原子間力顕微鏡を用いた微小スケール熱計測*
(第2報, 温度・熱物性値分布計測)中別府 修^{*1}, 井下田 真信^{*2}
梶井 誠^{*3}, 土方 邦夫^{*4}Microscale Thermal Measurement using the Atomic Force Microscope
(2nd Report, Temperature and Thermophysical Properties Measurement)Osamu NAKABEPPU, Masanobu IGETA,
Makoto KAJII and Kunio HIJIKATA

Experimental study on microscale measurement of temperature and thermophysical properties using the Atomic Force Microscope was conducted. Thermal and topological images were taken by scanning a gold film on nickel wire type thermocouple probe on sample with constant contact load. Visualization of temperature distribution of thin film resistor of 20 μm square and thermal conductance distribution of composite material called CFRP were attempted. With reducing ambient gas pressure, heat transfer mode between the probe and sample changes from gas conduction to solid conduction through contact point, thus contrast of temperature image becomes weaker and spatial resolution improves from 30 μm to less than 1 μm . In the properties measurement, it has been demonstrated that sub-micron scale visualization of thermal conductance is possible by this method and resultant image is affected by sample geometry and thermophysical properties distribution.

Key Words: AFM, SThM, Thermocouple probe, Microscale temperature measurement, Thermophysical properties, Point contact, Vacuum experiment

1. 緒言

光の波長より小さなスケールで温度・熱物性値の空間分布を調べる微小スケール熱計測は、微細化、高集積化の進む半導体産業、様々な特性の材料を組み合わせた複合材料の開発、熱輸送特性の空間分布から均一性等を調べる薄膜の低エネルギー評価、固体表面の触媒反応等の微細機構の解明など広範囲の利用が考えられる。従来、微小スケール熱計測には赤外線やラマン散乱⁽¹⁾を利用した光学的手法が一般的であったが、近年、遠視野光学の限界を超えた微細スケールの熱計測が、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) に各種の温度計測機能を付加した走査型熱顕微鏡 (SThM) により達成されつつあり、サブミクロンスケールの温度・形状同時計測例が報告され始めている⁽²⁾⁻⁽⁷⁾。

著者らは、前報⁽⁸⁾において、原子間力顕微鏡 (AFM) に細線型および薄膜型微小熱電対プローブを組み合わ

せた SThM による熱計測を行い、周囲空気の影響による熱イメージの歪み、空間分解能の低下を示し、真空環境での計測により、温度分解能が不十分ではあったが、試料表面温度をミクロンスケールで測定可能なことを報告した。また、プローブ先端と試料表面のポイントコンタクトによる熱や電子の輸送特性の解明を目的に、金属試料と測定プローブ間の接触電気抵抗の評価から微小接触面の接触半径が約 10 nm であることを示してきた⁽⁹⁾。

AFM は、カンチレバー (片持ち梁) と呼ばれるプローブ先端の針先と試料の間に働く微小な力を検出し、プローブと試料の間隔を制御しながら水平面内を走査し、原子スケールで固体表面形状を計測するが、試料とプローブ間の熱移動を通して計測する熱計測に関しては、AFM が一定圧力の接触状態を維持しながら試料上を走査する点が計測上の利点となっている。

本報では、熱電対接点を微小化しやすい薄膜被覆細線型熱電対プローブを製作し、微小スケールの温度分布および熱物性値分布を AFM を用いて計測する実験の結果を報告する。温度計測では、計測環境の気体圧力を変化させ微小発熱体の温度分布計測を行い、気体

* 1997 年 5 月 20 日 第 34 回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 1997 年 6 月 6 日。

^{*1} 正員, 東京大学 (☎ 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)。

^{*2} 准員, 東京工業大学大学院 (☎ 152-0033 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*3} 東京工業大学大学院。

^{*4} 正員, 東京工業大学工学部。

熱伝導の計測空間分解能や信号強度に与える影響を調べ、計測法の位置づけを明確にした。熱物性値計測に関しては、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の電気伝導性、熱伝導性分布の計測による微小スケールの可視化を行い、計測の特徴、必要な条件を熱伝導解析により検討した。以下、計測方法、温度計測、熱物性値計測について示す。

2. 測定方法

2.1 AFM 使用した AFM は市販の標準的なもの (SII 社製 SPI-3700, SPA-300) である。測定原理は前報に掲載したものと同一でありプローブにかかる力は光てこ方式で検出される。使用した AFM は大気中での使用を前提とされているが、 10^{-5} Torr までの真空環境で問題なく動作可能であった。また、除振機構を真空チャンパー内に設置することで、真空排気系の振動も実験範囲内の拡大率の計測では無視できた。

