

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：93901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17538

研究課題名(和文)熱輻射トンネリングを用いた熱ダイオード

研究課題名(英文)Thermal diode utilizing tunneling of thermal photons

研究代表者

伊藤 晃太(Kota, Ito)

株式会社豊田中央研究所・フロンティア研究領域・研究リーダー

研究者番号：70463685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、熱輻射トンネリングを用いた熱ダイオードと題し、相転移材料を用いた近接場熱輻射の制御を理論的・実験的に検証するものである。当該年度においては、距離350 nmに二枚の合成石英チップを平行に配置し、測定を行った。ここで、合成石英チップの片方にのみ二酸化バナジウムを堆積してある。温度差を保持した状態で低温側基板の温度を変化させ、熱流量を測定したところ、熱流量は二酸化バナジウムの金属絶縁体相転移により大きく変化し、その変化量は黒体輻射限界よりも大きいことが分かった。

研究成果の概要(英文)：Thermal diode is attracting broad interest, and near-field radiative heat transfer is expected to control thermal radiation beyond the blackbody limit. We confirmed by experiment that the radiative heat transfer is dynamically modulated beyond the blackbody limit. The near-field electromagnetic heat exchange mediated by phonon-polariton is controlled by the metal-insulator transition of tungsten-doped vanadium dioxide. The heat flux is transferred across a 370 nm gap, which is maintained by the microfabricated spacers and applied pressure. The uniformity of the gap is validated by optical interferometry, and the measured heat transfer is well modeled as the sum of the radiative and the parasitic conductive components. The presented methodology to form a nanometric gap with functional heat flux paves the way to the smart thermal management in various scenes ranging from highly integrated systems to macroscopic apparatus.

研究分野：応用物理

キーワード：熱輻射 熱変調器 相転移 熱ダイオード

1. 研究開始当初の背景

今日の自動車においては、エンジン・モータ・二次電池・燃料電池・排ガス浄化装置など、さまざまな機器が有機的に協働することで「走る」という機能を実現しているが、最適効率を実現できる温度は各機器によって異なる。電力等を投入することなく熱流を制御し、各機器をできるだけ長い時間最適温度で動かすことができれば、エネルギーの半分以上を廃熱として捨てている自動車の高効率化や環境負荷の低減が望める。また、効率的な廃熱回収ができれば、熱電・熱光発電によりエネルギーとして再生できる。熱整流素子(熱ダイオード)は、熱流の制御に対して有効な素子であり、なかでも輻射型デバイスを用いた方が特性の向上を望めることが分かっている。ここで近接場熱輻射は、熱流量を黒体限界よりも大きく変化させることができるため、輻射型熱整流素子と組み合わせることで、これまでにない特性を生み出すことができる。つまり、黒体輻射限界を超える熱流の整流を行うことができる。

2. 研究の目的

輻射型デバイスを用いて研究を進めていくなかで、熱流の整流ではなく熱流の変調を示した方が、波及効果が大きいことが分かってきた。特に、温度帯により熱流の量が変動するデバイス、つまり熱流変化デバイスが望まれていることが分かってきた。そこで、当初検討を予定していた熱整流デバイスでなく、温度差が一定であっても温度環境に応じて熱流量が変動する、熱流変調デバイスを検討することとした。

3. 研究の方法

距離 350 nm に二枚の合成石英チップを平行に配置し、測定を行った(図1)。ここで、合成石英チップの片方にのみ二酸化バナジウムを堆積してある。合成石英基板の上にウェットエッチングを施してスペーサを形成し、該スペーサを用いてギャップを形成した。光干渉測定を用いてギャップの大きさを定量した。形成したギャップに伝達する熱流を定常一次元熱流測定装置を用いて測定した。

