

# 研究

## レーザービーム偏向による走査型トンネル顕微鏡 圧電素子の変位測定

佐々木 彰\*・山田 浩史\*・深谷 次助\*・岩田 太\*

加藤 久季\*・青山 尚之\*・宮尾 正大\*\*・村上 健司\*\*

石川 賢司\*\*・野村 卓志\*\*・山口 豪\*・萩野 實\*\*

\* 静岡大学工学部, \*\* 静岡大学電子工学研究所 〒432 浜松市城北 3-5-1

(1991年8月20日受付, 1991年11月18日受理)

### Displacement Measurement of Scanning Tunneling Microscope Piezoelectric Transducers Using Laser Beam Deflection

Akira SASAKI,\* Hiroshi YAMADA,\* Jisuke FUKAYA,\* Futoshi IWATA,\*

Hisaki KATO,\* Hisayuki AOYAMA,\* Masahiro MIYAO,\*\* Kenji MURAKAMI,\*\*

Kenji ISHIKAWA,\*\* Takashi NOMURA,\*\* Tsuyoshi YAMAGUCHI\* and Minoru HAGINO\*\*

\* Faculty of Engineering, \*\* Research Institute of Electronics,  
Shizuoka University, 3-5-1, Johoku, Hamamatsu 432

(Received August 20, 1991; Accepted November 18, 1991)

A simple measurement method of the displacement of piezoelectric transducers (PZT) used in a scanning tunneling microscope (STM) has been developed. The axial displacement and inclination angles have been simultaneously measured using laser beam deflection with bisection and quartered silicone-photodiodes. The hysteresis, the nonlinearity and the mutual interference in the PZT's displacement are measured in a STM designed newly to observe optical effects. STM image of  $\text{SnO}_2$  film on an optical glass plate is observed at a constant tunnel current of 1 nA.

### 1. はじめに

走査型トンネル顕微鏡 (STM)<sup>1,2)</sup> は原子分解能で物質の表面性状を観測できる新しい顕微鏡として発達している。STMにおいて探針の3次元的位置や運動の制御には圧電素子 (PZT) を用いた3次元走査機構が使用されている<sup>3)</sup>。これらの機構において、PZT のヒステリシス、クリープおよび非線形性、また3次元走査機構の各軸の相互干渉により、STM像に歪みが発生する。そのため STM 装置に使用されている状態で PZT の変位を直接測定できる必要がある。PZT に印加した電圧の関数として変位を測定するが、それには各種の方法が使用されている<sup>4-10)</sup>。すなわち STM 用の PZT の変位測定は容量型センサー<sup>4,8)</sup>、レーザー干渉計<sup>5,7,10)</sup>、光ビーム偏向・変位<sup>6,11)</sup>、回折格子<sup>9)</sup>等を使用して行われてき

ている。

STM の開発に刺激され、原子間力顕微鏡 (AFM)<sup>10-12)</sup>、フォトン走査トンネル顕微鏡 (PSTM)<sup>13)</sup> 等、各種の走査型プローブ顕微鏡 (SPM) が開発されてきているが、これらにおいてもプローブ走査機構はほぼ STM と同一のため、これらの機構の変位測定は同様に可能である。しかしながら上述した STM 装置の PZT 変位測定において、ある軸の1次元的変位のみ測定しており、3次元的走査機構の各軸の相互干渉を直接測定していない。

そこで本報告において、測定方法の簡単な光ビーム偏向 (OBD) を用いた PZT 軸方向の変位およびその軸回り傾きが同時測定可能な測定方法を示す。これは2個の分割型フォトダイオードを用いた測定方法であり、この方法は現在まで行われていない新しい方法である。われわれは超高真空 STM 装置を製作し<sup>14)</sup>、測定を行ってき

たが<sup>15)</sup>、光に関連した現象を測定可能な、新たに製作した大気中用 STM 装置にこの OBD 測定方法を適応する。なお、OBD は AFM においても光てこ、すなわち力検出用のカンチレバーの変位検出にも使用されている<sup>10-12)</sup>。

