

令和元年5月20日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04221

研究課題名(和文)非対称導波路結合光子・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) Asymmetric-waveguide-coupled multi-stripped orthogonal photo-photocurrent-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) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：循環型の緑の地球には高効率の太陽電池が必要である。本研究課題では、光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。光導波効率を、左右非対称導波路と結合させることで、向上させると共に、温度上昇が少なく、拡散光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確認とその作製の基礎を築いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非対称導波路構造を更に進化させ、クラッド層の各部分において不連続構造を持たせることで、今までにない準解放コア層具有の新型導波路の動作原理確認に成功した。波方向に沿って、その最後端においてコア層に対してタンジェンシャルに接するような構造を持たせ、これにより、コア層内の光は、導波方向に沿って高効率で導波され、クラッド層の非連続性とコア層の準解放性によって、導波路コアに対し導波方向の複数ポイントにおいて外界から光を導入できることをシミュレーションにより確認した。離散的併進対称性を有する全く新しい導波路の概念を案出し、この優れた導波特性を有する新しい集光型の太陽電池の実現可能性を示すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have investigated a new type of waveguides (WGs) for concentration solar-cell systems. The redirection WG converts 3D-photons into 2D-photons that propagate in a planar WG which serves as the mainstream of the redirection WG. The cladding layer on one side of the planar WG, not being spatially continuous, tangentially touches the core of the planar WG which, having open geometry, is connected, through tributary WGs, to the bottom plane where the 3D-photons come in vertically. We have confirmed that light-waves from the tributary WGs are well merged with those from the mainstream WG at the junction of the cores of the mainstream and the tributary WGs. The redirection WG is promising for the concentration photovoltaic systems with solar-cell units placed at its periphery. Our new concentrator solar cell would be able to convert virtually the whole spectrum of black body radiation into the electricity with a conversion efficiency virtually as high as the thermodynamic limit.

研究分野：デバイス関連化学

キーワード：半導体デバイス 太陽電池 導波路

1. 研究開始当初の背景

(1) 循環型の緑の地球には高効率の太陽電池が必要である。本来、熱力学限界に迫ることの可能なタンデム構造太陽電池や、有機太陽電池の効率はまだ向上の余地がある。第1, 2世代太陽電池の効率は、現在までにバルク Si 系で 27.6%、薄膜 GaAs 系で 29.1%、a-Si/CIGS で 20.3%等が報告されている。マルチ接合型素子では、効率 43.5%が報告されているが、熱力学的に許される最大効率には程遠い。有機半導体系も、効率を伸ばしてきてはいるものの、同デバイスは移動度の低さによる困難を抱えている。他方、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が、熱力学限界に迫る高効率の光電変換は未だ得られておらず、既存の太陽電池デバイスにはなお向上の余地がある。

(2) 従来型太陽電池では、フォトキャリアの移動方向と光の進行方向が平行の為、キャリア収集と光吸収に“妥協”がなされるという欠点がある。又、集光型太陽光発電では、集光による素子温度上昇の問題と、曇天時等の拡散光にうまく対処できにくいという課題があった。材料と新構造の複合によって、曇天時等の拡散光にも強く、熱力学的限界に迫る高い変換効率を持ち、かつ高信頼性を有するという3拍子揃った究極の集光型太陽電池システムが求められている。

2. 研究の目的

(1) 我々の目指す新型太陽電池においては、太陽光の各エネルギー帯においてフォトン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となるように、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する配置をとることが重要である。このために光の進行方向を制御するリディレクション導波路を実現する。色々な方向から斜め入射してくる太陽光を2次元の導波路に対し直交する方向へ、進行方向転換させることを実現し、太陽追尾機能を必ずしも必要とせず、最終的には拡散光にも強い集光系光電変換素子の可能性を探る。

(2) 上記の2次元導波路に垂直に入射してくるフォトンに当該2次元導波路に沿って導波されるように効率的に進行方向転換させるために有効な構造を求める。空間伝搬光を効率的に2次元導波光化することが重要である。波長依存性があまり大きくないシステムを構築することを目指す。また上記の構造を歩留まり良く作製するために必要となってくる高純度プラットフォームも合わせて開発し、同時に単なる太陽電池作製プロセス環境に留まらない広範な応用展開を追求する。

