

# 研究報告書

## 「プラズモニクスを利用した高効率・超薄膜太陽電池」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 21 年 10 月～平成 25 年 3 月

研究者: 岡本 晃一

### 1. 研究のねらい

今世紀半ばに枯渇することが予想される化石燃料に替わるエネルギー源として、再生利用エネルギーが注目されており、中でも太陽光発電への期待が高まっている。そのためには太陽電池の光電変換効率を大幅に改善することが最重要課題である。化合物半導体や、単結晶シリコン系など、非常に高純度な結晶を用いた太陽電池においては、すでに理論限界に近い高効率が達成されており、大面積利用のための材料・コストの大幅な削減が今後の重要な課題である。一方、アモルファス系や有機系の薄膜太陽電池においては、結晶系と比べて材料が安価であり、プロセスも非常に容易であるが、光電変換効率は実用化の域には達していない。よって効率の大幅な改善と、さらに材料の耐久性、デバイスの長寿命化が重要課題である。結晶系太陽電池の薄膜化か、薄膜系太陽電池の高効率化か、どちらか一方だけでも達成できれば、太陽光発電にとって大きなブレークスルーになると思われる。それらを達成するためには、既存の技術の延長だけでは限界があり、斬新なアイデアを取り入れる必要がある。そこで本研究が注目するのがプラズモニクスの利用である。

プラズモニクスは、金属/誘電体界面での電子のプラズマ振動である表面プラズモン(SP)を制御・利用する技術である。SPは界面に強く局在した電磁波モードである表面プラズモン・ポラリトン(SPP)を伴い、これが外部の光と相互作用することによってユニークな光学特性・光機能性を作り出す。特に近年の微細加工技術の急速な発展に伴って、ナノ構造によるSPPの制御が可能になり、急激に注目を集めている。例えば、SPPが界面に作り出す巨大な電場増強効果を利用した超高感度センサーや、光の波長限界を超えたナノ空間を伝搬できるプラズモニック導波路、さらには可視光領域で負の屈折率を実現させるプラズモニック・メタマテリアルなど、様々な斬新な光学素子への応用が期待されている。プラズモニクスを太陽電池に応用すれば、電場増強効果によって太陽電池の光吸収効率が向上し、光電変換効率が大幅に改善されることが期待できる。またSPPは金属表面のナノメートル領域に局在し、面内を通常の光よりも遅い速度で伝搬するため、超薄膜においても十分な光路長をかせぐことができる。これらを利用して、各種太陽電池の飛躍的な高効率化と超薄膜化を達成することが本研究のねらいである。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究ではプラズモニクスを用いた新しいアプローチにより、太陽電池の飛躍的な光電変換効率の改善と、超薄膜化を目指している。プラズモニクスの太陽電池応用の試みは、1990年代から始まっており、ここ数年で特に活発になってきた。様々な金属ナノ微粒子、ナノ構造が、有機・無機材料を用いたあらゆるタイプの太陽電池の高効率化に試され、その効果はすでに実験室レベルでは実証されている。にもかかわらず、実用の域にはまだまだ達していない。一方、プラズモニクスの高効率発光素子への応用については、2004年に世界で初めて実験で示

すことに成功し、さきがけ研究(平成 18 年~22 年)として、ナノ構造の制御による最適化、さらなる高効率化のノウハウを培ってきた。これらを有効に活かすことにより、初めての实用化レベルでのプラズモニック太陽電池が実現できると期待している。

プラズモニクスによる高効率発光の機構は、材料内に発生した電子・正孔対(励起子)が、近傍の金属表面に発生する SP と共鳴することにより、発光速度が増加し、それによって非発光過程が相対的に抑制され、発光の内部量子効率が向上することに基づいている。この機構における各過程は可逆過程である。したがって光と SP の共鳴により光のエネルギーを金属界面に集め、励起子と SP の共鳴によって材料を効率よく励起できれば、光による材料の直接励起よりも高い効率で励起子を作ることができるはずである。それによって光電流が増加し、光電変換効率が向上する。このようにプラズモニクスは高効率化とまったく同様の原理において、太陽電池の高効率化にも応用可能である。また局在表面プラズモン(LSP)や伝搬型の SPP は、金属界面のごく近傍に強く局在しているため、膜厚が薄い材料においても十分な光吸収が得られ、太陽電池材料の超薄膜化によるコストダウンにもつながることが期待される。

