

超小型・高感度干渉変位センサーを組み込んだ 高精度原子間力顕微鏡

渡 辺 正 浩

High-Accuracy Atomic Force Microscope with Ultra Compact and High-Sensitivity Interferometric Displacement Sensors Incorporated in Probe Scanner

Masahiro WATANABE

A one-inch-sized displacement sensor with a sensitivity of 5 pm has been developed. It is based on common-path phase-shifting interferometry, in which photonic crystal polarizers are utilized as a reference mirror and a phase shifter. By integrating the above sensors in a triaxial probe scanner, a quantitative metrology AFM (atomic force microscope) was realized that had a probe position resolution of 15 pm, which is one order of magnitude smaller than atomic scale.

Key words: interferometric displacement sensor, atomic force microscope, AFM, photonic crystal

大規模集積回路 (LSI: large scale integration) の微細化¹⁾ やハードディスクドライブ (HDD: hard disk drive) の記録密度増大²⁾ に伴って、デバイス製造時のプロセスマージンが減少している。このため、製造の歩留まりを保つには、三次元ナノ構造の寸法 (例えばパターン幅, 高さ, 側壁角度) をインラインで測定し, その結果に基づいてプロセスを安定制御することが重要である。最小パターンサイズの 10 分の 1 の精度での寸法制御が要求されるため, 次世代の 18 nm ノード LSI や, パターンドメディアを記録媒体として用いるテラビット超級の HDD の製造では, 三次元ナノ構造の寸法を数ナノメートルオーダーの精度で制御することが不可欠となってくる。寸法測定精度としては, 寸法制御精度の 5 分の 1 から 10 分の 1 程度, すなわち数十から数百 pm が必要となる。

原子間力顕微鏡 (AFM: atomic force microscope)³⁻⁵⁾ は三次元ナノ構造の非破壊観察に適するため, これを寸法の定量測定に活用する研究が行われてきた⁶⁻⁸⁾。AFM では, 先端径が数 nm の探針を用い, 探針先端と試料表面に働く力 (例えば接触力) を一定に制御しながら試料表面を走査する。このとき, 各走査位置で読み取った探針の三次元変

位から試料の立体形状を得るという原理である。探針走査系は圧電素子で駆動され, 圧電素子に印加する電圧を探針の変位とすることでサブナノメートルの高分解能を実現している。しかし圧電素子には非線形性や経時変化があるため, 定量的な測定においては, 変位を圧電素子印可電圧ではなく走査系に組み込んだ変位センサーから得る必要がある。このため, AFM の測定精度は変位センサーの精度に依存する。変位センサーには静電容量式変位計, 線形差動変圧器等があるが, これらの分解能はたかだか 1 nm 前後にすぎない。前述のとおり数十から数百 pm の形状寸法測定精度を得るためには数十 pm の変位測定分解能が必要であり, これらの変位センサーでは精度が不足していた。

このため筆者らは, 共通光路位相シフト干渉法⁹⁻¹¹⁾ の原理に基づいた超小型干渉変位センサーを開発した^{12,13)}。特に, フォトニック結晶偏光素子を参照ミラーと位相シフターに用いることで, 1 インチサイズで変位感度 5 pm という小型化と高感度化を実現した。これを探針走査系の XYZ 軸に組み込み¹⁴⁾, 探針変位のクロズドループ制御分解能として原子サイズの 10 分の 1 相当の 15 pm を実現した。本稿ではこの AFM について論じる。

(株)日立製作所横浜研究所 (〒244-0817 横浜市戸塚区吉田町 292) E-mail: masahiro.watanabe.ub@hitachi.com

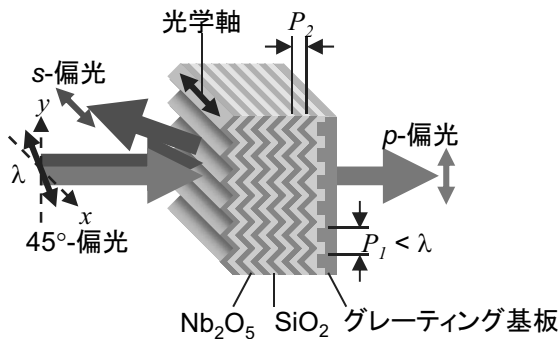


図1 フォトニック結晶偏光素子.

