

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630060

研究課題名(和文)電磁カップリングを用いたワイヤレスMEMS温度センサの開発

研究課題名(英文)Development of Wireless MEMS Temperature Sensor Using Magnetic Coupling

研究代表者

鈴木 雄二 (Suzuki, Yuji)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80222066

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)：本研究では、燃焼場の壁面温度計測に用いるためのワイヤレス温度センサの開発を行った。ポリイミドのプリント基板プロセスとMEMS技術を組み合わせることにより、1 mm以下の温度測定部を実現した。ポリイミドフィルムを基板として用いることで、可撓性と優れた耐熱性を有するセンサの試作が可能となった。温度上昇実験より常温から200℃までの温度範囲でワイヤレス温度センサとしての性能評価を行い、約4.2 kHz/Kの感度を得た。230℃までの非定常温度場において、2.48 msの平均測定時間間隔と、±6.4℃の計測の不確かさを得た。

研究成果の概要(英文)：We propose a novel flexible wireless temperature sensor, whose temperature measuring spot is 1 mm squared. The sensor basically consists of LCR resonant circuit and its coil is inductively coupled with an external read-out coil to measure the impedance. The sensor is fabricated on a both-side copper thin film laminated polyimide film and the temperature measuring part is formed with MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) process. It is shown in the experiments that the monotonous increase of the resonant frequency due to the increase of the temperature in the range of 25 to 200 °C. In addition, By decreasing the number of frequency sweeping points, the measurement time interval is reduced to ms order with the expense of increasing error in the resonant frequency. The performance of the sensor is evaluated in an unsteady thermal field. The temperature data converted from the measured resonant frequency shows the uncertainty of ±6.4 °C with the average time interval of 2.48 ms.

研究分野：熱流体工学

キーワード：温度センサ 燃焼 電磁結合 LCR回路 共振周波数 フレキシブルプリント基板

1. 研究開始当初の背景

固体壁面の温度は、様々な流体现象の解析に重要な役割を果たすだけでなく、流体機械、燃料電池、燃焼器など、多くの実デバイスの運転監視にも必要な基本的物理量である。従来、場を乱さない温度計測法として、熱放射、感温液晶、蛍光材料などを用いた非接触計測が提案されているが、これらを適用するには測定原理に応じた波長を透過する光学的ウィンドウが必要であり、計測目的で設計された実験装置以外への適用は一般的に難しい。光学的アクセスが得られる場合においても、最も一般的に用いられるサーモグラフィでは、ウィンドウの吸収率の補正以外に、放射面の輻射率の考慮が必要である。また、感温液晶は測定可能な温度範囲が狭く、高温場への適用は困難である。また、非光学的な非接触温度計測法としては、数 cm オーダーのキャビティ内における電磁波の共鳴を用いる手法 (Cheng et al., 2012) などが散見されるが、ピンポイントで正確な温度計測ができる手法は皆無である。

申請者は、これまで、マイクロデバイスを用いた熱流体现象の計測・制御、およびマイクロエネルギー変換に取り組み、新しい MEMS プロセス技術の開発や MEMS デバイスへの静電現象の応用を進めてきた。それらの研究を進めるうち、誘電体薄膜の温度による誘電体変化を用いた新しい無線型の MEMS 温度センサが実現できるという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究で開発する無線温度センサでは、誘電体薄膜を用いたコンデンサ、センサコイルからなり、外部の読み出しコイルとの電磁カップリングを用いて、誘電体薄膜の誘電率変化を電気回路としての共振周波数の測定によって求め、それを温度に変換する。予備的な計算によれば、 1°C の温度変化により 400Hz の大きな共振周波数変化が期待され、高感度なセンシング手法と期待される。本研究では、基板部を入れても $50\mu\text{m}$ 以下で実現できる、この新しいワイヤレス MEMS 温度センサを試作し、光学的アクセスが不可能な場での温度計測への実現可能性を示す。また、測定精度に影響を与える因子として、センサと外部コイルの距離、それらの間の介在物を検討し、これらの悪影響を低減するセンサ構造を考案し、これまでにない汎用的な温度計測手法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に、MEMS ワイヤレス温度センサを用いた壁温の非接触測定方法を示す。測定対象となる壁面に薄膜のセンサを、壁の反対側にはネットワークアナライザと接続した外部送受信コイルを取り付け、センサ側のコイルと外部コイルとの電磁カップリングを用いて非接触計測を実現する。

