

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25288112

研究課題名(和文) 導波路結合フォトン-フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池の研究

研究課題名(英文) Waveguide-coupled orthogonal photon-photocARRIER propagation solar cell

研究代表者

石橋 晃 (Ishibashi, Akira)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：30360944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光の吸収とフォトキャリアの収集効率の最適化を両立し、全太陽光スペクトルに亘って光電変換を行うことを目指して、フォトンの進行方向とフォトキャリアの移動方向が直交した、マルチストライプ構造を有する新しい光電変換デバイスシステムの検討を進めた。上記直交性の活用によりもたらされる光吸収と高いキャリア収集効率の両立と、光進行方向変換層のプロトタイプの実験評価が進んだ。この光進行方向変換層を最上層として設けることで、太陽光の入射方向によらず、2次元導波路構造に対し、ほぼ垂直に光が入射する構造を実現し得ることを実証し、変換効率を向上させるための礎を築いた。

研究成果の概要(英文)：We have investigated waveguide-coupled multistriped orthogonal photon-photocARRIER-propagation solar cell. The photons propagate in the direction orthogonal to that of the photo-carriers'. Because of the orthogonality, the new solar cell can optimize the absorption of light and the photo-carrier collection independently. By exploiting the degree of freedom along the axis of photon propagation, we can convert the full solar spectrum into electricity resulting in high conversion efficiency. The solar cell can convert virtually the whole spectrum of black body radiation into the electricity, being a candidate for next generation solar cell with high energy conversion efficiency.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：太陽電池 光電変換素子

1. 研究開始当初の背景

高効率の太陽電池の導入が望まれるが、従来の太陽電池素子構造では、太陽光の入射方向と生成したフォトキャリアの移動方向が平行である為、光吸収とフォトキャリアの収集の間にはトレードオフがある。第1, 2世代太陽電池の効率は、バルク Si 系で 24.7%、薄膜 GaAs 系で 24.5%、a-Si/CIGS で 14.6% が報告されている。またマルチ接合(タンデム型)素子では、2005 年に Green 等が GaInP/GaAs/GaInAs 系で 37.9% を報告している。有機半導体系でもペンタセン/C60 を用いた系で 2004 年に Yoo 等がパワー変換効率 2.7% を、また 2005 年には Ma 等が P3HT と PCBM を用いた系で、約 5% の変換効率を報告しているが、有機半導体デバイスは移動度の低さによる困難を抱えていた。

ホットキャリアの利用を目論む第3世代太陽電池は、高速緩和するキャリアの効率的収集の難しさ等、問題点が多く、高効率の光電変換は未だ得られていない。又、光入射方向と pn 接合面が平行な構造も提案されている(Hiramoto et.al. 2005)が、複数エネルギーギャップの利用や大面積化は容易ではなかった。

2. 研究の目的

(1) 従来の素子構造では、太陽光の入射方向と生成したフォトキャリアの移動方向が平行である為、光吸収とフォトキャリアの収集の間にはトレードオフがあり、両者を同時に最適化することは難しかったが、導波路構造を活用しつつ、太陽光の進行方向とキャリアの移動方向を直交させることで、このトレードオフを解消できる可能性がある。特に、昇降順を最適化したマルチストライプのフォトン-キャリア直交型の新型光電変換素子構造では、光源のスペクトル全体に亘る光電変換が可能であり、導波路系により自然に集光系が組めるため、高い変換効率が見込まれると期待される。

(2) 高効率の太陽電池の全地球的規模の導入が望まれている中、本来、塗布工程が可能であり従来のバルク Si 系にはない優れた潜在的優位性を持っている有機半導体太陽電池の効率は十分とは言えない。バルク Si 太陽電池、薄膜半導体太陽電池に続く、第3世代の高光電変換効率をもつ太陽電池の重要性は極めて大きい。

3. 研究の方法

本研究課題では、フォトンとフォトキャリアの進行方向を直交させ、複数バンドギャップの半導体ストライプが自動的にフォトンのエネルギーを弁別する新しい光電変換デバイスを進化させ、太陽光(黒体放射)の吸収とフォトキャリアの収集効率の最適化が両立可能で、太陽光全スペクトルに対し光電変換を実行し、高効率で素子寿命も長い太陽電池を実現する。高機能光導波路と結合させることで温度上昇の少ない拡散光