## 2. 実験方法

OBD による PZT の変位および傾き測定方法の原理を Fig. 1 (a), (b) に示す。PZT の軸方向の変位のみでなくその軸回りの傾きを同時に測定可能とするためレーザー 1 およびレーザー 2 の 2 台の He-Ne レーザーを使用し、2 分割型シリコン・フォトダイオード (SP 2) (浜松ホトニクス S 2200) および 4 分割型シリコン・フォトダイオード (SP 4) (浜松ホトニクス S 1671) を使用する。Fig. 1 (a) に示すように PZT が軸方向に  $d$  変位した場合、レーザー 1 からのレーザービームは SP 2 上において OBD により  $d/\cos\theta$  変位し、レーザー 2 からのレーザービームの SP 4 上における OBD は軸方向のみの変位のため観測されない。また Fig. 1 (b) に示すように PZT が角度  $\phi$  紙面内で傾いた場合、レーザー 1 からのレーザービームは SP 2 上において OBD により

$L_1 \tan 2\phi$  変位し、またレーザー 2 からのレーザービームは SP 4 上において  $(L_2 + L_3) \tan 2\phi$  変位する。このため、SP 2 と SP 4 上で同時に OBD が観測される。この場合 SP 4 により測定される観測量は PZT の軸回り傾きの情報のみを与える、PZT 軸方向変位の情報を含んでいない。このため、2 個の分割型フォトダイオードを使用すれば PZT の軸方向変位と軸回り傾きの同時測定が可能である。また、4 分割フォトダイオードを使用しているため、PZT の紙面内の傾きだけでなく軸回りの傾き一般が測定可能である。SP 2 により測定される観測量は PZT の軸方向変位および紙面内の傾きの情報を与える。したがって軸方向変位および軸回り傾きに対する SP 2 そして SP 4 の出力特性の校正を行っておけば、PZT の軸方向変位および軸回り傾き量の同時測定が可能となる。

レーザービームを使用した OBD の測定において、特に He-Ne レーザー管の熱歪みによるレーザービーム方向変動に注意する必要がある<sup>16)</sup>。本実験においてはレーザーが熱的平衡状態に達するまでレーザー点灯後十分な時間をおいてから OBD 測定を行った。

SP 2 および SP 4 からの信号出力電流を電流電圧変換器で電圧信号に変換し、A/D 変換器によりパーソナル・コンピュータに入力し必要な演算を行った。He-Ne レーザーの出力変動の影響を除去するため以下のようにして PZT の変位および傾きを測定する。2 分割型フォトダイオード SP 2 の各々の出力信号を  $i_{21}, i_{22}$  とした場合

$$I_2 = (i_{21} - i_{22}) / (i_{21} + i_{22}) \quad (1)$$

を演算し、PZT の軸方向変位および傾きを測定した。4 分割型フォトダイオード SP 4 の各々の出力信号を  $i_{41}, i_{42}, i_{43}, i_{44}$  とすると、その上での 2 次元的ビーム位置変動は以下の式で表される。

$$I_{4x} = (i_{41} - i_{42} - i_{43} + i_{44}) / (i_{41} + i_{42} + i_{43} + i_{44}) \quad (2)$$

$$I_{4y} = (i_{41} + i_{42} - i_{43} - i_{44}) / (i_{41} + i_{42} + i_{43} + i_{44}) \quad (3)$$

この関係より SP 4 上のビーム移動距離を測定し、 $(L_2 + L_3)$  の値を用いて PZT 軸の傾きを算出した。Fig. 1 に示した実験系の腕の長さ  $L_1, L_2, L_3$  およびビームの入射角  $\theta$  の値は各々 30 mm, 275 mm, 180 mm および  $46^\circ$  とした。 $(L_2 + L_3)$  の値を  $L_1$  の値より大きくした理由は PZT 変位時の微小角の傾きを測定可能とするためである。

