

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360094

研究課題名（和文）エバネッセント波誘導擬似プラズモンによる高密度近赤外光起電力発電

研究課題名（英文）High density thermophotovoltaic generation of electricity using psoudo Plasmon induced by evanescent wave

研究代表者 花村 克悟（HANAMURA KATSUNORI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20172950

研究成果の概要（和文）：

本研究において、熱エネルギーにより加熱されたタングステン製平滑面エミッター表面を GaSb 製光電池に近づけることにより、通常の伝播光に比べて、エバネッセント波効果により、およそ4倍の発電密度となることが示された。さらに数値シミュレーションモデルを独自に開発し、対向するピラーアレイ構造表面において、ピラー間隙間の表面プラズモンがその深さ（ピラー高さ）により周波数制御できる（すなわちエバネッセント波の波長制御となる）ことを示した。

研究成果の概要（英文）：

Thermophotovoltaic generation of electricity using near-field radiation (evanescent wave) was investigated using a GaSb semiconductor. Two kinds of cells were manufactured; one was a p-n junction cell made of undoped GaSb and Te-doped GaSb and another was a schottoky cell made of n-type GaSb with a thin Ni film. The energy transfer by the near-field radiation becomes 4.3 and 3.6 times higher than that by the conventional propagating-radiation for the p-n junction cell and the schottoky cell, respectively. In addition, using a modified scanning near-field optical microscope manufactured in our laboratory, the near-field radiation was detected by a silica glass fiber probe under the condition of an emitter temperature of 850 . Within a distance of about 100nm from the emitter surface, the output signal was drastically increased by the evanescent wave. Furthermore, through numerical simulation developed in our laboratory, pillar-array-structured surfaces faced together provide a spectral control of near-field radiation transfer as a result of resonance of a surface Plasmon in the narrow channel between pillars.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：エバネッセント波、表面プラズモン、波長選択、エネルギー変換、熱光起電力発電

1. 研究開始当初の背景

熱エネルギーからふく射を介して電気へ変換する熱光起電力発電において、いわゆる伝播光においては、従来のプランクの法則に従うため、発電量を増大するためには放射体温度を上昇させる必要がある。また、GaSbなどの低バンドギャップ半導体を用いた熱光起電力発電では、 $1.8\mu\text{m}$ より長い波長のふく射は電気に変換することが出来ない。そこで、まず、発電密度を高くするため、近接場光(エバネッセント波)を利用し、プランクの法則の制約を受けないエネルギー変換を目指すことが重要であった。さらに、このエバネッセント波においても、長波長成分のふく射が電力に変換されず熱損失となることから、伝播成分と同じように、電力に変換される $1.8\mu\text{m}$ 以下の波長のみを輸送できるように制御する必要があった。

熱光起電力電池については、製作されるものの、その利用方法が明確ではないことや、一方、近接場光による熱輸送促進効果が示されてはいるものの、その応用が曖昧となっていた。

2. 研究の目的

本研究は、熱エネルギーを、赤外線放射体表面近傍に生ずるエバネッセント波、およびその強電界により光電池表面の薄膜金電極に誘起される表面プラズモンを介して、局所的に光電池内電界を増強させることによって、電力へと変換する高密度な光起電力発電を行うとするものである。そして、例えば、稼働部のない新規な主電源、家庭用壁掛けコジェネ、あるいは新規な排熱回収発電システムなどを構築することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究ではエバネッセント波による熱エネルギーから電気への変換を実証するためGaSb半導体を用いた2種類の電池を製作した。1つはn型GaSbに厚さ5nmのNi金属薄膜をスパッタしたショットキーダイオード電池であり、もう1つは厚さ $2\mu\text{m}$ のアンドープp型GaSbをエピタキシャル成長させたp-n接合電池である。この表面に鏡面研磨されたタングステン製平滑面エミッターを近づけることによる発電実験を行った。このとき、ショットキー電池においてはNi薄膜が電極となり、金属面が向い合う平板-平板間のエバネッセント効果が検証できる。一方、p-n接合電池では、電池表面に厚さ200nm(幅 $50\mu\text{m}$ 、ピッチ $500\mu\text{m}$)の格子状(井下田状)Au電極を製作し、エバネッセント波による電界集中の効果を検証するものとした。

