

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760326

研究課題名(和文) 常温下熱機械変位方式高速高感度光パワー標準器の開発

研究課題名(英文) Development of Thermo-Mechanical Sensor as Optical Power Standard with Fast Response and High Sensitivity at Room Temperature

研究代表者

雨宮 邦招 (Amemiya, Kuniaki)

独立行政法人産業技術総合研究所・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) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：バイメタル熱変位センサによる高速高感度な熱型光パワー標準器の実現可能性について検討した。数 mm 角に及ぶ大面積のバイメタルセンサの熱弾性特性を有限要素法数値計算で評価した結果、同サイズの従来型熱電モジュール方式光カロリメータと比べて、等価ノイズパワー、及び応答時定数が一桁以上小さくなる設計を見出した。試作したセンサの評価実験結果もそれを支持するものであった。また熱型光センサの光吸収部として、吸収層付マイクロキャビティ型光吸収体が極低反射率を示す起源を突き止め、新規光吸収体の開発も行った。これらの成果により、高スループットな分光絶対光パワー測定につながるものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：The design and fabrication of a bimetal calorimeter was investigated as a high-speed and high-sensitivity photo thermal detector. Using finite element method, the thermo-mechanical properties of large-size bimetal sensors of up to several mm-square sensitive area were simulated. Several designs were found to have noise equivalent power (NEP) and time constant of one order smaller than that of conventional thermo module type optical calorimeter with similar sensitive area. Experimental results for the first prototype of the bimetal sensors also supported those theoretical predictions. Besides, the mechanism of the ultra low reflectance of a micro-cavity type optical absorber was also investigated, which led to the development of a novel broadband optical absorber. These will be expected to provide high throughput spectral absolute optical power measurement.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測機器 光カロリメータ バイメタル MEMS 高速高感度 光吸収体

1. 研究開始当初の背景

先端光計測や光応用分野で用いられる受光素子は、広い波長域に渡る分光量子効率の高精度な定量が求められている。分光量子効率の基準器として用いられる電力置換方式熱型検出器は SI 単位にトレーサブルな高精度光パワー計測が可能だが、従来の熱電変換型温度検出方式では応答時定数が数十秒と長すぎる点、及び光吸収部が任意波長で一般的な吸収率を保証しきれていない点等により、所望の波長域での網羅的測定に不向きだった。

2. 研究の目的

そこで、熱型光パワー測定器のセンサ部に高速応答と高感度を両立できる機械的変位検出方式を採用し、また超低反射率と波長感度一様性を有する平板型光吸収体を実現・実装して、国家標準レベルの高精度かつ常温で高速読取可能な光パワー標準器を開発することを目的に、本研究を実施した。

具体的には、機械的変位の検出方式としてバイメタル方式などを検討し、熱電素子型温度センサに勝る高速応答と高感度の両立を図った。平板型低反射率材料の特性については、NiP 光吸収体表面の物理モデルを構築して分光反射率の理論計算を行い、極低反射率と波長感度一様性の原理解明を進めた。その結果に基づいた新規光吸収体の試作等も行った。

3. 研究の方法

高速・高感度検出が可能な広波長帯域常温動作熱型光パワー標準器を新たに開発するにあたり、取り組むべき課題は(1)温度センサ部として採用する機械的変位検出方式の評価および(2)平板型光吸収体の一つである NiP 光吸収体の超低反射率かつ波長感度一様性の原理解明の大きく2つに分けられる。(1)温度センサ部は「機械的変位発生法」及び「変位検出法」それぞれに複数の方式が考えられるため、個々の評価を通じてより高速・高感度でノイズ耐性の高いものの選定を行なうとともに、有限要素法による熱弾性連成数値解析を活用して検出部の最適化設計を行った。

(2) NiP 極低反射率光吸収体に関しては、FDTD 法数値解析を用いて吸収層組成や表面微細構造が極低反射率および波長一様性にどのように影響を及ぼすかを解明し、定量的裏付けを与えると同時に、必要に応じて吸収体の最適化設計とその実現を図った。

