

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15414

研究課題名(和文) 蒸発と凝縮が混在するマイクロスケール閉鎖系の伝熱特性の解明

研究課題名(英文) Investigation of thermal characteristics of micro-scale phase change devices

研究代表者

塚本 貴城 (Tsukamoto, Takashiro)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70646413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、熱ダイオード、マイクロヒートパイプ、マイクロバーパーチャンバーなどの、マイクロ熱デバイスの開発において重要となる、微小領域での熱計測手法を開発した。2種類の感温塗料と、パルス励起を組み合わせることで、面内の温度分布と、面外方向の温度差を微小領域において測定する方法を考案し、感温塗料の発光特性、および、温度測定精度を向上させるための方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた結果から、感温塗料の温度感度はマイクロメートル程度の微小領域では一定ではなく、分布を持っていることがわかった。また、この温度感度が発光強度と相関を持っていることもわかった。また、この知見をもとに、温度感度のばらつきを補正する方法を考案した。これらの成果は、この手法をマイクロデバイスの熱計測に応用する際に、測定精度を向上させるために重要な技術である。

研究成果の概要(英文)：In this research, a micro-scale heat flux measurement method, which is essential for the development of micro thermal devices such as micro heat diode, micro heatpipe and micro vapor chamber, was developed. By combining two temperature sensitive paints (TSPs) and pulsed excitation method, both in-plane and out-of-plane temperature distributions can be obtained in the micro scale region. The luminescent properties of TSPs were investigated and a correction method for the temperature coefficient of intensity was developed.

研究分野：MEMS

キーワード：微小領域熱計測 熱流束計測 MEMS 熱ダイオード

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

相変化に伴う潜熱は、非常に高い熱伝達率を得ることができることから、ヒートパイプ等の小型で低熱抵抗を実現できる熱輸送デバイスに広く使われている。ヒートパイプは実効熱伝導率をバルクの金属よりも大きくすることが可能であるため、現在では電子デバイスの冷却を中心に、多くの機器に使用されている。さらに、近年では、微細加工技術の発達により、このヒートパイプの原理を応用した新しい小型デバイスが研究・開発されている。通常のヒートパイプは、発生した蒸気をパイプを通して凝縮部に輸送することで、パイプの長手方向に熱を輸送する。この原理を発展させた、蒸気を平板状デバイスの面内方向に輸送させるペーパーチャンバは、マイクロプロセッサ等が発生する極めて高い密度の排熱を、効率的に大面積に広げることができる。また平板状のデバイスの厚さ方向の等価熱抵抗を熱流方向に応じて変化させることができる熱ダイオードは、超小型の熱機関の実現や、小型冷凍器の省エネルギー化などに貢献が期待される。これらのデバイスでは、蒸発部と凝縮部がマイクロメートル程度の距離で対向しているため、その蒸発・凝縮現象は、マクロな系のものとは異なっていると考えられが、このような微小領域の観察、特に熱輸送現象の直接的な観察は容易ではない。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、マイクロデバイスの熱特性のなかでも重要なものの一つである、熱流束について着目し、その観察のための基礎研究を行う。微小領域で熱流束を測るためには、マイクロメートルスケールでの3次元温度分布の情報が必要となる。熱流束測定に一般に用いられているサーモパイル（熱電対）を用いた方法では、測定点数が限られ空間分解能が制限されてしまう。そこで、温度分布を2次元的に測定可能な感温塗料に注目し、これを熱流束センサとして応用する。ただし、熱流束の測定のためには、熱流方向の温度分布が必要であり、通常の感温塗料で測定できる面内情報のみでは情報が不足している。そこで、波長応答の異なる複数の感温塗料を、光学薄膜フィルタと積層することで、面外方向の温度情報も取得する。本研究では、考案した上述の方法を実現させるために、複数の感温塗料の微小領域における発光特性の解明、熱流束測定システムの構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、Eu(TTA)₃とRu(Phen)という2種類の感温塗料を用いる。Eu(TTA)₃は紫外光によって励起されると、可視(610 nm)波長で発光する。一方、Ru(Phen)は紫外及び青色光によって励起され、可視光(610 nm)で発光する。どちらの発光も、その強度が温度に依存して変化するため、測定された光情報から温度分布を知ることができる。熱流束測定用の感温シートの概略を図1に示す。図のように、Eu(TTA)₃とRu(Phen)で薄膜フィルタを挟んだ構造となっている。紫外光を照射すると、Eu(TTA)₃は励起されるが、フィルタによって紫外光がカットされるためRu(Phen)は励起されない。一方、青色光(450 nm)を照射すると、Eu(TTA)₃は励起されないがRu(Phen)は励起される。つまり、照射光の波長に応じて、温度測定に使用する感温塗料を選択することができる。このシートを通して熱流があると、感温塗料層およびフィルタの熱抵抗に応じて、両方の感温塗料に温度差ができる。よって、2つの感温塗料から得られた温度分布、および、(既知の)熱抵抗から熱流束の空間分布を知ることができる。

