

三次元ナノ構造の寸法・形状計測技術に関する調査研究

木津良祐*

(平成 28 年 1 月 25 日受理)

A survey on dimensions and shape measurement techniques of 3D nano structures

Ryosuke KIZU

Abstract

The nano structures on semiconductor devices have evolved from two-dimension into three-dimension in recent years. The linewidth is the most basic parameter of 3D nano structures of semiconductor devices and used for dimension-control in manufacturing. This report reviews typical measurement techniques for dimensions or shape of 3D nano structures, especially linewidth. A pilot study of interlaboratory comparison of linewidth measurement carried out among the National Metrology Institutes including NMIJ is introduced. At the end, linewidth calibration service provided by NMIJ and future prospect of dimensions and shape measurement techniques of 3D nano structures are discussed.

1. 緒言

ナノテクノロジーは物質をナノメートルのスケールで扱う技術であり、材料開発、製造、医療など様々な分野に応用されている。21世紀初頭から、米国をはじめとした各国はナノテクノロジーを国家規模のプロジェクトとして戦略的に推進し始めた¹⁾。日本においては、第2期(2001~2005年度)および第3期科学技術基本計画(2006~2010年度)の重要推進4分野の一つに指定されて国家規模のプロジェクトが推進された。文部科学省では、ナノテクノロジー総合支援プロジェクト(2002-2006年度)、ナノテクノロジー・ネットワーク(2007-2011年度)、ナノテクノロジープラットフォーム(2012-2021年度)といったプログラムによって、ナノテクノロジーの拠点・共用施設の形成を推進している²⁾。経済産業省ではナノ計測基盤技術(2001-2007年度)、ナノテク・先端部材実用化研究開発プロジェクト(2005-2010年度)といったプログラムによって、ナノテクノロジーの基盤

技術の構築と産業技術への展開を推進している^{3),4)}。

ナノテクノロジーを推進するための基盤技術として、ナノスケールで現象や構造の観察をするための計測技術(ナノ計測)が求められる。ナノ計測には形状計測、電気特性計測、元素分析など様々あるが、本調査ではナノメートルオーダーの幾何計測、特に三次元ナノ構造の寸法・形状計測を対象とした。

三次元ナノ構造の寸法・形状計測が最も求められているのは半導体産業である。MPU(Micro-Processing Unit)、DRAM(Dynamic Random Access Memory)、NANDフラッシュメモリといった半導体素子はトランジスタの微細化、高集積化によって性能が向上してきた。FinFET(MPU等に使われるトランジスタの種類)の最小線幅は現在10nm以下⁵⁾であり、国際半導体技術ロードマップ2013⁶⁾によると表1に示すように2022年にはFinFETの最小線幅が6.0nmまで縮小すると予想されている。また、DRAM 1/2 pitch, Fin 1/2 pitch, Fin線幅などの縮小化も今後進み、それに伴い線幅や線幅ラフネスといったパラメータの計測要求も高まっていくことが予想されている。

*工学計測標準研究部門ナノスケール標準研究グループ

本調査研究では、半導体素子の製造プロセスなどで必要となる寸法・形状計測について調査した。2章では、半導体素子の寸法管理、近年の半導体素子構造の三次元化とそれに伴う形状評価パラメータの増加について述べる。3章では、半導体素子などで作製される三次元ナノ構造の代表的な寸法・形状計測技術について述べる。4章では、三次元ナノ構造の寸法管理で必要となる線幅の計測技術として主に原子間力顕微鏡を用いた技術について述べる。5章では、産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ/AIST)⁷⁾の線幅標準供給と今後の展望について述べる。

2. 半導体素子の寸法管理

2.1 従来の二次元構造の寸法管理

半導体素子には光リソグラフィ技術などの微細加工技術によって多数の微小なトランジスタが作製されており、それは図1に示すような二次元構造をしている。Siウエハ表面近傍には不純物ドーピング等が施されソースとドレインが形成される。Siウエハ上にはソースドレイン間の電流を制御するゲートが形成される。「二次元」というのは、トランジスタ動作に必要な要素の多くがSiウエハ表面近傍にあるためであり、三次元構造が素子性能にとって重要となるトランジスタと対比してこのように呼ばれる。一般的にトランジスタの集積度が高いほど素子性能が高く、二次元構造の半導体素子はゲ-

ト間隔などのパラメータを指標として微細化と高集積化が進められてきた。

半導体製造現場における品質管理プロセスでは、ゲート間隔等の回路パターン寸法計測が必須であり、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) や OCD (Optical Critical Dimension)、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) といった計測技術を用いる。これらの計測技術は倍率校正用の標準試料を利用することでスケール校正や信頼性の担保が可能である。代表的な標準試料には図2に示すような一次元回折格子⁸⁾があり、そのピッチはNMIJ (National Metrology Institute of Japan) のような国家計量標準機関 (National Metrology Institute: NMI) や校正事業者によって長さの国家標準にトレーサブルに校正される。

2.2 半導体素子構造の三次元化

二次元構造の半導体素子は「ムーアの法則」に従って40年以上にわたり微細化が進んできた。しかしながら、二次元構造トランジスタは物理的限界によって微細化に限界が見えてきた。限界を破るための新たな素子構造として、2000年頃から研究されてきた三次元構造トランジスタが近年実用化されてきた^{5), 9)}。図3にFinFETと呼ばれる代表的な三次元構造トランジスタを示す。FinFETではSiウエハ上に形成されたFinの中を電流が流れ、電流はFinを覆う様に形成されたゲートによって

表1 国際半導体技術ロードマップ2013より抜粋⁶⁾

年	2013	2016	2019	2022	2025
DRAM 1/2 pitch (nm)	28	22	17	13	10
FinFET Fin 1/2 pitch (nm)	30.0	21.3	15.0	10.6	7.5
FinFET Fin線幅 (nm)	8.0	7.0	7.0	6.0	6.0
孤立線幅寸法計測不確かさ 3σ (nm)	0.42	0.32	0.24	0.18	0.14
線幅ラフネス計測不確かさ 3σ (nm)	0.32	0.25	0.19	0.14	0.11

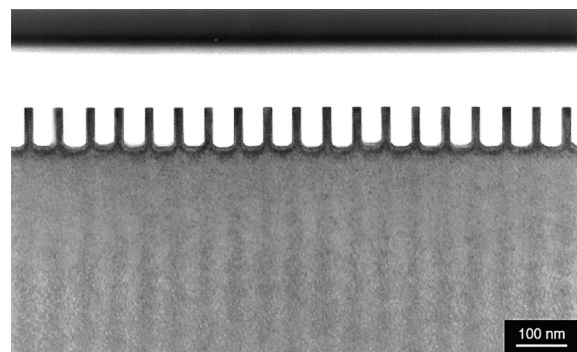


図2 一次元回折格子 (60 nm ピッチ)⁸⁾

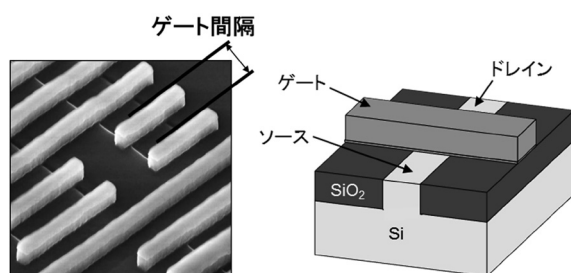


図1 二次元構造の半導体素子⁵⁾ (筆者加筆)

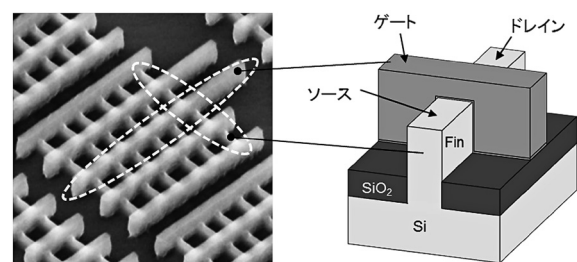


図3 FinFET⁵⁾ (筆者加筆)

制御される。

トランジスタが三次元構造になったことで、半導体製造現場の品質管理に必要なパラメータが二次元構造の場合より増加した。それは、微細加工技術によって形成される Fin やゲートの三次元形状によって FinFET の性能が決まるからである。図4に示すように Fin の主な形状評価パラメータには線幅（もしくは Critical Dimension: CD）、ラインエッジラフネス（Line Edge Roughness: LER）、線幅ラフネス（Line Width Roughness: LWR）、高さ、側壁角、上部角の曲率半径（Top Corner Rounding: TCR）、側壁ラフネス、裾引き（footing）等がある¹⁰⁾。これらの中でも特に、Fin の最も基本的な形状パラメータである線幅や素子性能に大きく影響する LER、LWR の計測技術が重要である。線幅とは、フォトマスク基板上や Si ウエハ上に形成された矩形断面をもつラインパターンの幅の寸法を指す。LER とは、直線で設計、加工されたはずのラインパターンのエッジの直線からのゆらぎを表す。LER はリソグラフィによる微細加工においてレジスト材料やエッチングプロセスに起因して発生する。LWR はラインパターンの左右の LER により生じる線幅のゆらぎのことである。LWR が大きいと、FinFET が動作する際の電気特性がばらついたり、線幅が小さい箇所でもリーク電流が流れたりする問題が知られている¹¹⁾。

2.3 半導体製造プロセス現場での計測装置の校正

半導体素子の製造現場では様々な形状評価パラメータを計測して製造条件にフィードバックすることで精度の高い製造プロセスを実現する。現在の CD 計測では、定期的に各プロセスから特別に選別された“Golden”ウエハを標準試料として用い、“Golden”ウエハと製造プロセスで処理されたウエハとを比較測定することで、製

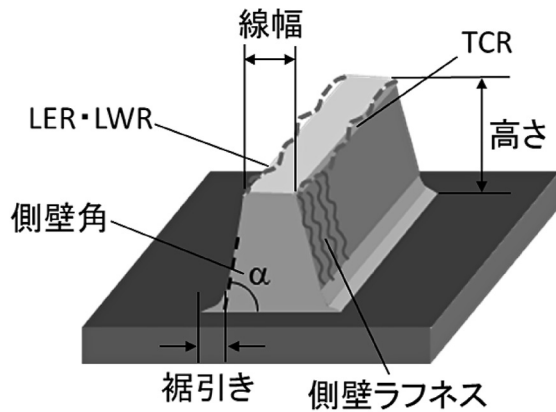


図4 Fin の形状評価パラメータ

造プロセスの「再現精度」は確保されている¹²⁾。しかしながら、この手法では計測値の「正確さ」はわからないため製造プロセス間や計測装置間に存在するバイアスを埋めることはできないし、“Golden”ウエハを定期的に交換すると製造現場の環境変化、経年的な装置の変化（劣化）を知ることはできない。微細化が進むにつれてこのバイアスに起因した計測の不確かさは無視できなくなっていき、歩留りの悪化につながる。このバイアスは製造プロセス間や工場間、企業間での計測結果の差となるため、日常的に製造現場で「正確な」標準試料を用いて校正を行う必要がある。

この問題に対して、製造プロセスを代表する一組の標準試料（全ての製造プロセス・計測装置に対応した計測対象を含む、校正がなされたウエハのセット）を用いる手法が提唱されている⁶⁾。各形状パラメータの絶対値がわかっている一組の標準試料を日常的に製造現場で用いると、各計測装置のもつ計測バイアスがわかり校正が可能になると考えられる。

