

令和 3 年 4 月 28 日現在

機関番号：14501

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2020

課題番号：18KK0145

研究課題名（和文）量子ナノ構造を利用して根本的に変換効率を向上させる太陽電池技術の開発

研究課題名（英文）Development of solar cell architectures using quantum nanostructures for fundamentally increasing the power conversion efficiency

研究代表者

喜多 隆（Kita, Takashi）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：10221186

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：半導体n-i-p接合を利用した高効率太陽電池はグローバルでカーボンフリーな安定したエネルギー源としてますます期待されている。一般的な太陽電池の変換効率は透過損失や熱損失などによって非集光時では約30%が限界であることが知られている。本研究では、独自の量子ナノ構造を利用して透過損失や熱損失を低減させ、根本原理に基づき変換効率を向上させる研究に取り組んだ。限界を超える効率は太陽電池が吸収する太陽光スペクトル領域を拡大することで可能になる。本国際共同研究では、ニューサウスウェールズ大学（オーストラリア）と共同して研究を実施し、若手研究者を派遣して量子ナノ構造における2段階光励起過程を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽電池の変換効率を単接合型構造の限界である約30%を超えて大きくするには、太陽光スペクトルを広くカバーして有効に利用することが重要である。そのためにもっともよく知られた構造が、多接合型太陽電池である。しかし、構造の複雑化に伴って技術的には極限レベルに近づいており、効率の進歩が鈍化している。本国際共同研究は独自の着想による半導体ヘテロ界面に量子ドットを挿入した量子ナノ構造におけるバンド内光学遷移エンジニアリングを利用したものであり、高効率なアップコンバージョンによって変換効率は最大で63%となる極めて有望な太陽電池を実現する根本原理を明らかにしている。

研究成果の概要（英文）：High-efficiency photovoltaics using n-i-p semiconductor solar cells offer a sustainable and carbon-free solution to the challenge of meeting the increasing global energy demand. The photovoltaic energy conversion efficiency for a single-junction solar cell is limited to ~30% owing to various losses, such as transmission loss and thermalisation loss. In this research project, we develop novel solar cell architectures utilizing quantum nanostructures for fundamentally increasing the efficiency. Efficiencies beyond the limit can be achieved for a single junction solar cell by extending the absorbable solar spectrum range using the process of multiple photo-excitations in quantum nanostructures. In this international research collaborating with The University of New South Wales (Australia), the international collaborator have carried out studies with the young scientist on spectroscopy for the multiple photo-excitation process in solar cells containing quantum nanostructures.

研究分野：半導体電子工学

キーワード：太陽電池 量子ナノ構造 量子ドット アップコンバージョン

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

太陽光発電システム技術は、二酸化炭素の排出削減、クリーンエネルギーの利用技術というわが国が世界をリードすべき研究開発分野であるばかりでなく、持続的経済成長が期待できる重要な産業技術でもある。この高い将来ビジョンを実現していくためには、人類未踏の変換効率 50%以上を実現して、使用する原料費を抑え、設置工事費を含めたシステムコストの低価格化を実現する必要がある。そのためには、大規模生産技術の革新、現在主流のシリコン技術の向上や新材料の導入による単接合太陽電池の高効率化・低コスト化だけでは困難であり、従来にない新しい構造からなる新原理で動作する高効率太陽電池の実現によって変換効率の単接合限界を突破することが必須である。

一般的な太陽電池は半導体の p 型と n 型の間に不純物を含まない真性層をサンドイッチした単接合構造であり、太陽光スペクトルの一部しか利用できないために変換効率は非集光時では約 30%が限界であることが知られている。バンドギャップの異なる太陽電池を多層に接合した太陽電池では現在 4 接合で世界最高効率 46%を達成しているが、構造の複雑化に伴って技術的には極限レベルに近づいており、効率の進歩が鈍化している。これに対して、本来なら透過する小さなエネルギーの光を多段に吸収するアップコンバージョン（昇圧）が最近注目されている。

