

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成27年度研究進捗評価用〕

平成24年度採択分
平成27年3月19日現在

ナノ・マイクロ熱物性センシング工学の確立と応用
Establishment of Nano-Micro Thermophysical Properties
Sensing Engineering and Its Applications

課題番号：24226006

長坂 雄次 (NAGASAKA YUJI)

慶應義塾大学・理工学部・教授



研究の概要

本研究の目的は、ナノ・マイクロレベルのエネルギー・運動量・物質輸送物性（熱伝導率、温度伝導率、粘性係数、表面張力、拡散係数、ソーレー係数）を包括的にセンシング可能なナノ・マイクロ熱物性センシング技術群を高度化することによって、新たな工学的応用を開拓し、『ナノ・マイクロ熱物性センシング工学』を確立することである。

研究分野：工学・機械工学・熱工学

キーワード：熱物性、輸送現象、マイクロ・ナノデバイス、計測工学

1. 研究開始当初の背景

ナノ・マイクロレベルの熱物性値の計測技術は、次世代熱工学の基盤としてのみならず、あらゆる分野を横断する最先端研究開発の基盤技術として極めて重要である。例えば、高密度光相変化記録メディア内部の多層薄膜の熱伝導や相変化問題、カーボンナノチューブやグラフェン等のナノ材料の熱物性サイズ効果問題、あるいは燃料電池用ポリマー薄膜内部の物質拡散問題等、枚挙にいとまがない。また学術的には、これら最先端の技術的課題を包括的に取り扱うためのナノ・マイクロ輸送現象に関する横断的な学問体系を構築する必要があり、熱物性センシング技術はその基本現象を定量的に解明する重要なツールとして不可欠である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、近接場光や熱的ゆらぎに起因した表面波そして温度波の干渉などを利用した測定原理と光 MEMS 技術を革新的に融合し、ナノ・マイクロレベルのエネルギー・運動量・物質輸送物性（熱伝導率、温度伝導率、粘性係数、拡散係数、ソーレー係数など）を包括的にセンシング可能なナノ・マイクロ熱物性センシング技術群を高度化（精度・時空間分解能の飛躍的向上および計測パラメータの拡張）することによって、新たな工学的応用を開拓し、『ナノ・マイクロ熱物性センシング工学』を確立することである。

3. 研究の方法

これまで開発を進めてきた熱物性セン

シング技術（近接場光学熱物性顕微鏡、フォトサーマル赤外検知法、レーザー誘起表面波法、リブロン表面光散乱法、ソーレー強制レイリー散乱法）に新たに4つの熱物性センシング技術（周期加熱サーモリフレクタンス法、光 MEMS 粘性センサー、光 MEMS 拡散センサー、近接場相関分光法）を加えた計9種類のセンシング手法を以下の2つの方向で高度化させ、新たな工学的応用を実施する。

高度化①「精度・時空間分解能の飛躍的向上」
[1] 近接場光、レーザー誘起表面波や温度波の干渉など熱物性測定の原理としては従来利用されていなかった物理現象を応用して時空間分解能を向上させる。

[2] より厳密な Working Equations の導出と不確かさ評価。

高度化②「計測パラメータの拡張と新規熱物性センシングへの応用」

[1] 従来考慮されていなかった新たな計測パラメータ拡張を行う。

[2] 開発した熱物性センシング技術を拡張発展させて新規熱物性に適用する。

[3] 熱物性センシングの原理を利用した MEMS センサーを開発する。

4. これまでの成果

(1) 近接場（蛍光）光学熱物性顕微鏡
超高感度・高時空間分解能を有する近接場光学熱物性顕微鏡を新たに開発し、従来の光技術では到達不可能なナノスケール空間分解能で温度センシングを実現した。

(2) 周期加熱サーモリフレクタンス法
1.5 K~300 K の温度範囲、最大 7T の強磁

場環境下で高温超伝導薄膜の熱伝導率を高精度にセンシング可能な周期加熱サーモリフレクタンス法を新規に開発し、YBCO 薄膜の熱伝導率-膜厚依存性および温度依存性を明らかにした。