3. 三次元ナノ構造の寸法・形状計測技術

本章では図5に示すような半導体三次元ナノ構造を対象とした計測技術を挙げ、その概要を特に寸法・形状の計測・観察の観点から述べていく。三次元ナノ構造の寸法・形状の計測・観察技術の多くは試料の表面形状を対象とした技術である。半導体素子においても、高精度な寸法計測が重要となるナノ構造は表面近傍にだけ有しているものが多い。一方、今後は積層型 NAND フラッシュメモリのようなナノ構造の積層化技術も進展していくと考えられる。本章では、はじめに試料表面上の三次元ナノ構造の計測技術について挙げ、次に三次元ナノ構造を有する試料の内部構造を観察する計測技術についても挙げる。

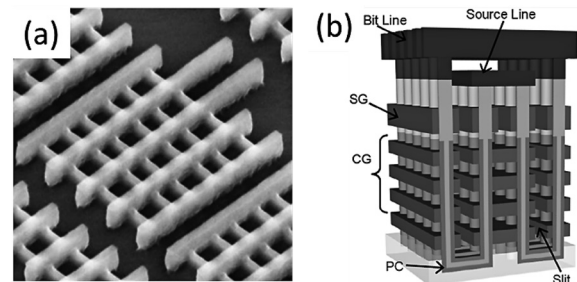


図5 半導体三次元ナノ構造 (a) FinFET⁵⁾ (b) 積層型 NAND フラッシュメモリ⁹⁾

3.1 試料表面上の三次元ナノ構造の計測

本章で挙げる寸法・形状計測技術には主に SEM, AFM のような実体観察法と OCD のようなシミュレーションを利用する技術がある。シミュレーションの利用によって、実体観察法では測定できない膜厚なども含めた多くのパラメータが計測可能となる。注意すべき点は、シミュレーションを利用する場合は信頼性の高い物理モデルが必要であることと、結果の信頼性担保のために形状が既知の標準試料を別に測定する必要があることである。また、パラメータ数が多いとシミュレーションが複雑になり計算コストが増加する。

3.1.1 走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM)

SEM では、真空中において数百 V から 30 kV 程度の加速電圧で加速された電子を試料上に集束し、その電子スポットを試料上で走査する。そのとき発生する二次電子、反射電子、特性 X 線などを検出することで試料の様々な情報を得ることができ、像観察では二次電子が用いられる。また、半導体素子の品質管理プロセスでは、それに特化した CD-SEM (測長 SEM)^{14),15)} が使用される。

SEM の利点は広い視野での実体観察が可能、試料平行方向がシングルナノスケールの高い分解能、複雑な形状も容易に観察可能といった点である。欠点は、垂直方向の定量計測は困難、試料への電子線ダメージがあるといった点である。

SEM はその拡大倍率範囲 (数十～数百万倍) の広さとスループットの高さから、半導体素子の品質管理プロセスにおいて最も広く使用されている。CD 計測の他にも例えば、SEM 画像から回路パターンの輪郭形状を検出し、設計形状と比較することで欠陥を同定できる¹⁶⁾。

一方、集束した電子ビームのスポットサイズはシングルナノスケールであるものの、ナノ構造の絶対寸法計測は困難である。その理由は、寸法計測を行うためには二次電子信号の強度から試料形状のエッジ位置を定義する必要があるが、二次電子の発生強度は図 6 に示すように試料構造のエッジ部分や傾斜がある部分で強くなったり¹⁷⁾、試料の元素の種類によって強度が異なったりすることに起因し、適切なエッジ位置の定義方法が困難で二次電子像と実際の形状が 1 対 1 に対応しないためである。この課題に対して、二次電子信号の波形生成物理モデルを利用したシミュレーションによりエッジ位置の決定を行う方法が研究されている¹⁸⁾。

3.1.2 ヘリウムイオン顕微鏡 (Helium Ion Microscope: HIM)

1 章で述べたように、現在最小の線幅は 10 nm 以下と

なっており、一般的な SEM では空間分解能が不十分である。近年、電子線プローブの代わりにヘリウムイオンビームをプローブとして利用する HIM が研究、実用化されている^{19),20)}。HIM の基本原理は SEM と同じであり、SEM が電子線を使用するのに対して HIM ではヘリウムイオンビームを使用する。

ヘリウムイオンビームを使用すると、回折が小さい、二次電子を放出させる領域 (表面相互作用領域) が狭いといった理由で電子線に比べて数十倍の高い分解能がある²¹⁾。また、HIM は SEM に比べ焦点深度が深くコントラストが付きやすいため、より複雑なナノ構造観察に適している。図 7 に SEM 及び HIM で観察したラインパターンの像と二次電子信号波形を示す。このように HIM では SEM よりも明瞭なコントラストのエッジが得られる¹⁹⁾。さらに SEM では問題となるチャージアップも、HIM の場合は正のイオンであるため電子銃を利用することで中和できる。一方、SEM の電子線ダメージ同様に HIM にもイオンによるダメージがあることに注意が必要である。

3.1.3 原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM)

AFM にはコンタクトモード、ダイナミックモードなどと呼ばれる主に二つの測定モードがあり、それらは原子間力の検知方法が異なる^{22),23)}。ここでは、現在最も広く使われているダイナミックモードの内、さらに振幅変調モードと呼ばれる測定モードについて述べる。図 8 に AFM の測定原理図を示す²⁴⁾。現在最も広く使われている振幅変調モードでは、先端が鋭く上がった探針を有す

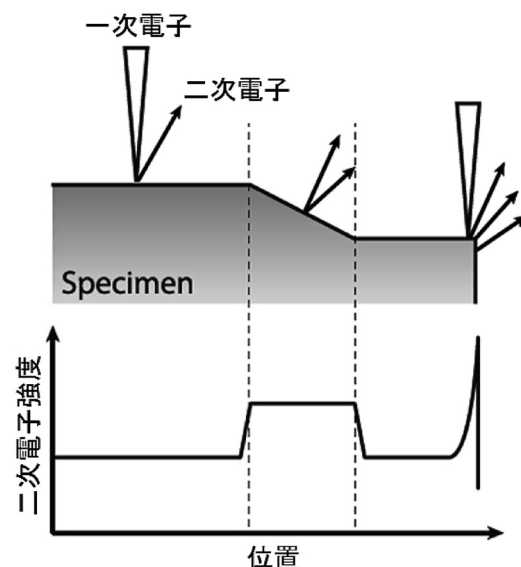


図 6 試料形状と二次電子信号¹⁷⁾ (筆者加筆)

るカンチレバーをピエゾ素子によりその共振周波数付近で振動させる。そして、探針を位置サーボ制御によって移動させて試料表面に近づける。このとき、探針と試料表面の間に働く原子間力によってカンチレバーの振動振幅が変化するため、これが一定になるように探針の高さ(Z)を制御しながらラスタ走査(X, Y)して探針の位置座標を記録していくと、それが試料表面の形状となる。

AFMの利点は三次元でサブナノスケールの高分解能な実体観察が可能、試料材質の選択幅が広い、表面ラフネスが測定可能、非破壊計測といった点である。欠点は探針が届かない箇所は測定不可能、探針形状が測定結果に畳み込まれ実際の形状よりも膨張させられるコンボリューション問題、低スループットといった点である。

コンボリューション問題に対して、測定結果から探針形状を除去して真の形状を得るデコンボリューションが研究されているが、測定中の探針摩擦による探針形状変化や探針形状を取得する方法の不完全性により高精度なデコンボリューションは困難である²⁵⁾⁻²⁸⁾。

また、AFMは空間分解能の高さからナノ構造の寸法計測で利用されているが、SEM、OCDに比べ低スループットであるため、これらの計測機器ほどは産業用として広く使われてはいない。ただし、産業向けのAFM装置^{24), 29)}では探針交換等の測定準備、光学顕微鏡観察による測定位置の決定、ウエハ交換などの自動化により高スループット化されている。

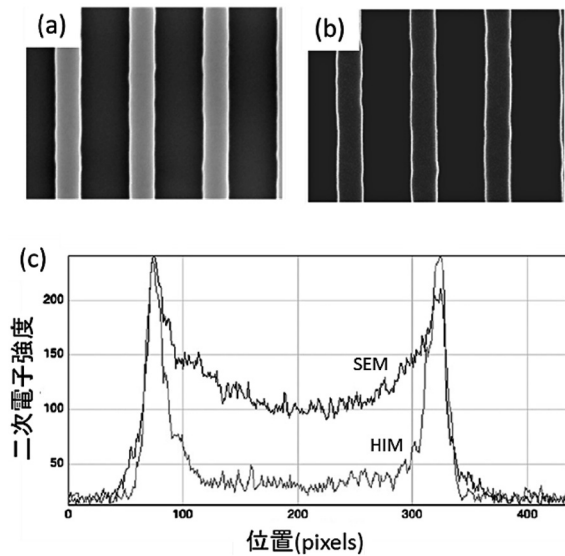


図7 Siラインパターン観察¹⁹⁾(筆者加筆) (a) SEM (b) HIM (c) 二次電子信号波形の比較

3.1.4 OCD (Optical Critical Dimension)

OCDは光回折を利用したCD計測でありスキヤトロメトリとも呼ばれている。図9にOCDの測定原理図を示す。OCDはウエハ上に形成された次元回折格子のような繰り返しパターンに対して使用される。光を試料表面に対して微小角度で入射し、得られた反射回折光を分光、検出することでパターン形状により異なる分光波形が得られる。繰り返しパターンのピッチはこの実験波形から求めることができる。また、実験結果とシミュレーションライブラリとを比較することで、パターン形状の寸法、高さ、角度、膜厚といった様々なパラメータを求めることができる。その場合、まず始めにナノ構造のモデルを作成して様々な計測パラメータを設定する。次に各パラメータを少しずつ変えながらシミュレーションを繰り返して、分光波形のシミュレーションライブラリを作成する。そして実験で得られた分光波形と比較してよく一致するものをライブラリから決定し、そこから各パラメータが決定できる。

OCDの利点は高スループット、高再現性、非破壊計測、といった点である。欠点は、測定可能な対象が繰り返しパターンであり孤立ラインの測定には適さず、繰り返しパターンでも数マイクロメートル以上の入射ビーム

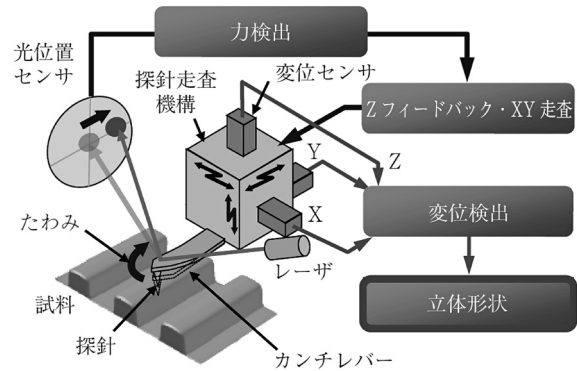


図8 AFMの測定原理²⁴⁾

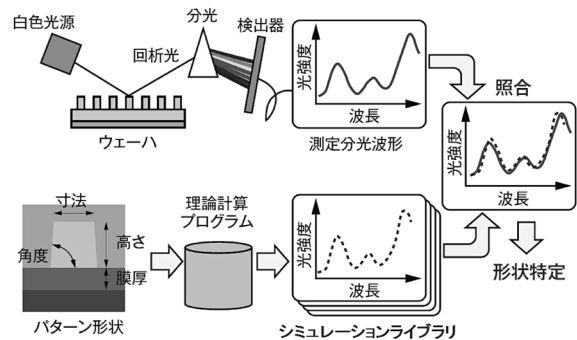


図9 OCDの測定原理³⁰⁾

スポットサイズ内での平均情報となる点である。また、分解能はライブラリ作成時の形状モデルのパラメータ数とその刻み幅の細かさに依存し、分解能を上げるためには膨大な計算が必要となる³¹⁾。