ガウス型レーザービームを用い上述の測定を行う場合、レーザーのスポットサイズ  $w$  が実験感度に関連するため、理論式的関係を求める。ガウス型レーザービー

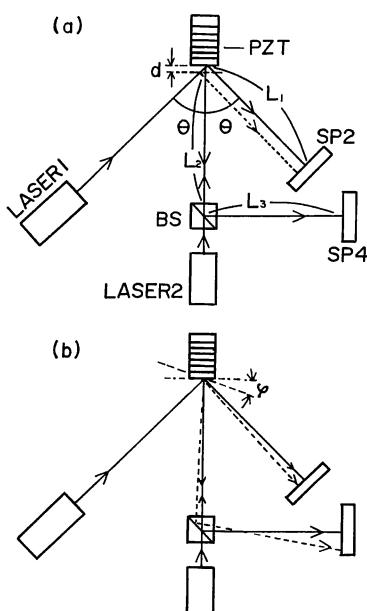


Fig. 1 Optical configuration for measuring (a) axial displacement and (b) inclination angle of scanning tunneling microscope piezoelectric transducers. SP 2; a bisection silicone-photodiode, BS; a beam splitter, LASER 1 and 2; He-Ne lasers.

ムの光強度分布は次式で表される。

$$I(x, y) = \frac{2I_0}{\pi w^2} \exp\left(-\frac{2x^2 + 2y^2}{w^2}\right) \quad (4)$$

ここで、 $I_0$  は全光強度である。2分割型シリコン・フォトダイオードを使用してレーザービーム位置移動を測定する場合を例に理論的曲線を求める。この場合、Fig. 2 に示すようにガウス型レーザービームを間隔  $b$  離れた 2 個の光検出器を使用して測定する場合と等価である。この時の  $i_{21}, i_{22}$  は次式で表される。

$$i_{21} = I_0 \{1 - \text{erf}(B/2 - k)\}/2 \quad (0 \leq x \leq b/2) \quad (5)$$

$$i_{21} = I_0 \{1 + \text{erf}(k - B/2)\}/2 \quad (x \geq b/2) \quad (6)$$

$$i_{22} = I_0 \{1 - \text{erf}(B/2 - k)\}/2 \quad (7)$$

ここで、 $B = \sqrt{2}b/w$ ,  $k = \sqrt{2}x/w$  であり、

$$\text{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (8)$$

で誤差関数を定義する。4分割型フォトダイオードを使用した場合も同じように理論式を求めることができる。上記の理論式の計算結果は実験結果の項で述べる。

実験に使用した He-Ne レーザー (NSO-FS) のスポットサイズ  $w$  は本測定法における実験感度に関連するため、 $w$  の値をスリット開口走査法<sup>17)</sup>で測定した結果、SP 2 および SP 4 上において各々 0.49 mm そして 0.57 mm であった。

STM 装置に使用される PZT の配置には種々の方法があるが<sup>2,3)</sup>、本実験に使用した STM 装置用の積層型 PZT 機構を Fig. 3 に示す。X および Y 軸の PZT は

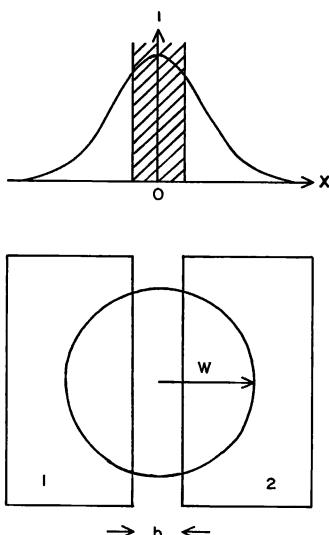


Fig. 2 Principle of displacement measurement of piezoelectric transducers using Gaussian laser beam.

