SPM の産業応用についての展望*

An Outlook on Industrial Applications of SPM

渡辺正浩**

Masahiro WATANABE

Key words

SPM, scanning probe microscope, AFM, atomic force microscope, probe, calibration, displacement sensor, probe, carbon nanotube

1. 緒 言

SPM (Scanning Probe Microscope) はその名の通り、微細なプローブ探針を走査しながら試料との相互作用を測定し、走査に合わせて画像化することで試料の微細構造を可視化する顕微鏡である。相互作用によってさまざまな種類があるが、探針と試料の間に流れるトンネル電流を用いた走査型トンネル顕微鏡 (STM: Scanning Tunneling Microscope) が IBM チューリッヒ研究所の Binnig と Rohrer により開発され、1981 年にシリコン (111)7×7 原子像の画像化に成功した¹⁾。両氏はこの発明によって 1986 年にノーベル物理学賞を受賞した。

その後すぐ、1986 年 Binnig と Quate は数原子オーダーまで近づいた探針と試料間に働く原子間力を相互作用として用いた、原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope) を発明し²⁾、導電性試料に限られていた STM の応用範囲を飛躍的に拡大した。この後、AFM の派生形としてさまざまな相互作用を用いたものが開発され、これらを総称して SPM (Scanning Probe Microscope) と呼んでいる。この中には例えば、磁性探針を用いた走査型磁気力顕微鏡 (MFM: Magnetic Force Microscope)³⁾、近接場光を用いた光近接場顕微鏡 (SNOM: Scanning Near-field Optical Microscope)⁴⁾ 等がある。このような各種 SPM 技術に関しては例えば Sarid⁵⁾、森田⁶⁾ が詳しく解説している。

SPM は表面物理の強力な観察・解析ツールとして盛んに用いられてきており、半導体・ハードディスク等の先端デバイスの開発にも大きく貢献している。例えば、走査型広がり抵抗顕微鏡 (SSRM: Scanning Spread Resistance Microscope)⁷⁾ による半導体のドーパントプロファイルの解析や、Kelvin Probe Force Microscope⁸⁾ による電位差分布測定等が活用されている。最近では、安藤らにより細胞・バイオ観察がビデオレートで行える高速バイオ AFM も開

発されており⁹⁾、バイオ産業における創薬といった製品開発への貢献も今後期待される。

上記のように SPM 技術は多岐にわたる (図 1) が、本稿では産業応用の中でも、製品開発時の解析用途ではなく、製造ライン中で活用される SPM 技術について論じることとする。

2. SPM の原理

図 2 に AFM の原理を示す。微小な原子間力は、「レーザー光でこ」と呼ばれる方法で通常は検出される。探針を

図1 SPMの分類

図2 AFMの原理

*原稿受付 平成25年1月10日

**正会員 (株)日立製作所横浜研究所 (神奈川県横浜市戸塚区吉田町292)

先端に付けたカンチレバーが撓むと、カンチレバーに照射されたレーザーの反射スポットが移動し、これが光位置センサーで検出される。カンチレバーの静的な撓みを検出するコンタクトモードと呼ばれるモードでは、このレーザー移動量が原子間力と比例するとして、これを一定に保つようにカンチレバーを保持する走査機構の Z 軸にフィードバックされる。この状態で走査機構を X、Y に走査しつつ、変位量を記録することで試料の立体形状を検出する。走査には圧電素子駆動機構が多く使われる。一方 AC (Alternative Current) モードでは、カンチレバーを加振した状態でレーザースポット位置の振動の振幅、位相、または周波数を検出して、これを Z 軸にフィードバックすることで、探針の接触状態を一定に保つ。さらに、探針の走査と同期して探針と試料の間に働く物理量を測定することで、各種 SPM が実現される。例えば、電流を測定することで SSRM、探針-試料間容量を測定することで SCM (Scanning Capacitance Microscope)、探針あるいは試料に近接場光を発生させた状態で探針と試料の相互作用で発生する散乱光を測定することで SNOM、探針に磁性体をコートしたものをを用いて、試料との間に生じる磁気力を測定することで MFM といった具合である。

3. 先端デバイス製造への応用

大規模集積回路 (LSI: Large Scale Integration) の微細化¹⁰⁾やハードディスクドライブ (HDD: Hard Disk Drive) の記録密度増大¹¹⁾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、3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 1/10 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、3次元ナノ構造の寸法を数 nm オーダの精度で制御することが不可欠となってくる。この制御のために必要な寸法測定精度としては、寸法制御精度の 1/5 から 1/10 程度、すなわち、数十から数百 pm となる。