OCD は様々な計測技術の中で最も高速であり、かつ、装置が安価であるため、半導体製造プロセスで微細加工の処理前後にインライン測定を行い、プロセスのモニタのためによく用いられている。また、トレンチホールや複雑な三次元構造の計測も可能であるが、その場合は数値解析が複雑となってライブラリ作成に時間がかかるため数値解析手法の最適化と高速化が課題になる。

3.1.5 微小角入射 X 線小角散乱 (Grazing Incidence-Small Angle X-ray Scattering: GI-SAXS)

GI-SAXS は OCD と同様に測定対象は繰り返しパターンであり、試料表面に対して X 線を微小角度で入射する。X 線はパターン形状の構造体の内部で散乱されて干渉する。その散乱回折光の角度分布パターンと事前に作成したシミュレーションライブラリを比較して測定パラメータを求める。

GI-SAXS の特徴の多くは OCD と同様であるが、X 線の波長は 10 nm 以下と非常に短いため高い分解能が期待できる¹⁰⁾。一方、構造体への X 線進入深さは散乱波の強度減衰により 100 nm 程度が限界であるため、それ以上の高さをもつ構造の計測には制限がある³²⁾。また、X 線散乱強度は構造体の電子密度に依存しているため、電子密度の差が小さい物質は区別できない。

大型放射光施設ではなく実験室サイズの X 線発生装置を用いる場合、現時点では GI-SAXS は研究段階であり、ピッチなどの一部のパラメータを除き測定能力は高くない。実験室サイズの GI-SAXS が三次元ナノ構造の様々なパラメータを高精度に測定可能となるためには、高輝度・高強度な小型 X 線源が必要である³³⁾。

3.1.6 スルー焦点走査光学顕微鏡 (Through-focus Scanning Optical Microscope: TSOM)

TSOM は光学顕微鏡による実験結果とシミュレーションライブラリとの比較から、三次元ナノ構造のパラメータを求める手法である³⁴⁾。図 10 に TSOM の測定原理図を示す。一般的な光学顕微鏡では最も焦点が合った位置の像を取得しているが、その空間分解能は光の回折限界により光の半波長程度であるためナノ構造の観察には適さない。しかしながら、焦点がずれた像にも試料構造の情報が含まれており、TSOM はこの情報を利用することで試料構造パラメータをナノスケール精度で計測する。

TSOM ではまず、図 10 (a) のように光学顕微鏡の光

軸方向に試料を移動させながら連続的に光学顕微鏡像を取得し、各測定点の光強度から図 10 (b) のような像面に垂直な面内の強度分布 (TSOM 像) を作成する。そして、それと TSOM 像のシミュレーションライブラリとの比較からパラメータを決定する。

TSOM の利点は使用する装置が光学顕微鏡であり測定システムが簡単で安価、高スループットといった点であり、半導体製造プロセスでインライン計測としての利用が期待されている。また、FinFET のパラメータ計測³⁴⁾を代表として、他にも TSV (Through Silicon Via) のパラメータ計測³⁵⁾、EUV マスク³⁶⁾の欠陥検査、ナノ粒子の数³⁷⁾といった様々な測定対象への利用が期待されている。一方、TSOM は近年研究が始められたばかりであり測定対象も単純な構造のみであるため、複雑な構造の測定や産業用計測機器としての実用化にはさらなる実験的検証が求められる。

3.2 試料内部の三次元ナノ構造の計測

ここでは (S)TEM (透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM) もしくは走査型透過電子顕

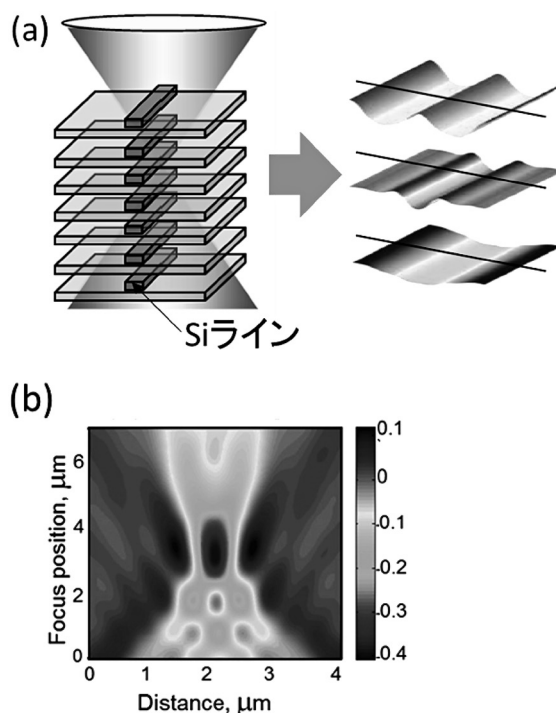


図 10 TSOM の測定原理³⁴⁾⁻³⁷⁾ (筆者加筆) (a) 光学顕微鏡の焦点に対して試料を上下に移動させて各測定点での光強度を記録 (b) TSOM 像を作成し、TSOM 像のシミュレーションライブラリと比較してパラメータを決定

微鏡 (Scanning Transmission Electron Microscope: STEM), 電子線 CT (Computed Tomography), FIB (Focused Ion Beam)-SEM, X線 CT の 4 種類の計測技術を挙げる。(S)TEM はナノ構造の断面像 (二次元像) を得る手法であるが, 試料内部のナノ構造観察で最もよく用いられるため, 本章では他の三つの三次元内部計測技術と共に挙げる。測定分解能の高い方から, かつ測定可能な試料サイズが小さい方から順に並べると (S)TEM, 電子線 CT, FIB-SEM, X線 CT である。

3.2.1 (S)TEM

TEM では真空中において平行電子線を薄片試料に照射して透過電子をレンズで拡大した試料像を取得する。透過した電子は試料の結晶構造を反映した回折像を含んでいるため, 結晶中の転位や積層欠陥の観察が可能である。一方 STEM は, SEM 同様に電子線を試料上に集束し, その電子スポットを試料上で走査して透過電子を結像する。高角度散乱電子を環状の検出器で検出する高角度散乱暗視野 (High Angle Annular Dark Field: HAADF)-STEM では, 原子番号の 2 乗に比例した像 (Z コントラスト像) となるため試料の組成情報が得られる³⁸⁾。ただし, (S)TEM では測定試料が厚い場合は透過できる電子が減って測定できないため, 数十 nm 以下に薄片化する必要がある。電子の最大加速電圧は市販装置の場合 200 kV や 300 kV, 学術研究用の高いものでは 1000 kV と SEM に比べ非常に高い。加速電圧が高いほど電子線の波長が短く高分解能となり, 透過能も高いためより厚い試料の観察も可能となる^{14), 39)}。市販装置でも分解能の高いものでは 0.1 nm 以下であり原子像観察が可能である。

3.2.2 電子線 CT

電子線 CT は (S)TEM を用いた三次元トモグラフィーであり, 光軸に対する試料の傾きを少しずつ変えながら連続的に撮った二次元の透過像から三次元像を再構成する。三次元像はボクセルとして数値化されているため, 任意の箇所の情報を抽出できる。再構成の空間分解能や像質は, それぞれの透過像の空間分解能, 試料傾斜角度範囲, 回転角度刻みの細かさに依存する。

電子線 CT の利点はサブナノスケールの高分解能で三次元観察が可能である点である。近年は原子分解能をもつ電子線 CT の研究が行われており, グラフェン⁴⁰⁾や金ナノ粒子⁴¹⁾の三次元原子分解能像が得られている。一方, 欠点は (S)TEM 観察のために試料の薄片化が必要な破壊計測, 測定値の定量化が困難, 測定時間がかかるといった点である。定量的な三次元再構成を行うためには最大傾斜角度を高くする必要があり, 一般的な $\pm 60^\circ$ 傾斜で

は再構成したとき測定値に大きな誤差が生じる⁴²⁾。測定時間については, 連続的な二次元像の取得の際に試料の中心軸をとらえてその軸の周りに回転させることが難しく, 毎回焦点を合わせる作業が必要となるため長くかかってしまう。近年はリアルタイム電子線 CT の実現に向けて, 二次元像撮影時間の短縮, 三次元再構成の計算時間の短縮方法や必要となる二次元像の数を減らす方法が研究されている⁴³⁾。

3.2.3 FIB (Focused Ion Beam) -SEM

FIB-SEM による三次元構造観察法はシリアルセクションニングの一つである。FIB にはスパッタリング効果があり半導体や金属など様々な材料の微細加工ができる。試料平行方向から FIB を入射して試料最表面を加工した後に垂直方向から SEM 観察を行うという操作を繰り返すと, 得られた複数の二次元像から三次元構造を構築することができる。FIB には Ga イオンビームがよく用いられ, 現在その加工分解能は最高で 5 nm 程度である^{14), 39)}。FIB-SEM の利用により, 図 11 に示す積層型 NAND フラッシュメモリのような二次元ナノ構造を積層した三次元ナノ構造の計測が可能である⁴⁴⁾。

FIB-SEM の利点は, 再構成された三次元構造から任意の断面を抽出することができるため立体的な解析が可能である点である。また, FIB-SEM は電子線 CT では観察できないマイクロメートルオーダーの比較的大きな試料もシングルナノオーダーの分解能で観察可能であり, 試料の薄片化の手間もない。欠点は破壊計測であるため一度測定した試料の再測定は不可能な点と, イオンビーム

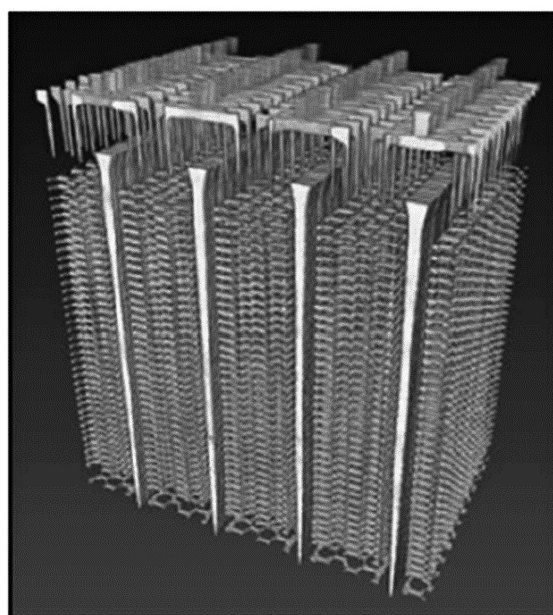


図 11 積層型 NAND フラッシュメモリの三次元像⁴⁴⁾

による物理的もしくは熱的な加工ダメージやイオン残留がある点である⁴⁵⁾。

3.2.4 X線 CT

X線の波長は短いため透過能が高く、X線 CTは試料内部の三次元ナノ構造を観察する手法の中で現在唯一非破壊計測が可能であり、ウエハ内部に埋め込まれたナノ構造の高分解能三次元観察の可能性をもつ。X線 CTは電子線 CTと同様に様々な角度から試料に対してX線を入射し、試料の材質や密度の違いによるX線の吸収係数の差から得られる複数の透過像を再構成して三次元像を得る。

十分に高い強度をもつX線源はほとんど放射光施設のものに限定されるため高分解能な商業レベル装置は製作が難しい。Carl Zeiss社は唯一、研究室規模の装置でありながら100 nm以下の高分解能をもつX線 CTを製造しており、その最高分解能は50 nmである⁴⁶⁾。X線 CTの分解能や測定時間といった測定性能の向上には、研究室規模のX線源の強度向上が必須である。

3.3 各計測技術の特徴のまとめ

3.1.で挙げた計測技術のうち、SEM、OCD、AFMは研究開発が長年行われており半導体産業の製造現場でも利用されている。製造現場ではインライン計測のニーズが高く、形状観察や製造プロセスの異常を発見するモニタの役割はスループットの高いSEMやOCDが適している。一方、絶対寸法計測の点ではAFMが最も適している。それは、三次元で高分解能であることに加え、実体観察法であるため長さの国家標準へのトレーサビリティがとりやすいからである。HIM、GI-SAXS、TSOMについては、比較的新しい技術であるため産業での実用化には課題が残っていたり信頼性のさらなる検証が必要であったりするが、これらは今後の半導体素子の微細化に対応し得る技術として有望であり、さらなる発展が期待される。HIMはSEMよりも高分解能であるため、今後普及して研究が進めばSEMと置き換わる可能性をもっている。GI-SAXSは原理的には高分解能かつ多くの形状評価パラメータが一度に計測可能である。TSOMはスループットが高く装置が安価であるためインライン計測に適している。

試料内部の三次元ナノ構造観察については、今後も進展するナノ構造の積層化に対応するために3.2.で挙げた計測技術のニーズがより高まっていくと考えられる。(S)TEMと電子線CTは原子像が観察できるほど高分解能である。FIB-SEMによる三次元観察では(S)TEMのような試料準備が不要であるため比較的スループットが

高く、さらなる高分解能化が望まれる。X線CTは唯一の非破壊計測であるがナノスケールの観点では分解能は低く、高分解能化にはX線源の強度向上が必須である。

ここでは述べなかったが、いくつかの計測技術は寸法・形状の計測・観察のためだけではなく機能が複合化されており、電気特性、元素分析、構造解析などの計測も可能である。

4. 半導体素子の形状評価パラメータの絶対寸法計測技術

半導体素子メーカーにとって製品の歩留り向上は重要であり、そのためには製品を設計通りに製造する必要がある。そのため、加工工程においてインラインで寸法・形状計測を行いその結果を各加工パラメータにフィードバックする。2章で述べたように、インライン計測機器のスケール校正、信頼性の担保のためには絶対寸法が既知の標準試料が必要となる。よって、標準試料は長さの国家標準にトレーサブルに校正される必要がある。

各国NMIは、標準試料に対して国家標準にトレーサブルで小さな不確かさで校正を行うための測長AFMを開発している^{47), 48)}。AFMを用いる理由は、AFMが三次元でサブナノスケールの高分解能を持つ、非破壊計測、実体観察法であるため長さの国家標準にトレーサブルな計測に適している、といった利点をもつためである。線幅の絶対寸法計測においても、標準試料の校正の観点からみるとAFMが最適と考えられる。一方、破壊計測であるものの(S)TEMを用いると非常に小さな不確かさで線幅計測が可能であり、AFMと相補的な利用が考えられる。

本章では、三次元ナノ構造の半導体素子で最も基本的なパラメータである線幅の計測課題、各国NMIやAFM装置メーカーなどによるいくつかの線幅計測技術、線幅計測の予備基幹比較、線幅以外のパラメータの計測について述べる。最後にナノスケール寸法・形状計測の今後の課題について述べる。

4.1 従来の線幅計測の問題点

マイクロメートルオーダーより小さな線幅標準試料には代表的なものとして、図12に示すようなSi基板を異方性エッチングにより加工したほぼ垂直な側壁をもつSiラインパターンがある^{49), 50)}。

従来の線幅測定ではSEM、光学顕微鏡、AFMが用いられていたが、いずれの方法もナノスケールでの絶対寸法計測は困難である⁵¹⁾。SEMの場合は3.1.1.で述べたようにラインエッジの決定が困難であるのに加え、小さ

な線幅のラインパターンの場合にはエッジ効果による左右の二次電子信号のピークが重なり合ってしまう問題によりさらに難しくなる。光学顕微鏡の場合は光の回折限界により分解能が光の半波長程度しかないためナノスケール計測は難しい。AFMにおいても、三次元で高分解能であるものの、AFMの探針が試料表面に対して垂直にアプローチする原理上、図13に示すようにある程度の開き角を持つ探針の先端が垂直に立ち上がったラインの側壁に届かない。また、測定結果に探針形状が含まれるコンボリューション問題もある。一次元回折格子の場合には絶対寸法計測ではなく周期的なラインパターンのピッチ測定を行っていたため、コンボリューション問題を無視しても1 nm以下の小さな不確かさでピッチ測定が可能⁸⁾であったが、線幅測定は絶対寸法計測であるため高精度なデコンボリューションが必要となる。一般的なAFMの原子間力の検知方向は垂直方向のみであり、探針が届かず検知できない側壁の三次元形状は測定結果に含まれないため、デコンボリューションは不可能である。

4.2 近年の線幅計測技術

一般的なAFMでは線幅計測は困難であるものの、AFMは標準試料の校正に適した計測技術であるため積

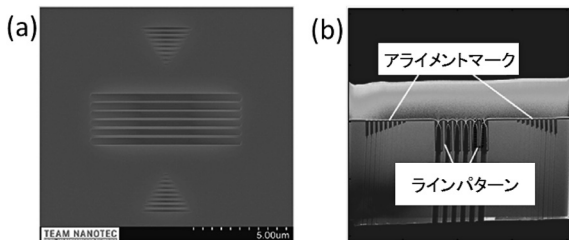


図12 Si線幅標準試料 (IVPS100-PTB)⁴⁹⁾ (筆者加筆)
(a) 表面SEM像 (b) 断面TEM像

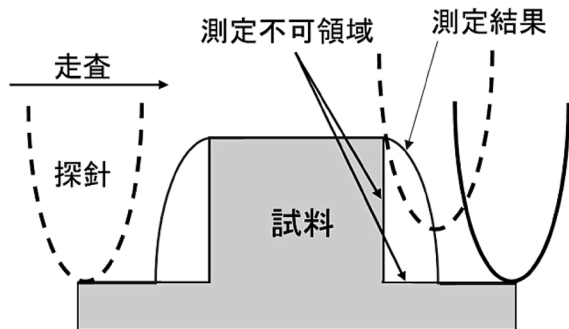


図13 一般的なAFM計測では探針の影響で垂直側壁形状は測定できない

極的にAFMによる線幅計測技術が研究開発されている。また、(S)TEMを用いた線幅計測では、破壊的計測かつ局所的な線幅計測になるもののサブナノスケールの不確かさが実現している。本節では、代表的な線幅計測技術としてフレア形状探針AFM、傾斜探針AFM、CNT探針AFM、(S)TEMを利用した方法を挙げていく。

4.2.1 フレア形状探針AFM

フレア形状探針AFMは、図14に示すようにフレア形状探針と呼ばれるAFM探針を用いて、一般的な試料垂直方向のみならず平行方向の原子間力も検出することで側壁形状を測定する技術である^{52), 53)}。フレア形状探針は一般的な垂直方向のみの原子間力を検知するAFMでは使用できず、平行方向の原子間力検知機能をもつAFM装置が必要である。

一般的なAFM探針は先端に向かうにつれ鋭くなり先端曲率半径は2~20 nm程度であるのに対し、フレア形状探針は先端部分が末広がりになっており、その幅は最小でも15 nm、大きなものでは100 nm以上である^{54), 55)}。よって、線幅を求めるためには探針幅の寸法を高精度で求めて補正する必要がある。また、探針先端が比較的大きく細かい凹凸へ探針が入り込めないため表面粗さ計測の分解能は低くなる。また、垂直方向の原子間力検知ではフレア形状の底面が大きな面であるため不安定になりやすいと考えられる。

NIST (米国NMI) と PTB (独国NMI) では図15に

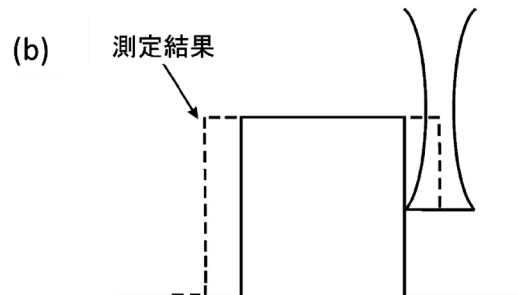
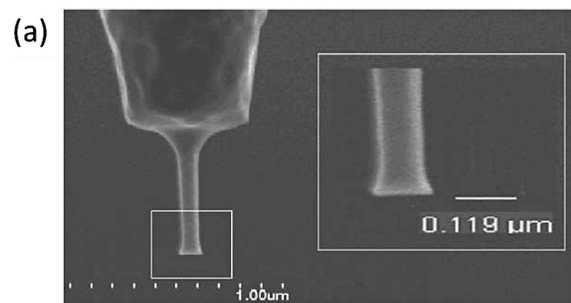


図14 (a) フレア形状探針 (b) フレア形状探針による線幅測定⁵³⁾ (筆者加筆)

示すような手法で線幅試料の校正を行っている^{49), 56)}。
 (1) 2つの線幅試料を用意し、それぞれを同じフレア形状探針を用いて同じ条件で線幅測定する。(2) 一方の線幅試料を、4.2.4. で述べる (S)TEM 測定によってサブナノスケールで線幅測定する。(3) AFM, (S)TEM それぞれによる線幅測定結果から実効探針幅を求める。(4) もう一方の線幅試料の測定結果から (3) で求めた探針の幅を引き、その線幅試料に校正値を付与する。このようにしてナノスケールの不確かさの線幅標準試料が得られる。この手法では主に、(1) AFM 測定の再現性、(2) (S)TEM による線幅の絶対寸法計測、(3) 高次の探針効果 (Higher order tip effect) の補正、といったことが不確かさを低減するために重要となる。

(1) については PTB が VAP (Vector Approach Probing) 法^{57), 58)}を開発している。一般的な AFM では試料表面近傍を探針がなぞるような走査をする。一方 VAP 法では、図 16 に示すように探針が試料に触れると一度探針を十分な距離だけ離し、次の測定点付近へ移動してからまた触れるという探針走査を行う。VAP 法により AFM の課題の一つである探針摩耗は抑えられ、同一箇所の繰り返し測定をしたとき最大値と最小値の差は 1 nm よりも小さく、良い測定再現性が得られている。

(2) については、4.2.4. で述べるように高分解能 (S)TEM で Si 原子をカウントし、Si 格子間隔をもとにして線幅を高精度に求める。このとき線幅試料の材料である単結晶 Si の表面に形成されるアモルファスの酸化 Si 層と、その上に (S)TEM 試料作製時に形成されるカーボン層との境界を決定する必要がある。PTB では (S)TEM 像から各層の信号強度を決定してその中間値を境界と定義している。各層の境界位置の曖昧さは (S)TEM による線幅測定における主な不確かさ要因となるため、各層の信号強度が高いコントラストをもつことが望ましい。

(3) は、フレア形状探針の形状や振動に起因する実効

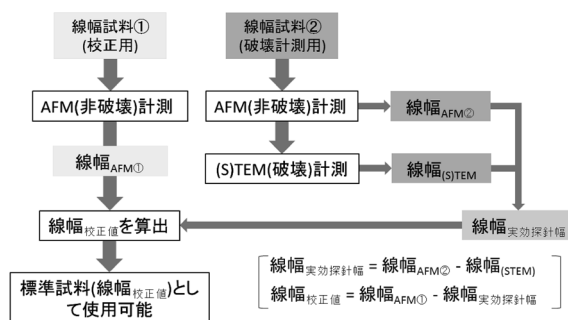


図 15 NIST および PTB の線幅校正システム

探針幅の変動のことを指す。例えば、測定試料の側壁角度依存性がある。フレア形状探針と側壁との原子間力は、フレア形状の最も幅の広い箇所 (リッジ) で検出される。しかしながらリッジは有限の丸みをもつため、フォトマスク基板上 Cr パターンなどの傾斜角度が付いた側壁を走査する場合は、その角度からフレア探針の実効探針幅を補正する必要がある^{59), 60)}。

フレア形状探針 AFM は、AFM による線幅計測技術としては最も研究が進んでおり、半導体産業用検査装置として実用化されている。3.1.3. で述べたように、AFM は SEM や OCD と比べスループットが低いものの、産業用では高スループット化されている。BRUKER 社製のフレア形状探針を用いた最新の CD-AFM⁶¹⁾は、次世代の 450 mm ウエハに対応しており一般的な表面形状計測、欠陥検査、三次元ナノ構造の形状計測の他に、ウエハの平坦性も評価可能である。また、スケールは NIST が供給する米国の長さの国家標準にトレーサブルである。

4.2.2 傾斜探針 AFM

傾斜探針 AFM は、図 17 に示すように一般的な先端が鋭い AFM 探針を傾斜させてラインパターンの左右からの測定と、それらの結合によって三次元形状を求めることで線幅を計測する技術である⁶²⁾⁻⁶⁷⁾。

図 18 に一般的な AFM 探針を示す。傾斜探針 AFM では、カンチレバー長手方向を軸とするロール回転で探針を大きな角度で傾斜させると、ベース基板の肩が試料表面に接触してしまうため、使用するカンチレバーの構造

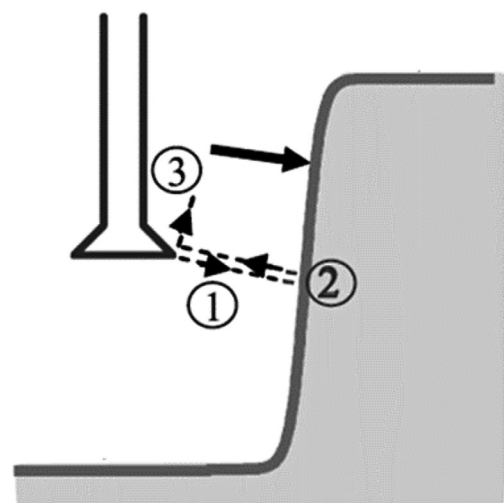


図 16 VAP 法⁵⁸⁾ (筆者加筆) ①探針を試料へ移動 ②探針が試料を検知してこのときの探針位置座標を形状データとして記録 ③探針を試料から離して次の測定点へ移動

と探針傾斜回転軸の設置角度に依存した傾斜角度で探針傾斜が制限される。この制限に起因してカンチレバーの傾斜角とラインパターンの垂直側壁がなす角が小さく探針と側壁の位置関係が平行に近い場合は、原子間力の検知が難しくなると考えられる。

また、探針を傾斜させる機構は一般的な AFM 装置よりも複雑になり、さらに、ラインパターンの左右から同時に測定するためには左右二つの探針傾斜機構を持つマルチプローブ技術が必要である^{62), 65)}。一方、探針傾斜機構を一つだけにして、ラインパターン片側から測定した後探針もしくは試料を回転させてもう一方の測定を行う方法や、探針の傾斜はせずに試料のみを傾斜させる方法も考えられる。これらの場合は、二度の測定で得られる左右からの測定結果を高精度に結合する技術が必要である⁶⁶⁾。

NMIJ では傾斜探針 AFM を開発している。探針傾斜機構は一つであり、二度の測定で得られる左右のラインパターン測定結果を結合して線幅を求める。結合はラインパターン上面や周辺の底面の特徴的な凹凸を手掛かり

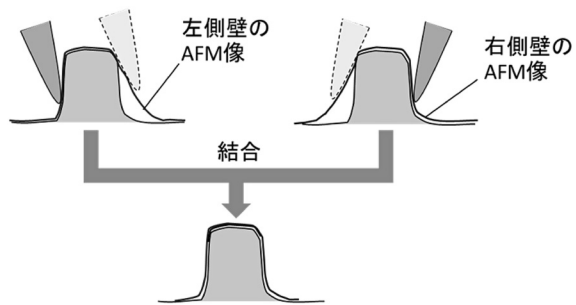


図 17 傾斜探針 AFM によるラインパターン形状計測では、左右それぞれの形状計測結果を結合して三次元形状を求める

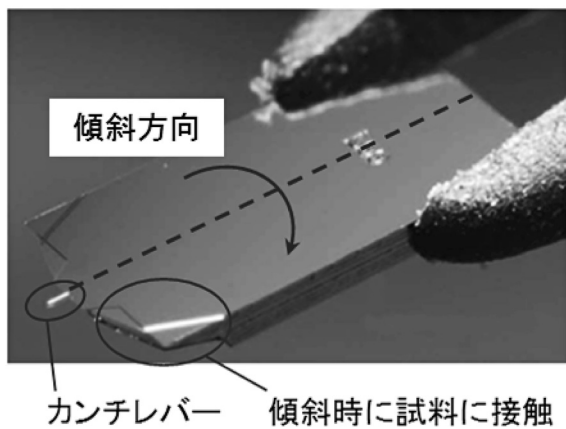


図 18 AFM 探針のベース基板の肩⁶⁸⁾ (筆者加筆)

にして行う。探針の傾斜角は 16°程度が限度であるが、図 19 に示すように探針の傾斜角とは独立に探針制御軸を任意の角度で行える。これにより、側壁走査の安定性が向上し、測定点密度の調整も可能になる。

傾斜探針 AFM においてもフレア形状探針 AFM 同様に、探針のコンボリューションが線幅計測において最も大きな課題である。NMIJ では (S)TEM によって高精度に校正された線幅標準試料を利用することで、実効探針幅を比較的高精度に求めて補正する手法を行っている。詳しくは 5.2. で述べる。

傾斜探針 AFM についても産業用検査装置が開発されている。Park Systems 社製の産業用傾斜探針 AFM⁶⁷⁾ は 300 mm ウエハに対応し、探針傾斜機構は一つのみで左右から傾斜無しの状態でのラインパターン測定結果を結合して線幅を求める。このとき、Z スキャナ自体を -38°から +38°の範囲で傾斜回転が可能のため試料の置き換えが必要ない。この傾斜探針 AFM では、高アスペクト比の探針を有する特殊なカンチレバーの使用と、Z スキャナの前方方向（傾斜回転軸と直交する方向）への

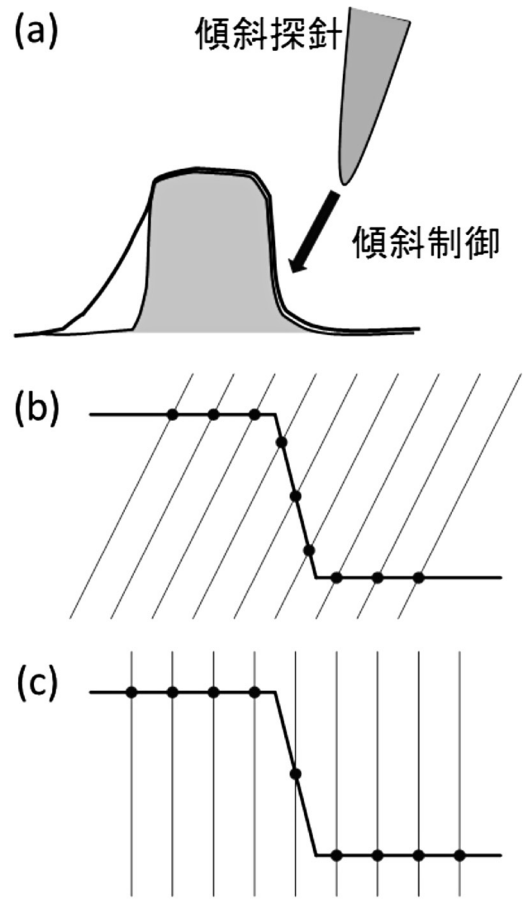


図 19 (a), (b) 傾斜制御あり (c) 傾斜制御なし

傾斜により、ベース基板の肩が試料にぶつかることなく ±38°と高い角度での傾斜が可能になっている。

4.2.3 CNT 探針 AFM

図 20 に CNT 探針を示す。CNT 探針は一般的な Si 製の探針のような開き角がなくフラットな先端形状、直径はシングルナノオーダーでありながら長さは数百 nm 以上の高アスペクト比、ヤング率が 1 TPa と高い剛性を持ち耐摩耗性も高い、といった利点から研究が行われた^{24), 69)-72)}。しかしながら、CNT 探針の作製のコスト、作製した CNT 探針の大きな個体差、CNT が曲がりやすいことに起因する問題などによって、近年は高精度な線幅測定は困難であると考えられている⁵⁹⁾。CNT は高い剛性をもつものの、アスペクト比が高いため試料表面を走査中に急な段差があると原子間力によって CNT が曲がってしまい、試料形状を測定するためには高精度な探針位置制御が必要と考えられる。一方、側壁に CNT 探針を近づけたとき原子間力により曲がることを利用して、フレア形状探針の場合と同様に CNT の先端部分が側壁に当たるときのカンチレバーのねじれを検出すれば

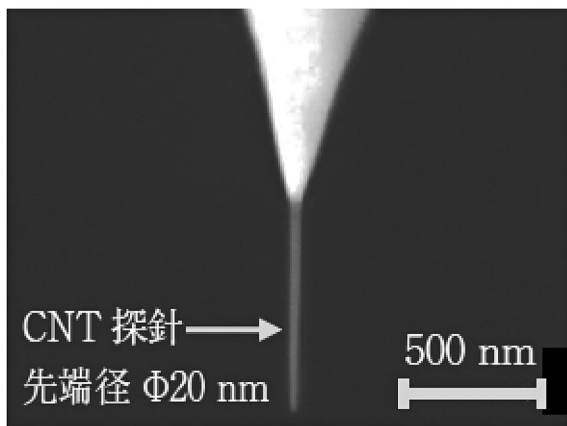


図 20 CNT 探針²⁴⁾

側壁形状が得られるという報告もある⁷²⁾。

4.2.4 (S)TEM による線幅計測

3.2.1. で述べた (S)TEM を用いる線幅計測は破壊計測である。二次元 (S)TEM 像の場合と同様に観察したいラインパターンを断面方向に対して薄片化加工を行うと、局所的であるものの高分解能で線幅計測ができる。加工前には、測定構造とその他の何もない空間とのコントラストを高くするためにカーボンのコーティング処理が行われる。

この手法では、Si の原子間隔を利用して線幅測定を行うためサブナノスケールの非常に小さな不確かさで測長が可能である^{49), 73)}。一方、大気中では単結晶 Si の表面にはアモルファスの酸化膜が形成されるため、これとカーボン層との境界の決定が難しく主な不確かさ要因となっている。これに対して、酸化膜の上からさらに金属をコーティングする手法がある⁷⁴⁾。カーボン層と金属層との高いコントラスト差により、境界の決定精度が高まる。

(S)TEM は破壊計測であるため直接的には標準試料の校正を行えないが、4.2.1. で挙げたように AFM と組み合わせると標準試料校正の不確かさを低減が可能になる。

4.3 予備基幹比較 NANO6 (Si 線幅)

国際メートル条約の下で運営されている国際度量衡委員会 (CIPM) の中に長さ諮問委員会 (CCL) があり、その中の寸法・形状計測 (Dimensional Metrology) に関する作業委員会のディスカッショングループ (WGDM7 DG) において、5つのナノメトロロジーの予備基幹比較 (NANO1~NANO5) が提案された⁷⁵⁾。表 2 に、この5つと後に追加された NANO6 を合わせた計6つの予備基幹比較について示す。これらの予備基幹比較は国際比較同様の手順に基づいて計画され、これまでに

