

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820058

研究課題名(和文) サブミクロン領域における近接場熱ふく射現象の解明と放射率可変デバイスへの応用

研究課題名(英文) Study on Near-field Thermal Radiation in Submicron Range and Application of Active radiation device

研究代表者

上野 藍 (UENO, Ai)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：50647211

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、人工衛星のミッションの多様化に伴い、宇宙空間における急激な温度変化に柔軟に対応可能なラジエータが望まれている。

本研究では、間隔をサブミクロン以下に近づけたときに発現する近接場効果を利用可能なデバイス設計、試作方法の検討および試作デバイスの性能評価を行った。設計では、隣接するダイアフラム間ではねを共有することで従来のMEMSラジエータよりも開口率(放射面積/全面積)を89%まで向上させた。さらに、加熱実験では、ON/OFF状態でのダイアフラムの温度変化は近接場効果により58.0 から 106.4 まで変化し、熱流束変化に換算するとON状態では144%増加することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Radiation control is crucial to maintain the operation temperature of satellites under varying irradiation of sunlight. Previously, bulky heat exchangers with heat pipe or thermal louvers/shutters with a low fill factor are proposed for the task, although they are not suitable for next-generation small satellites. In the present study, we propose an array of electrostatically-driven MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) diaphragms for active control of thermal radiation using the near-field effect. We have successfully fabricated a prototype with parylene shared springs and achieved a fill factor of as high as 89%. It is found that at the ON state, the diaphragm temperature is increased from 58.0 to 106.4, showing 144% enhancement in the radiation heat flux.

研究分野：熱工学

キーワード：熱ふく射 近接場 ナノギャップ MEMSラジエータ

1. 研究開始当初の背景

近年、伝熱現象を動的に制御する「スマート熱制御」が注目されている。例えば、ミッションが高度化する小型人工衛星において、太陽光の熱入力や内部機器の発熱量が時間的に変化しても温度を一定に保つためには、宇宙空間への放熱量を動的に制御できるラジエータが必要である<sup>[1,2]</sup>。既存のサーマルルーバなどの放射率可変ラジエータでは、デバイスの全面積に対する放射面積の割合で定義される開口率が50%以下であり、かつ重量が重いため、特に小型衛星への適用に問題があった<sup>[3]</sup>。また、MEMSシャッターなども提案されているが、同様に開口率が小さいという問題があった。このため、放射率が温度に依存して変化する小型衛星用の次世代型ラジエータの開発が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、黒体放射を超える大きな熱エネルギー輸送が可能な近接場放射を用いて、小型、軽量かつ低電圧駆動する宇宙用放射率可変型のMEMSラジエータ(熱スイッチ)の実現である。特に、本研究費の交付期間中は(1)材料の違いによる近接場効果の定量化および最適材料の検証、(2)新たなMEMSラジエータの設計と試作、(3)MEMSプロトタイプによる近接場効果の熱スイッチ応用への実験的評価を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 近接場効果の定量化と材料の選定

近接場効果が取得可能なプロトタイプデバイスをMEMS技術により試作し、実験により近接場効果の実証を行う。さらに、MEMSラジエータとしての最適材料探索のため、数値解析により候補材料を絞り込み、実験評価により最適材料の選定を行う。

(2) 新たなMEMSラジエータの設計/試作

(1)で選定した材料に合わせて、MEMSラジエータの詳細設計および試作を行う。

(3) MEMSラジエータの性能評価

MEMSラジエータの熱的評価実験装置の構築を行い、熱デバイスとしての性能評価を行う。宇宙模擬環境下における本デバイスの近接場効果制御による可変放熱特性を明らかにする。

4. 研究成果

本研究では、隣接するダイアフラム間でばねを共有することで従来のMEMSラジエータよりも開口率を向上させ、かつON状態で近接場効果が期待できるMEMSラジエータの設計を行い、プロトタイプの試作および熱的評価の結果を報告する。

