● 田原 弘量 特定准教授

Hirokazu TAHARA (Associate Professor)



研 究 課 題： ナノ構造半導体と量子協力効果を利用した散逸エネルギー再利用システムの開発
（Optoelectronic energy recycling and quantum cooperative effects in semiconductor nanostructures）

専 門 分 野： 量子光物理学、ナノ材料科学（Quantum photophysics, Nanoscience）

受 入 先 部 局： 化学研究所（Institute for Chemical Research）

前職の機関名： 京都大学化学研究所
（Institute for Chemical Research, Kyoto University）

光や電気のエネルギーを無駄なく利用することは、持続可能な社会に向けて私たちが直面している課題です。光検出器や太陽電池において光エネルギーを電気エネルギーに変換するとき、熱や輻射によるエネルギー損失が生じています。私の研究のねらいは、物質の中で散逸しながら失われていくこれらのエネルギーを無駄なく利用するエネルギー再利用の技術を生み出すことにあります。

そのために利用するのはナノ構造半導体の量子効果です。ナノ構造半導体は、大きさが数ナノメートルという非常に小さなサイズであることから量子効果が顕在化し、バルク結晶では生じない現象が数多く現れます。私はこれまでに、光吸収によって複数の電子と正孔を内包した状態が生み出されるメカニズムを明らかにしてきました。マルチエキシトンと呼ばれるこの多電子状態は、電気信号を増大させる高いポテンシャルを有しています。多電子状態の特性を、１個のナノ構造体内に留めるのではなく、集団のナノ構造体によって協同的に利用できれば、散逸エネルギーを回収する新しいシステムになると期待されます。本研究では、ナノ構造半導体の多電子状態と量子協力効果を合わせることで、散逸エネルギーの回収と再利用が可能なシステムを生み出します。

Efficient use of light and electricity is an essential step towards a sustainable society. Optoelectronic devices such as photodetectors and solar cells are useful devices to obtain electric signals and energies from light. However, these light-to-current conversion processes cause thermal and radiative energy losses, which are serious problems of energy waste. Here, I study optoelectronic energy recycling in semiconductor nanostructures.

The strategy to realize optoelectronic energy recycling is to utilize a quantum cooperative effect in nanomaterials. In my recent studies, I have revealed ultrafast generation processes of electrons and holes in nanomaterials. In semiconductor nanomaterials with their sizes of several nanometers, photogenerated electrons and holes are strongly affected by the quantum confinement. Quantum-confined electrons and holes form unique quantum states called multiexcitons, which are hardly generated in bulk semiconductors. Since a multiexciton involves multiple electrons and holes, multiexcitons have a great potential to enhance electric signals in optoelectronic energy conversion. In order to boost photon-to-current conversion efficiencies via multiexcitons, my research focuses on electronic coupling between semiconductor nanostructures. I will establish a new energy recycling system in coupled nanostructures, where thermal and radiative energies are collected and recycled for optoelectronic energy conversion processes.

光と電気のエネルギー変換

光エネルギーと電気エネルギーに関する技術は我々の生活を支える欠くことのできないものです。例えば、太陽電池は光エネルギーを電気エネルギーに変換するものであり、地球に優しいクリーンエネルギーを生み出すことができます。また、電気エネルギーを光エネルギーに変換するものには発光ダイオードがあり、我々の生活を明るく照らしてくれます。光を電気にそして電気を光に変換する効率を高めることは、持続可能な社会の形成に向けて私たちが直面している課題の１つです。従来の方式を超えた新しいエネルギー変換技術が、今まさに切望されています。

光電変換技術には半導体が利用されており、さまざまな元素を組み合わせた化合物半導体を用いることで、より効率的な光電変換を目指した研究が活発に進められています。さらに、半導体の光学的・電子的特性とともに量子力学的な特性を利用することで、光・電子・量子による新しいエネルギー変換技術に注目が集まっています。私の研究では、この光・電子・量子を組み合わせたエネルギー変換技術に挑戦します。

光はもっとたくさんの電気エネルギーを生み出せる

現状の光電エネルギー変換方式には理論的な限界があり、必ずエネルギー損失が生じています。例えば、太陽電池や光検出器では、吸収した光エネルギーよりも電気として取り出せるエネルギーは小さくなっています。このエネルギー損失は、電子の冷却過程における熱放出やキャリアの輻射再結合によるエネルギー損失過程が原因です（図１）。実際に、青い光は高いエネルギーを有していますが、この光を吸収したときには半分以上のエネルギーを熱として失っています。この熱エネルギーを捨てるのではなく、再利用することができれば光エネルギーの利用率を高めることができます。しかし、これらのエネルギー損失過程を抑制してエネルギーを再利用することは、従来のバルク結晶半導体（通常の大きなサイズの半導体）では困難なのが現状です。

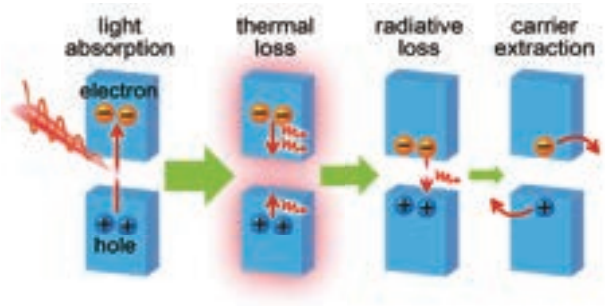


図１　光吸収後のエネルギー損失（熱放出，輻射）．最終的に利用できるエネルギーは光吸収直後よりも減少している．

ナノと量子を使ったキャリア生成率の増大

そこで、利用するのがナノ構造半導体です。ナノ構造半導体は、大きさが数ナノから十数ナノメートルという非常に小さな半導体です。ナノメートルサイズまで小さくした半導体では、光吸収によって作られた電子と正孔の波動関数が量子力学的に閉じ込められることで、量子効果が顕在化し、大きなバルク結晶半導体では生じない物性過程が現れます。私はこれまでに独自のレーザー分光法を開発することで、強い量子閉じ込め状況下における光吸収とキャリア生成のメカニズムを解明してきました（参考文献１，２，３）。ナノ構造半導体では、光吸収によって多数の電子と正孔を内包した量子状態であるマルチエキシトンが生み出されますが、これはバルク結晶半導体では生み出すことが困難な特殊な量子状態です。このマルチエキシトン状態は多数のキャリアを内包しているので、光電変換におけるキャリア生成率を高め、電気信号や電気エネルギーを増大させる高いポテンシャルを有しています。

ナノ構造体の集団的な量子効果をめざす

多数の電子と正孔を有するマルチエキシトン状態は、１個のナノ構造体内の物性過程として研究が行われてきました。マルチエキシトンが持つ特異な物性機能を１個のナノ構造体内に留めるのではなく、集団のナノ構造体によって協同的に利用できれば、熱や輻射によって失っていた散逸エネルギーを回収する新しいシステムになると期待されます。

そのために重要なのが、ナノ構造体間の協同過程をいかに強めるかという点です。ナノ構造半導体はさまざまな方法で合成されますが、ナノ構造体どうしを自在に結合し、その協同過程を制御する技術は確立されていません。本研究では、化学的アプローチと物理学的アプローチを組み合わせることで、ナノ構造体間の結合を強めたナノシステムを開発します（図２）。表面化学処理によるナノ構造体どうしの結合制御と、レーザー分光による量子干渉制御を組み合わせることで、集団ナノ構造体の量子協力効果を引き出し、散逸エネルギーの共有と再利用が可能なシステムを生み出します。

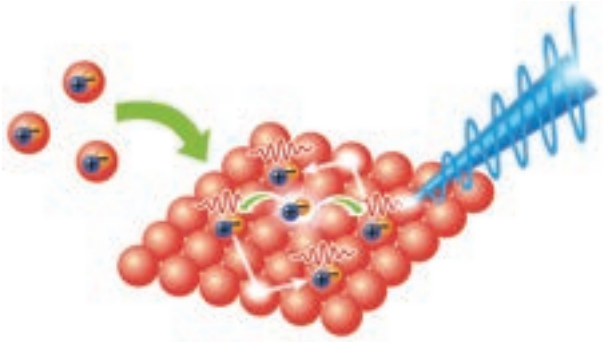


図２　ナノ構造体の集団的量子効果によって，エネルギー再利用システムをめざす．

参考文献

[1] H. Tahara, M. Sakamoto, T. Teranishi, and Y. Kanemitsu, *Harmonic Quantum Coherence of Multiple Excitons in PbS/CdS Core-Shell Nanocrystals,* Phys. Rev. Lett. 119, 247401 (2017).

[2] H. Tahara, M. Sakamoto, T. Teranishi, and Y. Kanemitsu, *Quantum coherence of multiple excitons governs absorption cross-sections of PbS/CdS core/shell nanocrystals,* Nat. Commun. 9, 3179 (2018).

[3] H. Tahara, M. Sakamoto, T. Teranishi, and Y. Kanemitsu, *Collective enhancement of quantum coherence in coupled quantum dot films,* Phys. Rev. B 104, L241405 (2021).