

結晶格子を基準に用いたエンコーダ

A linear encoder using a crystal as a reference

星 泰雄*・川 勝英樹*

Yasuo HOSHI and Hideki KAWAKATSU

1. 緒 言

ナノテクノロジーという言葉が頻繁に聞かれるようになってきているが、ナノメートルの分解能で機械的に物質を製造するためには、長さの基準としてそれ以上の精度を持ったものを必要とし、さらにはそれを基準にした位置決め、加工などができなければならない。長らく使われているレーザー干渉計に変わるものとして X 線干渉計が提案されており、光学的エンコーダの較正等に使われ始めている^{1,2)}。これはシリコンの結晶格子を回折格子として用いており、長さの基準として結晶格子を用いたエンコーダということが出来る。

筆者らは走査型プローブ顕微鏡が結晶格子像を画像化できることに着目し、結晶を基準に用いた比較測長および位置決めの研究を行なっている³⁻⁵⁾。走査型プローブ顕微鏡は X 線干渉計に比べて装置の構造が簡単のため、実用化する場合に小型化が容易であると考えられる。結晶の格子定数は従来 X 線回折により求められており⁶⁾、その値はバルクとしての平均値を表していた。近年、明田川らは走査型トンネル顕微鏡⁷⁾を用いてグラファイト (highly oriented pyrolytic graphite, 以下 HOPG) を観察し、位相変調型ホモダイン干渉計との比較を行なった。この結果、グラファイト表面の結晶は内部とほぼ同様の格子定数を持つことが確認された⁸⁾。

2. 摩擦顕微鏡による結晶像を基準に用いたエンコーダ

筆者らは、比較的帯域が広く高速化が可能な摩擦顕微鏡⁹⁾による結晶像を基準に用いる方法が、恒温室のような場所を選ばずに手軽に使える汎用的な装置に向いていると考え、研究を進めている。高速化に適した試料として HOPG を使用している。疎水性の HOPG に比べて親水性

のマイカは探針が表面に吸着してしまうため、高速で走査すると周期性の読み飛ばしが起き易い¹⁰⁾。

また、実用化のためには像を取得する二次元の走査ではなく、エンコーダで測定したい一方向の走査で周期性を観測するのが望ましい。筆者らはより周期性の観測に適した走査方向を探るために結晶方位を回転させて観察像の周期性の変化を調べた。

さらに、大気中の使用における結晶周期の精度を調べるため、観察される周期性とレーザー干渉計における波長との比較を行なっている。これらの実験を行なうために使用した装置の概要を図 1 に示す。市販の走査型プローブ顕微鏡¹¹⁾に回転テーブルとレーザー干渉計を追加している。

3. 実験条件

観察には Si_3N_4 製コンタクトモード用カンチレバーで寸法が $0.8 \times 20 \times 200 \mu\text{m}$ の短冊型のもの¹²⁾ を使用している。このカンチレバーはたわみの固有振動数が 22 kHz、ねじれの固有振動数が 400 kHz である。走査速度 $5.61 \mu\text{m/s}$ で 0.246 nm 刻みの HOPG 結晶の周期がたわみの固有振動数にほぼ到達するため、限界値としてこの速度で走査している。走査範囲は画像取得時 $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$ 、干渉計との比較時は $1 \text{ nm} \times 1 \mu\text{m}$ で干渉計のフリンジ一つ分に相当する範囲を抜き出している。

比較に用いた干渉計は光源に波長 632.8 nm の He-Ne レーザー¹³⁾ をファイバーに導入して使用しており、検出側のファイバー端および試料台端のミラーそれぞれからの反射光を干渉させた結果をフォトディテクターからオシロスコープに取り込んでいる。検出に用いるファイバーは図 1 の写真に示すように装置前面より導入し、端面が試料台端のミラーと平行になるよう位置決めしている。

なお、観察時の環境は室温・大気中であり、観察中の温度変化は実験全体でも 1°C 以下 ($27 \sim 28^\circ\text{C}$)、個々のデータ取得中は 0.1°C 以下であった。

