

# 研 究 報 告 書

## 「ギャッププラズモンによる光学的に厚く物理的に薄い高効率太陽電池の創製」

研究タイプ：通常型

研究期間：平成 23 年 10 月～平成 27 年 3 月

研 究 者：久保 若奈

### 1. 研究のねらい

本研究の目的は高効率有機薄膜太陽電池の実現である。高効率化を実現するためには改善すべき重要な点がある。有機薄膜太陽電池の光電変換材料の光吸収を向上させること(光学的厚み)、そして生成した電荷を確実に捕捉して捕捉効率を向上させること(物理的薄さ)を同時に満たすことである。しかし一般的に、光学的厚みを実現するために光電変換層の厚みを増大すれば、生成した電荷の拡散距離は増大し、電荷捕捉効率は著しく低下する。一方で、物理的薄さを実現するために光電変換素子を薄膜化すれば電荷の捕捉効率は向上するが、活性層は十分に太陽光を吸収することができない。つまり、これら二つの条件はトレードオフの関係にある。

このような光学的厚みと物理的薄さを同時に実現するために、本研究では金属ナノ構造体のプラズモン共鳴に着目をした。プラズモン共鳴は、太陽光を金属ナノ構造体のプラズモン増強場に変換して、電池デバイス内に比較的長い時間閉じ込めることができる。プラズモン共鳴による光閉じ込め効果は光電変換層と光との相互作用時間を拡大して、結果的に光電変換材料の光吸収量を向上させることができると期待される。つまり、プラズモンを利用すれば、光電変換層の膜厚を変えることなく、光電変換材料の光吸収量が向上する可能性がある。場合によっては光電変換層の薄膜化も可能になり、光学的厚みと物理的薄さを同時に充足できる可能性も考えられる。

そこで本研究では、金属ナノ構造体のプラズモン共鳴による光電変換材料の光吸収量の向上に着目をし、プラズモニック太陽電池の発電増強機構の解明に取り組んだ。発電特性に対するプラズモンの役割を明確にし、その知見を元に、今後のプラズモニック太陽電池のデバイスの設計指針を提案して、さらなる高効率化を実現し得るプラズモニック太陽電池の実現を目標とした。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

光学的な厚さと物理的薄さを実現するプラズモニック太陽電池の増強機構を解明して今後の設計指針を得るために、プラズモン共鳴を示す、様々なサイズ、形状、配置の金属ナノ構造体を作製した。そしてそれら金属ナノ構造体を有機薄膜太陽電池に埋没して光電変換特性を評価した。どのような光学特性及び物理的特性の金属ナノ構造体を利用すれば発電特性が向上するか明らかにすれば、プラズモニック太陽電池における発電増強機構の解明につながる知見が得られるためである。

実際に埋没した金属ナノ構造体は、直径が 120nm と、比較的大きいサイズを有する金属ナ

ノピラー配列構造、直径 10nm 程度の微小な金属ナノ粒子、そして直径数十 nm 程度に制御された金属ナノドット配列構造である。それぞれの金属ナノ構造体の配置場所や密度を変化させた際のデバイスの発電特性を評価した。その結果、わずかな発電増強は得られたものの、劇的な特性の向上は確認できなかった。一方、サイズが 100nm 程度の比較的大きい金属ナノ構造体を利用すると、発電特性が低下する様子を確認した。

この結果は、プラズモニックナノ構造体のプラズモン共鳴波長が光電変換材料の光吸収波長と一致し、プラズモン共鳴による光吸収量の増加が期待できる状況であったとしても、埋没したナノ構造体の物理的性質によって、必ずしも電池の発電特性が向上する訳ではないことを示している。つまり、太陽電池デバイス内へのプラズモニック構造体の埋没は、光電変換材料の光吸収を促進するという光学的利点のみならず、生成した電荷を消失させてしまうなどの電氣的欠点を招く可能性があると言える。この結果から、プラズモニック太陽電池の設計のためには、プラズモニック構造体の光学的特性の適切な設計のみならず、電池が元々有する発電特性を阻害しないナノ構造体の利用と埋没が必須条件であるという結論に至った。これらの知見を元に、金属ナノ構造体を太陽電池デバイス内に埋没することなく、プラズモニック効果を光電変換層に付与できる伝搬型プラズモンを利用した太陽電池の発想に至った。

