

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630065

研究課題名(和文) マイクロナノ複雑構造が実現する近接場ふく射エネルギー輸送量の飛躍的増大

研究課題名(英文) Enhancement of near-field thermal radiative heat transfer by micro-nano structures

研究代表者

山田 昇 (Yamada, Noboru)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90321976

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)：近年、微細構造によるふく射制御に関する研究が進められている。通常、ふく射熱流束はプランク則で律速され、ふく射によるエネルギー輸送量を増大するためには何らかのブレイクスルーが必要である。

本研究では、プランク則の限界を超える方法として近接場に注目し、マイクロスケールギャップの平行平板の表面に矩形空洞構造を付与すると、近接場領域において共鳴効果が発現し、Au平板同士と比較して約30倍の伝熱量が得られることを実験によりはじめて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Recently, the advanced control of thermal radiation by using micro-nano structures is of interest. A breakthrough technique is necessary to drastically enhance the radiative heat transfer because the radiative heat transfer flux is generally limited by Planck's law.

In this study, we focused on the combination of a metal micro-cavity structure with near-field effect. As a result of experiment, 30 times greater radiative heat flux was demonstrated between parallel plates with micro-scale gap. This is the first experimental demonstration of near-field thermal radiation with micro-nano structures.

研究分野：熱工学

キーワード：ふく射 近接場 熱輸送 エネルギー変換

1. 研究開始当初の背景

最近のふく射伝熱研究で注目されているのが近接場効果によるナノギャップ間のふく射伝熱制御である。物体同士をどんどん近づけていくと通常のふく射伝熱を超える。このとき、通常は遠方に伝わらない物体表面のエバネッセント波が光子トンネリングによって物体間で急激に伝わるようになる。つまり、近接場ではプランクの法則が破られる。

この現象は、ふく射伝熱のより高度な制御、ナノイメージング、熱のダイオード、熱光起電力発電 (TPV) の高性能化、ナノ加工、ふく射ヒートポンプなど応用例が広く、研究が加速している。

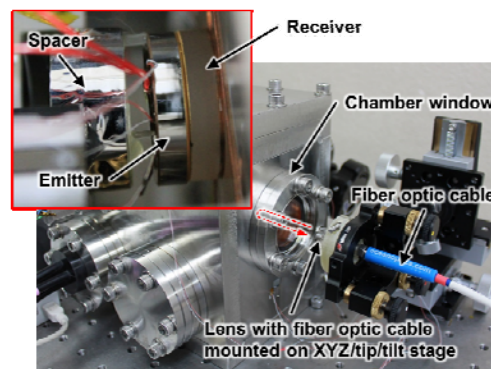
2. 研究の目的

本研究では、マイクロナノスケールの複雑構造がナノギャップ間のふく射エネルギー輸送量を飛躍的に増大することを解析および実験で立証することを目的とした。遠方場において波長選択性が確認されているマイクロキャビティ構造に着目し、平板上に構造を実際に製作し、ギャップ制御・計測に精度の高い新手法を用いて、従来の平板間ふく射伝熱に対して輸送量の飛躍的な増大が見られるかどうかを検証した。

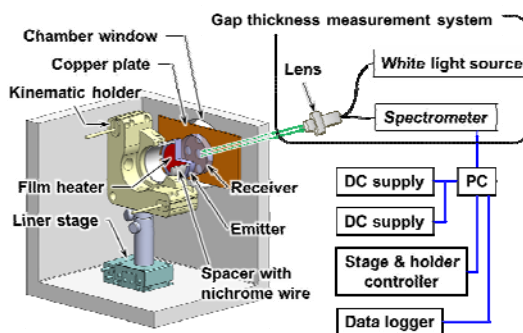
3. 研究の方法

3-1. 実験装置

図1に実験装置全体の概要を、図2にエミッタ/レシーバ周辺部の断面模式図をそれぞれ示す。本実験装置は真空チャンバー、キネマティックピエゾホルダ、直動ピエゾ1軸ステージ、ポリイミドフィルムヒーター、ギャップ計測光干渉計、ソースメーターで構成されている。本装置を用いて真空中で高温物体 (エミッタ) と低温物体 (レシーバ) の温度差を一定に保持し、ギャップに依存した熱ふく射熱流束を評価した。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エミッタ/レシーバ間ギャップ



