表面粗さ STM*

林 正和** 石田文彦** 小松忠紀** 津田展宏***

Scanning Tunneling Microscope to Reveal Surface Roughness

Masakazu HAYASHI, Fumihiko ISHIDA, Tadanori KOMATSU and Nobuhiro TSUDA

To take a detailed characteristics of a surface topography for X-ray or laser mirrors, STMs (Scanning Tunneling Microscopes) have been found to be very useful, owing to their ultra-high spatial resolution. However, conventional STMs are not sufficiently useful for this industrial purpose, because of the small measurement area involved. The authors developed a Wide Range STM using monolithic mechanisms and have developed a wider range and easy to use STM. In this new instrument, a sample is scanned in lateral directions with divided electrodes bimorph PZTs. This furnishes the ability to achieve $200\ \mu\text{m} \times 63\ \mu\text{m}$ scan range and that an actual mirror, such as one which has a 50 mm diameter, can be set on the sample stage. It is possible to successfully measure a grating, whose pitch is $0.42\ \mu\text{m}$ over about $200\ \mu\text{m}$ scan line. Also, a diamond turning mirror was measured over an about $45\ \mu\text{m} \times 2.5\ \mu\text{m}$ area tentatively. The resolution for this one is 4 nm vertically, at the most. These measurements reveal the saw wave topography of the grating and considerable detail on diamond turning marks on the mirror surface. The proposed new STM is very useful, because this measurement gives more information, exceeding the amount available using contact stylus methods and optical methods.

Key words: STM, surface roughness, piezoelectric bimorph, grating, diamond turning mirror

1. 緒 言

1982年, IBMのG. Binnigらによって発明された, 走査型トンネル顕微鏡 (STM: Scanning Tunneling Microscope) は物質の表面を非接触・高分解能で観察できる技術として注目を集め, その後も各国の研究者による開発が進められている。STMの優れた空間分解能は, 工業的にはX線ミラーをはじめとする超精密加工面の表面粗さ測定への応用を期待させる¹⁾。

しかし, 原子観察を主目的とした従来のSTMは, トライポッドやチューブスキャナと呼ばれる圧電素子で, 探針を3軸走査するため, 本質的には走査軸間に干渉が存在し, STM像にひずみをもたらす。そこで我々はすでに, 試料の走査と探針の走査を分離する方式を提案し, 試料ステージに平行ばね²⁾を重畳構造にした“大ストロークSTM”³⁾を開発してきた。しかし, この構造は実際の加工物, 例えば直径数十mmのミラーなどをそのまま測定しにくい点や, ストロークがまだまだ不十分である点などの問題があった。

そこで, 今回は実加工物をそのまま試料台に置くだけで簡易に測定でき, しかも極めて広い測定領域を持つ工業応用を目的としたSTMを開発した。開発したSTMは, バイモルフ型圧電素子が, 数 $\mu\text{m}/\text{V}$ と高い変位感度を持つことに着目して⁴⁾⁵⁾試料ステージを構成し, $200\ \mu\text{m} \times 63\ \mu\text{m}$ の走査領域を実現した。また, このSTMを用いて, 1次元で $200\ \mu\text{m}$, 2次元で約 $45\ \mu\text{m} \times 2.5\ \mu\text{m}$ の測定を行ったので報告する。

2. STMの構成

2.1 機構部の構成

開発した装置の構造を図1に示す。試料を水平面内(XY方向)に移動し, 探針を鉛直(Z方向)に移動する構成とした。試料(2軸)の走査と探針の走査を分離することで, 各軸の性能を独立に設計できるようにした。

試料の移動機構は, (a)手動マイクロメータヘッドによるXY粗動ステージ, (b)バイモルフ型圧電素子(以下, バイモルフという)によるXY微動ステージからなり, 直径50mm程度の試料が載る構造とした。探針の移動機構は試料の高さや操作性を考慮し, (a)ねじ送りによる初段の粗動機構, (b)ウォームとウォームホイールを用いた2段目の粗動機構, (c)切

* 原稿受付 平成元年10月30日。昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和63年10月5日)にて発表

** 正 会 員 (株)東芝(横浜市磯子区新杉田町8)

*** 正 会 員 計量研究所(つくば市梅園1-1-4)

Fig. 1 STM layout diagram

欠き型平行ばねに積層型圧電素子を組み込んだ3段目の粗動機構、(d) 単板型または積層型圧電素子に直接探針を取り付けたZ微動機構、の4段を積み重ねた構造とした。

測定の際は、探針を粗動機構で手動送りし、3段目の機構で探針をトンネル領域まで接近させる。その後、微動機構で自動追従する方式である。また、除振機構には、空気ばね式の除振台および金属板とゴム板を交互に4段重ねたものを用いた。