表 2 ナノメトロロジーの予備基幹比較

比較名称	幹事機関 (実施期間)	測定量	使用計測技術	参加機関数
NANO1(フォトマスク線幅)	NIST (アメリカ) 未実施	フォトマスク線幅: 未定	未定	未定
NANO2(段差)	PTB (ドイツ) (2000.9 - 2002.7)	段差 (nm): 7, 20, 70, 300, 800	触針式表面粗さ測定機 干渉顕微鏡 原子間力顕微鏡	14
NANO3(標準尺)	PTB (ドイツ) (2000.5 - 2002.4)	線間隔: 0 - 280 mm の範囲での 1 μm - 1 mm ピッチ	レーザー干渉計	14
NANO4(1次元回折格子)	METAS (スイス) (1999.2 - 2000.6)	ピッチ (nm): 300, 700	光学顕微鏡 光回折法 原子間力顕微鏡	10
NANO5(2次元回折格子)	DFM (デンマーク) (2005.1 - 2006.3)	X, Yピッチ, X-Y直交度: 300 × 300 nm, 1000 × 1000 nm	光回折法 原子間力顕微鏡	9
NANO6(Si線幅)	NIST (アメリカ) (2010.6 -)	Si線幅: 30 - 250 nm	原子間力顕微鏡	11

NANO2 (段差), NANO3 (標準尺), NANO4 (一次元回折格子), NANO5 (二次元折格子) の4つが終了した⁷⁶⁾. 4.2. で挙げたようにいくつかの線幅計測技術が研究されており, NMI の間で線幅計測の予備基幹比較 NANO6 (Si 線幅) が実施されることとなった⁷⁷⁾. パイロット NMI は NIST であり, NMIJ を含む 11 機関が参加している. NANO6 (Si 線幅) は 2010 年に開始されたが予定よりも遅れて 2017 年現在も進行中である. NANO1 (フォトマスク線幅) は今後実施される予定である. NMIJ はこれら全てに参加しており, 今後 NANO1 が実施される場合にはこれにも参加予定である.

NANO6 で使用する計測装置は AFM に限定されている. これは複数の計測装置の使用による比較の複雑化を避けるためである. 一方, 様々な種類がある AFM の測定モードのうち何を使用するかは自由である. 各 NMI は使用した AFM 測定モードや長さの国家標準へのトレーサビリティについて報告する. 測定試料は 1 cm × 1 cm × 1 mm の Si 基板であり, 測定するラインパターンはほぼ垂直な側壁をもつ. 図 21 に測定箇所の構造を示す. ラインパターンは公称値で 30 nm から 250 nm までの範囲の線幅が 6 種類あり, 高さは約 160 nm である^{50), 77)}. AFM は探針が届かない箇所の測定ができない欠点をもつため, これらのラインパターンは実際の製造プロセスで作製される密な繰り返しパターンではなく, 周囲にある程度の間隔をもたせた孤立ラインパターンである. 6 種類のラインパターンが並んだラインパターン群は同一基板上に複数作製されており, 比較測定に使用

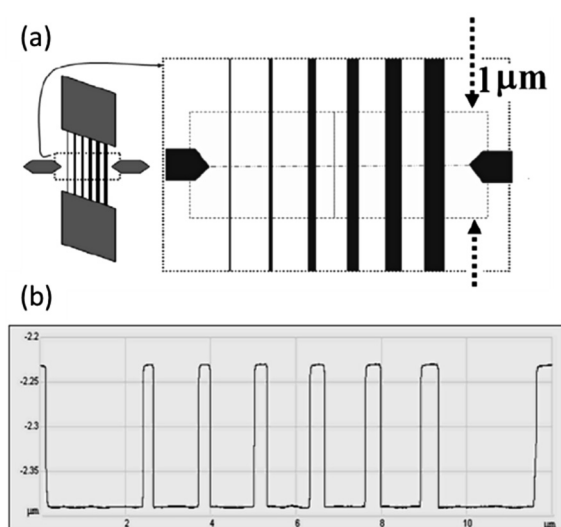


図 21 国際比較に用いられる線幅試料⁷⁷⁾ (a) 上面図 (b) 断面図

するラインパターン群はパイロットが指定する. ラインパターン群はいくつかのアライメントマークによって基板上での位置が示され, ラインと直交する向きに置かれた最も小さなアライメントマークを中心とした 1 μm にわたる長さの範囲で, ラインの 50 % の高さにおける線幅測定を行った結果の平均値を, それぞれ 6 種類のラインパターンで求めて報告する. また, 線幅結果の不確かさ算出の詳細とデコンボリューションの手法と手順についても報告する.

4.4 線幅以外の形状評価パラメータ

上記のように, 線幅についてはいくつかの計測技術が研究され, 予備基幹比較も行われている. 一方, 2.2. で挙げたように線幅以外にも形状評価パラメータは多数ある.

フレア形状探針 AFM や傾斜探針 AFM による線幅計測では, ラインパターンの三次元形状を測定しているため, 線幅だけでなく LER, LWR, 高さ, 側壁角といったパラメータも求めることができる^{49), 50)}. ただし, この手法で求めた LER と LWR のサンプリング数は少なく, ラインパターンの 1 μm の長さの範囲で数十本程度のラインをまたがるような走査線から求めている. この走査線を増やすことでサンプリング数は増加して LER と LWR を含む様々な三次元形状パラメータの測定精度は高まるが, その場合測定時間が長くなるためドリフトの影響が測定結果にのってしまう可能性がある. よって, LER や LWR などの測定は図 22 に示すようにライン長手方向の走査線の結果と合わせて求めるなどの工夫が必要と考えられる. 一方, フレア形状探針 AFM の場合, 凹凸の大きな構造や探針の円筒型部分とリッジとの距離分 (リッジの飛び出し距離分) より内部に入り込んだ側壁構造 (オーバーハング, アンダーカット) の測定は不可能である. また, TCR や側壁ラフネスといったパラ

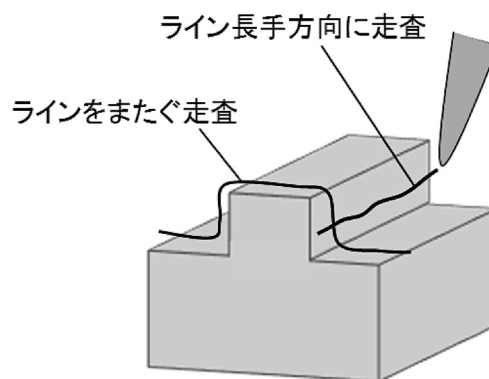


図 22 ライン長手方向走査

メータは測定困難である。側壁ラフネスのようなナノスケールの表面粗さについては、先端曲率半径が小さな探針を用いれば細かな凹凸が計測でき、大きな探針を用いれば細かい凹凸は無視されてスムージングされた形状が結果として得られる。よって先端曲率半径の大きなフレア形状探針を使用する際は測定結果の解釈に注意が必要である。

この問題に対して、傾斜探針 AFM では一般的な先端が鋭い AFM 探針を使用するため高い分解能を保ったまま側壁ラフネスの測定が可能である。また、傾斜角度による限界はあるもののオーバーハング、アンダーカット構造の測定も可能である⁶⁴⁾。よって、傾斜探針 AFM はより複雑な三次元ナノ構造の形状計測が期待できる。

近年は薄膜や材料表面の信頼性の高い表面粗さ測定が求められてきている。そのため、表面粗さ測定やその際の探針形状評価についての標準化の動きもある⁷⁸⁾⁻⁷⁹⁾。表面粗さについても校正された標準試料があれば、AFM ユーザーが信頼性の高い計測ができるようになる。

5. NMIJ の線幅標準供給と今後の展望

5.1 線幅校正サービス

2015 年から、NMIJ では経済産業省が示す「計量標準整備計画」⁸⁰⁾の通り線幅（パターン寸法）の校正サービス（依頼試験）⁸¹⁾を開始した。対象の校正器物は線幅（パターン寸法）、現在の校正範囲は 30 nm ~0.5 μm、校正値の拡張不確かさ ($k=2$) は 13 nm である。校正に使用する装置は 4.2.2. で述べた傾斜探針 AFM である。今後の計画では、2020 年度までに校正範囲を最小で 10 nm まで拡張することになっている。10 nm の線幅校正を行うには現在の不確かさは大きすぎるため、不確かさの低減が課題となっている。

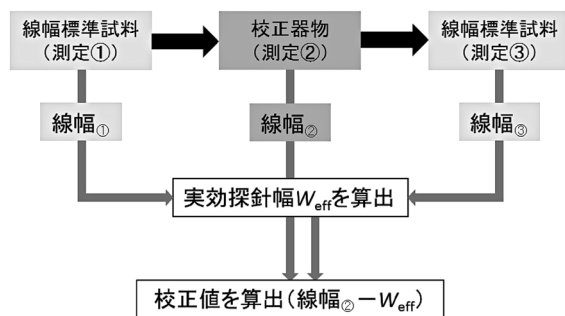


図 23 NMIJ の線幅校正手順

5.2 線幅計測の不確かさ低減における課題

4.2.2. で述べたように、NMIJ では (S)TEM によって高精度に校正された線幅標準試料を利用することで、探針幅を比較的高精度に求めて補正する手法を行っている。この手法では、校正器物の前後に校正器物と同じ条件で線幅標準試料を測定して、図 23 のように前後の線幅測定結果の平均値から線幅標準試料の校正値を差し引いた値を探針幅とする。校正値は、校正器物の測定で得られた線幅値から探針幅を差し引いた値として求まる。この手法では 3 回の線幅計測が必要となる手間があるが、校正器物の前後に線幅標準試料の測定を行うことで測定中の探針摩耗に関する不確かさ評価が量的に行える。使用している線幅標準試料は VLSI standards 社の NanoCD™ Standards であり、これは (S)TEM を使用して Si の原子間隔をカウントする手法により 1 nm 以下の拡張不確かさで校正されている^{80), 81)}。

表 3 に、現在の線幅校正値の主な不確かさ要因に対する評価の例を示す。ここでは、標準不確かさが比較的大きな要因 1、要因 2、要因 6 について述べる。要因 1 は、測定中の装置の熱ドリフトに起因した AFM 像の変形によって、左右二つの AFM 像を結合するときに用いる特徴点の場所の選択範囲によって線幅値が異なるため起こる不確かさである。要因 2 は、校正器物の形状が凹凸の少ないラインパターンであると、特徴点を使った結合の計算精度が低くなることによる不確かさである。要因 6 の実効探針幅の不確かさは、実効探針幅以外の要因（＝線幅標準試料の線幅計測値の不確かさ要因）と探針摩耗に関する不確かさの合成から求まる。

線幅計測値の不確かさ低減のためにはこれらの要因の不確かさ低減が必要であり、そのためには測定環境の安定化や安定性の高い走査が可能な探針制御技術の開発による測定中の探針摩耗の抑制が必要である。NMIJ ではこれらの課題に取り組み、不確かさ低減と線幅校正範囲拡大を目指す。

表 3 線幅計測における主な不確かさ要因に対する評価の例

主な不確かさ要因	値	タイプ	分布	感度係数	標準不確かさ
1 結合に用いる特徴点の場所依存性	5 nm	B	矩形	1	2.9 nm
2 結合計算精度	4 nm	B	矩形	1	2.3 nm
3 カンチレバー励振強度の不均一	2 nm	B	矩形	1	1.2 nm
4 二つのデータの相対角度補正	2 nm	B	矩形	1	1.2 nm
5 繰り返し性	1 nm	B	矩形	1	0.6 nm
6 実効探針幅	4 nm	B	正規	1	4 nm
合成標準不確かさ					5.8 nm

5.3 NANO1 (フォトマスク線幅)

NANO6 (Si 線幅) と相補的な予備基幹比較として NANO1 (フォトマスク線幅) がある。NANO6 では垂直側壁をもつ Si 基板上の Si ラインパターンが使用されていたが、NANO1 ではフォトマスクによく用いられる 6 インチ角のガラス基板上に形成された Cr (chrome on glass: CoG) のラインパターンを使用する。CoG ラインパターンは Si ラインパターンのような垂直側壁をもたず角度がついた斜面となる。線幅はラインパターンの 50 % の高さにおけるものと定義されるため、AFM を使用する場合は 4.2.1. で述べたようにデコンボリューションの際にフレア形状探針の形状に起因する接触点の変化を考慮する必要があったり、SEM を使用する場合はエッジを決定して線幅を求める手法が使えなくなったりする。よって NANO1 に必要な線幅計測技術は NANO6 の場合よりも難度が高い。

PTB と NIST は NANO1 に向けたフォトマスク線幅計測の予備二国間比較を行っている⁸⁴⁾。測定に用いたフォトマスクは PTB が設計した CoG パターンフォトマスクである⁸⁵⁾。比較に使用した最小公称線幅は 100 nm であり最大は 1000 nm である。PTB では CD-SEM, CD-AFM (フレア形状探針 AFM), 傾斜探針 AFM, UV (Ultraviolet) 顕微鏡 (光源波長 365 nm) を使用し、NIST は CD-AFM (フレア形状探針 AFM) のみを使用している。ただし、PTB の傾斜探針 AFM は片側からのみの測定で側壁角を求めるために使用しており、UV 顕微鏡は公称値 300 nm 以上のラインパターンの測定に使用している。PTB の CD-SEM と CD-AFM の結果を比較すると不確かさの範囲内であり差が 1 nm 以下の良い一致を示したが、PTB と NIST の CD-AFM の結果を比較すると全て PTB の方が不確かさの範囲を超えて系統的に約 5 nm 小さな値となった。この原因は不明であり、調査が必要である。一方、PTB の UV 顕微鏡と NIST の CD-AFM はほとんどのラインパターンの測定結果においてお互いの不確かさの範囲内にあり差が 1 nm 以下の良い一致を示した。

NMIJ は今後予定されている NANO1 に参加する予定である。使用する計測技術は、CD-SEM, UV 顕微鏡, NMIJ が保有する 6 インチフォトマスク対応の大型基板用 AFM, 傾斜探針 AFM の中から一つもしくは複数選択して使用する予定である。NANO1 により、NMIJ のフォトマスク線幅計測技術の各国 NMI との同等性が認められれば、フォトマスク線幅の校正サービスを現在の校正範囲の 0.5~10 μm から拡張することができる。

5.4 中長期的な展望

4.4. で述べたように線幅以外にも形状評価パラメータは多数ある。これらを AFM で測定するためには現在の線幅に特化した計測技術ではなく、ラインパターンの長手方向に沿った探針走査といった計測技術の開発や使用する探針の改良などにより、さらに高精度に三次元形状を測定する必要がある。ここでは、従来の AFM を発展させた技術として多探針 AFM と、AFM に限らず複数の計測技術を組み合わせる Hybrid Metrology について述べる。

5.4.1 多探針傾斜 AFM

NMIJ の傾斜探針 AFM は探針機構が 1 つだけであるため、ラインパターンをそれぞれ左右から二回測定する必要がある。よって、試料回転後に同一の測定箇所を高精度に探せるかという課題やデータの重ね合わせ処理に起因する不確かさが発生する。これに対して、探針傾斜機構を二つ並べてラインの左右から同時に測定すれば測定時間が半分以下になり、さらに一方の探針でもう一方の探針自体を測定すれば探針同士の相対位置がわかるので、データの重ね合わせ処理も容易になる。

多探針 AFM は半導体素子の特性評価に使用されるプローバの進化形として、主に微細加工により作製したナノ構造の電気特性を STM (Scanning Tunneling Microscope) や AFM の探針を電極として用いて測定する目的で研究が行われてきた^{86), 87)}。近年は、形状計測用の 2 探針傾斜 AFM も研究されてきている⁸⁸⁾。多探針 AFM の課題は、複数の探針走査機構を対称性良く配置する難しさや探針がスキャナ駆動軸から大きく外れてしまうこと (スキャナから長い腕を伸ばして探針を取り付ける状態) である。これらの原因により多探針 AFM は振動に対して弱い構造となり、高精度計測における課題になっている。

5.4.2 Hybrid Metrology

どの計測技術を用いても一つの技術では測定可能なパラメータに限られており、それぞれの計測技術が得意とするものや欠点も異なる。Hybrid Metrology は、複数の計測を相補的に使用して測定結果の信頼性を高めたり測定時間の高速化をしたりするための手法である。これは、ある測定対象に対して複数の計測装置を別々に使用する場合と複数の計測装置を組み合わせる一つの装置にする場合のどちらも含む。三次元ナノ構造の形状評価パラメータは多数あり、この計測要求を満たすためには Hybrid Metrology の利用が必須であるが、次のような課題が考えられる。

複数の計測装置を別々に使用する場合の課題は計測装

置間のもつバイアス補正である。この解決策としては、2.3. で述べたようにそれぞれの計測装置を代表する一組の標準試料の利用が考えられる。例としては、一つの基板上に OCD 用の繰り返しラインパターンと AFM 用の孤立ラインパターンを形成し、長さの国家標準にトレーサブルな校正をした標準試料が考えられる。

複数の計測装置を組み合わせて一つの装置にする場合の課題は装置の複雑化とそれによる個々の計測装置の性能低下である。例えば 5.4.1. で述べた AFM と SEM を組み合わせた場合は、AFM 目線では測定環境の真空化やそれに伴う振動の発生により測定試料の制限や測定分解能が低下する問題が起き、SEM 目線では真空チャンパー内に AFM が入るため試料ステージの傾斜機構の制限や様々な追加の物性計測用機器の使用制限が起こる⁸⁹⁾。そのため、計測装置を組み合わせる場合はあらかじめ目的に合わせて機能を制限する必要があると考えられる。

6. 結言

近年、半導体素子のナノ構造が二次元から三次元に進展してきており、それに伴い三次元ナノ構造の形状評価パラメータも増加した。それらの計測技術は多数あるが、それぞれ利点と欠点があり測定可能なパラメータは限られている。これらのスケール校正や測定値の信頼性の担保に必須であるのが、長さの国家標準にトレーサブルな校正がされた標準試料である。各国 NMI や AFM 装置メーカーでは、半導体素子の三次元ナノ構造の最も基本的な寸法・形状計測パラメータである線幅の AFM による計測技術を開発しており、各国 NMI の間では線幅測定の予備基幹比較が行われている。今後は、線幅のみならず様々な形状評価パラメータを、複数の計測技術の最適な組み合わせで高精度に計測する必要性が高まっていくと考えられる。本調査研究では、以上をふまえた調査を行いナノスケール寸法・形状計測の今後の展望を示した。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、高辻利之工学計測標準研究部門長ならびに平井亜紀子ナノスケール標準研究グループ長、三隅伊知子主任研究員、木下和人氏、権太聡研究企画室長、ナノスケール標準研究グループの皆様にご多くの助言を頂きましたことを深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) <http://www.nano.gov/> (参照 2016/01/13)
- 2) 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 研究開発の俯瞰報告書ナノテクノロジー・材料分野 第2版 (2013)
- 3) 中山亨：経済産業省におけるナノテクノロジー政策、表面技術 56 (2005) 709
- 4) <http://www.nedo.go.jp/> (参照 2016/01/13)
- 5) <http://www.intel.com/> (参照 2016/01/13)
- 6) The International Technology Roadmap for Semiconductors, 2013: <http://www.itrs.net/> (参照 2016/01/13)
- 7) <http://www.nmij.jp/> (参照 2016/01/13)
- 8) I. Misumi, S. Gonda, O. Sato, M. Yasutake, R. Kokawa, T. Fujii, N. Kojima, S. Kitamura, R. Tamochi and J. Kitta: Round-robin measurements of 100- and 60-nm scales among a deep-ultraviolet laser diffractometer, a scanning electron microscope and various atomic force microscopes, Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 803
- 9) D. Hisamoto, W. C. Lee, J. Kedzierski, H. Takeuchi, K. Asano, C. Kuo, E. Anderson, T. J. King, J. Bokor, and C. Hu: FinFET - a self-aligned double-gate MOSFET scalable to 20 nm, IEEE Trans. Electron Devices, 47 (2000) 2320
- 10) B. Bunday, T. A. Germer, V. Vartanian, A. Cordes, A. Cepler and C. Settens: Gaps Analysis for CD Metrology Beyond the 22 nm Node, Proc. SPIE 8681 (2013) 86813B
- 11) H. W. Kim, J. Y. Lee, J. Shin, S. G. Woo, H. K. Cho, and J. T. Moon: Experimental investigation of the impact of LWR on sub-100-nm device performance, IEEE Trans. Electron Devices, 51 (2004) 1984
- 12) N. G. Orji and R. D. Dixon: Higher order tip effects in traceable CD-AFM-based linewidth measurements, Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 448
- 13) R. Katsumata, M. Kito, Y. Fukuzumi, M. Kido, H. Tanaka, Y. Komori, M. Ishiduki, J. Matsunami, T. Fujiwara, Y. Nagata, L. Zhang, Y. Iwata, R. Kirisawa, H. Aochi, and A. Nitayama, "Pipe-shaped BiCS Flash Memory with 16 Stacked Layers and Multi-Level-Cell Operation for Ultra High Density Storage Devices, Symp. on VLSI Tech. Dig. (2009) 136
- 14) <http://www.hitachi-hightech.com/> (参照 2016/01/13)
- 15) A. Yamaguchi, H. Fukuda, H. Kawada and T. Iizumi:

- Impact of Long-Period Line-Edge Roughness (LER) on Accuracy in Critical Dimension (CD) Measurement and New Guideline for CD Metrology, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 5575
- 16) 山崎裕一郎：32 nm 世代の半導体ウェーハ検査・計測技術, *東芝レビュー* **64** (2009) 39-43
- 17) 熊谷和博：ナノ材料計測のための走査電子顕微鏡法および関連標準物質に関する調査研究, *産総研計量標準報告* **9** (2015) 293
- 18) B. Bunday, A. Cepler, A. Cordes and A. Arceo: CD-SEM Metrology for sub-10 nm Width Features, *Proc. SPIE* **9050** (2014) 90500T
- 19) M. T. Postek, A. Vldar, C. Archie and B. Ming: Review of current progress in nanometrology with the helium ion microscope, *Meas. Sci. Technol.* **22** (2011) 024004
- 20) ORION NanoFab: <http://www.zeiss.com/> (参照 2016/01/13)
- 21) 大西桂子：走査型ヘリウムイオン顕微鏡によるナノマテリアル評価技術の開発と共用, *顕微鏡* **48** (2013)
- 22) 重川秀実, 吉村雅満, 河津璋 責任編集：走査プローブ顕微鏡－正しい実験とデータ解析のために必要なこと－ (共立出版, 2009)
- 23) 一井崇：原子間力顕微鏡の発展と最近の動向, *表面技術* **59** (2008) 806-811
- 24) 渡辺正浩：SPM の産業応用についての展望, *精密工学会誌* **79** (2013) 195-199
- 25) J. S. Villarrubia: Algorithms for Scanned Probe Microscope Image Simulation, Surface Reconstruction, and Tip Estimation, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **102** (1997) 425
- 26) H. Itoh, T. Fujimoto and S. Ichimura: Tip characterizer for atomic force microscopy, *Rev. Sci. Instrum.* **77** (2006) 103704
- 27) 三隅伊知子：表面の微小寸法・形状評価と標準設定への課題, *計量研究所報告* **50** (2001) 69
- 28) K. Onishi and D. Fujita: Novel Tip Shape Reconstruction Method for Restoration of AFM Topography Images Using Nano-structures with Given Shapes, *Anal. Sci.* **27** (2011) 157
- 29) <http://www.bruker.com/> (参照 2016/01/13)
- 30) 黒部篤：研究, *東芝レビュー* **62** (2007) 34
- 31) 白崎博公：光 CD 計測の計測原理と関連技術, *精密工学会誌* **78** (2012) 127
- 32) Y. Ito, K. Inaba, K. Omote, Y. Wada and S. Ikeda: Characterization of Submicron-scale Periodic Grooves by Grazing Incidence Ultra-small-angle X-ray Scattering, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** (2007) L773
- 33) 伊藤義泰：微小角入射 X 線小角散乱による薄膜表面および薄膜に埋もれたナノ構造の評価に関する研究, 九州工業大学博士学位論文 (2009)
- 34) R. Attota and R. G. Dixon: Resolving three-dimensional shape of sub-50nm wide lines with nanometer-scale sensitivity using conventional optical microscopes, *Appl. Phys. Lett.* **105** (2014) 043101
- 35) V. Vartaniana, R. Attota, H. Park, G. Orji and R. A. Allen: TSV reveal height and dimension metrology by the TSOM method, *Proc. SPIE* **8681** (2013) 86812F
- 36) R. Attota, B. Bunday and V. Vartanian: Critical dimension metrology by through-focus scanning optical microscopy beyond the 22 nm node, *Appl. Phys. Lett.* **102** (2013) 222107
- 37) H. Kang, R. Attota, V. Tondare, A. E. Vldar and P. Kavuri: A method to determine the number of nanoparticles in a cluster using conventional optical microscopes, *Appl. Phys. Lett.* **107** (2015) 103106
- 38) 山本悠太：大域的な高分解能 HAADF-STEM 観察と画像解析による担持触媒の粒径分布評価, *技法* **117** (2015) 44
- 39) <http://www.jeol.co.jp/> (参照 2016/01/13)
- 40) D. V. Dyck, J. R. Jinschek and F. R. Chen: 'Big Bang' tomography as a new route to atomic-resolution electron tomography, *Nature* **486** (2012) 243
- 41) M. C. Scott, C. C. Chen, M. Mecklenburg, C. Zhu, R. Xu, P. Ercius, U. Dahmen, B. C. Regan, J. W. Miao: Electron tomography at 2.4-angstrom resolution, *Nature* **483** (2012) 444
- 42) 金子賢治, 馬場則男, 陣内浩司：電子線トモグラフィ法その 2：課題と応用例, *顕微鏡* **45** (2010) 109
- 43) J. Kacher and I. M. Robertson: Quasi-four-dimensional analysis of dislocation interactions with grain boundaries in 304 stainless steel, *Acta Materialia* **60** (2012) 6657
- 44) 清水夕美子, 藤本秀信：先端半導体デバイスの研究開発を支援する分析技術, *The TRC Journal* 2015 年 10 月号
- 45) 藪崎こずえ, 佐々木宏和：FIB を用いた微細構造解析用試料調整技術, *古河電工時報* **110** (2002) 77
- 46) Xradia 810 Ultra: <http://www.zeiss.com/> (参照

- 2016/01/13)
- 47) H. U. Danzebrink, L. Koenders, G. Wilkening, A. Yacoot and H. Kunzmann: Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology, *Annals of the CIRP* **55** (2006) 841
- 48) A. Yacoot and L. Koenders: Recent developments in dimensional nanometrology using AFMs, *Meas. Sci. Technol.* **22** (2011) 122001
- 49) G. Dai, F. Zhu, M. Heidelmann, G. Fritz, T. Bayer, S. Kalt and J. Fluegge: Development and characterisation of a new line width reference material, *Meas. Sci. Technol.* **26** (2015) 115006
- 50) M. W. Cresswell, W. F. Guthrie, R. G. Dixon, R. A. Allen, C. E. Murabito and J. V. Martinez De Pinillos: RM 8111: Development of a prototype linewidth standard," *J. Res. Nat. Inst. Standards Technol.* **111** (2006) 187
- 51) 菅原健太郎：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，産総研計量標準報告 4 (2005) 285
- 52) Y. Martin and H. K. Wickramasinghe: Method for imaging sidewalls by atomic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 2498
- 53) N. G. Orji and R. G. Dixon: Higher order tip effects in traceable CD-AFM-based linewidth measurements, *Meas. Sci. Technol.* **18** (2007) 448
- 54) <http://www.nanosensors.com/> (参照 2016/01/13)
- 55) <http://www.brukerafmprobes.com/> (参照 2016/01/13)
- 56) R. G. Dixon, R. A. Allen, W. F. Guthrie and M. W. Cresswell: Traceable calibration of critical-dimension atomic force microscope linewidth measurements with nanometer uncertainty, *J. Vac. Sci. Technol. B* **23** (2005) 3028
- 57) G. Dai, W. H. Grohne, D. Huser, H. Wolff, H. U. Danzebrink, L. Koenders and H. Bosse: Development of a 3D-AFM for true 3D measurements of nanostructures, *Meas. Sci. Technol.* **22** (2011) 094009
- 58) G. Dai, W. H. Grohne, D. Huser, H. Wolff, J. Fluegge and H. Bosse: New developments at Physikalisch Technische Bundesanstalt in three-dimensional atomic force microscopy with tapping and torsion atomic force microscopy mode and vector approach probing strategy, *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS* **11** (2012) 011004
- 59) R. Dixon, B. P. Ng, X. Bonnaud and N. Orji: Interactions of higher order tip effects in critical dimension-AFM linewidth metrology, *J. Vac. Sci. Technol. B* **33** (2015) 031806
- 60) G. Dai, K. Hahm, F. Scholze, M. A. Henn, H. Gross J. Fluegge and H. Bosse: Measurements of CD and side-wall profile of EUV photomask structures using CD-AFM and tilting-AFM, *Meas. Sci. Technol.* **25** (2014) 044002
- 61) InSight-450 3DAFM: <https://www.bruker.com/> (参照 2016/01/13)
- 62) V. Mancevski and P. F. McClure: Development of a dual-probe Caliper CD-AFM for near model-independent nanometrology, *Proc. SPIE* **4689** (2002) 83
- 63) J. Garnæs, P. E. Hansen, N. Agersnap, J. Holm, F. Borsetto and A. Kuhle: Profiles of a high-aspect-ratio grating determined by spectroscopic scatterometry and atomic-force microscopy, *Appl. Opt.* **45** (2006) 3201
- 64) K. Murayama, S. Gonda, H. Koyanagi, T. Terasawa and S. Hosaka: Side-Wall Measurement using Tilt-Scanning Method in Atomic Force Microscope, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** (2006) 5423
- 65) H. Xie, D. Hussain, F. Yang and L. Sun: Atomic force microscope caliper for critical dimension measurements of micro and nano structures through sidewall scanning, *Ultramicroscopy* **158** (2015) 8
- 66) W. Chu, J. Fu, R. Dixon and T. Vorburger: Linewidth Measurement Based on Automatically Matched and Stitched AFM Images, *AIP Conf. Proc.* **931** (2007) 407
- 67) Park NX-3DM: <http://www.parkafm.com/> (参照 2016/01/13)
- 68) <http://probe.olympus-global.com/jp/> (参照 2016/01/13)
- 69) 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
- 70) Y. Nakayama: Scanning Probe Microscopy Installed with Nanotube Probes and Nanotube Tweezers, *Ultramicroscopy*, **91** (2002) 49
- 71) J. Fu, R. Dixon, G. Orji, T. Vorburger and V. Nguyen: Linewidth measurement from a stitched AFM image, *AIP Conf. Proc.* **788** (2005) 421
- 72) M. Watanabe, S. Baba, T. Nakata, H. Itoh, T. Marimoto and S. Sekino: AFM Method for Sidewall Measurement through CNT Probe Deformation Correction and its Accuracy Evaluation, *Proc. SPIE* **7272** (2009) 72721P
- 73) K. Takamasu, Y. Iwaki, S. Takahashi, H. Kawada, M.

- Ikota, A. Yamaguchi, G. F. Lorusso and N. Horiguchi: Line profile measurement of advanced-FinFET features by reference metrology, Proc. SPIE **9424** (2015) 942406
- 74) K. Takamasu, H. Okitou, S. Takahashi, M. Konno, O. Inoue and H. Kawada: Sub-nanometer calibration of line width measurement and line edge detection by using STEM and sectional SEM, Proc. SPIE **8324** (2012) 83240X
- 75) F. Meli: Final report of supplementary comparison nanometrology: one dimensional gratings 1999–2000 (WGDM-7 DG Nano4), BIPM publication CCL-S1 (2000)
- 76) <http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccl/> (参照 2016/01/13)
- 77) United States National Institute of Standards and Technology: Preliminary International Comparison on Nanometrology according to the Rules of the CCL Supplementary Comparison. Nano 6: AFM Linewidth Standards, Nano 6 Technical Protocol (2010)
- 78) 草野英二：走査型プローブ顕微鏡による薄膜表面粗さ測定のJIS化, 精密工学会誌 **79** (2013) 205
- 79) I. Misumi, K. Naoi, K. Sugawara and S. Gonda: Profile surface roughness measurement using metrological atomic force microscope and uncertainty evaluation, Measurement **73** (2015) 295
- 80) <http://www.nmij.jp/service/P/calibration/> (参照 2016/01/13)
- 81) <http://www.nmij.jp/info/planning/> (参照 2016/01/13)
- 82) <http://www.vlsistandards.com/> (参照 2016/01/13)
- 83) M. Tortonese, G. Lorusso, R. Blanquies, J. Prochazka, L. Grella, Proc. SPIE **5375** (2004) 647
- 84) D. Bergmann, B. Bodermann, H. Bosse, E. Buhr, G. Dai, R. Dixon, W. Häßler-Grohne, K. Hahm, and M. Wurm: Photomask Linewidth Comparison by PTB and NIST, Proc. SPIE **9636** (2015) 96360
- 85) J. Richter, T. Heins, R. Liebe, B. Bodermann, A. Diener, D. Bergmann, C. G. Frase, H. Bosse: Calibration of CD mask standards for the 65 nm node: CoG and MoSi, Proc. SPIE **6533** (2015) 65330S
- 86) M. Ishikawa, M. Yoshimura and K. Ueda: Development of Four-Probe Microscopy for Electric Conductivity Measurement, Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) 1502
- 87) S. Yoshimoto, Y. Murata, K. Kubo, K. Tomita, K. Motoyoshi, T. Kimura, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, S. Honda, M. Katayama and S. Hasegawa: Four-Point Probe Resistance Measurements Using PtIr-Coated Carbon Nanotube Tips, Nano Lett. **7** (2007) 956
- 88) D. Hussain, K Ahmad, J. Song and H. Xie: Advances in the atomic force microscopy for critical dimension metrology, Meas. Sci. Technol. **28** (2017) 012001
- 89) I. Shiraki, F. Tanabe, R. Hobara, T. Nagao and S. Hasegawa: Independently driven four-tip probes for conductivity measurements in ultrahigh vacuum, surf. Sci. **493** (2001) 633