研究を推進する中で、極めて微小なサイズでありながら、形状や配置場所が精密に制御された金属ナノ構造体を作製する必要性に駆られた。従来、そのような微小な金属ナノ構造体は電子線リソグラフィー法で作製されるのが一般的であるが、電子線リソグラフィー(EBL)法はスループットが極めて低く、プラズモニック太陽電池を実用化する際に障害となる。そこで、微細なナノ構造体を迅速かつ大面積で作製できる微細加工技術を独自に開発し、EBL法による加工時間を 1/100 以下に短縮することに成功した。新たな技術の開発によって作製が可能になったナノ構造体のサイズや形状にバリエーションが増大し、今後のプラズモニック太陽電池の開発研究に大きく貢献すると期待された。

## (2) 詳細

#### 研究テーマ A「金ナノピラー配列構造を埋没した有機薄膜太陽電池の発電特性の評価」

配列した金ナノピラー構造は、強いプラズモン共鳴を示し、周囲に増強された電場を形成することから、太陽電池に埋没すれば光電変換材料の光吸収量を増加する光学素子として期待できる。実際に、参考文献では、太陽電池内への金ナノピラー配列構造の埋没によって光電変換材料の光吸収量が増大する結果をシミュレーションによって求めており、金ナノピラー構造の発電特性への寄与が期待された。

薄膜の塗布とエッチングを組み合わせた微細加工技術、ナノコーティングリソグラフィ法を利用して金ナノピラー配列構造を作製し、有機薄膜太陽電池の光電変換層に埋没した。その結果、開放電圧値、短絡電流値ともに低下し、フィルファクターの低下率は 4%と、セル特性が悪化している様子を確認した。金ナノピラー構造が光電変換層内で生成した電荷を消失したこと、そして光電変換層に埋没したことで、シャント抵抗が低下したことなどが要因と考えられた。

そこで、金ナノピラー構造の埋没部分を正孔輸送層に変更した。光電変換層への埋没よりも、電荷の消失が低減できると期待したためである。また、金ナノピラーサイズも直径 120nm と極力縮小してシャント抵抗の低下を抑制するように工夫した。その結果、開放電圧値の低下は回避できたが、依然、短絡電流値が 4%程度低下する様子を確認した。埋没部分を変更したことでセル特性の維持は可能になったが、短絡電流値の向上は実現できなかったと言える。金ナノピラーによる光電変換特性の向上が得られなかったことの原因は特定できていないが、他の論文と比較して、サイズが大きいことが要因の一つと推測した。

#### 研究テーマ B「蒸着法により作製した金ナノ微粒子による有機薄膜太陽電池の発電効率の向上」

研究テーマ A において、比較的サイズの大きい金ナノピラーの利用では光電変換特性の向上が確認できなかった。そこでどのようなサイズのプラズモニック構造体であれば光電変換特性が向上するか調査するため、極端に小さい金ナノ粒子を利用してプラズモニック太陽電池の作製を試みた。金ナノ粒子の作製手法には、熱蒸着法を採用した。蒸着法は簡便で制御性も比較的高く、量産化にも適した加工法と言える。

酸化インジウムスズ(ITO)電極上に  $0.1\text{\AA}/\text{sec}$  という蒸着レートにおいて金ナノ粒子を形成した。形成した金ナノ粒子の平均粒径は約 10nm であった。空気下における金ナノ粒子のプラズモン共鳴は 590nm であった。正孔輸送層と光電変換層塗布した後、そのプラズモン共鳴波長は 634nm にシフトした。これは、金ナノ粒子のプラズモン電場が光電変換層の塗布による屈折率変化を検出している証拠で、プラズモン電場が光電変換層まで到達していることが推測された。