3. 研究の方法

(1) 光電変換デバイスにおいて、光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し、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て、太陽光全スペクトルに対し光電変換を実行することにより、高効率で素子寿命も長い太陽電池を実現することを可能とする新しい導波路を開発する。独自の高純環境(CUSP)の下、光を片側のみに選択的に送り込む放物線鏡と屈折率異方性層を利用した、太陽光を高効率に2次元導波光化する左右非対称導波路を開発し、マルチストライプ構造を結合する(図1)。3次元伝播太陽光を2次元伝播光とする数百~数千倍の集光系を実現する。まず始めに図1において示すように斜め入射してくる太陽光を2次元の導波路に対し垂直入射するように進行方向転換させる構造を最適化する。

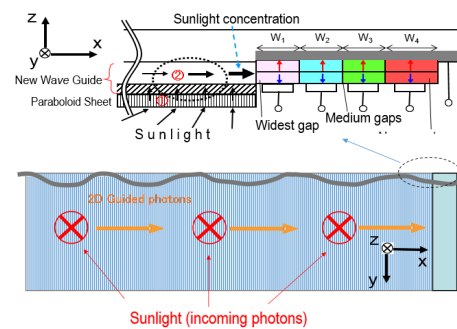


図1. 本研究課題の新しい光電変換システムの構造図。上はその断面図で、左側は、光ハーベスト部の断面図(光進行方向変換層)であり、右端は、マルチ(N=4)ストライプ光電変換ユニットの断面図である。下段は光電変換システムの上面図。

まず始めに図1において示すように斜め入射してくる太陽光を2次元の導波路に対し垂直入射するように進行方向転換させる構造を最適化する。

(2) 空間伝搬光を効率的に2次元導波光化するに際し、左右対称な構造(例えば回折格子構造など)では、電磁波の伝搬には時間反転対称性が存在することに起因して空間伝搬光の効率的な2次元導波光化が難しい(即ち2次元導波光状態に行き止りにできない)が、これを左右非対称な導波路を構成することにより克服する。その第一の方策として周期配列放物線鏡を備えたテーパ導波路の結合系により、光導波方向についてその順方向と逆方向に関して、非対称構造を持たせる。特に3Dプリンティングを活用して同心円状に配置した周期配列放物線ミラーを作製するとともに、これと結合して最適な円錐状の形状を持つテーパ状導波路も作製して、新しい非対称導波路構造を作製する。

これをさらに進化させた第2の方策として、新しい概念の導波路の構築を推し進める。即ち従来の導波路は、光導波方向についてその順方向と逆方向に関して、対称構造を持っており、また基本的に光を導波するコア層をクラッド層で連続的に挟み込んだ構造により光の漏れを防ぐとともに、閉じ込めを行って導波させていた。このため、光を外から導波路コア層に導入することが極めて難しく、従来型導波路を集光型太陽電池・光電変換素子と結合する際には、その光集光において非常に困難な点が多くあった。非対称導波路構造のアイデアを梃子に、これらを解決するべく、コア層に準解放構造を持たせつつクラッド層の各部分において不連続構造を有せしめた新しい導波路構造を具現化する。

4. 研究成果

(1) 放物線断面を持つ構造であるパラロイドを敷き詰めたシート状構造体を光進行方向変換層として用いて、(レーザ光についても同様の進行方向変換作用を持つのみならず)図2に示すように太陽光を摸したインコヒーレントな白色LED光に対しても、特に低角および高角入射角に対し、光進行方向を面に垂直方向に変換できることを確認した。入射角 $30^\circ \sim 50^\circ$ に対して、直交性を上げていくことが今後の課題であるが、全体としては、斜め入射光を2次元導波路へ良い近似でほぼ垂直な方向へ変換することに成功した。