熱流束の測定には、2つの感温塗料の温度分布を”同時に”測定する必要がある。ただし、今回用いた2つの感温塗料は、励起波長は異なるが発光波長はほぼ同じため、波長分解することは困難である。そこで、微小な時間差をつけてパルス状に各感温塗料を励起する方法を開発した。図2に測定システムの概略図を示す。励起のために、2種類のLED光源(365 nm, 450 nm)を用い、ダイクロイックミラー（365 nmを反射、450 nmを透過）によってこれらの光を同軸化させる。それぞれのLEDはFPGAによって精密に照射タイミングが制御される。同軸照明光はダイクロイックミラー（365 nm, 450 nmを反射、610 nmを透過）によって90度曲げられたあと、対物レンズによってシート上に照射される。感温塗料の発光（610 nm）は、対物レンズによって平行光に変換された後、リレーレンズ、ハーフミラーを用いて2台のCCDカメラに同時に投影される。2台のCCDカメラの電子シャッターを、それぞれ365 nmと450 nmのLED照射に同期させることで、Eu(TTA)3とRu(Phen)の発光を観測する。この方法を用いることで、CCDカメラのシャッター間隔（30 ms程度）よりも短い時間間隔で、2つの感温塗料の温度分布を取得することができる。

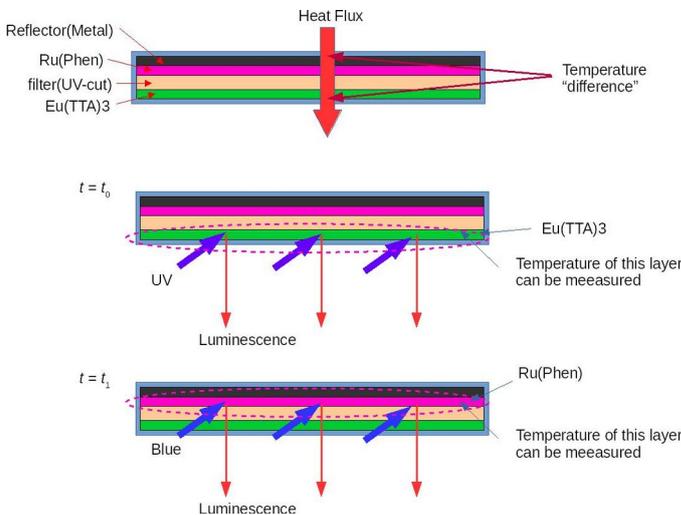


図1: 熱流束測定シートの構造と測定原理

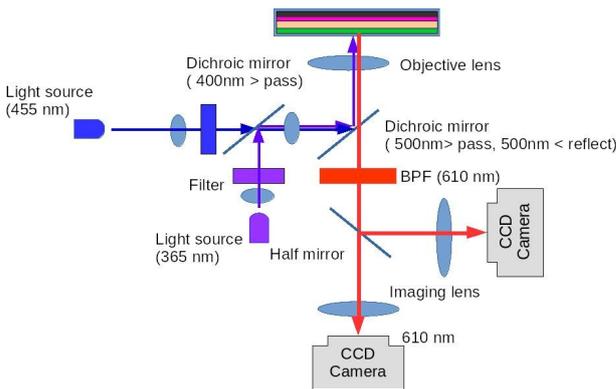


図2: 測定光学系

4. 研究成果

図3に開発した測定システムの外観を示す。市販の顕微鏡をベースにして、2波長LED照明光学系、2-CCD測定系を追加した。また、LEDの照射パルスの制御、CCDのシャッタータイミングの制御のために、FPGAを用いた制御回路を作製した。

感温塗料は、Eu(TTA)3、Ru(Phen)を、樹脂の母材および有機溶剤と混合することで調製し

た。Eu(TTA)₃を用いた感温塗料には、PVBとMEKを、それぞれ母材と溶剤として用いた。混合比としては、Eu(TTA)₃:PVB:MEK = 0.03[g]:0.09[g]:1[mL]の割合とした。Ru(Phen)を用いた感温塗料には、PAAとエタノールを用い、その混合割合は、Ru(Phen):PAA:Etanol = 1.4[mg]:0.2[g]:2[mL]とした。調製した塗料の塗布にはスピコート法を用いた。塗布した感温塗料の顕微鏡写真を図4に示す。図のように、塗布後の膜には微細な構造が見られた。

