結晶格子を基準とする微小長さ測定 (第2報)*

— 逆格子ベクトルを用いた自動格子計数法 —

明田川 正人** 高田 孝次** 高橋 秀昭***

Small Length Measurement Using Regular Crystalline Lattice for Reference (2nd Report)
— Automatic Counting of Lattice Points on STM Image Using Reciprocal Lattice Vectors —

Masato AKETAGAWA, Koji TAKADA and Hideaki TAKAHASHI

This paper presents a method to automatically extract periodic atomic features from scanning tunneling microscopy (STM) images of crystal surfaces and count the number of lattice points. The method is based on the FFT analysis of STM images. Reciprocal lattice vectors of a crystalline lattice are obtained through two dimensional FFT processing the STM image, and, by using the spatial frequency and phase of the obtained reciprocal lattice vectors, the distance between any two points on the STM image is determined with a resolution smaller than the lattice spacing of the crystal. The present method was applied to comparative length measurement using a dual tunneling-unit scanning tunneling microscope (DTU-STM) in which a highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) is used as the reference scale. The experimental results have verified the effectiveness of the present method for automatic counting the number of lattice points as well as the possibility for length measurement with a high resolution of sub-nanometer.

Key words: STM, length measurement, sub-nanometer, crystalline lattice, FFT, reciprocal lattice vector

1. 序 論

結晶格子の原子間隔は約 0.2 nm であり, 結晶自体が無応力状態であれば, その間隔は長周期にわたって安定している。一方, 走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope: STM)¹⁾ は結晶格子表面の原子像を実時間でかつ大気中でとることが可能である。従って, STM と結晶格子を組み合わせれば, 分解能がサブ nm 以下のスケールを構築できるものと考えられる。現在, 数 μm から nm にかけての測定範囲で, 信頼性の高い測長手段がない。もし, 結晶格子と STM を組み合わせた測長法で測定長さを数 μm まで拡大できれば, この領域での一つの測長手段になりうる。

以上のような背景を基に, STM と結晶格子を組み合わせた測長法の研究が行われている^{2)~4)}。前報⁵⁾で紹介したとおり, 我々のグループは, 川勝らの提唱した DTU-STM⁶⁾ (Dual Tunneling-Unit STM) を用いた, 結晶格子を基準とする比較測長法の開発を進めている。DTU-STM は 1 個の共通 XY ステージ (スキャナ) と, Z 軸が互いに独立に制御される 2 個のトンネリングユニットで構成されている。したがって, 一方のユニットで測長すべき試料表面を, 他方のユニットで基準となる既知結晶格子表面を同時に測定することにより, 結晶格子の STM 画像をリファレンスとして被測定試料の長さを測定できる。両トンネリングユニットの探針と試料間の XY 面内の相対変位が全く同一であれば, 未知試料表面の任意の方向の長さは, 結晶格子表面の 2 個の独立した基本並進ベクトルを基準として決定できる。

前報では, 試作した DTU-STM の概要を説明するとともに, トンネリングユニット-XY ステージ間の熱ドリフトや STM 画像のゆがみを検出し補正する方法を示した。本報では, 基準結晶格子 STM 像の格子を測長すべき方向に沿って自

動的に認識し計数する方法を提示する。

川勝らは, 結晶格子 STM 画像の原子頂点の検出を, 画像データの二値化と重心検出を組み合わせた画像処理方法で行い, さらに, 抽出した原子頂点に順番に番号をつけることで測定方向に含まれる原子数を計数し, 長さ測定を行っている⁷⁾。本報では, これに対し, 結晶格子 STM 画像を FFT 処理して得られる逆格子ベクトルを用いて測定方向の原子数を計数する方法を示す。この方法には次のような利点が期待できる。

- (1) FFT によって結晶格子画像の周期成分を平均化し長さを決定するので, ノイズの影響を低減できる。
- (2) FFT により得られる位相情報を用いて格子間隔より小さい長さを決定することができる。