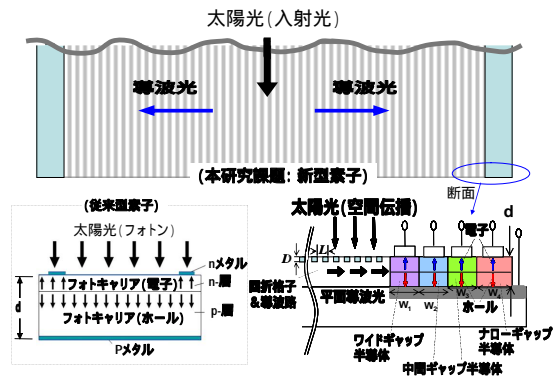


図1 本研究課題の新しい光電変換システムの上図。右下内挿図はその断面図、左下内挿図は従来型太陽電池断面図。

にも強い集光型発電システムを形成し、以って光電変換素子において熱力学的に許される最大効率に迫るための原理とその学術的な基礎を築く。

導波路と結合したフォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池の構造を図1に示す。空間伝播する太陽光を、周期的屈折率変調構造により平面導波光に変換し、この光を導波路の端に設けた複数のバンドギャップを持つマルチストライプ半導体 pn 接合面に沿って導くことで、新しい集光型光電変換システムを構成する。この系は、半導体ストライプ幅 W_k ($k=1-4$) を十分大きくして太陽光の各成分の吸収を完全に行うのと同時に、図1の導波路端で上下方向に移動するフォトキャリアの拡散長と同程度に電極間隔 d を取ることによって、電子/正孔の収集効率を最大限に高めることができる。

4. 研究成果

(1) 図1右下に示すように、太陽光の伝播方向を変換する仕組みであるリディ렉션導波路の端に、エッジ入射型の太陽電池を配置する。こうして、空間伝播する太陽光を、周期的屈折率変調構造により平面導波光に

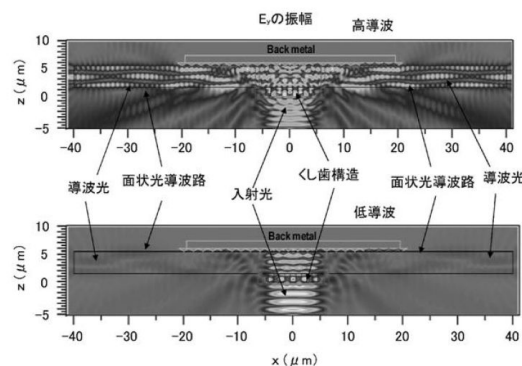


図2 単純な有限単一周期屈折率変調構造を片面に持つ樹脂スラブ構造に対する導波の様子: 高導波時(上)および低導波時(下)

変換し、この光を導波路の端に設けた複数のバンドギャップを持つマルチストライプ

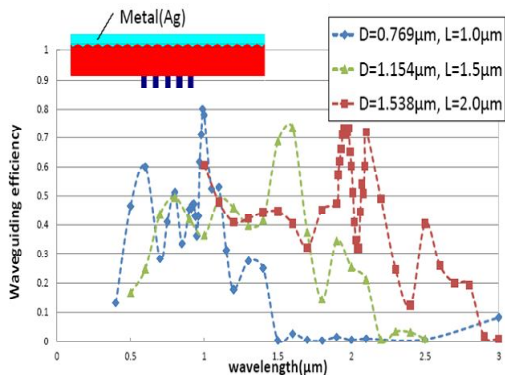


図3 構造の異なる有限単一周期屈折率変調構造に対する光の水平方向導波効率。

半導体 pn 接合面に沿って導くことで、光子とフォトキャリアの進行方向を直交させ、高効率の集光型光電変換システムを構成できる（素子の pn 接合面に対し、光を垂直ではなく平行に入射させているため）。並列接続のタンデム構造と相性がよく、多重性の高いタンデム構造の一括形成へも繋がると期待される。

