

## 量子ナノ構造を利用した太陽電池の光キャリアの振る舞いを解明

### -高効率太陽電池の実現に前進-

#### 概要

金光義彦 化学研究所教授、ディビット・テックス (David M. Tex) CREST 研究員は、異なる三種類の波長のレーザー光を用いた分光測定によって、通常の太陽電池では利用できない近赤外領域の光を効率よく電力に変換できるナノ構造中間バンド型太陽電池の実現に向けた突破口を見出しました。本研究は、豊田工業大学の神谷格教授との共同研究により行ったものです。

太陽光の光エネルギーを直接電気エネルギーに変換できる太陽電池は、近年の逼迫するエネルギー・環境問題の解決を期待されている電力源の一つです。より多くの安価な太陽電池を利用するため、エネルギー変換効率の更なる向上が必要とされています。一種類の半導体材料によって構成された単接合太陽電池のエネルギー変換効率は、その材料のバンドギャップエネルギー（注1）によって決定され、理論的な限界は約 30%になることが知られています。その理論限界に迫り、さらに超えることを目指して、これまでに様々な構造の太陽電池が提案され、多くの検証実験が行われてきました。しかし、これらの新型太陽電池は実際には期待される変換効率に達していません。

変換効率を制限している主な要因の一つは、太陽光の光エネルギーの多くを担っている近赤外光を利用できないことです。本研究では、近赤外光を利用するために提案されている中間バンド型太陽電池を、理想的な太陽電池材料の一つである GaAs あるいは AlGaAs のバルク結晶内に InAs のナノ構造（量子ドットや量子ディスク）（注2）を挿入することによって作製し、その光学的・電氣的な特性を明らかにしました。このナノ構造試料に対して異なる三種類の波長の光を同時に照射し、高効率なアップコンバージョン（注3）による光電流を測定しました。その結果、量子ディスクが光電流の増大に大きく寄与することを明らかにしました。また、量子ドット構造を利用した中間バンド型太陽電池の効率が理論予想よりも低い原因を突き止め、中間バンド型太陽電池の高効率化への突破口を見出しました。

研究成果は、平成 26 年 2 月 18 日（英国時間）に、英国ネイチャー出版グループのオンライン科学誌「Scientific Reports」で公開されます。

ポイント：

多波長励起光電流分光によるアップコンバージョン光電流生成機構の解明

半導体ナノ構造を利用した中間バンド型太陽電池の効率を支配するプロセスを究明

キャリア多体効果を利用することによる太陽電池の高効率化の提案

## 1. 背景

半導体の単接合型太陽電池の光エネルギー変換効率には、その半導体材料のバンドギャップエネルギーによって決まる Shockley-Queisser 限界 (SQ 限界) と呼ばれる原理的限界があり、30%程度の変換効率しか得られないことが広く知られています。このような理論限界が存在する理由は、太陽光が紫外光から可視光、赤外光まで幅広いエネルギー範囲から構成されているためです。一種類の半導体材料で作られた太陽電池には変換効率を低下させる要因が主に二つ存在します。一つはバンドギャップエネルギー以上の光の余剰エネルギーが熱に変わってしまうこと (熱損失)、もう一つはバンドギャップエネルギー以下の光を吸収できないことです (透過損失)。これらの理由から、最も変換効率が良いバンドギャップエネルギーは約 1.4eV (光の波長で 850nm 程度) で、このときの変換効率が 30%程度と理論的に予測されています。太陽電池を次世代の再生可能エネルギーとして利用するために、この限界を超えることが望まれています。SQ 限界に近づき、更には超えることを目指して、多接合太陽電池の作製やナノ構造を用いた太陽電池の提案など、世界中で活発な研究・開発が行われています。これまで利用できていなかった近赤外光を効率的に利用するための研究を展開させる必要があると認識されています。

## 2. 研究内容

最も太陽電池に適した半導体材料のひとつである GaAs 単結晶を基板とし、その上に InAs の量子ディスク及び量子ドットが埋め込まれた GaAs 及び AlGaAs 薄膜を分子線エピタキシー法によって作製しました。この試料構造を図 1. a に示します。量子ディスク及び量子ドットは平面上にランダムに形成され、量子ドットが一番低いエネルギーの構造です。これらの量子構造を選択的に励起し、発生する光電流を検出するために、図 1. b に示すような複数のレーザーを用いた実験を行いました。

量子ディスクや量子ドットのエネルギー準位は GaAs や AlGaAs のバンドギャップエネルギーよりも低いため、GaAs や AlGaAs では吸収されない光を利用することができます。各量子構造に生成された光キャリアはそのままでは光電流に寄与できませんが、再度励起されることによって GaAs や AlGaAs の領域に到達し、光電流を増幅させます。この過程をアップコンバージョン過程と呼びます。図 2 には二つの光を吸収することで起こるアップコンバージョン過程を示しています。これにより、通常は透過してしまう光の吸収が生じ、電力に寄与できる電子の数を増やすことが可能になります。電子が流れる伝導帯と正孔が流れる価電子帯の間に量子構造による準位またはバンド構造を形成させる太陽電池構造を中間バンド型太陽電池 (注 4) と呼んでいます。中間バンド型太陽電池を使うと、通常の太陽電池では透過してしまう光の吸収が生じるため、電力に寄与できる電子の数を増やすことが可能になります。