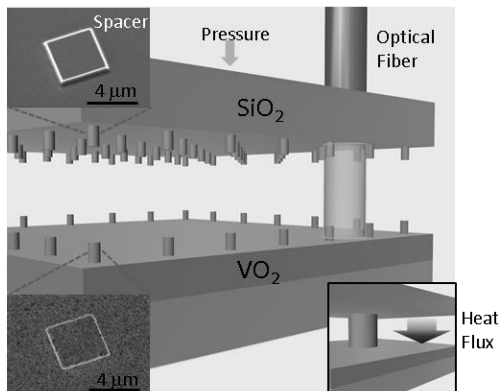


図1 近接場熱輻射の測定系

電磁界計算による近接場熱輻射の計算は、式1によってなされた。

$$\phi = \int_0^{+\infty} d\omega \frac{1}{4\pi^2} [\theta(\omega, T_1) - \theta(\omega, T_2)] \sum_{j=s,p} \int_0^{+\infty} Z(\omega, \beta, j) \beta d\beta$$

式1

$$\int_0^{+\infty} Z(\omega, \beta, j) \beta d\beta = \int_0^{+\infty} \frac{\omega/c (1 - |r_{R,j}|^2)(1 - |r_{L,j}|^2)}{|1 - r_{R,j} r_{L,j} e^{2i\gamma_0 d}|^2} \beta d\beta + \int_{\omega/c}^{+\infty} \frac{4 \operatorname{Im}(r_{R,j}) \operatorname{Im}(r_{L,j}) e^{2i\gamma_0 d}}{|1 - r_{R,j} r_{L,j} e^{2i\gamma_0 d}|^2} \beta d\beta$$

式2

また、二枚の基板の間の伝達係数は、式2によって求められた。ここで、 ω は角周波数、 T_1 、 T_2 はそれぞれ高温部と低温部の温度、 j は偏光、 $\theta(\omega, T)$ はプランク振動子強度、 β は横方向波数、 c は光速、 $r_{R,j}$ 、 $r_{L,j}$ はそれぞれ高温部と低温部の反射係数、 γ_0 はギャップ中縦方向波数、 d はギャップである。

4. 研究成果

形成したギャップにおいて、四点で光干渉測定を行った。結果、十分に均一なギャップが形成されていることが分かった。次に、温度差 50 K を印加し、定常一次元熱流測定装置を用いて熱流量を定量した。その結果、熱流量は二酸化バナジウムの金属絶縁体相転移により大きく変化し、その変化量は黒体輻射限界よりも大きいことが分かった。さらに動的に低温側基板の温度を変化させたところ、熱流量もその温度変化に追従し大きく変化していることが分かった(図2)。二酸化バナジウムが合成石英チップ表面に存在しない場合、熱流量変化がほぼないことも見出した(図3)。同様の測定を 20 回以上繰り返し、複数の測定データを用いて熱コンダクタンスを評価した。その結果、有限要素法を用いた熱伝導計算(図4)と揺動電磁気学を組み合わせた理論計算の和が、実験結果とほぼ合致することを見出した。このような熱流制御素子についての結果は、近接場熱輻射理論により測定されたものとよく一致していることが分かった(図5)。