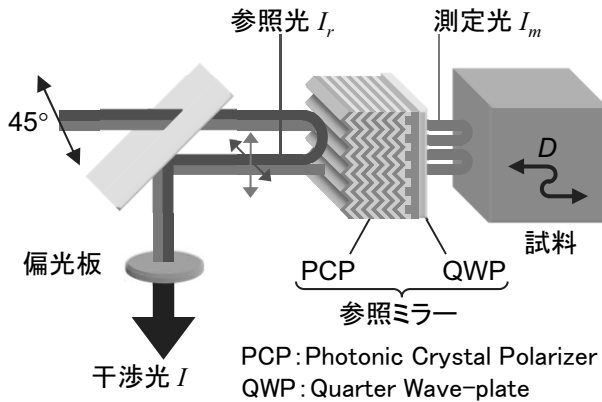


図2 フォトニック結晶偏光素子を用いた共通光路変位計.

1. 超小型干渉変位センサー

1.1 フォトニック結晶偏光素子 (PCP)

図1に積層型フォトニック結晶の構造を示す. フォトニック結晶はサブ波長ピッチの二次元周期構造から成り, 以下のようなプロセスで製作される. まず, 使用波長 λ よりも短いピッチ P_1 のグレーティングを, 合成石英のような誘電体基板上に形成する. この上に屈折率の異なる2種類の誘電体薄膜を積層する. このとき, 自己複製成膜プロセスを用いることで, 断面が三角形となった薄膜が転写されていく¹⁵⁾. 作製されたフォトニック結晶は光学的異方性を示し, 偏光素子として利用することができる. グレーティングピッチ P_1 と積層周期 P_2 と膜層数を変えることにより, 任意の適用波長のフォトニック結晶偏光素子 (以後では, PCP: photonic crystal polarizer と呼ぶ) を実現できる¹⁶⁾. 消光する偏光方向 (光学軸) は基板のグレーティングの方向で決まるので, 基板上の場所によって異なる光学軸をもった偏光素子アレイ (マイクロ偏光素子) を一体構造で実現できる. 後述の位相シフト素子もマイクロ偏光素子に基づいている¹⁷⁾.

1.2 フォトニック結晶偏光素子を用いた共通光路干渉計

図2に示すように, PCP に対して 45° 方向に偏光した

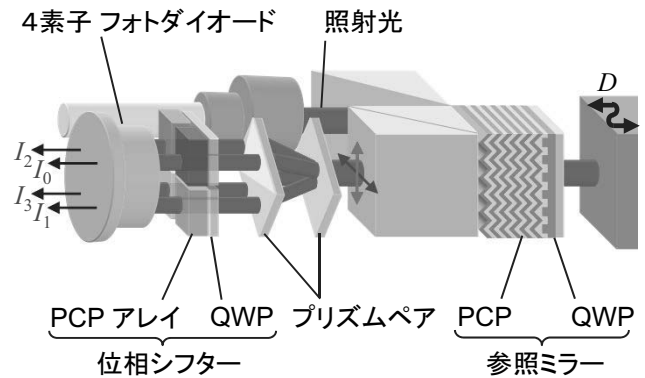


図3 共通光路干渉計とフォトニック結晶偏光素子による位相シフター.

レーザー光が照射されると, グレーティングに平行な偏光成分 (S 偏光) は反射されるので, これを参照光として用いる. 直交する偏光成分 (P 偏光) は PCP を透過するので, これを測定光として用いる. すなわち, PCP を共通光路干渉計の参照ミラーとして使用することが可能となる. さらに, 図2に示すように, PCP と組み合わせられた四分の一波長板 (QWP: quarter-wave plate) を透過することで, 測定光は測定試料表面と PCP との間で, P 偏光, 右円偏光, S 偏光, 左円偏光, P 偏光と変化しつつ2往復する. 測定光はこの後 PCP を透過して, 参照光と合波される. これによって, 試料の変位 D に対する位相の感度が2倍となるダブルパス干渉計を単純な構造で実現できる. 測定光と参照光が共通光路をもつため, 環境の変動による影響を相殺でき, 光学系の振動や温度変化による影響に対してロバストになる. 特に AFM では, ストロークが数百 μm に過ぎないため, ターゲットミラーを PCP 参照ミラーのごく近傍に置くことで測定光のみの光路を 1 mm 以下に抑えることができ, 大気の影響を極限まで抑制可能である.

