へと変容させるのかという点にある。これによりオージェ再結合を抑制することにより、複数のキャリアを利用する超高効率光触媒の創製をめざすための指針を得る。

量子分割を行うためにはそもそものエネルギーギャップが小さい、近赤外光にも応答するような量子ドットの利用が必須となる。従来の近赤外応答する量子ドットはPbSやCdTeであり、高毒性重金属を含むことが問題となる。このような背景から、私は近赤外光に応答可能な新規量子ドットとして、ZnTe-AgInTe₂ 固溶体量子ドットを開発し、これらが発光材料として優れた特性を持つことを報告してきた。本研究ではこの新規近赤外量子ドットを基軸として、量子分割による光エネルギーの反応への有効な利用を検討することとした。

2. 研究成果

(1) 概要

前述した目的を達成するため、当初計画として粒子内部に異種半導体からなるType-II型のヘテロ接合界面を導入することを考えた。このようなヘテロ接合界面を持つ粒子として、私はこれまでに低毒性元素からなるZnS-AgInS₂固溶体量子ドットを、組成を変更させながら接

合させた、ダンベル形状量子ドットの開発を行ってきた。このダンベル形状量子ドットでは光励起された電子・正孔が界面で電荷分離することにより、キャリアを長寿命化させ反応効率を向上させることに成功している。量子分割による多励起子生成 (Multiple exciton generation; MEG) を化学反応に利用するためには、オージェ再結合の抑制が鍵となるが、このようなヘテロ接合界面により MEG で生成した励起子を素早く電荷分離することができれば本研究の目的を達成できる。

はじめに研究テーマ①「ZnTe-AgInTe₂量子ドットにおける MEG の観測と光電流増強」を実施した。ここでは、ZnTe 量子ドットにおいて MEG を利用した光エネルギー変換の可能性を示すため、発光の高速分光や電極上に担持したときの、励起エネルギーと光電流応答について詳細に調べた。量子ドットのエネルギーギャップに対して、2.8 倍以上のエネルギーをもつ光を照射したときに、MEG 発生時に特徴的なオージェ再結合を示す早い寿命成分を観察することができた。一方で、電極上に担持した ZnTe 量子ドットに対して光照射した際に発生する光電流の波長依存性からホットキャリアが電極に注入されていることがわかった。

ZnTe 量子ドットにおけるホットキャリア移動の挙動を調べるため、続いて研究テーマ②「ZnTe-AgInTe₂量子ドットから電子アクセプターへのホットキャリア移動」に取り組んだ。電子アクセプターとして、メチルビオロゲンを用いて、キャリア移動の初期状態を分光学的に観察したところ、ZnTe 量子ドット表面に予め配位させたメチルビオロゲンへの電子移動は効率的かつサブピコ秒のとても早い時間スケールで起こることを見出した。これはすなわち、当初計画した Type-II 型のヘテロ構造を形成した場合に、MEG が起こるような高い励起状態を形成してもホットキャリアが MEG よりも早く電荷移動してしまうことを示唆する結果であった。

ここまでの知見から、ZnTe 中に光生成したホットキャリアを MEG に利用するためには、生成したホットキャリアを長寿命化する必要があることがわかった。そこで、ホットキャリアがナノ秒オーダーで長寿命化することが知られるグラフェン量子ドットを用いて、これを ZnTe 量子ドットと接合させた、これまでに報告のない新規ヘテロ接合量子ドットを合成し、高速分光から MEG の可能性について検討した(研究テーマ③「ホットキャリアの長寿命化を目指した新規ヘテロ接合量子ドットの創生」)。