(2) 導波路の一つの候補となる構造として図2（及び図3内挿図）に示すように、フロント側（光は下部より入射する）に有限単一周期屈折率変調構造を有し、バックサイドにジグザグの反射面を持つメタル（Ag）を設けた場合を検討した。図中、最上部はメタル、中間域は樹脂、最下部は下駄の歯状の高屈折率材料を表す。メタルと樹脂の接合面は鋸状の断面を有している。なお、メタル/樹脂界面の反射率は95%程度である。この導波路に下方から光を入射したときの伝播の様子をシミュレートしたものが図2である（構造パラメータは下記図3参照）。構造と入射光波長のマッチングが悪い時には、図2下図のように殆ど2次元導波が生じないが、マッチングが良いときには、図2上図に示すように、垂直下部から入射した光が、高効率で面内方向に伝播することがわかる。伝搬効率を波長の関数として、図3にプロットする（構造パラメータは図の右上の通りであり、Dは下駄の歯の高さを、Lは周期を示す）。条件を整えば、垂直下部から入射した光が、面内方向に伝播することがわかる。導波効率はまだ十分ではないが、異なる波長帯に対し、垂直入射光を水平方向へと変換することができる。

この光電変換装置の利点を改めてまとめると次の通りである。

- (i) フォトンの進行方向とフォトキャリアの移動方向との直交性により、光吸収とキャリア捕集効率を独立に、同時最適化できる。
- (ii) 多段のマルチストライプ構造により、太陽光スペクトルの全幅光電変換が可能となる（並列タンデム構造であり、直列の場合より高い多段性が容易である）。
- (iii) 導波路結合集光系とすることにより、

非集光系に比べ、約20%の効率上昇が見込まれる。

(iv) 多段のマルチギャップ半導体による光電変換を行うことから、熱として散逸してしまうエネルギーを極小化できるため、（ヒートシンクとの好相性の高扁平性と相俟って）集光太陽光発電系の弱点であった温度上昇を抑制することができる。

(v) リダイレクション導波路を用いた面状光導波路による集光系であるため、曇天時等の拡散光に対する集光特性の劣化が抑制される。

(vi) 物質の結合に害を与える高エネルギー光子をマルチストライプの最初の層で、光電変換することで、それに続く中間ギャップ半導体層、ナローギャップ半導体層を形成する物質の劣化を未然に防ぐことができ、結果として高い信頼性が得られる。

最終的に熱力学的限界に迫る高い光電変換効率を得ることも夢ではないと期待される。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計12件)

A. Ishibashi, H. Kobayashi, T. Taniguchi, K. Kondo, and T. Kasai: "Optical simulation for multi-striped orthogonal photon-photocarrier-propagation solar cell with redirection waveguide", 3D Res., 査読有, 7: 33 (2016)

A. Ishibashi, S. White, N. Kawaguchi, K. Kondo and T. Kasai, "Edge-Illumination Scheme for Multi-striped Orthogonal Photon-Photocarrier- Propagation Solar Cells", Int. J. Eng. Tech. Res., 査読有, 6(1) 115-117 (2016)

A. Ishibashi, M. Yasutake, N. Noguchi, T. Etoh, J. Matsuda, K. Nakaya, T. Ohsawa, Y. Satoh, N. Ohata, M. D. Rahaman, J. Alda and Y. Ohashi, "Clean Unit System Platform (CUSP) for various frontier experiments and applications", Int. J. Eng. Tech. Res., 査読有, 6(3) 31-35 (2016)

石橋 晃, 「フォトンフォトキャリア直交型太陽電池」、エネルギーデバイス, 査読有, 3(4) : 77-83 (2016)

A. Ishibashi, "An approach for uniting bottom-up and top-down systems and its applications", Int. J. Eng. Res. Sci., 査読有, 2(9) 103-114 (2016)

A. Ishibashi and M. Yasutake, "Clean Unit System Platform (CUSP) for Medical/Hygienic Applications", Int. J. Eng. Sci., , 査読有, 2(3) : 92-97 (2016)