(2) 上記の垂直光を導波路に沿った水平導波光とするべく、図3に概念図を示す周期配列放物線ミラーを作製し、テーパ導波路に結合した非対称構造系の構成を目指した。まずシミュレーションにより、放物線構造とテーパ角度を最適化することで、図4右下に示すように、良好な導波特性が実現できることを突き止めた。本系は、反射光学系を成すので、回折光学系と異なり、導波効率の波長依存性を小さく抑えることができる。この導波路端には、在来の面入射型の(タンデム型を含む)太陽電池を結合することもできる。多角的に最適なシステムへと進化させることで高い光電変換効率の実現が期待される。

特に3Dプリンティングを活用して同心円状に配置した周期配列放物線ミラーを作製するとともに、これと結合して最適な円錐状の形状から切り出した構造をもつテーパ状導波路を作製し、実際にこの右端にシリコン系太陽電池を面入射配置にて設置することで、集光系としてこのシステムの良好な機能が確認できた。ソーラーシミュレータを使用した実験で実際に面入力配置にて太陽電池を結合して約3.5倍の集光システムとして動作することを実証した。

更に、非対称導波路構造を進化させるべく、図5に示すような従来にない全く新しい導波路構造のアイデアを創出した。従来の導波路は、光導波方向についてその順方向と逆方向に関し

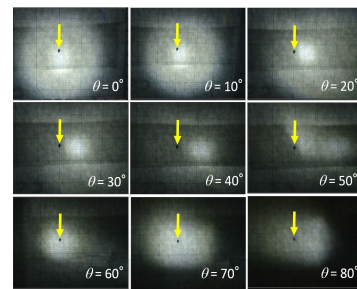


図2 進行方向変換層の性能評価実験。斜め入射光(矢印)が後方スクリーンの真ん中に導かれており、ほぼ垂直方向への進行方向変換に成功した。

周期配列Parabolic mirror (prepared using 3D printer)

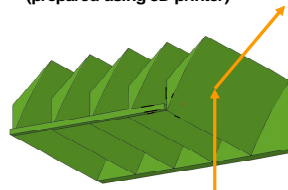


図3 周期配列放物線鏡. これと2次元導波路を結合する。

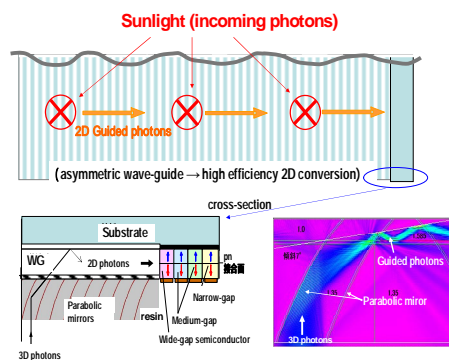


図4 非対称導波路結合フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ半導体太陽電池(上面図)。左下: 同断面図、右下: ティーパー非対称導波路の場合の導波シミュレーション図。

て、対称構造を持っており、基本的に光を導波するコア層をクラッド層で連続的に挟み込んだ構造により光の漏れを防ぐとともに、閉じ込めを行って導波させるため、光を外から導波路コア層に導入することが極めて難しく、光集光において非常に困難な点が多くあった。今回の新しい導波路においては、図5上図で円弧状の構造で示される各非連続クラッド層の幾何学的構造が、図5下図に示すように、向かって左から右への導波方向に沿って、その最後端においてコア層に対してタンジェンシャルに接するような構造を持つ。これにより、コア層内の光は、導波方向に沿って高効率で導波されるとともに、クラッド層の非連続性とコア層の準解放性によって、導波路コアに対し導波方向の複数ポイントにおける外界から光の導入とその後の良好な導波特性の両立が可能となる。実際にシミュレーションによって、図6に示すように、2次元導波路本流から本流へ、並びに、光ハーベスト部を構成する支流から本流への効率的な光導波が確認された。このように、非対称導波路構造のレジームにおいて、クラッド層の各部分において不連続構造を持たせることで、コア層は解放構造を持ちつつも光そのものは閉じ込めるといふ今までにない準解放コア層具有の新型導波路の動作原理を確認した。優れた導波特性を有する新しい集光型の太陽電池のアイデアを創出し、シミュレーションにより、その実現可能性を示すことができた。また上記リディレクション導波路と結合して好適なマルチギャップ GaInN 系素子を有する高効率光電変換システムの特許化にも成功した(特許第 6261088 号)。更に、高潔浄環境 C U S P の医療や住環境など新たな応用の道が拓けた(US Pat. 10,172,547)。