(2) 詳細

研究テーマ①「ZnTe-AgInTe₂量子ドットにおける MEG の観測と光電流増強」

初めに ZnTe-AgInTe₂ (ZnTe; (AgIn)_xZn_{2(1-x)}Te₂) 固溶体からなる量子ドットを量子分割に用いるための基礎的な検討を行った。図 1a に ZnTe 量子ドットの吸収スペクトルおよび TEM 像を示す。ここからわかるように、ZnTe 量子ドットは、近赤外光領域でエネルギーギャップを固溶体の組成 (x の値) に応じて微細に制御可能な材料である。ZnTe 量子ドットは新規な材料であり、まずそもそもこの材料において MEG が起こるのかを確認する必要がある。そこで、高エネルギー光照射時の発光寿命の観測を行った。三種類の波長 (785, 375, 280 nm) における発光ピーク 1000 nm の発光減衰曲線を測定した (図 2)。MEG の起こらない、785 nm ($E_g/h\nu=1.3$) における測定結果と比較して、375 nm ($E_g/h\nu=2.8$) および 280 nm ($E_g/h\nu=3.7$) では、励起直後に減衰過程が観測できるのがわかる。これらの結果を

三成分でフィッティングすると、後者においてのみ、サブナノ秒の領域で減衰成分が見られる。MEG が発生した場合、量子ドット内に複数のキャリアが存在することで、オージェ再結合が生じ発光減衰に新たな過程が追加される。オージェ再結合はピコ秒オーダーの非常に速い速度で起こることから、この結果の様に、速い成分の発現がすなわち間接的に量子ドット内の MEG の発生を示している。これらのことは典型的な量子ドットである CdTe や PbS でも報告されている。 $E_g/h\nu=2.5$ までの励起光では観測できなかったものの、このように高いエネルギーを与えることにより ZAlTe 量子ドットにおいても MEG を生じることを確認できた。

一方で、ZAlTe 量子ドットに対して光照射した際に発生する電流(光電流)を観測すると、短波長光照射時に興味深い光電流増強を示した。ZAlTe 量子ドットを固定化した透明電極に対し、可視から近赤外光を照射すると、粒子組成 x に関わらず、いずれの ZAlTe においてもカソード光電流を生じ、p 型半導体類似の特性を示した。光電流の作用スペクトル(図 1b)は、立ち上がり波長付近では、粒子の吸収スペクトルと一致したものの、約 500 nm 以下の短波長側では吸収スペクトルよりも大きく増加することがわかった。この時、エネルギーの異なる単色光を照射しながら電極電位を走査し、光電流-電位曲線を測定したところ光電流の立ち上がり電位が波長により変化した(図 3a)。

これらの結果からまず期待されたのは、MEG による多数キャリアの光電流としての観測である。しかし、前述したように ZAlTe 量子ドットにおける MEG の閾値は $E_g/h\nu=2.8$ であり、光電流の増強はそれよりも低いエネルギーで発生している($E_g/h\nu=2.3$)。また、電位応答からも別のメカニズムが考えられた(図 3b)。電極電位が量子ドットの価電子帯準位の上端に等しい電位付近から負電位側に掃引す

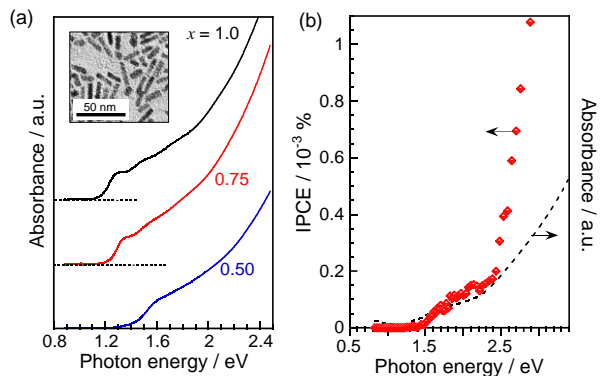


図 1. (a) ZAlTe 量子ドットの組成に依存した吸収スペクトル変化と代表的な TEM 像 ($x=0.75$)。 (b) ZAlTe 量子ドット ($x=0.75$) を担持した ITO 電極の光電流作用スペクトル (-0.3 V vs. Ag/AgCl) と吸収スペクトル。

