

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420407

研究課題名(和文) 常温常圧でピコワット分解能のMEMS方式高速大面積光カロリメータの開発と応用

研究課題名(英文) Development and application of fast and large-area MEMS optical calorimeter at picowatt resolution in air at room temperature

研究代表者

雨宮 邦招 (Amemiya, Kuniaki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：60361531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロメカニカルなセンサに基づく、低ノイズかつ、大面積な光カロリメータを開発した。バイメタルセンサの熱変形により、光パワー入力で生じた熱量を検出するもので、その微小な変位量は高分解能な光ファイバファブリペロー干渉計で読み取る。今回、SOIマイクロマシン加工技術で作製したSi-Alの大面積(5mm角)バイメタルMEMSセンサで、光パワー検出分解能 $\sim 12\text{nW}$ を実験的に達成できた。開発したバイメタルMEMSセンサは、ジョンソンノイズフリーのため、サーモパイルでは達成できない信号対雑音比を達成できる可能性があり、原理的には、室温・大気圧下で 1nW を切る分解能が得られるものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel bimetal MEMS calorimeter as a high-sensitivity photothermal detector having large size of $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ for high-throughput optical radiometry. Prototypes of the Si/Al bimetal MEMS sensors were fabricated via SOI processes. Their thermo-mechanical displacements can be measured with a fiber Fabry-Perot interferometer. Noise equivalent power (NEP) of the sensor system was estimated to be 12 nW in air at room temperature, being comparable to the conventional thermoelectric devices. Further reduction of the NEP toward sub-nW, in principle, would be possible owing to their Johnson-noise-free merit.

研究分野：工学

キーワード：計測機器 光カロリメータ MEMS バイメタル 大面積

1. 研究開始当初の背景

光の強さを表す各種測定量、例として光束 (lm)、照度 (lx)、輝度 (cd/m²) 等は、SI基本単位である「光度」カンデラ (cd) に基としている。光度は光源の放射強度 (W/sr) を通じて定義されているため、光の強さは、まず単位ワット (W) で絶対計測することが出発点となる。

光パワーの絶対計測には、もっぱら熱型動作の放射計が用いられる。入射光パワーを全て吸収して熱に変え、その温度上昇をセンサで検出する。続いて、同じ温度上昇を示すように補償用ヒータに印加した電氣的パワーと比較することで、高精度に絶対光パワーを計測できる。こうした目的に使用できるものにサーモパイル方式熱形検出器があるが、一般にも入手しやすく、1 mW を 0.1% レベルの不確かさで測定できるものもある。一方で、サーモパイルは分散型分光測定などにおいて、マイクロワット未満の光パワーしか確保できないような場合には、信号対雑音比が必ずしも十分ではないという課題があった。これはサーモパイルの等価ノイズパワー (NEP) を低減するには、各熱電対配線について、熱浴との距離を稼ぎながら素子を薄くする必要があることから、大面積化が困難なためである。必要とされる 100 pW/√Hz 級の低 NEP は主に小型素子 (1 mm 角未満) でのみ得られている。

これを克服できるものとして、研究代表者らはバイメタル素子の熱変形を温度センサとして利用する、メカニカルカロリメトリに着目した。本方式の利点は、大面積化により NEP がむしろ低減する効果があること、及び材料選択による NEP 低減の余地がサーモパイルよりも大きいことが挙げられ、従来にない高感度大面積センサが期待できる。

研究代表者らは本研究の開始までに、有限要素法に基づく熱機械連成解析を通じて、数 mm 角サイズに及ぶバイメタル MEMS カロリメータの設計を行い、Si と Al からなるバイメタル MEMS センサの試作にも着手してきた。シミュレーション上では、センサ固有の NEP として常温常圧下でも 100 pW/√Hz を切ると期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、高スループットな精密絶対光パワー計測を可能にする、バイメタル MEMS 方式温度センサに基づいた光カロリメータ標準器を開発する。現実の測定環境を鑑み、常温常圧動作かつ、測定光ビームを漏れなく高効率に検出可能な大面積センサとしたうえで、従来型のサーモパイル光センサ等よりも高速で高感度となるよう、読出・制御方式も含めて設計の上、検出器系を構築する。これにより、分光するとマイクロワット以上の十分な光パワーを得るのが困難であった波長領域においても、0.1% レベルの不確かさで迅速に精密絶対分光パワー計測が可能となる標準を提供する。