太陽電池の電極上の一部にのみ、金ナノ粒子を形成し、金ナノ粒子含有部と非含有部の発電特性を比較した。その結果、金ナノ粒子含有部の電流密度値が  $6.18 \pm 0.30 \text{mA}/\text{cm}^2$  だったのに対し、非含有部は  $5.85 \pm 0.29 \text{mA}/\text{cm}^2$  と、5%程度の電流密度値の増加を確認した(図 1)。また、分光感度特性を測定すると、金ナノ粒子含有部は、500–800nm の波長範囲において、わずかに高い分光感度特性を示した。そこで、分光感度比  $\text{IPCE}_{\text{Au NPs 含有部}}/\text{IPCE}_{\text{Au NPs 非含有部}}$  を算出し、デバイス内に埋没した金ナノ粒子のプラズモン特性と比較した(図 2)。その結果、IPCE 比が向上した波長領域は金ナノ粒子のプラズモン共鳴波長と相関があることを確認し

た。この結果は、金ナノ粒子のプラズモン共鳴が光電変換特性の向上に寄与していることを示唆している。しかし、今回の結果からは、プラズモン電場増強効果と光散乱効果のどちらが発電増強に寄与しているかを言及できなかった。利用した金ナノ粒子のサイズや配置を蒸着法では制御ができないためである。プラズモニック太陽電池の増強機構においてより精密な検討が必要であることが改めて示唆された。

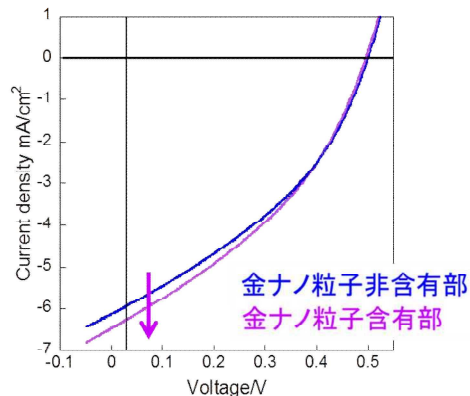


図1 金ナノ粒子を含有する有機薄膜太陽電池の発電特性。金ナノ粒子含有部は非含有部よりも高い電流密度値を示した。

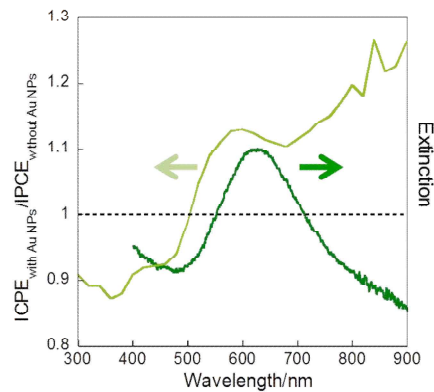


図2  $\text{IPCE}_{\text{Au NPs 含有部}}/\text{IPCE}_{\text{Au NPs 非含有部}}$ 比(左軸)と、太陽電池デバイス内に埋没した金ナノ粒子のプラズモン消光スペクトル(右軸)との関係。

研究テーマ C「金ナノドット構造を埋没した有機薄膜太陽電池における、金ナノドットの光学・物理的特性と発電特性との相関」

有機薄膜太陽電池の発電特性におけるプラズモンの役割を明らかにし、今後のプラズモニックデバイスの設計指針を得るために、サイズ、形、そして配置を精密に制御した金ナノドット構造を作製し、有機薄膜太陽電池の正孔輸送層に埋没して、発電特性を評価した。

金ナノドット構造のサイズを 36, 54, 95nm と変化させたときの太陽電池デバイスの電流密度値の変化を測定した。その際の金ナノドットの体積比は正孔輸送層に対し 0.61vol/%である。その結果、金ナノドットのサイズが 95nm の時、電流密度値が約 5%低下する様子を確認した(図 3)。一方で、サイズが 54nm または 36nm では電流密度値の増減は確認できなかった。この検討は同じ金ナノドットの密度で比較を行っているので、金ナノドットのサイズが発電特性に影響を及ぼすことを明確に確認した。

また、金ナノドットのサイズを 54nm に統一し、ドット間のピッチを制御して正孔輸送層に対する金ナノドットの体積比を変化させたところ、体積比が 1.41vol/%では、電流密度値が 6%低下した。一方、体積比 0.61vol/%以下では、電流密度値の増減は確認できなかった(図 4)。スペクトル測定から、いずれの体積比における金ナノドット構造のプラズモン共鳴波長も光電変換材料の吸収波長域と一致し、光電変換材料の光吸収波長における消光率は向上していることから、光電変換材料の光吸収が向上し得る状況である可能性が高い。しかしながら、ナノドット構造の体積比が増加すると発電特性が低下したため、ナノドット構造による電荷の消失などの失活過程が存在するのではないかと推測された。