一般にアップコンバージョンの方法としては、非線形効果による波長変換や小さなエネルギーのフォトンの多段階光励起が知られている。しかし、非線形光学定数は材料に依存し、太陽電池材料では小さい。一方、多段階光励起では、バンドギャップ内の中間準位密度が低いために高い効率は望めず、さらには、中間準位に励起した状態を次段の励起が起こるまで維持する工夫をしないと原理的に多段階光励起できない。

このような状況の中、われわれは 2017 年に半導体ヘテロ界面に量子ドットを挿入した量子ナノ構造において、通常バンド間光吸収係数と同程度の高い光吸収特性を有する 2 段階の光吸収によるアップコンバージョンを室温で初めて実証した。この原理のポイントは、量子ナノ構造による「バンド内光学遷移エンジニアリング」であり、バンド内光遷移確率と光学遷移始状態の電子寿命の制御がカギを握っている。これらは、量子ナノ構造でないと制御できない物性であり、本研究課題では量子ナノ構造が創出する高効率なバンド内光学遷移によるアップコンバージョンの学理を深く学術的に問うことを主題にした。

### 2. 研究の目的

本研究で提案するアップコンバージョン太陽電池の基本構造は、太陽電池の p 型層と n 型層の間の真性層にヘテロ界面を挿入したシンプルな構造である。ヘテロ界面に蓄積した高密度な電子は第 2 のフォトンによって高い遷移確率でバンド内励起され、電子はバンドオフセットバリアを乗り越え内部電界によってバンドギャップが大きな半導体 1 の側にドリフトして光電流を生成する。これまでの理論予測より、この新原理で動作する太陽電池の変換効率は、ワイドギャップ半導体のバンドギャップが大きくなると変換効率の向上が顕著になり、太陽光を集光して照射すると変換効率は顕著に高くなる。予測される変換効率は最大で 63%と極めて大きな値を示した。

本国際共同研究では、太陽電池研究において世界最大且つ先導的機関であるニューサウスウェールズ大学 (UNSW) (オーストラリア) と共同して研究を実施する。UNSW は最高精度の太陽電池評価技術を有しており、特に、UNSW が有するフェムト秒レベルの超高速過渡光吸収分光技術は量子構造太陽電池の定量評価に極めて有効な手段である。われわれは研究分担者の若手研究者・朝日を派遣して、半導体ヘテロ界面に量子ドットを挿入した量子ナノ構造における 2 段階光励起吸収特性を「定量的」に明らかにするとともに、この新しい原理に基づいて変換効率を最大限引き上げる設計を実施することによって従来の限界を突破する新原理の解明を目的にした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 量子ナノ構造の最適設計と基礎特性評価（神戸大で実施）

デバイスシミュレータを用いて AlGaAs/InAs QD/GaAs ヘテロ構造を真性層に内包す

る p-n 構造の最適設計を行い、分子線エピタキシー技術を用いて太陽電池構造を作製した。また、太陽電池の基礎特性を明らかにするため、光電流スペクトル応答と電流-電圧特性を詳細に調べ、ヘテロ界面におけるキャリアの蓄積効果とキャリアの引き出し特性を調べた。

### (2) アップコンバージョン太陽電池の基礎特性評価 (神戸大で実施)

アップコンバージョンの高効率化を決定する物理を明らかにするため、ヘテロ界面高密度電子の自由電子プラズマ効果を取り入れたバンド内光学遷移理論計算を実施した。界面電子密度を制御するために Si を AlGaAs に変調ドーピングした太陽電池セルを試作してアップコンバージョン太陽電池について光電流スペクトルや時間分解光電流特性を詳しく調べた。