(1) 近接場効果の定量化および最適材料の選定

近接場光とは表面ごく近傍に発生する非伝搬光であり、遠方場の熱放射での上限である黒体放射を超える大きな熱輸送が可能となる<sup>[4-6]</sup>。本研究では、図1のような近接場効果を用いた宇宙用可変ラジエータを提案する。ばねで支持されたダイアフラムを静電場により駆動することにより、基板-ダイアフラム間の間隔を制御し、実効放射率を変化させる。

2枚の向かい合った放射面の間隔が熱放射の波長より十分に広い場合、基板の温度、放射率を $T_1, \epsilon_1$ 、ダイアフラム内側の温度、放射率を $T_2, \epsilon_2$ 、ダイアフラム外側の温度、放射率を $T_3, \epsilon_3$ とすると、放射熱流束 $q_3, q_{2, \text{far}}$ は、

$$q_3 = \epsilon_3 \sigma T_2^4, \quad q_{2, \text{far}} = \frac{2\sigma\epsilon_1\epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)} (T_2^4 - T_1^4) \quad (1)$$

となる。ダイアフラムが薄いことから、 $T_3 = T_2$ 、また、 $q_3 = q_{2, \text{far}}$  から  $T_2$  が求まり、基板温度  $T_1$  を基準とした実効放射率  $\epsilon_{\text{eff}}$  は

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_3 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4 \quad (2)$$

で与えられる。

一方、ギャップが熱放射の波長よりも小さい場合、近接場光効果<sup>[7]</sup>により、放射熱流束 $q_{2, \text{near}}$ は、

$$q_{2, \text{near}} = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty \{ \Theta(\omega, T_1) - \Theta(\omega, T_2) \} \int_0^\infty Z_{12}(\beta) \beta d\beta d\omega \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $\Theta, Z_{12}, \beta, \omega$ は、それぞれプランクプランク振動子の平均エネルギー、交換関数、波数ベクトルの平行成分、周波数である。 $q_3 = q_{2, \text{near}}$  から  $T_2$  が求まり、遠方場と同様に実効放射率  $\epsilon_{\text{eff}}$  が算出される。

本研究では近接場効果およびMEMSプロセスに適切な材料選定を行う必要がある。材料選定では、近接場効果の熱流束計算を実際のデバイスモデルに則した多層型計算モデルに改良した。計算のアルゴリズムは、1次元の多層構造における近接場熱ふく射モデルに基づいて、Francouerら<sup>[8]</sup>のモデルを参考に

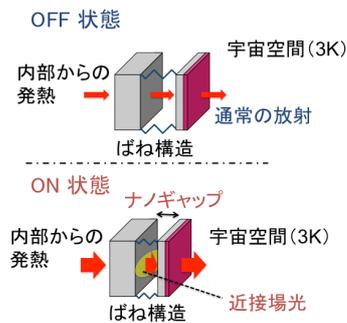


図1 近接場効果を用いたMEMSラジエータの概念図。

し、本研究のデバイス条件に合う様に以下 2 点の変更を行った。

変更点 1：適応型求積法を適用

変更点 2：材料の誘電率は実験値<sup>[9, 10]</sup>を適用

材料としては、上部電極金属として、Cu からより熱伝導率の小さい Ti に変更した。加えて、上下電極間の絶縁膜としてパリレン樹脂を用いていたが、より耐電圧の高い SiO<sub>2</sub> を絶縁膜として選定した。計算モデルとしては、簡易なモデルである 2 層バルクモデルおよびデバイスに則した 5 層モデルを比較し、Ti/SiO<sub>2</sub> の 2 層バルクモデルにおいて、周波数積分のみにおいて適応型求積法を用いた場合、計算時間は 1/17 程度に減少した。実際の計算では、波数積分に関しても適応型求積法を用いているため、計算負荷はさらに大幅に減少できたとと言える。また、Ti/Au, Ti/SiO<sub>2</sub> の組合せでは、熱流束スペクトル分布が大きく異なり、簡易なモデルである 2 層バルクモデルおよびデバイスに則した 5 層モデルの違いが比較的小さいことが明らかになった。本報では、計算負荷を考え、バルクモデルを用いてギャップ間隔に対応する近接場熱流束を求めた。