現時点では、金ナノドット構造の埋没による発電特性低下の原因を明確に特定できてはい

ない。金ナノドットによる電荷の消失量などを明確に検出できないためである。しかし、金ナノドットの物理及び光学的特性と発電特性との相関に関する知見が部分的ではあるものの得られているため、より詳細な知見を得るために引き続き検討を行っていく。

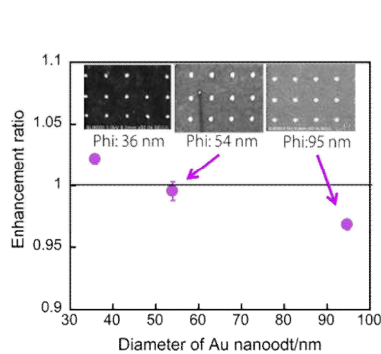


図 3 太陽電池デバイスに埋没した金ナノドットのサイズと電流密度値 (Enhancement ratio) の関係。

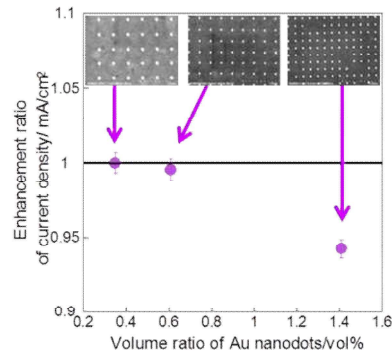


図 4 太陽電池デバイスに埋没した金ナノドットの体積比と電流密度値 (Enhancement ratio) の関係。

#### 研究テーマD 「伝搬型プラズモン共鳴を利用した有機薄膜太陽電池の開発」

研究テーマ A-C の検討から、太陽電池デバイス内へのプラズモニックナノ構造体の埋没は、光学的作用を与えるだけでなく、電気的な作用をももたらすことが明らかとなった。この知見から、金属ナノ構造体を太陽電池デバイスに埋没することなく、プラズモン効果を光電変換材料に与えられれば、発電特性に対する電気的作用を回避したまま光学的作用のみを与えるという発想に至った。

そこで、太陽電池デバイスの電極に微細構造を導入して伝搬型プラズモン共鳴を誘起し、その伝搬型プラズモンによって光電変換材料の光吸収量を向上させる試みに着手した。伝搬型プラズモンは電極表面の微細構造によって誘起される。つまりデバイス内にプラズモニック構造体を埋没することがない。さらに、本来電極表面で消失していた反射太陽光を、電極表面を伝搬する伝搬型プラズモンに変換し、光電変換材料と太陽光との相互作用時間を拡大することが可能になる。

実際に、電池デバイスの電極表面に微細構造を施し、反射率を測定すると、微細構造を施した電極では、可視光域において著しく反射率が低下して、入射光が電極表面を伝搬する伝搬プラズモンに変換された様子を確認した。発表前なので詳細については割愛するが、今後詳細な検討内容について報告を行う予定である。

#### 研究テーマE「ナノインプリント法によるメタマテリアル構造の作製」

物質の透過、吸収、屈折などの光学的特性を任意で制御できる人工物質をメタマテリアルと呼び、今後、太陽電池の高効率化に寄与する材料として期待される。例えば、空気と太陽電池基板界面における急激な屈折率変化を緩慢な変化に補整するメタマテリアルを作製して太陽電池表面に装着すれば、太陽電池表面における光の反射が完全に抑制されて、より多くの太陽光が太陽電池に照射される、などの効果が期待できる。



メタマテリアルの実用化には課題もある。課題の一つは、メタマテリアルは駆動する波長に対し 1/10 程度のサイズが必要となるため、可視・近赤外領域に対応するメタマテリアルは一辺のサイズが 100 nm 以下と、極めて小さいサイズと設計された精密な構造を有することである。そこで多くの場合は電子線リソグラフィ(EBL)法によって作製されている。しかし、1mm 角の描画に数時間を要するスループットの低い EB 法を用いている限り、メタマテリアルを実用展開することはできない。

