

## 校正用光波干渉計を備えた結晶格子基準段差測定平行バネ STM

Step Height Measurement Using a Scanning Tunneling Microscope Equipped with a Crystalline Lattice Reference and Interferometer

藤 井 透\*・鈴木正敏\*・樋口俊郎\*\*  
鴻上弘\*\*\*・川勝英樹\*\*\*

Toru FUJII, Masatoshi SUZUKI, Toshiro HIGUCHI, Hiroshi KOUGAMI and Hideki KAWAKATSU

## 1. 緒 言

走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope, STM)<sup>1)</sup> は 3 次元空間分解能において高い性能を有するソリッドプローブスキャニングタイプの顕微鏡である。その分解能は条件によっては3次元の原子分子の表面形状を得ることが可能である。STM においては広範囲測定対応の形状観察用の走査機構として、PZT から形成されたチューブスキャナ、トライポッドスキャナ、バイモルフスキャナなどが一般に広く用いられている。しかし、PZT にはよく知られているように、印加電圧に対し変位に非線形反応、クリープ、ヒステリシスが生じるため、精密な広範囲形状測定においては精度を低下させる重大な要因になる。また XYZ の相互干渉もあり、これらの画像の歪みは走査範囲に比べ最大10%にも達することがある。

これらの欠点を克服するため、唯一長さの標準として用いることができる光を用いた干渉計校正による線幅測長用の STM が88年に開発された<sup>2)</sup>。この STM は各軸間における相互干渉の少ない直進運動を実現するガイドメカニズムである平行バネを用い、さらに XY 軸の変位を光波干渉計によって校正し上記のような誤差要因を排除している。ここで用いられた干渉計は、88年に開発されたヘテロダイナミック干渉計の波長周期の非線形誤差を除去するシステム<sup>3)</sup>を有するため精度もサブナノメートルを実現している。結晶格子を XY スケールとして用いる STM が89年に開発された<sup>4)5)</sup>。分解能は結晶格子の間隔で決まるためきわめて高く、結晶像の質がよい場合には内挿によりサブオングストロームにも達するが、絶対精度の点では格子自体は直接の

基準とはなり得ないため光の波長による校正の必要がある。しかし、システム全体の大きさでは干渉計 STM に比べ光源を持たないこともあり小型化が可能である。段差方向は干渉計構成上複雑でかつ単純運動でない帰還制御方向を読み取らなければならないため難易度が高かったが、90年後処理による段差の干渉計校正がAFMで行われ<sup>6)</sup>、93年には干渉計により実時間校正可能な STM が開発された<sup>7)</sup>。

線幅測長の対象は通常半導体や光ディスクで見られるように数百ナノメートルからマイクロメートルにおよび範囲が大きく要求測定精度もナノメートル程度である。一方、段差測長の対象はコンタクトホールのようなマイクロメートルオーダーの大きなものもあるが、ディスクのピットなどのように100ナノメートル内外で線幅に比べれば小さい場合が多く、特に膜厚などの段差は数モノレイヤから存在するためナノメートル程度の場合も多くある。このように、段差方向は測定範囲が小さく高分解能が要求されるため、結晶格子を基準とした測定に適している。しかし、段差方向は帰還制御方向であり、XY 走査のように運動が均一でないため従来の技術では測定できない。また絶対精度の点ではやはり校正が必要である。

本研究では結晶格子比較測定を段差測定に用いるための手法を開発し、運動精度向上のためのガイドメカニズムと校正のための干渉光学系を備えた装置を開発したので報告する。

## 2. 装置と測定方法

STM を用いて試料の段差を測定するためには、探針の段差方向への帰還制御動作を測定する必要がある。厳密には光干渉計を組み込むことになるが、光学系や光源が必要なことから装置は多少大きくなる。サブナノメートルの精度を有する、より簡便で小型の段差測定装置を実現するため