2.2 制御部の構成

制御系は電流電圧変換回路、対数増幅回路、差動増幅回路、積分回路、高圧増幅回路からなるSTMの標準構成とした³⁾。制御は探針・試料間に流れるトンネル電流を一定にする定電流モードを用い、電流値は0.1~10 nAの間で設定した。Xステージは発振器の三角波信号で駆動し、Yステージはこの三角波に同期させたコンピュータ出力(D/A変換器電圧)で駆動した。STM像の表示にはXYレコーダ、CRTモニター、オシロスコープを用いた。

3. バイモルフによるXYステージ

3.1 ステージの構造

試作したXYステージの構造を図2(a)に示す。同じ構造のステージを2段に重ねることで、XY軸の干渉が避けられる。ステージ移動部は、フレームに両端支持した2N枚(図では4枚)のバイモルフで一斉に駆動する方式とした。両端支持方式を採用したため、高い剛性が得られる。また、バイモルフを2N枚に重ねることで駆動力をN倍にできる。

次に、使用したバイモルフの構造を図2(b)に示す。通常のバイモルフと異なり、電極を4分割しa、

Fig. 2 XY bimorph stage

Fig. 3 Simulation model for divided electrodes piezoelectric bimorph deformation

a'とb, b'の部分で分極方向を反転した構造、いわゆるダブルS構造⁵⁾とした。この構造は変形の際、aとa'で変形曲率の符号が逆となるため、固定端p₁, p₃および中央部p₂の接線がフレームに直角に移動し、両端が固定されていても、中央部が無理なく変位する特徴がある。使用したバイモルフの単一電極は、長さ・幅共10mmである。

3.2 ステージの動作解析とシミュレーション

図3(a)に電極分割型バイモルフの片側を解放したモデルを示す。ここで、バイモルフに電圧を印加すると、一様の曲げモーメントが作用する。一様の曲げモーメントが全長に作用する片持ちりの終端変位量 δ_0 は、一般に、式(1)で与えられる⁶⁾。

$$\delta_0 = 2\delta_n = \frac{M_v l^2}{4K_b} \quad (1)$$

ただし、

$$K_b = E_p I_p + E_m I_m$$

$$I_p = \frac{2}{3}b(t_p^3 + 3t_p^2t_m + 3t_pt_m^2)$$

$$I_m = \frac{2}{3}bt_m^3$$

$$M_v = bE_pd_{31}t_p(t_p + 2t_m)E_3$$

となる。ここで、 M_v は圧電効果による曲げモーメント、 $2l$ はバイモルフの有効長さ、 K_b はバイモルフの曲げ剛さ、 E_p は圧電素子のヤング率、 I_p は圧電素子の断面2次モーメント、 E_m は金属板のヤング率、 I_m は金属板の断面2次モーメント、 b はバイモルフの幅、 t_p は圧電素子の厚さ、 $2t_m$ は金属板の厚さ、 d_{31} は素子の圧電定数、 E_3 は圧電素子に加わる電界（＝（印加電圧）/ t_p ）である。

次に、両端支持構造のバイモルフの変形を考える。両端支持の場合、バイモルフの長手方向に張力 P が発生し、先の変位 δ_0 は減少する。図3(b)のモデルで考えると、座標 X に生ずる曲げモーメント M は、この点でのモーメントの釣合い条件から、

$$M = M_0 - PW \quad (2)$$

となる。ここで、 M_0 は固定端のモーメント、 W は座標 X でのたわみである。また、はりのたわみに関する一般式から、

$$M = -K_b \frac{d^2 W}{dX^2} - M_v \quad (0 \leq X \leq l/2) \quad (3)$$

$$M = -K_b \frac{d^2 W}{dX^2} + M_v \quad (l/2 \leq X \leq l) \quad (4)$$

となる。さらに、張力 P については、

$$P = K_t \int_0^l \left(\frac{dW}{dX} \right)^2 dX \quad (5)$$

ただし、

$$K_t = (E_p A_p + E_m A_m) / 2l$$

$$A_p = 2bt_p$$

$$A_m = 2bt_m$$

となる。ここで、 K_t はバイモルフの長手方向の剛さ、 A_p は圧電素子の断面積、 A_m は金属板の断面積である。また、拘束条件は、

$$\left[\frac{dW}{dX} \right]_{X=0} = 0 \quad (6)$$

$$\left[\frac{dW}{dX} \right]_{X=l} = 0 \quad (7)$$

である。

式(2)～(5)は数値解析的に解くことができる。すなわち、まず張力 P が与えられたとして、条件式(6)、(7)のもとで、式(2)、(3)、(4)からたわみ W を解く。この W を下式(8)に代入し、