## (2) MEMS ラジエータの設計/試作

図 2 に新たに提案する静電駆動型 MEMS ラジエータの概略図を示す。基本的な構造は接触熱抵抗型の熱スイッチ<sup>[11]</sup>のデバイスと同じであるが、本報では近接場効果を取得するために以下の改良を行った。

1) SiO<sub>2</sub> 絶縁層の厚さを 50nm (最近接時のギャップ)

2) 隣接するダイアフラムでばねを共有

3) 上部電極として熱伝導率の低い Ti, ばね材料としてはパリレン樹脂 (diX-HR, KISCO) を採用

1) の改良点については、ON 状態で上下電極が近接し、実質的なダイアフラム-基盤間距離は電極間にある絶縁層の厚さで決まるため、従来のモデル 1.5 $\mu$ m 程度よりもさらに薄膜でかつ、耐電圧の高い SiO<sub>2</sub> (50nm) とした。

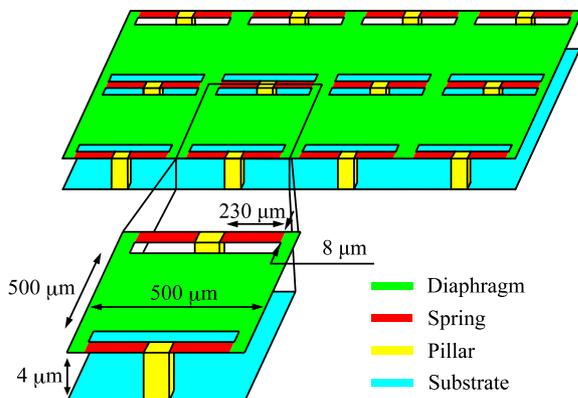


図 2 提案する MEMS ラジエータの概念図と設計値。

2) では、ばね幅を MEMS プロセスの解像度に対して余裕を持たせ、かつ開口率を高めるため、隣接するダイアフラムでばねを共有させた。

ばねの長さや幅は、MEMS ラジエータの性能に大きく関わる。特に考慮すべき項目として、a) 駆動電圧、b) 共振周波数、c) ON/OFF での熱流束変化の 3 点が挙げられる。ここでは、小型の人工衛星でも使用できるように 10 V 以下の駆動電圧、ロケット打ち上げ時などの振動で破損しないように 2 kHz 以上の共振周波数を設計条件とした。

設計条件 a) の 10V 以下の駆動電圧について、本設計では駆動電圧を平行平板間でのキャパシタモデルにより推算した。MEMS デバイスでは平行平板間が初期値の 1/3 変化すると静電引力とばねの復元力との釣り合い位置が不安定になり上下極板間が接着してしまうという Pull-in 現象が存在する。本デバイスでは駆動電圧=Pull-in 電圧として設計することで 10V 以下の低電圧駆動を実現している。

設計条件 c) については、ダイアフラムの 2 次元平面に対して有限体積法による熱解析を行い、ばねの長さや幅を系統的に変化させて、ON/OFF における熱流束変化を算出した。OFF 状態におけるデバイスの伝熱モードはダイアフラムから外部環境への熱ふく射、ばね部の熱伝導、そして、ギャップ間の遠方場熱ふく射である。一方、ON 状態ではこれらに加えて、電極間の近接場熱ふく射、接触熱伝導が関与する。ただし、計測実験を真空中で行うため、上下極板間における空気の熱伝導は無視した。

図 3 に、ばねの長さや幅に対する、ON/OFF における熱流束の比の等値線を示す。また、図中、一点鎖線は駆動電圧が 10 V となるばねの長さや幅の関係、破線は共振周波数 2 kHz となる条件を示す。従って、これらの設計条件を満たすには、2 つの線の間の領域のばねの長さや幅を選ぶ必要がある。本研究では、ばねの長さを 230  $\mu$ m、幅を 5  $\mu$ m に選んだ。このとき、熱流束比は 3.41 倍となることが期待され、開口率は 89% にまで向上する。