\* (株) ニコン

\*\* 東京大学工学部

\*\*\* 東京大学生産技術研究所 第2部

に、探針の帰還制御動作をもう 1 組の STM によって結晶格子を基準として測定する新しい段差測定方法を考案した。結晶格子には方位があるため、STM 探針で結晶表面を直線的に 1 次元走査するだけでは正確な変位を測定できない。結晶格子を測長の基準とするには、2 次元を走査し格子像とする必要がある。そこで本研究では、段差試料側の STM 探針上にグラファイト結晶を固定し、試料段差による探針の帰還動作を、もう 1 組の結晶側 STM の走査領域の変化として測定する。

図 1 に装置の主要構成図を示す。sample 1 が基準となる結晶で主にグラファイトの結晶を用い、3 次元方向に運動可能な円筒型圧電素子 tube 1 によって駆動される STM 探針 tip 1 によって観察される。tube 1 は直流ギアモータとネジによる Y 方向接近粗動機構に搭載される。sample 1 は積層型圧電素子で駆動される一体型二次元平行バネ XZ scanner 上に搭載される。XZ scanner には被測定試料 sample 2 を観察する STM 探針 tip 2 が固定される。sample 2 は試料側で独立に 3 次元観察が可能ないように円筒型圧電素子 tube 2 に固定される。tube 2 は試料上の特定位置出しが容易なように Z 接近方向に加え X 方向にも運動可能な粗動機構上に搭載される。XZ scanner には光を用いた干渉測定機能を付加し、格子の校正を行うため干渉計用

測定鏡が 2 面に取り付けられている。本装置では格子像の質が重要であり装置可動部に質量を付加することは極力避けねばならないため、通常測定鏡として用いるコーナーキューブやあおり機構の使用は避ける必要がある。そのため干渉計用偏光ビームスプリッタ (Polarizing Beam Splitter) PBS 1, PBS 2 とレーザ光導入部にステアリングアライメント機構<sup>7)</sup>を用いたため厚さ 300 ミクロンの平面鏡を用いることができ、干渉計による装置可動部への質量負荷を最小限にとどめた。干渉計はマイケルソン型直交偏光 2 周波ヘテロダイン干渉計を用いた。サブナノメートルの分解能が要求されるため、ヘテロダイン周波数は 100kHz を用い光源には安定化 HeNe レーザを用いる。干渉計用偏光ビームスプリッタ PBS 1, PBS 2 には装置小型化のために偏光干渉に必要な波長板と参照鏡が一体化されている。図 1 では、偏光ビームスプリッタの 2 つの面に付いている板が波長板で、重ねて付いている板が参照鏡である。PBS 1 は Z 軸段差方向のためのビームスプリッタ、PBS 2 は線幅である X 方向のビームスプリッタである。非偏光ビームスプリッタ (Non-Polarized Beam Splitter) NPBS はレーザビームを ZX の 2 軸に分配する。ナノメートルの精度が要求されると偏光ヘテロダイン干渉測定では偏光混合による波長周期の非線形誤差が問題になる。それ

