

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04987

研究課題名(和文)多接合型光電変換素子における発光結合効果の解明

研究課題名(英文)Luminescent effects in multijunction photovoltaic devices

研究代表者

太野垣 健(Tayagaki, Takeshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員

研究者番号：80422327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：非輻射再結合損失が抑制された高効率光電変換素子においては、輻射再結合が主要な損失要因となるため、輻射再結合による発光放出を再吸収する発光結合効果が光電変換特性に重要な役割を果たす。多接合型光電変換素子の発光結合効果により、従来の光電変換素子にない新しい特性の発現が期待されている。本研究では、Laser power converter、メカニカルスタック多接合太陽電池など、特徴的な多接合型光電変換素子について、太陽電池特性の時間分解測定などの実験的研究を実施した。様々の素子において発現する発光結合効果と光電変換特性への影響を分析し、発光結合効果を包括的に理解するような知見の構築を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光電変換素子における発光効果の研究は、太陽電池素子において盛んである。高性能太陽電池は高品質pn接合であり高効率な発光効率により性能向上するという観点から、GaAs薄膜を用いた高効率発光素子が、世界最高の太陽光発電効率を示すことが実証された。本研究は、発光効果による高性能化が遅れている多接合型太陽電池において、その性能向上への知見を構築するという意義がある。集光用太陽電池やLaser power converterなどの多接合太陽電池において、発光結合効果が素子性能へ及ぼす影響を議論する際の基礎となる知見の構築に寄与している。

研究成果の概要(英文)：In a high-efficiency photovoltaic device in which non-radiative recombination loss is suppressed, radiative recombination is a major loss factor, so the luminescent coupling effect of reabsorbing light emitted by radiative recombination plays an important role in photovoltaic characteristics. Due to luminescent coupling effect of multi-junction photovoltaic devices, it is expected that new characteristics not found in conventional photovoltaic devices would appear. In this research, we conducted experimental research such as time-resolved measurement of solar cell properties of multi-junction photovoltaic devices such as laser power converters and mechanical stack multi-junction solar cells. We analyzed the luminescent coupling effect and the effect on photovoltaic device characteristics seen in various devices, and proceeded to build knowledge to comprehensively understand the luminescent coupling effect.

研究分野：太陽光発電

キーワード：太陽電池 太陽光発電 発光 多接合太陽電池 光電変換

1. 研究開始当初の背景

輻射再結合は高品質太陽電池においても不可避な損失過程である。非輻射再結合損失が抑制された高効率光電変換素子においては、輻射再結合が主要な損失要因となるため、輻射再結合による発光放出を再吸収する発光結合効果が光電変換特性に重要な役割を果たす。単一 p n 接合である単接合太陽電池においては、一旦放出された発光が同一 p n 接合内で再吸収される現象 (フォトンリサイクリング効果) により、輻射再結合による損失が低減され高性能を示すようになる。一方、laser power converter や集光型太陽電池などに用いられる多接合型光電変換素子は、p n 接合が多数積層された光電変換素子であるが、p n 接合における発光 (輻射再結合) が異なる p n 接合で再吸収される発光結合効果が素子性能に重要な役割を果たすようになる。多接合型太陽電池の電気特性は多数の p n 接合が直列につながれた回路と等価であり、各 p n 接合に流れる電流は同じ値となる。光照射により p n 接合に大きな光電流が生成されると、順方向バイアス電圧 (光起電力) が生じ、暗電流が流れる。この暗電流の一部により電界発光が生じるが、これが隣接する p n 接合に吸収されると生成電流値が増大し、発光損失は低減する。このような結合効果を介して、多接合太陽電池全体で生成される光電流値が増大するなど、多接合光電変換素子においては照射光強度-生成光電流間に非線形応答が発現する可能性が指摘されている。このような発光を介した結合効果は、以前より発光効率が比較的高い - 族化合物半導体素子において知られており、現象論的な研究が行われていた。近年、高品質化された最近の太陽電池においては非輻射再結合が抑制され輻射再結合の寄与が大きくなったため、従来にない微視的物理機構まで掘り下げた研究が必要となってきた。

2. 研究の目的

多接合型光電変換素子の発光結合効果により、生成光電流が照射光強度に対し非線形に増大するなど、従来の光電変換素子にない新しい特性の発現が期待されている。本研究では、そのような発光結合効果の微視的物理機構を解明することが目的である。

3. 研究の方法

集光用多接合太陽電池や Laser power converter、メカニカルスタック多接合太陽電池など、特徴的な多接合型光電変換素子について、太陽電池特性の時間分解測定などの実験的研究を実施する。様々の素子において発現する発光結合効果と光電変換特性への影響を分析し、発光結合効果を包括的に理解するような知見を構築する。

