

令和元年6月12日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02117

研究課題名(和文) ぶく射スペクトル制御型熱ダイオードを用いた高効率ソーラー熱光起電力発電

研究課題名(英文) High-efficiency solar-thermophotovoltaic power generation systems using thermal diode based on controlling of thermal radiation spectrum

研究代表者

湯上 浩雄 (Hiroo, Yugami)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60192803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,500,000円

研究成果の概要(和文)：ソーラー熱光起電力発電は単接合セルで多接合セル並みの高効率発電が期待でき、蓄熱システムとの親和性が高いことから次世代太陽エネルギー変換技術として期待されている技術である。本研究の成果である熱輻射スペクトル制御に基づく熱ダイオード技術は入力した太陽光を非常に高い効率で光起電力セルまで導くための重要な技術である。本研究開発によって実験的にGaSbセルを用いたシステムとしては世界最高効率である変換効率5.6%を達成し、変換効率20%以上が期待できるシステムを構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽エネルギー利用は今後さらに重要度を増すことが予想されており発電効率の向上および蓄電によるピークシフトといった課題の解決が必要である。ソーラーTPV発電は潜在的に高発電効率が達成可能であり、蓄熱システムとの親和性が高いため次世代太陽エネルギー利用技術として期待できる。本研究成果はソーラーTPV発電システム実現の上で重要な課題であった太陽光から光電変換セルまでのエネルギー輸送効率向上に大きく寄与するものであり、また、他の熱利用システムにおいても応用が期待される。本研究開発により発電効率20%達成への道筋を見出すことができ、ソーラーTPV発電実現へ前進する重要な成果が得られたと考えている。

研究成果の概要(英文)：Solar-thermophotovoltaic (TPV) are expected as an advanced solar energy conversion systems because they potentially have conversion efficiency as high as that with multi-junction cells even with single junction cells and also have high affinity to thermal storage systems. We developed thermal diode technology based on controlling of thermal radiation spectrum which is important to lead the incident solar power toward TPV cell with high-efficiency. Based on this technology, the solar-TPV system could achieve the world highest record conversion efficiency of 5.6% using GaSb TPV cells. We also revealed the conversion efficiency could be more than 20% with our system.

研究分野：新エネルギー変換工学

キーワード：熱光起電力発電 熱輻射 太陽エネルギー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

一般的な伝熱現象において伝熱の方向は物体間の温度差によって決定される。一方、近年、非対称性の微細構造等を用いたフォノン制御による伝熱の一方方向制御、すなわち熱ダイオード特性に関する研究が盛んに行われている¹⁾。このような熱ダイオードを実現することによってシステム設計自由度の向上やエネルギー輸送効率の飛躍的向上といった大きな波及効果が期待される。本研究では熱放射スペクトル制御技術に基づいた新規熱ダイオードデバイスの実現を目指し研究を行った（図1参照）。

一般にある物体に熱ふく射が入射し、周囲より高温になった場合には物体から全方位に向けて再放射が生じる。しかし我々がこれまでに行ってきた高温環境下における熱ふく射スペクトル特性制御、すなわち高温フォトニクス技術を適用することによって入射面に対し波長選択吸収および入射角度選択吸収特性を持たせ、且つ幾何学構造の最適設計を行うことで任意放射面以外からの放射を極限まで抑制することが可能となる。この状態において吸収-放射面間が良熱伝導体によって構成されていれば入射エネルギーの大部分が放射面へ輸送される。すなわち一方方向性の熱エネルギー伝達である熱ダイオード特性を示す。本研究では当該技術の実現とこれの応用による高効率ソーラー熱光起電力（Thermo-Photo-Voltaic: TPV）発電システムの実現を目指す。