2.2 温度測定プローブ 図1に、製作した熱電対プローブの概要を示す。熱電対接点がプローブ先端に微小サイズで形成されるように、前報で示した2種類のプローブの中間的性質を持つ薄膜被覆細線型プローブを製作した。プローブは、電解エッチングにより尖らせた直径 $25\ \mu\text{m}$ のニッケル細線に熱硬化性樹脂を塗り、表面張力効果で露出した先端を含む全面に厚さ 30nm の金薄膜を蒸着することで作られる。プローブ先端に形成される微小な熱電対接点は、SEM に接続されたエネルギー分散型分析器 (EDS : Energy Dispersive Spectroscopy) による計測の結果、 $5\ \mu\text{m}$ 程度の大きさであった。また、プローブの固定されているベースプレートには、もう一方の熱電対接点が形成されており、温度信号としてはプローブ先端と根元の温度差が現れる。

プローブ先端形状は、SEM 観察から曲率半径 $2\ \mu\text{m}$ 程度と計測され、AFM のプローブ先端としては大きな曲率半径を有している。この先端形状は、高分解能な形状計測には不向きであるが、大きな接触面積を得て、接触熱コンダクタンスを大きく取れるため、温度計測性能の向上には有利な形態である。

また、微小サイズの熱電対は製作方法や材料構造の違いで熱起電力にばらつきが生じる可能性があるが、プローブ各々について較正を行った結果、正常動作する全てのプローブで熱起電力は $20.1\ \mu\text{V/K}$ 程度となり、バルクの熱起電力 $22.6\ \mu\text{V/K}$ の約9割程度の値であった。計測では、この較正結果の熱起電力値を使用した。

プローブのバネ定数は、既知の形状のアルミ箔製カンチレバーとプローブを接触、変形させることから、

Fig.1 Gold Film on Nickel Wire type Thermocouple Cantilever Probe

Fig. 2 Samples.

Fig.3 Properties Measurement System

バネ定数 $30\ \text{N/m}$ を得た。この値も、通常の AFM プローブの値の数十から数百倍の大きさである。繊細な材質の計測には、さらに全体を小型化した低バネ定数の温度プローブの製作が必要である。

2.3 試料・計測系 図2に計測に使用した微小発熱体と複合材料試料の光学顕微鏡像を示す。微小発熱体はガラス基板上に蒸着されたサイズ $20\ \mu\text{m}$ または $50\ \mu\text{m}$ 四方、厚さ $20\ \text{nm}$ の ITO (Indium Tin Oxide) 薄膜抵抗であり、金電極を通じて直流通電加熱される。表面温度分布の計測時には、試料とプローブの電気的な接触を避けるために、試料表面に厚さ $1\ \mu\text{m}$ 程度の絶縁膜 (フォトレジストまたはアルミナ) をコーティングした

ものを使用した。複合材料試料としては、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を使用し、炭素繊維に直行する面を光沢を帯びるまでアルミナ研磨材(粒径: $0.3\mu\text{m}$)を使用して研磨し、観察面とした。CFRPは多数の炭素繊維が一定方向に列になってエポキシ樹脂の中に詰まっているもので、炭素繊維径は約 $8\mu\text{m}$ である。炭素繊維は導電体、エポキシ樹脂は不導体であり、熱伝導率についても各々 $\lambda=126\sim 216 [\text{W/mK}]$, $\lambda=0.30 [\text{W/mK}]$ と大きな違いがあり、CFRPは電気的、熱的に物性が大きく異なる材料の複合材料である。

温度分布の計測では、熱電対プローブで試料表面を走査し、熱電対出力を直流アンプで増幅し、AFMコントローラーで高さ情報と同時に記録する。物性値の計測では、図3に示すように、電気的および熱的計測を行った。電気的計測では、プローブ細線と試料に微弱電流($I \approx 0.75\mu\text{A}$)を流し、接触点から試料背面までの電圧降下を測定し、試料の電気伝導性分布を調べた。また、熱的計測では、試料は均一な面ヒーター上に設置され、プローブ根元温度(T_∞)より高い一様な温度(T_0)に保たれる。熱電対プローブが表面を走査し、試料からプローブへの熱移動に伴う接触点の温度変化が計測される。両者の物性値計測は、気体熱伝導の影響が現れない低圧環境で行われた。