2. 逆格子ベクトルを用いた長さ計測

DTU-STM に固定された直交座標系 (以下, 実座標系と呼ぶ) 上の XY 面内の任意の位置ベクトルを $\mathbf{r}$, STM 画面上の $X'Y'$ 座標系でのその点の位置ベクトルを $\mathbf{r}'$ とする。以下の議論では DTU-STM において, 2 つのトンネリングユニットの XY ステージに対するスキャニング誤差が全く同一だと仮定する。また, 熱ドリフトや試料の傾斜に伴う誤差も, 両ユニットで同じとする。この場合, 一方のトンネリングユニットで観察された未知試料表面上の点の $X'Y'$ 面内のベクトル $\mathbf{r}'_s$ は, これを他方のトンネリングユニットで得た基準結晶格子 STM 画像の座標系に重ねて, 格子の基本並進ベクトル $\mathbf{a}_1', \mathbf{a}_2'$ と比較できる。比較の結果, 図 1 (a) に示すようにベクトル $\mathbf{r}'_s$ が基準結晶格子 STM 画像中の基本並進ベクトル $\mathbf{a}_1'$ の m_1 倍, $\mathbf{a}_2'$ の m_2 倍のベクトルの和として次式のように表されたとする。

$$\mathbf{r}'_s = m_1 \mathbf{a}_1' + m_2 \mathbf{a}_2' \quad (1)$$

一方, 観察した STM 画像上のベクトル $\mathbf{r}'_s$ と $\mathbf{a}_1', \mathbf{a}_2'$ に対する実座標系上のベクトルをそれぞれ $\mathbf{r}_s, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ とすると, 実座標系上でのベクトル $\mathbf{r}_s$ は式 (1) と同様にベクトル $\mathbf{a}_1$ の m_1 倍, $\mathbf{a}_2$ の m_2 倍のベクトルの和として表されるので, その絶対

* 原稿受付 平成 8 年 11 月 21 日

** 正 会 員 長岡技術科学大学 (長岡市上富岡町 1603-1)

*** アンリツ (株) (東京都港区南麻布 5-10-27)

Fig. 1 Length measurement by using reciprocal lattice vectors

値の2乗は、

$$|r_s|^2 = |m_1 a_1 + m_2 a_2|^2 = m_1^2 \lambda_1^2 + m_2^2 \lambda_2^2 + 2m_1 m_2 \lambda_1 \lambda_2 \cos \theta_{12} \quad (2)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} |a_i| &= \lambda_i \quad (i=1, 2) \\ a_1 \cdot a_2 &= \lambda_1 \lambda_2 \cos \theta_{12} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

である。 λ_1, λ_2 は基準結晶格子の格子定数、 θ_{12} は a_1 と a_2 のなす角で、いずれも既知の値である。式(2)は、未知試料STM画像上の任意のベクトル r'_s の実座標系上での大きさ $|r_s|$ は、2つのトンネリングユニットで得られた画像を比較し、式(1)を満たす m_1 と m_2 を求めることで決定できることを示している。

次に、 m_1 と m_2 の求め方について述べる。 m_1 と m_2 を求めるためには、まず、画像上の格子点を認識しなければならない。一般に、STM画像はノイズを含んでいるため、その画像から直接格子点を自動認識することは必ずしも容易ではない。実用的観点からはノイズに強い方法が望まれる。そこで、ここでは逆格子ベクトル⁸⁾を用いる方法を提案する。逆格子ベクトルはSTM画像の2次元フーリエ変換により求められるが、この処理によりランダムノイズを除去すると同時に、格子点座標の平均化が行われるので、明りょうで正確な格子点を得ることが期待できる。

基準結晶格子STM画像中の、格子の基本並進ベクトル a'_j とその逆格子ベクトル k'_i には、以下の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} k'_i \cdot a'_j &= \delta_{ij} \quad (i, j=1, 2) \\ \delta_{ij} &= \text{Kronecker's } \delta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

基本並進ベクトル a'_j と、その逆格子ベクトル k'_i の関係は図1(b)に示すようになり、逆格子ベクトル k'_1 と k'_2 に直交する方向に格子点を結ぶ平行な直線（以下、本論文では便宜的に