(a) 実験装置システム構成図



(b) 外観およびエミッタ/レシーバ部拡大写真

図1 実験装置概要

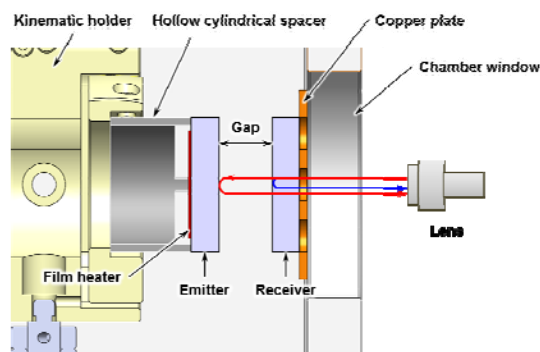


図2 エミッタ/レシーバ部断面模式図

を精密に測定した。干渉計のレンズ部はチャンバー外側に設置してある目盛りXYZ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面内方向へスキャンでき、それによりエミッタ/レシーバ間の傾きを定量化できる。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 $1 \mu\text{rad} (= 5.73 \times 10^{-5}^\circ)$ である。キネマティックピエゾホルダは直動ピエゾステー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した。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 piezo 素子で駆動し、その最小移動量は $50 \pm 10 \text{ nm}$ である。エミッタは裏面に直径 25 mm 、肉厚 1.5 mm の中空スペーサを介してホルダに取り付けられている。さらにエミッタ裏面には直径 20 mm のポリイミドフィルムヒーターが取り付けられており、ジュール熱によって加熱を行った。直径 0.1 mm の K 型熱電対を 2ヶ所エミッタとヒーターの間に挿入し、温度測定および制御を行った。電流分解能 $5 \mu\text{A}$ のソースメーターを用いて PID 制御によりエミッタ温度は一定に保たれる。レーザーは厚さ 2 mm の銅板を介してチャンバー内壁に取り付けられており、エミッタから受け取った熱量をチャンバーへ散逸させることでその温度を低温に保つ。レーザー温度も同様に直径 0.1 mm の K 型熱電対を 2ヶ所レーザーと銅板の間に挿入し、温度を取得した。LabVIEW プログラムにより piezo ステージ/ホルダへの信号、温度、ヒーター印加電流および抵抗を取得・制御を行った。真空チャンバーは ISO クラス 6 のクリーンブース内に設置し、エミッタ/レーザーをセットするまでにふく射伝熱面へ微粒子が付着しないようにした。

3-2. ギャップの精密測定方法

分光干渉計を用いてギャップを精密に測定する方法を新たに構築した。その光学配置を図 3 (a) に示す。ハロゲンランプの白色光 ($400\text{-}1000 \text{ nm}$) を光ファイバーによりアクロマティックレンズへ導光し、レンズから射出された光はエミッタ/レーザー間の微小ギャップで多重反射され、多重反射した光は再びレンズを通り、光ファイバーを介して分光器へ導光される。分光器で取得した反射スペクトルは微小ギャップにのみ依存した干渉波形を示し、フーリエ変換された干渉波形の最大値が微小ギャップに対応する。