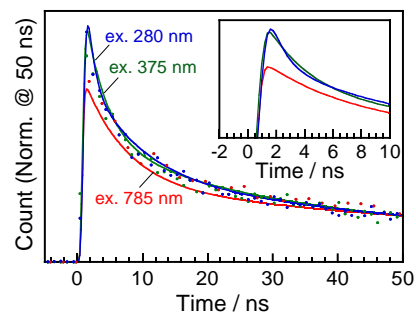


図 2. 励起波長を変化させて測定した ZAlTe 量子ドットの発光寿命。挿入図は初期の拡大図。

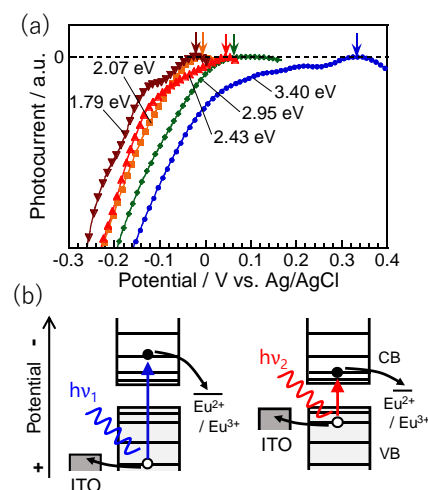


図 3. (a) 照射光波長を変化させて測定した ZAlTe 量子ドット ($x=0.75$) 担持 ITO 電極の光電流-電位曲線。(b) 立ち上がり電位の変化とエネルギー構造の関係。

ることで、正孔が電極に移動し観測される。ZAlTe ($x=0.75$) の場合、価電子帯上端準位は約 0 V vs. Ag/AgCl であるため低いエネルギーで励起した場合には、これと同様の現象が観測されている。一方で、高エネルギー光で励起した場合には、立ち上がりが正電位側へとシフトした。これは、バンド端へと正孔が失活する前に電極へ移動していると考えたと説明することができる。すなわちホットな状態のキャリアがエネルギーを保ったまま取り出されるホットキャリア移動が起きていることが示された。

研究テーマ②「ZnTe-AgInTe₂ 量子ドットから電子アクセプターへのホットキャリア移動」

ZAlTe 量子ドット固定化電極は p 型半導体と同様の挙動により、ホール電極への移動によってカソード光電流が生じており、高い励起状態のホール(ホットホール)が電極に効率的に注入されることがわかった。一方で、高励起状態のホットエレクトロンの挙動については依然として未解明であった。そこで、電子受容体としてよく用いられるメチルビオロゲン(MV)を ZAlTe 量子ドットと複合化させ、その光励起後のダイナミクスを観察した。

コロイド法により合成した ZAlTe ($x=0.75$) 量子ドットオクタン溶液中に、量子ドット 1 粒子に対して 16 分子相当の MV を添加した。得られた粒子に対して、365 nm の励起光を照射し、定常状態での発光スペクトルを観察したところ、その強度は MV を添加していない場合と比較して、1/10 以下まで減衰しており、励起された電子が MV へ効率よく移動していることが確認された。

MV を添加したものとしていないものを用いて、その過渡吸収スペクトル測定を行った。このとき、励起光には $E_g/h\nu=1.22$ と MEG が生じない程度で、かつ E_g よりも高い波長 800 nm を採用した。得られた過渡吸収スペクトルからは、サブピコ秒～ナノ秒の範囲で、MV の有無に関わらず、バンド端波長にブリーチ信号が観測された(図 4ab)。ブリーチ信号は励起されたキャリアがバンド端準位に蓄積されること

で、バンド端への直接遷移ができなくなるために表れ、時間経過と共にキャリアが再結合や電子移動によりバンド端から移動することで、徐々に減衰する。これを解析することにより、キャリアのダイナミクスを知ることが出来る。時間と吸収端波長のブリーチ信号の関係を図 4c に示す。この、ブリーチ信号の時間変化は MV の有無により大きく異なり、MV を添加することで減衰速度が大きく増加した。ホット電子の挙動を解析するには、バンド端へ電荷が蓄積されるまでの過程を観察する(ライズ成分と呼ばれる)。MV を添加していない場合には電子の受け手が存在しないので、高励起キャリアがバンド端へ緩和するまでの速度定数(k_1)を求めることが出来る。一方で、MV を添加するとこのライズ寿命が短くなり、速度定数が大きくなっていることがわかる。これは、バンド端への緩和以前にホット電子の状態で粒子から移動してしまうためであると考えられ、この速度定数を k_{HET} として解析することで、