1.3 フォトニック結晶偏光素子による位相シフト技術

偏光が直交した測定光と参照光は, 図3のように, ピラミッド型のプリズムペアによって4本のビームに分離され, PCP で構成した位相素子に導かれる. 位相素子は, 図4に示すように, QWP と一体形成された4つの PCP アレイから成る. QWP の光学軸は 0° と 90° 方向, PCP の光学軸は $\pm 45^\circ$ 方向となっている. これにより, 4本のビーム内で測定光と参照光の間にそれぞれ $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の位相差が加えられて干渉する. 4本の干渉光は4素子フォトダイオードによって検出され, 得られる4つの位相シフト干渉信号は

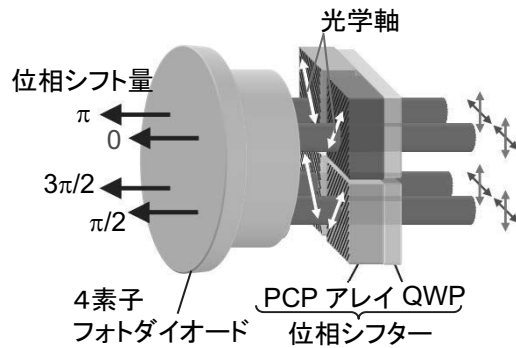


図4 位相シフターの構造.

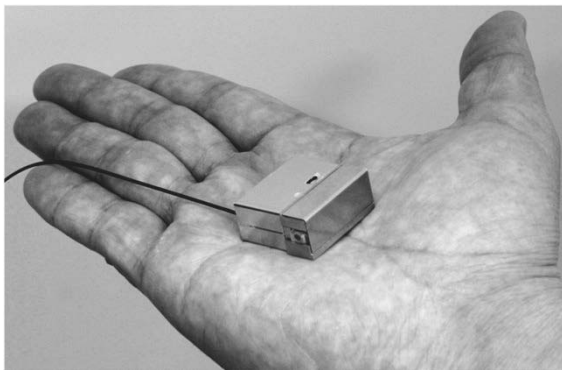


図5 1インチサイズの超小型干渉変位センサー.

$$I_q = I_m + I_r + 2\sqrt{I_m I_r} \cos\left(\frac{8\pi n D}{\lambda} + \frac{\pi}{2} q\right) \quad (1)$$

と表わされる直交信号となる. ここで, I_m と I_r はそれぞれ測定光と参照光の強度, λ はレーザー光の波長, q は0から3の整数, n は環境の屈折率 ($n \approx 1$) を示す. 試料の変位 D は

$$D = \frac{\lambda}{8\pi n} \tan^{-1}\left(\frac{I_3 - I_1}{I_0 + I_2}\right) \quad (2)$$

によって表わされる. 従来の位相シフト法では, 無偏光ビームスプリッター, 偏光ビームスプリッター, 二分の一波長板, QWP といった多数の光学素子を精密に位置合わせすることが必要であった^{18,19)}. 開発した位相シフト技術では, QWP と一体形成の PCP アレイのみで同じことが実現できる. また, ワイヤグリッド偏光素子²⁰⁾ よりも格段に高い消光比により, 位相が正確に直交した干渉信号を得ることができる.