また図 3 に示すように、HDD ヘッドの浮上量が数 nm まで減少している現在、ヘッド浮上面 (ABS: Air Bearing Surface) の平坦性に許されるマージンは 1 nm を切っている。粗さに至っては Ra で 0.1 nm が要求されている。また、書き込み磁極の幅は数十 nm であり、許される凹凸は 1 nm を切っている。これらの測定にも要求加工精度を上回る測定精度が要求される。

SPM は微細立体構造を非破壊で測定できるため、上記のような先端ナノデバイス製造時のプロセス管理への活用が期待されている。しかし、このためには、デバイス表面の解析・観察用途にはない、測定の定量性・再現性・スループットといった特性が要求される。具体的には 1) 寸法精度・再現性・校正機能、2) 走査の平坦性・鉛直度、3)

図 3 HDD の構造と、記録密度と浮上量の変遷

図 4 探針走査機構 (a) チューブ型圧電素子, (b) 圧電素子と弾性ガイド機構, (c) 滑りガイドによる広範囲走査機構

高段差形状の正確なトレースと探針形状補正、4) 高スループット・自動測定、である。

3.1 走査の平坦性・鉛直度

SPM の探針走査機構としてよく使用されるチューブ型の圧電素子は、圧電素子に形成された分割電極に対する電圧の印加の極性の組み合わせで、シンプルな構造で XYZ の 3 軸走査が可能であるが、変位の軸間クロストーク、特に、XY 方向走査時の球面状の上下動 (駆動範囲 40 μm で上下動 10~100 nm 程度) が問題となる (図 4 (a))。そのため、産業用では図 4 (b) のように X、Y、Z 軸独立の弾性ガイドステージを圧電素子で駆動する構成が常用される¹²⁾¹³⁾。特に平坦性に対する要求の厳しい磁気ヘッドの ABS 面の製造時の検査には欠かせないものとなっている¹²⁾。一方筆者らは、LSI で用いられる CMP (Chemical Mechanical Planarization) と呼ばれる研磨工程によるウェーハ平坦化の評価のために、図 4 (c) のように平坦性の確保された石定盤上でサンプルステージをスライドさせながら探針を追従させることで、40 mm $\square$ の広い領域を 30 nm の平坦性で走査できる AFM も開発している¹³⁾。

図5 AFM 組み込み用小型干渉変位センサー¹⁶⁾

3.2 寸法精度・再現性・校正機能

初期の SPM の探針走査機構は、走査用圧電素子に対する印可電圧を探針の変位とすることでサブ nm の高分解能を実現していた。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ており、産業用の SPM としてはこのタイプのものが大勢となっている。変位センサーには分解能が 1 nm 前後の静電容量式変位計、線形差動変圧器等が用いられる。さらに、産総研、米国 NIST (National Institute of Standards and Technology) 等では、レーザー干渉計を変位センサーとして用いることで、長さ標準に対してトレーサブルな AFM を開発している¹⁴⁾¹⁵⁾。筆者らも共通光路位相シフト干渉法の原理に基づいた小型干渉変位センサーを開発した¹⁶⁾。

図 5 に示すように、フォトニック結晶偏光素子を参照ミラーに用いることにより、探針走査系に組み込みやすい 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、クローズドループ制御分解能として原子サイズの 1/10 相当の 15 pm を実現している¹⁷⁾。

一方、校正試料による定期的な装置の精度校正も重要である。このために標準段差試料、標準線幅試料、標準ピッチ試料等が市販されている¹⁸⁾¹⁹⁾。これらは、それぞれ nm~ μ m オーダの 2 次元格子状試料、孤立ラインパターン試料、一次元ラインパターン試料であり、シリコンや石英などの基板上に干渉露光技術や電子線描画技術とエッチング技術を駆使して形成されている。標準試料には SI ト