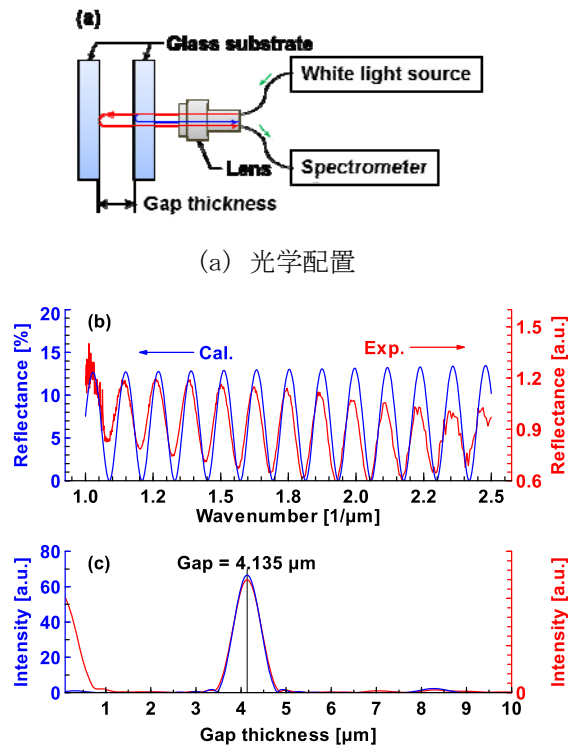


図 3 分光干渉を用いたギャップ計測システム構成図

本システムの測定可能範囲は $0.5 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ 、分解能は 1 nm である。白色光を長波長側へシフトする、あるいは分光器の波長分解能を高くすることでより広い範囲でギャップ測定が可能になる。また、アクロマティックレンズによって集光するためギャップ測定スポット径は約 1 mm である。したがって本システムは局所的なギャップを測定することができ、測定位置を走査することでエミッタ/レーザーの平行度を測定することが可能である。白色光を用いた光干渉計により分解能 0.1 nm のガラスギャップ測定が実現されるなど、分光干渉方式を用いることで精密に測定することが可能である。測定の一例として図 3 (b) に石英平板間の真空ギャップにおける分光反射率(干渉波形)を示す。青線はギャップ $4.135 \mu\text{m}$ の理論計算結果で

あり、赤線は実験中に取得した反射率である。フーリエ変換した干渉波形を図3(c)に示す。どちらの干渉波形もギャップ $4.135\ \mu\text{m}$ にピークを持っており、測定した干渉波形をフーリエ変換することでギャップを定量化できる。

3-3. 試料

下記に示すエミッタ/レーザの組み合わせで実験を行い、平行平板間での精密な理論比較検証と表面微細構造が与える影響について調査した。

1. 平板エミッター-平板レーザ (Flat - Flat)
2. キャビティエミッター-キャビティレーザ (Cavity - Cavity)
3. 金キャビティエミッター-金キャビティレーザ (AuCavity - AuCavity)
4. 金キャビティエミッター-金平板レーザ (AuCavity - AuFlat)

平板エミッタ/レーザとして直径 25 mm, 厚さ 5 mm の石英基板を用いた。ふく射伝熱面の面精度は $\lambda/20@633\ \text{nm}$ であり、これは伝熱面において一番高い所と一番低い所の高低差が 32 nm 以内であることを示す。同じ仕様の基板を用いて伝熱面へ $5 \times 5 \times 5\ \mu\text{m}$ の矩形キャビティを施した基板をキャビティエミッタ/レーザとして用いた。その外観と SEM 像を図4に示す。ふく射伝熱面に対して 62.4% を占める $17.5 \times 17.5\ \text{mm}$ の領域にキャビティ加工を施した。さらにこのキャビティ基板に対してスパッタリングにより金を成膜した基板を金キャビティエミッタ/レーザとして用いた。金膜厚は $0.62\ \mu\text{m}$ である。図5に外観および模式断面図を示す。キャビティ加工が施されたエミッタ/レーザを評価するときは平坦面の位置が合うように位置調整をした。したがってキャビティの壁の向きがエミッタ/レーザで揃っている。また、未加工の平坦部でギャップを測定し、平行度

