

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月23日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18119

研究課題名（和文）AFMによる線幅計測の不確かさ低減のための探針形状の絶対評価技術開発

研究課題名（英文）Absolute evaluation of a probe-tip shape for the reduction of uncertainty of linewidth calibration using an AFM

研究代表者

木津 良祐 (Kizu, Ryosuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：40760294

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：原子間力顕微鏡（AFM）を用いてナノスケールの半導体ラインパターンの線幅を校正した際の不確かさを低減することを目的として、線幅計測結果からAFM探針形状幅を補正する技術を開発した。これを適用した線幅計測の不確かさ評価を行った結果、校正値の拡張不確かさ（包含係数 $k=2$ ）を従来の約13 nmから今回1.0 nmへ低減できた。従来最も大きな不確かさであった探針形状の影響に起因した不確かさを低減できたことが線幅校正値の不確かさ低減に大きく寄与した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体デバイス製造において、微細加工技術で作製されたナノ構造の形状計測はデバイス性能や製造歩留まりの向上に欠かせない。また、計測装置間の結果のずれを防ぐためには、正確な（長さ標準にトレーサブルな）計測が重要となる。本研究では、半導体ラインパターンの代表的な形状評価パラメータである線幅を精密・正確に計測するために、AFM探針形状を高精度に補正する技術を開発した。その結果、微小なラインパターン線幅を拡張不確かさ1.0 nmで校正することが可能になった。

研究成果の概要（英文）：We developed a technique for correcting the probe-tip width from the result of linewidth measurement for reducing measurement uncertainty of linewidth calibration of nanoscale semiconductor line pattern using an AFM. The expanded uncertainty (a coverage factor: $k=2$) of the measured value was reduced from 13 nm, which is the previous value, to 1.0 nm. The reduction of the uncertainty related to tip convolution was greatly contributed to the reduction of the expanded uncertainty of linewidth calibration.

研究分野：計測工学

キーワード：原子間力顕微鏡（AFM） 線幅校正 ナノ計測 不確かさ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ナノ構造の形状計測技術は、ナノテクノロジーの基盤技術として重要である。特に、ナノメートル(nm)オーダーで絶対寸法計測する技術に関しては、半導体デバイス製造における計測装置の倍率校正や信頼性の担保のために使われ、半導体デバイスの微細化の進展によって一層重要性が増していく。近年、半導体デバイス構造は二次元的だけでなく三次元的にもなりつつある。三次元的な半導体デバイス製造では、最も基本的な寸法計測はナノスケールのラインパターン線幅（もしくはCritical Dimension (CD)）の計測である。

半導体製造現場では一般的に走査電子顕微鏡 (SEM)、光学式散乱計測といった高スループットな計測装置が使用されているが、これらの手法では線幅の nm オーダーの絶対値計測は原理・分解能の点から困難であり、主な線幅測定可能な手法は透過電子顕微鏡 (TEM) と原子間力顕微鏡 (AFM) である。TEM は高分解能であるが、単結晶格子をカウントする測長原理と破壊的計測である理由から測定可能な試料に制限がある。一方 AFM は任意の形状・材質の計測が可能な利点があるが、nm オーダーの線幅計測は困難であり測定結果が大きな不確かさをもつ欠点がある。AFM による線幅計測が高精度化できれば、様々なラインパターン試料に対して線幅校正が可能になる。校正された線幅試料を利用すれば、計測結果の正確さが担保されていない計測装置（一般的な SEM や AFM 等）で計測した線幅計測技術の正確さを評価できる。

一般的な AFM による線幅計測が難しい原因は、AFM は探針が試料表面に対して垂直にアプローチする原理上、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素子構造の側壁に届かないからである。こういった AFM による線幅測定の課題に対して、米国や独国の国家計量標準研究機関では探針先端が左右に張り出したフレア形状探針を使用しているが、これは探針先端のサイズが大きいため分解能が低くなる。一方、研究代表者の所属するグループでは、AFM 探針の傾斜機構をもつ AFM（傾斜探針 AFM）を開発しており、鋭い探針先端で高分解能な側壁走査を可能にした。そして、ラインパターンの左右の側壁測定結果を結合することで線幅測定を可能にした。高分解能 AFM 像をもとに線幅計測を行うと、低分解能 AFM 像では無視されてしまうラインパターンの局所的な凹凸や表面粗さが反映されるため、より正確な線幅計測が可能になると考えられる。