 Fig. 2 Method for determining Δm_i , the decimal fraction of m_i

格子線と呼ぶ。2次元結晶では正しくはミラー指数(1,0)(0,1)の格子面と呼ぶ⁹⁾の群を考慮することができる。また、各群に属する格子線の間隔は式(4)により k'_1 あるいは k'_2 の絶対値の逆数に等しい。したがって、簡単のために $X'Y'$ 座標系の原点をいずれかの格子点と一致させれば、これら k'_1, k'_2 に対応する格子線群の方程式は以下のように与えられる。

$$k'_1 \cdot r' = n_1 \quad (n_1 = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

$$k'_2 \cdot r' = n_2 \quad (n_2 = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

ここで、 n_1, n_2 は整数である。このように、逆格子ベクトルを用いれば、STM画像上に格子点を結ぶ直線群を描くことができる。図1(a)中の実線と破線はそれぞれ式(5),(6)に対応する。

いま、 m_i の整数部を M_i 、小数部を Δm_i とすると、

$$m_i = M_i + \Delta m_i \quad (7)$$

したがって、図1(a)のように、測長すべきベクトル r'_s の始点、終点が格子線の交点、すなわち格子点と一致していれば、 r'_s と各格子線との交叉回数を計数することにより、 M_1 と M_2 が求まり、 r'_s は a'_1, a'_2 を単位として

$$r'_s = M_1 a'_1 + M_2 a'_2 \quad (8)$$

となる。

3. 格子間隔以下の長さの補間方法

本節ではベクトル r'_s の始点、終点が格子点に一致していない場合に、格子点間隔を補間して m_1, m_2 を小数点以下まで求める方法について述べる。

簡単のために、STM画像上の $X'Y'$ 座標系を図2(a)に示すように取る。すなわち、 Y' 軸を測長すべきベクトル r'_s 上に取り、座標原点を結晶格子のある格子点と一致させる。

STMで観察される基準結晶格子表面の高さを $Z'(r')$ とす

る。結晶格子 STM 画像の 2 次元 FFT パワースペクトラムには、逆格子ベクトル $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ の線形和 ($h\mathbf{k}_1 + l\mathbf{k}_2$; h, l は整数で、格子面のミラー指数に相当する) で表されるベクトルが複数現れる。結晶格子表面の高さ $Z'(\mathbf{r}')$ をこれらのベクトルに対応した、余弦波状に波打つ複数個の面の合成で以下のように表す。

$$Z'(\mathbf{r}') = \sum_{h,l} A_{hl} \cos\{2\pi(h\mathbf{k}_1 + l\mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r}'\} \quad (9)$$

ここで、 A_{hl} は (h, l) 成分の振幅を、 $\mathbf{r}'$ は $X'Y'$ 面内の任意の位置ベクトルを表す。前節で述べた逆格子ベクトル $\mathbf{k}_i'$ ($i=1, 2$) に対応する格子線は式 (11) の $(h, l)=(1, 0)$, $(h, l)=(0, 1)$ 成分の尾根になる。

ここで、図 2 (a) のように STM 画像を測長すべき $\mathbf{r}_s'$ の終点を通り $\mathbf{r}_s'$ に垂直な平面 $Y' = |\mathbf{r}_s'|$ で切り、その断面 A-A' 上のプロファイルを考える (図 2 (b))。以下では $\mathbf{r}'$ をこの断面と $X'Y'$ 面との交線上の任意の点の位置を表すものとし、

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r}_{X'}' + \mathbf{r}_s' \quad (10)$$

とおくと ($\mathbf{r}_{X'}'$ は $\mathbf{r}'$ の X' 軸成分)、式 (1) および式 (7), (10) より、

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r}_{X'}' + (M_1 + \Delta m_1)\mathbf{a}_1' + (M_2 + \Delta m_2)\mathbf{a}_2' \quad (11)$$

を得る。式 (11) を式 (9) に代入し、式 (4) を用いると断面波形 $Z'(\mathbf{r}')$ は、以下のようになる。

$$Z'(\mathbf{r}') = \sum_{h,l} A_{hl} \cos\{2\pi(h\mathbf{k}_{1X'}' + l\mathbf{k}_{2X'}')X' + 2\pi(h\Delta m_1 + l\Delta m_2)\} \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{k}_{iX'}'$ はベクトル $\mathbf{k}_i'$ の X' 軸成分である。すなわち、断面波形は $(h\mathbf{k}_{1X'}' + l\mathbf{k}_{2X'}')$ の逆数を周期とする複数個の余弦波の合成となる。また各余弦波の位相はそれぞれ $2\pi(h\Delta m_1 + l\Delta m_2)$ となる。ただし通常、逆格子ベクトル $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ に対する成分 ($h, l)=(1, 0)$ または $(0, 1)$ が 2 次元 FFT で最も強く現れる。