まず、コンデンサの誘電体としてアルミナを用い、その比誘電率の温度依存性を利用した MEMS ワイヤレス温度センサについて予備的な検討を行った。インピーダンス位相角の落ち込みから LCR 回路の共振周波数を求め、静電容量の変化から温度を測定する。しかし、試作したセンサではコイルの抵抗値が設計値に比べて 10 倍近く大きく、インピーダンス位相角に鋭い落ち込みが現れなかった。また、温度上昇による抵抗値の増加を考慮した場合、抵抗値増加が共振周波数へ与える影響が静電容量の減少による影響より大きいと、大きな温度変化が現れる燃焼場では設計通りの動作が期待できないことが判った。そこで、本研究では、まず、蒸着により金属薄膜のコイル、コンデンサを形成し、コイルに用いる金属の抵抗率の温度依存性に基づいた温度センサを検討した。

センサの試作には、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を利用した。TEMPAX ウェハを基板とし、 500 nm 厚の金膜をスパッタし、フォトリソグラフィを用いて下部電極を形成する。次に、TEOS (Tetraethyl orthosilicate) をプリカーサとしたプラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) を用いて、 100 nm 厚の SiO_2 層を成膜し、上下の電極間の導通部分をエッチングする。最後に、再度 $1.5\ \mu\text{m}$ 厚の金薄膜をスパッタし、スパイラルコイル部と上部電極にパタニングすることで、製作プロセスが完了する。試作したセンサの写真を図 2 に示す。センサは約 10 mm 角のサイズであり、中央部のキャパシタと 5 回巻きの平面スパイラルコイルが直列に接続されている。

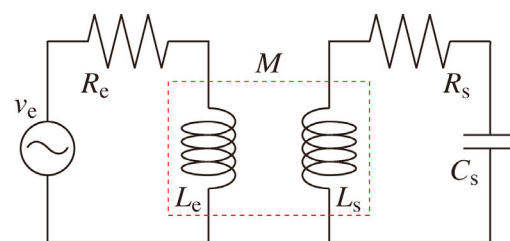


図 1 センサの等価回路

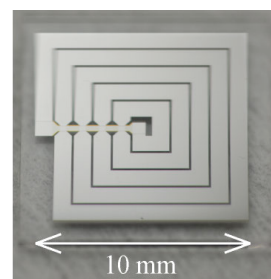


図 2 蒸着金属膜を用いた MEMS 温度センサ

次に、蒸着膜を用いた場合、コイル自身の寄生抵抗が大きいため、温度計測にコイルの抵抗値変化を用いざるを得ず、温度測定の空

間分解能はセンサ全体の面積に等しくなる。温度測定スポットの微小化のためには、コイルの寄生抵抗を抑え、小さい面積を有する温度測定部が全抵抗値の大部分を占めるようにセンサを設計する必要がある。そこで、プリント基板に広く用いられているポリイミドフィルムをセンサの試作に用いることで、コイル寄生抵抗の低減を図った。ポリイミドは、耐熱性に優れ、可撓性を有するという特徴も有する。

銅箔付きポリイミドフィルムの両面の銅箔をそれぞれ、コイルパターンとキャパシタの電極になるようにエッチングし、開口部となる部分に穴を開け、無電解金めっきを施すことで、上下電極の間を導通させる。次に、微小温度測定部パターンのハードマスクをSi基板のDRIEにより作成し、ポリイミド基板上に密着させ、金をスパッタリングすることでセンサを閉回路として形成する。