1.4 超小型干渉変位センサーと検出感度

前記の原理に基づいて, 図5に示すような, $25 \times 27 \times 12$ mm とほぼ1インチサイズの超小型変位センサーを開発した. 図6に原理確認に用いた実験装置の構成を示す. 周波数安定化 He-Ne レーザーからの直線偏光レーザー光を, 偏波面保存ファイバーによって導いた. 4つの位相シフト

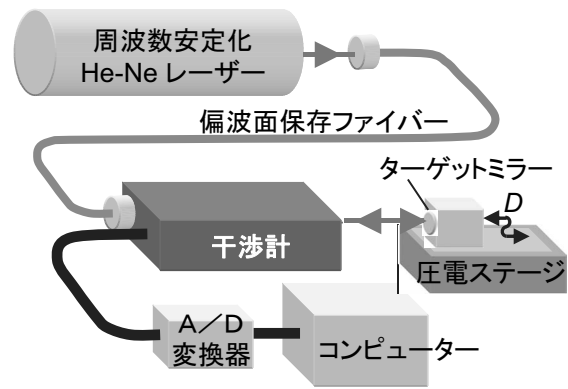


図6 干渉変位センサーの原理確認に用いた構成.

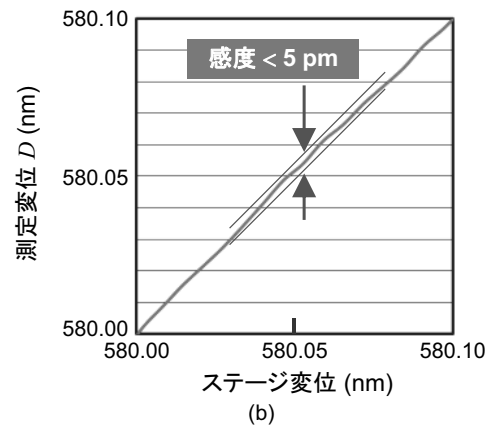
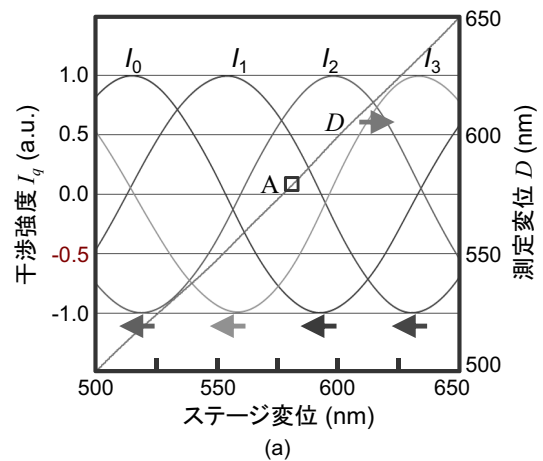


図7 実験結果. (a) 4つの位相シフト干渉信号とこれから計算された変位信号, (b) 領域Aの変位信号の拡大.

干渉信号は18 bit 分解能で A/D 変換され, 式(2)によって変位が計算される.

圧電ステージに搭載したターゲットミラーを一定速度で150 nm 駆動した際の4つの位相シフト干渉信号と, これらから計算されたステージ変位を図7(a)に示す. 干渉信号は互いに $\pi/2$ ずつずれて, 158.2 nm 周期で繰り返す正弦波であることが読み取れる. この周期は光源波長のちょうど4分の1であることから, 測定光が正確に2回ター