(2) 詳細

「金属ナノグレイン構造を用いた伝搬型表面プラズモンの制御・利用」

これまで提案されてきたプラズモニック太陽電池は、単に金属微粒子を材料表面に分散させ、微粒子近傍に発生する LSP の散乱増強や電場増強の効果を利用したものがほとんどであった。LSP は光の直接照射によって簡単に励起できるが、増強電場は微粒子表面から半径程度のごくわずかな空間に局在しているため、そのエネルギーを材料に効率よく移動させるのが困難である。一方で伝搬型の SPP を太陽電池に応用できれば、光吸収の大幅な増加と薄膜化が期待できるが、光と SPP を結合させるためには、プリズムの全反射やナノグレーティング等の配置が必要になり、入射角や波長帯域が制限される。

これらの問題を解決し、広い波長域において効率的な SP 結合を得るためには、特殊な構造が必要である。例えば図1に示したナノ金属グレインを背面に用いた太陽電池構造により、広い波長域で、広い角度の入射光を SPP に結合させると考えられる。

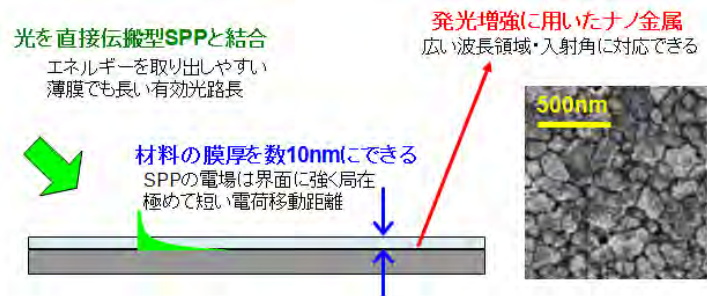


図1 背面に金属ナノ構造表面をもつプラズモニック太陽電池。

ナノグレイン構造による光と SPP の有効な共鳴を実証するために、Ag 表面の金属ナノグレインサイズを変化させて、InGa<sub>0.5</sub>N/GaN 量子井戸の発光増強の観測を行った。スパッターによって Ag の成長速度を変化させて作製した Ag 薄膜 50nm の表面の(原子間力顕微鏡)AFM 像と蛍光像を図 2(a)に示す。図 2(b)はスパッターによる Ag 薄膜の成長速度とグレインサイズの関係で、成長速度によってナノグレインのサイズを制御できている。図 2(c)はそれぞれの成長速度で成膜した Ag 薄膜の発光増強効果であり、強いグレインサイズ依存性があることがわかった。最も強い増強比を示すグレインサイズ(50nm)は、理論から予想した値と一致した。

このことから、光と SP の共鳴には、周期の揃ったナノ回折格子やプリズム全反射は必ずしも

必要ではなく、金属表面のランダムな構造でも十分であることを明らかにした。このことは SPP を利用したプラズモン太陽電池を実現する上で重要な知見である。

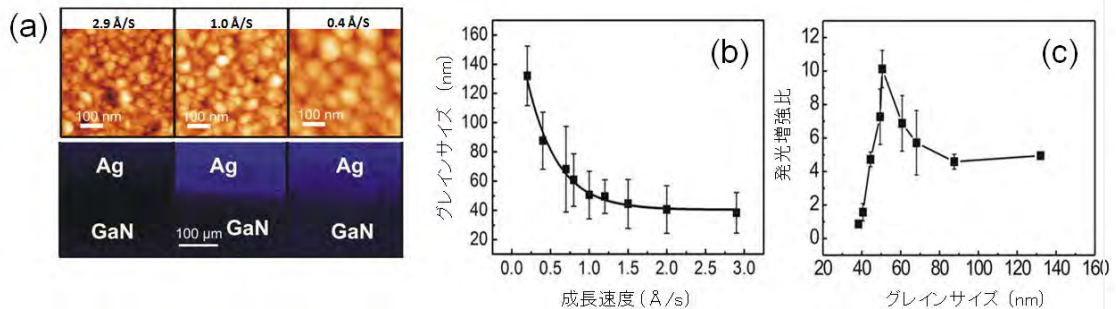


図2 (a)各成長速度によって成膜したAgグレイン構造のAFM像と蛍光顕微像。(b)スパッタによるAgの成長速度とグレインサイズの関係。(c)InGaN/GaN系QWの発光増強比のAgグレインサイズ依存性。

