

マイクロスケール試料の表面温度測定

反射光と電気抵抗の同時測定によるサーモリフレクタンス温度計

微小試料の表面温度を高空間分解能・高速・非接触で精密に測定することが可能な「共焦点顕微鏡光学系型サーモリフレクタンス温度計」の開発を行っている。これは反射率の温度変化を利用した测温システムである。共焦点顕微鏡光学系を通して、レーザー光を試料にあて、その反射光強度と同時に試料の電気抵抗を温度の関数として同時測定する。電気抵抗の温度依存性から反射光強度と温度との関係が構築できる。この関係を用いれば、試料の表面温度を反射光強度の相対測定のみで推定できる。現在、モリブデン細線の試料について、試料温度 100°C 付近で温度分解能 0.2°C、空間分解能 0.7 μm が得られている。

A temperature measuring system based on the thermoreflectance method has been developed. This system can measure the temperature of sub-microscale specimen with non-contact, high temperature resolution, high speed, and high spatial resolution. Simultaneous measurements of a specimen in the relative intensity of reflected light and in the electric resistance allow us to determine its surface temperature. High spatial resolution of 0.7 μm is achieved by employing laser irradiation and detection through confocal microscope optics. The minimum detectable temperature change of 0.2 °C at around 100°C is obtained for a molybdenum thin strip.

装置開発の背景

半導体デバイスの高集積化に伴い、微細化技術の目覚ましい進展が進む半導体分野では、微細配線におけるジュール熱の発生や漏れ電流などの問題解決のために、微小領域の温度や温度変化を迅速かつ信頼性高く測定する技術の開発が不可欠となってきている。また集積回路(IC)の欠陥をその熱画像から検知することや、多重光通信に用いられる半導体レーザーの温度を高速・高精度に制御する技術などが提案・検証されている。試料が微小になると熱移動をはじめとする熱現象がバルク材料と異なる挙動を示したり、異方性が現れたりする可能性があり、これらを微小領域に適応した熱計測や温度計測か

ら調べることは材料科学的にも興味ある課題である。

試料からの熱放射を測定する赤外イメージング法では、使用する赤外線波長(数 μm)以下の空間分解能を得ることは難しく、また、赤外領域では高速(ナノ秒領域)の光検出器も得にくい。本稿で紹介するサーモリフレクタンス法は、物質表面の反射率が温度により変わることを利用するもので、短波長のレーザー光が使えるため、空間分解能・応答速度の点で有利であり、上記の熱問題の解決にも適応可能な技術である。またこの技術は、放射率の低い金属や赤外領域に透過帯を持つシリコンなど半導体材料にも適応できるため、赤外イメージング法とは互いに相補的である。

清水 祐公子 しみず ゆきこ
shimizu-yukiko@aist.go.jp
計測標準研究部門 温度湿度科
放射温度標準研究室
(つくばセンター)

日本ではまだ着手されていない中温域(100°C~400°C)において赤外放射温度計を開発し、放射温度標準を確立するための研究に従事している。現在の国際協定では、温度標準は特定の物質の凝固点・融解点などの物性値に基づいて供給されている。将来は熱力学の法則から高精度の温度標準を直接供給する方法を確立したいと考えている。その1つとしてボルツマン定数の精密決定とそれによる温度標準の供給を計画している。



図1 共焦点顕微鏡光学系を用いたサーモリフレクタンス温度計

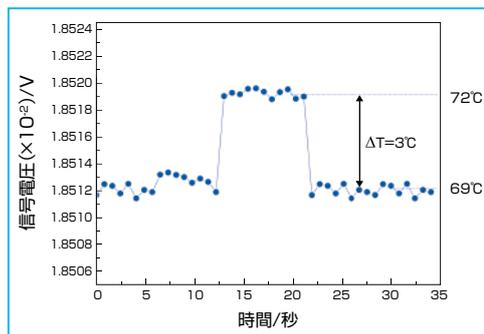
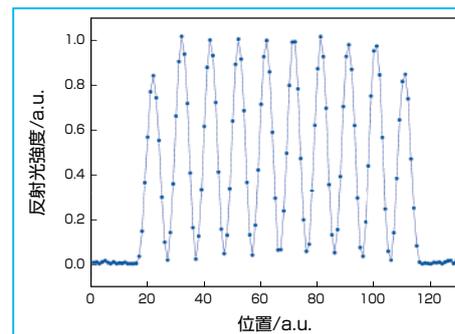