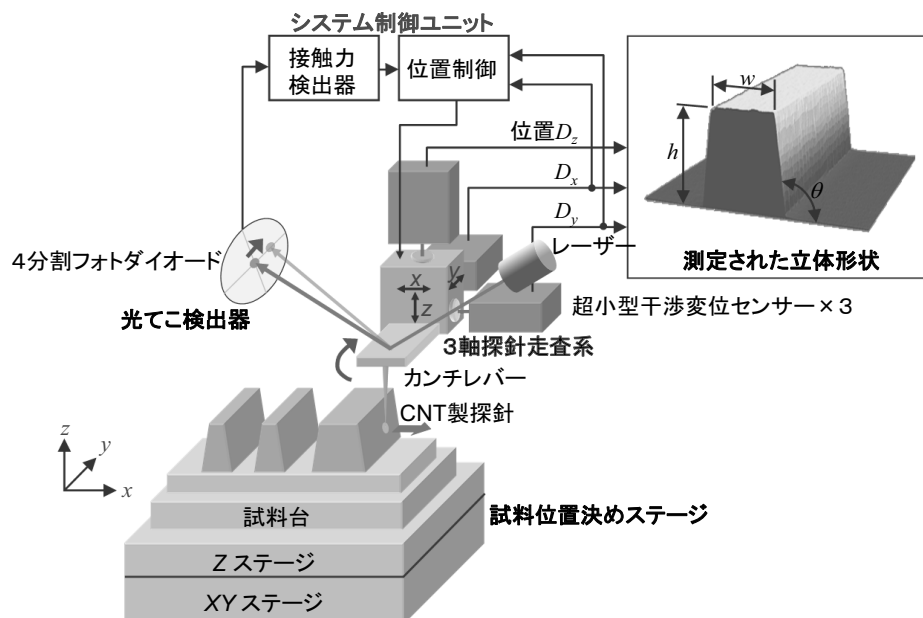


図8 開発した原子間力顕微鏡のシステム構成。

ゲットミラーと参照ミラーの間を往復していることを示している。さらに、変位信号の線形性が良好なことから、共通光路干渉計で通常問題となる多重反射による線形性の低下が大幅に抑制されていることを示している。これはPCPの高い消光比の効果と考えられる。以上より、本干渉変位センサーが共通光路ダブルパス位相シフト干渉計として機能することが検証できた。図7 (b) に示す領域Aの拡大図から、5 pmの変位感度が読み取れる。

2. 超小型干渉変位センサーを組み込んだ原子間力顕微鏡

2.1 システム構成

図8に開発したAFMの構成を示す。前述の超小型干渉変位センサーを組み込んだ三軸探針走査系、光てこ法を用いた接触力検出器、制御系、および試料位置決めステージで構成される。探針はカンチレバー先端に形成されているため、探針先端と試料の間の微小な接触力はカンチレバーのたわみに変換され、さらに接触力検出器によって接触力信号に変換されて走査系の圧電素子にフィードバックされることで、一定の接触力を保つよう制御される。探針には、先端径が4 nmまで先鋭化されたカーボンナノチューブ (CNT: carbon nanotube) を用いた²¹⁾。CNTは高い強度 (ヤング率1 TPa前後) と靱性と形状安定性をもつ理想的な探針材料である。

開発したAFMにはステップイン走査法という探針走査法を備えた²²⁾。図9 (b) に示すように (1) 探針先端を降下させて、(2) 試料表面に所定の接触力で接触したところ

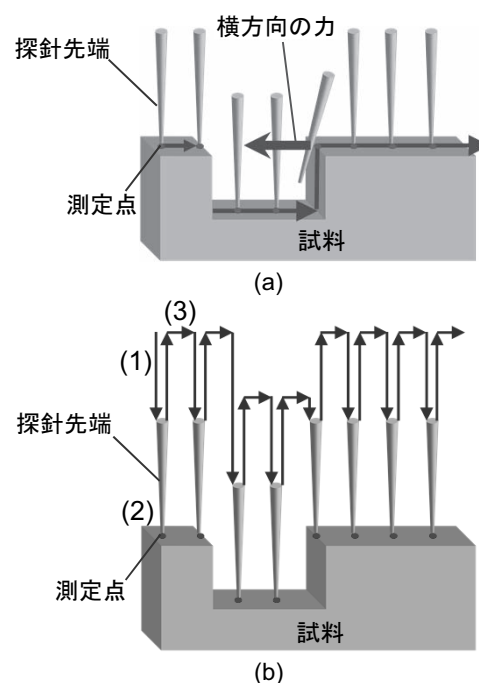


図9 原子間力顕微鏡の探針走査法。(a) コンタクト走査法とAC走査法、(b) ステップイン走査法。

で探針の三次元変位を測定し、(3) 試料からのファンデルワールス力や表面張力を感じなくなるまで探針を引き上げた後、次の走査点に移る。図9 (a) に示すような探針が試料に接した状態で横に移動する他の探針走査法と異なり、急峻な段差でも良好なプロファイル追従性を示し、探針の摩耗が非常に少ないという利点がある。特に、探針を振動させるAC走査法では、試料上の急斜面で振動が不安定になりスパイク状の形状誤差を示すことがあるのに対し、探