*東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター

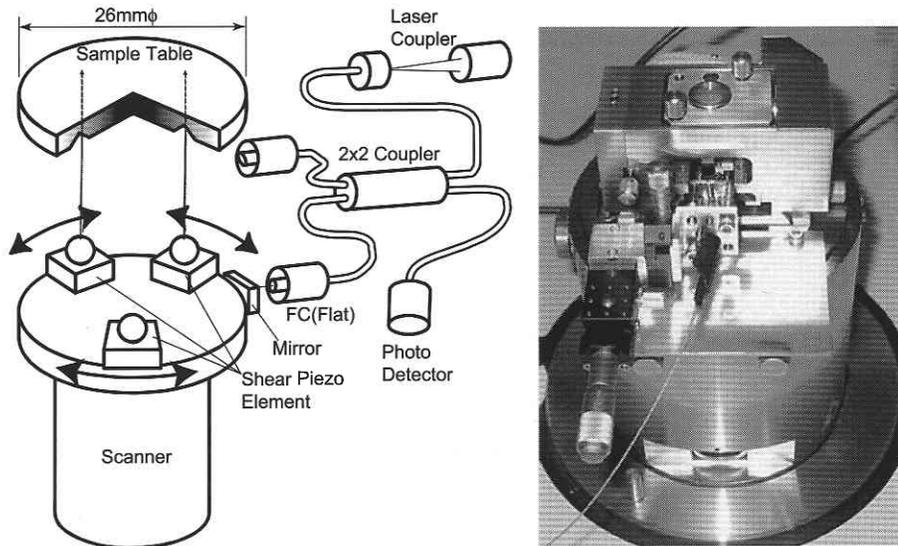


図1 実験装置の概要

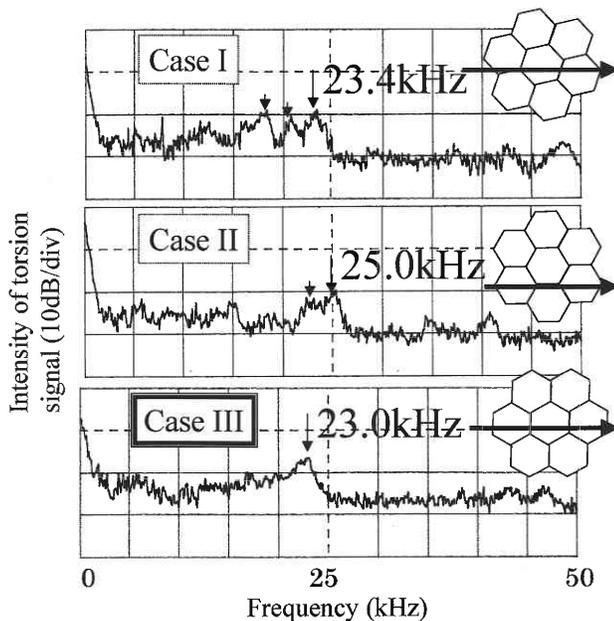


図2 走査方向と結晶の周期性の関係

4. 実験結果

4.1. 結晶方位と周期性の関係

走査方向を約 15° ずつ回転させて、ねじれ信号に含まれる周波数成分の変化を調べた結果を図2に示す。走査方向が Case III のときに周波数のピークがほぼ一つに集約しており、エンコーダとして用いるのに最も適した方向という

ことが出来る。

4.2. 結晶周期の精度

緒言で述べたように、HOPGの結晶表面が長さの基準としての精度をもっていることはほぼ確認されている。しかし、筆者らは大気中もしくは低真空状態で持ち運べるような簡便なエンコーダの製作を検討しているため、超高真空中、恒温状態での測定に比べてどの程度の精度を確保できるかを調べる必要がある。当初は一次元の走査を行なってレーザー干渉計との比較を試みたが、結晶の傾きの影響を十分に評価できないため、現在は範囲 $1\mu\text{m} \times 1\text{nm}$ 程度の二次元の走査で像を得た上で評価を行なっている。レーザーの半波長 316.4nm に相当する範囲に存在する結晶周期の数について、10回の測定を行なった。最大・最小の二つのデータを除外した8回の平均および分散 ($k=2$) を表1に示す。測定された結晶周期の平均は1439.6カウントで、これにHOPGの格子定数 0.246nm をかけると測定された長さは 354.1nm となる。