4. 研究成果

特徴的な多接合型光電変換素子において、発光結合効果の特性解明を進め、以下のような研究成果を得た。

(1) 集光用 GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs₄ 接合太陽電池において、光入射側に配置された高バンドギャップエネルギー太陽電池サブセルから、隣接する低エネルギーバンドギャップ太陽電池サブセルへの発光結合効果について調べた。単色レーザー照明下において、開放電圧の過渡的变化について測定を行い、発光結合の効率について抽出を行った。GaInAs サブセルは、照射されたレーザー光を直接吸収しないので、他のサブセルからの発光を再吸収する発光結合効果によって光電流を生成する。また、照射レーザー光強度の増加に伴い、開放電圧が非線形に増大することがわかった。さらに、6桁にわたる照射光強度の範囲において、開放電圧の増大が観察された。これらの開放電圧の増加について、サブセルのシャント抵抗、静電容量、発光結合効果を含む直列接続されたダイオードモデルを用いて調べた。その結果、発光結合で生成された光電流、つまり GaInAsP サブセルから GaInAs サブセルへの発光結合係数は、バイアス電圧に対して特徴的な依存性を示すことがわかった。この振る舞いは、通常の光励起による発光と電界発光が競合した結果として説明された。これらの結果から、発光結合に寄与する発光として、通常の発光とバイアス電圧による電界発光の寄与を考慮する必要があることがわかった。

(2) メカニカルスタックによって作製した GaAs//InGaAsP 2 接合太陽電池において、GaAs トップセルにおけるフォトンリサイクリングについて調べた。作製したメカニカルスタック太陽電池

においては、トップセルとボトムセルの間にナノメートルスケールのエアギャップが存在する。まず、GaAs トップサブセル裏面における反射率の入射角依存性を計算により見積もった。その結果、エアギャップの厚さが 10 nm の場合でも、GaAs トップセルにおける発光の 30%以上がエアギャップで反射されることがわかった。次に、実験によって、サブセル間にギャップがない太陽電池デバイスとの比較を行い、ナノメートルのエアギャップがある GaAs//InGaAsP 2 接合太陽電池において取り出される発光が増大することが示された。これらの結果から、数十ナノメートルのエアギャップにおいても、エアギャップによる効率的なフォトンリサイクルが発現することがわかった。

(3) 異なる厚さの GaAs サブセルで構成される GaAs 3 接合太陽電池において、各 GaAs サブセルのスペクトル応答について調べた。多接合太陽電池は、太陽電池と同様に、ワイヤレス電力伝送の分野で注目を集めている。太陽光スペクトル照明の条件において、各 GaAs サブセルで生成される光電流量を見積もり、サブセル間の電流が整合していることを検証した。また、各サブセルのスペクトル応答曲線から、405 nm、660 nm、および 785 nm の波長のレーザー照射下におけるスペクトル応答の照射強度依存性の実験結果について、GaAs トップセルにおけるシャント抵抗低下と発光結合効果を考慮することによって説明されることがわかった。

(4) 水素化物気相エピタキシーを使用して製造された InGaP/GaAs タンデム太陽電池において、発光結合効果が太陽電池性能評価に及ぼす効果、特に電界発光を用いた性能評価に及ぼす影響について調べた。この素子における InGaP トップセルから GaAs ボトムセルへの発光結合効率は 0.6% であると見積もられた。また、電界発光測定を使用して、サブセルの電流-電圧曲線分析を行う際の、発光結合の影響を調べた。電界発光効率の測定には、InGaP 単接合太陽電池を参照試料として用いた。InGaP トップセルからの発光収集効率は、GaAs ボトムセルにおける発光収集効率よりも低いことがわかった。これらは、InGaP トップセルから GaAs ボトムセルへの発光結合による影響であるとして理解される。これらの結果から、各サブセルの発光取り出し効率を考慮した解析を行うことにより、合理的なサブセル電圧を見積もることができることがわかった。

(5) 金属ナノ粒子アレイを介した半導体貼り合わせ技術（スマートスタック）を使用して製造された 3 端子型 InGaP//InGaAsP および InGaP/GaAs//InGaAsP タンデム太陽電池において、発光結合の特性について調べた。3 端子型タンデム太陽電池の出力電力について評価を行い、3 端子型タンデム太陽電池デバイスにおける総生成電力はトップセルとボトムセルの生成電力の合計に等しいことを検証した。さらに、トップセルからボトムセルへの発光結合効果の特性について、3 端子型タンデムデバイスを用いて調べた。その結果、発光結合電流は照射光強度とともに増加すること、発光するサブセルへの印加電圧に対して依存性を示すことがわかった。さらに、3 端子タンデム太陽電池から取り出される電力について、発光結合効果の影響を分析した。これらの結果から、3 端子型タンデム太陽電池は、発光結合効果をより直接的に精密に測定する良い研究対象であることがわかった。