研究開始当初の線幅校正の拡張不確かさは約 13 nm であったが、近年の半導体デバイスの微細化によって最小線幅は 10 nm 以下となっていたため、それに対応するためには不確かさを小さくする必要があった。従来の不確かさの主な要因は「探針形状幅の推定精度に起因する不確かさ（約 10 nm）」であり、この不確かさの低減が必須であった。

2. 研究の目的

本研究では、傾斜探針 AFM による線幅校正の不確かさ低減のために、AFM 探針形状を求めて線幅測定結果から高精度に補正する技術を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

線幅校正の際に、校正対象の線幅計測を行うことに加えて探針形状を求めるための線幅標準試料の線幅計測を行う。線幅計測は 1 回あたりで、2 回の AFM 計測を行いラインパターンの左右の側壁がそれぞれ含まれる 2 つの AFM 像を結合して 1 つの三次元 AFM 像を得る（図 1）。左右の結合は、2 つの AFM 像で共通しているラインパターン上面部分の特徴的な形状をもとに行う。線幅標準試料は側壁角がほぼ 90° で約 110 nm の線幅をもつ Si ラインパターンであり、TEM を利用して線幅校正値がつけられている。よって、線幅標準試料の線幅計測結果から校正値を差し引くことで探針形状幅が得られる。また、線幅標準試料の線幅計測を校正対象の線幅測定の前後に行うことで、校正対象の線幅計測における探針摩耗量を定量評価する。これにより、探針形状幅の推定と探針摩耗に起因する不確かさを評価できる。高精度で再現性の高い線幅計測を行うためには、前述の校正手順の工夫だけではなく AFM 計測の測定環境や測定条件も重要となるため、探針位置決めや安定性や探針摩耗量を確認しながら各種計測手順・制御パラメータの最適化を行った。

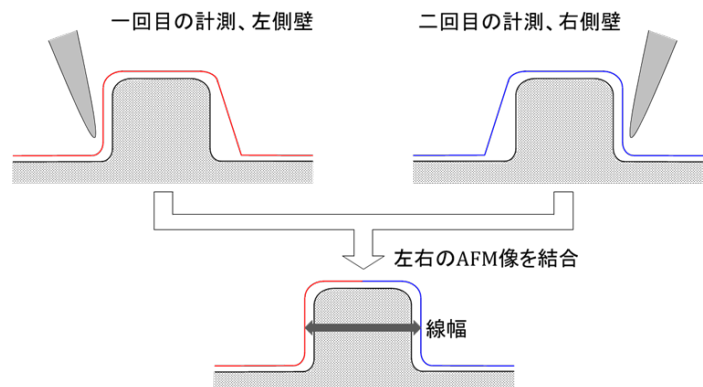


図1 線幅計測手順。

4. 研究成果

本研究で行った探針形状の補正方法や探針摩耗量の定量評価方法を用いた線幅校正方法による不確かさ評価および校正値の信頼性検証のために、図2に示す実験手順を用いた。用意した線幅試料は二つあり、一方は校正対象となる NCDM-110X、もう一方は探針形状の補正のために用いる NCDM-70X である。これらの線幅試料はどちらも TEM による線幅校正値をもっているため、傾斜探針 AFM による線幅校正値と TEM による線幅校正値を比較すれば、校正結果の信頼性評価ができる。傾斜探針 AFM による線幅計測は合計 3 回あり、校正対象 (NCDM-110X) の計測の前後に探針形状の補正用試料 (NCDM-70X) の計測を行った。探針形状幅 W_{eff} は次のように求められる、

$$W_{\text{eff}} = (CD_{\text{std1}} - CD_{\text{std2}}) / 2 - CD_{\text{ref70X}},$$