3. ミクロスケール温度計測

3.1 温度計測結果 AFM周囲の空気圧力 P を変え、製作した熱電対プローブで微小発熱体の温度計測

を行い、ミクロスケールの温度計測に対する空気熱伝導の影響を調べた。図4に周囲圧力を左側から 760 Torr (大気中), 3.5×10^{-2} Torr, 6.0×10^{-5} Torr とした場合の温度計測結果を示す。

大気中における計測領域は $70\mu\text{m}$ 四方であり、低圧での計測領域は $40\mu\text{m}$ 四方である。大気中で計測された温度像の上に、同時に計測された形状像から得た ITO 抵抗、金電極の形状を白線で描いてある。

大気中での計測では、試料とプローブ間の熱移動は、プローブと試料の微小接触面を通した固体熱伝導ではなく、気体熱伝導が支配的となり高い S/N 比の温度信号が得られるが、前報⁽⁸⁾に示したように、プローブ形状に依存する温度画像の歪みが現れ、等温線から若干左側で温度が高く計測されていることが観察される。

圧力を $P=3.5 \times 10^{-2}$ Torr とした計測結果は、空気を介した熱輸送量が減少し、プローブと試料の接触点付近の熱的情報が計測され、温度画像中で ITO 抵抗部の形状や試料表面に付いた粒子の影響、抵抗中心部から等距離にあるガラス部分の方が金電極部分より温度が高いことが分かることを示している。しかし、この程度の真空度では、大気中と同様、発熱体左側で温度が高く計測されていること及び ITO 発熱部分が若干ぼやけていることから、気体熱伝導も熱輸送に関与していることが分かる。

$P=6.0 \times 10^{-5}$ Torr における計測では、熱電対信号が小さくなり、接触状態の変化が大きく計測に影響するようになる。画像中心部に水平な帯状の低温領域が現れているが、これは計測途中にプローブ先端部に何らかの粒子が付着し接触状態が変化したためだと考えられ

Fig.4 Temperature Measurement of ITO Heater under Various Gas Pressure Condition

る。その他の領域の計測結果から、この条件での計測の特徴を示すと、発熱体の左右で対称な温度分布が得られていること、金電極周囲の段差や絶縁膜上に微粒子が付着した部分での表面の凹凸による接触状態の変化が温度変化として現れていることが挙げられる。気体熱伝導の影響がさらに小さくなり、接触点を通しての熱移動の計測における割合が大きくなったことを示している。また、圧力が高いほど試料表面の吸着物質も多くなり接触熱伝達が増加すると考えられるが、本研究では、その影響を独立して調べていないため、圧力による影響の中にその効果は含まれている。

ITO 抵抗の温度依存性から求めた発熱体の平均温度と周囲環境温度の差は、大気中での実験では 50.9 K、低圧中では 52.2 K と測定された。熱電対プローブの測定最高温度はそれぞれ 3.5 K, 2.9 K, 2.1 K であり、この差は、10 nm 程度の接触点サイズが熱電対サイズに比べて小さく、接触点から熱電対接点までの熱抵抗が大きいことが原因と考えられる。熱移動モードが接触面を通した固体熱伝導のみであると考えた場合、熱電対接点の示す温度は、接触面の大きさと熱電対接点の接触点からの距離、接触面の温度変動速度で決まる。非定常熱伝導解析からは、例えば 50 nm の接触半径では、100 Hz で変動する接触点温度を 1/10 の大きさで計測するには 1 μm 以下の熱電対接点が必要となることが示される⁹⁾。真空中での S/N 比を向上させ、計測結果が表面温度分布を忠実に示し、計測時間の短縮化を狙うためにも、将来的に、熱電対サイズを現状の 5 μm から 1 μm 程度にすることが必要であると考えられる。

3.2 測定空間分解能 図 4 の温度計測結果より熱輸送形態の違い及び計測分解能を考察する。図 4 に示した A-A', B-B', C-C' 線上の温度分布を図 5 に示す。大気中での計測は気体熱伝導が支配的であり、検出される温度信号が大きく、ある範囲の表面温度を平均した分布が計測されているため、凹凸のない滑らかな温度分布を示す。一方、B-B' では気体熱伝導の影響が減少し、C-C' では、検出温度が接触状態に強く影響されるようになり気体熱伝導より固体熱伝導が支配的となった場合の計測温度分布を示している。