そこでナノインプリントという鋳型の型押し技術を用いて、短時間かつ大面積でメタマテリアルを作製する技術を開発した。従来にもナノインプリント法を用いてメタマテリアル構造を作製する報告はあったが、それらに対し本研究の新規性は、幅 28nm という極めて微細なギャップ構造をナノインプリントで複製できた点であり、これほど微細な幅のギャップ構造をナノインプリントで作製できた例はない(図 5)。作製した構造の光学特性を評価すると、作製した構造は Fano 共鳴を示し、メタマテリアルとして駆動することを確認した。現時点におけるメタマテリアルの作製サイズはまだ 2cm 角ほどなので、大面積という点においてはまだ改善が必要であるが、従来 EBL 法で作製していたメタマテリアルの実用的な加工法を提案・実現したことで、メタマテリアルの実用展開を後押しし得る結果であると期待している。本研究テーマは当初計画にはなかったが、形や配置が制御された極めて微細な金属ナノ構造体を太陽電池に埋没する研究を進めたところから、微細構造の迅速かつ大面積での作製の必要性を強く感じ、取り組むに至った。

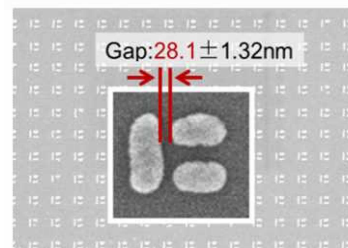


図 5 ナノインプリント法によって作製したメタマテリアル構造。ギャップ幅 28nm という微細な構造配列を均一に作製した。

### 3. 今後の展開

プラズモニック太陽電池の発電機構を完全に解明するまでには至っていないが、引き続き検討を行い、機構に関する知見を収集し続ければ、より最適なプラズモニック構造体やその利用方法の提案、現状よりも高効率化が見込めるプラズモニック太陽電池の設計指針の提示などに発展していくと期待している。

プラズモニック構造体が太陽電池の発電特性に及ぼす効果について、部分的ではあるが複数の知見が得られた。少なくとも、本プロジェクトにおいて発電特性を低下させる金属ナノ構造体のサイズ、密度、配置場所などは明確になった。

本研究で得られた結果は、すでに報告されている関連文献と異なる部分が多い。例えばサイズに関しては、参考文献では、数 nm という微細な金属ナノ構造体から 2, 300nm と比較的大きな構造体まで幅広く利用されているが、いずれも発電増強を実現している。一方、本研究では一辺 100nm 程度のサイズのナノ構造体では必ず発電特性が低下した。

これらの比較から、プラズモニック太陽電池における発電機構に関する要因が推察される。例えば、金属ナノ構造体の作製方法や構造体の表面状態が、太陽電池の特に電気的特性に大きく寄与している可能性である。また、プラズモン電場増強効果の寄与ではなく、ナノ構造体

による光散乱効果が、発電増強において主要な役割を果たしている可能性なども推測される。このように詳細に比較検討していけば、発電増強の核心に迫ることが可能になり、最終的に高効率化を実現するプラズモニック太陽電池の実現につながると期待している。

研究の途中で微細な金属ナノ構造体を作製する必要に駆られて開発した、メタマテリアルの大面積かつ迅速な作製技術は、現在、基礎研究に留まっているメタマテリアルの応用展開における実用的な作製手法として貢献すると期待している。メタマテリアルは光電変換デバイスの高効率化にも寄与し得る材料であるので、今後、メタマテリアルを利用した太陽電池デバイスの開発が期待される。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

##### (研究者)

プラズモニック太陽電池の発電増強機構を解明し、プラズモニック太陽電池のデバイス設計指針を示して、光学的厚さと物理的薄さを満たす高効率太陽電池のデバイスを開発するという目的の点においては、残念ながら達成状況は道半ばである。しかし、発電増強機構が不明であったプラズモニック太陽電池の発電機構を、形やサイズを制御したプラズモニック構造体を用いて解明しようという試みは萌芽的かつ先駆的な取り組みであり、発電機構に関する知見が少なからず得られたこと、そしてその知見を元に、より高効率化に適したプラズモニック太陽電池を提案し、実現しつつあることを鑑みるとある程度の進捗はあったと評価している。