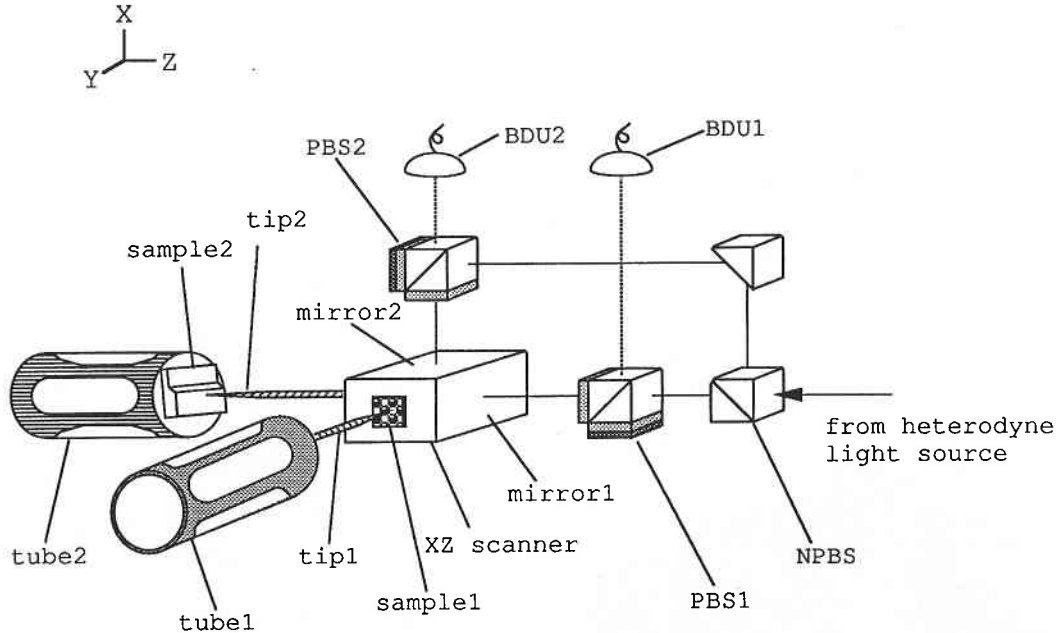


Fig. 1 Schematic of the unit. sample 1: reference crystal, sample 2: measured sample. tube 1 and 2: tube PZT scanners for reference crystal and for sample. tip 1 and 2: tunneling tips for crystal and sample. XZ scanner: two-dimensional monolithic parallel spring with two stacked PZT. mirror 1: measurement mirror for Z direction. mirror 2: measurement mirror for X direction. PBS 1 and 2: polarized beam splitters with wave plates (light tone) and reference mirrors (dark tone), placed on steering stages. NPBS: non-polarized beam splitter for beam dividing. BDU 1 and 2: balanced detector unit.

研 究 速 報

に加えビームスプリッタによるアライメントを行うことによる光学系設置誤差が大きくなるため差動検出装置 (Balanced Detector Unit) BDU 1, BDU 2 を検出系に用いる<sup>3)</sup>。

図 2 に装置主要部の写真を示す。2本の白い円筒状の部品がチューブスキャナであり、小さい方が格子像観察用で STM 探針を保持し、大きな方が被測定試料用で試料を保持する。上と右側の黒い光学調整機構によって干渉計用ビームスプリッタを保持し、アライメントを行う。その奥が2次元用一体型平行バネで、結晶試料と被測定試料用 STM 探針を一つの同一ブロックで保持している。そのブロックには干渉測定用測定鏡が固定されている。図 3 は XZ scanner の平行バネと円筒型圧電素子を示す。平行バネはアルミ製でワイヤ放電加工により製作されている。円弧上の切り欠き部が弾性ヒンジとなり1軸に関して4ヶ所がヒンジとして働き、それによって囲まれた長方形が剪断し平行四辺形になる。動きが小さいときは沈み込みによるコサインエラーは小さいためほぼ直線運動とみなせる。1軸分の内部にもう一軸分を一体に製作する。

図 4 に測定原理を示す。tube 1 を Z 方向に振りながら平行バネ XZ スキャナを X 方向に送ることによって tip 1 は sample 1 (グラファイト) 上をスキャンすることになり、sample 1 の結晶像が得られる。同時に、XZ スキャナの X 方向への送り動作によって tip 2 は sample 2 の断面をなぞっていく。ここで、図 4 (b) のように sample 2 に段差が存在する場合、tip 2 は探針試料間を一定に保つよう Z 方向に制御され、tip 2 と一体の sample 1 も Z 方向に等しく動く。sample 1 が Z 方向へ動いていくことによって tip 1 の走査領域は強制的に歪められる。この結果、図 4 (a) の結晶像が得られる。図 4 (a) は、sample 2 の段差による走査範囲の歪みを無視して直交格子状に描画しているため、段差の影響が見かけ上結晶格子像の歪みとして現れる。sample 1 自身の Z 方向への動きを tip 2 の制御電圧として