気体圧力による空間分解能の違いを知るため、20 μm の ITO を加熱させた場合の温度分布を 3 次元熱伝導方程式を数値的に解き、図 6 のグラフにおいて実験結果との比較を行った。図 5 の実験結果を改めて丸、三角、四角のシンボルで示し、計算結果を実線で示す。縦軸は計算結果に対して最高温度で規格化した温度、横軸は ITO 抵抗の中心を 0 とした時の距離である。

計測結果を縦方向に伸縮し、数値解析結果と一致させることを試みた結果、低圧環境での計測結果の分布

Fig.5 Temperature profile on ITO measured in various gas pressure condition.

Fig.6 Comparison between measurement and numerical simulation of temperature profile of ITO sample.

Fig. 7 Spatial resolution of thermal measurement for various energy transport mode

は解析結果とうまく一致し、計測値は空間的な平均化を受けていないことが分かった。プローブ・試料の接触点スケールが数 10 nm であること、温度分布画像の印象から 10^{-5} Torr 程度の真空中では、計測空間分解能は 1 μm 以下であると考えられる。一方、大気圧下での計測結果は、分布形状が解析結果と合わず、解析結果を 20, 30, 40 μm の領域で平均化した温度分布 T_{20} , T_{30} , T_{40} との比較を行った。その結果、大気中での実験結果は、 T_{20} , T_{30} の温度分布の中間程度の分布形状を示し、大気中において本手法による温度計測空間分解能は 30 μm 程度であることが分かった。

以上の結果より、針状熱電対プローブを試料に接触

Fig.8 Topographic, Electric Conductance and Thermal Conductance Images of CFRP

させて温度計測を行う本手法の位置づけが図7のようにまとめられる。従来の微小スケール温度計測の代表的手法である赤外線放射温度計が $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の空間分解能限界を持つのに対し、本手法は、大気中での使用で $30\text{ }\mu\text{m}$ の分解能を示し、気体圧力を変え気体熱伝導の影響を制御することで、現段階ではサブミクロン、究極的には 10nm オーダーの接触点スケールの分解能を持つ可能性があると言える。また、さらに分解能を上げた熱計測のためには、1原子同士の相互作用や電子トンネル効果の温度依存性を利用する等の計測における原理的な飛躍が必要となる。

4. ミクロスケール熱物性値計測

4.1 物性値分布計測結果 次に複合材料試料の物性値分布を電気的および熱的に計測した結果を示す。熱計測における空気の影響を排除するため、空気圧力が 10^{-2}Torr 程度の低圧環境で実験を行った。試料は全体として均一な温度に保たれ、プローブ根元は試料より低温であるため、プローブ・試料の微小接触点を通して試料からプローブへ熱移動が起これ、接触点温度 $T_{p,c}$ および熱電対温度 T_m が低下する。一定圧力でプローブを試料に接触させ、接触状態を一定にしたまま走査することで、試料の熱伝導性の可視化が行われる。

計測領域を炭素繊維が数本含まれる $15\text{ }\mu\text{m}$ 四方とし、熱電対プローブを用い、連続して電気伝導性計測、熱伝導性計測を行った結果を図8に示す。左から、表面形状(トポ)像、電気伝導像、熱伝導像であり、白い部分はトポ像においては高い部分、電気伝導像、熱伝導像

においては伝導性が高い部分を示す。試料表面を研磨したため、トポ像では炭素とエポキシ樹脂の境界が不明瞭だが、光学顕微鏡画像と比較すると、炭素部とエポキシ部の識別ができる。

一方、電気伝導像では、炭素とエポキシで電気伝導度の違いが非常に大きいこと、電子輸送に周囲気体の影響が全くないことから、 10 nm オーダーの接触点を通しての電子移動が計測されている。エポキシ部と炭素繊維部の境界が明確に現れ、境界部の微細な構造も解像されているため、電気的計測の空間分解能は $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以下に達していると考えられる。