Table 1 Piezoelectric bimorph parameters

Metal plate Young's modulus E_m	1.11×10^{11} N/m ²
Piezoelectric plate Young's modulus E_p	6.20×10^{10} N/m ²
Piezoelectric coefficient d_{31}	2.57×10^{-10} m/V
Bimorph length $2l$	40 mm
Bimorph width b	10 mm
Metal plate thickness $2t_m$	0.05 mm
Piezoelectric plate thickness t_p	0.1 mm

Fig. 4 Simulational characteristics for displacement and tension at applied voltage

$$\varepsilon = P - K_t \int_0^l \left(\frac{dW}{dX} \right)^2 dX \quad (8)$$

として誤差 ε を求める。 ε が十分小さくなるように、収束させた W が求める解である。求める変形量 δ_c は、

$$\delta_c = [W]_{X=l} \quad (9)$$

として得られる。

表1に示すパラメータを用いたシミュレーション結果を図4に示す。この計算から、駆動電圧 ± 40 V で約 ± 100 μ m の変位が得られることになる。

3.3 ステージの特性評価実験

図5に試作したXYステージの電圧変位特性を示す。(a)はXステージ、(b)はYステージの特性で、それぞれ圧電素子の抗電場値に対応する電圧 ± 40 V、0.1 Hz の三角波信号を圧電素子に加え、往復3回繰り返した測定結果である。変位測定は電気マイクロメータで行った。X方向約200 μ m、Y方向約63 μ mの変位量が得られた。X方向の感度は約2.5 μ m/Vで、ヒステリシスはフルスケールに対して15.2%、Y方向の感度は約0.8 μ m/Vで、ヒステリシスは16%であった。また、小信号における感度はX方向

(a) X stage displacement

(b) Y stage displacement

Fig. 5 XY stage static characteristics

で約 $2.0 \mu\text{m}/\text{V}$, Y 方向で約 $0.85 \mu\text{m}/\text{V}$ であった。図から、ステージの送り方向の再現性が極めて良いことが分かる。X ステージに対して、Y ステージの変位が $1/3$ 程度と少なくなったのは、バイモルフの分極の不備によるものである。また、この X ステージの変位は先に示したシミュレーション結果と極めて良い一致を示した。

図 6 にステージの周波数特性を示す。(a) は X ステージ, (b) は Y ステージの特性である。周波数掃引した正弦波でバイモルフを駆動し、変位量を渦電流式変位計で測定し、FFT アナライザで解析した。X 方向の共振点は 65 Hz , Y 方向の共振点は 73 Hz であった。この共振点と除振台の共振点 3 Hz を考え合わせると、床の横振動に対して約 53 dB の減衰が見込めることになる⁷⁾。

また、図 7 に X ステージのヨーイング特性を示す。ステージを三角波信号で駆動し、オートコリメータで測定した。図からヨーイングはフルスケールで約 7.5

(a) X stage frequency response

(b) Y stage frequency response

Fig. 6 XY stage dynamic characteristics

Fig. 7 XY stage angular characteristics

Fig. 8 X stage straightness, using optical stylus method

μrad であった。また、XY ステージのヨーイング、ピッチング、ローリング特性値を図中に示す。

図 8 にステージの真直度を示す。ステージ上に設置

したミラーの上下動を、臨界角法を用いた光学式センサ⁸⁾ (スポット径 $2\mu\text{m}$, 分解能 1nm) で測定した。データはステージの真直度のほかミラーの表面形状とセンサドリフトを含んだ値であるが、図の a~c が良く重なり合うことから、真直度の再現性は約 $\pm 2\text{nm}$ よりも良好である。

4. STM による測定結果

この STM で測定した、回折格子 (溝数: 2400本/mm , プレーズ角: 10.36° , 表面: 金コート) の 2 次元像を図 9 に示す。Z 微動機構には $5\mu\text{m}/100\text{V}$ の積層型圧電素子を使用し、探針にはタングステン棒を電界研磨したものを用いた。観察像から格子のピッチは約 $0.43\mu\text{m}$, 高さは約 75nm で、これらの値は回折格子の設計値と良く一致する。