(3) フォトサーマル赤外検知法

垂直配向カーボンナノチューブに対するパリレンの浸透率を飛躍的に向上させる新しい成膜方法を提案し、ボイドの少ない緻密で均一なナノコンポジットの開発に成功した。

(4) パリレン蒸着型非定常細線法

本研究を遂行する中で、MEMS 技術の一つであるパリレン蒸着に着目し、導電性サンプルへの適用が可能な高精度熱伝導率センシング手法の開発に成功した。本提案により、ナノ・マイクロ熱物性センシング技術群は 10 種類に拡張された。

(5) レーザー誘起表面波法

試料の体積パルス加熱を実現する新しいレーザーシステムを導入し、測定精度ならびに時間分解能の飛躍的向上を達成した。さらに厳密な Working Eqs. の導出と解析手法を提案し、革新的な粘性率・表面張力高速センシング手法として確立した。

(6) リプロン表面光散乱法

観測するリプロンの波長を掃引可能な液体表面揺らぎスペクトロスコーピー技術を構築し、酸素ナノバブルや窒素ナノバブルなどナノバブル含有水の挙動を明らかにすることに成功した。

(7) 光 MEMS 粘性センサー

レーザー誘起表面波法の原理を応用したハンディタイプの光 MEMS 粘性センサーを開発した。手振れを自動で制御する光学コンポーネントを搭載し、非常に高い安定性で試料の粘性率を非接触に測定することが可能となった。

(8) ソーラー強制レイリー散乱法

濃度勾配形成過程の信号を高感度に検出する新しいセンシングシステムを構築し、従来考慮されていなかった新たな計測パラメータを測定することが可能となった。有機薄膜太陽電池の光学活性層における成膜条件最適化に有益なデータを初めて示した。

(9) 光 MEMS 拡散センサー

タンパク質などの生体試料の構造変化や代謝能をセンシング可能な光 MEMS 拡散センサーを新規に開発した。提案手法により濃度の薄い生体試料の高感度分析が可能となる。

(10) 近接場相関分光法

数 nm 径の貫通孔 (ナノポア) を有するメンブレンを用い、シーケンサへの応用を目指した DNA 通過過程の光学的検出・ダイナミクス計測技術の開発をおこなった。

シリコンメンブレンと紫外光励起をベースとした 10 μ s 分解能による通過過程観察に成功し、光学的測定の優位性を示した。

5. 今後の計画

今後は、ナノ・マイクロ熱物性センシング技術群を更に高度化・深化させ (特に高精度化と高感度化)、従来の古典的測定方法では適用が不可能な系に用いることで、世界に類を見ない工学的応用を達成する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

【主要な論文】

- (1) Matoba, Y., Taguchi, Y., and Nagasaka, Y., "Micro optical diffusion sensor using a comb-driven micro Fresnel mirror", *Opt. Express*, 23(1), 477-483, (2015).
- (2) Hira, T., Homma, T., Uchiyama, T., Kuwamura, K., Kihara, Y., and Saiki, T., "All-optical switching of localized surface plasmon resonance in single gold nanosandwich using GeSbTe film as an active medium", *Appl. Phys. Lett.*, 106, 031105/1-5, (2015).
- (3) Nishimura, Y., Hasegawa, A. and Nagasaka, Y., "High-precision instrument for measuring the surface tension, viscosity and surface viscoelasticity of liquids using ripplon surface laser-light scattering with tunable wavelength selection", *Rev. Sci. Instrum.*, 85, 044904 (2014).
- (4) Nitta, J., Taguchi, Y., Saiki, T., and Nagasaka, Y., "Numerical analysis of the temperature dependence of near-field polarization for nanoscale thermometry using a triple-tapered near-field optical fiber probe", *J. Opt.*, 16, 035001/1-7, (2014).
- (5) Ikeda, T., Ando, T., Taguchi, Y., and Nagasaka, Y., "Size effect of out-of-plane thermal conductivity of epitaxial YBa₂Cu₃O_{7- δ} thin films at room temperature measured by photothermal radiometry", *J. Appl. Phys.* 113, 183517, (2013).
- (6) Fujii, T., *Taguchi, Y., Saiki, T., and Nagasaka, Y., "Near-field fluorescence thermometry using highly efficient triple-tapered near-field optical fiber probe", *Rev. Sci. Instrum.*, 83, 124901/1-8, (2012).

【受賞】

- (1) 長坂雄次, 日本熱物性学会賞熱物性賞, 日本熱物性学会, 2014 年 11 月 23 日.

ホームページ等

<http://www.naga.sd.keio.ac.jp/kiban-s.html>