ソーラーTPV発電とは集光太陽光をTPV発電の熱源として用いた環境調和型の技術であり、単接合セルを用いるため低い発電コストで40%以上の高い変換効率が期待されるシステムである。このシステムでは太陽光を光起電力（Photovoltaic; PV）セル感度波長域に整合した熱放射光へ変換することで光電変換効率を向上させることができ、単接合セルで多接合セルと同様の高発電効率を得ることができる。また蓄熱が可能、季節毎の太陽スペクトル変化の影響を受けないという特徴がある。当研究室では早い段階でソーラーTPVの研究をスタートさせており、現在、国内では唯一申請者らの研究室がソーラーTPV発電システムの研究を行っている^{2,3)}。一方海外では複数の研究機関で研究が行われており、^{4,5)}数年前からMITのグループがS³TECというSolar-TPVに関連するプロジェクトを開始するなど近年、関連論文数も急激に増加しており注目されている研究分野である。しかし最大理論効率として報告されている45%に比して現状の効率は10%未満と未だ低い⁶⁾。効率を飛躍的に向上させるためにはアブソーバー/エミッター/PVセル間における熱輸送効率向上が重要な課題であり、「熱ふく射スペクトル制御による熱ダイオード技術」は高効率ソーラーTPV実現に向けた重要な要素研究である。

1) M. Schmotz et al., *New Journal of Physics*, **13** (2011), 113027., 2) H. Yugami et al. *Proc. of IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (2000), 1214-1217., 3) M. Shimizu et al., *J. Photonics. Energy*, **5** (2015), 053099. 4) V. M. Andreev et al., *J. Sol. Energy Engineering-Transactions of the ASME*, **129** (2007), 298-303., 5) E. Rphaeli et al., *Opt. Express*, **17** (2009), 15145-15159., 6) Andrej Lenert et al., *Nat. Nanotech.*, **9** (2014), 126.

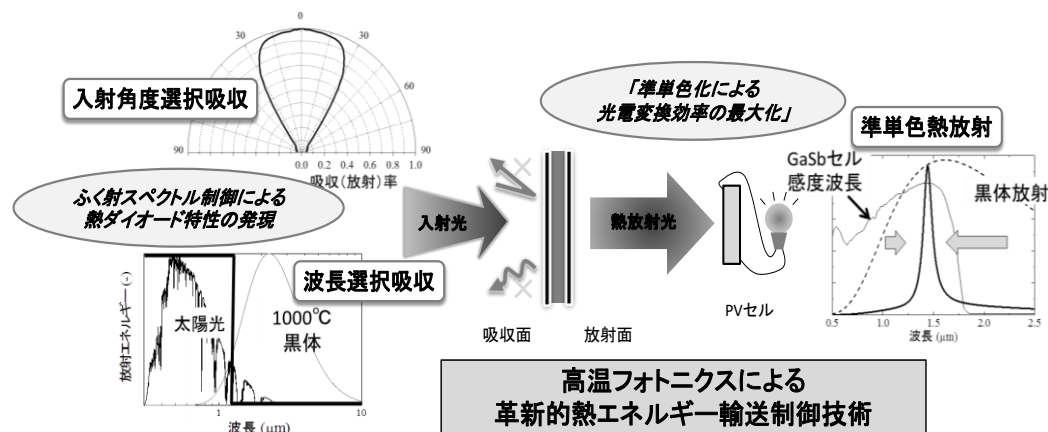


図1 本研究の概要

2. 研究の目的

1000°C以上の高温下で作動するソーラーTPVシステムにおいて効率を決定する最重要因子は「アブソーバー-エミッター間の高効率熱輸送」と「エミッター熱放射光とセル感度波長特性との整合によるエミッター-PVセル間の高効率熱輸送」である。本申請ではこれまで得られてきた高温フォトニクスの研究に関する知見を元にソーラーTPVの飛躍的効率向上に貢献しうる、革新的熱ふく射スペクトル制御技術の実現を目的とする。

(1) 熱ふく射スペクトル制御による熱ダイオード技術を開発し、アブソーバー-エミッター間における熱ふく射エネルギーの一方方向輸送を実現することで太陽エネルギー利用効率を最大化する。そのために波長および入射角度における選択吸収特性を有するアブソーバーを実現する。さらに耐熱性及び高温時光学特性、また光学特性の角度依存性について実験的評価を行う。加えてアブソーバーに対するエミッター面積比増大によるエネルギー利用効率最大化を目指しキューブ型アブソーバー/エミッター構造をベースにした幾何学構造最適設計を行う。

(2) PVセルのバンドギャップ近傍においてのみ高放射特性を有し、感度波長特性との高い整合性を示す熱放射準単色化技術により光電変換効率の飛躍的向上を目指す。また、高密度集光下での耐熱性及び高温時の光学特性についても実験的検討を行う。

(3) 上記技術に基づくソーラーTPV発電システムを設計・作製しシステム効率を評価する。

3. 研究の方法

熱放射スペクトル制御による熱ダイオード特性を実現するための基盤技術を確立し、それに基づいた高性能かつ高耐熱性を有するアブソーバー、エミッタの設計・作製を行う。最終的にそれら技術を融合させた高効率ソーラーTPV発電試験用システムの実現を目指す。

(1) 熱放射スペクトル制御による熱ダイオード技術

ソーラーTPVシステム高効率化のためには入射エネルギー量と放射面からの熱放射量との比、すなわち熱の整流性の指標となる放射抽出効率 η_{ext} を大きくする必要がある。放射抽出効率向上の方法としては波長選択吸収特性の利用が考えられる。また、入射角度選択吸収特性の利用が考えられる。さらに、吸収面と放射面の面積比 (A_e/A_a) の増大による実質的な放射抽出効率の向上が考えられる上記の技術によってほぼ100%の放射抽出効率の実現(現状、最大約50~55%)が解析結果から示唆されておりシステムの飛躍的な効率向上が期待される。

(2) マイクロキャビティ構造を用いた熱放射スペクトル準単色化

ソーラーTPVシステム効率の向上のためには光電変換効率を向上する必要がある。本研究では微小共振器であるマイクロキャビティ構造においてQ値を向上させることで熱放射の準単色化を実現する。我々はこれまでにマイクロキャビティ構造において内部へ定在波が局在することで放射(吸収)が増大することを明らかにした⁷⁾。しかし、従来構造では定在波の閉じ込め効果は低く高いQ値を達成するのは難しい。そこで本研究ではレーザー光学におけるOutput-Coupler鏡の概念を応用し、局在効果の増強によるキャビティQ値の向上を考える。

(3) Solar-TPV発電システムを用いた発電試験

ここまで得られた知見を集約しSolar-TPV発電システムを作製し、発電試験を実施する。試験においては外部出力測定のみではなくアブソーバー・エミッタやセル温度等をモニタリングし、システム内におけるエネルギーフローの可視化を行うことによって発電時における放射抽出効率の評価を可能とする。本研究とこれまでの研究とを総合的に評価し、ソーラーTPV発電システムにおけるアブソーバー、エミッタ等の知見を総括すると共に、それら技術の各種応用システムへの適応性について検討を行う。

7) S. Maruyama et al., *Applied Physics Letters*, **79** (2001), 1393-1395.,

4. 研究成果

(1) 熱放射スペクトル制御による熱ダイオード技術

① 放射抽出効率と光電変換効率の定義

熱ダイオード性能の評価およびソーラーTPVシステムの評価を行うために評価指数としてそれぞれ「放射抽出効率 η_{ext} 」と「光電変換効率 η_{PV} 」を新たに定義した。放射抽出効率は入射したエネルギーから放射面における熱放射エネルギーへの変換効率を示し、これが熱ダイオード特性の評価指数となる。また光電変換効率は光電変換セルへ入射したエネルギー量から電力への変換効率を示している。ソーラーTPVシステムにおける主なエネルギーフローは図2のようになっており、放射抽出効率と光電変換効率によって総合的なエネルギー変換効率が決定する。