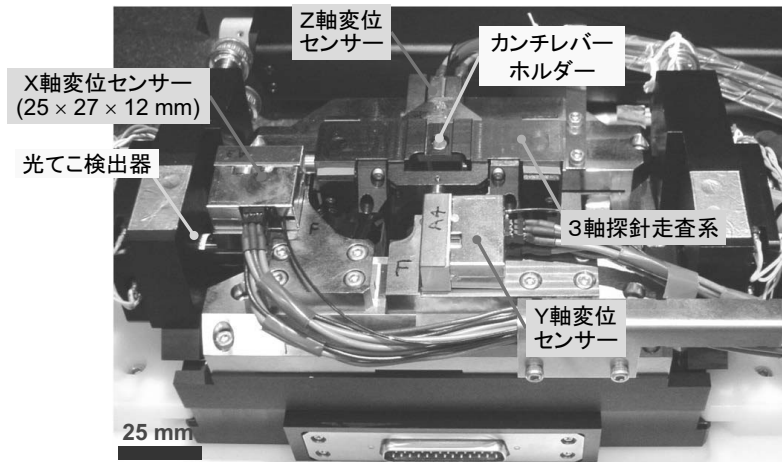


図 10 超小型干渉変位センサーを組み込んだ 3 軸探針走査系（下側より撮影）。

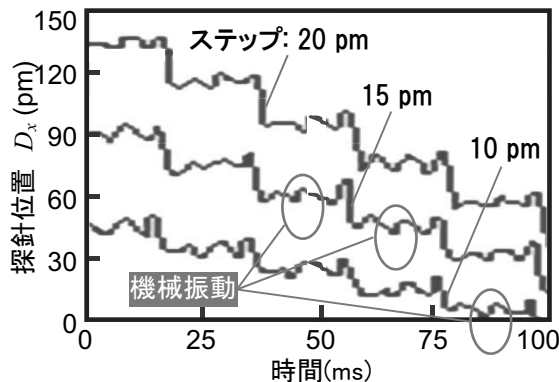


図 11 QM-AFM の探針位置制御分解能。ステップ変位指令 (10, 15, 20 pm) に対する X 軸走査系の変位センサー信号。

針を振動させないステップイン走査法では、このような問題を生じにくい。筆者らはまた、CNT 探針の特性を巧みに利用して、アスペクト比の非常に高い微細凹凸試料の立体形状を測定可能な技術も開発している²³⁾。

2.2 探針走査系

図 10 に示すように、XY 走査系は平行平板による弾性ガイドをもち、この下に Z 走査系を保持している。XYZ 軸は独立に圧電素子で駆動される。走査レンジは X, Y 軸が 20 μm で、Z 軸が 10 μm である。試料側に XY 軸をもつことが多い小型の AFM と異なり、探針側を X, Y, Z 軸に駆動することで、シリコンウェハーのような大形の試料の測定が可能となる。走査機構の真中に穴があいており、開口数 0.45 の顕微鏡光学系を配置して、試料上方から試料とカンチレバーを高解像度で観察できる。超小型干渉変位センサーからの信号は、18 bit デジタル信号として DSP (digital signal processor) で処理されて、D/A 変換器を介して XYZ 軸の圧電素子にフィードバックされ、クローズドループ