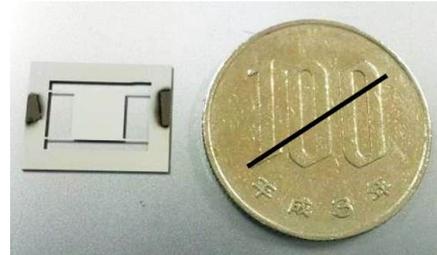
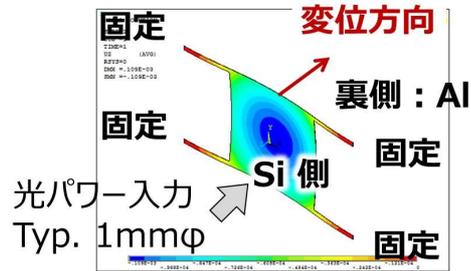


図 1: バイメタル MEMS センサの設計と試作品。

3. 研究の方法

本研究では、Si/Al バイメタルからなる MEMS カロリメータセンサを試作した (図 1)。それぞれの厚みは Si 層が 10 μm、Al 層が 1 μm で、5 mm 角の有感領域を 4 本の細いビーム (梁) で支えている。Al の熱膨張率の方が大きいことにより、センサに光が入射し加熱すると、Al 側にたわむ。センサの固有 NEP は、カンチレバー型バイメタルセンサの場合、センサ振動の熱ノイズ NEP_{vibration}

$$NEP_{\text{vibration}} \approx 4\sqrt{k_B TB} \sqrt{24\mu} \frac{K\lambda \sqrt{L}}{E\alpha t}$$

及び、フォノンノイズ NEP_{phonon}

$$NEP_{\text{phonon}} = \sqrt{4k_B T^2 BG}$$

の合成となる。しかし、本研究で試作したセンサは単純なカンチレバー形状ではなく、上記式が適用できないため、数値計算でセンサの応答度 $\not P$ 、熱コンダクタンス G 、ばね定数 k 、基本モードの振動数 $\omega_0/2\pi$ 、を求め、 Q 値の見積もりを用いて NEP を算出する。有感領域 5 mm 角の各センサについて、NEP は 64 pW/√Hz、応答時定数は 0.7 s と見積もられ、変位のパワー応答度は 5.8 pm/nW のオーダーであった。これを踏まえ、100 pW 未満のノイズレベルを得るには、センサの熱変位を検出するにあたって、サブ pm 分解能の微小変位検出が不可欠である。研究代表者らはこれまでに、バイメタル MEMS センサの微小熱変位検出系として、フィゾー干渉変位計を構築したところ、センサ系全体の NEP として数 100 nW という結果を得ていた。これは目標値に 4 桁近く足りないが、主に干渉変位計測系のノイズが原因と考えられる。

そこで、本研究ではセンサの変位計測系に、

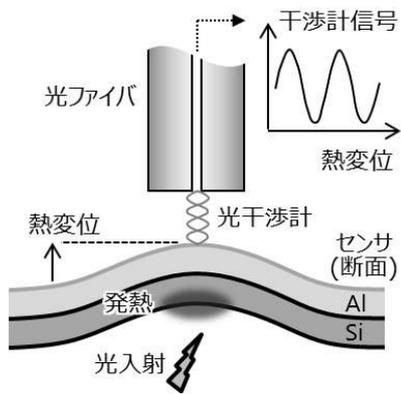


図 2：光ファイバファブリペロー干渉変位計測系の模式図。

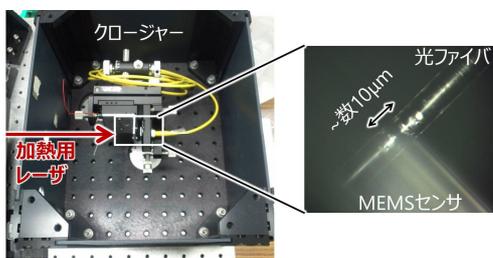


図 3：光ファイバファブリペロー干渉変位計測系を組み込んだ、バイメタル MEMS 光カロリメータの実験系。

より高分解能な変位計測が可能と期待されるファブリペロー干渉計の採用を検討した。測定系のセットアップを図 2 に示す。光ファイバ端面と、バイメタル MEMS センサ表面との間でファイバファブリペロー共振器を構築した。センサが変位することで共振器長が変化し、戻り光の出力に干渉縞(フリンジ)が生じる。ここでは 1550 nm の波長を用いたので、1 フリンジあたりの変位量は、半波長の 775 nm に相当する。光ファイバのクリップ端は多層膜ミラーコート(反射率約 90%)を施してある。出射した光が広がり散逸するのを防止しつつ、干渉縞のビジビリティをできるだけ確保するために、光ファイバ端とバイメタル MEMS センサ (Al 側) との距離が数十 μm 以内となるよう保持した(図 3)。風防のため、測定系はクロージャの中に納めたが、実験は常温大気圧下で行った。MEMS センサの変位量と干渉計信号との相関を取得するため、MEMS センサをステージ上に載せ、 piezoelectric 素子にて前後させた。その際に生じた干渉計信号の変化の様子から、変位検出系が最大感度で動作する位置に MEMS センサを保持した。

引き続き、図 3 の測定系で、加熱用のレーザーパワー入力に対する変位応答度、及び応答時定数を測定した。MEMS センサの Si 側に加熱用レーザー光(波長 0.85 μm)を入射し、Al 側のセンサシート部中心位置において、変位量の時系列データを取得した。Si は間接遷

移型半導体であるため、光吸収により生じた電子正孔対は無輻射過程を通じてほとんど再結合するため、吸収した光エネルギーは全て熱化するものと仮定した。加熱用レーザーの波長 0.85 μm において、Si の表面反射率、及び吸収係数はそれぞれ 30%、及び 0.05 μm^{-1} 程度である。表面反射を逃れた加熱用レーザービームは、厚さ 10 μm の Si 層を伝搬中に約 40% 減衰し、裏面の Al 層との境界で 86% 反射した後、Si 層による再吸収を受ける。この時、波長 0.85 μm の光に対する Al の表皮深さは数ナノメートルなので、Al 層の透過ロスは無視できる。したがって、最初の Si 表面反射、及び Al 境界面での反射光が Si 表面から再度逃げるロスする分を考慮して、MEMS センサの正味の光加熱パワーは入射光パワーの約 50% と見積もられた。入射光パワーはあらかじめ Si フォトダイオードを内蔵した光パワーメータで測定しておき、MEMS センサの信号出力と比較した。

4. 研究成果

ファイバファブリペロー干渉変位計では、プローブ用レーザー光のパワー安定度やスペクトル線幅が分解能に影響するので、本研究では温度安定化 DFB レーザ光源を用い、さらに不要なノイズを低減するためにスペクトル線幅を制御することで、0.005% 未満の干渉計信号の安定度を得た。今回構築した共振器のフィネスは、実測値で 6~7 程度と、設計値の約 20 よりは小さかったが、これはアライメントの不完全さによるものと思われる。しかし微小変位の検出には十分なものであった。バイメタル MEMS センサによる光パワー検出信号の結果例を図 4 に示す。500 nW を切る光パワーも十分に検出可能である

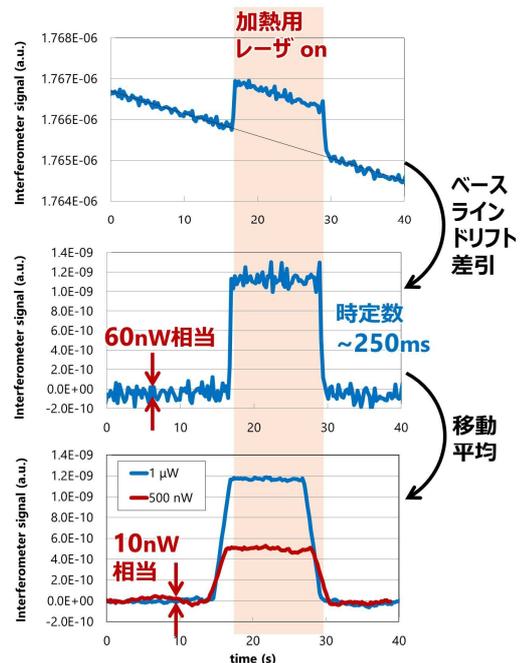


図 4：バイメタル MEMS センサによる光パワー検出信号の結果例。

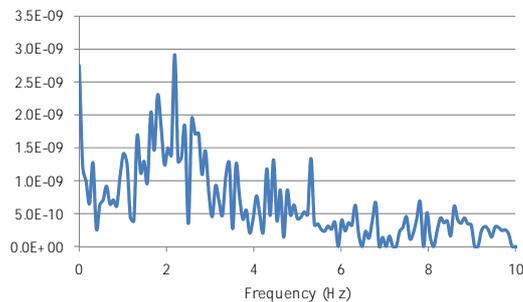


図 5：センサのノイズスペクトル。~2 Hz の超低周波領域にピークが認められる。

ことがわかった。応答時定数は 0.25 s と、設計値の 0.7 s より速かった。一方で、センサ変位のパワー応答度は 0.3 pm/nW 程度と、設計値の 1/20 程度にとどまった。センサ試作時に生じた残留応力が、機械特性に影響した可能性がある。試作プロセスに改善の余地はあるものの、5 mm 角という比較的大面積なバイメタルセンサで初めて、1 μ W を切る光パワー入力を低ノイズに検出できた。検出信号を平均化処理すると、ノイズレベルは積分時間 2.5 s で 20 nW、積分時間 10 s で 12 nW であった。これは同じサイズのサーモパイル製品と同等の性能は十分達成できたこととなる。

一方で、目標とする数十 pW のノイズレベルとは、まだ 2 桁程度の開きがある。センサ測定系のノイズ特性を詳細に調べるため、ノイズスペクトル密度を評価した。その結果を図 5 に示す。~2 Hz の超低周波領域にノイズのピークが認められる。このようなピークは、MEMS センサの代わりに堅い基板を試料としてファブリペロー干渉変位計にて測定した際には見られなかったため、MEMS センサが環境振動の影響を受けて振動しているものと示唆される。超低周波領域も除振できるアクティブ防振台上に測定系を設置して測定してみたが、図 5 のピークを十分に低減するには至らなかった。一方で、MEMS センサの周りに何らのクロージャも設置しなかった場合にはノイズレベルが大きく増加したことから、空気中を伝わってくる音圧の影響は大きく受けていると考えられた。したがって、図 5 のピークは環境中の超低周波音の影響と示唆されるが、こうした周波数域は防音が大変困難ため、何らかの別アプローチによるノイズ除去の工夫が必要である。

また、試作プロセスの見直しにより、バイメタル MEMS センサ自体の応答度を向上することも課題として挙げられる。今後、これらの改良を進め、目標とする低ノイズレベル達成を目指す。

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)

雨宮 邦招、福田 大治、沼田 孝之、田辺 稔、座間 達也、大面積高感度光パワー精密計測器としてのバイメタル MEMS 方式カロリメータの検討、熱物性、査読有、Vol. 29、No. 1、pp.19-26、2015

DOI: 10.2963/jjtp.29.19

雨宮 邦招、福田 大治、座間 達也、Very low-noise large-area calorimeter based on bimetallic micromechanical transduction: toward sub-nanowatt resolution in air at room temperature、Applied Physics Express、査読有、Vol. 9、No.11、117201、2016

DOI: 10.7567/APEX.9.117201

〔学会発表〕(計 3 件)

雨宮 邦招、福田 大治、沼田 孝之、田辺 稔、高感度光パワー精密計測器としてのバイメタル MEMS 方式カロリメータの検討 III、第 35 回日本熱物性シンポジウム、東京工業大学大岡山キャンパス、2014/11/23

雨宮 邦招、越川 博、八巻 徹也、前川 康成、薮 洋司、木下 健一、沼田 孝之、田辺 稔、福田 大治、身近な熱形放射計を目指して 微細加工を駆使した新型センサ及び新規黒体材料の技術開発、照明学会平成 27 年度(第 48 回)全国大会(招待講演)、福井大学、2015/8/29

雨宮 邦招、沼田 孝之、田辺 稔、福田 大治、バイメタル MEMS 方式高スループット放射計の開発、第 7 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム、朱鷺メッセ、2015/10/29

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://unit.aist.go.jp/ripm/aplradrg/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

雨宮 邦招 (AMEMIYA, Kuniaki)

産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：60361531