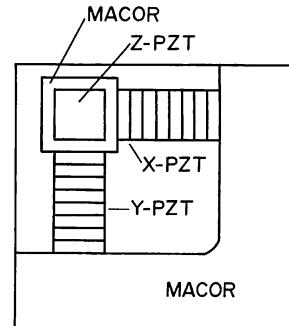


Fig. 3 STM scanning system using piezoelectric transducers.

機構の剛性を高くするため、マコールを使用し相互をエポキシ系樹脂で接着した。Z 軸方向変位用 PZT は X および Y 軸との相互作用を小さくするため、Fig. 3 に示すように XY 機構上に接着した。実験に使用した PZT はトーキン NLA 5×5×10 であった。X, Y, Z 軸の各々の変位および傾きを測定するため、反射鏡を PZT およびマコールに接着して実験を行った。

### 3. 実験結果

測定系の PZT 軸方向変位および軸回り傾き量の校正のための例を Fig. 4, Fig. 5 に示す。Fig. 4 に示した結果は軸方向にマイクロメータヘッドを使用した移動台により PZT を移動した場合のものである。SP 2 により測定した結果が Fig. 4 (a) である。Fig. 4 (a) の点線で示したのが式(1), (4)~(8) を使用して計算した理論値である。測定点は原点からずれているが、これは SP 2 の位置の初期的ずれであるため補正可能である。ほぼ一直線上に測定点がのり、また Fig. 4 (a) からわかるように、ガウス型レーザービーム強度分布のビーム径  $w$  の値を用い計算した理論的勾配すなわち感度と実験値はほぼ一致した。また、同時に測定した SP 4 の測定結果を Fig. 4 (b), (c) に示す。原点からずれ、横軸に直線的平行に変位しているがこれは SP 4 の向きが移動台と相対的に傾いていることを表しており補正可能である。また、これらの測定結果から移動台が直線的に移動していることがわかる。次に、マイクロメータヘッドつき微動回転台上に PZT 機構部を配置し、軸回り傾き角の校正を行う。その際反射鏡の表面反射部分が微動回転台の回転中心にくるようにし、その部分でレーザービームが反射するように配置する必要がある。その測定結果例および理論計算結果を点線で Fig. 5 に示す。

Fig. 5 (a) に示すように、微動回転台移動に伴い SP

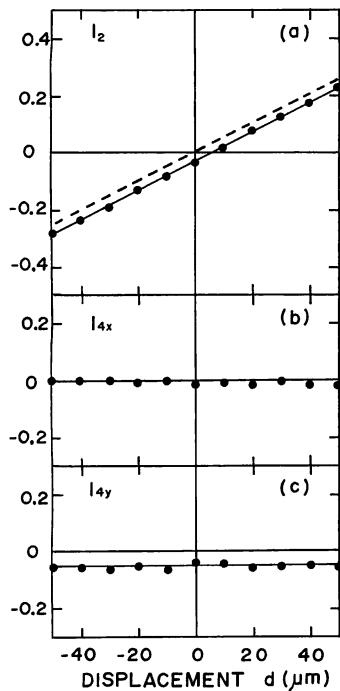


Fig. 4 Output signal  $I_2$  of SP 2, and output signals  $I_{4x}$  and  $I_{4y}$  of SP 4 for measuring displacement. The dash curve is a theoretical result.

2 上のレーザービーム位置も移動する。この場合もガウス型レーザービーム径  $w$  の値から計算した勾配、すなわち感度と実験値はほぼ一致した。また、実験値の原点のずれは補正可能である。同時に測定した SP 4 の測定結果を Fig. 5 (b), (c) に示す。Fig. 5 (b) の結果は回転軸の回転量を表している。PZT の軸方向変位に伴う STM 機構の軸の傾きは微少であるため Fig. 5 (b) の直線部分を使用して実際の測定を行う。このような曲線になるのはレーザービームがガウス型強度分布をしているためであり、 $w$  の値を用いて計算した結果はほぼ実験値と一致する。また、実験値の原点のずれは補正可能である。Fig. 5 (c) に (b) と直交する方向の回転量を示す。SP 4 の配置の傾きのため、直線的に変位しているが補正可能である。