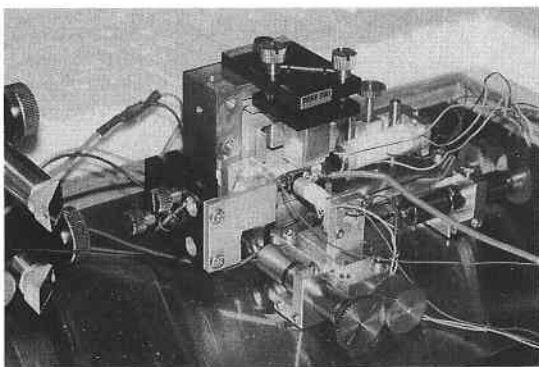


Fig. 2 Photograph of the apparatus.

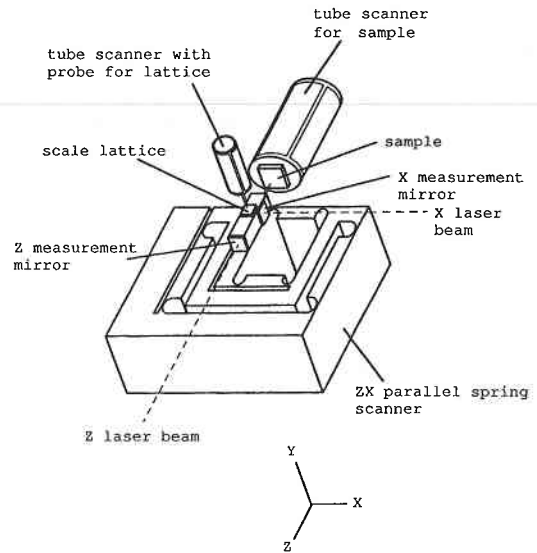


Fig. 3 Schematic of step height measurement STM using crystalline lattice as the scale reference. The ZX parallel spring scanner eliminates error motion of PZTs and the scale lattice gives the displacement value. The two-axis interferometer certifies the displacement value of the lattice.

記録しておくことで、図 4 (a) の結晶像を実際の走査範囲の形状に近くなるように補正することができる。その結果を図 4 (c) に示す。グラファイトの結晶格子の並びが連続的になり、sample 2 の段差による走査範囲の歪みが結晶像の輪郭に現れる。すなわち、図 4 (c) の結晶像の下端の曲線が sample 2 の段差の断面を表している。

通常、高さ方向の制御電圧からは正確な PZT の移動量、すなわち試料の段差の大きさ等は測定できない。本装置では、PZT の制御電圧は結晶像を補正して図 4 (c) のような段差像を得るために用いられ、実際の段差高さの測定では結晶格子をサブナノメートルのスケールとして用いる。図 4 の結晶像は本装置で得られたものであるが、試料段差を追従する探針への制御電圧の代わりに、結晶走査中に XZ スキャナの Z 方向へのオフセット電圧を加えることで結晶の走査範囲を変化させた。

3. 結 言

結晶格子をスケールとして試料の段差を測定するための手法を考案し、段差試料用と基準結晶用の2個のSTMを組み込んだ装置を開発した。各軸間の相互干渉を防ぐために平行バネによるガイドメカニズムを持ち、また校正のための光波干渉計を備えている。