ただし CD_{ref70X} 、 CD_{std1} 、 CD_{std2} はそれぞれ、NCDM-70X の TEM による線幅校正値、NCDM-110X の前に NCDM-70X を線幅計測した値、NCDM-110X の後に NCDM-70X を線幅計測した値を示す。そして、NCDM-110X の線幅校正値 CD_{cal} は次のように求められる、

$$CD_{\text{cal}} = CD_{\text{meas}} - W_{\text{eff}},$$

ただし CD_{meas} は NCDM-110X を線幅計測した値を示す。

そして、校正値の検証のために NCDM-110X の TEM による線幅校正値 CD_{ref110X} と CD_{cal} を比較する。求めた W_{eff} の値の確率密度分布を $W_{\text{eff}} - (CD_{\text{std1}} - CD_{\text{std2}}) / 2$ から $W_{\text{eff}} + (CD_{\text{std1}} - CD_{\text{std2}}) / 2$ を範囲とする三角分布とみなすと、探針摩耗に関する標準不確かさ u_{wear} は次のように求まる、

$$u_{\text{wear}} = (1/\sqrt{6}) \cdot (CD_{\text{std1}} - CD_{\text{std2}}) / 2.$$

図3に傾斜探針 AFM による NCDM-110X のラインパターン形状計測結果を示す。ラインパターンの高さ h をラインパターン上面と底面の高さをもとに求め、左右側壁それぞれ $2h/5$ から $3h/5$ にある側壁データを平面フィッティングして、側壁間距離を線幅測定値とした。NCDM-110X と NCDM-70X の線幅の TEM 校正値および AFM 計測結果を表1に示す。また、表1の結果から算出された W_{eff} 、 CD_{cal} 、 u_{wear} を表2に示す。

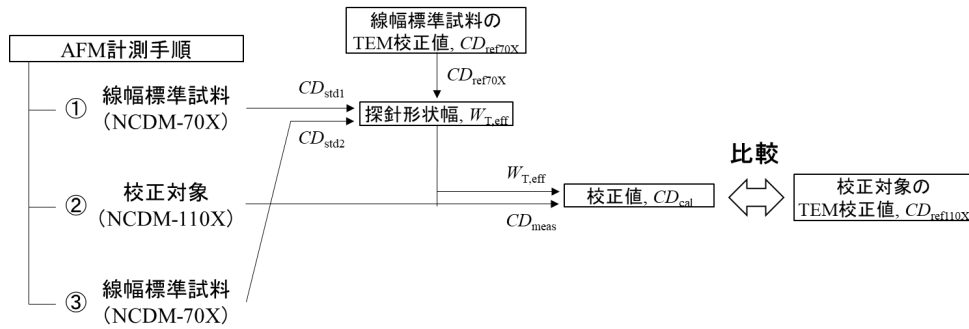


図2 線幅校正の信頼性検証のための実験手順。

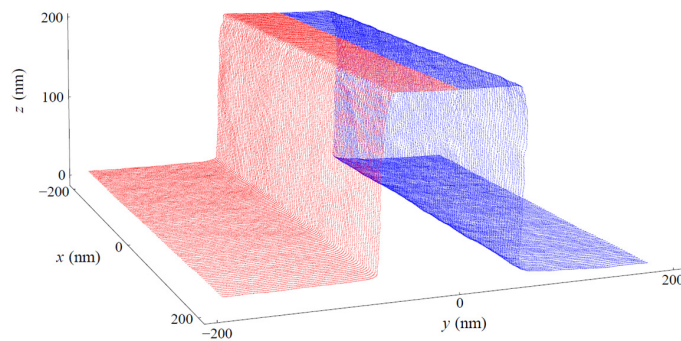


図3 ラインパターンの AFM 像 (左右結合後)。

表1 NCDM-110X と NCDM-70X の線幅の校正値および AFM 計測結果。

	線幅 (nm)
NCDM-70X の TEM 校正値 ± 標準不確かさ, CD_{ref70X}	70.3 ± 0.3
NCDM-110X の TEM 校正値 ± 標準不確かさ, CD_{ref110X}	111.4 ± 0.4
NCDM-70X の AFM 測定、前半), CD_{std1}	83.90
NCDM-110X の AFM 測定, CD_{meas}	125.34
NCDM-70X の AFM 測定、後半), CD_{std2}	85.02