製作した STM 機構の X, Y, Z 軸の軸方向変位および傾きの測定結果を Fig. 6, 7, 8 に示す。これらの結果は補正をほどこし軸方向変位および軸の傾きを同時に各々演算し得たものである。横軸は PZT に印加した電圧値を示す。Fig. 6 は X 軸方向 PZT に電圧を印加した場合を示す。Fig. 6 (a) の結果は X 方向の変位を示しており、PZT 変位におけるヒステリシスおよび非線形

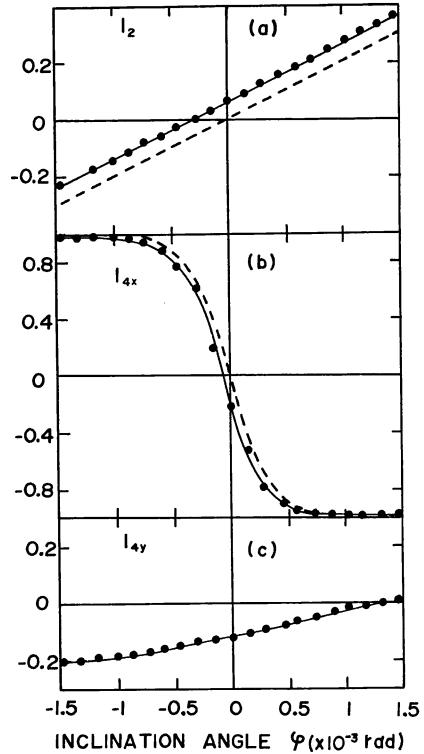


Fig. 5 Output signal  $I_2$  of SP 2, and output signals  $I_{4x}$  and  $I_{4y}$  of SP 4 for measuring inclination. The dash curves are theoretical results.

性が表れている。Fig. 6 (b), (c) に X 方向 PZT 変位時の STM 機構の Y 方向および Z 方向傾きを表している。Fig. 3 の STM 機構から予想されるように X 方向に変位した場合 Y 方向に傾くと考えられる。X 方向に  $6.8 \mu\text{m}$  変位し Y 方向に拘束だけされる場合、幾何学的に  $4.5 \times 10^{-4} \text{ rad}$  の傾きが予想されるが実際には  $2.25 \times 10^{-4} \text{ rad}$  の値が観測された。これは STM 機構の一体構造の弾性的特性のためであると考えられる。Z 方向には機構上傾きが発生しないはずであるが、Fig. 6 (c) に示すようにわずかな傾きが観測された。これは PZT 接着の際ににおける素子の傾きおよび素子内の変位分布<sup>18)</sup>のためであると考えられる。また、傾きにおいても PZT の特性に関連したヒステリシスおよび非線形性が観測される。これらの PZT および XY 機構に関連したヒステリシス、非線形性および軸間相互作用による効果はこれらの実験結果からわかるように実際の走査の場合において補正可能である。

Fig. 7 に Y 軸方向 PZT に電圧を印加した場合を示す。Fig. 6 に示した X 軸方向の場合とほぼ同様である。Fig. 8 に Z 軸方向 PZT に電圧を印加した場合を示す。

$Z$  軸 PZT は  $XY$  軸機構の上部に接着してあるため,  $X$ ,  $Y$  軸方向の傾きは原理的に観測されないはずであるが最大  $1.3 \times 10^{-4}$  rad の傾きが測定される。これは  $XY$  軸機構への接着方法, 反射鏡の接着方法および素子内の変位分布<sup>18)</sup>に関連しているものと考えられる。これらの傾き等も実際の走査の場合において補正可能である。