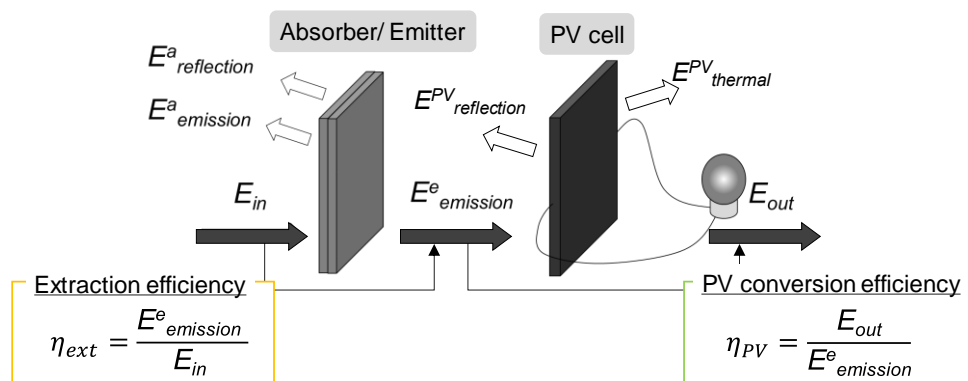


図2 ソーラーTPVシステムにおけるエネルギーフロー

② CPA 構造を用いた波長選択吸収（放射）技術

研究方法の部分で示したように波長選択吸収（放射）特性は放射抽出効率の向上および光電変換効率の向上どちらにも大きく貢献することがわかる。波長選択吸収（放射）特性を付与する方法は多く存在するが、ソーラーTPV システム作動温度である 1000℃以上で適用可能な技術は多くない。これまでに高融点金属における周期的表面微細構造を用いた波長選択吸収（放射）特性が実現され、また 1000℃以上における耐熱性が確認されている⁸⁾。一方で高融点金属上への微細構造作製は現状技術でも難しく現実的な作製を考慮した場合には適用が難しい。

本研究では Coherent Perfect Absorption (CPA) 理論⁹⁾を適用した積層型 CPA 波長選択吸収（放射）デバイスについて研究を行い、1000℃以上の耐熱性を実験的に示すことに成功した。CPA 理論とは物体の両側から同位相の光が同時に入射した場合に完全吸収が生じるというものであり、これを応用し金属ナノ薄膜を用いた積層構造によって高吸収を実現する。本構造では高い耐熱性を実現するため金属材料にモリブデン (Mo) を用い透明誘電体層には酸化ハフニウム (HfO₂) を用いる。図 3 には数値シミュレーション解析によって計算されたアブソーバーとエミッタの最適波長選択特性を示す。本構造を実際に作製し、シミュレーション結果と同様の高い波長選択吸収特性が実現できることを示した。この波長選択材料によって 1200℃放射抽出効率は 54%、また光電変換効率は 22%が実現可能となった。また耐熱性を評価した結果、真空下では 1150℃の耐熱性を有することが明らかとなった。