(6) 半導体貼り合わせ技術スマートスタックを用いて、裏面に第 2 および第 3 電極を有した裏面コンタクト型の Si ボトムセルを用いた 3 端子型タンデム太陽電池を作製した。3 端子型タンデム太陽電池は、原理的にはスペクトル変動に耐性のある太陽電池である。3 端子型 GaAs//Si タンデム太陽電池を作製し、その生成電力を測定した。照射光のスペクトル形状が変化しても、トップセルとボトムセルで生成された電力の合計に相当する電力が生成されることを検証した。これらの結果から、照射光スペクトルが変動する地上への応用に向けては、裏面コンタクト型のボトムセルを備えた 3 端子型タンデム太陽電池に利点があることがわかった。

(7) 交互に配置された電極を背面に備えた 3 端子型 GaAs//Si タンデム太陽電池において、様々な外部負荷と電流ミスマッチ条件における電気出力特性について調べた。選択した負荷トポロジ（3 端子中のどの端子を共通端子として使用するか）に関係なく、3 端子型タンデム太陽電池の 2 つのサブ回路の出力電力の合計は同じ値になることがわかった。一方のサブ回路の電流-電圧曲線は、もう一方のサブ回路の負荷トポロジとバイアス条件に依存することがわかった。これらの結果は、単純な等価回路モデルで説明できた。トップセルとボトムセルの間の電流ミスマッチに応じて、2 つのトポロジでは負の電流が観察された。これは、サブ回路の 1 つへの電力注入を示している。この負の電流は、3 番目のトポロジでは発生しなかったため、特にスペクトルが変化する条件下で、3 番目のトポロジが電力を最大化するための有用な方法であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takashi Nakamoto, Kikuo Makita, Takeshi Tayagaki, Taketo Aihara, Yoshinobu Okano, Takeyoshi Sugaya	4. 巻 12
2. 論文標題 Spectral response measurements of each subcell in monolithic triple-junction GaAs photovoltaic devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 102015-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1882-0786/ab45d8	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 Takeshi Tayagaki, Kikuo Makita, Tomihisa Tachibana, Hidenori Mizuno, Ryuji Oshima, Hidetaka Takato, Takeyoshi Sugaya	4. 巻 10
2. 論文標題 Three-Terminal Tandem Solar Cells With a Back-Contact-Type Bottom Cell Bonded Using Conductive Metal Nanoparticle Arrays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Photovoltaics	6. 最初と最後の頁 358-362
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPHOTOV.2019.2957661	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 Takeshi Tayagaki, S. Kasimir Reichmuth, Henning Helmers, and Gerald Siefer	4. 巻 124
2. 論文標題 Transient analysis of luminescent coupling effects in multi-junction solar cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 183103-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5046543	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 該当する
1. 著者名 Takeshi Tayagaki, Kikuo Makita, Ryuji Oshima, Hidenori Mizuno, and Takeyoshi Sugaya	4. 巻 8
2. 論文標題 Analysis of luminescence coupling effect in three-terminal tandem solar cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Photonics for Energy	6. 最初と最後の頁 045503-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.JPE.8.045503	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 Takeshi Tayagaki, Kikuo Makita, Ryuji Oshima, Hidenori Mizuno, and Takeyoshi Sugaya	4. 巻 27
2. 論文標題 Impact of nanometer air gaps on photon recycling in mechanically stacked multijunction solar cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 A1-A10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.0000A1	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 Takeshi Tayagaki, Ryuji Oshima, Yasushi Shoji, and Takeyoshi Sugaya	4. 巻 10
2. 論文標題 Luminescence effects on subcell current-voltage analysis in InGaP/GaAs tandem solar cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Photonics for Energy	6. 最初と最後の頁 025504/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JPE.10.025504	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 Takeshi Tayagaki, Kikuo Makita, Tomihisa Tachibana, Hidenori Mizuno, Ryuji Oshima, Hidetaka Takato, Takeyoshi Sugaya	4. 巻 221
2. 論文標題 Impact of loading topology and current mismatch on current-voltage curves of three-terminal tandem solar cells with interdigitated back contacts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Solar Energy Materials and Solar Cells	6. 最初と最後の頁 110901/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.solmat.2020.110901	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4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 T. Tayagaki, K. Makita, T. Tachibana, H. Mizuno, R. Oshima, H. Takato, and T. Sugaya
2. 発表標題 Demonstration of three terminal GaAs//Si tandem solar cells with a back-contact-type bottom cell
3. 学会等名 29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tayagaki, H. Mizuno, K. Makita, R. Oshima, and T. Sugaya
2. 発表標題 Impact of nanometer air gap on photon recycling in mechanically stacked multijunction solar cells
3. 学会等名 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tayagaki, S. K. Reichmuth, H. Helmers, and G. Siefer
2. 発表標題 Luminescent coupling in multi-junction photovoltaic devices studied by transient voltage measurements
3. 学会等名 35th European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 太野垣 健, 牧田 紀久夫, 立花 福久, 水野 英範, 大島 隆治, 高遠 秀尚, 菅谷 武芳
2. 発表標題 裏面コンタクト型三端子GaAs/Si タンデム太陽電池の性能評価
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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			
ドイツ	フラウンホーファ研究機構太陽 光エネルギーシステム研究所			