表面微細構造を有する平行平板間における 近接場熱ふく射エネルギー輸送の実験検証

Experimental study of near-field radiative heat transfer between parallel plates with micro structured surface

○学 居城 俊和 (長岡技科大院) 正 山田 昇 (長岡技科大)

Toshikazu Ijiro, Graduate School of Energy and Environmental Science, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188, Japan

Noboru Yamada, Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188, Japan

We have measured near-to-far field radiative heat transfer between two macroscopic SiO₂ plates with and without micro-cavity at the surface by using highly precise and accurate optical gap measuring method. These experiments, conducted near 300 K, have measured the heat transfer as a function of separation over 1.0 μm to 50 μm and as a function of temperature differences between 4.1 and 19.5 K. The experiment results are in good agreement with theoretical results. In addition, we investigated effect of micro-cavity at dielectric emitter/receiver surface on near-to-far field heat transfer by comparing flat emitter/receiver. The result indicated that the micro-cavities at the surface aggravated near-field radiative heat transfer in small gap separation.

Key Words: Radiative heat transfer, Near-field, Micro-nano structure

1. 緒言

近年、近接場熱ふく射に関する研究が注目されている。近接場熱ふく射とは、放射体から遠方へ伝搬する通常のふく射とは異なり、放射体近傍にのみ存在する非伝播性のふく射成分である。そのエネルギー密度は放射体表面へ近づくにつれ指数関数的に増加し、放射体のごく近傍ではプランク則を超えるエネルギー輸送が行われる^(1,2)。この特異なふく射特性を利用した熱デバイスの研究・開発が進められている。例えば、放射体と熱光起電力 (Thermophotovoltaic: TPV) セルを 1 μm 以下まで近接させ、近接場成分によって出力密度が向上するナノギャップ TPV セルが花村らによって報告されている⁽³⁾。また、鈴木らによってギャップを MEMS によって制御した宇宙用アクティブラジエータが報告されている⁽⁴⁾。これらの近接場熱ふく射を利用したデバイスのさらなる高性能化、高機能化を果たす 1 つの方法としてふく射伝熱面にマイクロスケールの微細構造を付与することが考えられる。

本研究では、表面微細構造が近接場ふく射熱交換に与える影響を実験的に検証することを目的とする。表面微細構造の無い高平滑ガラス基板、および表面にマイクロキャビティを施したガラス基板間の近接場熱ふく射エネルギー輸送量を測定し、微細構造が与える影響を定量的に評価した結果について報告する。

2. 実験装置

2-1 実験装置構成 図 1 に実験装置の概要を示す。本実験装置は真空チャンバー、キネマティックホルダ、直動ステージ、ヒーター、ギャップ計測光干渉計からなる。真空チャンバーの観察窓越しに干渉計の光束を入射し、ギャップサイズに依存した干渉波形からレシーバ/エミッタ間ギャップを測定する。ギャップ計測分解能は 1 nm である。干渉計ヘッド部は XYZ 目盛付きステージに装着されており、ステージを動かすことでギャップをスキャンする。レシーバとエミッタ裏面にそれぞれ線径 $\phi 0.1 \text{ mm}$ の K 型熱電対が 2ヶ所取り付けられている。エミッタ裏面にポリイミドフィルムヒーターが接着され、樹脂製スペーサを介してキネマティックホルダにマウントされている。キネマティックホルダはピエゾ素子で駆動しエミッタ/レシーバの平行度を調整し、その角度分解能は 1 μrad ($= 5.73 \times 10^{-5}^\circ$) である。基板ホルダーは直動ステー

Fig. 1 Experimental apparatus.

Fig. 2 Macroscopic and SEM image of emitter / receiver with rectangular micro-cavity.

ジによって前後に移動し、エミッタ/レシーバ間ギャップを制御する。なお、直動ステージが動作しても平行度は変わらない。直動ステージはピエゾ素子で駆動し、その最小移動量は $50 \pm 10 \text{ nm}$ である。安定化直流電源を用いてヒーターに電流を印加し、ジュール熱によってエミッタを加熱する。レシーバは厚さ 1.0 mm の銅板を介して真空チャンバー内壁に取り付けられており、レシーバ温度を低温に保つ。銅板には $\phi 5.0 \text{ mm}$ の穴が 5ヶ所設けられており、その穴を通して光束を通すことでギャップを計測する。

Fig. 3 Radiative heat transfer coefficient vs gap thickness. The emitter and the receiver temperatures (T_h and T_c) are (a) $T_h = 307.3$ K, $T_c = 303.2$ K, (b) $T_h = 312.1$ K, $T_c = 303.3$ K, (c) $T_h = 323.2$ K, $T_c = 303.7$ K. BB means blackbody radiation theory.