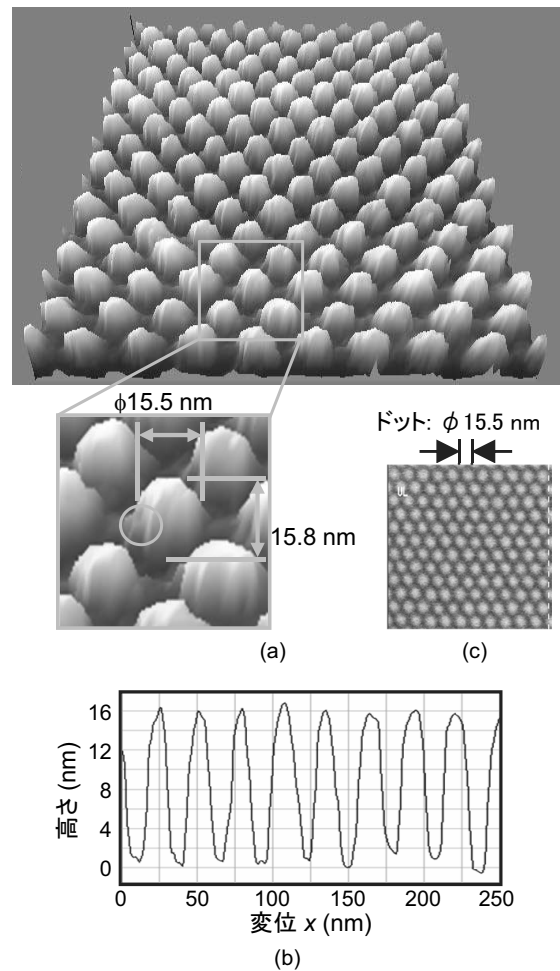


図 12 ピッチ 30 nm、高さ 16 nm のシリコンナノドットパターンの QM-AFM による測定結果。(a) 鳥瞰図、(b) 断面プロファイル、(c) 上方からの SEM 画像。

制御系を形成する。これにより、正確な超高分解能探針位置決めが実現される。この AFM を筆者らは QM-AFM (quantitative meteorology AFM) と呼んでいる。これまで

も干渉計で探針の変位を測定した例はあるが²⁴⁾、干渉変位センサー全体を三軸探針走査系の内部に組み込んだ例は、筆者の知る限りない。

2.3 実験結果と考察

図11にpmオーダーのステップ移動指令に対するX軸走査系の変位センサー信号を示す。10 pm ステップ移動時の変位センサー信号はノイズのため不明瞭だが、15 pm と20 pm のステップ移動時のステップ変化は明瞭に観察できる。このことから、開発したQM-AFMは15 pmの探針変位分解能をもっていると結論付けられる。さらに、これらのゆらぎはステップ移動直後に観察されることから、走査機構自体がクローズドループ制御系の残留振動特性を示している可能性が高い。つまり、変位センサー単体としては、数pmの微小変位を検出できている可能性を示している。

図12(a)に、次々世代HDDに用いられるパターンドメディアを想定した、記録密度1 Tbit/inch²相当のシリコンナノドットパターン(ピッチ30 nm, 高さ16 nm)の測定結果を示す。図12(b)は断面プロファイル、図12(c)は試料のSEM画像である。4 nmまで先鋭化したCNT探針の先端が、ステップイン走査法によって安定的にナノドット構造の狭い間隙の底部に到達していることを示している。測定されたドットパターンの高さは15.8 nmであった。