光に関連した現象を測定可能な上述の走査機構を使用した新たに製作した STM 装置の概略を Fig. 9 に示す。STM 装置の機械的剛性を高めるため、装置を 2 個の部分にわけ、各々の部分をジュラルミン製の一体構造としている。 $Z$  軸方向粗動機構として小型マイクロメータヘッドを使用した。マイクロメータによる水平方向移動を垂直方向移動に変換する構造で、6 mm の水平方向移動量が垂直方向の 1 mm の移動量に変換される。また、原子オーダーまでの表面形状を測定可能にするためチューブ型 PZT も装着している。この装置において反射鏡を接着した状態で  $Z$  軸 PZT に白色ノイズを印加し、変位測定値の高速フーリエ変換を観測した結果、共振周波数が 27.6 kHz であった。このように機械的剛性の高いシステムが製作可能である。

STM 観測に際して光学用防振台上にスタック型防振機構を設置しその上部に STM 装置を備え付けた。使用

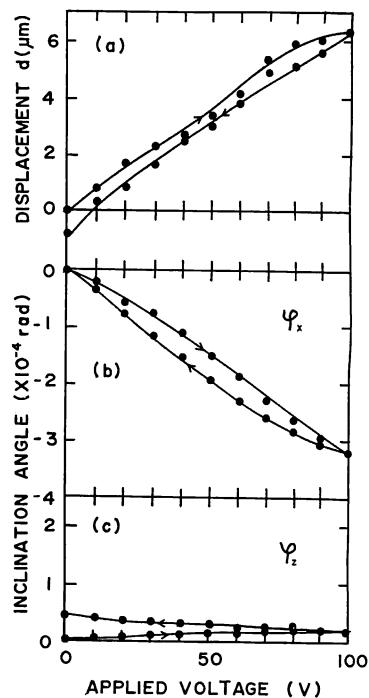


Fig. 7 Experimental results of  $Y$  axial displacement. (a) axial displacement, (b) and (c) inclination angles.

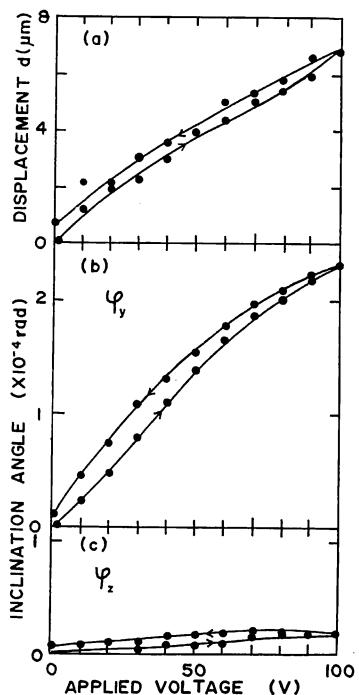


Fig. 6 Experimental results of  $X$  axial displacement. (a) axial displacement, (b) and (c) inclination angles.

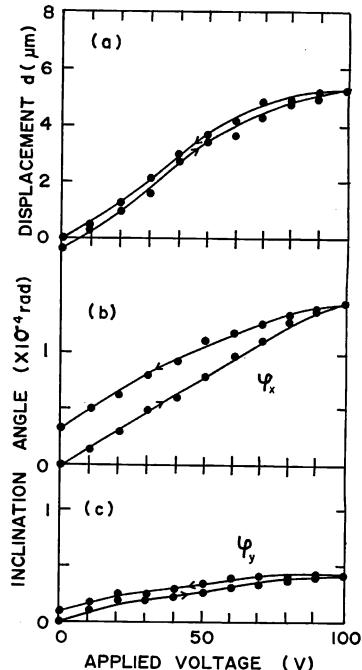


Fig. 8 Experimental results of  $Z$  axial displacement. (a) axial displacement, (b) and (c) inclination angles.