一方、過去の科研費の支援を受けて当研究室にて開発した真空型近接場光学顕微鏡を用いて、さまざまな周期的微細構造表面によ

るエバネッセント波の波長制御性を確認するための手法を確立する。

また、揺動電磁波理論とマクスウェルの方程式に基づいて、Ni金属エミッター内部に放射源をランダムな位相をもって与えた数値シミュレーション(FDTD)により、周期的微細構造における電磁場の解析をおこなった。

4. 研究成果

まず、ショットキー電池を用いた実験において記す。1100Kに加熱されたタングステン製エミッター($6\text{mm}\times 5\text{mm}$)を電池表面に近づけた場合、伝播光成分の範囲においては、電池のI-V特性が変化しない、すなわち形態係数がほぼ1となる状態を明確にした。その後、さらにピエゾアクチュエーターにより近づけることにより、短絡電流値が4倍程度まで上昇した。両面間の距離を正確に測定することは出来なかったが、この上昇はエバネッセント波によるものと考えられる。ショットキーバリア電位が低いため出力は $1\text{mW}/\text{cm}^2$ オーダーであり、 $1.8\mu\text{m}$ 以下の波長範囲の入射ふく射エネルギーに対する発電効率は0.0004%と極めて小さいが、通常の伝播光による発電密度に比べて、4.3倍となった。一方、p-n接合電池においても、形態係数がほぼ1と考えられる伝播光成分の領域では、その出力は、両面間の距離に依存せず、さらに近づけることにより、伝播光の場合に比べて3.6倍の発電密度となった。なお、p型層が $2\mu\text{m}$ と厚かったため、短絡電流を大きく取ることができず、発電密度は $10\text{mW}/\text{cm}^2$ オーダーであった。このp型層の厚みを100nm程度にするなどの最適化を行うことにより伝播光成分においても $0.5\text{W}/\text{cm}^2$ 程度に達することはすでに明らかになっている。

次に数値シミュレーションについて記す。遠方場においては、光導波管の原理に基づき、周期的マイクロキャビティが波長制御の役割を担う。しかしながら、近接場においては、むしろ平滑面間の近接場光輸送に比べて、マイクロキャビティ面間のそれが小さくなることが示された。これは、向い合うキャビティにより、せつかく表面プラズモン共鳴を生じている表面間距離が離れてしまっていることによると考えられる。そこで、構造を全く反転させた周期的ピラー構造表面を向い合わせ、近接場ふく射輸送を計算したところ、ピラー高さ(溝深さ)により輸送促進される波長を制御できることが明らかとなった。いわば、近接場光の波長制御がここに初めて実現されたことになる。具体的には、溝幅40nm、ピッチ400nm、ピラー高さ200nmにおいて、波長 $1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ の範囲の近接場ふく射輸送が、平滑面のけるその9倍にも達している。このピラー高さを120nmとすると波長 $0.8\mu\text{m}\sim 1.5\mu\text{m}$ の範囲において4倍程度と制御できる

ことが明らかとなった。さらにピラー間の溝幅にはそれほど依存しないことも明らかとなっている。つまり、ピラー間の溝においてプラズモン共鳴が生じ、そこで強まった電磁場が対向する溝へ輸送される、いわば構造による一種の干渉が生じたものと考えられる。

この現象を実験的に明らかにするためには、直接、発電実験を行うことも考えられるが、まず、このピラー構造の溝による効果であるか、を検証するため、真空型近接場光学顕微鏡を用いて、表面の近接場光強度分布を測定する必要がある。そこで、その準備として、タングステン製平滑面エミッターを850℃まで加熱し、シリカ製ガラスファイバープローブをナノオーダーまで近づけることにより、近接場光の散乱光を捉えることを試みた。その結果、フォトマル検出器のため可視光から0.92 μm の範囲ではあるが、プローブがエミッター表面に接触する手前100nmの範囲内において急激に検出信号が増大することが示され、その領域でのエバネッセント波による電界強度が極めて高いことが明らかとなった。

このように、表面の周期的微細構造によりエバネッセント波をも波長制御可能となることが示唆され、完全ではないにしろ、極めて新規な発電システムの構築に近づいたといえる。

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7件)

Tomoyuki Kumano, Katsunori Hanamura, Energy Conversion from Thermal Energy to Spectral-Controlled Radiation for Thermophotovoltaics using Porous Quartz Glass Media, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 6 No.3 pp.391-405, 2011. (査読有)

平島 大輔, 花村 克悟, ふく射機能性表面の放射シミュレーション, 日本機械学会論文集, Vol. 77 No. 782, pp.1978-1993, 2011. (査読有)