### (3) アップコンバージョンの学理と高効率化技術開発 (UNSW で実施)

作製した新型太陽電池に対して、UNSW が有する変調分光システムを利用して若手研究者の朝日が現地に出向いて実施した。アップコンバージョンでは光吸収特性の定量的な評価が最も重要であり、光生成した電流と再結合による発光を総合的に評価して電子あるいは正孔がヘテロ界面に蓄積する場合に発現するバンド内光学遷移特性の違いを調べた。

## 4. 研究成果

アップコンバージョン太陽電池 (TPU-SC) はワイドギャップ半導体 (WGS) とナローギャップ半導体 (NGS) から構成されたヘテロ接合を有する単接合太陽電池である。太陽光は WGS 側から入射され WGS のバンドギャップ以上の光子は WGS で吸収され、WGS 以下の光子は NGS で吸収され励起された電子はヘテロ界面にあるポテンシャルバリアに蓄積される。この電子は内部電界によって既に正孔と分離されているため、長寿命となり低エネルギーの光子により高効率な TPU が発生する。実験に用いた TPU-SC は分子線エピタキシー装置を用いて作製し、 $p^+$ -GaAs (001) 基板上に作製した。この太陽電池は AlGaAs は GaAs から形成されるヘテロ界面を含み、AlGaAs が WGS、GaAs が NGS に相当する。TPU 効率の増強効果を狙いヘテロ界面直下に InAs QDs を 1 層挿入した。

### 4-1 ドーピングによるアップコンバージョン効率向上の実験実証

アップコンバージョンの高効率化を決定する物理を明らかにするため、ヘ

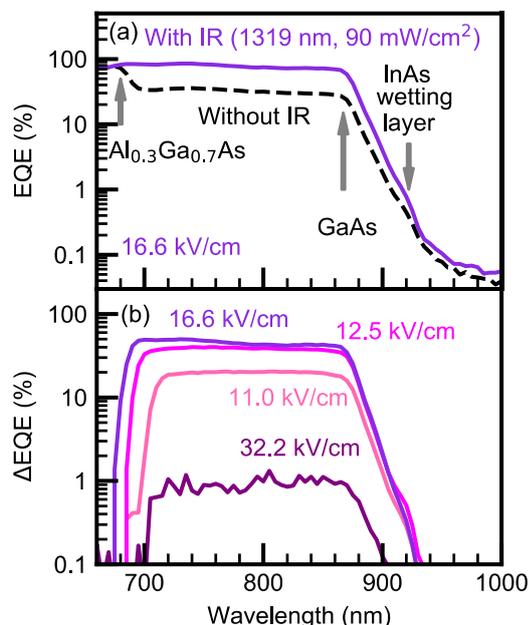


図 1(a) ヘテロ界面の電界強度 16.6 kV/cm の TPU-SC における追加赤外光照射前後における EQE スペクトル。(b) 各太陽電池の  $\Delta$ EQE スペクトル。グラフ内の数字は各太陽電池のヘテロ界面の電界強度。

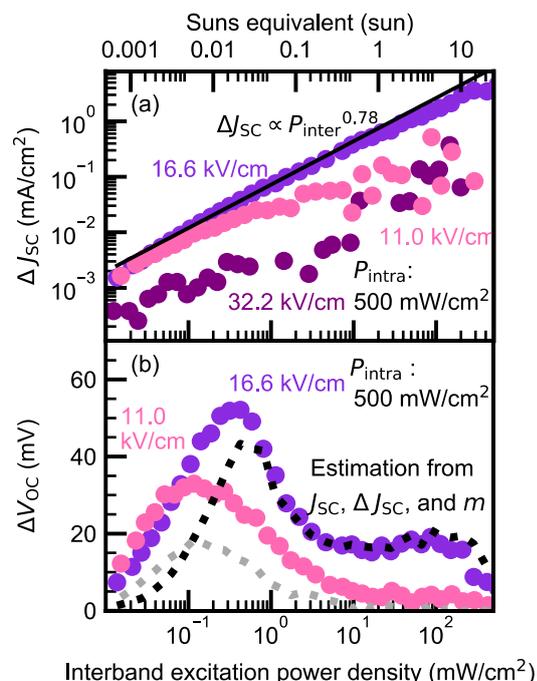


図 2 アップコンバージョンによる、(a) 短絡電流上昇量  $\Delta$ JSC と (b) 開放電圧上昇量  $\Delta$ VOC のバンド間励起光強度依存性。(b)の破線は JSC、 $\Delta$ JSC、およびダイオード因子  $m$  から求めた詳細平衡理論による開放電圧上昇量。