表2 W_{eff} 、 CD_{cal} 、 u_{wear} の算出結果。

W_{eff} (nm)	CD_{cal} (nm)	u_{wear} (nm)
14.16	111.19	0.23

表3 線幅校正値の不確かさ評価。

不確かさ要因	分布	値	自由 度, ν_i	感度係 数	タイプ	不確かさ, u_i
AFM 像の結合精度	一様	0.22 nm	8	1	B	0.13 nm
探針摩耗	三角	0.56 nm	8	1	B	0.23 nm
探針位置計測	一様	0.41 nm	+inf.	1	B	0.24 nm
探針幅の推定	正規	0.33 nm	125	1	B	0.33 nm
再現性	-	negligible	-	-	-	negligible
合成標準不確かさ (nm): $u_c = \sqrt{\sum u_i^2}$						0.48 nm
有効自由度: $\nu_{\text{eff}} = u_c^4 / \sum (u_i^4 / \nu_i)$						117
拡張不確かさ (nm) (包含係数 $k = 2$): U						0.96 nm

表2 に示した校正値 CD_{cal} に関して行った不確かさ評価を表3 に示す。拡張不確かさ (包含係数 $k = 2$) は 1.0 nm であった。従来課題となっていた探針幅の推定に関する不確かさは、従来の約 10 nm から 0.3 nm へと大幅に低減できた。その他の不確かさ要因に関しても、従来数 nm であった値が 1 nm 以下へと低減できた。

傾斜探針 AFM による線幅校正の信頼性を評価するために、校正対象の TEM 校正値との比較を行った。校正値と不確かさを用いたパフォーマンス評価を ISO/ICE 17043:2010 に記載の E_n 値を用いて次式の計算を行った、

$$E_n = (CD_{\text{cal}} - CD_{\text{ref110X}}) / (\sqrt{(U_{\text{AFM}}^2 + U_{\text{ref}}^2)}),$$

ただし U_{AFM} と U_{ref} はそれぞれ CD_{cal} と CD_{ref110X} の拡張不確かさを示す。これを計算すると $|E_n| = 0.17$ と求まり、1 以下でありことから満足なパフォーマンスを示した。

結論として、探針幅補正方法の導入と AFM 計測の最適化によって高精度なラインパターン形状計測が可能となり、線幅校正の拡張不確かさ (包含係数 $k = 2$) を 1.0 nm まで低減することができた。今後の展望として、従来技術であるフレア形状探針を使用した線幅計測技術との比較や、他の研究機関と線幅の比較計測を行い本研究の校正技術との同等性を確認することが重要である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

① R. Kizu, I. Misumi, A. Hirai, and S. Gonda, Accurate vertical sidewall measurement by a metrological tilting-AFM for reference metrology of line edge roughness, Proc. of SPIE, 10959, 109592B (2019), 査読無

DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2511712>

② R. Kizu, I. Misumi, A. Hirai, K. Kinoshita, and S. Gonda, Linewidth calibration using a metrological atomic force microscope with a tip-tilting mechanism, Meas. Sci. Technol., 30, 015004 (2019), 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaf02a>

③ R. Kizu, I. Misumi, A. Hirai, K. Kinoshita, and S. Gonda, Development of a metrological atomic force microscope with a tip-tilting mechanism for 3D nanometrology, Meas. Sci. Technol., 29, 075005 (2018), 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aabel1a>

[学会発表] (計 3 件)

① R. Kizu, I. Misumi, A. Hirai, and S. Gonda, Accurate vertical sidewall measurement by a metrological tilting-AFM for reference metrology of line edge roughness, SPIE Advanced Lithography 2019 (2019)

② 木津良祐、三隅伊知子、平井亜紀子、権太聡、走査型プローブ顕微鏡像のドリフト補正、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (2017)

③ 木津良祐、三隅伊知子、平井亜紀子、木下和人、権太聡、傾斜探針型測長 AFM による線幅計測における実効探針幅の補正、2017 年度精密工学会春季大会学術講演会 (2017)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：走査型プローブ顕微鏡のドリフト補正方法及びドリフト補正機能を備えた走査型プローブ顕微鏡

発明者：木津良祐

権利者：国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2017-154999

出願年：平成 29 年

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ：所属研究グループ－<https://unit.aist.go.jp/riem/ns-std/>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。