式 (12) は $Y' = |\mathbf{r}_s'|$ において得られた断面波形 $Z'(\mathbf{r}')$ をフーリエ解析し、逆格子ベクトル $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ に対する調和成分の位相を得れば $\Delta m_1, \Delta m_2$ が求まることを示している。このように、前節で述べた方法により M_1, M_2 を、本節で述べた方法により $\Delta m_1, \Delta m_2$ を求めれば、STM 画像上の長さを格子間隔以下まで補間して能率良く測定できる。なお、上記の説明では測長すべき方向を Y' 軸方向としたが、このことで本方法の一般性が失われるものではない。

4. DTU-STM を用いた比較測長法への適用と検証

4.1 HOPG の結晶格子 STM 画像への適用

前報⁵⁾ で述べたとおり、HOPG (高配向焼結グラファイト結晶) は DTU-STM による測長法の基準結晶になり得る。ここでは、HOPG の結晶格子 STM 画像に前節までの方法を適用し、その有効性を確かめる。

HOPG の場合は $|\mathbf{a}_1| = |\mathbf{a}_2| = 0.246 \text{ nm}$, $\angle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 = 120^\circ$ などで理想 STM 画像は規則正しい正三角構造となり、その FFT パワースペクトラムは正六角形の構造を示す。図 3 (a) に、HOPG 結晶の STM 画像、同図 (b) にその FFT パワースペクトラムを示す。ただし、この例ではトンネリングユニット-XY ステージ間に熱ドリフトがあり STM 画像とその FFT パワースペクトラムは共にゆがんでいる。また、図 3 (b) には、 $\mathbf{k}_1', \mathbf{k}_2'$ のほかに第 3 のピークも現れている。これらには $\mathbf{k}_3' = \mathbf{k}_1' - \mathbf{k}_2'$ なる関係があり、互いに独立なベクトルは 2 つであ

Fig. 3 STM image of HOPG and its FFT power spectrum

Fig. 4 An example of HOPG profile on the cross section perpendicular to Y' axis and its power spectrum obtained from the STM image shown in Fig. 3 (a)

る。従って式 (9) あるいは式 (12) でも用いる逆格子ベクトルとしては $\mathbf{k}_1', \mathbf{k}_2', \mathbf{k}_3'$ のうち任意の 2 つを選べばよい。以下では $\mathbf{k}_1', \mathbf{k}_2'$ を選び、 $\mathbf{k}_3'$ については実験データの正確さを確認する目的で用いている。

図 4 (a) に図 3 (a) に示した STM 画像を Y' 軸に垂直な断面 A-A' で切った断面波形、同図 (b) にその 1 次元 FFT パワースペクトラムを示す。FFT パワースペクトラムには 3 個の強いピーク $\mathbf{k}_{1X'}', \mathbf{k}_{2X'}', \mathbf{k}_{3X'}'$ が現れ、2 次元 FFT のピーク (図 3 (b) の $\mathbf{k}_1', \mathbf{k}_2', \mathbf{k}_3'$) の個数と一致している。また、その空間周波数 $f_{X'}' = 33, 4, 29 \text{ pixel}$ ($1 \text{ pixel} = 0.125 \text{ nm}^{-1}$) は、図 3 (b) の逆格子ベクトルの X' 成分の絶対値に一致している。

図 5 (a) に得られた Δm_i を、同図 (b) に Δm_i を個々に累積して求めた m_i を示す。2 次元 FFT を施した 1 画面の範囲内では、理論上、 m_i と Y' の関係は直線となる。そこで、図 5 (b) に示した m_i の実測値に対して回帰直線をあてはめ、そこ

Fig. 5 Δm_i and m_i obtained by applying the present method on Y' axis of the STM image shown in Fig. 3 (a)