図6 側壁形状測定方法

図7 探針変形補正による側壁形状測定方法 (a) CNT 探針先端の SEM 画像、(b) 探針の曲げ変形の補正、(c) 吸着によるオフセット量検出原理

レーサブルな校正値がつけられていて、これを定期的に SPM で測定し、装置パラメータか測定結果のいずれかの補正を行う。

3.3 高段差形状測定と探針

製造工程の管理に用いる AFM では平坦な試料に対する原子分解能ではなく、LSI の配線やゲート等の高段差パターンの形状・寸法を正確に測定することが重要である。このために、図 6 に示すようにさまざまな走査法や探針が開発されている。図 6 (a) では先端の広がったいわばラップ型の Si 製プローブを用いて、左右方向の力も感じながら走査を行うことで切り立った側壁形状を測定することができ、CD-AFM (CD: Critical Dimension (微細寸法)) と呼ばれて市販されている²⁰⁾。Si 製探針では強度が不足するため $\phi 50$ nm を切る探針は利用するのが難しいので、CNT (Carbon Nanotube) 製プローブも開発されている²¹⁾²²⁾。CNT はヤング率 1 TPa と高い剛性をもち、耐摩耗性も高いために探針としては理想的な材料である。図 6 (b) のようにこの探針を傾けつつ走査することで側壁形状を測定する技術も開発されている²³⁾。一方筆者らは図 7 (a) (b) のように CNT 探針を傾けずに用いて、探針が側壁から受けるファンデルワールス力による曲げ変形を補正することで、側壁形状を正確に測定する技術を開発している。探針の曲げ変形量に関しては、図 7 (c) に示すよう

(a) AFM 生プロファイル

(b) 探針の形状と変形を補正後のプロファイル

図8 探針変形補正例：アスペクト比2超の深溝形状（幅45 nm，深さ100 nm）が測定できている²⁴⁾

に，光でこの信号から得られるカンチレバーの捩れ量を用いて推定している²⁴⁾．本技術による測定例を図8に示す．このように，幅が45 nmで深さが100 nmの高アスペクト比形状の測定に成功している．使用したCNTは直径25 nm，長さ200 nm程度であった．サンプルとしては，産総研で開発されたSiとSiO₂の多層膜をエッチングしたSPM校正用試料を用いている．ただ，CNT探針はSi製探針の先端に一つ一つCNTを取り付ける必要があり，コストがかかるので，代わりにAr+スパッタを用いてφ20～30 nm程度のアモルファル状カーボン（CNF：Carbon Nanofiber）を多数のSiカンチレバーの先端に同時に成長させる技術²⁵⁾も製品化されている．

また，形状測定のためには探針の形状補正が不可欠であるが，ISOで標準化の作業が進んでいる²⁶⁾ことも特記しておく．

3.4 高スループット・自動測定

製造工程の管理には途中工程のワークを高い頻度で抜き出して検査する必要がある．このために産業向けSPMでは，スループット向上や自動化に工夫を凝らしている．ラボ用SPMでは測定開始前の探針アプローチという作業には，探針と試料が衝突しないようにゆっくり接近させるために，数分かかるのが普通であった．産業向けでは，光学センサーや画像焦点合わせ情報を用いて探針と試料の間隔を正確に見積もる等の工夫で，探針アプローチが数秒でできるように工夫されている．粗走査や光学顕微鏡の結果を用いて測定位置を自動で決定して精走査を行う機能も搭載されている．また，探針の自動交換機能も装備されており，探針の交換から光でレーザーの光軸調整まで自動化されている．半導体向けのSPMでは，さらにウェーハの自動交換機能も装備されているものが多い．

一方，HDD磁気ヘッド向けではワークを手でピンセットを用いて載せるのが普通であったが，磁気ヘッドが一列に並んだローバーを，トレイに並べて入れた状態で装置に装着すると，自動的にローバーを試料ステージに搭載し

て検査を行う装置も，筆者らは開発している．この装置ではMFMを用いて，磁気ヘッド1個あたり数秒での書き込み磁界幅の検査を実現している²⁷⁾．これによって，従来はローバーをヘッドに切り分けてHGA（Head Gimbal Assembly）と呼ばれるアームに組み付けてから，実際に記録メディアに読み書きを行わないと，良否が分からなかった磁気ヘッドの書き込み磁界の検査を，製造工程の早い段階で全数実施できるようになった．

4. 結 言

SPMは，先端デバイスの製造になくてはならないものとなってきている．今後，HDDでは熱アシスト記録（TAMR：Thermal Assisted Magnetic Recording）技術や，ナノバタンドメディアの導入，LSIではFin FET（Field Effect Transistor），MRAM（Magnetoresistive Random Access Memory）等の新デバイスの導入につれて，ますます不可欠な製造のツールとなってくることが期待される．