花村 克悟, 谷口 祐司, パチャムス ジャヤベル, エライヤラジュ スリニバサン, 深井 尋史, 山田 明, 近似黒体面を用いた熱光起電力電池の発電特性, 熱物性, Vol. 25 No.1, pp.15-20, 2011. (査読有)

Katsunori Hanamura, Hirofumi Fukai, Elaiyaraju Srinivasan, Masao Asano, Teppei Masuhara, Photovoltaic generation

of electricity using near-field radiation, Proceedings of ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference, ASME, pp.1-5, 2011. (査読有)

Daisuke Hirashima, Katsunori Hanamura, Directional Characteristics of Thermal Radiation Emitted from Microstructured Surface, RAD-10, Proceedings of the 6th International Symposium on RADIATIVE TRANSFER, INTERNATIONAL CENTRE FOR HEAT AND MASS TRANSFER, CD-ROM, pp.1-15, 2010. (査読有)

Tomoyuki Kumano, Katsunori Hanamura, Control of Spectral Emission using a Rare-Earth Oxide Film coated on a Ceramic Plate, Heat Transfer-Asian Research, Vol.39, No.4, pp.209-221, 2010. (査読有)

熊野 智之, 花村 克悟, 希土類酸化膜における放射率の制御に関する研究, 熱物性, Vol.23, No. 2-83, pp.105-110, 2009. (査読有)

[学会発表](計13件)

Katsunori Hanamura, Energy Conversion and Heat Recovery supported by Nano-and/or Micro-Technology ~ Thermophotovoltaics through Near-Field Radiation and Solid Oxide Fuel Cells using Proton Conductors ~, ECO-MATES 2011, Nov.28, Osaka, 2011.

熊野智之, 花村克悟, ふく射機能性釉薬によるセラミックスの放射率制御, 第32回日本熱物性シンポジウム, 11月21日, 神奈川県, 2011年

藤井康太, 平島大輔, 花村克悟, 熱ふく射近接場成分の計測に関する研究, 第32回日本熱物性シンポジウム, 11月21日, 神奈川県, 2011年

平島大輔, 花村克悟, 近接場におけるふく射輸送のスペクトル制御に関する研究, 第32回日本熱物性シンポジウム, 11月21日, 神奈川県, 2011年

Katsunori Hanamura, Yuji Taniguchi, Pathamuth Jayavel, Elaiyaraju Srinivasan, Hirofumi Fukai, Akira Yamada, Measurement of output power of thermophotovoltaic cells using a pseudo blackbody surface, European Conference on Thermophysical Properties 19, August.28, Thessaloniki,

Greece, 2011.

平島大輔, 花村克悟, 近接場ふく射輸送の数値シミュレーション, 第48回日本伝熱シンポジウム, 6月1日, 岡山, 2011年

熊野智之, 花村克悟, 希土類ドーブによる近赤外ふく射機能性塗薬の開発, 第31回日本熱物性シンポジウム, 11月17日, 九州大学 伊都キャンパス, 2010年

平島大輔, 花村克悟, 近接場光輸送に関する研究, 第31回日本熱物性シンポジウム, 11月17日, 九州大学 伊都キャンパス, 2010年

花村克悟, 平島大輔, 深井尋史, 浅野雅夫, 近接場光起電力発電の電気力学的考察, 熱工学コンファレンス2010, 10月31日, 長岡技術大学, 2010年

平島大輔, 黒田圭佑, 花村克悟, 熱ふく射の近接場成分計測に関する研究, 第47回日本伝熱シンポジウム, 5月26日, 札幌コンベンションセンター, 2010年

平島大輔, 花村克悟, 導体矩形マイクロキャビティの指向性単色放射率に関する放射シミュレーション, 第47回日本伝熱シンポジウム, 5月26日, 札幌コンベンションセンター, 2010年

浅野雅夫, 深井尋史, Elaiyaraju Srinivasan, 花村克悟, 近接場光起電力発電の高密度化に関する研究, 第47回日本伝熱シンポジウム, 5月26日, 札幌コンベンションセンター, 2010年

平島大輔, 花村克悟, 回折格子表面の放射シミュレーション, 第30回日本熱物性シンポジウム, 10月28日, 米沢市「伝国の杜」, 2009年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.mep.titech.ac.jp/~TANSO/hanamura/index-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

花村 克悟 (HANAMURA KATSUNORI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 20172950

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし