

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13395

研究課題名(和文) 太陽光の準単色化によるレクテナソーラーセルの高効率化

研究課題名(英文) High-efficiency rectenna solar cell based on quasi monochromatic conversion of sunlight

研究代表者

湯上 浩雄 (Yugami, Hiroo)

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：電磁波のエネルギーを電力へ直接変換可能なレクテナシステムにおいてマイクロ波領域ではこれまでに90%以上の変換効率が実現されている。同様の原理で太陽光を直接変換するレクテナソーラーセルに関する研究が近年盛んに行われているが、未だ原理検証段階に留まっている。本研究ではレクテナを用いた太陽エネルギー変換技術の実現を目指し、微小共振器構造を用いることで太陽光を準単色化する方法を開発した。加えて近赤外・可視光域(>100THz)の光に応答可能なダイオードが金属-絶縁体-金属(MIM)トンネルダイオードに幾何学的電場集中効果を応用することで実現できることを解析的に示した。

研究成果の概要(英文)：Optical rectenna is a new photo-voltaic conversion system that expected to break through the limit efficiency of existing system. The most important technology to realize this device is ultra-high speed diodes to rectify optical light frequency (>100THz) and controlling broad solar spectrum into narrow band emission. In this study, we developed a technique to control broad thermal radiation spectrum into quasi-monochromatic thermal emission. For the diode, we suppose to apply geometrical e-field enhancement in order to improve response frequency and quantum efficiency of Metal-Insulator-Metal (MIM) tunnel diode that is one of the most hopeful rectifier for optical rectenna.

研究分野：エネルギー変換工学

キーワード：太陽光 トンネルダイオード アンテナ 熱ふく射

### 1. 研究開始当初の背景

本研究ではレクテナを用いた新たな太陽エネルギー変換技術の研究を行う。レクテナとはアンテナによって吸収した光を整流することで直接電力へ変換するシステムである。電磁波である光のエネルギーを直接取り出すため理論効率は 100% であり、既存のシステムを大きく超える効率が期待できる。マイクロ波領域においては実験的に 90% 以上の変換効率が実現されているが<sup>1)</sup>、光領域における効率は 1% にも満たない<sup>2)</sup>。低効率の主な原因の一つとして太陽スペクトルが広帯域であることが挙げられる。単色光に対するレクテナの理論効率が 100% であるのに対し、ダイオード回路インピーダンスとの不整合等により太陽光に対する効率は理論上大きく低下することが明らかとなっている。本研究は太陽光を準単色化することでレクテナソーラーセルの飛躍的な効率向上を目指すものである。申請者らの研究室ではこれまで熱光起電力発電や集光型太陽熱発電システム高効率化を目的とし、高温下での熱ふく射スペクトル制御に関する研究を行ってきた。それらの知見をもとに太陽光の準単色化を可能とするデバイスを実現し、レクテナソーラーセル高効率化のための基盤技術確立を目的とする。

### 2. 研究の目的

電磁波のエネルギーを電力へ直接変換可能なレクテナシステムにおいてマイクロ波領域ではこれまでに 90% 以上の変換効率が実現されている。同様の原理で太陽光を直接変換するレクテナソーラーセルに関する研究が近年盛んに行われているが、未だ原理検証段階に留まっている。本研究では太陽光を準単色化することで、レクテナを用いた太陽エネルギー変換効率の飛躍的な向上を達成するための知見を得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

レクテナソーラーセルにおける問題点は太陽スペクトルが広帯域であるため、レクテナを用いて電力へ変換する際にエネルギー損失が生じることである。具体的な損失としては主に「アンテナの作動帯域と放射スペクトルの不整合」、「整流回路設計波長とのずれによるインピーダンス不整合」、「レクテナ最適作動電圧の周波数依存性に起因したマルチ化」の 3 点が挙げられる。これらの損失によりレクテナで太陽光を直接変換した場合でも理論変換効率は 44% に留まるということが報告されている<sup>3)</sup>。本研究ではこの課題を解決するため、太陽光をセルに直接導入するのではなく、一旦中間体を加熱し、その材料からの熱ふく射を準単色化してセルへ導入することで高効率なエネルギー変換システムを実現するものである。本研究で提案するシステムは原理的にこれまでの太陽エネルギー変換システムを大きく超える可能性

を持つシステムであり、加えて多接合型太陽電池と比較すると遥かに低いコストで作製が可能であると考えられる。

本研究ではレクテナソーラーセルを用いた高効率太陽エネルギー変換システム基盤技術確立を目的として、準単色の熱放射の実現、光応答ダイオードの検討、ダイオード体型中赤外アンテナ構造の設計・作製について研究を行った。これらの研究においては Maxwell 方程式に基づく波動光学シミュレーションや、量子力学を取り入れた数値解析を行うと共に、本学のマイクロ・ナノマシニング研究教育センターにおけるナノ構造作製を組み合わせる研究開発を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 熱ふく射の準単色化

本研究では金属表面に熱ふく射の波長と同程度の微細構造を形成し、その微小共振器構造閉じ込め効率を向上させることで高い Q 値、すなわち準単色の熱ふく射の実現を目指した。閉じ込め効率向上のためキャビティ開口部を極薄金属膜でカバーすることで Q 値が向上し、従来のピークより著しく幅が狭く高い強度を持たせられることがこれまでに明らかとなっている (図 1)。

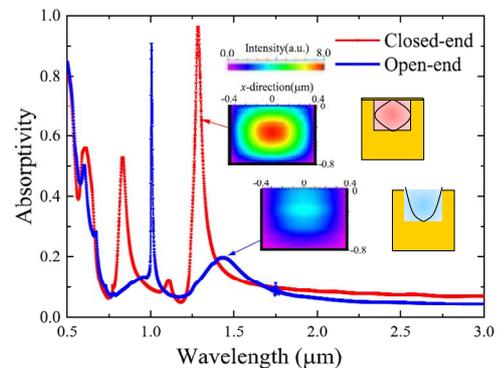


図 1 光学シミュレーションを用いた極薄金属膜カバー型微小共振器の熱放射スペクトル解析結果

この微小共振器構造において高 Q 値を実現するためには極薄金属膜の平坦性が重要であり、基板から作製すると、十分な平坦性が得られない問題点があった。そこで透明基板を表面保護層としたスーパーストレート型太陽電池構造に着想を得て、透明ガラス基板上へトップ層である極薄金属膜から順に作製を行っていった。また共振器構造内は光学的に透明な SiO<sub>2</sub> で構成し、安定的な作製を可能とした。作製した構造の断面 TEM 画像を図 2 に示している。画像下部が放射面となる透明ガラス基板になっており、その上に厚さ 6nm の極薄金膜でカバーされた微小共振器構造が作製できていることがわかる。上述した薄膜の平坦性以外にもピーク幅を広げ、強度を低下させる要因は複数存在したがプロセス最適化によって光学シミュレーションモデルに近い構造作製することで最終的に Q 値=11 の構造を実現することができた (図 3)。

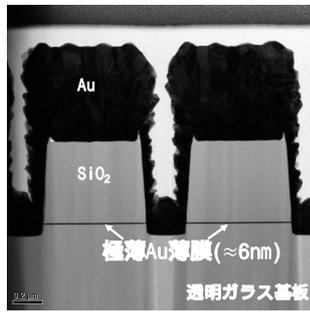


図2 作製した極薄金属膜カバー型微小共振器構造のTEM断面画像。下側が放射面

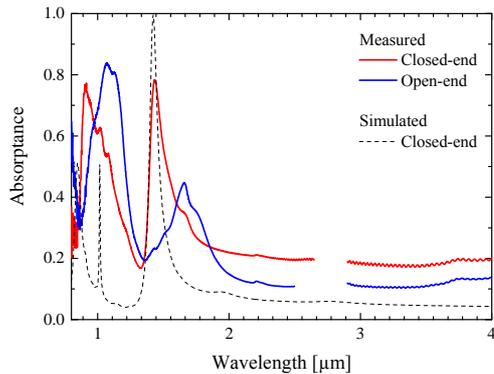


図3 作製した極薄金属膜カバー型微小共振器構造の放射率スペクトル。青線はカバーがないもの。黒破線はシミュレーション結果。

### (2) 光応答ダイオードの検討

光レクテナ実現のためには数百 THz 以上の高周波数で応答可能なダイオードが必要であり、一般的な p-n 接合ダイオード等は原理的に適用が困難である。本研究では高周波応答に適した MIM トンネルダイオードをベースとして光応答ダイオードの実現を目指した。

MIM ダイオードが光領域で作動するためには、静電容量と正バイアスでの抵抗を同時に小さくし、静電容量と抵抗値の積 (RC 時定数) を  $10^{-15}$  [s] オーダーにする必要がある。これまでに Wilke らは仕事関数差を 0.2[eV] まで小さくできる Ni 及び NiO を用いたダイオードにおいて  $RC = 8.5 \times 10^{-14}$  [s] を達成している<sup>4)</sup>。しかし、障壁が極端に小さい MIM ダイオードは整流性能 (非線形性) が低く、線形的な電流電圧特性となる。MIM ダイオードにおいて高い非線形性を得るためには、陰極側の金属の仕事関数を大きくして仕事関数差を大きくする必要がある。つまり低い RC 時定数と非線形性の間にはトレードオフの関係があり両立が難しい。

そこで従来の MIM トンネルダイオードに幾何学的非対称性を導入した新たな光応答用ダイオードを考案した。特徴としては仕事関数の異なる二種類の金属と誘電体の異種材料からなる積層型構造を有し、加えて低仕事関数の金属が尖鋭化した構造を持つことを特徴としている。この構造においては異なる金属の仕事関数差によるトンネル整流効果

に加えて、一方が尖鋭化した非対称構造による幾何学的効果による整流性が期待でき、低いトンネル障壁を用いても高い非線形性が期待できる。また、ダイオード部面積が小さくなることからキャパシタンスも抑制することができ、RC 時定数も小さくできる。加えて、図4に示す尖鋭化した先端部においては強い電場集中が生じる。図は Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を用いて今構造の先端部における電場ポテンシャルを解析した結果であり、強い電場集中が生じていることがわかる。これによって材料仕事関数由来のポテンシャル障壁が図5のように大きく変化することが解析結果から明らかとなり、この変化がより大きな非線形性を生じさせることも明らかとなった。

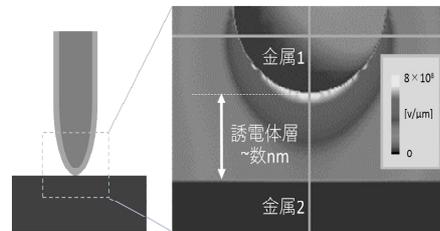


図4 FDTD 法を用いた電場解析結果

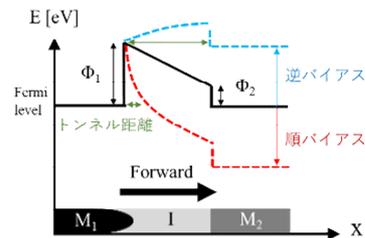


図5 電場集中によるポテンシャル障壁の変化

この電場集中効果は、MIM ダイオードの誘電体層の欠陥や基板金属の表面粗さによって偶発的に発生し、欠陥の構造によっては MIM ダイオード本来の仕事関数差に起因した整流作用を打ち消してしまうので、本来は避けなければならないものである。しかし、Atomic Layer Deposition (ALD) 法などの製膜技術を用いることで、欠陥や粗さの少ない MIM ダイオードの作製が可能となり、電場集中効果を制御することは十分可能であると考えている。

### (3) ダイオード一体型中赤外アンテナ構造の設計

本研究開発では当初、ダイオードとアンテナは各技術独立して開発を実施する予定であった。しかし、熱ふく射のコヒーレントエリアを考慮すると約  $10 \mu\text{m}$  四方であり、ダイオード一体型アンテナとする必要があることが明らかとなった。また、前述したダイオード構造においては高い電場集中部が存在し、トンネルギャップ等によって大きく電場

分布が変化する。すなわち光学特性設計の点からもダイオードを含めたアンテナ構造の設計が必要であることがわかり、図6に示すbow-tie型アンテナ構造と積層型ダイオード一体型構造を考案した。本構造においてRigorous Coupled-Wave Analysis法を用いた光学シミュレーション解析を行った結果、Au反射層からの距離によって吸収率が制御可能であることが示され、目標の波長域(3.5 $\mu\text{m}$ 付近)においてほぼ100%吸収可能であることが明らかとなった。以上より図7に示すように90%以上の効率を実現可能な構造の概念設計を達成することができた。

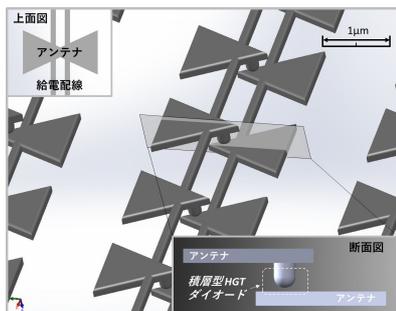


図6 考案したアンテナ ダイオード一体型構造

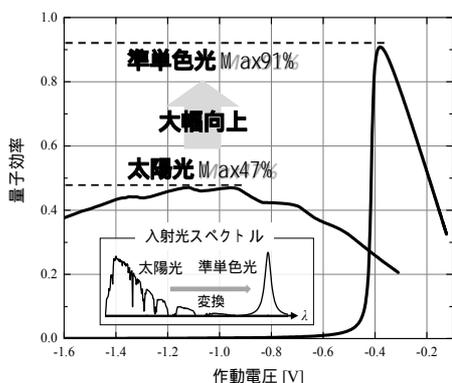


図7 本技術によって期待される変換効率

#### <引用文献>

- 1) W. C. Brown, *IEEE Trans, MTT*, 32, 1230-1242 (1984).
- 2) B. Berland, *NREL Subcontractor Report*, SR-520-33263 (2003).
- 3) S. Joshi, *Appl. Phys. Lett.*, 102, 083901 (2013).
- 4) I. Wilke et.al, *App Phys Mater Sci Process* 58, 329 (1994).

#### 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18件)

【以下全て査読あり】

- (1) 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*, Vol. 212, 2018, pp. 45-49.

DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.02.037

- (2) 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*, Vol. 57, 2018, p. 40312.  
http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.57.040312/meta
- (3) Etienne Blandre, Makoto Shimizu, Asaka Kohiyama, Hiroo Yugami, Pierre-Olivier Chapis, Rodolphe Vaillon, Spectrally shaping high-temperature radiators for thermophotovoltaics using Mo-HfO<sub>2</sub> trilayeron-substrate structures, *Optics Express*, Vol. 26, 2018, pp. 4346-4357.  
DOI: 10.1364/OE.26.004346
- (4) Daisuke EMA, Yoshiaki KANAMORI, Hitoshi SAI, and Kazuhiro HANE, Plasmonic Color Filters Integrated on a Photodiode Array, *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 101, 2018, pp. 98-104.  
DOI: 10.1002/ecj.12055
- (5) Makoto Shimizu, Mari Suzuki, Fumitada Iguchi, Hiroo Yugami, High spectral selectivity for solar absorbers using a monolayer transparent conductive oxide coated on a metal substrate, *Journal of Applied Physics*, Vol. 121, 2017, p. 183103.  
DOI: 10.1063/1.4983189
- (6) Makoto Shimizu, Toshiro Abe, Fumitada Iguchi and Hiroo Yugami, High-temperature solar selective absorbers based on a transparent conductive oxide film coated periodic micro-hole array, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1850, 2017, p. 120003.  
DOI: 10.1063/1.4984494
- (7) Yuto Moritake, Yoshiaki Kanamori, and Kazuhiro Hane, Dynamic Spectral Control of Fano Resonance by MEMS Actuated Optical Metamaterials, *電気学会論文誌 E*, Vol. 137, 2017, pp. 357-362  
DOI: 10.1541/ieejsmas.137.357
- (8) 清水信, 阿久津宏樹, 津田慎一郎, 引地広介, 熊野勝文, 湯上浩雄, 多層膜被覆周期的微細構造を用いた高温用太陽光選択吸収材料, *電気学会論文誌 E 部門誌*, Vol. 137, 2017, pp. 393-399.  
DOI: 10.1541/ieejsmas.137.393

- (9) 大久保 藍, 金森 義明, 羽根 一博, 面外配置された非対称型ダブルバーメタマテリアルの製作と光学応答, 電気学会論文誌 E, Vol. 137, 2017, pp. 363-370.  
DOI: 10.1541/ieejsmas.137.363
- (10) 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, Vol. 9, 2016, pp. 112302\_1-5.  
DOI: 10.7567/APEX.9.112302
- (11) Shinichiro Tsuda, Makoto Shimizu, Fumitada Iguchi, Hiroo Yugami, Enhanced thermal transport in polymers with an infrared-selective thermal emitter for electronics cooling, Applied Thermal Engineering, Vol. 113, 2016, pp. 112-119.  
DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.11.024
- (12) Makoto Shimizu, Hiroki Akutsu, Shinichiro Tsuda, Fumitada Iguchi, Hiroo Yugami, A High-Temperature Solar Selective Absorber Based upon Periodic Shallow Microstructures Coated by Multi-Layers Using Atomic Layer Deposition, Photonics, Vol. 3, 2016, pp. 2013\_1-11.  
DOI: 10.3390/photonics3020013
- (13) Hiroo Yugami, Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu and Fumitada Iguchi, A Solar Thermophotovoltaic System Using Spectrally Controlled Monolithic Planar Thermal Emitter/Absorber, Proceedings of ASME 49651, Vol. 1, 2016, p.6692.  
DOI: 10.1115/MNHMT2016-6692
- (14) Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, Fumitada Iguchi and Hiroo Yugami, Low-directivity quasi-monochromatic thermal radiation from microcavities covered by thin metal film, Proceedings of ASME 49651, Vol. 1, 2016, p.6683.  
DOI: 10.1115/MNHMT2016-6683
- (15) Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, Fumitada Iguchi and Hiroo Yugami, Narrowband thermal radiation from closed-end microcavities, Journal of Applied Physics, Vol. 118, 2015, pp. 133102\_1-5.  
DOI: 10.1063/1.4931375
- (16) Yuto Moritake, Yoshiaki Kanamori and Kazuhiro Hane, Detailed characterization of Fano resonance in asymmetric-double-bar metamaterials in the optical region, 電気学会論文誌 E, Vol. 135, 2015, pp. 426-432.  
DOI: 10.1541/ieejsmas.135.426
- (17) Yuto Moritake, Yoshiaki Kanamori, and Kazuhiro Hane, Enhanced quality factor of Fano resonance in optical metamaterials by manipulating configuration of unit cells, Applied Physics Letters, Vol. 107, 2015 pp. 211108\_1-4.  
DOI: 10.1063/1.4936385
- 〔学会発表〕(計 27 件)
- (1) 清水信, 阿部俊郎, 井口史匡, 湯上浩雄, 透明導電酸化物被覆微細構造を用いた太陽光選択吸収材料の耐熱性評価, 第 65 回応用物理学会 春季学術講演会, 2018 年
- (2) 松浦大輔, 清水信, 陳強, 湯上浩雄, 光レクテナセルを用いたレーザー光受電システム, 第 3 回宇宙太陽発電シンポジウム, 2017 年
- (3) 清水信, 井口史匡, 湯上浩雄, 透明導電酸化物膜を用いた高波長選択性太陽光選択吸収材料, 機械学会東北支部第 53 回秋季講演会, 2017 年
- (4) 松浦大輔, 清水信, 陳強, 湯上浩雄, 熱ふく射スペクトル制御技術を用いた光レクテナシステムにおける光応答ダイオードの特性評価, 機械学会東北支部第 53 回秋季講演会, 2017 年
- (5) 清水信, 阿部俊郎, 井口史匡, 湯上浩雄, 透明導電酸化物被覆微細構造を用いた高温用太陽光選択吸収材料, 第 7 8 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年
- (6) Makoto Shimizu, Hiroki Akutsu, Shinichiro Tsuda, Hiroo Yugami, A Few Layer Coating on Periodic Shallow Microstructures as a Spectrally Selective Absorber, Summer Heat Transfer Conference ASME2017, 2017.
- (7) Makoto Shimizu, Etienne Blandre, Asaka Kohiyama, P. Olivier Chapuis, Rodolphe Vaillon, Hiroo Yugami, High Spectral Selectivity Based on A Few Layer Structure for Solar-Thermophotovoltaics, NanoRad2017, 2017.
- (8) 小桧山朝華, 清水信, 湯上浩雄, 熱輸送特性と波長選択性の太陽熱光起電力発電システム効率への影響, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年
- (9) 清水信, 小桧山朝華, 湯上浩雄, 金属ナノ薄膜 透明誘電体膜積層構造による熱ふく射スペクトル制御, フィジカルセンサ/マイクロマシン・センサシステム研究会, 2016 年
- (10) Shinichiro Tsuda, Makoto Shimizu, Fumitada Iguchi, Hiroo Yugami,