文 献

- 1) Semiconductor Industry Association: *International Technology Roadmap for Semiconductors, 2011 Edition* (International SEMATECH, Austin, Texas, 2011).
- 2) 森 恭一, B. Ratray, 松井裕一: “物理限界に挑戦するハードディスク製造設備技術”, 日立評論, **93** (2011) 198-199.
- 3) G. Binnig, C. F. Quate and C. Gerber: “Atomic force microscope,” *Phys. Rev. Lett.*, **56** (1986) 930-933.
- 4) T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne and D. Ruger: “Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity,” *J. Appl. Phys.*, **69** (1991) 668-673.
- 5) P. Hansma, J. Cleveland, M. Radmacher, D. Walters, P. Hillner, M. Bezuanilla, M. Fritz, D. Vie, H. Hansma, C. Prater, J. Massie, L. Fukunaga, J. Gurley and V. Elings: “Tapping mode atomic force microscopy in liquids,” *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 1738-1740.
- 6) M. Nagase, H. Namatsu, K. Kurihara and T. Makino: “Critical dimension measurement in nanometer scale by using scanning probe microscopy,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 4166-4174.
- 7) Y. Martin and H. K. Wickramasinghe: “Toward accurate metrology with scanning force microscopes,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13** (1995) 2335-2339.
- 8) R. Dixon, N. G. Orji, J. Fu, M. Cresswell, R. Allen and W. Guthrie: “Traceable atomic force microscope dimensional metrology at NIST,” *Proc. SPIE*, **6152** (2006) 61520P.
- 9) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (Wiley, 1992).
- 10) C. Chou, J.-C. Shyu, Y.-C. Huang and C. K. Yuan: “Common-path optical heterodyne profilometer: A configuration,” *Appl. Opt.*, **37** (1998) 4137-4142.
- 11) T. Nakata and T. Ninomiya: “A charge-coupled-device-based heterodyne technique for parallel photodisplacement imaging,” *J. Appl. Phys.*, **96** (2004) 6970-6980.
- 12) T. Nakata and M. Watanabe: “Common-path double-pass optical interferometry using a wire-grid polarizer as a reference mirror,” *Opt. Rev.*, **15** (2008) 276-279.
- 13) T. Nakata and M. Watanabe: “Ultracompact and highly sensitive common-path phase-shifting interferometer using photonic crystal polarizers as a reference mirror and a phase shifter,” *Appl. Opt.*, **48** (2009) 1322-1327.
- 14) 渡辺正浩, 立崎武弘, 中田俊彦: “プローブ走査系に光干渉変位センサを組み込んだ超高分解能AFM(II) —装置構成と性能評価結果—”, 第70回応用物理学会学術講演会, 16a-P9-24 (2010).
- 15) S. Kawakami: “Fabrication of submicrometre 3D periodic structures composed of Si/SiO₂,” *Electron. Lett.*, **33** (1997) 1260-1261.
- 16) T. Sato, K. Miura, N. Ishino, Y. Ohtera, T. Tamamura and S. Kawakami: “Photonic crystals for the visible range fabricated by autocloning technique and their application,” *Opt. Quantum Electron.*, **34** (2002) 63-70.
- 17) T. Sato, T. Araki, Y. Sasaki, T. Tsuru, T. Tadokoro and S. Kawakami: “Compact ellipsometer employing a static polarimeter module with arrayed polarizer and wave-plate elements,” *Appl. Opt.*, **46** (2007) 4963-4967.
- 18) R. Smythe and R. Moore: “Instantaneous phase measuring interferometry,” *Opt. Eng.*, **23** (1984) 361-364.
- 19) T. Keem, S. Gonda, I. Misumi, Q. Huang and T. Kurosawa: “Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system,” *Appl. Opt.*, **44** (2005) 3492-3498.
- 20) J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, M. B. North-Morris, M. Novak and J. C. Wyant: “Pixelated phase-mask dynamic interferometer,” *Proc. SPIE*, **5531** (2004) 304-314.
- 21) H. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzier, D. T. Colbert and R. E. Smalley: “Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy,” *Nature*, **384** (1996) 147-150.
- 22) S. Hosaka, T. Morimoto, K. Kuroda, H. Kunitomo, T. Hiroki, T. Kitsukawa, S. Miwa, H. Yanagimoto and K. Murayama: “Proposal for new atomic force microscopy (AFM) imaging for a high aspect structure (digital probing mode AFM),” *Microelectron. Eng.*, **57-58** (2001) 651-657.
- 23) M. Watanabe, S. Baba, T. Nakata, T. Morimoto, S. Sekino and H. Itoh: “Atomic force microscope method for sidewall measurement through carbon nanotube probe deformation correction,” *J. Micro/Nanolithogr., MEMS, MOEMS*, **11**(1) (2012) 011009.
- 24) I. Misumi, S. Gonda, O. Sato, K. Sugawara, K. Yoshizaki, T. Kurosawa and T. Takatsuji: “Nanometric lateral scale development using an atomic force microscope with directly traceable laser interferometers,” *Meas. Sci. Technol.*, **17** (2006) 2041-2047.

(2012年9月28日受理)