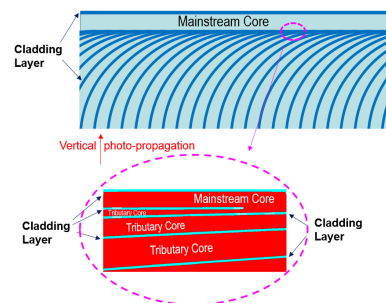


図5 離散的併進対称性をもつ新しい非対称導波路(上)メインストリームを成す2次元導波路コア層付近の拡大図(下)

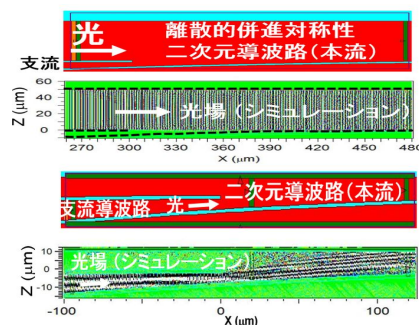


図6 今回の新しい導波路のクラッド層断続部(導波路本流と支流の合流部)に於ける導波路本流から本流への構造図とその中の光伝搬(上)、支流・本流合流部および支流から本流への伝搬のシミュレーション(下)。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

A. Ishibashi, T. Kasai and N. Sawamura: "Redirection Waveguide having Discrete Translational Symmetry for Photovoltaic Systems with Solar-Cell Units Placed at the Periphery", *Energies*, 査読有, 11 3498-1-3498-9 (2018) doi:10.3390/en1123498

石橋 晃、野口 伸守、江藤 月生、松田 順治、大橋 美久: 「孤立・閉鎖系高潔浄環境クリーンユニットシステムプラットフォーム~Clean Unit System Platform (CUSP) based upon 100%-feedback closed system」, Proc. 35th Annual Tech. Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, 査読有, 38-41 (2018)

A. Ishibashi, T. Matsuoka, R. Enomoto and M. Yasutake: "New solar cell and clean unit system platform (CUSP) for earth and environmental science", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 査読有, 93: 012081 1-7 (2017) doi:10.1088/1755-1315/93/1/012081

A. Ishibashi, H. Kobayashi, N. Sawamura, K. Kondo and T. Kasai: "Symmetric and asymmetric wave-guides for multi-striped orthogonal photon-photocarrier-propagation solar cells", *IEEE-ICASI 2017*, Meen, Prior & Lam (Eds), 査読有, 1477-1479 (2017) ISBN 978-1-5090-4897-7

A. Ishibashi, "Systems development in Atom-Bit-Energy/Environment (ABE2) space for a new solar-cell, medical and safety applications on clean unit system platform (CUSP)", *Proc. Collaborative Conf. on Materials Research*, 査読有: 191-195 (2017)

A. Ishibashi, H. Kobayashi, T. Taniguchi, K. Kondo and T. Kasai: "Optical simulation for multi-striped orthogonal photon-photocarrier-propagation solar cell (MOP3SC) with redirection waveguide", *3D Research*, 査読有, 7 33-1 - 33-5 (2016) doi:10.1007/s13319-016-0109-4

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、377-83 (2016)

[他 2 件]

[学会発表](計 56 件)

A. Ishibashi, Y. Ohkura and N. Sawamura: "Towards a Planer Photon-harvesting Waveguide having Discrete Translational Symmetry with Open Core Geometry", The 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference, PACIFICO Yokohama, (2019-04)

石橋 晃、黄倉 侑人、澤村 信雄: 「フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ 半導体太陽電池に向けた離散的併進対称性を有する新しい非対称導波路構造」、日本応用物理学会 2019 年春季大会、東京工業大学(大岡山)(2019-03)

A. Ishibashi, N. Sawamura, T. Matsuoka, H. Kobayashi and T. Kasai: "Multi-stripped Orthogonal Photon-Photocarrier Propagation Solar Cell (MOP3SC) in Waveguide-Coupled Scheme", 第 28 回日本 MRS 年次大会～循環型社会のためのマテリアルズイノベーション(B4-119-021), 招待講演, 北九州国際会議場 (2018-12)