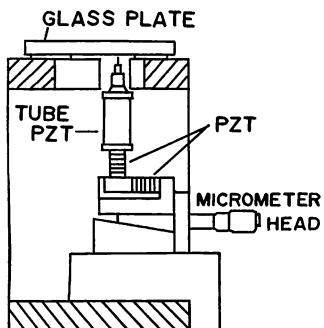


Fig. 9 STM device for measuring optical effect.

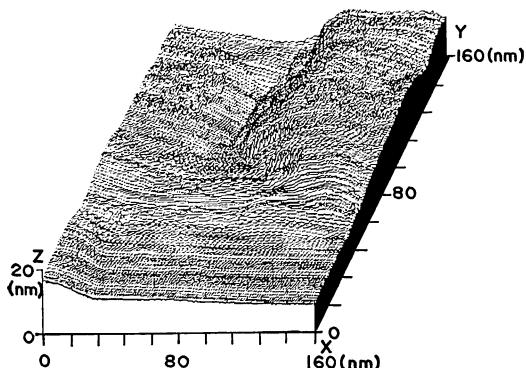


Fig. 10 STM image of  $\text{SnO}_2$  film on optical glass plate.

した探針は Pt-Ir であり、機械的方法で鋭い針先を得ている。発光・蛍光および光照射効果等<sup>19-23)</sup>が外部から容易に測定できるように、試料は装置の上部に装着する。Fig. 9 に示した例の場合はガラス基板下面に  $\text{SnO}_2$  コートをほどこしてある導電性光透過膜である。現時点までこの種類の薄膜の STM による観測は行われていない。

測定例を Fig. 10 に示す。試料に +0.1 V のバイアス電圧を印加し、定トンネル電流を 1 nA とし測定した。観測された凹凸は約 20 nm である。これは光学用ガラス基板 (面精度  $\lambda/10$ ) の表面粗さのためであると考えられる。このような表面形状が再現性良く観測された。Fig. 10 に示した X, Y 軸方向移動量は上述した方法で測定した結果を利用し、校正を行っている。ここに示したような微小走査範囲においては PZT のヒステリシス、非線形性および 3 軸の相互干渉は小さい。大領域の走査においては上述した測定方法を活用した補正が必要になる。

#### 4. む す び

走査型プローブ顕微鏡の 3 次元的走査機構において、PZT を使用した一体型走査機構の場合さけられないヒステリシス、非線形性および相互干渉の簡単な測定方法について述べている。測定法にはレーザービーム偏向法を使用している。2 台の He-Ne レーザーと 2 分割および 4 分割フォトダイオードを使用し、機構の軸方向変位と軸回り傾きを同時に測定している。この方法を新たに製作した光に関連した現象が測定可能な STM 装置に適用した。測定の結果 PZT に由来するヒステリシスおよび非線形性、走査機構に関連した各軸間の相互作用による軸回り傾きも観測された。これらの測定結果を用いれば走査機構の移動量・相互作用量の補正も可能である。STM 測定例として光学ガラス基盤上に  $\text{SnO}_2$  コートを行った試料の STM 測定を行っている。