熱伝導性計測では、熱伝導性が炭素部で高くエポキシ部で低い画像が得られ、試料の熱的特性のミクロスケールの可視化が可能なが示された。炭素繊維同士の間のエポキシ部分が観察できていることから、計測の空間分解能は $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下であると考えられる。また、熱伝導性像の特徴は、炭素・エポキシ境界部で熱伝導性が連続的に変化して計測されている点であり、この画像は単純に熱伝導率の違いを可視化したものではないことを示している。図8の熱伝導性の画像を得るまでに、CFRP 試料の厚さを 2.5mm , $860\text{ }\mu\text{m}$, $260\text{ }\mu\text{m}$ とし、また、試料とプローブ根元の温度差 ($T_0 - T_\infty$) を 1.3°C , 3.7°C , 7.5°C と変化させ実験を行った。その結果、試料が厚いと熱伝導性画像は得られず、温度差が大きいほどコントラストの大きい画像が得られることが分かった。

この結果を説明するため、図9に示す単純な熱抵抗モデルを考える。プローブ根元温度 T_∞ と試料底面温度 T_0 が与えられると定常状態の接触点温度 $T_{p,c}$ および熱電対の指示温度 T_m が、プローブの熱抵抗 R_{probe} 、接触

Fig. 9 Thermal resistance model of probe and sample system.

点から熱電対接点までの熱抵抗 R_{jct} 、試料の熱抵抗 R_{sample} から見積られる。プローブ熱抵抗に比べ試料熱抵抗が小さいと測定温度は試料底面温度に近づき、試料熱抵抗が大きくなると測定温度はプローブ温度に近くなる。炭素とエポキシの熱伝導率を考慮すると、試料厚さに対して測定される温度は、図9中の曲線のような変化を示すことが予想される。これより、試料熱抵抗がプローブ熱抵抗に比べ非常に大きくなるような厚い試料では、物性の違いによる計測温度のコントラストが明確に付かないこと、また、系が定常熱伝導に支配されている限り、計測温度の変化はプローブと試料の温度差に比例し、S/N 比の観点から、ある程度大きな温度差が必要であることが理解される。

4.2 物性値計測の解析 単純な熱抵抗モデルでは、試料厚さにより熱画像のコントラストが影響を受けることが分かったが、計測条件が定常熱伝導モデルを適用可能なものであるか、また、測定された温度変化が物性値の空間分布から予測されるものと同じかどうかを調べるために、CFRP をモデル化し3次元定常熱伝導解析を行った。

まず、プローブを一定速度 u で厚さ L 、熱拡散率 a の試料上を移動させることの熱移動に与える影響を調べる。プローブが x 軸に沿って移動している時、プローブに固定した座標系から見ると熱移動は対流拡散方程式に支配され、 u 、 L 、 a で方程式を無次元化すると次式となる。

$$\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad Pe = \frac{uL}{a}$$

ここで、熱拡散率の小さなエポキシ樹脂を例に取り、実験条件での Pe 数を評価すると、 $u=10^{-6}$ m/s、 $L=10^{-3}$ m、 $a=0.14 \times 10^{-6}$ m²/s より $Pe=7 \times 10^{-3}$ となり、対流の影響が非常に小さいことが分かる。よって、本研究の実験条件では、プローブ移動速度は試料内の熱緩和時間に対して十分遅く、試料内の温度分布の評価に定常熱伝導を

Fig. 10 Calculation model of CFRP

Fig. 11 Comparison between Experimental and Calculation Results.

適用できることが示された。

CFRP 試料の熱伝導解析では、図9のようなモデル化を行った。CFRP は直方体の炭素繊維とエポキシを含む単位領域が周期的に配列しているものと考え、その1/4を計算領域とする。基礎方程式は炭素とエポキシで熱伝導率が異なる3次元定常熱伝導方程式を用いる。境界条件として、計算領域側面で断熱、下面は温度一定、上面では熱伝導率 h とプローブ温度 T_0 を与え、プローブが接触している部分は $h=10^8$ W/m²K、その他の部分は $h=0$ という条件を使用した。試料底面とプローブ根元の温度差は $T_0 - T_\infty = 7.5$ K とした。計算領域の大きさは x 、 y 方向に $10 \mu\text{m}$ 、 z 方向は $25 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$ とし、計算メッシュには x 、 y 方向に幅 $0.5 \mu\text{m}$ 、 z 方向には最上面のメッシュ高さを $0.5 \mu\text{m}$ とし以下等比的に高さの増加する不等間隔メッシュを使用した。プローブと試料の接触点の大きさや等価的な熱伝導率は正確ではないが、計測結果の傾向を説明し理解を深めるには十分なモデルである。

接触点が x 軸に沿って移動した場合の数値計算結果と実験で得た炭素繊維中心からエポキシ部にかけての温度計測結果を図11に示す。実線で示す実験結果は計測値を10倍した値であり、シンボルを破線でつないだものが計算結果である。計測値は接触点から $5 \mu\text{m}$ 程離