A. Ishibashi and N. Sawamura: "Asymmetric redirection waveguide with discrete translational symmetry for multi-stripped orthogonal photon-photocarrier-propagation solar cells (MOP3SCs)", 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (IEEE ICAM 2018), Yunlin, Taiwan (Province of China) (2018-11)

石橋 晃、澤村 信雄、河西 剛: 「フォトンフォトキャリア直交型太陽電池用のための新しい非対称導波路」、平成 30 年度ファブシステム研究会臨時総会、産業技術総合研究所(つくば中央)(2018-10)

A. Ishibashi: "Multi-stripped orthogonal photon-photocarrier-propagation solar cells (MOP3SCs) with new asymmetric redirection waveguides", Advanced Energy Materials 2018, 招待講演, Finstown Castle Hotel, Dublin, Ireland (2018-08)

石橋 晃、河西 剛、近藤 憲治、澤村 信雄: 「周期配列放物線鏡付テーパ導波路具有光子・フォトキャリア直交型半導体太陽電池」、PV Japan 2018、Pacifico 横浜(横浜市)(2018-06)

石橋 晃、野口 伸守、江藤 月生、松田 順治、大橋 美久: 「孤立・閉鎖系高清浄環境クリーンユニットシステムプラットフォーム」、第 35 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会、早稲田大学国際会議場 (2018-04)

石橋 晃、河西 剛、近藤 憲治、澤村 信雄: 「フォトンフォトキャリア直交型太陽電池用非対称導波路のミニマルファブによる作製可能性」、平成 30 年度ファブシステム研究会定期総会、産業技術総合研究所(つくば中央)(2018-04)

石橋 晃、河西 剛、近藤 憲治、澤村 信雄: 「フォトン・フォトキャリア直交型マルチストライプ 半導体太陽電池に向けた 周期配列放物線鏡付テーパ非対称導波路構造」、日本応用物理学会 2018 年春季大会、パシフィコ横浜 (2018-03)

A. Ishibashi, T. Matsuoka, R. Enomoto and M. Yasutake: "New solar-cell system and clean unit system platform (CUSP) for Electronics, Communications and Networks", CECNet2017, National Dong Hwa University, Hualien, Taiwan (2017-11)

石橋 晃、松田 順治、野口 伸守、江藤 月生、大橋 美久、原 史朗: 「Clean Unit System Platform (CUSP)とミニマルファブシステムのシナジーの可能性」、日本応用物理学会 2017 年秋季大会、福岡国際会議場 (2017-09)

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、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, Japan (2016-06 ~ 2016-07)

[他 42 件]

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 12 件)

名称: 光導波装置、光電変換装置、建築物、電子機器、移動体および電磁波導波装置

発明者：石橋 晃

権利者：国立大学法人 北海道大学

種類：特許

番号：PCT/JP2018/035015

出願年：2018年09月21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：PCT/JP2016/079575

出願年：2016年10月05日

国内外の別：国外

[他10件]

取得状況(計10件)

名称：System and method using information of involuntary body movement during sleep, and sleeping state detection system and method

発明者：A. Ishibashi, M. Yasutake and F. Ishibashi

権利者：Akira Ishibashi, Masahiro Yasutake, C'sTEC Corporation

種類：特許

番号：US 10,172,547

取得年：2019年01月08日

国内外の別：国外(米)

名称：建築物の生活及び/または活動空間内ガス分子濃度制御方法

発明者：石橋 晃

権利者：石橋 晃、清水一智、シーズテック(株)、飛栄建設(株)、(株)石橋建築事務所

種類：特許

番号：特許第6399500号

取得年：2018年08月01日

国内外の別：国内

名称：光電変換装置、建築物および電子機器

発明者：石橋 晃、松岡 隆志

権利者：石橋 晃、シーズテック株式会社

種類：特許

番号：特許第6261088号

取得年：2017年12月22日

国内外の別：国内

[他7件]

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：松岡 隆志

ローマ字氏名：Matsuoka Takashi

所属研究機関名：東北大学

部局名：金属材料研究所

職名：教授

研究者番号(8桁)：40393730

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。