最後に、本研究にあたり種々ご協力いただき、またマイクロメータヘッドを提供していただいた(株)ミツトヨ 上田守正氏、分割型シリコン・フォトダイオードを提供していただいた浜松ホトニクス(株)平野伊助氏、ご援助いただいた富士電気化学(株) (静岡県産学共同研究開発事業)、STM 装置の製作にご協力いただいた静岡大学工作技術センターの皆様に感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) G. Binnig and H. Rohrer: "Scanning tunneling microscopy—from birth to adolescence," Rev. Mod. Phys., **59** (1987) 615-625.
- 2) P. K. Hansma and J. Tersoff: "Scanning tunneling microscopy," J. Appl. Phys., **61** (1987) R 1-R 23.
- 3) 青山尚之: 最新超精密測定技術, 下河辺明編 (ミツダータシステム, 東京, 1990) 第 13 章, p. 475.
- 4) S. Vieira: "The behavior and calibration of some piezoelectric ceramics used in the STM," IBM J. Res. Dev., **30** (1986) 553-556.
- 5) W. Y. Pan and L. E. Cross: "A sensitive double beam laser interferometer for studying high-frequency piezoelectric and electrostrictive strains," Rev. Sci. Instrum., **60** (1989) 2701-2705.
- 6) G. C. Wetsel, Jr., S. E. McBride, R. J. Warmack and B. Van de Sande: "Calibration of scanning tunneling microscope transducers using optical beam deflection," Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 528-530.
- 7) L. E. C. van de Leemput, P. H. H. Rongen, B. H. Timmerman and H. van Kempen: "Calibration and characterization of piezoelectric elements as used in scanning tunneling microscopy," Rev. Sci. Instrum., **62** (1991) 989-991.
- 8) J. E. Griffith, G. L. Miller, C. A. Green, D. A. Grigg and P. E. Russell: "A scanning tunneling microscope with a capacitance-based position monitor," J. Vac. Sci. Technol., **B 8** (1990) 2023-2027.

- 9) G. E. Poirier and J. M. White : "Diffraction grating calibration of scanning tunneling microscope piezo-scanners," Rev. Sci. Instrum., **61** (1990) 3917-3918.
- 10) 中山 貴: "STM ファミリーにおけるレーザーの利用," レーザー研究, **19** (1991) 147-158.
- 11) R. C. Barrett and C. F. Quate : "Optical scan-correction system applied to atomic force microscopy", Rev. Sci. Instrum., **62** (1991) 1393-1399.
- 12) 梅田倫弘: "AFM とその可能性", O plus E, No. 138 (1991) 77-83.
- 13) 蔣 曜東, 富田直幸, 大津元一: "フォトン走査トンネル顕微鏡", 光学, **20** (1991) 134-141.
- 14) 村上健司, 宮尾正大, 野村卓志, 石川賢司, 萩野 實, 佐々木彰, 山口 豪, 西野直也, 福岡修一: "電界イオン一走査型トンネル複合顕微鏡の製作とその性能", 静岡大学電子工学研究所研究報告, **24** (1989) 79-90.
- 15) T. Nomura, K. Murakami, K. Ishikawa, M. Miyao, T. Yamaguchi, A. Sasaki and M. Hagino: "Structure of GaAs heteroepitaxial layer grown on GaP (001) by molecular beam epitaxy," Surf. Sci., **242** (1991) 166-170.
- 16) 佐々木彰, 萩原昭文: "He-Ne レーザー管の熱歪みによるビームの偏向と対策", レーザー研究, **14** (1986) 946-952.
- 17) A. Sasaki, F. Yamada and T. Masui: "A simple and accurate measuring technique of the spot size of gaussian laser beams," Jpn. J. Appl. Phys., **17** (1978) 1163-1164.
- 18) 内野研二: 圧電／電歪アクチュエータ (森北出版, 東京, 1986) p. 209.
- 19) P. J. Moyer, C. L. Jahncke, M. A. Paesler, R. C. Reddick and R. J. Warmack: "Spectroscopy in the evanescent field with an analytical photon scanning tunneling microscope," Phys. Lett. A, **145** (1990) 343-347.
- 20) R. J. Hamers and D. G. Cahill: "Ultrafast time resolution in scanned probe microscopies," Appl. Phys. Lett., **57** (1990) 2031-2033.
- 21) M. Völcker, W. Krieger and H. Walther: "Laser-driven scanning tunneling microscope," Phys. Rev. Lett., **66** (1991) 1717-1720.
- 22) L. Q. Qian and B. W. Wessels: "Scanning tunneling optical spectroscopy of semiconductors," Appl. Phys. Lett., **58** (1991) 1295-1296.
- 23) P. Johansson, R. Monreal and P. Apell: "Theory for light emission from a scanning tunneling microscope," Phys. Rev. B, **42** (1990) 9210-9213.