### 「金属ナノシート構造を用いた局在・伝搬協調モードの制御・利用」

気液界面にミリスチン酸でコートされた金属微粒子を展開し、基板の上に細密充填させた2次元微粒子シート構造(図3左)も、光捕獲に非常に有効な構造であると期待できる。2つの隣接する金属微粒子間のナノギャップにおいては、互いのLSPが相互作用して新たな共鳴条件を生じ、ホットサイトとよばれる、より強い電場増強効果をもたらす。金属ナノ微粒子ナノシート構造の場合、すべての微粒子間でホットサイトを生成することができる。そのような場合、どのような光学特性を示すのか、3D-FDTD法を用いて電磁波解析を行った。

図3右は、直径5nmのAg微粒子シート構造において、微粒子間隔 $d=1, 2, 3$ , および4nmと変化させた時のLSPの共鳴スペクトルの変化であり、太陽光のスペクトルに重なるほどの幅広い波長シフトが得られた。同様の傾向は吸収スペクトルの実験によっても確認できた。FDTD計算の結果から、各微粒子に強く局在するLSPモードが広範囲において相互作用し、広い周期で協調的に伝搬していることがわかった。このようなSPの局在・伝搬協調モードは、光と直接結合できるというLSPの利点と、材料の励起子とよく結合できるというSPPの利点の両方を併せ持っていると考えられる。局在・伝搬協調モードの光学特性は、微粒子のサイズ・間隔を変えることによって、フレキシブルに変化させることができ、SPの結合条件も自由に調整することが可能になる。このような一種のプラズモニック・メタ材料ともいべきナノ構造材料は、プラズモニックのLEDと太陽電池の両方の応用に適している。

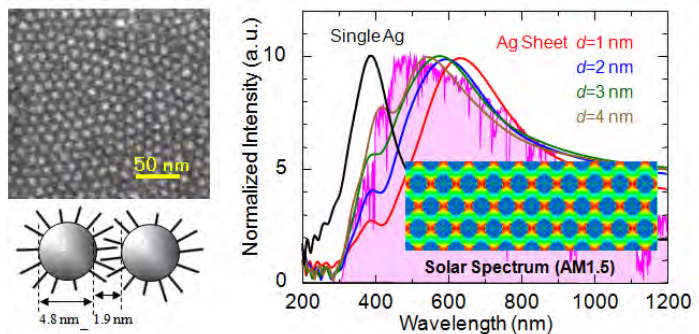


図3 金属ナノ微粒子構造(左)とその光学特性のFDTD計算(右)。

### 「プラズモニック太陽電池のデバイス化に向けて」



ナノ微粒子シート構造においては、各微粒子に強く局在した LSP と、それらが集団的に相互作用して形成された広い周期の SPP の両方が混在し、光との強い相互作用を示すことがわかった。最適な条件下においては、SP 共鳴ピーク波長の吸光度は $\sim 2$  に達し、入射光の 99%以上を厚みわずか数ナノメートルの微粒子シートに閉じ込めることが可能であることがわかった。