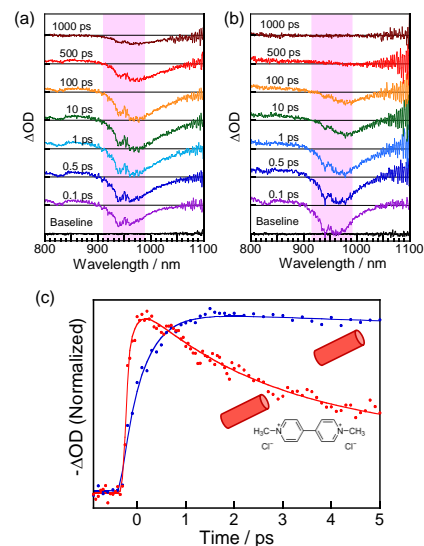


図 4. ZAlTe (a)および ZAlTe-MV (b)の過渡吸収スペクトルとその時間変化(960 nm) (c)。

最終的にはホット電子移動収率 Φ ($k_{\text{HET}}/(k_1+k_{\text{HET}})$) が求められる。この時の収率は 40%と見積もられた。さらに興味深いことは、より短い波長で励起した場合のキャリアダイナミクスからは、さらに効率的にホットキャリアが移動していることが確認でき、400 nm ($E_g/h\nu=2.4$) 励起時にはその効率も 75%まで向上した。以上のことから、ZAlTe 量子ドットの高エネルギー励起からのキャリアの挙動について、種々の知見を得ることが出来た。量子ドットが単独で存在する(キャリアの受け手が居ない)場合には、 E_g の 2.8 倍以上のエネルギーの光で励起すると、MEG を観測することが出来た。一方で、電位を制御した電極やメチルビオロゲンなどと接触した状態では、ホットキャリア移動が効率的に起こる。これらは競争的な関係にあり、MEG を反応に利用するにはホットキャリア移動が起こる前に MEG を起こすための工夫が必要となる。また、ホットキャリアをエネルギーの放出をともなわずそのまま利用できれば、エネルギーの高効率利用に資すると言える。

研究テーマ③「ホットキャリアの長寿命化を目指した新規ヘテロ接合量子ドットの創生」

ここまでの検討から、ZAlTe 量子ドットのホットキャリアの振る舞いについてわかったことを図 5 にまとめた。ZAlTe 中で光生成するホットキャリアは E_g の 2.8 倍以上の光を照射することにより、“それが孤立した状態であれば”MEG を生じることがわかっている。このときの時間スケールは発光寿命測定などからも数ナノ秒程度である。孤立した QDs 中では、MEG の発生と同時に数ナノ秒のオーダーでオーグジュ再結合が生じるので、これを反応に利用するためヘテロ構造を形成させることを当初計画した。しかし、孤立しておらず、電子アクセプターや電極などキャリアの受け手が存在する中で、高励起状態を形成させるとホットキャリアが数百 fs という非常に早い速度で電荷移動することも明らかになった。この現象は MEG の生成を阻害する。

すなわち、当初の構造では目的とする MEG の化学反応への利用は達成できないと考えられたため、量子ドット触媒構造に修正を加えることとした。そこで注目したのがグラフェンである。グラフェン中のホットキャリアは半導体量子ドットなどと比較して長寿命(数百 ps)で保持されることが報告されている。つまり、これを本研究で目指すヘテロ構造に導入し、ホットキャリアの保管庫として使うことにより、MEG の発生する時間スケールまでホットキャリアを保持することが期待される。本研究のポイントは、ナノスケールのヘテロ接合構造を作ることにより、そこに通常の数百ナノメートルのスケールのグラフェンでは適切な構造を作ることができない。そのため、数ナノメートルのグラフェン(グラフェン量子ドット)を使うこととした(図 6a)。これを本研究が目指すヘテロ接合界面に組み込む構造を構築するため、以下の検討を実施した。

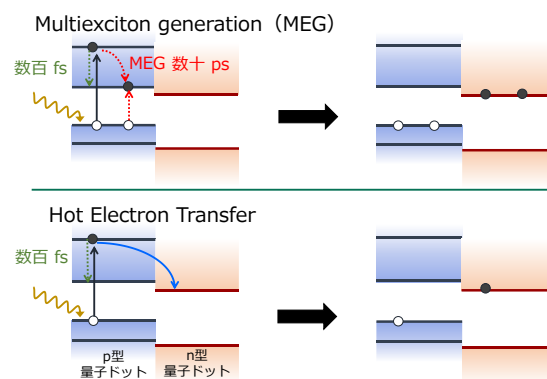


図 5. ヘテロ接合量子ドットで発生する MEG とホットキャリア移動のイメージおよび時間スケール。

グラフェン量子ドット(GQDs)は既報を元に、サイズが約 6 nm のものを合成した。GQDs を分散させた溶媒中で、ZAITe 量子ドットを合成することにより、GQDs 表面で結晶核を析出させることによる安定化と、それを起点とする結晶成長によりヘテロな結晶の合成を試みた。図 6b には組成 $x=1.0$ にて GQDs を含むドデカンチオール中で合成した ZAITe 量子ドットの TEM 像を示す。得られた粒子には T 字型の粒子や円とロッドがつながった

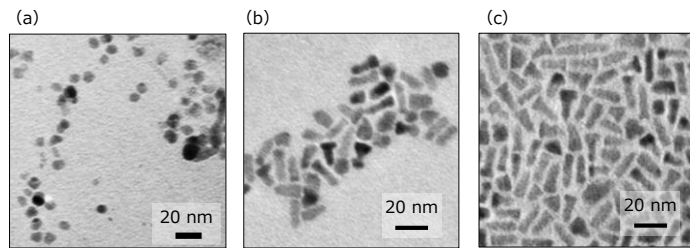


図 6. 量子ドットの TEM 像。(a) GQDs、(b,c) GQDs/ZAITe 量子ドット (分離前 b, 分離後 c)。

ようなヘテロ粒子が多く観察されたが、その一方でヘテロ成長していない粒子も複数混在していることが確認できた。そこで、サイズ選択的沈殿法により、QDs の貧溶媒を少量加え、大きな粒子のみ沈殿として取り出す操作を複数回繰り返すことにより、所望のサイズのヘテロ粒子を取り出すことを試みた。その結果図 6c のような GQDs と ZAITe 量子ドットのヘテロ接合粒子を得ることに成功した。

得られたサンプルの発光スペクトルからは、ZAITe 量子ドット由来の発光が観測されるものの、その強度は GQDs が無い場合と比較して 1/10 程度まで消光していることが確認された。これは量子ドットから GQDs へのキャリア移動が起こっていることを意味しており、GQDs がキャリアの保管庫として機能する可能性を示した。この粒子を用いて、発光減衰を測定すると、 $E_g/h\nu=2.1$ 倍でもピコ秒の速い減衰成分を観測することが出来た。このような早い成分は MEG が生じない $E_g/h\nu=1.3$ では観測できないことから、GQDs との接合により MEG の発生する閾値が減少した可能性が考えられる。予備的な結果ではあるが、このようにして得られたヘテロ粒子を用いて、水素発生光触媒反応を行ったところ、それぞれ ZAITe のみや GQDs のみ、これらを混ぜた場合よりも 2.5 倍高い反応活性を観測することが出来た。現時点で、期待するような MEG による活性向上であるかどうか判断するには、今後単色光照射下での活性の評価などを行う必要がある。

最終的にはここに対して n 型半導体量子ドットを接合させることで、当初目的としたオージェ再結合を抑制しつつ、MEG を効率的に利用できる半導体量子ドット光触媒を開発したい。そのための n 型半導体量子ドット層として、同じ Ag 系多元系量子ドットとして Ag-In-Ga-Se 量子ドットの開発も行った。組成による微細なエネルギー構造のチューニングが可能な材料であり、比較的良好なバンド端発光スペクトルを示すことから、結晶欠陥の比較的少ない高品質な材料を合成できたことが確認された。