Fig. 6 Histogram of error e_i in determining Δm_i

からの m_i の偏差 e_i および e_i の標準偏差 σ_i を求めた。その結果を図6に示す。当然 σ_i はSTM画像の画質に依存するが、実験に用いた試作DTU-STMではおよそ $0.02 < \sigma_i < 0.12$ であった。したがって、補間精度を $2\sigma_i$ で評価するとすれば、試作DTU-STMを用いた場合、良い画質が得られた時は格子間隔の約1/10の精度で、悪い画質の時でも1/2の精度で補間できるとみることができる。現状では、図3に示した画像は画質が比較的良好例、後に示す図8の画像は画質の悪い例である。

4.2 DTU-STMを用いた比較測長法への適用

ここでは、提案した格子計数補間法を用いて、試作したDTU-STM⁵⁾の比較測長機としての性能を調べた結果を述べ

Fig. 7 Configuration of DTU-STM

(a) STM image of HOPG

Scanned area : 8 nm × 11 nm, Scanning time : 18.9 s/frame

(b) FFT power spectrum of Fig. (a)

Unit A

Unit B

Fig. 8 STM images of HOPG obtained by unit A and B of DTU-STM and their power spectrum

る。試作DTU-STMの構造は図7のようになっており、トンネリングユニットAとBの下に共にHOPGを配置して、両方のユニットで得られた結晶格子画像に提案した格子計数補間法を適用し、各々のSTM画像の X' 軸と Y' 軸に沿った長さを求め比較した。図8にそのSTM画像および2次元FFTパワースペクトラムを示す。走査範囲は、およそ8 nm × 11 nmである。熱ドリフトは並進成分と回転成分が存在する。結晶格子STM画像の逆格子ベクトルを考えると、熱ドリフトの回転成分は逆格子の回転をもたらすが、本報ではその回転はほとんど観察できなかった。そこで、本報では並進成分のみを考え、前報⁵⁾で報告した方法で両トンネリングユニットの測定時の熱ドリフト速度の並進成分を求めたところ、図8に示すような値

Table 1 Comparison of length measured by unit A and unit B

Tilting errors are corrected

Upper : thermal drift error is corrected

Lower : thermal drift error is not corrected

	Unit A	Unit B
X_A', X_B' nm	8.20 ± 0.07 8.20 ± 0.07	8.24 ± 0.05 8.24 ± 0.05
Y_A', Y_B' nm	10.88 ± 0.12 11.64 ± 0.12	10.97 ± 0.11 12.86 ± 0.11

であった。 dx, dy はそれぞれ熱ドリフト速度の X 軸方向, Y 軸方向成分である。また, 両 HOPG の測定面の XY 面外傾斜による測定誤差も, STM 画像の高さデータを用いて計算により補正¹⁰⁾¹¹⁾した。

図8中に示したように, X' 軸に沿った長さ測定においては, STM 画像上で $X'=0$ pixel から $X'=511$ pixel までの長さ X_A', X_B' を Y' 軸方向に 1 pixel 間隔で 512 か所測定し, その平均値とばらつきを求めた。 Y' 軸に沿った測定も同様に, $Y'=0$ pixel から $Y'=511$ pixel までの長さ Y_A', Y_B' を X' 軸方向に 512 か所で求めた。なお, 図8(a)の結晶格子像の品質は, 図3(a)に比べて落ちる。画質は逆格子のピーク強度より判定できる。逆格子のピーク強度は, 図3(a)と図8(b)ではおよそ10倍の差があった。

結果を表1に示す。表中, 上段は熱ドリフト補正後の値を, 下段は補正前の値を示す。測定結果はすべて HOPG の格子定数 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.246$ nm, 基本並進ベクトル間のなす角 $\theta_{12} = 120^\circ$ として計算した。また表中には測定値の平均と $\pm 2\sigma$ のばらつきの範囲を示してある。また, 熱ドリフト補正後の測定は X' 軸方向と Y' 軸方向ともにユニット A, B で, ばらつきの範囲内でほぼ一致している。ただし, ユニット A, B により得られた長さの平均値を比較すると, X' 軸方向の測定値の相違は 0.04 nm, Y' 軸方向の相違は 0.09 nm であり, X' 軸方向の相違が小さい。いずれもばらつきの範囲内での相違なので断定はできないが, X' 軸方向の測定はアッペの条件を満たしており, Y' 軸方向はこれを満たしていないことが, 上記の相違として現れた可能性がある。 Y' 軸方向の測定値のばらつきが X' 軸方向より大きいのは Y' 軸方向での画像の S/N 比が比較的悪いせいである。熱ドリフト補正前後の測定値を比較すると, X' 軸方向では差がないが, Y' 軸方向では明らかな差が見られる。これは, X' 軸はラスタ走査の Fast 軸であり, 1 ライン走査するのに, わずか 18.4 ms しかかからず, この間の熱ドリフトによる誤差はほぼ無視できるからである。これらの結果は, 測定方向をアッペの条件を満たし, かつ, ラスタ走査の Fast 軸に合致させるのが測定精度向上に有効であることを示している。