一般の見解として、プラズモニック太陽電池に対し漠然とした期待が浸透しているが、その根拠の多くは電磁界計算で算出された、光学的視点のみを重視した見解に基づいている。しかし、実際に発電させると、金属ナノ構造体の併用によって必ずしも発電増強が起こらないことが本プロジェクトの研究より判明した。つまり、プラズモニック太陽電池の設計においては、元々の電池活性を阻害しない金属ナノ構造体の利用条件が必須なのだ。

これらの知見が得られた理由は、実際に微細加工技術を用いて金属ナノ構造体を作製してデバイスに的出し、電池特性を評価したためである。微細な金属ナノ構造体を利用し、発電増強機構を解明するという地味であるが重要な検討は従来行われたことがなく、この点においては先駆的な研究であったと言える。本研究期間内では大きな発電増強は得られなかったが、今後もプラズモニック太陽電池の設計指針に関わる重要な知見を収集し続けば、デバイス設計指針へとつながり、発電増強につながる結果を近いうちに達成できると期待している。

現状では、プラズモニック構造体やメタマテリアルを利用した太陽電池は実用化には至っていないが、これらの光学素子は、今後太陽電池デバイスの高効率化に寄与する重要な素子である。本研究プロジェクトで明らかになりつつあるプラズモニック太陽電池の設計指針は、今後の科学技術発展と光電変換デバイスの開発において十分に波及効果を及ぼすと期待している。

本プロジェクトの機会を与えられたことで、それまで従事していた微細加工及び光学分野に加え、太陽電池について学習することができた。この経験によってプラズモニック太陽電池の光学的視点に加え、発電プロセスを重視する視点も併せて持つことができ、大局的な分析に取り組むに至った。結果的に研究分野の拡張と研究者としての成長につながり、本プロジェクトの機会を与えて頂いたことに心から深く感謝している。プロジェクト終了後も引き続き本研究

テーマに従事して、関連研究分野に貢献し、さらにプラズモニクエネルギー分野における先駆的研究者に成長できるよう、精進していくつもりである。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究課題は、ギャップ構造体の光学的・物理的特徴を利用し、光学的に厚く物理的に薄い新規太陽電池を、ギャップ間のみで光電変換素子を充填した際のギャッププラズモン特性の活用とギャップ電極の構築によって、電荷の拡散距離が短い薄膜セルでありながら、光吸収効率の高い新規太陽電池を目指している。

久保研究者は、金属ナノ構造体のプラズモン共鳴による光吸収量増大による有機薄膜セル特性向上を目標に、光電変換層、正孔輸送層、電極へのナノ構造埋込セル試作評価などを推進し、各種のプラズモン構造体(局在型、伝搬型)を用いて有機薄膜太陽電池を作製し、変換効率と構造の関係を検討した。また、ナノ構造体の作製技術として、ナノインプリント技術確立するなど、プラズモン太陽電池の地道な作製・解析で成果を上げている。また、電極に微細構造を施すことにより、高効率化に繋がる可能性のある伝搬プラズモンの発生に成功し、プラズモニク太陽電池について、微細加工技術を用い、金属ナノ構造体を作製し、サイズや作成方法、デバイスへの組み込み法などに工夫を凝らして太陽電池特性を評価している。本研究では、金属ナノピラー配列構造、微小な金属ナノ粒子、制御された金属ナノドット配列構造などの複雑な構造を有機太陽電池内に埋め込む技術を開発した。多くのナノ構造を実際に有機太陽電池内に埋込み、独創的発想の、金属ナノ構造体のプラズモン共鳴に着目し、形やサイズを制御したプラズモニク構造体を用いることにより、プラズモニク太陽電池において、ある程度の発電機構に関する知見を得た。