これまでは、量子ドットのアップコンバージョン過程の高効率化を目指して多くの研究が行われてきましたが、その効率は低いのが現状です。この問題を解決するため、本研究者らは、図 2 に示すように

浅いエネルギー準位の量子ディスク構造に注目し、研究を行ってきました。その結果、量子ドットよりも量子ディスクの方がキャリア多体効果を活用した効率良いアップコンバージョン電流を発生できることが明らかになり、これを利用した新しい中間バンド太陽電池構造を提案しました。

今回さらに量子ドットの活用を目指して、複数のレーザーを用いることで様々な波長で試料を励起できる多波長レーザー励起分光システムを開発し、近赤外の光を効率よく電流に変換できる条件を調べました。その詳細を図3に示しており、レーザー1と2はそれぞれ量子ドットと量子ディスクを励起しています。3番目の近赤外レーザーの照射による電流の増幅は、ディスクを強く励起している場合にのみ観測されました。このような振舞は、量子ドットからアップコンバージョンによって出来たキャリアが、励起されていないディスクに捕まることを意味しています。即ち、量子ドットのアップコンバージョン電流は、他のナノ構造によって抑制されていることが分かりました。これらのことから、量子ディスクと量子ドットを空間的に分離することで、太陽電池の効率を向上できることを見出しました。

### 3. 今後の展開

量子ディスクのエネルギー準位はスペクトル上の非常に狭い領域に存在し、幅広いエネルギー範囲に存在する量子ドットに比べ、光エネルギーの有効活用の観点からは不利です。しかし、量子ディスクの光電流生成効率は、量子ドットより極めて高く、キャリア多体効果を利用することにより、新しい光電変換過程が可能になります。アップコンバージョン過程を利用した高効率太陽電池の実現には、基礎物理の立場からより詳細な機構解明が必要です。また、量子ドットと量子ディスクの役割をはっきりさせ、それらを空間的に分離させることにより、実用レベルに近いエネルギー変換効率が得られるものと期待されます。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST と科研費の援助のもとに行われ、研究成果は、平成 26 年 2 月 18 日（英国時間）に、英国ネイチャー出版グループのオンライン科学誌「Scientific Reports」で公開されました。

発表論文：

DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/SREP04125>

“Control of hot-carrier relaxation for realizing ideal quantum-dot intermediate-band solar cells”  
David M. Tex, Itaru Kamiya, and Yoshihiko Kanemitsu,  
Scientific Reports 4, 4125 (2014) .

参考文献：

“Efficient upconverted photocurrent through an Auger process in disklike InAs quantum structures for intermediate-band solar cells”  
David M. Tex, Itaru Kamiya, and Yoshihiko Kanemitsu,  
Phys. Rev. B 87, 245305 (2013).

<用語解説>

注1) バンドギャップエネルギー：結晶が持っている材料特性の一つ。それが小さければ小さいほど、赤外線は吸収しやすくなります。太陽電池に使われている典型的な半導体材料においてはバンドギャップエネルギーが近赤外・可視光領域にあります。

注2) 量子構造：量子効果が支配的になる微小なサイズの半導体構造。InAs 量子ドットは、数 nm のサイズを持っている小さなピラミット形の結晶で、InAs 量子ディスクは数 nm のサイズを持っている小さな皿のような結晶です。ドットより薄いので、その中に出来る光キャリアはより高いエネルギーを持ちます。