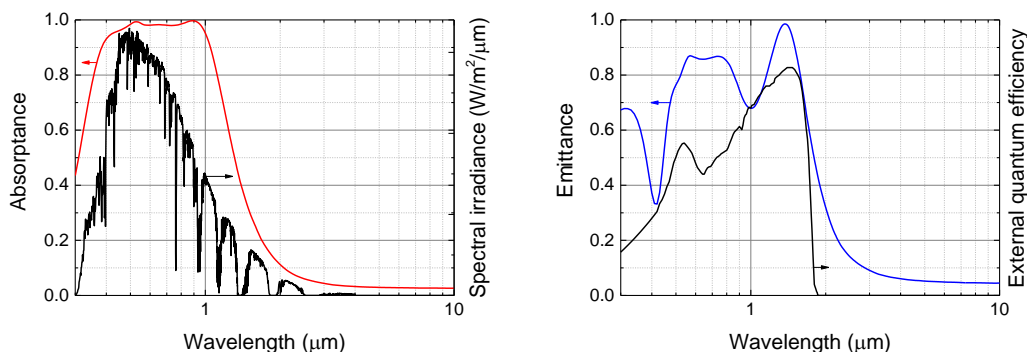


図 3 積層型 CPA 構造を用いたアブソーバー（左）とエミッタ（右）の光学特性

③ 幾何学的構造設計による放射抽出効率向上

アブソーバー温度の上昇に起因する再放射損失を低減することは放射抽出効率の向上に寄与する。したがってエミッタ/アブソーバー面積比を大きくすることで放射抽出効率の向上は可能である。理想的な波長選択吸収（放射）特性を仮定した場合面積比が 10~15 となることで放射抽出効率は 85~90%となることが明らかとなった。これを実現する構造として本研究ではキューブ型アブソーバー/エミッタ構造を考案した。この構造によって温度ムラが小さく、高い面積比を実現可能なデバイスを実現した。アブソーバー以外の部分は全てエミッタとなるため積層型 CPA 構造を用いた波長選択吸収（放射）特性を用いた場合の放射抽出効率は 75%と高い値の実現が期待できる。

④ Leaky モードを用いた角度選択吸収

アブソーバーに角度選択吸収特性を付与することで再放射損失の低減が期待できる。本研究では薄膜における Leaky モードを用いた角度選択吸収技術を開発した。金などの高反射基板上へ透明誘電体薄膜を形成することで透明誘電体層が Wave-guide として機能し、薄膜面内方向のベクトルに近い波数ベクトルを有する Leaky mode が発生する。この Leaky モードと薄膜における他の吸収モードが結合することで面内方向ベクトルに近い高角度方向にのみ高い吸収率を有する角度選択吸収特性が実現可能である。本研究では薄膜材料として高分子材料を用い、高分子材料の分子振動モードと Leaky モードを結合させることで角度選択吸収特性を実現し（図 4）、熱輻射の角度選択吸収における基盤技術を構築することができた。

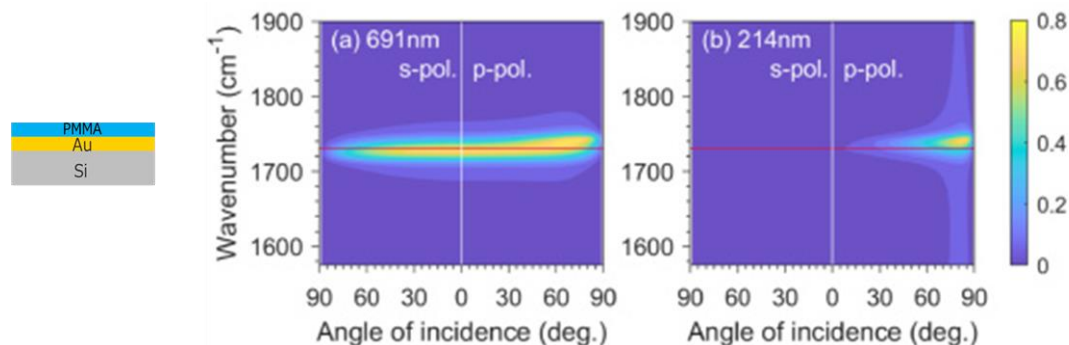


図 4 Leaky モードと高分子薄膜の分子振動モードとの結合による角度選択吸収特性。分子振動モードが支配的な厚膜試料（左）と角度選択吸収特性を有する薄膜試料（右）¹⁰⁾

(2) マイクロキャビティ構造を用いた熱放射スペクトル準単色化

本研究では熱輻射共振器であるマイクロキャビティ構造において共振器のQ値を向上させることにより熱放射スペクトルの準単色化を目指した。共振器におけるQ値は共振器内部において発生する内部緩和損失率と共振器外部への外部漏れ損失率によって決まる。これまでの研究で報告されてきたマイクロキャビティ構造ではこれらの損失率が高いためQ値は低くなりピーク幅は広がっていた。本研究ではマイクロキャビティ構造の開口部に金属ナノ薄膜を形成することで外部漏れ損失率を大幅に低減する、すなわちレーザーにおけるOutput-coupler鏡を意図した方法を用いてQ値を向上し、熱放射スペクトルの準単色化実現を目指した。その結果、図5に示す、狭帯域な熱放射スペクトルを得ることができた。