参 考 文 献

- 1) G. Binnig and H. Rohrer: Scanning Tunneling Microscopy, Surf. Sci, **126** (1983) 236.
- 2) G. Binnig, C.F. Quate, and Ch. Gerber: Atomic Scope Microscope, Phys. Rev. Lett., **56** (1986) 930.
- 3) Y. Martin and H.K. Wickramasinghe: Magnetic Imaging by "Force Microscopy" with 1000 Å Resolution, Appl. Phys. Lett., **50** (1987) 1455.
- 4) D.W. Pohl, W. Denk and M. Lanz: Optical Stethoscopy: Image Recording with Resolution $\lambda/20$, Appl. Phys. Lett., **44** (1984) 651.
- 5) D. Sarid: Scanning Probe Microscopy, Oxford University Press, (1991).
- 6) 森田清三：走査型プローブ顕微鏡 最新技術と未来予測，丸善，(2005)．
- 7) C. Shafai, D. Thomson, M. Simard-Normandin, G. Mattiussi and P.J. Scanlon: Delineation of Semiconductor Doping by Scanning Resistance Microscopy, Appl. Phys. Lett., **64**, 3 (1994) 342.
- 8) M.P. O'Boyle and H.K. Wickramasinghe: Kelvin Probe Force Microscopy, Appl. Phys. Lett., **58**, 25 (1991) 2921.

- 9) T. Ando, T. Uchihashi and N. Kodera : High-speed Atomic Force Microscopy, Jpn. J. Appl. Phys., **51** (2012) 08KA02.
- 10) Semiconductor Industry Association, International Technology Roadmap for Semiconductors, 2011 Edition, International SEMATECH, Austin, Texas, (2011).
- 11) 森恭一, Brian Rattray, 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.
- 12) J. Kwon, J. Hong, Y.-S. Kim, D.-Y. Lee, K. Lee, S. Lee and S. Park : Atomic Force Microscope with Improved Scan Accuracy, Scan Speed, and Optical Vision, Review of Sci. Instr., **74**, 10 (2003) 4378.
- 13) 馬場修一, 渡辺正浩, 中田俊彦, 樽沼透, 黒田浩史, 廣木武則 : 半導体検査用インライン AFM, LSI テスティングシンポジウム 2006 予稿集, (2006) 35.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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ー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 回応用物理学講演会, **70** (2010) 16a-P9-24.
- 18) VLSI standards, Inc : <http://www.vlsistandards.com/>
- 19) 三隅伊知子 : 幾何計測の標準試料, 精密工学会誌, **74**, 3 (2008) 222.
- 20) G. Dahlen, M. Osborn, H.-C. Liu, R. Jain, W. Foreman and J.R. Osborne : Critical Dimension AFM Tip Characterization and Image Reconstruction Applied to the 45-nm Node, Proc. SPIE, **6152** (2006) 61522R.
- 21) H. Dai, J.H. Hafner, A.G. Rinzler, D.T. Colbert and R.E. Smalley : Nanotubes as Nanoprobes in Scanning Probe Microscopy, Nature, **384** (1996) 147.
- 22) Y. Nakayama : Scanning Probe Microscopy Installed with Nanotube Probes and Nanotube Tweezers, Ultramicroscopy, **91**, 1 (2002) 49.
- 23) K. Murayama, S. Gonda, H. Koyanagi and T. Terasawa : Three-Dimensional Metrology with Side-wall Measurement Using Tilt-Scanning Operation in Digital Probing AFM, Proc. SPIE, **6152** (2006) 615216.
- 24) 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/Nanolith. MEMS, and MOEMS, **11**, 1 (2012) 011009.
- 25) M. Tanemura, M. Kitazawa, J. Tanaka, T. Okita, R. Ohta, L. Miao and S. Tanemura : Direct Growth of Single Carbon Nanofiber onto Tip of Scanning Probe Microscopy Induced by Ion Irradiation, Jpn. J. Appl. Phys., **45**, 3B (2006) 2004.
- 26) D. Fujita, H. Itoh, S. Ichimura and T. Kurosawa : Global Standardization of Scanning Probe Microscopy, Nanotechnology, **18**, 8 (2007) 084002.
- 27) 張開鋒, 廣瀬丈師, 渡辺正浩, 徳富照明 : 磁気力顕微鏡を応用した磁気ヘッド素子磁界幅検査技術の開発, 第 73 回応用物理学学会学術講演会, **73** (2012) 13p-H6-11.

渡辺正浩

1988 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修了, 同年(株)日立製作所入社。現在, 横浜研究所検査システム研究部主任研究員, 北海道大学大学院客員教授, 博士(工学), 光学・プローブ応用検査・計測技術の研究開発に従事。