を調整した。

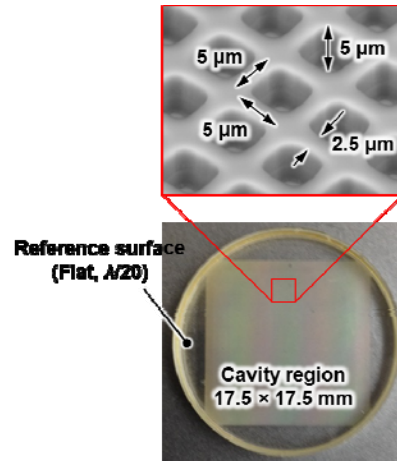


図4 矩形キャビティを加工したエミッタ/レーザ外観写真およびSEM像

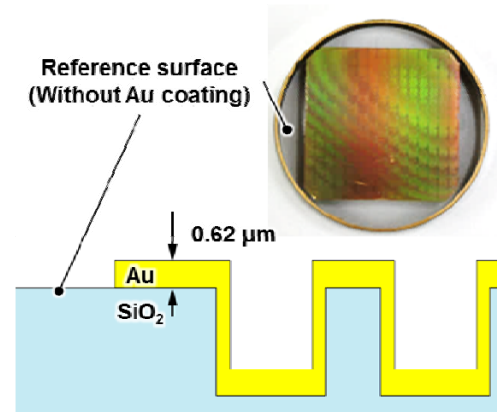


図5 金キャビティエミッタレーザの外観および模式断面図

3-4. 実験手順

はじめに、エミッタ/レーザ間ギャップを約 $100\ \mu\text{m}$ に保ち、ギャップをスキャンしながら鉛直、水平方向の平行度が 5×10^{-4} 以下になるよう平行度を調整した。次にヒーター印加電流の PID 制御を開始し、目標温度へと昇温させながらおよそ 3 時間かけて実験系全体を熱平衡状態へ到達させる。熱平衡状態へ到達後、平行度を確認しながらギャップを小さくし、ギャップ約 $1\ \mu\text{m}$ に設定した。これを初期状態とし、その後ステージを後退させてギャップを拡大し、1 時間かけて熱平衡状態への到達を繰り返すことでふく射熱流束 q のギャップ

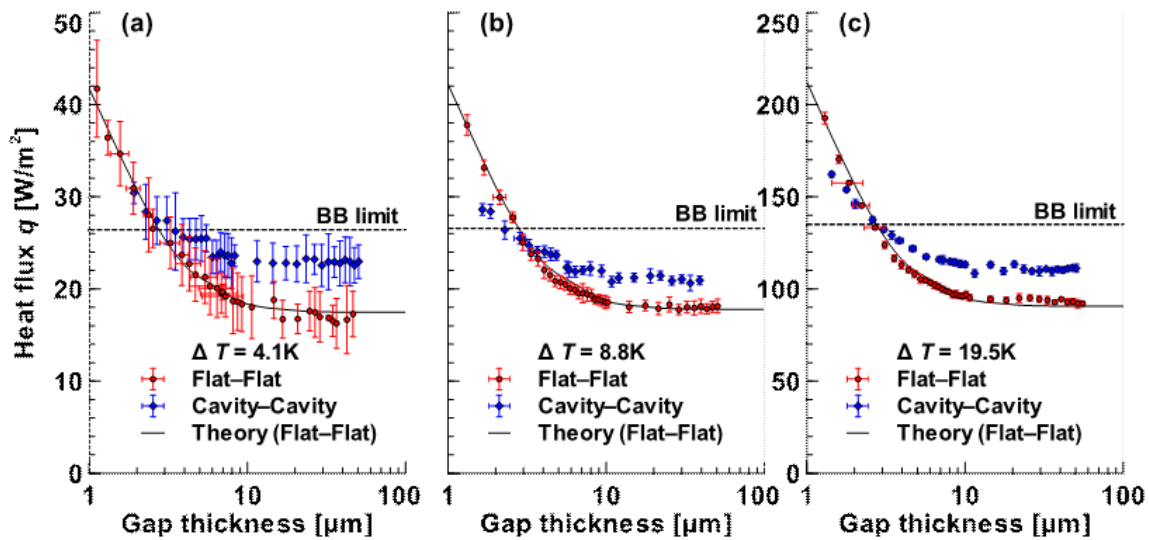


図6 ふく射熱流束のギャップ依存性. 実線は理論計算結果を示し, 各測定点のエラーバーは平均時間中の $\pm 3\sigma$ を示す. エミッタ温度 T_h , レシーバ温度 T_c はそれぞれ (a) $T_h = 307.3$ K, $T_c = 303.2$ K, (b) $T_h = 312.1$ K, $T_c = 303.3$ K, (c) $T_h = 323.2$ K, $T_c = 303.7$ Kである.

BB limitは黒体ふく射限界を示す.

依存性を取得した. エミッタ温度はPID制御により一定に保った. 実験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, また測定中のチャンバー温度を 30°C (303.2 K) に維持した. 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自動的に測定を行った.

4. 研究成果

4-1. 金膜なしエミッタ/レシーバの場合

図6に各温度差における Flat - Flat のふく射熱流束のギャップ依存性を示す. 厳密解と非常に良く一致していることがわかる. 測定点は熱平衡状態時での10分間の平均値を採用し, 平均時間内で得られた測定値の $\pm 3\sigma$ をエラーバーとして示してある. この実験結果からわかるように, ギャップ $2 \mu\text{m}$ 以下においては黒体ふく射限界を超える熱流束が得られている. 各温度差条件で得られた最大熱流束はそれぞれ 43.1 W/m^2 , 94.5 W/m^2 , and 192.7 W/m^2 であり, 黒体ふく射限界の1.4倍である.