5. 考 察

表1で補正前のデータを用いた場合、本来観察されるべき結晶周期を 0.246nm とすると、測定された長さの平均値は $354.1 - 316.4 = 37.7\text{nm}$ の誤差を持つことになる。以下ではこれらの誤差要因について考察する。

5.1. 走査のひずみおよび熱ドリフト

本実験では、市販の装置の円筒ピエゾをそのまま用いているため、走査のひずみを把握する必要がある。図3は走査の振れを測定するために行なった実験および結果を示し

表 1 実験結果

scan range (half wavelength of optical interferometer)	average count of crystal periodicity	estimated length from crystal periodisity	after calibrating known errors	residual error.	uncertainty
316.4 nm	1439.6(n=8)	354.1 nm	325.1nm	8.7 nm	5.2 nm (2σ)

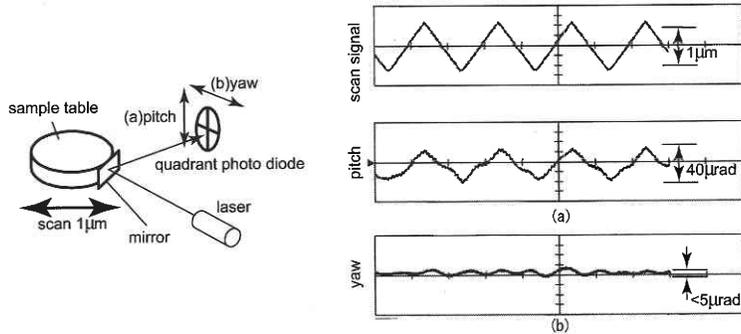


図 3 ピッチおよびヨーの測定実験。走査範囲約 1 μm に対して 40 μrad のピッチが発生する。ヨーとして見えているのはノイズであり検出限界以下と思われる。

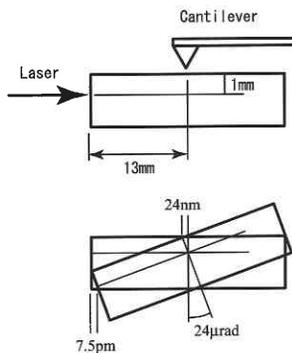


図 4 ピッチングによるアッペの誤差

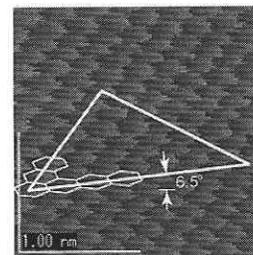


図 5 データ取得後の結晶象

ている。約 1 μm の範囲を走査し、試料台端面のミラーからのレーザー反射の振れを光てこにより観察している。ピッチングの変化を測定したところ、約 40 μrad のピッチングが測定された。測定時の走査範囲はこの 5 分の 3 なので、ピッチングは 24 μrad と推定される。また、ヨーイングについてはこの方法では測定できなかったため、実際には 1 μrad 以下と考えられる。

図 4 にピッチングによる測定誤差を示す。レーザーが当たっている部分とカンチレバーとの間は水平距離で 13 mm、垂直距離で 1 mm 離れている。ここに上記のピッ

チングが加わった場合、レーザー端面での変位 7.5 pm に対し、カンチレバーの先端、すなわち結晶像においては見かけ上 24 nm の変位を生じ、両者を比較する場合に結晶周期を干渉計の変位より多く数える最も大きい誤差の要因となっている。

また、干渉計で測定しているテーブルの変位は高速走査方向のみであり、現状では低速走査方向の変位は測定していない。データ取得直後の結晶像を図 5 に示すが、本来正三角形に見えるべき画像がひずんでいることがわかる。測定時の熱ドリフトは高速走査方向に 0.12 nm/s、低速走査方向に 0.03 nm/s であり、図 5 の例では 5.48 s の走査時間内に画面全体が横方向に 0.65 nm、縦方向に 0.16 nm ひずむ計算になる。この値は無視できないが、図 5 ではドリフ

研究速報

トの影響が少ないと思われる高速走査方向(横方向)に比べて縦方向に大きなひずみが見られ、測定していない低速走査方向の走査のひずみが大きいことを示唆している。

5.2. 結晶方位の傾き

図5に示した画像から、結晶方位が完全には高速走査の方向と一致していないことがわかる。現状の装置構成では、測定時の傾きを 5° 以下にすることが困難である。画像から得られる方向のずれは 6.5° であるが、先に述べたような熱ドリフトによるひずみを仮定した場合、方向のずれは約 10° となる。これは比較を行なった走査範囲 316.4 nm に対して約 5 nm の誤差を生じる角度である。

5.3. レーザー波長の読み取り誤差

レーザー波長は干渉計の正弦波から読み取っているが、最大値および最小値を目測により判断するため、数 nm の誤差を生じる。測定結果のばらつきの多くをこの読み取り誤差が占めていると考えられる。

5.4. 補正後の誤差について

上記で考慮した誤差を差し引くと、今回測定したデータの平均値は 325.1 nm となり、走査範囲 316.4 nm に対してまだ約 9 nm の誤差を持っている。これは現在測定できていない低速走査のひずみによるものと推測しており、今後測定装置を追加して計測する予定である。

6. 結 言

HOPGの結晶格子を基準としたエンコーダを開発するにあたり、大気中の摩擦力顕微鏡を用いた観察で確保できる精度について調べた。レーザーの半波長 316.4 nm に対して、あらかじめわかっている誤差を補正した測定値は

325.1 nm 、不確かさ($k=2$)は 5.2 nm であった。残っている誤差は低速走査のひずみによるものと考えている。今後低速方向の測定装置を追加するとともに、 1 nm の分解能を持つ変位計を導入して再度精度評価を試みる計画である。

(2003年9月12日受理)

参 考 文 献

- 1) G. N. Peggs and A. Yacoot: *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 360 (2002) 953-968.
- 2) A. Yacoot and N. Cross: *Meas. Sci. Technol.*, 14 (2003) 148-152.
- 3) H. Kawakatsu and T. Higuchi: *SEISAN-KENKYU*, 40 (1988) 45.
- 4) H. Kawakatsu, T. Higuchi, H. Kougami, M. Kawai, M. Watanabe, Y. Hoshi, and N. Nishioki: *J. Vac. Sci. Technol. B*, 12 (1994) 1681-1685.
- 5) H. Kawakatsu, Y. Hoshi, H. Bleuler, H. Kougami, M. Bossardt, N. Vezzin: *Appl. Phys. A*, 66 (1998) S 853-S 855.
- 6) F. Cembali, R. Fabbri, M. Servidori, A. Zani, G. Basile, G. Cavagnero, A. Bergamin, and G. Zosi: *J. Appl. Cryst.*, 25 (1992) 424-431.
- 7) G. Binnig and H. Rohrer: *Helv. Phys. Acta*, 55 (1982) 726-735.
- 8) P. Rerkkumsup, M. Aketagawa, K. Takada, T. Watanabe and S. Sadakata.: *Rev. Sci. Instrum.*, 74 (2003) 1205-1210.
- 9) C. M. Mate, G. M. McClelland, R. Erlandsson, and Sh. Chiang: *Phys. Rev. Lett.*, 59 (1987) 1942-1945.
- 10) Y. Hoshi, T. Kawagishi, and H. Kawakatsu: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39 (2000) 3804-3807.
- 11) JEOL, JSPM-4200
- 12) OLYMPUS, OMCL-RC 800 PS
- 13) NEOARK, HN 550 P