また、図 10 (a) に X ステージ全域にわたって測定した回折格子の 1 次元像を示す。観察された格子の数は 540 個で、約 $200\mu\text{m}$ の測定を達成した。(b) は試料を逆方向に走査したデータで、図中欠陥部に見られるように、試料の特徴的な部分が良く再現されている。また拡大像で、図 9 に示した鋸歯状波形がひずんで観察されたのは、探針の影響である。

次に、図 11 (a) にダイヤモンドターニング加工した銅切削面 (ピッチ: 約 $6\mu\text{m}$, 表面: 白金コート 20nm) の STM 像を示す。(b) に示した触針式粗さ計のデータに比べ、切削痕中にある微細な形状が明りょ

Fig. 9 STM image showing Au coated grating on computer display

うに測定できている。

図 12 に探針と試料間に発生するノイズを示す。走査しないミラーに対し探針をトンネリング状態に保ち、フィードバック電圧を測定した。図はこの信号のパワースペクトルである。スペクトル分析から、 3Hz 付近の周波数成分は除振台の共振点、 230Hz 付近の周波数成分は XY ステージ・Z 微動機構間の共振点の影響である。また、XY ステージの横方向共振点も観察される。さらにこのデータから、試料・探針間の

Fig. 10 Long line topograph for fine grating

Fig. 11 Surface topograph for diamond turning mirror

Fig. 12 Power spectrum for piezoelectric driving voltage

ノイズは、4 nm_{rms} (80 mV_{rms} に相当) で、この値が STM の Z 方向分解能である。

5. 結 言

XY ステージに大きなストロークを持ち、試料の走査と探針の走査を分離した“表面粗さ STM”を開発した。試作の結果、次のことが確認できた。

- (1) 両端支持の 4 分割電極バイモルフで構成したステージの変位特性は、シミュレーションの結果

と良く一致した。

- (2) このステージは、約 200 μm × 63 μm の広い走査領域を持つ。またステージのヨーイングは 8 μrad 以下、真直度の再現性は $\pm 2 \text{ nm}$ 以下と運動性能が良い。
- (3) STM を用いて、ピッチ 0.43 μm の格子形状を明らかにとらえ、1 次元で 200 μm の測定を達成した。また、2 次元で約 45 μm × 2.5 μm の測定を行った。
- (4) この STM の縦分解能は 4 nm (ノイズレベル) である。

この“表面粗さ STM”は縦型構造としたため、実加工物をそのまま測定でき、超精密製品の評価用として極めて実用的である。

謝 辞

この研究を進めるにあたり、多くの助言を頂いた計量研究所・精密計測研究室の中山貫室長、山田啓文技官はじめ研究室の方々、バイモルフの解析に協力頂いた弊社・総合研究所の泉守氏、小野富男氏、種々の面で協力頂いた当研究所の上田勝宣氏、佐藤隆氏、天野啓氏、内田順三氏、安永民好氏はじめ関係各位に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) M. Green, M. Richter, J. Kortright, T. Barbee, R. Carr and I. Lindau : Scanning Tunneling Microscopy of X-ray Optics, J. Vac. Sci. Technol., **A**, 6, 2, (1988) 428.
- 2) S. T. Smith, D. G. Chetwynd and D. K. Bowen : Design and Assessment of Monolithic High Precision Translation Mechanisms, J. Phys. E : Sci. Instrum., 20, (1987) 977.
- 3) 津田展宏, 山田啓文, 石田文彦, 宮下正之, 山口正高 : 大ストローク STM, 精密工学会誌, **55**, 1 (1989) 146.
- 4) P. Muralt, D. W. Pohl and W. Denk : Wide-range, Low-operating-voltage, Bimorph STM : Application as Potentiometer, IBM J. Res. Develop., **30**, 5, (1986) 443.
- 5) J. R. Matey, R. S. Crandall, B. Brycki and G. A. D. Briggs : Bimorph-driven x-y-z Translation Stage for Scanned Image Microscopy, Rev. Sci. Instrum., **58**, 4, (1987) 567.
- 6) 例えば, 川田雄一 : 材料力学, 裳華房 (1981) 53.
- 7) D. W. Pohl : Some Design Criteria in Scanning Tunneling Microscopy, IBM J. Res. Develop., **30**, 4, (1986) 417.
- 8) 河野嗣男 : 最近の光学式超精密あらさ測定法, 機械の研究, **37**, 9 (1985) 1005.