図2 温度変化に対応する反射光強度の変化

左軸は反射光強度に対応する検出器出力電圧。右軸は電気抵抗と温度との校正結果から求めた温度目盛。

図3 空間分解能評価

線幅 1 μ m のテストチャート観測結果。コントラスト 100% を達成している。



装置の特徴

サーモフレクタンズ法と電気抵抗測定技術を合わせ用いることにより、未知試料における微小領域の温度の絶対値を高速に求める装置を開発した。さらにサブミクロン領域の温度計測を実現するために光学系には共焦点顕微鏡を採用し、空間分解能を向上させた。

サーモフレクタンズ法では、試料の反射率の温度依存性を正確に知る必要がある。しかし多くの物質についてこのようなデータの蓄積はまだ十分とはいえない上、測定対象試料の組成や反射面の状態が詳らかでない場合も多い。また反射光の相対強度の測定は比較的容易かつ高精度に行えるが、反射率の絶対測定には高度な技術が要求される。本装置では測定対象そのものの反射率の温度依存性を、反射光強度と電気抵抗のその場測定から解析する。絶対反射率に比べると、測定が容易で測定精度も高い電気抵抗の温度特性から得られる温度目盛を、反射光強度の温度依存性に移し替えておくことで、プロセス中の測定においても反射光強度の相対測定のみで直ちに試料の表面温度を推定できる。

装置構成と測定結果

図1に温度測定装置の写真を示す。上段が光源および測定系、下段が試料および微動ステージである。波長785nmの安定化された半導体レーザーの出力は共焦点顕微鏡光学系の対物レ

ンズを通して測定対象試料面に収束・照射される。反射光は対物レンズおよび結像レンズを通して光検出器の直前におかれたピンホール面に結像される。試料はXYZ微動ステージ上に載せられ、CCDカメラのモニターで監視されながら、位置決めされる。測定試料としてガラス基板上にDCスパッタ成膜した幅100 μ m、厚さ70nmのモリブデン細線を用いた。この細線には電流および電圧測定端子が取り付けられている。試料に流れる電流を矩形波的に変化させ、温度上昇したときの電気抵抗値および反射光強度を同時測定する。矩形波加熱に対応する試料の温度変化は、反射光強度の変化として検出器の出力電圧の変化に現れる(図2)。温度変化は、同時測定された電気抵抗値の変化から、あらかじめ測定した電気抵抗値と温度の関係を使って求められる。縦軸右側の温度目盛は、電気抵抗測定から移し替えられた目盛である。こうして試料についての反射光相対強度と温度との関係図が求められる。

高温分解能・高空間分解能の実現

図2において矩形波加熱電流に対応

する反射光強度の変化は、電気抵抗の同時測定により温度変化3 $^{\circ}$ Cに相当することが求められる。反射光強度の変動の標準偏差値 10^{-6} Vは0.2 $^{\circ}$ Cの温度変化に相当し、これが検出可能な温度変化の最小値となる。空間分解能の評価は、線幅が1 μ mから0.5 μ mまでのラインアンドスペースのテストチャートを使用し、ステージを移動させながら反射光強度を観測して行った(図3)。線幅1 μ mでは100%、0.7 μ mにおいては30%のコントラストが観測された。

本装置において1 $^{\circ}$ Cあたり 10^6 の極微小な反射率変化を観測可能とし、かつ波長785nmの近赤外光源の回折限界の分解能を持つ温度計測が実現した。測定系の温度ドリフトの除去、光学系の最適化などにより、システムの空間分解能、温度決定精度をさらに向上させることが可能である。われわれはこの研究を実用的な微小領域温度高速測定装置開発の第一歩と位置づけ、光計測を基盤としたナノ領域表面温度標準の開発、さらには新しいナノ温度センサーの開発とその校正・評価技術の確立を目指している。

関連情報:

- 共同研究者: 石井順太郎, 馬場哲也 (計測標準研究部門)
- N.Taketoshi, T.Baba, A.Ono, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.38, L1268 (1999)
- Y.Shimizu, J.Ishii, K.Shinzato, T.Baba, Int. J. Thermophys., Vol.26, 203 (2005)
- J.Christofferson, et al., Symp. SEMITHERM VII. Prop., San Jose, Ca (2001)
- T. Phan, S. Dilhaire, V. Quintard, W. Claeys, J. Batsale, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, pp.69-74 (1999)