注3) アップコンバージョン：光吸収によって生成された電子または正孔がさらに高いエネルギーに励起される機構のことです。

注4) 中間バンド型太陽電池：ナノ構造等による近赤外の光の吸収とアップコンバージョンを利用し、電流を増幅させる新型太陽電池の一つです。

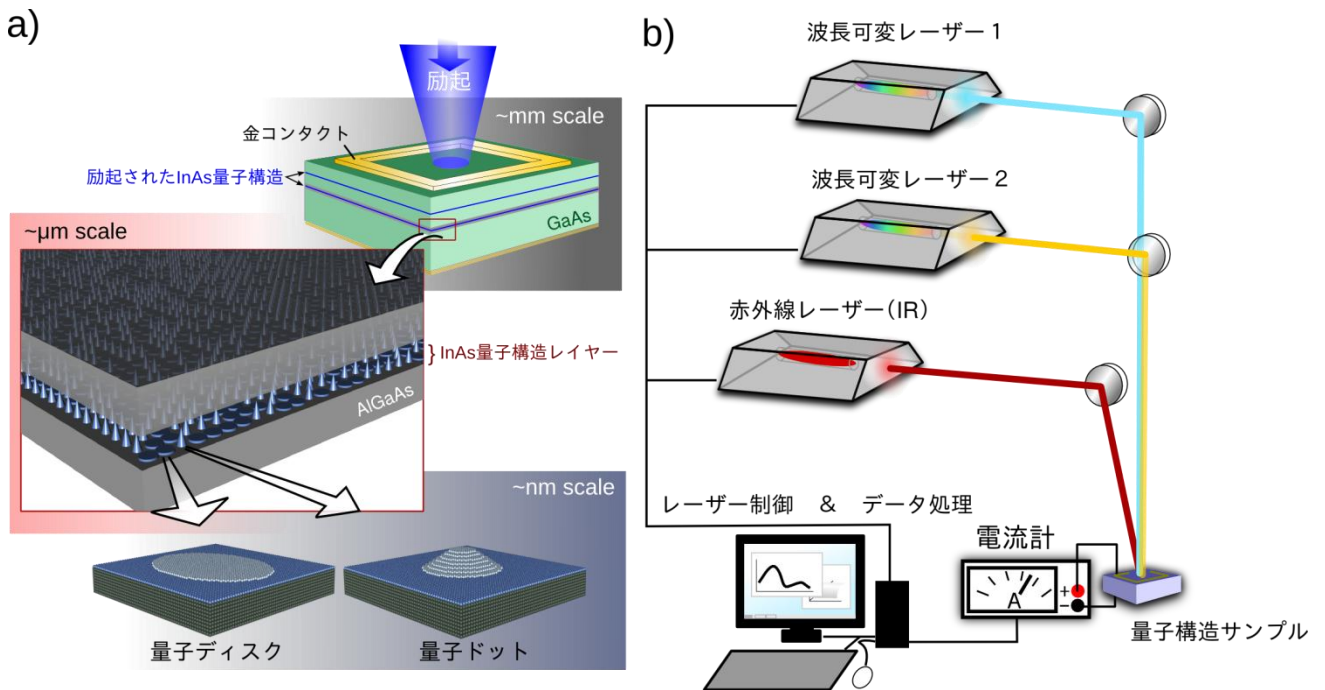


図1： a) 試料構造 b) 多波長レーザー励起分光システムの概略図

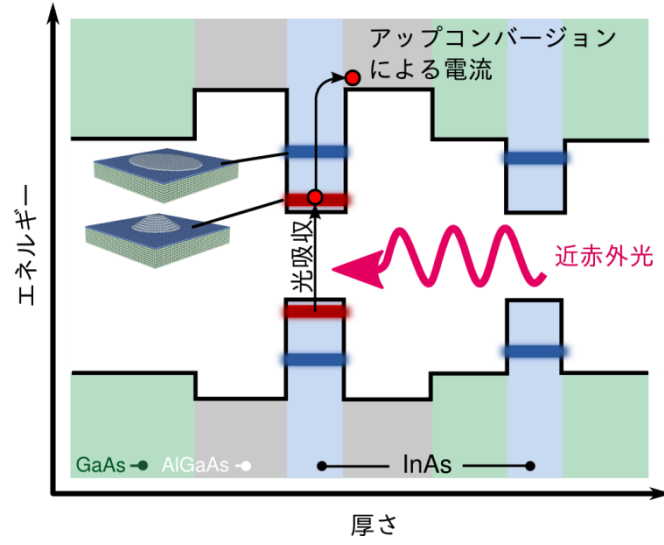


図 2 : 試料のエネルギーバンド図

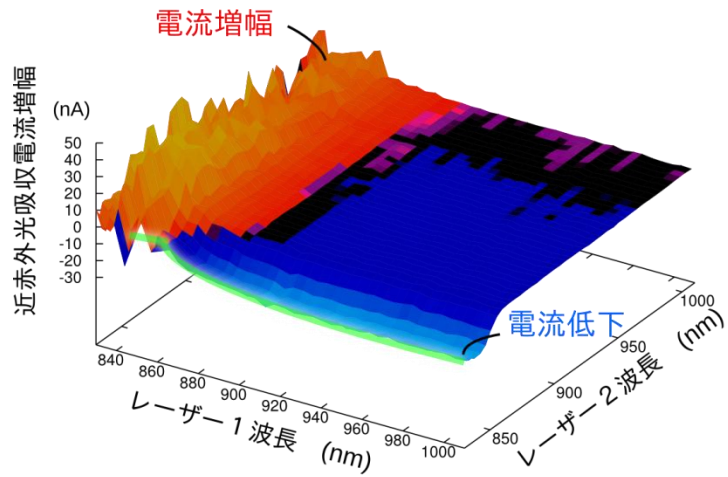


図 3 : 近赤外光の吸収によるアップコンバージョン電流増幅