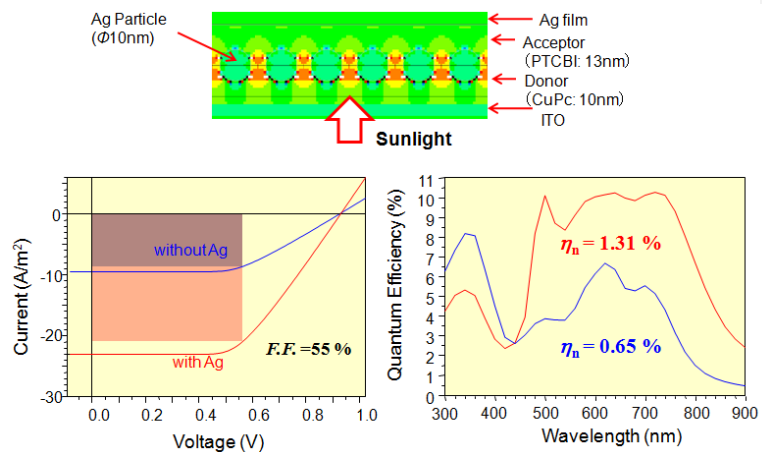


図 4 ナノ微粒子シートを用いた有機薄膜太陽電池(上)の IV 特性(左)と光電変換効率(右)の計算結果

これを有機薄膜太陽電池に応用した場合の、光吸収と光電変換効率の向上について、3D-FDTD 法による電磁波解析と、生じたキャリアの挙動を解析するデバイスシミュレーションとの組み合わせによって計算した。その結果、図 4 に示すように、光吸収の増加によって約2倍のキャリアが発生し、約2倍の短絡電流密度、光電変換効率が達成できることがわかった。実際にはこれに励起子-SP 結合の効果が加わり、励起子発生速度が増加することによって、さらなる高効率化が達成できる可能性もある。一刻も早い実験での検証が望まれる。

### 「プラズモニクスにおける、利用金属種、応用波長領域の拡張」

金属微粒子に生じる LSP は、金属微粒子の種類・形・サイズによって、可視光領域ほぼ全域において共鳴スペクトルを調節できるが、現在のところ使用できる金属種は金、銀、銅に限られている。大抵の金属は誘電関数の虚数部が大きく、損失によって良好な SP 共鳴特性を持たないが、例えば Al は深紫外域に SP 共鳴振動数を持ち、比較的 SP の効果が強く現れる金属である。以前の研究で、Al のナノグレイン構造を用いることにより、250nm 付近にピークを持つ AlGaIn/GaN 系 QW からの深紫外発光の高効率化にも初めて成功している。

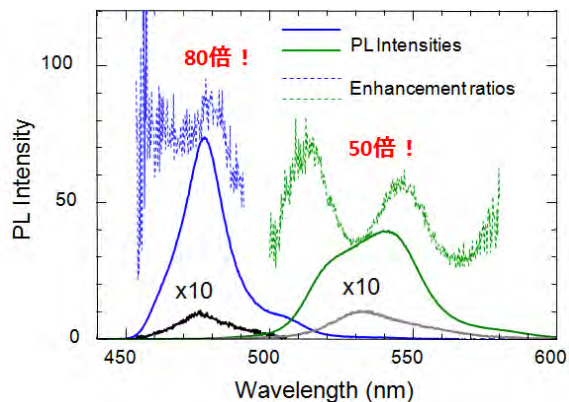


図 5 アルミニウムを用いたプラズモニクスによる InGaIn 系量子井戸の発光増強

Al は紫外域に SP 振動数を持つために、紫外光と最もよく結合するが、これをあえて可視域で用いることにより、幅広い波長域、より広空間において増強効果が期待できる。図 5 は Al を InGaIn 系量子井戸に蒸着した時の、青色・緑色発光における増強スペクトルである。驚くべきことに、青色、緑色において、それぞれ、 $\sim 100$  倍、 $\sim 40$  倍といったこれまでの報告をはるかに

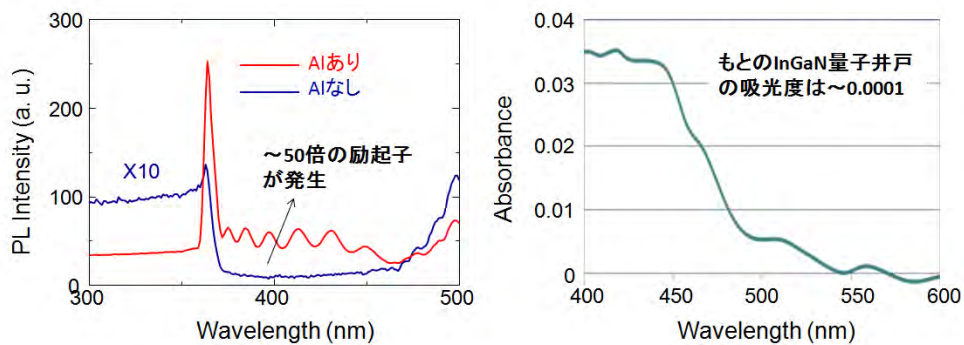


図6 Al/InGaNの励起スペクトル(左)と反射率から求めた吸光度(右)

上回る著しい発光増強が得られた。発光増強の効果が Al の蒸着速度に依存することから、Al のナノグレイン構造によって SP 共鳴が達成されていると考えられる。図6はこの試料の励起スペクトルと光吸光度であり、得られた増強は Ag を用いた時のように発光効率の増加によるものではなく、光吸収の増加により通常の 50~100 倍もの励起子が発生したためであることがわかった。これを光電流として取り出すことができれば、50~100 倍の光電流が得られることが期待できる。

さらに太陽光の有効利用には、赤外波長領域での SP 共鳴が重要である。赤外プラズモニクスには Au のナノロッドがしばしば用いられる。ナノロッドの長軸方向に偏光する赤外光を SP と共鳴させることができるが、無偏光の光に用いられれば多くのロスが生じる。応用上は球形のナノ微粒子が望ましく、それには Au 以外の金属を用いる必要がある。例えば Ta は、若干のプラズモン特性を示すことが理論から予想できる。そこで Ta ナノ微粒子の SP 共鳴について FDTD 計算により解析した。Ta の誘電関数は単純な Drude モデルで表すことができず、Lorentz 型の共鳴吸収を持つ。これが Ag, Au, Al に比べて Ta のプラズモン特性が乏しい一因である。そこで図7(a)に示すように、Drude-Lorentz 複合型として Ta の誘電関数の文献値を最適化した。図7(b)に FDTD 計算の結果得られた Ta 微粒子近傍に発生した LSP の増強分布とそのスペクトルを示した。Ta は伝搬型の SPP 特性はほとんど示さないが、径 10nm の微粒子構造にすることによって、LSP は発生しうることがわかった。Ag, Au 微粒子の LSP も同時に示した。Ta の LSP スペクトルは Ag よりも遥かに小さいが、Au と同程度の強さを持っており、赤外波長領域に共鳴ピークをもつ。これを用いて 2 次元微粒子シート構造など超格子膜を設計することにより、波長制御性を持たすことができると期待できる。

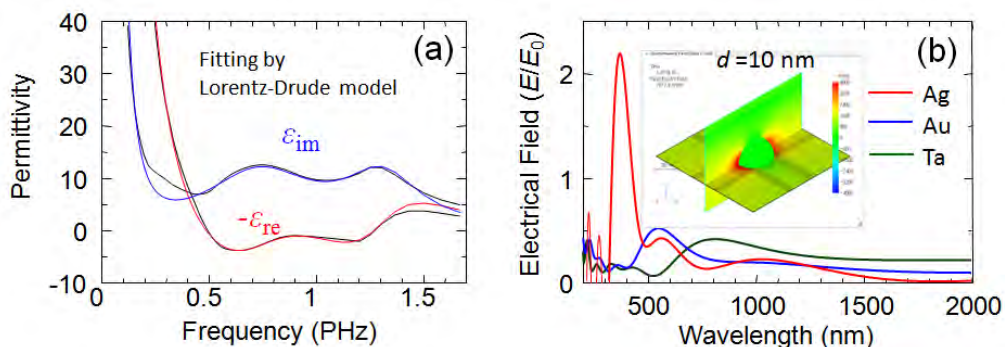


図7(a) Ta の誘電関数の Drude-Lorentz 複合モデルによる最適化。(b) 径 10nm の Ta ナノ微粒子近傍に発生した局在表面プラズモンの増強分布とそのスペクトル

### 3. 今後の展開

表面プラズモン(SP)を利用する技術「プラズモニクス」が注目されているが、本研究が目指している高効率太陽電池や、高輝度 LED、ナノ光集積回路といった斬新な光・電子デバイス応用については、実用化レベルにはなかなか到達できないのが状況である。例えば高効率 LED への応用に対しては、光励起のフォトルミネセンスにおいては何十倍もの著しい増強効果が得られているのに対し、電流注入においては同様の構造を用いても2倍を超える増強度は報告されていない。また太陽電池応用においても、金属ナノ構造による著しい吸光度の増強は、本さきがけ研究も含め多く報告されているものの、実際に得られる光電流においてはそれほどの効果は得られない。これらはすべて電子系と SP の相互作用について、まだ不明な点が多いことに起因しており、それを明らかにすることが重要である。つまりはプラズモニクスとエレクトロニクスの関わりを理解し、それを制御・利用する技術基盤を確立することである。

プラズモニクスは SP 共鳴分光(SPR)や表面増強ラマン分光(SERS)のような高感度光センシング、あるいは電場増強効果を利用した非線形光学効果の増強、異常透過特性を利用した光フィルターなど、様々な用途にすでに応用されている。これらは、すべて光と SP の相互作用を利用したものであり、その物理を議論する際にも SP の電磁波としての側面である SPP として扱われることがほとんどである。すなわち、従来の研究では、SP の利用は光波としての特性が強く表れる波長領域に限られており、電子波領域での挙動はほとんど注目されていない。

電子系と SP の相互作用の機構・物理については、本さきがけ研究において解明を進めてきたが、不明な部分もまだ多く残されている。例えば励起子と SP が相互作用する確率・速度が、両者の距離、ナノ形状、サイズ、分散、密度、温度等の条件に対してどのような影響を受けるのか、さらにはどのような温度依存性を示すのか、励起子-SP 相互作用の時間分解-空間分解ダイナミクスはどのようにになっているのか、その詳細をさらに定量的に解明する必要がある。金属ナノ構造における SP と電気特性の相互作用の原理を解明すれば、光によって電気特性を、あるいは電流・電圧印加によって光特性を制御できる可能性もある。

本来、プラズモニクスは光と電子を繋ぐ新技術であるので、従来の光-SP 相互作用の研究だけでは片手落ちであり、それがデバイス化への壁の要因にもなっている。空間を伝搬する光と界面に局在する低次元波である SPP は、どちらも電磁波モードであるために、その振る舞いは古典的な Maxwell 方程式によって記述できる。よって従来の光-SP 相互作用を利用した技術においては、電磁気学的応用の範疇を越えない。そのためにプラズモニクスそのものも、単なる古典的電磁気学を超えないものと誤解されることがしばしばある。しかし、1999 年に Yablouitch らが提唱したように、電子-正孔対(励起子)と SP の相互作用によって励起子の自然放出速度が変化する現象は、フェルミの黄金律によって量子力学的な摂動として記述されるべきである。我々は本さきがけ研究において、プラズモニクスにおける量子力学的な摂動の重要性を、発光速度の増強に関する実験で明らかにした(Phys. Stat. Sol. C, 5, 2822-2824, 2008)。この成果がプラズモニクスの量子力学的解釈のきっかけになると思われる。様々な系において系統的に同様の観測・解析を定量的に行うことによって、SP と電子系の相互作用メカニズムを解明することができれば、プラズモニクスの量子力学的解釈が確立される。それによって、高効率 LED、太陽電池の発展が期待され、加えて、プラズモンレーザー、ナノ集積回路、高速演算素子等の次世代エレクトロニクスデバイスの実現可能性が大幅に前進する。実用レベルのプラズモニク LED、太陽電池の実現は、低消費電力駆動や熱の発生の抑制につながり、エネルギー、環境問題にも大きな影



響を及ぼす。さらにプラズモンレーザー、プラズモンナノ集積回路といった未来技術は、電子工学分野の発展に大きく寄与すると期待できる。

#### 4. 自己評価

本研究は、プラズモニクスを利用した太陽電池を実用レベルにまで高めることを目的としており、主に①SP 結合を促進するためのナノ構造デザイン・最適化、②微細加工技術による界面ナノ構造の作成・制御、③空間・時間分解測定による光学特性評価・メカニズム解明、④プラズモニック太陽電池のデバイス試作・評価の研究課題によって遂行した。①に関しては、FDTDシミュレーションにより金属ナノ微粒子シート、その多層膜、ナノピラーアレイといった様々な構造で計算を行い、光を効率よく捕獲するナノ構造・デザインの最適化を行った。特に Ag ナノ微粒子シートの多層膜により、特定の波長の入射光を、わずか厚み数十 nm のシートに 99% 以上閉じ込めることに成功した。②に関しては、金属微粒子、金属ナノグレイン構造といったボトムアップ手法によるナノ構造の作製・制御に取り組んだ。特にスパッターにより作成した金属ナノグレインにおいては、サイズの制御に再考し、プラズモン共鳴の効果を最適化することに成功した。③に関しては、原子間力顕微鏡 (AFM) と光学測定を同時に計測できる装置を立ち上げ、ナノ構造とプラズモン特性の密接な関係の解明を進めた。FDTD 計算で得られるナノスケールでの光学特性を実感においても検出し比較するために、さらに解像度の高い近接場光学顕微鏡 (SNOM) との組み合わせに加え、AFM の分解能で光学測定が可能なチップエンハンス SNOM の系を立ち上げた。これに関しては装置の立ち上げ・調整に予想以上に手間取り、まとまった結果が出るまでにはまだ至っていないが、今後も引き続き遂行していく予定である。④の太陽電池デバイスに関しては、FDTD 計算による電磁波解析と、デバイスシミュレーションを組み合わせることにより、有機膜太陽電池に Ag ナノシートを導入することで約 2 倍の高効率化が図れることを示した。しかし、残念ながら実験においては、吸光度の向上は計算で予想した通りの結果が得られたが、高電流として取り出すことにまだ成功していない。よって実際のデバイス開発までには至っていない。しかしデバイス開発に必要な様々な知見を本さきがけ研究において得ることができたので、それらを有効に活用することにより、近い将来にデバイス開発まで達成できると期待している。

#### 5. 研究総括の見解

本研究では、独自に培ってきたプラズモニック発光増強技術を応用する新しいアプローチにより、太陽電池の飛躍的な光電変換効率の改善と、超薄膜化によるコスト削減を狙った実用化達成を目指す。表面プラズモンは金属表面のナノメートル領域に局在し、著しい電場増強効果があるため、うまく利用すれば太陽電池の超薄膜化と高効率化の達成が期待される。膜厚が薄い有機薄膜太陽電池の光吸収を増大させる方法として、表面プラズモンを駆使することは重要なアプローチの一つである。表面近傍にプラズモンを閉じ込めながら、ナノ構造を介して内部へ放射させるところがユニークで、有機系や量子ドット系にも使える可能性がある。

岡本研究者は、理論と実験結果の両面からの検討が行える数少ない研究者であり、その特徴を生かした研究を進めている。伝搬型プラズモンを利用した太陽電池の高効率化という新しい切り口を見出し、プラズモニクスを利用して薄膜の高い光吸収を示したことは高く評価できる。物性評価と理論計算を併せて、着実に研究成果を挙げている。プラズモニクスを太陽電池の高効率化に取り入れられるか、取り入れるための構造はどうかについて局在・伝搬協調モードに注目

し基礎検討を実施済みであり、素子設計の段階にある。ナノ微粒子シートを有する有機薄膜太陽電池の変換効率を計算し従来の 2 倍の効率を得ている。しかしながら、太陽電池の効率の向上がまだ認められていないことは、プラズモニクスとエレクトロニクスとのメカニズム解明のさらなる研究が必要であることを示唆している。素子設計の要件を精査し、モデルを修正する作業をくり返すことで太陽電池高効率化の可能性が見えてくると思われる。さきがけ研究で得られた知見と人脈を活用し、新規なデバイス構造やナノ材料を開発する事で、太陽電池の高効率化を達成してもらいたい。有機太陽電池への応用であればその動作メカニズムに併せた設計が最重要であり、素子特性を見ながら改善を進めてほしい。

## 6. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. X.-Y. Xu, M. Funato, Y. Kawakami, K. Okamoto, and K. Tamada. "Grain size dependence of surface plasmon enhanced photoluminescence". Optics Express. 2013, Vol. 21, No. 3, pp. 3145-3151.
2. K. Okamoto, B. Lin, K. Imazu, A. Yoshida, K. Toma, M. Toma, and K. Tamada. "Tuning colors of silver nanoparticle sheets by multilayered crystalline structures on metal substrates". Plasmonics. 2013, DOI: 10.1007/s11468-012-9437-2.
3. 岡本 晃一. "プラズモニクスのグリーンテクノロジーへの応用—高効率 LED・太陽電池を目指して—". 超精密, 2012, vol. 18, pp. 14-20.
4. K. Okamoto, and Y. Kawakami. "Enhancements of emission rates and efficiencies by surface plasmon coupling". Physica Status Solidi C. 2010, Vol. 7, No. 10, pp. 2582-2585.
5. K. Okamoto, Y. Kawakami. "Nanostructure-controlled plasmonics towards high-efficiency light-emitting diodes and solar cells". Renewable Energy 2010 Proceedings. 2010, O-Pv-1-3.

### (2) 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)

#### 著書

1. "プラズモニクス ~光・電子デバイス開発最前線~". 2011 年 8 月, エヌティーエス出版 (分担執筆: 第 2 章 プラズモニクスの電子工学的アプローチ, 第 4 章総説 プラズモニック光源の研究開発動向)
2. "プラズモン基礎理解の徹底と応用展開~実用化への要求仕様と課題/解決策検討~". 2011 年 4 月, 情報機構, (分担執筆: 第 5 章 LED~実用化のための要求仕様/課題/解決策候補等~, 第 9 章 薄膜太陽電池におけるプラズモニクスによる高効率化, 付録 3: 主な材料の波長依存性データ一覧).
3. "フォトニックナノ構造の最近の進展". 2011 年 3 月, シーエムシー出版. (監修: 野田進, 分担執筆: 第 10 章 プラズモニクスの光デバイス応用).
4. "Nanoscale Photonics and Optoelectronics, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology 9". 2011, Springer, (Editor: Z.M. Wang, A. Neogi, 分担執筆: Chapter 2, Surface Plasmon Enhanced Solid-State Light-Emitting Devices)



5. “Advanced Photonic Sciences”. 2012, InTech (Editor: M. Fadhali, 分担執筆: Chapter 8, Plasmonics for Green Technologies: Toward High-Efficiency LEDs and Solar Cells).

#### 総説、解説

1. 岡本 晃一. “プラズモニクスが拓く革新的光デバイス”. 未来材料. 2011, vol. 11, No. 4, pp.43-49.
2. 岡本 晃一. “プラズモニクスを用いた LED の発光増強”. 光学. 2011, vol. 40, No. 2, pp.83-90, (特集:進展するプラズモニック・デバイス).
3. 岡本 晃一. “ナノフォトニクスを用いた新規光計測と発光素子”. 化学工業. 2010, vol. 61, No. 10, pp.737-743, (特集:先端フォトニクスの展開).
4. 岡本 晃一. “プラズモニクスによる高効率発光”. 表面技術. 2010, vol. 61, No. 9, pp.617-623, (小特集:LED 照明と表面技術).
5. 岡本 晃一. “プラズモニクスの高効率発光デバイスへの応用”. O plus E. 2010, vol. 32, No. 2, pp.169-174, (ナノフォトニクス特集号).

#### 国際会議招待講演

1. K. Okamoto. “Plasmonic Nanostructures for High-Efficiency LEDs and Solar Cells”. 10th International Conference on Nano-molecular Electronics, Awaji, 12-14, Dec. 2012.
2. K. Okamoto. “Plasmonics for Energy: Toward High Efficiency LEDs and Solar Cells”. 8th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, St. Petersburg, Jul. 2-5, 2012.
3. K. Okamoto, Y. Kawakami, K. Tamada. “Applications of Plasmonics for Green Technology -Toward High Efficiency LEDs and Solar Cells-”. International Symposium on Material Science and Innovation for Sustainable Society, Eco-materials and Eco-innovation for Global Sustainability, Hotel Hankyu Expo Park, Osaka, Nov. 29, 2011.
4. K. Okamoto. “Nanostructure Controlled Plasmonics Towards High-Efficiency LEDs and Solar Cells”. 8th International Symposium on Modern Optics and Its Applications, Bandung, Indonesia, Jul. 4-7, 2011.
5. K. Okamoto. “Plasmonics toward high-efficiency LEDs and solar cells”. Workshop on Information, Nano and Photonics Technology, Kobe University, Dec. 2-3, 2010.

#### 国内学会招待講演

1. 岡本 晃一. “プラズモニクスのグリーンデバイス応用の将来展望”. 日本光学会ナノオプティクス研究グループ研究討論会 第 20 回記念シンポジウム(慶應義塾大学), 2012 年 5 月.
2. 岡本 晃一. “プラズモニック太陽電池の新展開”. 日本化学会第 92 春季年会 中長期テーマシンポジウム “プラズモニック化学の新展開”, 慶應義塾大学, 2012 年 3 月.
3. 岡本 晃一. “プラズモニクスを用いた高効率発光素子に向けて”. 日本分光学会北海道支部シンポジウム, 北海道大学, 2011 年 10 月.

4. 岡本 晃一. “プラズモニクスの高効率太陽電池への応用”. 応用物理学会分科会日本光学会光設計研究グループ第47回研究会 “環境と光学”, 京都大学桂, 2011年6月.
5. 岡本 晃一. “プラズモニクスのLED と太陽電池への応用”. 応用物理学会関西支部平成22年度第2回講演会 “プラズモニクスの最近の進展と展望”, 大阪大学中之島センター, 2011年1月.