

走査型プローブ顕微鏡による線幅標準に関する調査研究

菅原 健太郎*

(平成17年11月30日受理)

Survey on line-width standard with scanning probe microscopes

Kentaro SUGAWARA

1. はじめに

ナノ計測における線幅標準の重要性

半導体メーカーにとって、製品の歩留まりの向上や集積度の向上を追求することは、競合他社を抑えて利益を確保するために重要である。そのためには、最先端の製品開発技術を導入することもさることながら、加工工程における計測と評価が大きな役割を果たす(図1)。製品を検査(計測)し、所望の設計パターンが得られる最適な加工条件を探索し、加工工程の各種パラメータにフィードバックさせるのである。つまり、加工の条件出しをおこない、製品の質を維持・管理するのに計測技術は重要である。例えば、電子線描画によるリソグラフィでは、照射する電子線の量(照射線量)や描画速度などの最適条件の探索が、実際にできたパターンを計測することでおこなわれている。

線幅は基本的な計測対象である。これまで半導体産業の分野では、かの有名なムーアの法則に従ってシリコン(Si)半導体素子の微細化・高密度化が着実に進んできた(表1)(図2)。例えばここ10年間では、Siウェハ上に形成される回路の線幅は、1 μ mから0.1 μ m(～100nm)へと約10分の1にまで縮小化が実現された。さらに今後10年間、この調子で微細加工技術の進展が続くと、回路線幅

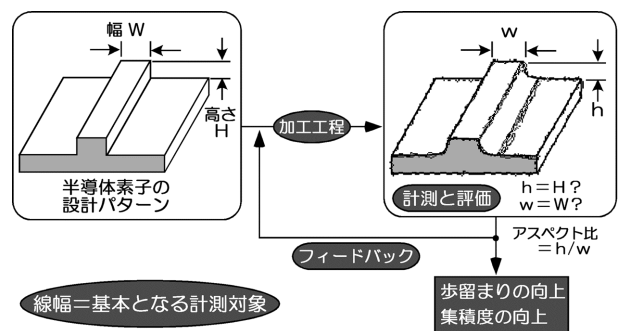


図1 半導体産業における計測¹⁾

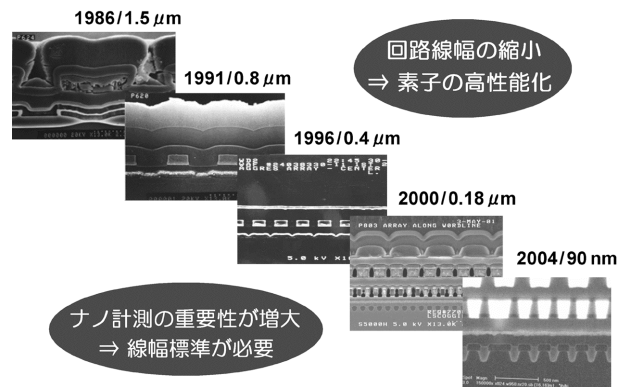


図2 半導体産業における微細加工技術の進展²⁾

表1 国際半導体技術ロードマップ (ITRS2003) より抜粋

年	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
回路線幅 (nm)		90			65			45
DRAM 1/2 pitch (nm)	100	90	80	70	65	57	50	45
最大アスペクト比/直径 (nm)	13/120	15/107	15/95	16/85	16/76	17/67	17/60	>20/50
寸法計測要求精度 孤立ライン 3 σ (nm)	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3

* 計測標準研究部門 長さ計測科

～10 nmというSiリソグラフィの限界に到達するという（先端分野では既にSiに置き換わる新規な配線材料の研究が開始されている）^{3),4)}。

産業界では線幅標準の供給に対する需要が高まっている。世界各地に点在する各半導体メーカの工場間で線幅標準試料が厳密に一致していなければ、半導体部品の流通や、完成した製品の輸出入などの経済活動に支障をきたす。例えば、100 nmの回路線幅に対して、半導体素子の動作特性を保証するために測定精度1%が要求されたとすると、原子数個（1 nm）の不確かさに相当する。

本稿では、従来の電子線や光による線幅標準の現状と、より微細な線幅標準の実現が期待されている走査型プローブ顕微鏡（Scanning probe microscope, SPM）について述べる。最後に、産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ/AIST）における線幅標準の確立への展望を述べる。

2. 従来の方式による線幅測定

2.1 電子線による線幅測定の現状と問題点

現在の半導体産業における製品管理プロセスでは、走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）を用いた検査（計測）が主流である⁵⁾⁻⁷⁾。しかし、SEMによる線幅の絶対測定は以下で述べるように困難と考えられ、絶対的な計測手法はいまだ確立していない。旧工業技術院計量研究所は昭和60年頃、民間企業10数社の協力の下‘マイクロパターンの計測に関する検討会’と題して半導体産業における線幅計測の動向調査を実施し、線幅試料の国内持ち回り試験をおこなってきたが、線幅標準の供給を実現するまでには至っていない⁴⁾。

図3は、SEMをもちいた線幅測定の概略図である。電子ビームを固定して、線幅試料を移動させると、線幅のエッジ領域で二次電子の信号強度が変化する。この図で白く見えるところがエッジに相当する。線幅は、このエッジの間隔をもって定義されるのだが、その定義の方法にいくつかあり（Peak to Peak法、閾値法、最大勾配法、直線近似法…）^{1), 5)}、半導体メーカによってまちまちである。問題は、実際の線幅形状と二次電子像とは1対1に対応しないことであり、二次電子信号はある程度の広がりを持つためSEMによる絶対値測定は困難である。また、半導体素子にはSi以外のさまざまな材料が使われており、

* 通常のSEM測定にもちいられる電子ビームは、数kVで加速された高エネルギーな電子の集団である。試料表面に入射した電子は、表面の構成元素との衝突・散乱を繰り返して膜厚方向に拡がっていき徐々にエネルギーを失っていく。二次電子は、その過程でたたき出されたものである。

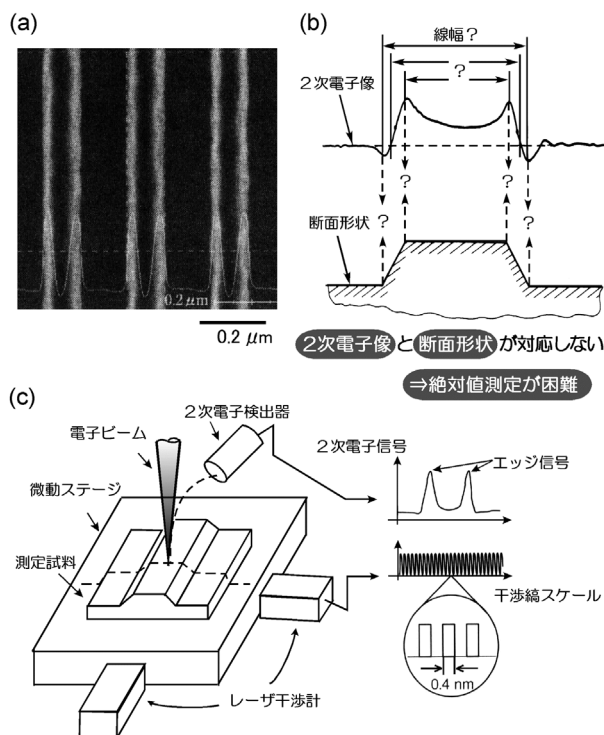


図3 電子ビーム方式（測長SEM）による線幅測定の原理^{1),5),8)}。
(a)線幅試料のSEM像、(b)断面プロファイル、(c)装置の模式図

二次電子の発生効率は元素ごとに異なる⁹⁾。そのため、複数の異種元素を含んだ多層構造を有する半導体素子では、像の解釈はさらに複雑なものとなり精密計測は困難である。

2.2 光による線幅測定の現状と問題点

基本的な測定原理は、電子線による線幅測定とほぼ同様である。図4に示すように電子線の代わりにレーザー光を照射し、ラインのエッジ領域からの信号強度変化を検出する。光の場合、反射光でもって計測する方法と透過光でもって計測する方法の2種類がある。

光による測定では、光の回折限界により計測可能な最小線幅が光の半波長程度（～100 nm）に制限される。光スポットサイズ ϕ は次式で表される。

$$\phi = k \lambda / NA$$

（ k ：比例係数、 λ ：波長、 NA ：レンズ開口数）すなわちレーザー波長やレンズのNA値などによって分解能は制限され、そのため光スポットサイズよりも小さな線幅の測定は不可能である。

分解能の向上のためには、短波長のレーザーをもちいることや高NAのレンズなどで光学系を組む方法が考えられる。しかし、紫外域のレーザーはレンズなどでの光吸収が無視できなくなり、既存の透過型の光学系が使えなくなる。近年、共焦点レーザー顕微鏡と液浸法⁹⁾の組み合わせによる分解能の向上が検討されている。

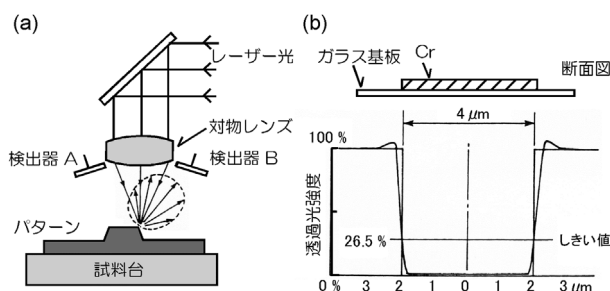


図4 光プローブ方式による線幅測定原理¹⁾.
(a)散乱型, (b)透過型

表2 線幅標準の校正範囲と不確かさ (光プローブ方式)¹⁰⁾.
NISTとPTBは、不確かさの長さの項の記載が不明.

	校正範囲	不確かさ ($k = 2$)
NIST (米国)	0.5–30 μm	37 nm
NPL (英国)	0.3–200 μm	(30 + 0.001L) nm
PTB (ドイツ)	0.5–400 μm	20 nm

2.3 線幅標準供給の現状

現在のところ、線幅の標準供給をおこなっているのは、NIST (国立標準研究所, 米), NPL (物理学研究所, 英国), PTB (物理工学研究所, ドイツ) の3機関のみであり、校正方法は3機関とも光プローブ方式である(表2)¹⁰⁾. 国際半導体技術ロードマップによると、線幅 ~ 100 nmで測定精度 ~ 1 nmの厳しい条件が求められている(表1). 現状では、線幅の標準供給の校正範囲とその不確かさは、半導体産業界における要請からは程遠く、かなり立ち遅れている印象は否めない.

3. 走査型プローブ顕微鏡による線幅測定

3.1 走査型プローブ顕微鏡

近年、ナノテクノロジーという言葉が浸透しているが、その研究の場において広く使われている一連の顕微鏡群が、走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope, SPM) である¹¹⁾. 基本の動作原理は、鋭く尖った探針 (プローブ) *で試料の表面上をなぞる (走査する) ことで表面を描き出すという単純なものである. 分解能は探針先端と試料表面との物理 (化学) 的な相互作用が働く領域の広がりによって決定される. SPMの中で、走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope, STM) と原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) は、理想的な

* AFMのプローブは、探針 (tip) と片持ち梁 (カンチレバー, cantilever) から構成される. そのため、ここでは探針にプローブとして定義する.

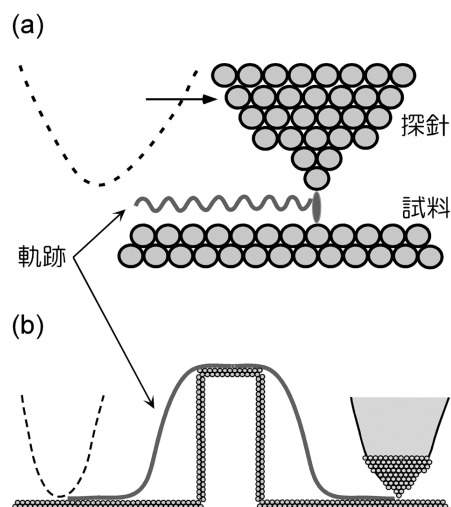


図5 探針の軌跡. (a)原子凹凸 (○は原子を表す), (b)ナノ凹凸構造

環境 (原子レベルで平坦な清浄表面が出現している試料) の下では、原子分解能が達成される (図5(a)). STMは、トンネルギャップ (~ 1 nm) を介して、探針先端原子とその最近接に位置する表面原子間を電子がトンネルすることで流れるトンネル電流 ($\sim \text{nA}$) を検出することで、表面を描き出す. 一方のAFMは、探針先端と試料表面との間 (~ 0.1 nm) に働く原子間力 ($\sim \text{nN}$) を検出することで、表面の凹凸像が得られる.

メトロロジー (計測学) の分野では、この高分解能を有するSPMを精密計測にもちいる研究が、精力的におこなわれてきた^{8), 12)}. STMは計測できる対象が導電性試料に制限されるため、絶縁体表面も観察可能なAFM研究が主流となっている. ところが、ナノメートルの凹凸をもつ表面の精密計測をおこなう場合、次のような問題が生じる.

3.2 走査型プローブ顕微鏡による線幅測定の問題点

ナノ凹凸をもつ構造体のSPM表面観察では、図5(b)に示すように、真の表面形状と探針先端形状の畳み込み積分の結果として横方向に広がった凹凸像となる^{8), 12)}. 探針先端形状が畳み込まれたSPM像の例として、基板上にねかせて配置したカーボンナノチューブ (CNT) の観察が報告されている¹³⁾. CNTは、直径 ~ 10 nm (単層では1–2 nm) の細長い形状をした炭素同素体であるが、もちいる探針によってはその直径が2倍も大きく観察される.

半導体素子のパターンの凹凸は、数100 nm (アスペクト比で10以上) に及ぶ. 高アスペクト比をもつ回路線幅を計測する場合には、畳み込みの効果が顕著となる. さらに複雑に入り組んだパターンでは、探針が細部まで入り込めなくなり、イメージング不可能となる.

3.3 線幅計測用のプローブ技術

AFMをもちいて、何とかして高アスペクト比をもつ構造体を精密測定できないだろうか？これまでに、いくつかの方法が提案されてきた（図6）。

例えばHosakaらは、図6(a)のようなプローブ走査方法（ステップインモード）を報告している¹⁴⁾。まず、探針を真下に降ろして試料表面に接触させる。次に、その接触点で探針を真上に十分な距離だけ引き上げて、ある決まった距離だけ横方向に移動させる。再び探針を真下に降ろして表面に接触させる。そして、再び探針を真上に引き上げて横方向に移動させる。以上の繰り返しで、接触点の軌跡より表面形状を得る。この特殊モード対応のAFMは現在市販されており、以下の3つの特徴が挙げられる。①ステップインモードでは、一般的なラスタ走査では困難な、傾斜面や深い穴底を描き出すことが可能。②探針の走査方向に依存したエッジの立ち上がりや立ち下りでの非対称性が皆無（通常のラスタ走査では、データ間隔が不均等となって非対称性が現れやすい）。③さらに、接触点では縦方向の力しか働かないため（横方向の摩擦力はほぼゼロ）、探針先端・試料表面の磨耗・損傷が軽減されて高分解能を長時間維持。反面、プローブは走査中にダイナミックな上下移動を繰り返すために、サブnmでの探針の精密位置決めが困難となる欠点がある。

カーボンナノチューブ（CNT）は発見された当初から、SPM探針への応用が検討されてきた（図6(b)）¹⁵⁾。なぜなら、その先端の曲率半径はきわめて小さく（最小～1 nm）¹⁶⁾、非常に高分解能な像が得られる可能性があるためである。また、その長さは1～10 μmと細長く、高アスペクト比な構造体の計測に適した理想形状を有する^{17), 18)}。現在、CNTプローブは実用化され、各社から市販されている。しかし、CNTプローブには主に2つの問題点がある。1つは一般的なシリコン製プローブは半導体産業における成熟したエッチング技術をもちいて個体差がなく大量生産されるのに対し、CNTプローブは一つ一つ接着して作製されることが多く接着されたCNTの径や長さ、角度のば

らつきが大きく個体差がある。また、CNTは曲がりやすく高速な走査が困難である欠点がある。現在、CNTプローブの作製コストを低減するため、個体差の少ない大量生産法が模索されている¹⁹⁾。

ブーツ型の探針をもちいて、構造体の垂直側壁をも計測可能とする手法がある（図6(c)）²⁰⁾。線幅の精密計測には、側壁（サイドウォール）の観察が必要であるため、半導体製造現場で近年広く用いられている（ここでブーツ底部の直径を線幅標準試料で事前に求めておく必要がある）。しかし、側壁走査のためにもう1軸、つまりX軸（あるいはY軸）方向へのフィードバックがさらに必要となる。そのため、一般のZ軸制御しか対応しないAFM装置では、このブーツ型探針を使いこなすことはできない。ブーツ型探針に対応したAFM装置は、世界的な大手SPMメーカーであるVeeco社が産業界向けに販売している。

以上は計測手段・装置の改良によって線幅計測をおこなう方法であったが、数学的な手法を採用することも考えられる。それは、探針先端形状の畳み込み効果の除去である。前節でも触れたように、プローブ顕微鏡による像は、真の形状と探針先端形状の畳み込み積分（コンボリューション）の結果として、次式で書き表すことができる。

得られた像 $f(x) = \text{真の形状}(g(x)) * \text{探針先端形状}(h(x))$

そこで、別の手段により探針先端形状 $h(x)$ を求めて既知なものとし、得られた像 $f(x)$ をデコンボリューションして、未知なる真の形状 $g(x)$ を求める方法が考えられてきた²¹⁾⁻²⁵⁾。ここで探針先端形状を計測するための高精度な試料（キャラクタライザー）が必要であるという問題点がある²¹⁾。現在、探針先端形状評価用試料の一つとして剣山状試料が開発され解析ソフトとともに市販されている¹⁸⁾。一方、キャラクタライザーを使用せずに、直接AFM像から探針先端形状を評価する方法もある^{23), 24)}。なお、畳み込みの効果をしる限り低減するために、 $h(x)$ がデルタ関数に近い形状の探針を用いることは、デコンボリューションの精度向上に寄与する。

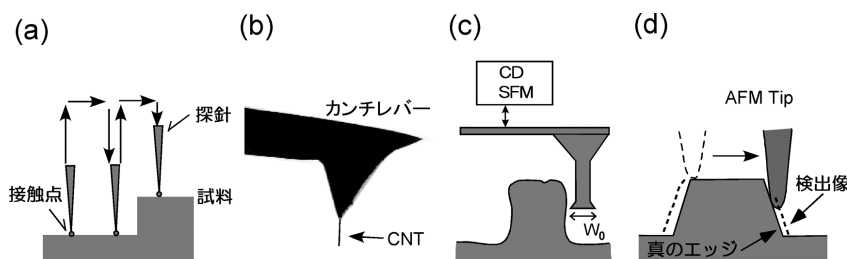


図6 線幅計測用のプローブ技術 (a)ステップインモード¹⁴⁾, (b)カーボンナノチューブ¹⁵⁾, (c)ブーツ型探針²⁰⁾, (d)先端形状のたたみ込み効果の除去²¹⁾⁻²⁵⁾

4. 各国標準研究所のSPM

ここでは、NMIJ、NIST、PTBのナノ精密計測SPMを概観する。

・NMIJ

NMIJは、XYZに高分解能レーザ干渉計を搭載したAFM(測長AFM及び差動式測長AFM)²⁶⁾を開発し、一次元回折格子のピッチ及び段差の校正サービスを行っている。レーザ干渉計の理論分解能はいずれも約40 pmである。走査範囲は、測長AFMが17.5 μm×17.5 μm×2.5 μm、差動式測長AFMが100 μm×100 μm×12 μmである。XY軸のレーザ干渉計信号でサーボをかけXY微動ステージの位置を制御する。またZ軸スキャナの移動距離もレーザ干渉計で測定しているため実時間で表面形状(長さ)の絶対値測定が可能である。差動式測長AFMは、XYZ軸のレーザ干渉計光源として、ヨウ素安定化He-NeレーザにオフセットロックさせたHe-Neレーザを用いている。測定中、XYZ軸のレーザ干渉計の周波数(波長)は常に一定値となるようにフィードバックがかけられており、得られる像は直接長さ標準にトレーサブルである。また、両AFM装置は、XYZ軸の測長に3面一体型の移動鏡を採用しており、分離型の移動鏡と比較して測長の座標軸が最も安定である。

・NIST

NISTは、XYの二軸にレーザ干渉計を搭載したAFM(Calibrated AFM, C-AFM)²⁷⁾を保有している。Z軸の変位は、静電容量センサをもちいて検出する。XYZの3軸は、ヨウ素安定化He-Neレーザにトレーサブルである。これまで段差の標準試料開発に力を入れてきており、例えば単結晶Siの原子ステップ(0.3 nm)を段差試料とすることで、不確かさ8 pmが実現されている²⁸⁾。また、透過型電子顕微鏡(TEM)をもちいた線幅標準試料の開発もおこなっている²⁹⁾。最小線幅40 nmで不確かさは約1.5 nmであるという。

他に走査範囲50 mm角で不確かさ1 nmを目指したSTM(Molecular Measuring Machine, M³)³⁰⁾がある。超高真空環境での動作に対応している。

・PTB

PTBは、XYZ三軸にレーザ干渉計を搭載したAFM(Large Range Scanning Force Microscope, LR-SFM)³¹⁾を保有している。市販のAFM装置を改良したものであり、走査領域が25 mm×25 mm×5 mmと広範なのが特徴である。なお、一世代前のAFM装置には、走査範囲が70 μm×

15 μm×15 μmで分解能がそれぞれ1.25 nm, 0.25 nm, 0.25 nmのものがある。

5. 線幅標準の供給へ向けた展望

物理標準の整備計画に基づき2007年度までに0.1-5 μmの線幅標準の供給を開始する。今後の展望として短期(2007年度)と、中・長期(2010年度)に分けられる。短期では、国家計量標準機関の間で行われる国際比較に参加して校正能力を証明し、校正サービスを開始することである。中・長期では、線幅標準試料の校正能力の向上を図り、標準試料の開発、値付け、配布をすることである。

5.1 短期

ナノメトロロジーの国際比較のうちNMIJが測長AFMを用いて参加したもの又は参加予定のものを表3に示す。一次元(1D)回折格子(NANO4)、段差(NANO2)が完了し、2005年11月現在、二次元(2D)回折格子のNMIJでの測定及び報告書送付が終了したところである。線幅は最後に残った国際比較である。その開始日は未定であるが、NMIJは測長AFM、電子顕微鏡(SEM)、光学式の3つの測定手段で参加する予定である。国際比較に用いられる線幅試料は、NISTから供給されているフォトマスク用標準試料(SRM 475)となる予定である。

AFMでは、CNTプローブを用いた線幅測定を検討している。CNTプローブを用いた各種の形状観察^{17), 18)}(さらには微細加工)³²⁾の報告は既にあり、通常のSi製プローブに比べてよい結果(傾斜角がより鋭敏に測定可能、より微細なSPMリソグラフィが可能)が得られる。しかし、実際に測定に使用すると、解決しなければならない問題が次第に明らかになってきた³³⁾。

CNTプローブは非常に細長い形状のため、硬いSi製プローブに比べ、測定可能なAFM走査条件がより厳しい。試料表面へのアプローチ時や走査中に曲がりや起こりやすく、また、急な凸段差が走査方向に対して存在すると、その側壁に引き寄せられて根元から曲がる。また、探針先端と試料表面はお互いに力学的な力を及ぼしあって、測定中に弾性変形している可能性がある。探針の位置制御をおこなうフィードバック系には、より微小な力(〜fN)の高精度検出・制御が望まれる³⁴⁾。

走査中の磨耗によって、CNT先端(キャップ)の開きが問題となるおそれがある(ナノチューブ先端は合成時には閉じて成長する)。通常、Si探針の先端は逆円錐型であり、磨耗によって徐々に先端の曲率半径が大きくなる

表3 ナノメトロロジー国際比較

標準	幹事研究機関	測定量	参加機関数	状況
NANO1 (線幅)	NIST (アメリカ) 未定	線幅 0.9 μm –10.8 μm	9	未開始
NANO2 (段差)	PTB (ドイツ) (2000.9–2002.7)	段差 7, 20, 70, 300, 800 nm	14	終了
NANO4 (1D回折格子)	METAS (スイス) (1999.2–2000.6)	ピッチ 300, 700 nm	10	終了
NANO5 (2D回折格子)	DFM (デンマーク) (2005.1–)	X,Yピッチ, X-Y直交度 300 \times 300, 1000 \times 1000 nm	9	継続中

が、CNTプローブは、均一な筒状形状のために、磨耗しても先端曲率が一定に保たれる。そのため、CNTは高分解能が維持されて長寿命との説明がなされているが、この磨耗による影響がサブnmオーダーの精密測定にどう出るのかは未知である。

ナノメトロロジーへのCNTプローブの適用の可否をめぐっては、基礎実験データを蓄積して線幅算出をおこない、その不確かさ評価を早急におこなう必要がある。

5.2 中・長期

校正能力の向上のためには、線幅の全側壁をどうやって測るかが開発課題である。フォトマスク試料 (SRM 475) のように側壁が比較的なだらかな場合とは異なり、実際の半導体素子はほとんど垂直に近い構造を有する。どのような方法で、垂直側壁をプロービングすればよいのか？解決の糸口として次の2点が現時点で考えられる。ひとつは、線幅測定に適した探針の開発、ふたつは、傾斜プローブ機構を有する新規の測長AFM開発である。

①線幅測定に適した探針とは？さまざまな形状をしたSPM探針が存在する。ナノ精密計測のためには、当然ながら、プローブの先端曲率は十分に小さいことが望まれる。これは、探針先端が触っていない領域、つまりデータの得られなかった領域の形状は、どのような手法（数学的处理、画像操作）を施しても知ることはできないということ。ブーツ型の探針はそのひとつの解であったが、他の解も考えられる。集束イオンビーム (Focused Ion Beam, FIB) をもちいたリソグラフィ技術³⁵⁾は、現在3次元ナノ構造の作製手法として絶大なインパクトを与えている。二つ又、三つ又の形状を有する探針など、任意形状の探針が作成可能であり、‘コロンプスの卵’的な発想が浮かばないだろうか。

②探針を斜めに傾けて走査することで、側壁をプロービングする斬新な方法が考えられている。そして、このアイデアの具体化、傾斜プローブ機構を有する新規の測長AFMが開発段階にある。これまでの既存のSPM走査方

法の概念を壊すものであり（探針制御は面に対して垂直ではない）、様々な周辺技術の整備（プローブ測定技術、データ処理方法…）が必要とされる。

線幅標準試料の校正技術の向上だけでなく線幅標準試料の開発、配布も重要である。線幅標準試料として次の3つの仕様が要求される。1つ目は、側壁のラフネスが小さいことが挙げられる。これは、場所による線幅のばらつきが十分小さく、不確かさが小さな標準試料の供給につながる。2つ目は、SEMで測定が可能なこと、つまり高アスペクト比で垂直側壁を有しSEMでコントラストが鮮明な像が得られることが挙げられる。これは、メインユーザとして想定される半導体産業では、主にSEMによる製造プロセスの管理がおこなわれているためである。3つ目は、標準試料として大気中で安定であり、経時変化が少ないことが挙げられる。校正された線幅標準試料の経時変化が顕著であると線幅標準試料を標準器としている校正システムの維持が困難となる。そこで、試料の材質には、既に酸化して大気中で安定状態となっている酸化化合物材料が最適であると考えられる。現在、透明導電性酸化化合物材料の研究分野において、エピ膜の成膜技術が確立されている状況にある³⁶⁾。

6. まとめ

線幅標準の重要性を述べ、電子線や光による線幅計測の現状と問題点について触れた。現在、標準供給をおこなっているのは光学測定をもちいた3機関のみであり、その校正範囲は最小線幅0.3 μm 、不確かさ20 nmである。

AFMによる精密測定の問題点と、その解決手段について述べた。ナノ凹凸の測定で問題となるのは、探針先端形状の畳み込みの効果である。数学的な手法（デコンボリューション）や、CNTプローブをもちいることで、より真の形状に近い像が得られることを述べた。

最後に、NMIJでのAFM装置による標準供給のシナリオと、将来展望について述べた。短期（2007年）では、国

際比較NANO1にて校正能力を証明し、線幅の校正サービスを開始することである。そして、中・長期（2010年）ではさらなる校正能力の向上を図り、線幅標準試料の開発・配布を手がけることである。

謝辞

本調査研究をおこなうにあたり、調査課題を与えてくださった高辻利之室長、ご指導を頂いた権太聡主任研究員、三隅伊知子研究員、佐藤理研究員、有益なご助言を頂いた土井琢磨主任研究員、幾何標準研究室の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 谷村吉久, 豊田幸司, 初沢 毅: 標準マイクロパターンの計測に関する調査研究 (計量研究所, 1988) .
- 2) <http://www.intel.com/technology/silicon/flash.htm>
- 3) J. V. Barth, G. Costantini and K. Kern: Engineering atomic and molecular nanostructures at surfaces, *Nature* **437** (2005) 671–679.
- 4) H. Sakaguchi, H. Matsumura, H. Gong and A. M. Abouelwafa: Direct visualization of the formation of single-molecule conjugated copolymers, *Science* **310** (2005) 1002–1006.
- 5) 中山義則: 電子ビームによる半導体パターン計測, 精密工学会誌 **68** (2002) 342–344.
- 6) 宮本敦, 田中麻紀, 諸熊秀俊, 瀬戸口勝美: 測長SEMによるビームチルト角キャリブレーション技術の開発, 精密工学会誌 **71** (2005) 1173–1177.
- 7) A. Yamaguchi, H. Fukuda, H. Kawada and T. Iizumi: Impact of long-edge roughness (LER) on accuracy in critical dimension (CD) measurement and new guideline for CD metrology, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 5575–5580.
- 8) 初澤毅, 豊田幸司, 谷村吉久: マイクロパターン絶対測長装置の開発, 計測自動制御学会論文集**26** (1990) 983–988.
- 9) 大和壮一: 液浸リソグラフィ技術, 応用物理 **74** (2005) 1192–1195.
- 10) <http://www.bipm.org>
- 11) 日本表面科学会編: ナノテクノロジーのための走査プローブ顕微鏡 (丸善, 2002) .
- 12) J. E. Griffith and D. A. Grigg: Dimensional metrology with scanning probe microscopes, *J. Appl. Phys.* **74** (1993) R83–R109.
- 13) N. Choi, T. Uchihashi, H. Nishijima, T. Ishida, W. Mizutani, S. Akita, Y. Nakayama, M. Ishikawa and H. Tokumoto: Atomic force microscopy of single-walled carbon nanotubes using carbon nanotube tip, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) 3707–3710.
- 14) T. Morimoto, H. Kuroda, Y. Minomoto, Y. Nagano, Y. Kembo and S. Hosaka: Atomic force microscopy for high aspect ratio structure metrology, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (2002) 4238–4241.
- 15) H. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzler, D. T. Colbert and R. E. Smalley: Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature* **384** (1996) 147–150.
- 16) S. S. Wong, A. T. Woolley, T. W. Odom, J.-L. Huang, P. Kim, D. V. Vezenov and C. M. Lieber: Single-walled carbon nanotube probes for high-resolution nanostructure imaging, *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 3465–3467.
- 17) C. V. Nguyen, R. M. D. Stevens, J. Barber, J. Han, M. Meyyappan, M. I. Sanchez, C. Larson and W. D. Hinsberg: Carbon nanotube scanning probe for profiling of deep-ultraviolet and 193 nm photoresist patterns, *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 901–903.
- 18) 安武正敏: 走査型プローブ顕微鏡を用いたナノメーターオーダーの計測, 計測と制御 **38** (1999) 769–775.
- 19) E. Yenilmez, Q. Wang, R. J. Chen, D. Wang and H. Dai: Wafer scale production of carbon nanotube scanning probe tips for atomic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 2225–2227.
- 20) Y. Martin and H. K. Wickramasinghe: Toward accurate metrology with scanning force microscopes, *J. Vac. Sci. Technol. B* **13** (1995) 2335–2339.
- 21) U. Hübner, W. Morgenroth, H. G. Meyer, T. Sulzbach, B. Brendel and W. Mirandé: Downwards to metrology in nanoscale: determination of the AFM tip shape with well-known sharp-edged calibration structures, *Appl. Phys. A* **76** (2003) 913–917.
- 22) P. Markiewicz and M. C. Goh: Simulation of atomic force microscope tip-sample / sample-tip reconstruction, *J. Vac. Sci. Technol. B* **13** (1995) 1115–1118.
- 23) H.-Y. Nie, M. J. Walzak and N. S. McIntyre: Use of biaxially oriented polypropylene film for evaluating and cleaning contaminated atomic force microscopy probe tips: An application to blind tip reconstruction, *Rev. Sci. Instrum.* **73** (2002) 3831–3836.

- 24) A. Rothschild, S. R. Cohen and R. Tenne: WS₂ nanotubes as tips in scanning probe microscopy, *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999) 4025–4027.
- 25) J. E. Castle and P. A. Zhdan: Characterization of surface topography by SEM and SFM: problems and solutions, *J. Phys. D* **30** (1997) 722–740.
- 26) I. Misumi, S. Gonda, Q. Huang, T. Keem, T. Kurosawa, A. Fujii, N. Hisata, T. Yamagishi, H. Fujimoto, K. Enjoji, S. Aya and H. Sumitani: Sub-hundred nanometre pitch measurements using an AFM with differential laser interferometers for designing usable lateral scales, *Meas. Sci. Technol.* **16** (2005) 2080–2090.
- 27) <http://www.mel.nist.gov/div821/webdocs-14/821-14.htm>
- 28) N. G. Orji, R. G. Dixon, J. Fu and T. V. Vorburger: Traceable pico-meter level step height metrology, *Wear* **257** (2004) 1264–1269.
- 29) http://www.nist.gov/public_affairs/releases/atom_rulers.htm
- 30) K.-J. Lan, J.-Y. Yen and J. A. Kramar: Sliding mode control for active vibration isolation of a long range scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.* **75** (2004) 4367–4373.
- 31) http://www.ptb.de/en/org/5/_index.htm
- 32) A. Okazaki, S. Akita, H. Nishijima and Y. Nakayama: Nanolithography of organic polysilane films using carbon nanotube tips, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) 3744–3746.
- 33) M. C. Strus, A. Raman, C.-S. Han and C. V. Nguyen: Imaging artifacts in atomic force microscopy with carbon nanotube tips, *Nanotechnology* **16** (2005) 2482–2492.
- 34) S. Hosaka, D. Terauchi, H. Sone, T. Morimoto, Y. Kembo and H. Koyanagi: Highly precise atomic force microscope measurement of high-aspect nanostructure free of probe bending error, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) 3572–3575.
- 35) 松井真二：収束イオンビームによる三次元ナノテクノロジーの展開, *応用物理* **73** (2004) 445–454.
- 36) K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono: Thin-film transistor fabricated in single-crystalline transparent oxide semiconductor, *Science* **300** (2003) 1269–1272.