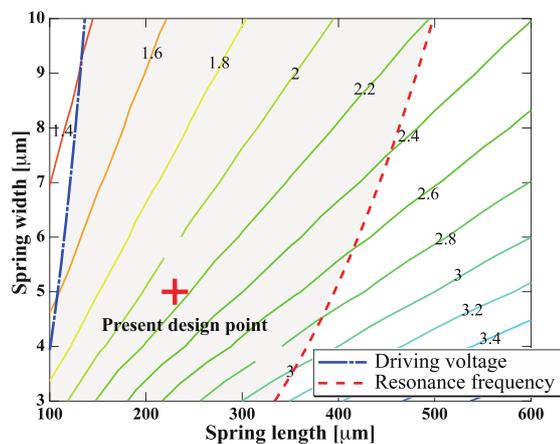


図 3 ばねの長さおよび幅による熱流束変化。

図4に試作プロセスを示す. 4インチ Si ウェハの表面を熱酸化して絶縁層を形成した後, 下電極となる Cr/Au/Cr 薄膜を形成する. 次に, SiO<sub>2</sub>を絶縁膜として堆積する. ON 状態において上下電極間で近接場効果が得られるよう, その膜厚を 50 nm とした. そして, 200 nm 厚の Si および犠牲層となる 4.0 μm 厚のフォトリソをパタニングし, 上電極となる 200 nm の Ti をスパッタにより成膜した後, 構造体となる diX-HR を 4 μm 蒸着する. 最後にダイアフラムをパタニングし, 犠牲層の除去により構造のリリースを行う.

図5に完成したデバイスの概観およびエッチングホール(拡大図)の SEM 画像を示す. 500μm 角のダイアフラムを1デバイスとすると, 1.1cm 角の中に 22 X 22 個のデバイスが配列されている. SEM 画像より, MEMS ラジエータの試作に成功したことが分かる. より詳細にギャップ間を観察するため, ダイアフラムとばね部分をレーザ表面形状計で測定し, 設計値 4 μm とほぼ同等の 4.1 μm のギャップが形成されていることを確認した. また, 犠牲層を除去するためのエッチングホールは全体の 5%以下で作製している.

### (3) MEMS ラジエータの性能評価

#### ①実験系の構築

MEMS ラジエータの熱的特性の評価を行った. 図6に 10 μm/pic の分解能をもつサーモグラフィ (FSV-1200, Apiste) を用いた熱ふく射計測系の概略図を示す. 真空チャンバはターボ分子ポンプで排気され, 圧力は  $7 \times 10^{-3}$  Pa である. サーモグラフィによる計測では, 1)フッ化バリウム窓材による赤外光の吸収, および 2)表面材料の放射率による補正をする必要がある. そこでまず, 放射率既知のサンプルを用いて加熱実験を行い, BaF<sub>2</sub>の透過率を 0.95 とした. また, Ti 表面の放射率は, ダイアフラムと同じ手法で試作されたサンプルで測定し, 100℃以上の温度領域で 0.316 と見積もった.

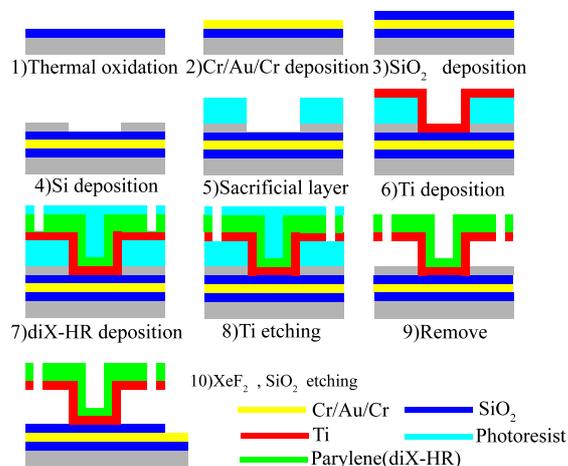


図4 試作ラジエータの MEMS プロセスフロー.

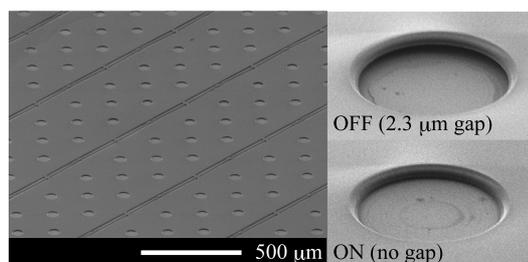


図5 試作デバイスの SEM 画像.

1チップ(約1cm角)とエッチングホール

#### ②熱ふく射計測による性能評価

図7に加熱実験結果として, MEMS ラジエータの ON/OFF 変化による熱画像を示す. OFF 状態ではダイアフラム表面の温度分布は均一であり, 表面温度は平均 58℃であった. 一方, 上下極板間が近接する ON 状態では, 温度分布は不均一となり, ダイアフラム表面温度は上昇し, 測定領域の平均温度は 106.4℃となった. ON/OFF 変化による温度上昇をデバイスの熱流束変化に推算すると, 144%程度増加したことになる. 近接場効果無しの場合, 熱ふく射によるダイアフラム表面からの ON/OFF 変化による熱流束変化は 46%と推算され, これは接触熱抵抗を用いた MEMS ラジエータの結果とよく一致する<sup>[11]</sup>. よって, 今回の ON/OFF 変化での急激な温度変化は近接場効果によるものと結論づけることが出来る. しかし, 本デバイスの推算値では近接場効果が得られた場合には, ON/OFF 変化で熱流束が最大 241%まで向上すると期待されており, さらなるプロセスの改良が望まれる.

#### (4)まとめ

本研究では, 近接場効果を利用した高開口率 MEMS ラジエータの設計および試作を行った. 隣接するダイアフラムとばねを共有することにより, 従来の MEMS ラジエータの開口率 61%から 89 %にまで向上させた.

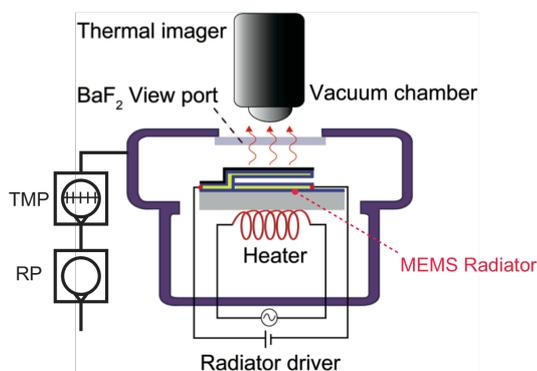


図6 熱ふく射計測装置のセットアップ.

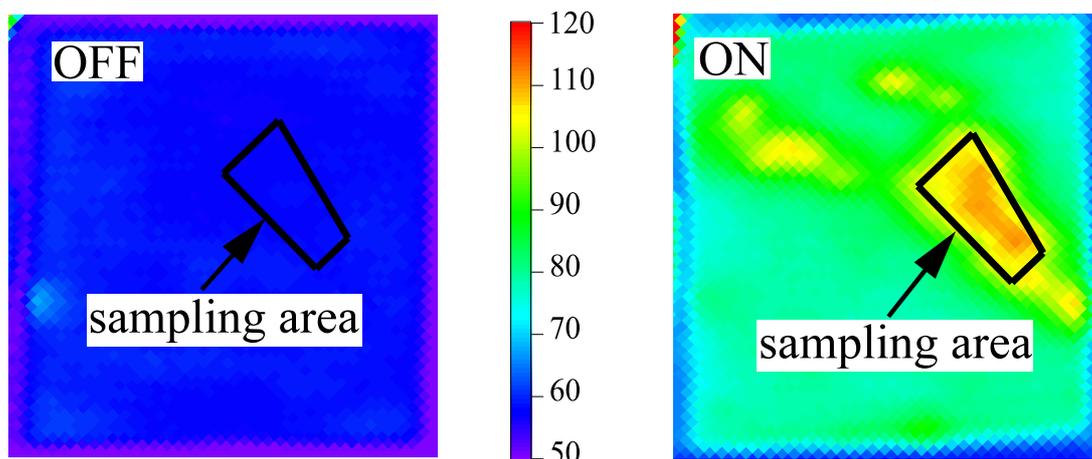


図7 MEMS ラジエータの ON/OFF 変化による加熱実験結果(熱画像)。

近接場効果を発現し、かつ試作可能な材料をデバイスモデルに則した多層膜モデルのシミュレーションから明らかにした。さらに、ばねの長さや幅がラジエータの熱流束変化にどのように寄与するかをダイアフラムの2次元平面に対して有限体積法による詳細な熱解析により系統的に推算した。上記のように、本研究では理論だけに留まらず実用デバイスへの設計指針を明らかにした。

また、パリレン樹脂を用いた表面マイクロマシニングにより、静電駆動のダイアフラム構造を持つプロトタイプの試作に成功した。さらに性能評価として、加熱実験を行い、ラジエータ表面温度が ON 状態では 58.0°C から 106.4°C まで上昇し、ON/OFF 変化によるデバイス表面からの熱ふく射による熱流束が 144% 増加することを明らかにした。

以上の研究成果は、宇宙分野に留まらず、動的制御を必要とする除熱問題に適用可能な、新たな熱制御手法であり、熱効率の高いシステムを可能にすることで省資源を可能とする技術として期待される。

#### 参考文献

- [1] A. Williams, and S. E. Palo, Proc. SPIE, 6221, (2006) 622108.
- [2] H. Demiryont, and D. Moorehead, Sol. Energy Master. Sol. Cells, 93, (2009) 2075.
- [3] D. Farrar et al, 18<sup>th</sup> Conf. IOTHERM, (2002) 1020.
- [4] E. Rousseau et al., Nature Photonics, 3, (2009) 514.
- [5] St-Gelais, R, et al. *Nature Nanotech.* doi:10.1038/nnano.2016.20 (2016).
- [6] Song, B. et al. *Nature Nanotech.* doi:10.1038/nnano.2016.17 (2016).
- [7] S. Basu et al., Trans. ASME: J. Heat Transfer, 132 (2010) 023301.
- [8] M. Francoeur, M. Pinar Menguc, and R. Vaillon, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, Vol. 110, (2009) pp. 2002-2018.
- [9] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell, S. E. Bell, R. R. Bell, R. W. Alexander, and C. A. Ward, *Appl. Optics*, Vol. 22, (1983) pp. 1099-1119.

[10] Palik, E. D, *Handbook of Optical Constants of Solids* (1985).

[11] A. Ueno and Y. Suzuki, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 104, (2014) 093511.

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 吳 承哲, 林 祐樹, 中島 寛貴, 上野 藍, 森本 賢一, 鈴木 雄二, 「共有ばねを有する近接場効果を用いた高開口率 MEMS ラジエータの開発」, 第 53 回日本伝熱シンポジウム, グランキューブ大阪(大阪府, 大阪市) 2016 年 5 月 24-26 日
- (2) Nakajima, H., Oh, S., Ueno, A., Morimoto, K., and Suzuki, Y., “Development of Near-Field-Enhanced High-Fill-Factor MEMS Radiator with Shared Springs,” 15th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2015), Boston (USA), Dec.1-4, 2015. Also, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 660, (2015), 012049.
- (3) 中島 寛貴, 上野 藍, 吳 承哲, 森本 賢一, 鈴木 雄二, 「共有ばねを用いた高開口率 MEMS ラジエータに関する研究」, 日本機化学会熱工学コンファレンス 2015, 大阪大学コンベンションセンター(大阪府, 吹田市), 2015 年 10 月 24-25 日.
- (4) Ai Ueno, Yuji Suzuki, “Thermal Radiation Characteristics in sub-micron region for MEMS Space Radiator,” 15th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-15), Kyoto (Japan), Aug. 10-15, 2014.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

上野 藍 (Ai UENO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・  
 特任研究員  
 研究者番号：50647211