しかしながら、現状では、金ナノピラー、金ナノ粒子、金ナノドットを用いた何れの有機薄膜太陽電池においても、わずかな発電増強は得られたものの、プラズモンの効果はほとんど見られず、最終目標の高効率化には至っていない。新しい試みなので、じっくり課題を一つ一つ解決し、着実に進んで欲しい。ナノインプリントなど新しい手法を見出しており、それにより実験のスループットを高められる可能性があり、さらに実験データを蓄積して手がかりを得てほしい。当初のテーマであるプラズモンセルの発電機構の解明、同セルの設計指針の提案を進めることが重要であり、これを進めてほしい。これまで得られた知見をもとに詳細に検討を進め、ナノメートルギャップの存在がもたらす効果についての検証を再考するなど、高効率化に向けた新規アイデアを創出してほしい。新しいデバイス構成や材料を開発することにより、新規なプラズモン構造体を用いて有機薄膜太陽電池の高効率化の達成を期待したい。プラズモン効果は太陽電池に有効であるかは、確認されていないので、さらに研究を進めて、この点も検証してほしい。

## 5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表



1. X. Fang, S.Yaginuma, **W. Kubo**, T. Tanaka, “Resonance enhancement of difference-frequency generation through localized surface plasmon excitation” *Applied Physics Letters*, **2013**, 102, 203101–203103.

(2)特許出願

研究期間累積件数:1 件

1.

発 明 者: 久保 若奈, 田中 拓男

発明の名称: 光起電力素子およびその製造方法

出 願 人: 独立行政法人理化学研究所

出 願 日: 2012/9/11

出 願 番 号: 2012-199796

(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)

[解説論文]

1. **久保若奈**, “エネルギーデバイスに向けた光メタマテリアルの加工技術” 月刊オプトロニクス, 392, 50–54, **2014**.
2. **久保若奈**, “ナノコーティングリソグラフィー法による金二重ナノピラー構造の作製と展開” Colloid & Interface Communication, 37, 28–29, **2012**.
3. **久保若奈**, 藤川茂紀, 田中拓男 “金ナノフィンによるフレキシブル透明導電膜” ナノ学会会報, 10(2), 63–67, **2012**.
4. **久保若奈**, 藤川茂紀 “ナノコーティングリソグラフィーによるナノギャップ型プラズモンセンサ素子の大面積作製” プラズモニクス-光電子デバイス開発最前線-, p.147–155, **2011**.
5. **久保若奈**, 藤川茂紀 “ナノコーティングリソグラフィーによる金二重ナノピラー配列の作製とプラズモンセンサーへの展開” 未来材料, 11, 60–63, **2011**.

[招待講演]

1. **久保若奈**, “インプリントによる新規光学素子の作製と展開” SCIVAX 株式会社セミナー, 東京, 2013.12.13
2. **W. Kubo**, “Metal Nanostructures for Energy Materials” SJTU-RIKEN Workshop, Shanghai, China, 2013.10.26
3. **W. Kubo**, “Large-scale Fabrication of Nanostructures with Metals and Metal Oxides.” The 7th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics(STAC-7), Yokohama, Japan, 2013.6.19
4. **W. Kubo**, “Large-scale Fabrication of Plasmonic Nanostructures toward Practical Device” The 7th International Conference on Nanophotonics (ICNP)/ The 4th Conference on Advances in Optoelectronics and Micro/Nano Optics (AOM), HongKong, China, 2013.5.20
5. **久保若奈**, “大面積プラズモニックデバイス” 第3回先端フォトンクスシンポジウム, 東京, 2013.4.26

6. W. Kubo, “Plasmonic Nanostructures Fabricated by Nanocoating Lithography” The 2nd Korea–Japan Metamaterials Forum, Tsukuba, Japan, 2012.6.28
7. 久保若奈, “金属ナノ構造体配列の作製と展開” 光・電子デバイス技術委員会, 東京, 2012.6.4
8. 久保若奈, “金属ナノ構造体配列の作製” ナノ学会ワークショップ, 東京, 2012.3.22
9. 久保若奈, “ナノコーティングリソグラフィー法によるナノ構造体アレイの作製” 北海道大学 the 5<sup>th</sup> HPAPS, 北海道, 2011.11.30

[受賞]

1. 田中貴金属グループ 貴金属に関わる研究助成金 MMS 賞 2012.5.31