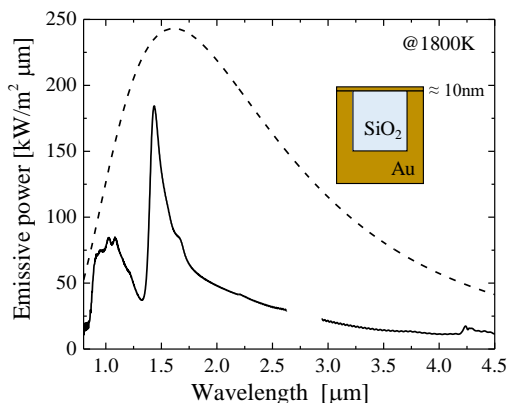


図5 開口部への金属ナノ薄膜形成により共振器Q値を向上させることで得られた狭帯域熱放射ピーク。熱放射スペクトルは室温で測定された吸収率と1800Kの黒体放射を用いて算出。2.8μm帯は水蒸気の吸収があるため測定不可

(3) キューブ型アブソーバー/エミッタによるソーラーTPV発電システムの構築

高い放射抽出効率と光電変換効率を実現する構造として、従来用いていた平板型のアブソーバー/エミッタに変わりキューブ型アブソーバー/エミッタを考案した(図6)。本構造においては6面のうち上部1面がアブソーバーとなっており、それ以外の5面はエミッタとして機能する。それぞれの面には積層型CPA構造を適用している。これによって波長選択吸収(放射)特性およびエミッタ/アブソーバー面積比に基づく高い放射抽出効率と光電変換効率が可能となる。エミッタの周囲には冷却板に設置したGaSb-TPVセルを配置しており隙間からの漏れ光を低減することでエミッターTPVセル間の高い形態係数を実現可能としている。このシステムにおいて高集光度ソーラーシミュレーターを用いた発電試験を実施した。その結果、支持部からの伝熱損失等を考慮しても約65%の高い放射抽出効率を実現できることが明らかとなった。これによりGaSb-TPVセルを用いたシステムでは世界最高の総合発電効率5.6%を達成した。

また、高温域においては波長選択性能が低下したことが示唆されており、これが低下しなかった場合は8.9%の効率を達成できる可能性が解析結果より明らかとなった。加えて、TPV発電においてはナローバンドギャップセルの性能向上が必要であり、現状使用しているセル性能では到達効率に限界がある。理想的なTPVセル性能を仮定した場合にはこのシステムにおいて20%以上の高効率を期待できることが解析によって示された。

以上の研究を通じ、熱輻射制御による熱の一方方向輸送技術の基盤となる技術を確認し、ソーラーTPVシステムの高効率化に寄与することが明らかとなり本発電技術実現へ大きく近づくことができたと考えている。

8) M. Shimizu et al., JQSRT, 212 (2018). 9) E. Blandre et al., OpticsExpress., 26 (2018). 10) S. Tsuda et al., Optics Express, 26 (2018).