得られた実験結果と厳密解を比較し絶

対誤差を求めた. $\Delta T = 4.1$ Kの条件において, 最大誤差は 1.85 W/m^2 , 平均誤差 0.55 W/m^2 である. 一方, 既報の実験結果 ($\Delta T = 6.8$ K) での最大/平均誤差はそれぞれ 11.0 W/m^2 , 4.4 W/m^2 であり, 本研究で提案したギャップ測定手法により精度が1桁向上している. ギャップ測定のバラつき ($\pm\sigma$) は本研究では最大で $0.138 \mu\text{m}$ 以下であり, 従来研究の $1/10$ の値であり非常に安定したギャップ測定がなされた. このように, 分光干渉方式による精密なギャップ測定により低温度差においても精密に理論検証を行うことができた. また, エミッタ/レシーバ間の平行度は少なくとも $8.6 \times 10^{-4}^\circ$ 以下であり, 幾何学的な関係からエミッタ/レシーバは接触していない. 平行度はギャップ測定点の距離と, 局所ギャップから算出した.

図6には Cavity - Cavity のふく射熱流束のギャップ依存性も示している. ギャップ $10 \mu\text{m}$ 以上の遠方場ふく射が支配的な領域では Flat - Flat に対して1.2倍の熱流束が得られた. 一方, ギャップが小さくなる (近接場ふく射が支配的になる) につれ

近接場効果による熱流束の向上は相対的に低下した。

4-2. 金膜ありエミッタ/レシーバの場合

図7に AuCavity - AuCavity の測定結果を示す。ギャップ 3 μm 以下で急激にふく射熱流束が向上していることがわかる。一方、石英基板上に同じ厚さの金膜を付与した金平板をレシーバにした場合 (AuCavity - AuFlat) では熱流束は向上しなかった。これは AuCavity - AuCavity では、ギャップ極小時においてエミッタ/レシーバのキャビティ構造間で共鳴が生じ、近接場成分が効率よくエミッタからレシーバへ伝わるためであると考えられる。ギャップ約 1 μm では金平板同士 (理論) と比較して最大で約 30 倍にふく射伝熱量が向上した。このようなキャビティ構造による近接場ふく射熱輸送量の増大については従来研究において理論解析により可能性が示唆されていたが、実験的に検証したのは今回が初めてである。

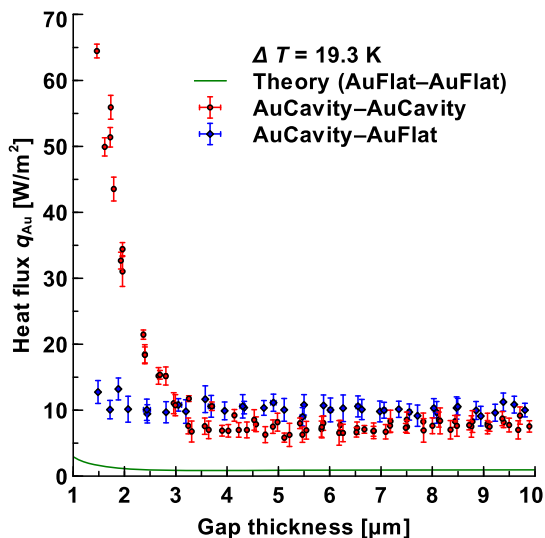


図7 金膜ありエミッタ/レシーバのふく射熱流束のギャップ依存性。
 $T_h = 322.8 \text{ K}$, $T_c = 303.5 \text{ K}$.

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 1 件)

- ① Ijiro Toshkazu, Noboru Yamada, Near-field radiative heat transfer between two parallel SiO_2 plates with and without microcavities, *Applied Physics Letters*, 106, 023103 (2015); doi: 10.1063/1.4905601

[学会発表] (計 2 件)

- ① 居城俊和, 山田昇, 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, 第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2014. 5. 21-23), 講演番号 FSP403
- ② 居城俊和, 山田昇, 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, JSME 第 6 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集 (2014. 10. 20-22), 講演番号 20pm3-PM14.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 昇 (YAMADA, Noboru)
 長岡技術科学大学・大学院工学研究科・
 准教授
 研究者番号: 90321976

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

明田川 正人 (AKETAGAWA, Masato)
 長岡技術科学大学・大学院工学研究科・
 教授
 研究者番号: 10231854

高原 淳一 (TAKAHARA, Junichi)
 大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・
 教授
 研究者番号: 90273606