石橋 晃, 大橋 美久, 松田 順治, 野口 伸守, 江藤 月生: 「空気清浄技術「CUSP」～新型太陽電池作製プラットフォーム

ームから居住空間応用展開まで」, 建築設備と配管工事, 709(53) : 66-73 (2015)
 H. Kaiju, Y. Yoshida, S. Watanabe, K. Kondo, A. Ishibashi and K. Yoshimi: "Magnetic Properties on FeAl Stripes and Dots Induced by Nanosecond Pulsed Laser Irradiation", J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, 38, pp. 157-161 (2014).
 H. Kaiju, Y. Yoshida, S. Watanabe, K. Kondo, A. Ishibashi and K. Yoshimi: "Magnetic Properties on the Surface of FeAl Stripes Induced by Nanosecond Pulsed Laser Irradiation", J. Appl. Phys., 査読有, 115, pp. 17B901-1 - 17B901-3 (2014)
 T. Matsumoto, W. Kai, T. Fukushima, M. Takahashi, A. Ishibashi, H. Kobayashi, Improvement of minority carrier lifetime by HCN treatments, ECS J. Solid State Sci. Technol., 査読有, 2 (2013) Q127-Q130.
K. Kondo, H. Kaiju and A. Ishibashi: "Focused Magneto-Optic Kerr Effect Spectroscopy in Ni₇₅Fe₂₅ and Fe Ferromagnetic Thin Films on Organic Substrates", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, 52, pp. 013001-1- 013001-5 (2013).
 Y. Yoshida, K. Oosawa, S. Watanabe, H. Kaiju, K. Kondo, A. Ishibashi and K. Yoshimi: "Nanopatterns induced by pulsed laser irradiation on the surface of an Fe-Al alloy and their magnetic properties", *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 102, pp. 183109-1-183109-4 (2013).

[学会発表] (計 22 件)

A. Ishibashi, "Multi-striped Orthogonal Photon-Photocarrier-Propagation Solar Cells (MOP³SC) with Redirection Waveguide", 2016 Collaborative Conference on 3D and Materials Research (CC3DMR), Seoul/Inchon, Korea (2016-06) (招待講演)
A. Ishibashi, "New high-efficiency solar cells and clean unit system platform (CUSP) in "atom-bit-energy/environment" space", HOKUDAI-NCTU International Joint Symposium, Sapporo (2016-10)
 石橋 晃, "非対称導波路結合フォトンフォトキャリア直交型太陽電池", 平成28年度物質・デバイス領域共同研究拠点事業: 平成28年度科学研究費助成事業『次世代デバイス・システムの展望 ~ 高効率太陽電池並びに清浄環境の新展開』研究会、北海道大学 (2016-07)
 石橋 晃, 澤村 信雄, 近藤 憲治, 河西 剛: 「非対称導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池用周期配列放物線鏡の作製」, 日本応用物理学会 2017 年春季大会、パシフィコ横浜 (2017-03)
 石橋 晃, 河西 剛, 澤村 信雄, 野口 伸

守, 江藤 月生, 松田 順治, 大橋 美久 : 「ミニマルファブと新型太陽電池、高機能清浄環境 CUSP のシナジー」, 平成28 年度ファブシステム研究会臨時総会、つくば中央 (2016-09)
 石橋 晃, 河西 剛, 近藤 憲治, 澤村 信雄: 「非対称導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池」, PV Japan 2016, Yokohama (2016-06 ~ 2016-07)
 石橋 晃, 河西 剛, 近藤 憲治, 澤村 信雄 : 「ミニマルファブで作製を想定する導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型 マルチストライプ半導体太陽電池」, 平成 28 年度ファブシステム研究会定期総会、つくば中央 (2016-04)
 石橋 晃, 河西 剛, 近藤 憲治, 澤村 信雄, "非対称導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池", 2016 年応用物理学会 2016 年春季大会、東京工業大学大岡山キャンパス、03/19-03/22 (2016)
A. Ishibashi, "Clean Unit System Platform in "atom-bit-energy/ environment" space for high-efficiency solar cells and Kinetosomnogram (KSG) applications", Int'l Conference and Exhibition on Mesoscopic & Condensed Matter Physics, Boston, USA (2015-06) (招待講演)
A. Ishibashi and M. Yasutake: "Clean Unit System Platform (CUSP) for Processing New Solar Cells and for Medical/ Hygienic Applications", Collaborative Conference on 3D and Materials Research, Busan, Korea (2015-06) (招待講演)
A. Ishibashi, T. Matsuoka, T. Kasai, K. Kondo and N. Sawamura, "Waveguide-coupled Multi-striped Orthogonal Photon-Photocarrier-Propagation Solar Cells with InGaN layers", The 16th Ries-Hokudai Int. Symp., Sapporo (2015-11)
 石橋 晃, 河西 剛, 近藤 憲治, 澤村 信雄, 「導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型 太陽電池システムのプロセスの検討」, 平成 27 年度ファブシステム研究会臨時総会、つくば中央 (2015-10)
 石橋 晃, 「導波路結合フォトンフォトキャリア直交型太陽電池 R & D の現況」, 平成 27 年度物質・デバイス領域共同研究拠点事業『次世代デバイス・システムの展望 ~ 高効率太陽電池の展望、並びに清浄環境の新展開』研究会、北海道大学 (2015-07)
 石橋 晃, 「導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池の展開」, PV Japan 2015, Tokyo (2015-07)
A. Ishibashi, R. Enomoto, J. Matsuda, Y.