Enhancement of Thermal Transport in Polymers Using Control of Thermal Radiation Spectrum for Thermal Management of Electronic Devices, The fourth international forum on heat transfer, 2016.

- (11) Makoto Shimizu, Asaka Kohiyama, Etienne Blandre, P.-Olivier Chapuis, Rodolphe Vaillon and Hiroo Yugami, PERFORMANCES OF A FEW-LAYER METALLO-DIELECTRIC ABSORBER-EMITTER FOR SOLAR THERMOPHOTOVOLTAICS, 2016.
- (12) 清水信、阿久津宏樹、津田慎一郎、井口史匡、湯上浩雄、多層膜積層型微細構造による太陽光選択吸収材料, 第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2016年
- (13) Hiroo Yugami, Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, System design and experiment of solar-thermophotovoltaic generation based on spectrally selective absorber/emitter, Solar PACES, 2016.
- (14) Makoto Shimizu, Toshiro Abe, Fumitada Iguchi and Hiroo Yugami, High-temperature Solar Selective Absorbers Based on a Transparent Conductive Oxide Film Coated Metal Microstructure, Solar PACES, 2016.
- (15) 小桧山朝華、清水信、湯上浩雄、熱輸送効率向上による太陽熱光起電力発電システムの高効率化, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 2016年
- (16) 清水信、阿久津宏樹、津田慎一郎、井口史匡、湯上浩雄、金属誘電体積層構造を用いた高温用太陽光選択吸収材料, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 2016年
- (17) 湯上浩雄、清水信、高温フォトンクスによる太陽熱利用技術の高度化, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 2016年
- (18) Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, Hiroo Yugami, Solar-thermophotovoltaic systems using spectrally selective absorber/emitter based on metal-dielectric multilayer, SPIE Optics+Photonics, 2016.
- (19) Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, Fumitada Iguchi and Hiroo Yugami, Low-directivity quasi-monochromatic thermal radiation from microcavities covered by thin metal film, ASME 2016 5th Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference, 2016.
- (20) Hiroo Yugami, Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, 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, 2016.

- (21) Makoto Shimizu, Asaka Kohiyama, Fumitada Iguchi, Hiroo Yugami, SPECTRAL CONTROL OF THERMAL RADIATION USING METAL-DIELECTRIC MULTILAYERS FOR HIGH-TEMPERATURE USAGE OVER 1000oC, ASME 2016 5th Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer International Conference, 2016.
- (22) Asaka Kohiyama, Makoto Shimizu, Hiroo Yugami, High-efficiency solar thermophotovoltaic system using selective absorber and emitter consists of multilayer coating, World Engineering Conference and Convention 2015, 2015.
- (23) 小桧山朝華、清水信、井口史匡、湯上浩雄、熱ふく射スペクトル制御技術を用いた太陽熱光起電力発電システム, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年
- (24) 小桧山朝華、清水信、井口史匡、湯上浩雄、マイクロキャビティ構造に基づいた熱ふく射スペクトル準単色化, 電気学会E部門総合研究会, 2015年
- (25) Yoshiaki Kanamori, High precision fabrication of optical metamaterials with sharp Fano resonance, The 5th Korea-Japan Metamaterials Forum, 2015.
- (26) 金森義明, Fano 共鳴型光メタマテリアルの高精度製作, メタマテリアル第187委員会 平成27年度第2回研究会, 2015年

〔その他〕  
ホームページ等：  
<http://www.energy.mech.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
湯上 浩雄 (Yugami, Hiroo)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60192803
- (2) 研究分担者  
金森 義明 (Kanamori, Yoshiaki)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10333858  
  
清水 信 (Shimizu, Makoto)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60706836
- (3) 連携研究者  
井口 史匡 (Iguchi, Fumitada)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：00361113