3. 今後の展開

現時点で当初計画した MEG の化学反応への利用は実証出来ていないため、研究テーマ ③ で得られた、これまで報告の無い新しいヘテロ接合量子ドットを用い、このコンセプトの実証を行っていきたい。本研究期間内にも、他のグループからコアシェル構造化による MEG 発生閾値の低エネルギー化などの報告がされるなど、世界中で同様の検討は続けられているが、未だこれで化学反応や太陽電池の高効率化を達成したとの報告はなされていない。本

研究を通じて、ホットキャリア移動という高速の競争的な過程が、MEG利用の鍵となることがわかり、前述したようなヘテロ接合の形成により、これを解決できる可能性が示されたので、コンセプトを初めて実証できるように、MEGの化学反応への利用についての追求と実証を行う。

さらに、研究テーマ②、③を通じてZAITe量子ドットにおいては、ホットキャリアの取り出しが効率的であることが明らかとなった。従来の半導体光触媒は光励起された後に、伝導帯のバンド端までエネルギーを放出して(失活して)から反応が起こる。そのため、材料開発はバンド端をいかに反応に対して調整するか(バンドエンジニアリング)、という点を中心に実施されてきた。しかし、光エネルギーをそのまま利用することが出来れば、例えば波長選択により反応を切り替えたり、これにより逐次的に反応を進行させたりする、といった新しいコンセプトの光触媒開発が期待される。さらに、ホットキャリアの寿命を延ばすことで、これを効率的に反応に用いることもできる。本研究をきっかけとして予想していなかった研究の広がりが期待できる。

4. 自己評価

本研究の目的は半導体量子ドット中で発生するMEGを化学反応に利用することで、従来利用できなかった太陽光に含まれる高エネルギー(短波長)成分の無駄ない利用方法の開発である。そのため近赤外光に応答する半導体量子ドットにおける、キャリアの失活過程の確認と、量子ドットからの取り出しを検討したところ、当初の計画通りではこれが達成できないことがわかった。そこで新たに生じた課題(ホットキャリア移動)を回避するための方策を立て、遂行する修正を行った。これにともない、期間内に当初のコンセプトを証明するには至らなかった。計画修正は当初の目的達成のために必要不可欠であった。また、これによりMEG利用を可能にするための要素を抽出でき、コンセプト証明の可能性が出て来たところは、評価できると考えている。この課題はエネルギーの効率的な利用の観点から、ホットキャリアの利用可能性を見出すという、新たな研究シーズにつながる発見を得ることが出来た。エネルギーの効率的な利用方法の開発は、カーボンニュートラル社会実現のためにも必要なテーマであり、本研究で見出したふたつのシーズを、花咲かせるべく今後も研究に邁進したい。

領域内の他の研究者(金沢大古山先生)との共同研究も実施し、共著論文にまとめるという成果も得られた。COVID-19により領域内の他の研究者とのネットワークづくりも難しい状況ではあったが、チーム活動においても積極的な参加と雰囲気づくりへの貢献により、良い関係を築くことが出来たと評価している。また、本研究への取り組みを含めてこれまでの研究活動を評価され、2021年6月に名古屋大学工学研究科准教授へ昇格した。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:5件

1. T. Kameyama, K. Sugiura, S. Kuwabata, T. Okuhata, N. Tamai, T. Torimoto, “*Enhanced Photoelectrochemical Properties of Zn-Ag-In-Te Nanocrystals with High Energy Photon Excitation*”, *ChemNanoMat*, **2019**, *5*, 1028–1035.