結晶側のみのSTMを用いた実験の結果、段差測定用探

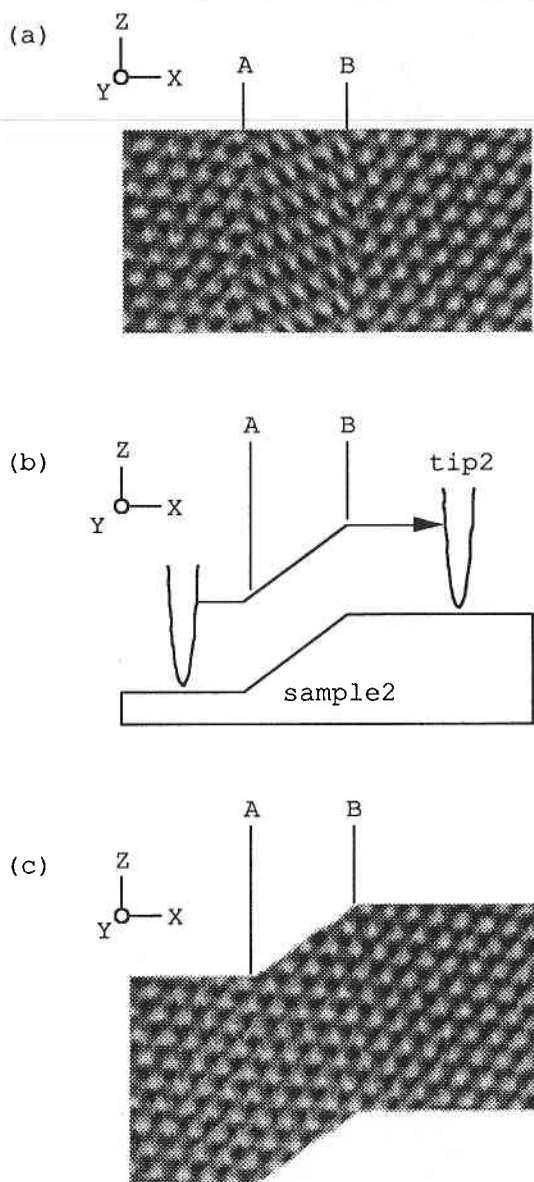


Fig. 4 Principle of step height measurement. (a) Graphite lattice image of the sample 1 obtained by the tip 1 in Fig.1. X slow line scanning is performed by the XZ scanner and fast Z scanning is performed by the tube 1. The image between A and B is modulated by feedback motion of the tunneling regulation between the sample 2 and the tip 2. The tip 2 is positioned by the XZ scanner as (b). (c) Corrected image using the applied voltage to the XZ scanner. Upper or lower edge indicates the two-dimensional image of the sample 2 in (b).

針の動き、すなわちグラファイト結晶の動きが走査によって得られる結晶像の歪みとして測定された。段差試料の高さ方向に加えられた制御電圧を補助的に用いることで、結晶像の歪みをおおよそ直し、結晶格子をスケールとしてグラファイトの移動量、すなわち段差測定用探針の移動量を測定できることが確認された。

今後、段差測定用探針を用いて試料を観察し、実際の試料段差による探針変位を結晶像によって記録、測定する予定である。段差試料上での探針位置制御の精度が直接グラファイト像の画質に影響するため、段差試料側の制御の安定性が重要になる。また、本装置に組み込まれた光波干渉計によって実際の探針の動きも測定し、結晶格子による測定との結果を比較、校正することによって、本手法の有効性を検証する。  
(1994年9月19日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982).
- 2) H. Yamada, T. Fujii, and K. Nakayama, Japan. J. Appl. Phys. 28 (11) 2402 (1989).
- 3) 山田啓文, 藤井透, 田中充, 中山貫 6pZB17 応用物理学会88秋.
- 4) H. Kawakatsu, and T. Higuchi, J. Vac. Sci. Technol. A8(1), 319 (1990).
- 5) 川勝英樹, 樋口俊郎, 鴻上弘, 生産研究 第46巻 第7号 376.
- 6) T. Fujii, M. Suzuki, M. Miyashita, M. Yamaguchi, T. Onuki, H. Nakamura, T. Matsubara, H. Yamada and K. Nakayama, J. Vac. Sci. Technol. B9(2), 666 (1991).
- 7) T. Fujii, M. Yamaguchi and M. Suzuki, Rev. Sci. Instrum. 投稿中