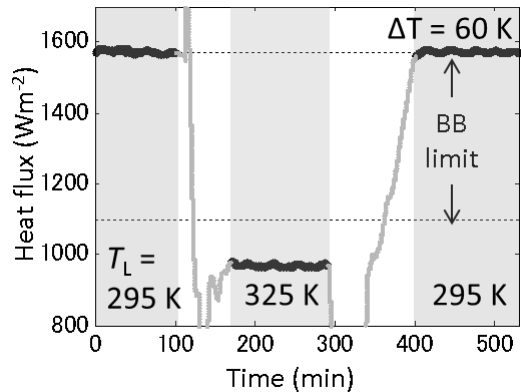


図2 近接場熱輻射の動的測定結果

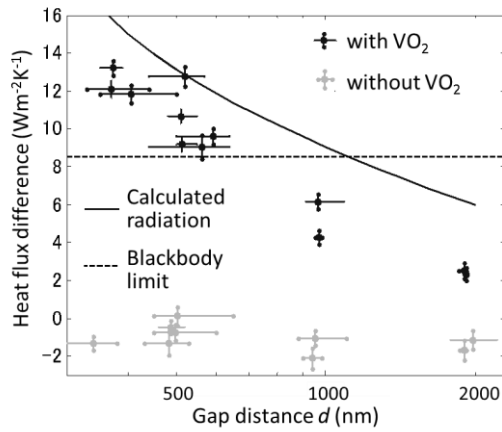


図3 繰り返し測定した結果

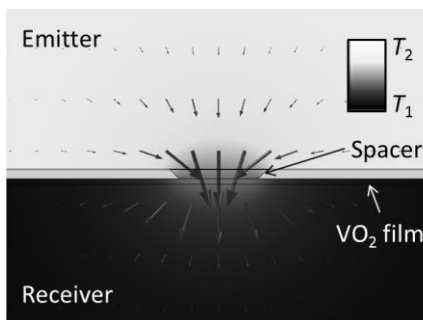


図4 有限要素法を用いた寄生熱伝導計算

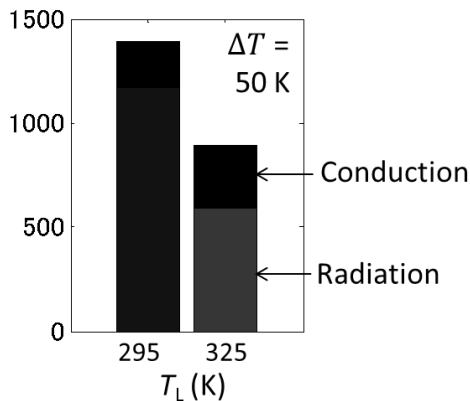


図5 寄生熱伝導計算において用いた熱伝導成分と熱輻射成分の分離

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 2 件)

1. Kota Ito, Kazutaka Nishikawa, Atsushi Miura, Hiroshi Toshiyoshi, and Hideo Iizuka, "Dynamic Modulation of Radiative Heat Transfer beyond the Blackbody Limit", Nano Letters, 査読有, 17, 2018, 4347-4353 DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b01422
2. Kota Ito, and Hideo Iizuka. "Directional thermal emission control by coupling between guided mode

resonances and tunable plasmons in multilayered graphene", Journal of Applied Physics, 査読有, 120, 2016, 163105. DOI: 10.1063/1.4966577

[学会発表] (計 5 件)

1. Kota Ito, Kazutaka Nishikawa, Atsushi Miura, Hiroshi Toshiyoshi, and Hideo Iizuka, "Hysteretic Metal-Insulator Transition of VO₂ and Near-Field Radiative Heat Transfer Play Key Role in Radiative Thermal Information Processing", NANORAD 2017, 2017
2. Kota Ito, Hiroshi Toshiyoshi, and Hideo Iizuka, "Thermal Emission Control by Subwavelength Structures: Tiled MIM Resonators for Parasitic Suppression and Graphene Plasmon toward Active Beaming", NANORAD 2017, 2017
3. Kota Ito, Kazutaka Nishikawa, Atsushi Miura, Hideo Iizuka, and Hiroshi Toshiyoshi, "Thermal devices based on electromagnetic heat transfer", The 24th international commission for optics (Invited), 2017.
4. Kota Ito, Hiroshi Toshiyoshi, and Hideo Iizuka, "Metal-Insulator-Metal Metamaterial Thermal Emitter with the Suppression of the Parasitic Modes", MRS spring meeting, 2017
5. Kota Ito, Kazutaka Nishikawa, Atsushi Miura, Hideo Iizuka, and Hiroshi Toshiyoshi, "Toward Radiative Thermal Information Processing: Multilevel Memory and Near-Field Effect", MRS spring meeting, 2017

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 晃太 (KOTA, Ito)

株式会社豊田中央研究所・フロンティア研究
領域

研究者番号：70463685

(2) 研究協力者

年吉 洋 (HIROSHI, Toshiyoshi)

東京大学 生産技術研究所

研究者番号：50282603