温度測定部は、線長と線幅がそれぞれ4 mm、100 μmとし、厚さ100 nmの金薄膜が約8.8 Ωの理論抵抗値を持つように設計した。図3に、ハードマスクと試作センサの写真を示す。用いられた銅箔とポリイミド層の厚さは、それぞれ18 μm、12.5 μmであり、コイル寄生抵抗の理論抵抗値と蒸着された温度測定部の抵抗値は、それぞれ1 Ω以下と約130 Ωである。

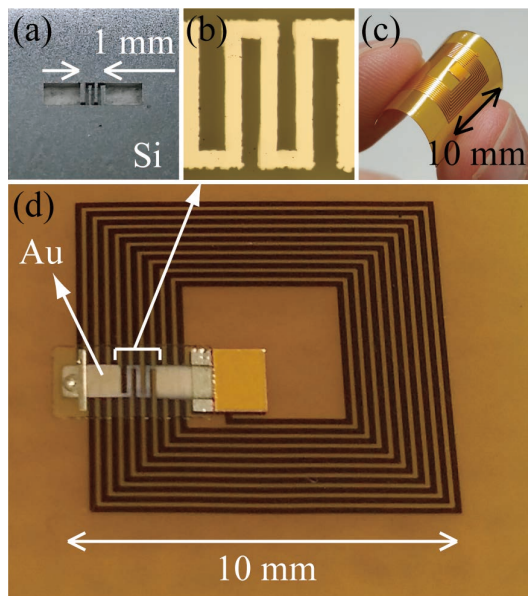


図3 ポリイミドを用いた MEMS 温度センサ。a)ハードマスク, b)温度感知部, c, d)試作センサ

4. 研究成果

まず、図2に示すセンサについて特性評価を行った。センサと読み出しコイルの間隔は1.77 mmである。周囲温度を200℃まで上げたところ、図4に示すように、共振周波数は21.9 MHzから22.5 MHzに変化した。図5に、共振周波数と温度の関係を示す。共振周波数を温度の2次関数に良く当てはまることが