ZAITe量子ドットを担持した電極において、発生する光電流の波長依存性を観測した。特に電極上に単層で量子ドットを担持した際に、短波長光照射において大きく光電流が増強された。光電流-電位特性では短波長光励起時に、電極に電荷注入される電位が正電位シフトすることが観測され、一方で、この光電流の増強が観測される励起波長での発光寿命からは、多励起子生成に相当する、短寿命成分が観測されなかった。以上の結果から、この短波長励起時の光電流増強が、ホットキャリア移動によるものであることが示唆された。

2. T. Kameyama, K. Sugiura, S. Kuwabata, T. Okuhata, N. Tamai, T. Torimoto, “*Hot Electron Transfer in Zn-Ag-In-Te Nanocrystal-Methyl Viologen Complexes Enhanced with Higher-Energy Photon Excitation*”, *RSC Adv.*, **2020**, *10*, 16361-16365.

ZAITe量子ドットに対して、電子アクセプターであるメチルビオロゲンを配位させ、量子ドットを励起した際のキャリア(励起電子)の遷移過程を過渡吸収により観測した。メチルビオロゲンに対して、励起電子は効率的に移動するが、特に短波長光で励起した際に、その吸収減衰の立ち上がりが短寿命化した。このことは、励起電子が非常に速いサブピコ秒のオーダーで量子ドットから移動していることを示唆するものであり、この系では非常に効率的にホット電子の移動が起こることを明らかにした。

3. T. Kameyama, H. Yamauchi, T. Yamamoto, T. Mizumaki, H. Yukawa, M. Yamamoto, S. Ikeda, T. Uematsu, Y. Baba, S. Kuwabata, T. Torimoto, “*Tailored Photoluminescence Properties of Ag(In,Ga)Se₂ Quantum Dots for Near-Infrared In Vivo Imaging*” *ACS Appl. Nano. Mater.*, **2020**, *3*, 3275–3287.

近赤外光領域にバンドギャップをもつ新たな半導体量子ドットとしてこれまでに報告の無かった Ag(In,Ga)Se₂量子ドットを新たに開発した。この粒子のバンドギャップおよびエネルギー準位は In/Ga 組成比をコントロールすることで、近赤外領域で自在に変化させられる、とても制御性の高いものであった。線幅の狭い、バンド端発光が生じることから結晶中に欠陥が少ない、高品質な粒子であり、近赤外発光を利用することで生体内部を観察する、*In vivo* イメージングにも利用可能であった。

(2) 特許出願

なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

受賞

1. 永井科学技術財団賞 学術賞(公益財団法人永井科学技術財団), 2022年3月15日

原著論文

1. Y. Ishikawa, T. Kameyama, T. Torimoto, H. Maeda, M. Segi, T. Furuyama, “Red-light-activatable ruthenium phthalocyanine catalysts”, *Chem. Commun.*, **2021**, *57*, 13594–13597.
2. N. Rismaningsh, H. Yamauchi, T. Kameyama, T. Yamamoto, S. Morita, H. Yukawa, T. Uematsu, Y. Baba, S. Kuwabata, T. Torimoto, “Photoluminescence properties of quinary Ag-(In,Ga)-(S,Se) quantum dots with a gradient alloy structure for in vivo bioimaging”, *J. Mater. Chem. C*, **2021**, *9*, 12791–12801.
3. Y. Minowa, X. Geng, K. Keisuke, K. Sato, T. Kameyama, T. Torimoto, M. Ashida, “Optical trapping of nanoparticles in superfluid helium”, *OPTICA*, **2022**, *9*, 139–144.

学会発表

3. T. Kameyama, K. Sugiura, S. Kuwabata, T. Okuhata, T. Tamai, T. Torimoto, “Promoted Hot Carrier Extraction in Zn-Ag-In-Te Nanocrystals by Irradiation of High-Energy Light”, PRiME 2020, 2020, October, Hawaii (online hybrid), USA.
4. T. Kameyama, H. Yamauchi, T. Mizumaki, H. Yukawa, Y. Baba, S. Kuwabata, T. Torimoto, “Composition-Controlled Synthesis of Near-IR-Light-Emitting Ag-In-Ga-Se Nanocrystals for Biological Imaging”, 239th ECS Meeting, 2021, June, Chicago (online hybrid), USA.
5. T. Kameyama, “Synthesis strategy of Ag-based multinary quantum dots from the perspective of controlling emission properties” 日本化学会第102春季年会, 2022年3月, 関西学院大学, 神戸(招待講演)