5. 結 論

本論文では, 結晶格子の格子間隔を基準として微小送り長さ

測定を行う場合に必要となる自動格子計数法を検討した。結論は以下の通りである。

- (1) 基準結晶格子の STM 画像を FFT 処理して得られる逆格子ベクトルを用いて, 自動的に能率良く格子点を計数する方法を示した。
- (2) 上記方法を拡張して, 格子間隔を線形補間し格子間隔以下の長さを決定する方法を示した。
- (3) 試作した DTU-STM で得た HOPG 画像に対して提案した格子計数法を適用した結果, ノイズの少ない良質の画像の場合には格子間隔の約 1/10 の精度で, 画質の悪い場合でも 1/2 の精度で長さを決定でき, 本方法はノイズに強いことが確認された。
- (4) 本方法の適用例として, DTU-STM の 2 つのトンネリングユニットで HOPG を同時に測定し比較した。その結果, 長さ測定の方角をアッペの条件を満たし, かつ, ラスタ走査の Fast 走査軸に合致させることが測定精度向上に有効であることが確認された。

謝 辞

本学卒業生の佐々木成寿君, 鈴木斉城君には画像データ整理の一部を手伝っていただいた。ここに謝意を表す。また, 本研究の一部は平成7年度科学研究費補助金の助成を受けて行われた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) G. Binning, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel : Tunneling Through a Controllable Gap, Appl. Phys. Lett., **40**, (1982) 178.
- 2) H. Kawakatsu and T. Higuchi : Design of a Positioning Table Using a Crystalline Lattice and Surface Topography as a Reference Index, SEISAN-KENKYU, **40**, (1988) 45.
- 3) E. C. Teague : The National Institute of Standards and Technology Molecular Measuring Machine Project: Metrology and Precision Engineering Design, J. Vac. Sci. Technol., **B7**, (1989) 1898.
- 4) M. Aketagawa and K. Takada : Correction of Distorted STM Image by Using a Regular Crystalline Lattice and 2D FFT: Nanotechnology, **6**, (1995) 105.
- 5) 明田川正人ほか：結晶格子を基準とする微小長さ測定（第1報）——2次元FFTによるSTM画像のゆがみ成分の抽出とその補正, 精密工学会誌, **63**, 1 (1996) 108.
- 6) H. Kawakatsu and T. Higuchi : A Dual Tunneling-Unit STM - Application as a nm Order Measuring Machine and a Positioning Table -, SEISAN-KENKYU, **41**, (1989) 548.
- 7) H. Kawakatsu and H. Kougami : Automated Calibration of the Sample Image Using Crystalline Lattice for Scale Reference in Scanning Tunneling Microscopy, J. Vac. Sci. Technol., **B14**, (1996) 11.
- 8) C. Kittel (宇野良清ほか訳) : 固体物理学入門(上) (第5版), 丸善, (1978) 43.
- 9) 例えば, 小間 篤ほか：表面科学入門, 丸善, (1994) 27.
- 10) H. Kawakatsu, Y. Hoshi and T. Higuchi : Crystalline Lattice for Metrological Applications and Positioning Control by a Dual Tunneling-Unit Scanning Tunneling Microscope, J. Vac. Sci. Technol., **B9**, (1991) 651.
- 11) V. Yu. Yurov and A. N. Kilinov : Scanning Tunneling Microscope Calibration and Reconstruction of Real Image - Drift and Slope Elimination -, Rev. Sci. Instrum., **65**, (1994) 1551.