これら要素技術を熱型光パワー標準器として実装の後、感度や応答速度、ノイズ特性等々を評価することとした。

4. 研究成果

(1)熱型光パワー標準器の高速高感度化方式の評価と選定

熱型光パワー標準器の温度センサ部に採

用する機械的変位検出方式について、有限要素法による数値解析などを元に応答感度、応答速度を評価し、その最適化設計の探索を行った。温度上昇に伴う機械的変位発生法としては、性能や製作・オペレーションの難易度も加味して、熱膨張率の異なる2種類の材料を貼り合わせたバイメタル方式を主に検討した。機械変位検出に特有のノイズや電力置換の等価性も含めて評価した結果、有感面積5mm角を有する並進変位型の MEMS 構造で、従来器よりも応答感度・応答速度とも1桁以上の性能向上が見込まれる体系を見出した(図1)。一方、微小変位の検出法として当初想定していた光透過技術は、並進変位の検出には必ずしも適切ではないため、ファブリペロ干渉計方式の変位計測法を採用することとし、必要な測定系の整備に着手した。

検討した MEMS センサの最適化設計に基づき、機械変位検出方式熱型光パワー検出器の心臓部を試作した。具体的には、MEMS センサの仕様として数mm角の Si-Al バイメタルシートを細い4本の梁(ビーム)で支える「竹とび型構造」を採用し、試作を進めた。試算の上では時定数1秒以下、等価ノイズパワー数十 pW/√Hz の特性が得られる設計である。その後、完成した MEMS センサ(図2)の熱変位をレーザ変位計で計測する系(図3)を構築し、応答速度、応答感度など基本特性を評価した。その結果、MEMS センサの熱変位の検出に成功し(図4)、時定数0.3-0.6秒という高速応答が実現できていることがわかったが、変位のパワー感度は設計値の10-20分の1程度であることがわかった。Al 成膜の膜質が一因となっているものと考えられるが、それでも NEP は数百 pW/√Hz が得られると見込まれ、従来方式の熱型光パワー検出器より一桁近い性能向上である。

(2)波長感度一様性の高い光吸収体の原理解明と試作

NiP ブラックの極低反射率および波長感度一様性の原理解明を目指し、これまでの文献で公表されている表面構造や光吸収層のサイズ、黒化層の組成の情報を元に物理モデル(図5)を構築し、FDTD 法による光の伝播のシミュレーションを行った。その結果、光吸収体表面のピット構造のサイズ、アスペクト比、吸収層厚、基板材料、光入射角が反射率に影響を与えることがわかり、実験的に得られた反射率データを説明できる構造の存在を明らかにした(図6)。また、可視から近赤外に渡っての波長感度一様性を保証するための評価法についても提案した。本内容は論文として Applied Optics 誌に投稿し、受理・掲載された。

数値シミュレーション等で得られた知見に基づき、NiP ブラックと同様な吸収層つきマイクロピット構造を有した光吸収体を試作した。具体的にはイオントラックエッチング法を応用し、樹脂基板上に高エネルギーイ

オンビームを照射後、化学エッチングで現出したエッチピットの表面に炭素系黒色層を堆積することで低反射光吸収体とした。試作した光吸収体(図7)はSEM観察により設計通りの表面構造が得られているかどうか確認したほか、標準反射板との比較により絶対反射率評価を行った。その結果を図8に示す。反射率の理論予想(コンマ数%)に対し、測定結果は1%前後であった。これはマイクロピットのアスペクト比不足が一因と考えられ、ピット構造を鋭くすることで0.1%級の極低反射率も可能になるものと考えられる。

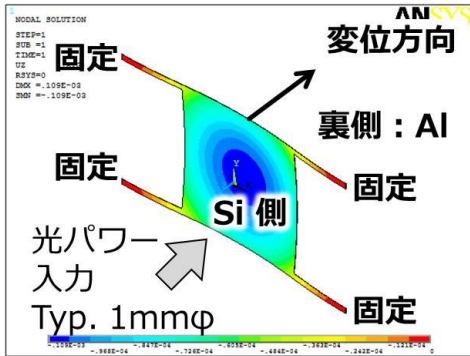


図1 バイメタルMEMS センサの設計形状と熱変位シミュレーションの結果例。

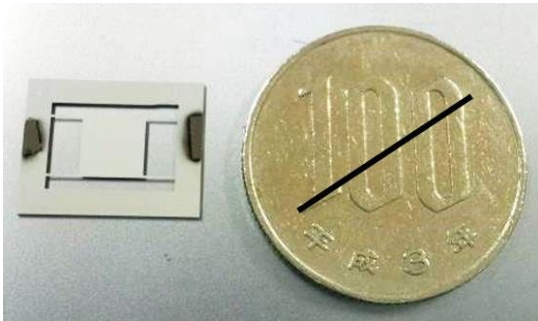


図2 試作したバイメタルMEMS センサの写真。

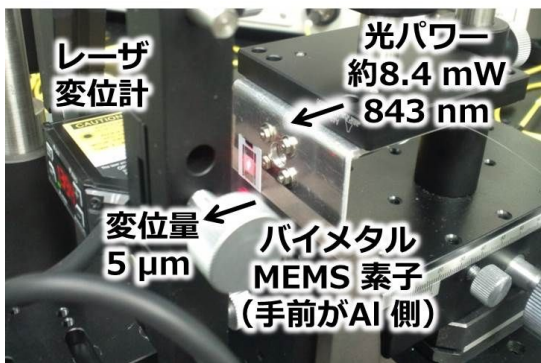


図3 試作したバイメタルMEMS センサの熱変位計測系。

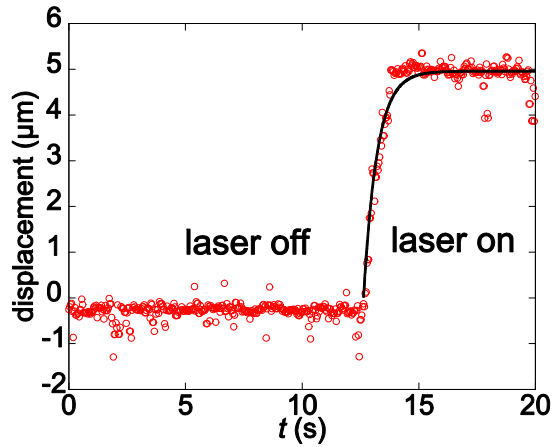


図4 試作したMEMS バイメタルセンサを光加熱した際の時間応答。

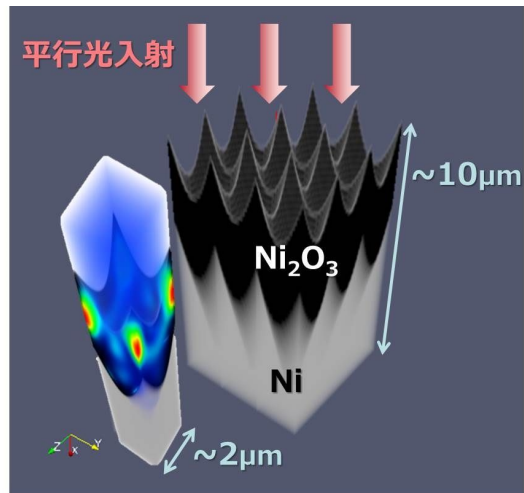


図5 NiP ブラック表面の物理モデル。左はFDTD法で単位セル中の光電場強度分布を計算した結果の例。

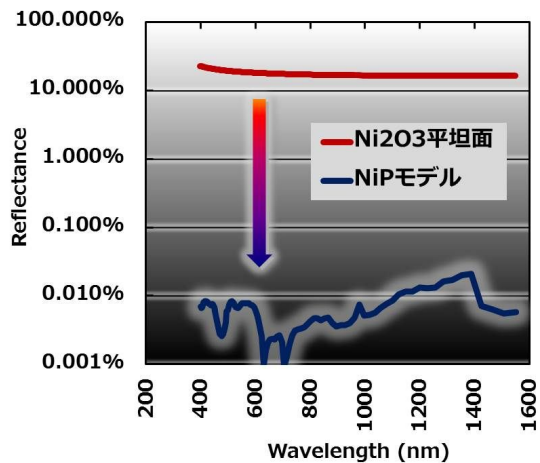


図6 FDTD法によるNiPブラックモデルの極低反射率シミュレーション結果。

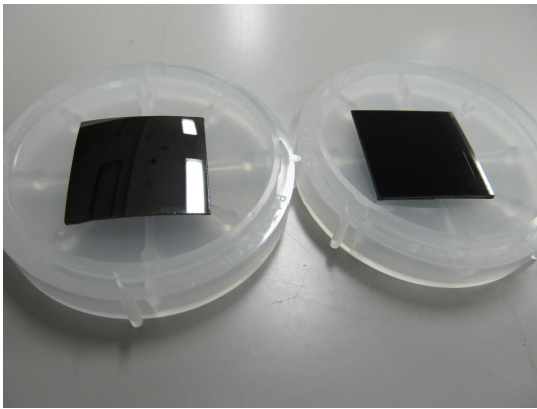


図7 試作したマイクロピット構造光吸収体の写真(右)。左は炭素系黒色材の平坦面。

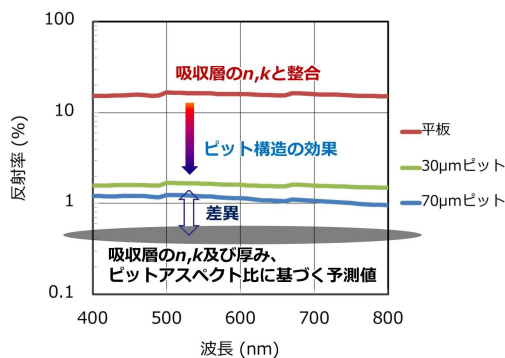


図8 試作した光吸収体の分光反射率測定結果。ピットサイズは開口径を表す。

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1件)

雨宮 邦招、福田 大治、沼田 孝之、田辺 稔、市野 善朗、Comprehensive characterization of broadband ultralow reflectance of a porous nickel-phosphorus black surface by numerical simulation、Appl. Opt.、査読有、Vol. 51、No. 29、2012、pp. 6917-6925、
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.51.006917>

[学会発表](計6件)

雨宮 邦招、高速高感度光パワー精密計測器としてのMEMS方式カロリメータの検討、第33回日本熱物性シンポジウム、2012年10月03日、大阪市立大学杉本キャンパス(大阪府)

雨宮 邦招、MEMS方式による光カロリメータの高速高感度化の検討、産総研計量標準総合センター2012年度成果発表会、2013年01月24日、産総研つくば中央(茨城県)

雨宮 邦招、高速高感度光パワー精密計測器としてのMEMS方式カロリメータの検討II、第34回日本熱物性シンポジウ

ム、2013年11月20日、富山県民会館(富山県)

雨宮 邦招、座間 達也、MEMS方式による光カロリメータの高速高感度化の検討II、産総研計量標準総合センター2013年度成果発表会、2014年01月23日、産総研つくば中央(茨城県)

雨宮 邦招、越川 博、前川 康成、沼田 孝之、木下 健一、薮 洋司、市野 善朗、座間 達也、イオントラックエッチピットを用いた超低反射光吸収体の開発、2014年第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日、青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県)

雨宮 邦招、越川 博、前川 康成、沼田 孝之、木下 健一、薮 洋司、市野 善朗、座間 達也、Development of Ultra-Low Reflectance Optical Absorber Using Etched Ion Tracks、The 12th International Conference on New Development and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2014)、2014年6月25日、Dipoli Congress Center in Otaniemi, Espoo(フィンランド)

6. 研究組織

(1)研究代表者

雨宮 邦招(AMEMIYA KUNIAKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：60361531