成膜した感温塗料の励起光の吸収特性を図5に示す。Eu(TTA)₃薄膜は400 nm以下の光を吸収することがわかる。一方、Ru(Phen)薄膜は、300 nm以下の紫外光および450 nmの青色光を強く吸収することがわかった。図6に、観測された微小領域の発光を示す。図4の微細構造に対応して、発光強度が変動している様子が観測された。発光強度の温度係数 (TCI = Temperature Coefficient of Intensity)を図7に示す。図からわかるように、微小領域では感温塗料の温度係数にばらつきがあることがわかった。通常感温塗料が使われる場面では、このような温度係数のばらつきは報告されておらず、微小領域の感温塗料に特有の本研究で新たに得られた知見である。また、発光強度との関係を図8に示す。図からわかるように、発光強度とTCIには強い相関があることがわかった。この関係を利用することで、感温塗料の温度係数のばらつきを補正し、TCIのばらつきによる温度測定のはらつきを補正できることを実証した (図9)。

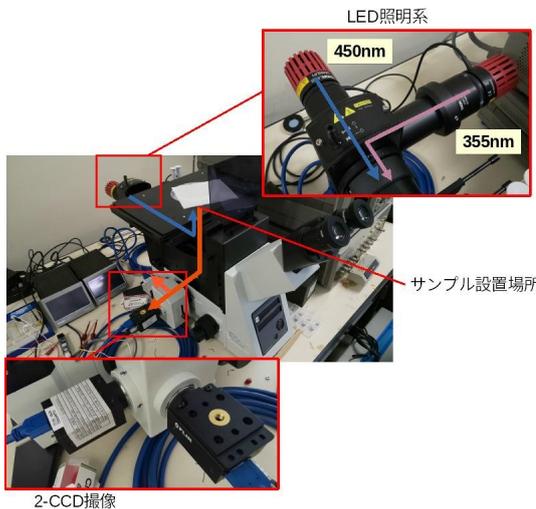


図3: 測定系の写真



図4: 感温塗料 (Ru(Phen)) 薄膜の顕微鏡写真