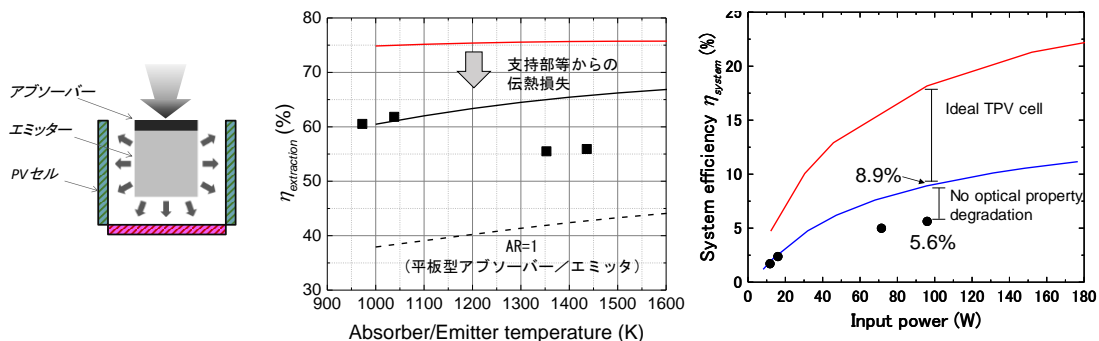


図6 キューブ型アブソーバー/エミッタシステム概略図(右)、放射抽出効率の実測値(中央)、総合発電効率実測値および予測値解析結果

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(計8件) 【全て査読有】

1. Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, Hiroo Yugami, Radiative heat transfer enhancement using geometric and spectral control for achieving high-efficiency solar-thermophotovoltaic systems, Japanese Journal of Applied Physics, 57 (2018),

40312.

[DOI: 10.7567/JJAP.57.040312]

2. Makoto Shimizu, Asaka Kohiyama, Hiroo Yugami, Evaluation of thermal stability in spectrally selective few-layer metallo-dielectric structures for solar thermophotovoltaics, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 212 (2018) 45-49.
[DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.02.037]
3. Etienne Blandre, Makoto Shimizu, Asaka Kohiyama, Hiroo Yugami, Pierre-Olivier Chapuis, Rodolphe Vaillon, Spectrally shaping high-temperature radiators for thermophotovoltaics using Mo-HfO₂ trilayeron-substrate structures, *Optics Express*, 26 (2018), 4346-4357.
[DOI: 10.1364/OE.26.004346]
4. Shinichiro Tsuda, Shuhei Yamaguchi, Yoshiaki Kanamori, Hiroo Yugami, Spectral and angular shaping of infrared radiation in a polymer resonator with molecular vibrational modes, *Optics Express*, 26 (2018), 6899-6915.
[DOI: 10.1364/OE.26.006899]
5. Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, Hiroo Yugami, Unidirectional radiative heat transfer with a spectrally selective planar absorber/emitter for high-efficiency solar thermophotovoltaic systems, *Applied Physics Express*, 9 (2016), 112302-1-112302-5.
[DOI: 10.7567/APEX.9.112302]

[学会発表] (計 22 件)

1. Makoto Shimizu, Asaka Kohiyama, Kana Konno and Hiroo Yugami, Effective solar energy conversion based on spectral control of thermal radiation via monolithic absorber/emitter, Nano-Micro Conference 2018, Jeju, Korea, Dec. 17, 2018.
2. Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu and Hiroo Yugami, High-efficiency solar-thermophotovoltaic systems based on controlling asymmetry of radiative heat transfer in a monolithic absorber/emitter, Summer Heat Transfer Conference ASME2017, Bellevue, USA, Jul. 11, 2017.
3. Hiroo Yugami, Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu and Fumitada Iguchi, "A Solar Thermophotovoltaic System Using Spectrally Controlled Monolithic Planar Thermal Emitter/Absorber", ASME 2016 5th Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer International Conference, Bioporis, Singapore, Jan. 4, 2016.

[図書] (計 1 件)

1. 次世代の太陽電池・太陽光発電—その発電効率向上, 用途と市場の可能性— 「太陽熱光起電力発電システムの概要, その可能性」、技術情報協会 (2018)、pp. 295-310、清水信

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：金森 義明

ローマ字氏名：Yoshiaki Kanamori

所属研究機関名：東北大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：10333858

研究分担者氏名：清水 信

ローマ字氏名：Makoto Shimizu

所属研究機関名：東北大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：60706836

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：井口 史匡

ローマ字氏名：Fumitada Iguchi

※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。