れた熱電対接点部分の温度を示し、計算値は接点温度を示すこと、計算に使用した熱伝達率や接触半径、熱物性値に不確定な部分があることから、絶対値の一致は見られない。しかし、実験結果の分布形状と計算結果の分布形状は同様であり、接点温度は炭素部で一定、エポキシとの境界付近で急激に低下、エポキシ部で再び一定値になることが理論解析からも示された。さらに、この計算でも、試料の厚さにより炭素部分とエポキシ部分上の接点温度のコントラストが変わることが示されている。また、内部の温度分布からは、プローブに伝わる熱は主に炭素部分だけを伝わり輸送されているもので、接触点がエポキシ上にある場合は断熱状態に近く、接触点が炭素付近にある場合は、炭素部分を通しての熱伝導の結果僅かに接点温度が上昇することが分かった。熱物性値の大きく異なる材質で構成された試料として本実験では CFRP を選んだが、CFRP の 2 次元形状が物性値による熱伝導性画像の取得に非常に有利であったことが実験が成功した一つの原因であると考えられる。

5. 結 論

AFM に自作の薄膜被覆細線型熱電対プローブを組み合わせ、微小スケールの温度分布計測および熱物性値分布計測を行い以下の結論が得られた。

- (1) AFM に熱電対プローブを組み合わせ、固体試料の表面温度分布を計測する手法は、大気中では $30\text{ }\mu\text{m}$ 程度、 10^{-2} Torr 以下の低圧環境中では $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の空間分解能で温度分布を計測可能であることが示された。また、計測環境の空気圧力により温度画像のコントラストと分解能が変化するため、工学上は必要なコントラスト、分解能を得る計測環境を選ぶことが重要である。
- (2) 熱物性値分布のある一様温度に加熱された試料を熱電対プローブで走査することで、熱伝導性画像を $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の空間分解能で計測可能なことが示された。この計測では、プローブ熱抵抗と比較した試料側熱抵

抗が計測されるため、試料厚さ、試料物性値の 3 次元分布を考慮し計測条件を設定する必要がある。

また、今後の課題として以下の点が挙げられる。製作された熱電対接点の大きさは $5\text{ }\mu\text{m}$ 程度であるが、接点温度と計測温度の差が大きいため、より小さなセンサーサイズのプロープが望まれ、より高分解能な計測を行う場合、点接触を通じてのエネルギー輸送の特性、固体表面の吸着物質の影響を明らかにする必要がある。また、本手法による温度計測では、試料の温度分布にプローブの接触が影響を与えるため、試料からの熱移動を起こさない様にプローブ温度を制御し、真の表面温度計測を行う手法の開発が望まれる。

謝 辞

本研究は平成 7, 8 年度科学研究費補助金 (基盤研究(A) (2), No. 07555069) の補助を受けたことを記し、謝意を表する。

文 献

- (1) R. Ostermeir, K. Brunner, G. Abstreiter and W. Weber, IEEE Trans., Electron Devices, Vol. 39, (1992) pp. 858-863
- (2) M. Nonnenmacher and H. K. Wichramasinghe, App. Phys. Lett., Vol. 61(2), 168-170, 1992
- (3) A. Majumder, J. P. Carrejo and J. Lai, Appl. Phys. Lett., Vol. 62, 2501-2503, 1993
- (4) A. Majumdar, J. Lai, M. Chandrachood, O. Nakabeppu, Y. Wu, and Z. Shi, Rev. Sci. Instrum. 66(6), 3584-3592, June 1995
- (5) R. J. Pytkki, P. J. Moyer and P. E. West, Jpn. J. Appl. Phys. :Part 1, Vol. 33, 3785-3790, 1994.
- (6) O. Nakabeppu, M. Chandrachood, Y. Wu, J. Lai, and A. Majumder, Appl. Phys. Lett. Vol. 66, 694-696, 1995
- (7) A. Majumder, K. Luo, Z. Shi and J. Varesi, Experimental Heat Transfer, 9.83 (1996).
- (8) 中別府, 土方, M. Chandrachood, Y. Wu, J. Lai, and A. Majumder, 機論, 62-593, B (1996), pp.284-290
- (9) O. Nakabeppu, M. Igeta and K. Hijikata, Microscale Thermophysical Engineering, Vol. 1 No.3 (1997), pp.201-213