テロ界面高密度電子の自由電子プラズマ効果を取り入れたバンド内光学遷移理論計算を実施した。バンド内光学遷移は界面電子密度に応じて変化し、キャリアの引き出し特性に影響することが明らかになった。また、プラズモン共鳴応答特性を見出し、量子ドットの形状、大きさ、密度による変化を明らかにすることができた。界面電子密度はドーピングによって制御できるので、本研究では Si を AlGaAs に変調ドーピングして界面電荷密度を制御してアップコンバージョン太陽電池基礎特性を詳しく調べた。

図 1(a)は変調ドーピングによりヘテロ界面の電界強度を 16.6 kV/cm に制御した太陽電池の外部量子効率 (EQE) スペクトルである。黒い破線は追加赤外 (IR) 光を照射していないときの EQE であり、680 nm、870 nm、920 nm に観測できる吸収端はそれぞれ、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 、GaAs のバンドギャップと InAs 濡れ層の準位に相当する。 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  と GaAs のバンドギャップの間である 680 nm から 870 nm の光は GaAs を選択的に励起し、生成された電子及び正孔はそれぞれ  $n$  層と  $p$  層へドリフトする。その過程で電子は  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  と GaAs のヘテロ界面に形成されるバリアで留まるため、高密度な電子ガスが形成される。

図 1(a)の紫色の実線は追加 IR 光を照射した際の EQE スペクトルである。この IR 光の波長は 1319 nm と十分に長く太陽電池内でバンド間励起を発生させることはできず、ヘテロ界面に蓄積した電子のバンド内励起 (アップコンバージョン) のみ誘起する。この光により EQE が上昇しており、これは効率的なアップコンバージョンにより電流が発生していることを示している。図 1(b)にヘテロ界面の電界強度が異なる太陽電池の  $\Delta\text{EQE}$  スペクトルを示す。ここで、11.0 kV/cm は変調ドーピングを行っていない太陽電池である。変調ドーピングを行った 12.5 kV/cm、16.6 kV/cm の太陽電池は  $\Delta\text{EQE}$  が上昇している。これは変調ドーピングによりヘテロ界面の電界強度が増加し、アップコンバージョンした電子の取り出し効率が改善した結果、アップコンバージョンの効率が向上したことを示している。ここで 32.2 kV/cm では  $\Delta\text{EQE}$  が逆に低下している。これは強すぎる電界ではヘテロ界面の電子がトンネル脱出によりバリアを超えてしまいヘテロ界面に電子が蓄積しないためである。図 2(a)に追加 IR 光による短絡電流上昇量  $\Delta I_{\text{SC}}$  の 1 段階目バンド間励起光強度依存性を示す。図 1 と同様、16.6 kV/cm の太陽電池が最も効率よくアップコンバージョンされている。図 2(b)には追加 IR 光照射による開放電圧上昇量  $\Delta V_{\text{OC}}$  のバンド間励起光強度依存性を示す。16.6 kV/cm、11.0 kV/cm とともに明確に開放電圧が上昇してい