エミッタとスペーサは密着しているため熱伝導によりスペーサへ熱が逃げ、熱損失となる。そこでスペーサ外周にニクロム線を巻きつけ加熱し、エミッタ温度とスペーサ/エミッタ間に挿入した熱電対温度との差を小さくすることで断熱する。線径 0.2 mm、長さ 1 m のニクロム線をスペーサへ巻きつけた後、光感光性樹脂を用いて封止する。スペーサは中空となっており、肉厚は 1.5 mm である。スペーサとエミッタの接触部は五徳のような加工を施し接触面積が最小限になるようにしてある。その接触面積は 22.5 mm² であり伝熱面積の 5% にあたる。

2-3 エミッタ/レシーバ 本研究では面精度 $\lambda/20$ 、直径 25 mm、厚さ 5 mm の SiO₂ 基板をエミッタ/レシーバとして用いた。図 2 に示すように同じ仕様の基板表面の一部に電子線リソグラフィとエッチングによってキャビティ加工を施した。無加工のフラットな面でギャップを計測する。平板サンプルとキャビティ加工サンプルをそれぞれ 2 枚用意し、お互いに対向させてふく射熱交換を行った。誘電体表面にこのような微細構造があることで物体内部からのふく射が界面で散乱され、近接場による熱交換量の増大が平板よりも小さくなると予想される。

2-3 実験手順 まずエミッタ/レシーバ間ギャップを約 100 μ m に保ち、ギャップをスキャンしながら鉛直、水平方向の傾きが $5 \times 10^{-4}^\circ$ 以下になるよう平行度を調整する。平行度を調整後、ギャップを約 1 μ m に設定し測定を開始する。エミッタ/レシーバ温度、ヒーター出力、チャンバー内壁/外壁温度、スペーサ温度を記録しながら、ステージ後退と熱平衡状態への到達を繰り返す。エミッタ温度は PID 制御により一定に保たれる。測定中は真空ポンプを稼働し続け、チャンバー内圧力を $4 \sim 5 \times 10^{-4}$ Pa に維持した。

3. 実験結果と考察

3-1 ふく射熱伝達率 ふく射熱伝達率 h をエミッタ温度 T_h 、レシーバ温度 T_c 、伝熱面積 A 、ヒータ発熱量 Q_{heater} を用いて次式を用いて求めた。

$$h = \frac{Q_{heater} - Q_{loss}}{A(T_h - T_c)} \quad (1)$$

ここで Q_{loss} は熱損失であり、スペーサへの熱伝導損失、非熱交換面(エミッタ裏面、側面)のふく射損失が含まれる。 $Q_{heater} = 49.7$ mW の時、 $Q_{loss} = 8.2$ mW である。

3-2 平板エミッタ/レシーバ 表面に微細構造の無い平板エミッタ/レシーバの実験結果を図 3 に示す。この図よりギャップ 1~50 μ m の範囲で理論解析結果⁽¹⁾と非常によく一致して

いることがわかる。また、ギャップ 2 μ m 以下では T_h 、 T_c から計算される黒体ふく射を超える熱伝達率が確認され、ギャップ約 1.5 μ m において温度差が小さい順に $h = 8.97, 9.52, 9.01$ W/m²K と黒体ふく射限界の 1.4 倍の熱伝達率が確認された。

3-3 キャビティエミッタ/レシーバ 図 3 に図 2 に示すマイクロキャビティ状に加工したエミッタ/レシーバの実験結果を示す。平板同士の結果と同様にギャップ 10 μ m 以下において近接場効果による熱伝達率の向上が確認できたが、その向上率は平板同士よりも低い。また、遠方場での熱交換が支配的なギャップ 10 μ m 以上では、平板同士よりも熱伝達率が高いことがわかる。同一材料でも表面状態によって放射率は異なり、一般的に研磨面よりも粗面の方が高くなる。遠方場が支配的な領域において熱伝達率が平板(研磨面)よりも高くなっているのは表面がキャビティ状になったことで研磨面よりも放射率が高くなったからだと考えられる。一方近接場が支配的なギャップ 10 μ m 以下ではキャビティによって全反射が阻害されることで近接場が占めるエネルギー割合が相対的に低下したことが原因だと考えられる。ある屈折率を持った物体内部から伝播する電磁波(ふく射)は全反射条件を満たす場合、表面で反射する。その際物体界面へ沿うように近接場が発生する。物体界面が平面で無い場合は反射せずに散乱され遠方場へと変換される、つまり近接場が占めるエネルギー割合が小さくなると予想されるが、その予想と一致する結果を得た。

4. 結言

平板ならびにキャビティを持つ誘電体エミッタ/レシーバ間のふく射熱伝達率のギャップ依存性を実験的に検証し、キャビティの存在によって近接場による熱伝達率向上率が小さくなること示した。今後は金属表面における微細構造の影響を同様な手法を用いて実験的に検証したい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費・挑戦的萌芽研究 25630065 および JSPS 特別研究員奨励費の助成を受けた。また、有益なご助言を頂いたふく射勉強会の各位にも記して謝意を示す。

引用文献

- (1) D. Polder & M. Van Hove, Phys. Rev. B 4, (1971) 3303.
- (2) R. Ottens, et.al., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 014301.
- (3) 芦田, 吉田, 花村, 機論(B), 79-799 (2013), 229.
- (4) A. Ueno, and Y. Suzuki, Int. Workshop on Nano-Micro Thermal Radiation (2012), 72.