

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14865

研究課題名（和文）半導体ナノ構造の超精密形状計測：sub-nm精度の粗さ計測

研究課題名（英文）Ultraprecise dimensional measurement of semiconductor nanostructures

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・主任研究員

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）：本研究では、半導体デバイスの性能評価やリソグラフィ技術による加工性能評価に欠かせない「ラインエッジラフネス（LER）」と呼ばれる微細な半導体ラインパターンの側壁粗さ情報を示す形状パラメータの計測技術に着目し、高精度に粗さ形状が特徴づけられたLER標準試料の提案と実験検証に取り組んだ。実験検証の結果、作製した試料に設計に応じた粗さ形状が反映されていることが確認でき、LER標準試料の実現可能性が示された。また、原子間力顕微鏡（AFM）を用いたLER計測技術の高度化に取り組んだ結果、従来技術では難しかったレジストパターンの側壁形状の高精度計測と電子線照射時の収縮変形の定量評価が可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体デバイスは様々な産業の情報化のための基幹部品として継続的な性能向上が求められている。一方で、半導体デバイス製造の技術難度は年々高まっており、トランジスタ構造の微細化・複雑化に伴って計測要求も一層高まっている。その中で、LERは先端的なリソグラフィ技術の研究開発における重要な評価値である。本研究で提案したLER標準試料は、ランダム性をもちながらも既知である粗さ情報を提供でき、次世代LER計測の基盤技術として応用が期待できる。また、AFMによる高精度LER計測技術は従来難しかった高精度かつ3Dで側壁を計測でき、各種プロセス（リソグラフィ、エッチング等）のメカニズム解明への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study focused on the measurement technique of the shape parameter indicating the sidewall roughness information of nanoscale line patterns, called line edge roughness (LER). LER is essential for the performance evaluation of semiconductor devices and process technologies in lithography technology. We proposed and fabricated an LER standard sample whose roughness shape is characterized with high accuracy. As a result of the experimental verification, it was confirmed that the fabricated sample reflected the roughness shape according to the design, and the feasibility of the LER standard sample was demonstrated. We also carried out an enhancement of the LER measurement technique using an atomic force microscope. As a result, high-precision measurement of the sidewall shape of resist patterns and quantitative evaluation of shrinkage deformation during electron beam exposure, which had been difficult with conventional techniques, became possible.

研究分野：計測工学

キーワード：粗さ計測 ラインエッジラフネス（LER） 原子間力顕微鏡（AFM） 走査電子顕微鏡（SEM） ナノ構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ナノスケール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り、その応用の一つに、半導体デバイス製造技術における微細パターンの計測がある。近年の半導体デバイスの研究開発では、これまで同様の微細化に加えて三次元化の進展もあり、それとともなって様々な計測要求も高まっている。FinFET 等の三次元的なデバイス構造では、その最小構成要素であるラインパターンを特徴付ける三次元形状パラメータの超精密計測が、高度なデバイス性能評価や製造の歩留まり向上に欠かせない。例えば、線幅はラインパターンの最も基本的な寸法であり、半導体の微細化を表す指標としても重要である。他にも、パターンの高さや側壁角などがあり、近年特に高精度な計測を求められている形状評価パラメータにラインエッジラフネス(LER)がある。LER はラインパターンの側壁の粗さを表しており、リソグラフィやエッチングなどの各プロセスで生じる。LER はデバイス特性に悪影響を与え、また、各種半導体製造技術(露光技術、レジスト材料、エッチング技術、等)の研究開発における指標として使われているため、高精度に計測・制御を行う必要がある。測定の正確性を担保するための方法の一つとして、校正用標準試料の利用が考えられる。例えば、半導体製造向けの走査電子顕微鏡(SEM)では、その倍率を定期的に校正するために、周期が校正されている一次元グレーティング試料を利用している。LER の計測に関して、SEM で計測する際には SEM 像に含まれるノイズや装置間での計測結果の差が生じることなどの課題によって、正確性を担保することは容易でなく、校正用標準試料が有用と考えられる。

2. 研究の目的

上述の背景を基に、本研究では LER 計測のための校正用標準試料(LER 標準試料)を提案する。LER 標準試料の実現のためには、LER の設計から試料作製と LER 評価までの一連の手順を確立する必要がある。そして、実験検証を通して LER 標準試料の実現可能性を調べる必要がある。また、作製した試料に対して高精度な LER 評価を行う必要もある。以上から、本研究では、LER 標準試料の実現および高精度な LER 計測技術の開発を目的とした。

3. 研究の方法

次の ~ の手順で LER 標準試料を作製した。

任意の粗さパラメータを有した粗さプロファイルを生成する(生成方法については参考文献 [1]を参照)。ここで粗さパラメータとは、Self-affine fractals モデルにしたがう粗さプロファイルの自己相関関数($R(r)$ 、ラグ r)が $R(r)=\sigma^2\exp(-r/\xi^{2\alpha})$ で表されるとした場合の σ 、 ξ 、 α を指す。今回の実験検証では、 $\sigma=100$ nm、 $\xi=400$ nm、と固定し、 α を 0.3/0.5/0.7/0.9 の 4 つに振った条件で作製した。図 1 に、生成した 4 つの粗さプロファイルを示す。

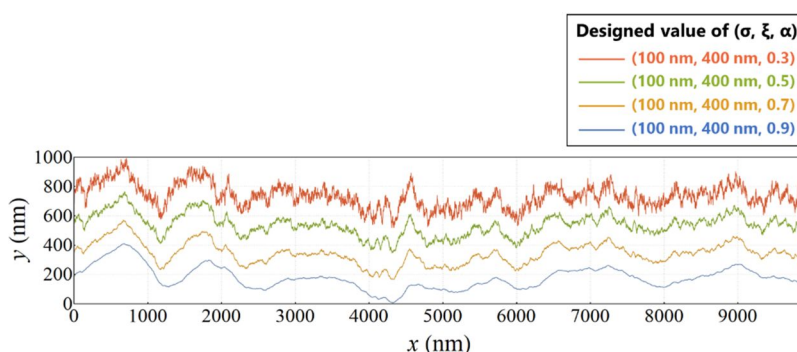


図 1 生成した 4 種類の粗さプロファイル[2]

上記の で生成した粗さプロファイルが側壁粗さになるようなパターンレイアウトを設計し、それを基にリソグラフィ技術などの微細加工技術によってシリコン基板に対して加工を行い、側壁の粗さが の生成した粗さプロファイルになるような試料を作製する。微細加工技術には電子線リソグラフィを用いることでレジストパターンを形成し、その後ドライエッチングによってパターンの高さが約 120 nm になるように加工する。

作製したパターン試料の LER 計測を行ってラインエッジプロファイルを取得し、粗さ解析を行う。また、作製結果のプロファイルと図 1 に示す設計プロファイルの比較を行い、作製精度の評価を行う。

4. 研究成果

LER 標準試料として作製した試料の SEM 測定の結果を図 2 に示す。ラインパターンの SEM 像に対してエッジ検出処理を行い、ラインエッジプロファイルを抽出しており、図 2 では色付きの線で SEM 像に重ねて示している。また、作製結果の粗さプロファイルと図 1 に示す設計プロファイルを並べてプロットすることで比較評価を行った結果を図 3 に示す。ただし、ここでは $\alpha=0.3$ と $\alpha=0.9$ の結果について示している。

これらの結果から、作製結果が設計した粗さプロファイルと少なくとも長周期では良い一致を示していたことが目視で確認でき、LER 標準試料 (LER を制御したラインパターン) の実現可能性が示された。また、 α が大きいときは試作結果と設計が比較的良い一致を示したが、 α が小さいときは長周期の形状は良い一致を示したものの短周期の形状が試作結果にあまり反映されていなかったことが確認できた。

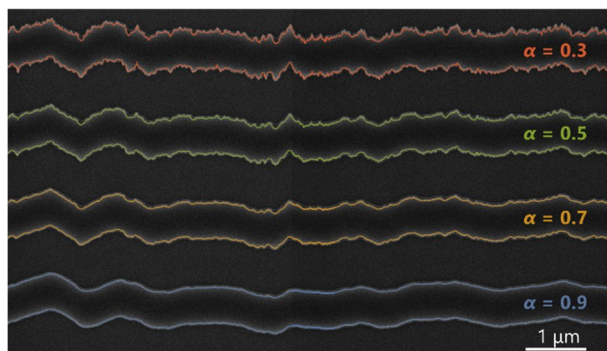


図 2 LER 標準試料として作製した試料の SEM 測定の結果 (ただし、ラインエッジプロファイルを重ねて示している) [2]

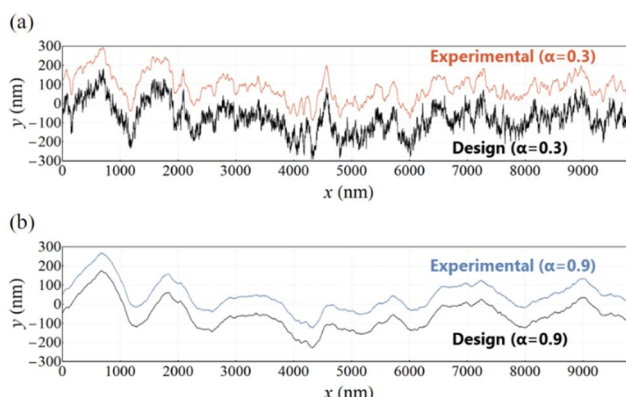


図 3 作製結果および設計の粗さプロファイルの比較 ((a) $\alpha=0.3$ および(b) $\alpha=0.9$ の結果) [2]

次に、図 3 のように得られた作製結果および設計の粗さプロファイルに対して、Height-height correlation function (HHCF)によるスケール解析[3]を行った結果を、図 4 に示す。この図から、作製結果の HHCF はラグ r が小さいほど設計の HHCF よりも減衰していたことがわかった。また、 $\alpha=0.3$ および $\alpha=0.9$ のそれぞれについて、設計の HHCF に対する試作結果の HHCF の減衰量が 10% になるときのラグ $r_{10\%}$ を算出したところ、 $\alpha=0.3$ の場合 442 nm であったことに対して、 $\alpha=0.9$ の場合は 22 nm であった。これは、設計上のプロファイルの α が小さい (プロファイル中に短周期の変動が多い) ほど、設計に対する加工の忠実性が低かったことを示す。

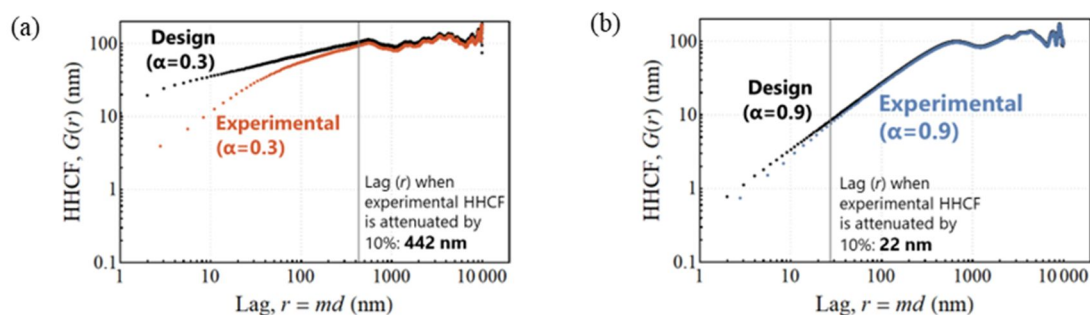


図 4 HHCF による粗さプロファイルの解析[2]

以上の結果をまとめると、本研究では LER 標準試料の実現に向けて、LER が制御されたラインパターンの作製と評価を行った。任意の粗さパラメータを有したプロファイルを生成し、それを基にして電子線リソグラフィによりシリコンラインパターンを作製して評価した。その結果、設計した粗さプロファイルに応じた形状が少なくとも長周期では加工できていることがわかり、LER が制御されたラインパターンの実現可能性が示された。

参考文献：

- [1] A. Papoulis and U. Pillai, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes (McGraw-Hill, 2002).
- [2] 木津良祐、他、“ラインエッジラフネスが制御されたシリコンパターンの作製と評価”2022 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、309-310、2022
- [3] V. Constantoudis et al., J. Vac. Sci. Technol. B 22, 1974 (2004).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kizu Ryosuke, Misumi Ichiko, Hirai Akiko, Gonda Satoshi	4. 巻 19
2. 論文標題 Direct comparison of line edge roughness measurements by SEM and a metrological tilting-atomic force microscopy for reference metrology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	6. 最初と最後の頁 44001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.JMM.19.4.044001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kizu Ryosuke, Misumi Ichiko, Hirai Akiko, Gonda Satoshi	4. 巻 11611
2. 論文標題 Evaluating SEM-based LER metrology using a metrological tilting-AFM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1161117
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2583475	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kizu Ryosuke, Misumi Ichiko, Hirai Akiko, Gonda Satoshi	4. 巻 11325
2. 論文標題 Comparison of SEM and AFM performances for LER reference metrology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 113250Q
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2551468	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kizu Ryosuke, Misumi Ichiko, Hirai Akiko, Gonda Satoshi	4. 巻 21
2. 論文標題 Unbiased line edge roughness measurement using profile-averaging method for precise roughness parameters measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology	6. 最初と最後の頁 24001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.JMM.21.2.024001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kizu Ryosuke, Misumi Ichiko, Hirai Akiko, Gonda Satoshi	4. 巻 133
2. 論文標題 Enhancing the precision of 3D sidewall measurements of photoresist using atomic force microscopy with a tip-tilting technique	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 065302 - 065302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0130459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kizu Ryosuke, Misumi Ichiko, Hirai Akiko, Gonda Satoshi	4. 巻 12496
2. 論文標題 Photoresist shrinkage observation by a metrological tilting-AFM	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 1249605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2655566	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kizu Ryosuke, Misumi Ichiko, Hirai Akiko, Gonda Satoshi
2. 発表標題 Comparison of SEM and AFM performances for LER reference metrology
3. 学会等名 SPIE Advanced Lithography 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木津良祐、三隅伊知子、平井亜紀子、権太聡
2. 発表標題 傾斜探針型測長原子間力顕微鏡によるラインエッジラフネスの参照計測
3. 学会等名 次世代リソグラフィワークショップ 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kizu Ryosuke、Misumi Ichiko、Hirai Akiko、Gonda Satoshi
2. 発表標題 Evaluating SEM-based LER metrology using a metrological tilting-AFM
3. 学会等名 SPIE Advanced Lithography 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木津良祐、三隅伊知子、平井亜紀子、権太聡、高橋哲
2. 発表標題 ラインエッジラフネスが制御されたシリコンラインパターンの作製と評価
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kizu Ryosuke、Misumi Ichiko、Hirai Akiko、Gonda Satoshi
2. 発表標題 High-resolution sidewall observation and LER measurement of a photoresist pattern by a metrological tilting-AFM
3. 学会等名 SPIE Advanced Lithography + Patterning 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kizu Ryosuke、Misumi Ichiko、Hirai Akiko、Gonda Satoshi
2. 発表標題 Photoresist shrinkage observation by a metrological tilting-AFM
3. 学会等名 SPIE Advanced Lithography + Patterning 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 粗さ解析のための方法及び情報処理システム	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
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-112800	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------