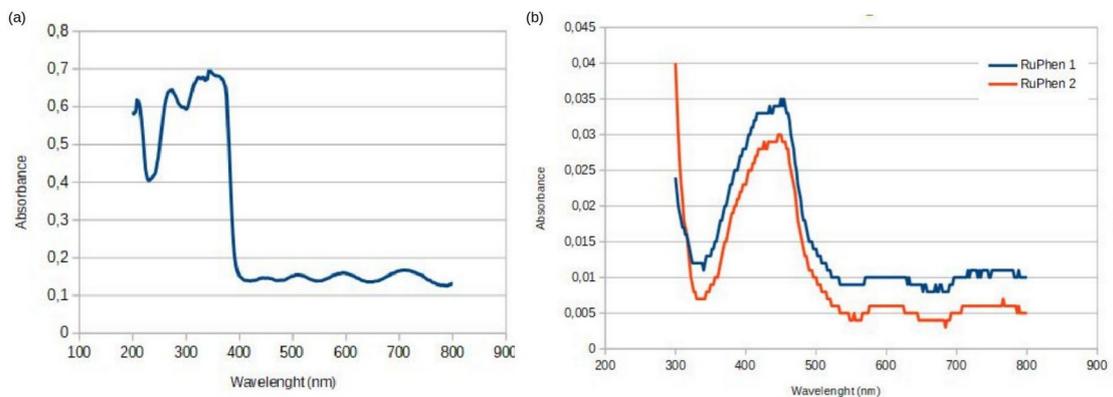


図5: 感温塗料薄膜の吸光特性。(a)Eu(TTA)₃ と(b)Ru(Phen)薄膜

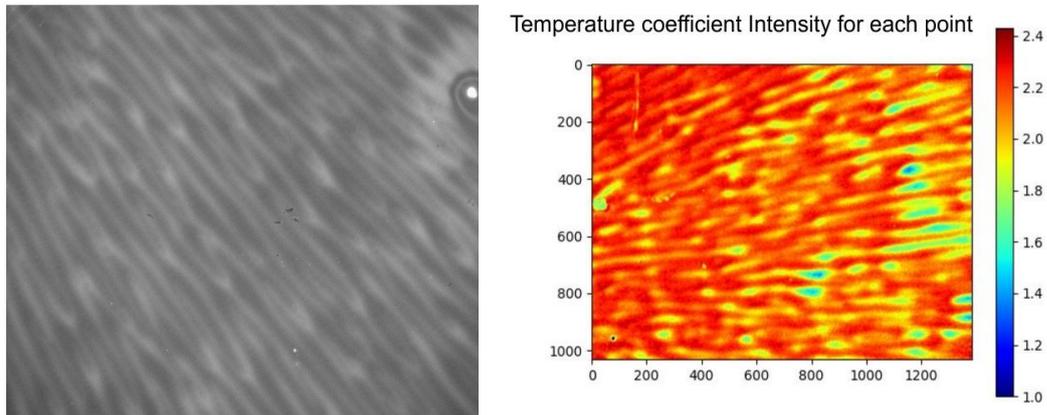


図 6: 観測された発光強度分布 (Ru(Phen) 薄膜) 図 7: 温度感度 (TCI) の分布 (Ru(Phen) 薄膜)

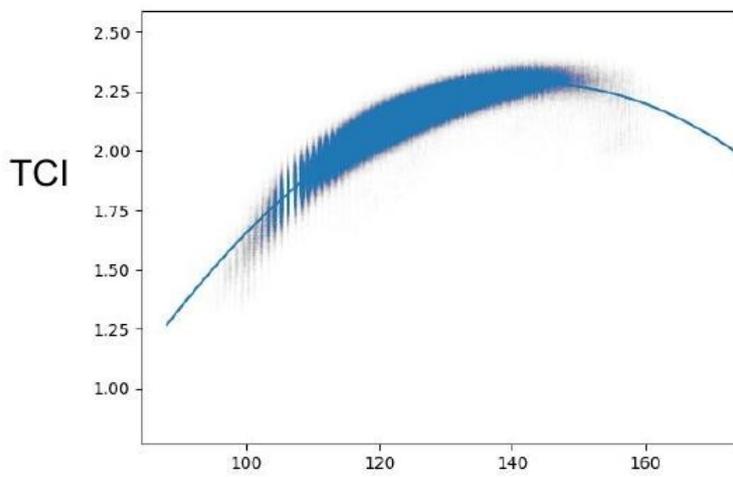


図 8: 発光強度 (X 軸) と温度感度 (Y 軸) の相関

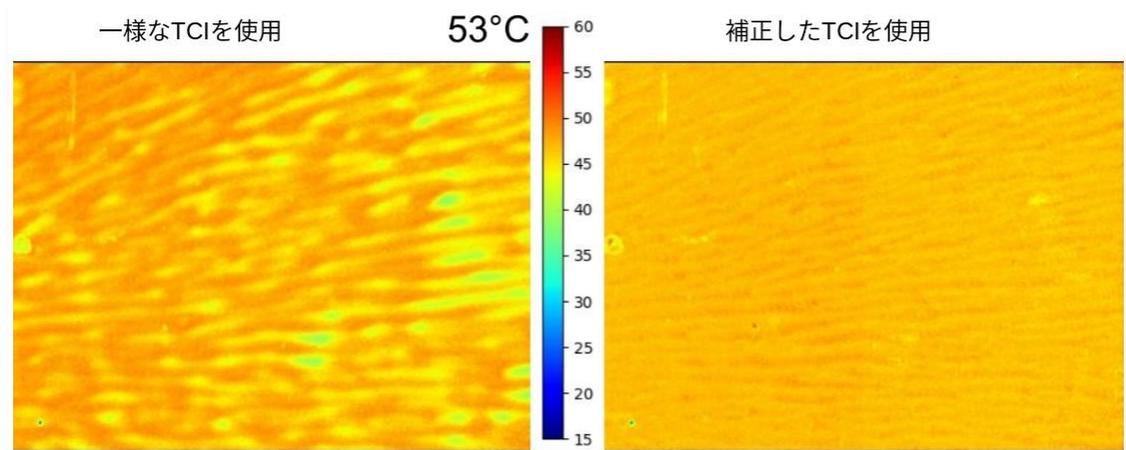


図 9: 温度測定結果。一様な TCI を仮定した場合と、図 8 の関係から TCI の変動を補正した結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Julien Sauvageot、 塚本貴城、 田中秀治
2. 発表標題 Microscale Heat Flux Sensing Using Temperature Sensitive Paint
3. 学会等名 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------