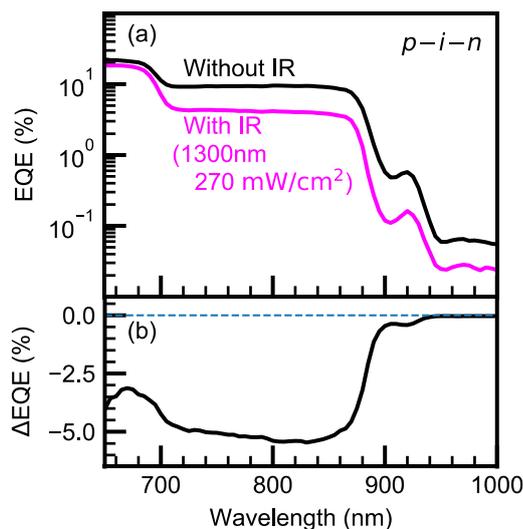


図 3(a) 正孔をアップコンバージョンする p-i-n 型のアップコンバージョン太陽電池の追加赤外光照射前後における EQE スペクトル。(b)  $\Delta\text{EQE}$  スペクトル。

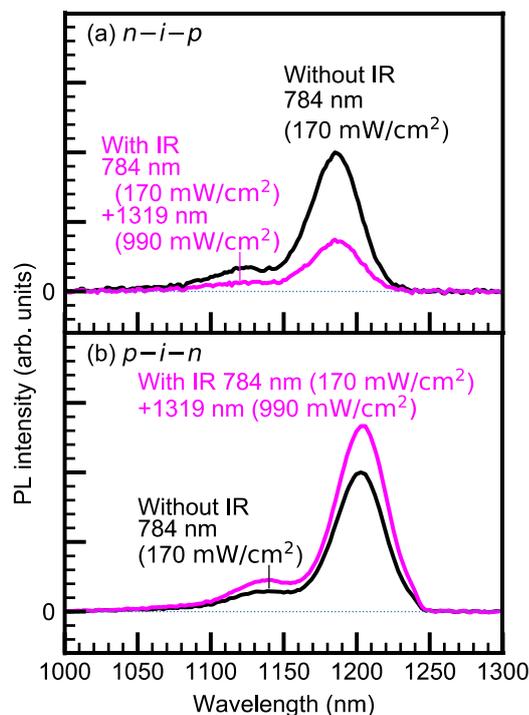


図 4(a) n-i-p 構造、(b) p-i-n 構造のフォトンアップコンバージョン太陽電池の InAs 量子ドットからのフォトルミネッセンススペクトル。黒線は GaAs のみを励起した場合、マゼンタ線は追加 IR 光を照射した場合。

る。ここで、黒い破線は  $J_{SC}$ 、 $\Delta J_{SC}$ 、およびダイオード因子  $m$  から単接合型太陽電池詳細平衡理論により求まる開放電圧上昇量であり、実験値はこの値を明確に超えている。この差はヘテロ界面における擬フェルミ準位の分裂の程度を示していると考えている。この結果は初めてアップコンバージョンにより明確に擬フェルミ準位分裂を実証した結果であり、さらなる太陽電池の変換効率向上が期待できる。

#### 4-2 正孔アップコンバージョン太陽電池の基礎特性検証

これまで実証してきたフォトンアップコンバージョン太陽電池は電子のアップコンバージョンを利用する  $n-i-p$  構造だったが、原理的には同じことが正孔でも発生するはずである。そこで、正孔のアップコンバージョンを利用した  $p-i-n$  構造のフォトンアップコンバージョン太陽電池を作製し評価を行った。その EQE スペクトルを図 3(a) に示す。追加赤外光を照射しない場合のスペクトル構造は  $n-i-p$  構造と同じである。しかし、追加 IR 光を照射した際の応答が  $n-i-p$  構造とは異なり、追加 IR 光照射で明確に EQE が減少する。その結果、図 3(b) に示す  $\Delta EQE$  では負の値となった。この結果は、当初の予測とは全く逆の特性であり、興味深い結果である。我々はこの EQE 減少のメカニズムを解明するため、詳細な光学測定を行った。図 4(a) 及び (b) に 2 波長の光源で励起した際の  $n-i-p$  構造と  $p-i-n$  構造のフォトルミネッセンス (PL) スペクトルを示す。 $n-i-p$  構造、 $p-i-n$  構造共に 1200 nm 付近に強い発光ピークと 1130 nm 付近に小さな発光ピークが観測できる。これはヘテロ界面近傍に形成した InAs 量子ドットの基底準位、励起準位における電子と正孔の再結合による発光である。図 4(a) で示している  $n-i-p$  構造の太陽電池では、追加 IR 光を照射することにより PL 発光が減少している。これは IR 光により電子がアップコンバージョンされヘテロ界面での電子密度が減少し、PL 発光強度が低下したと理解でき、妥当な結果である。一方、 $p-i-n$  構造では逆に追加 IR 光により PL 強度が増加している。この結果から追加 IR 光による EQE の減少は以下のようなメカニズムであると考えている。まず、ヘテロ界面に蓄積した正孔はアップコンバージョンされ、より高いエネルギーの準位に遷移するが、電子と比べ実効的な移動度が小さいため、引き抜かれることなく、アップコンバージョンされた準位に留まる。これにより、ヘテロ界面における正孔の InAs 量子ドット基底準位の正孔密度が下がり、光電流が低下する。一方、追加 IR 光照射によりヘテロ界面の正孔密度が増加し、その結果ヘテロ界面に到達する電子が増加し、その結果 PL 強度が増加する。正孔の電子に比べて小さな移動度による PL の傾向の差は他の光学測定においても確認されている。このように、電子と正孔の実効的な移動度の差が、EQE と傾向の差となって表れたと考えている。この結果から新たな構造を提案することにより、正孔のアップコンバージョンにおいても電流上昇が実現できると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Y. Harada, S. Asahi, and T. Kita	4. 巻 12
2. 論文標題 Bound-to-Continuum Intraband Transition Properties in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 125008 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab56ef	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita	4. 巻 34
2. 論文標題 Hot-Carrier Generation and Extraction in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Semiconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 094003 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6641/ab33a2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	4. 巻 9
2. 論文標題 Adiabatic Two-Step Photoexcitation Effects in Intermediate-Band Solar Cells with Quantum Dot-in-Well Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7859-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-44335-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S. Asahi, and T. Kita	4. 巻 10
2. 論文標題 Reply to: Thermal Artefacts in Two-Photon Solar Cell Experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 956-1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-08704-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 喜多隆	4. 巻 6
2. 論文標題 高変換効率太陽光発電の研究開発～50%を超える変換効率実現に向けた取り組み	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気評論	6. 最初と最後の頁 13-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Zhu, S. Asahi, K. Watanabe, N. Miyashita, Y. Okada, and T. Kita	4. 巻 129
2. 論文標題 Two-Step Excitation Induced Photovoltaic Properties in an InAs Quantum Dot-In-Well Intermediate-Band Solar Cell	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 074503-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0036313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Murata, S. Asahi, Stefano Sanguinetti, and T. Kita	4. 巻 10
2. 論文標題 Infrared Photodetector Sensitized by InAs Quantum Dots Embedded Near an Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As/GaAs Heterointerface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 11628-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-68461-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 N. Kinugawa, S. Asahi, and T. Kita	4. 巻 14
2. 論文標題 Reciprocal Relation Between Intraband Carrier Generation and interband Recombination at the Heterointerface of Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014010-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.14.014010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita
2. 発表標題 Excitation Energy Dependence of Hot-Carrier Extraction Process in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells
3. 学会等名 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Asahi, and T. Kita
2. 発表標題 Effect of the accumulated Electron Density at the Hetero-Interface in Two-Step Photon-Up Conversion Solar Cells
3. 学会等名 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita
2. 発表標題 Extensively-Prolonged Electron Lifetime Within Room Temperature Upon InAs/GaAs Quantum Dot-in-Well Solar Cell
3. 学会等名 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Harada, N. Iwata, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita
2. 発表標題 Hot-Carrier Extraction in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells
3. 学会等名 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Strong Voltage-Boost Effect in Two-Step Photon-Up Conversion Solar Cells
2. 発表標題 S. Asahi, and T. Kita
3. 学会等名 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Reciprocal Relationship Between Photoluminescence and Photocurrent in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell
2. 発表標題 N. Kinugawa, S. Asahi, and T. Kita
3. 学会等名 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田幸弘、草木和輝、朝日重雄、喜多隆
2. 発表標題 2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるバンド内遷移特性
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺航平、朝日重雄、喜多隆
2. 発表標題 変調ドープした二段階フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるアップコンバージョン電流増大
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 絹川典志、朝日重雄、喜多隆
2. 発表標題 2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における光電流と輻射再結合電流の相反関係及びキャリア収集特性
3. 学会等名 第30回光物性研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kita
2. 発表標題 Up-Conversion Dynamics in Nanostructure
3. 学会等名 Round-Table Workshop on Future Quantum Photovoltaics, University of Cambridge (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝日重雄、柴村和樹、草木和輝、喜多隆
2. 発表標題 正孔のアップコンバージョンを利用したフォトンアップコンバージョン太陽電池の基礎検討
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 絹川典志、朝日重雄、喜多隆
2. 発表標題 フォトンアップコンバージョン太陽電池における輻射再結合と光電流の相反性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 絹川典志、朝日重雄、喜多隆
2. 発表標題 ヘテロ界面を利用した2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における輻射再結合過程
3. 学会等名 第29回光物性研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Watanabe, S. Asahi, Y. Zhu, and T. Kita
2. 発表標題 Up-Converted Photocurrent Enhancement in Modulation-Doped Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells ”
3. 学会等名 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita
2. 発表標題 Intensive-Light-Induced Backtracking Voltage Phenomenon: An Insight into Intermediate-Band Solar Cell Output Performance
3. 学会等名 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita
2. 発表標題 Efficiency Compensation from Intraband Transitions of Opposite Carrier in a Quantum Dot-in-Well Intermediate Band Solar Cell
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺航平、朝日重雄、喜多隆
2. 発表標題 変調ドーブした二段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における電圧上昇効果
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Zhu, S. Asahi, K. Watanabe and T. Kita
2. 発表標題 Performance Analysis of an InAs/GaAs/Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As Quantum Dot-in-Well Intermediate Band Solar Cell Under Two-Step Photoexcitations
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Watanabe, S. Asahi, Y. Zhu, and T. Kita
2. 発表標題 Dramatic Enhancement of Current and Voltage in Modulation-Doped Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells
3. 学会等名 第39回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝日重雄、M. Nielsen, N.J. Ekins-Daukes, 喜多隆
2. 発表標題 正孔のアップコンバージョンを利用した2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池の追加赤外光による光電流減少メカニズム
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita
2. 発表標題 Performance Degradation of Quantum Dot-in-Well Intermediate Band Solar Cell Under Intense Bi-Color Barrier and Intraband Photoexcitations
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺航平、朝日重雄、喜多隆
2. 発表標題 変調ドープした二段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における光励起効率の向上
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺航平、朝日重雄、Yaxing Zhu、喜多隆
2. 発表標題 変調ドープによるフォトンアップコンバージョン太陽電池の特性制御
3. 学会等名 日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Takashi Kita, Yukihiro Harada, and Shigeo Asahi	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 202
3. 書名 Energy Conversion Efficiency of Solar Cells	

〔産業財産権〕

〔その他〕

神戸大学工学研究科フォトニック材料学研究室  
<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-photonics/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	原田 幸弘  (Harada Yukihiro)  (10554355)	神戸大学・工学研究科・助教   (14501)	
研究分担者	朝日 重雄  (Asahi Shigeo)  (60782729)	神戸大学・工学研究科・助教   (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
オーストラリア	ニューサウスウェールズ大学		