Ohashi: "Versatile Clean Unit System Platforms (CUSPs) in "atom-bit-energy/environment"space", The 15th Ries-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan, December 16-17 (2014)

T. Taniguchi*, T. Kasai, K. Kondo and A. Ishibashi: "Redirection Waveguide for High Efficiency Orthogonal Photon-Photocarrier Propagation Solar Cell", The 15th Ries-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan, December 16-17 (2014)

小林 光、石橋 晃: 「新規手法による結晶シリコン太陽電池の高効率化」、ナノとマクロをつなぐ物質・デバイス・システム創製戦略プロジェクト平成25年度成果報告会、大阪大学会館 5月30日(2014) (招待講演)

石橋 晃、谷口 朝哉、近藤 憲治、河西 剛: 「導波路結合フォトンフォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池」、PV Japan 2014, Tokyo, 7月30-8月1日(2014)

石橋 晃: 「量子十字素子、高効率太陽電池プロセス用高潔淨環境の展開」、ナノとマクロをつなぐ物質・デバイス・システム創製戦略プロジェクト平成25年度成果報告会、大阪大学会館(2014-05)

谷口 朝哉、河西 剛、近藤 憲治、石橋 晃: 「フォトンフォトキャリア直交型高効率太陽電池用導波路の検討」、第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学 9月17-9月20日(2014)

- ②1 A. Ishibashi, T. Kasai, K. Kondo, H. Kaiju and T. Taniguchi, T. Kasai, K. Kondo and H. Kaiju: "Waveguide-coupled Multi-stripped Orthogonal Photon-Photocarrier-Propagation Solar Cells", The 14th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan, December 11-12 (2013)

- ②2 石橋 晃、河西 剛、近藤 憲治、海住 英生: 「導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池のSiベース無機半導体での展開」、PV Japan 2013, Tokyo, July 24-27 (2013)

〔産業財産権〕

出願状況(計4件)

名称: 光導波装置、光電変換装置、建築物、電子機器及び発光装置

発明者: 石橋 晃、権利者: 北海道大学

種類: 特許、番号: PCT/JP2016/079575

出願年月日: 2016年10月5日

国内外の別: 国外

名称: 光導波装置、光電変換装置、建築物、電子機器及び発光装置

発明者: 石橋 晃、権利者: 北海道大学

種類: 特許、番号: 特願 2015-200705

出願年月日: 2015年04月13日

国内外の別: 国内

名称: 光電変換装置、建築物及び電子機器

発明者: 石橋 晃、小林 光、権利者: 北海道大学

種類: 特許、番号: 特願 2014-80088

出願年月日: 2014年04月09日

国内外の別: 国内

名称: 光電変換装置、建築物及び電子機器
発明者: 石橋 晃、松岡 隆、権利者: 北海道大学

種類: 特許、番号: 特願 2010-165309

出願年月日: 2010年7月22日

国内外の別: 国内

〔その他〕

[新聞・雑誌・放送等]

- 1) 石橋 晃: 日経産業新聞「北大、光電変換効率60%へ～多接合型の太陽電池～」
2015年08月31日
- 2) 石橋 晃、松岡 隆志: 日経サイエンス
2015年11月01日「究極効率の太陽電池～普及が進むシリコン太陽電池は最終目標への経過点にすぎない～」

[受賞]

- 1) 石橋 晃: 平成28年度北海道地方発明表彰 北海道知事賞「高潔淨部屋システム」
ならびに建築物(特許第5329720号)
2016年10月

ホームページ等

<http://qed4.es.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋 晃 (ISHIBASHI AKIRA)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号: 30360944

(2) 研究分担者

近藤 憲治 (KONDO KENJI)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号: 50360946

(3) 連携研究者

なし