判った。温度測定の不確かさ(95%包括度)は、27℃において1.3℃, 177℃において3.8℃である。

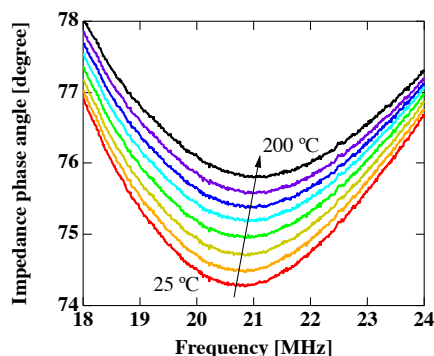


図4 図2のセンサに対するインピーダンスの位相角と周波数の関係。

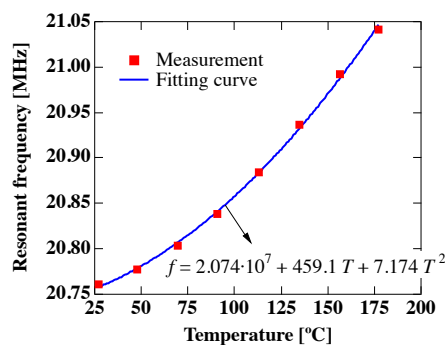


図5 図2のセンサに対する共振周波数と温度の関係

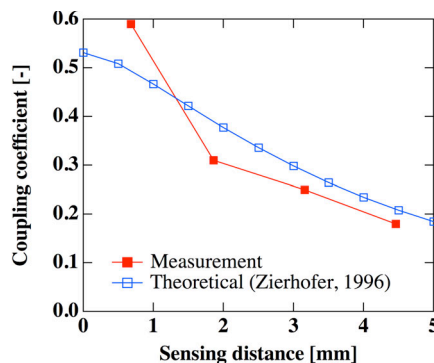


図6 図2のセンサに対する距離と結合係数の関係

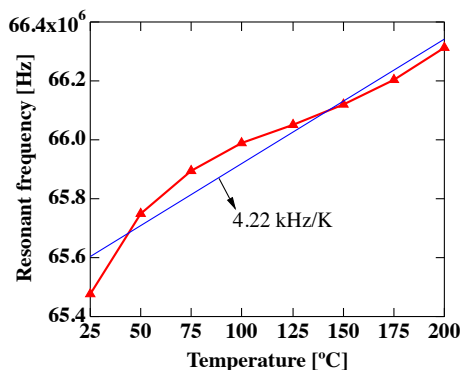


図7 図3のセンサに対する共振周波数と温度の関係

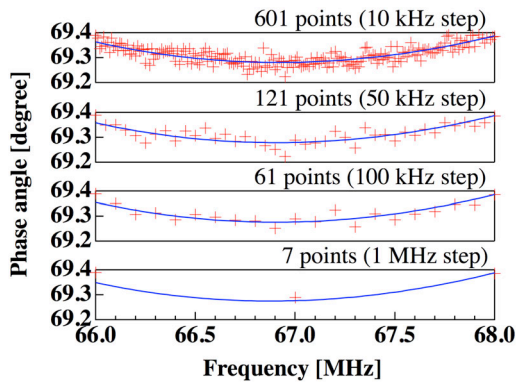


図8 周波数掃引の点数を変化させた測定結果

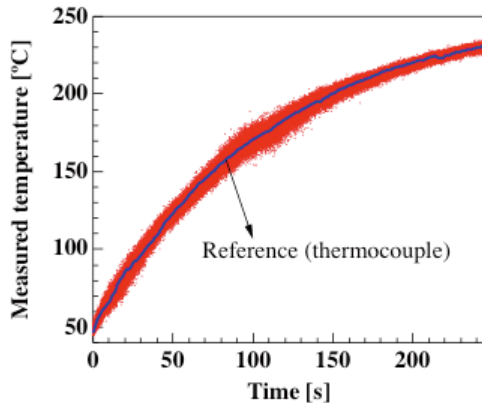


図9 非定常温度変化の計測

また、センサと読み出しコイルの距離についても検討を行い、電磁結合のカップリング係数が、1.77mmでは0.39であったのが、5mmでは0.2まで低下し、5mm程度が限界であることが判った(図6)。

次に、ポリイミド基板を用いたセンサについて検討を行った。センサと外部コイルの間に1.87mmの距離を保った。温度変化に対する共振周波数の変化を、図7に示す。温度上昇につれ、共振周波数が単調に増加した。勾配が一定でないのは、温度変化によってポリイミド層の誘電率が変化したためと考えられる。しかし、100℃以上の高温領域においては誘電率の温度依存性が弱くなり、温度上昇につれ周波数感度が増加するような特徴が得られた。温度変化に対する平均的な周波数感度は、約4.2kHz/Kに相当する。

さらに、位相角データを等価回路式にフィッティングすることで、測定時間間隔の短縮を試みた。これまでは100ms以上の時間が必要であったが、図8に示すように、測定点数を減らすことで、周波数掃引時間を減らすことが可能である。一方、データ数の減少によって、共振周波数のあてはめ誤差が増大する。測定点が7点の場合、周波数掃引時間は約0.6msとなり、装置間の通信時間などを含めても2.48msの時間間隔で測定ができることを示した(図9)。その際の計測の不確かさは±6.4℃と見積もられ、燃焼場における

壁面温度の計測に対しては比較的良い精度であると言える。

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 0件)

[学会発表] (計 8件)

①Lee, M., Kawahara, Y., Morimoto, K., and Suzuki, Y., “MEMS Wireless Temperature Sensor for Combustion Studies,” 14th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2014), Awaji-shi (Hyogo), (2014). Also, J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 557, No. 012077 (2014).

②Lee, M., Morimoto, K., and Suzuki, Y., “Flexible Wireless Wall Temperature Sensor for Unsteady Thermal Field,” 15th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2015), Boston (U.S.A.) (2015). Also, J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 660, No. 012019 (2015).

[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

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 雄二 (SUZUKI YUJI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：80222066

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし