

ナノレベルの高低差の3次元形状測定技術

Optical Inspection Technology to Measure 3D Surface Shapes with Nanoscale Height Differences

大野 博司 OHNO Hiroshi 加納 宏弥 KANO Hiroya 大野 啓文 OHNO Akifumi

半導体をはじめとする様々な製造工程で行われている外観検査では、製品表面の微小欠陥を迅速かつ高精度に検出し、その3次元(3D)形状を正確に識別して不良判定を行うことが求められる。しかし、高低差がナノメートルレベルの極微小欠陥は、傾斜が非常に緩やかなため、従来の撮像技術では明暗のコントラストが付きにくく、検出が困難であった。

そこで東芝は、極微小欠陥からの反射光の微細な方向変化を色情報として捉える撮像光学系と、教師なしの深層ニューラルネットワーク(DNN)により3D形状を再構成するアルゴリズムを構築した。これにより、1枚の画像から高低差32 nmの欠陥形状が再構成可能であることを試作機で実証し、開発した技術の有効性を確認した。

An optical inspection technology capable of instantly and precisely detecting minute defects on the surfaces of products and measuring the three-dimensional (3D) shapes of defects is essential to judge whether products, including semiconductor devices, meet designated criteria in various manufacturing processes. However, it is difficult for conventional imaging technologies to detect extremely minute defects with nanoscale height differences due to decreases in brightness and contrast through slight surface inclinations.

To resolve this issue, Toshiba Corporation has developed a new optical inspection technology consisting of an optical imaging system which converts slight changes in the direction of reflected light from nanoscale defect surfaces into color information and an algorithm to reconstruct the 3D surface shapes based on an unsupervised deep neural network (DNN). We have confirmed the effectiveness of the technology via experiments on a prototype showing that it can reconstruct the 3D surface shapes of defects with a height difference of 32 nm from a single image.

1. まえがき

様々な製造工程で行われている外観検査では、製品表面の微小欠陥を迅速に検出し、その3D形状を識別して不良判定を行う必要がある。特に、シリコンウエハーを用いた半導体の製造工程では、結晶成長や、切断、研磨、エッチング、成膜など多くの工程が存在し、それぞれの工程で表面の平坦(へいたん)さが厳しく求められる。これは、たとえナノレベルの僅かな凹凸でも、集積回路の性能劣化や製品不良を引き起こす可能性があるためである。

このようなナノレベルの極微小欠陥の3D形状を測定する装置として、AFM(原子間力顕微鏡)がある。AFMは、高精度な表面測定が可能だが、一般に測定範囲が狭く、ウエハー全体を網羅的に検査するには複数箇所での測定が必要となる。そのため、測定位置の調整や段取りに時間を要し、結果的に全体の検査リードタイムが長くなり、生産ラインでのリアルタイム検査に適用するのは難しい。一方、高速に3D形状を取得する代表的な方法としては、例えば、レーザーで物体表面に細い線を投射し、それを走査させながら連続的に複数枚の画像をカメラで取得し、画像における投射線の変形具合から3D形状を算出する光切断法があ

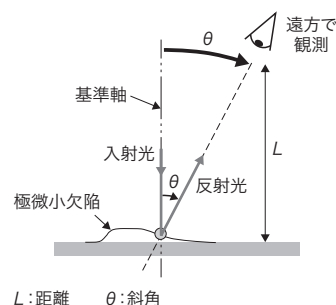


図1. 光てこの原理

反射光が遠方に進むにつれて基準軸との間の距離は次第に大きくなる。ワンショットBRDFは、この原理を応用した撮像光学系である。

Principle of optical lever

る。また、物体表面に様々な周期のしま模様を投射し、それらの撮像画像を解析して3D形状を求めるしま投影法もある。しかし、特に高低差がナノレベルの極微小欠陥は、その傾斜角が僅かであり、従来の撮像技術では、明暗のコントラストが付きにくくて鮮明な画像が取得できなかった。そのため、欠陥を見落としてしまったり、欠陥の3D形状を精度良く測定できなかったりするという問題があった。

そこで東芝は、図1のように、極微小欠陥に基準軸に

沿って光を入射させると、たとえ表面の傾斜角が僅かであっても、その傾斜に応じて斜角 θ の反射光が生じ、反射光が遠方に進むにつれて基準軸との間の距離は次第に大きくなる“光てこの原理”に注目して、極微小欠陥からの僅かな反射角でもカラーマッピングできる撮像光学系を開発した。この光学系は、反射光の角度分布をBRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) と呼ばれる分布関数を用いて、視野内の全領域にわたってワンショットで捉えられる。そのため、この光学系をワンショットBRDFと呼んでいる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。更に、ワンショットBRDFで撮像した画像を入力とし、教師なしのDNNで幾何光学方程式を解くことにより、3D形状を再構成するアルゴリズムも開発した。

ここでは、ワンショットBRDFを用いて撮像した1枚の画像から、開発したアルゴリズムを用いて、ナノレベルの極微小欠陥の3D形状が再構成できることを確認できたことについて述べる。

2. 光の方向をカラーマッピングする撮像技術

図2に、ワンショットBRDFの模式図を示す。図2(a)に、ワンショットBRDFの試作機のCAD図を示し、また、図2(b)に xz 面におけるワンショットBRDFの断面図、図2(c)にこの光学系が備える多色ストライプフィルターの xy 断面図を示す。多色ストライプフィルターは、複数のストライプ状(短冊状)の領域を持ち、それらが x 軸方向に沿って色相(Hue)、すなわち見た目の色が変化するようにした。

ワンショットBRDFは、照明系と撮像系で構成する。照明系は、LED(発光ダイオード)とピンホール、そして照明

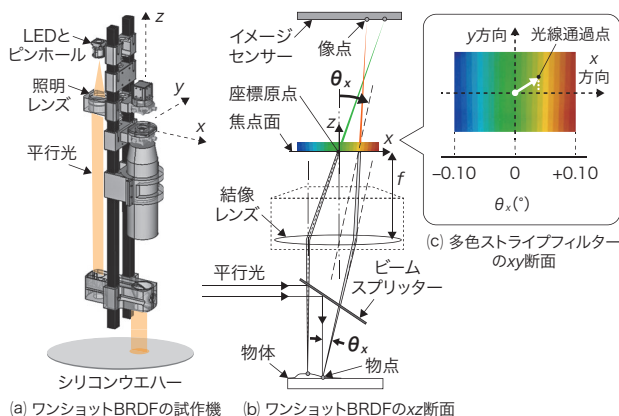


図2. ワンショットBRDFの模式図

ワンショットBRDFは、結像レンズの焦点面上に多色ストライプフィルターを配置し、光線方向ごとに反射光の波長を変化させることで、反射方向に関する情報を得る。

Prototype one-shot bidirectional reflectance distribution function (BRDF) optical system

レンズから成る。照明レンズは、LEDからの発散光を平行光に変換する。ここで、照明レンズの光学性能を向上させるにはハミルトン光学に基づいた設計が有効である⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。照明光は、ビームスプリッターを介して物体に照射する。撮像系は、結像レンズとイメージセンサーで構成する。結像レンズの光軸は z 軸方向とし、焦点距離は f とする。この構成自体は一般的な撮像光学系と同様であり、物体表面の各物点からの反射光を各像点に結像する。通常の撮像では、物点からの反射光は像点の1点に集まり、反射方向に関する情報は得られない。一方、ワンショットBRDFでは、結像レンズの焦点面上に多色ストライプフィルターを配置しているため、光線方向ごとに反射光の波長(色相)を変化させることができる。

例えば、物点から光軸に平行に反射する光線は、フィルター上に定めた座標原点(図中の緑色領域)を通過し、緑色光となる。また、光軸に対して斜めに反射する光線は、座標原点から離れた位置 (x, y) を通過し、 x 位置に応じて色が変化する。光軸に対する反射角 θ_x は、それが十分に小さいとすると、通過位置 x を焦点距離 f で割ることで求められ、式(1)のようになる。

$$\theta_x = \frac{x}{f} \quad (1)$$

このような、色と光線方向の対応関係は、物点の位置によらず一意に定まる。したがって、撮像画像の各画素の色相から θ_x を取得できる。

反射角の角度分解能は、光てこの原理を応用することにより、 f を大きくすることで向上させることができる。このことは、式(1)からも読み取れる。また、多色ストライプフィルターのストライプ幅を小さくすることで向上させることができる。そこで、結像レンズの f を、通常は望遠レンズとして使用されるレベルの200 mmとし、多色ストライプフィルターのストライプ幅を0.035 mmとした。これにより、極微小欠陥の傾斜角が 0.005° の僅かなものでも捉えられるようにした。イメージセンサーの画素数は、 $5,472 \times 3,648$ ピクセルとした。

3. 3D形状の計算アルゴリズム

物体表面からの反射光は、一般的に、正反射方向の強度が最も強くなる。特に、物体表面がシリコンウエハーのように滑らかであると、反射光はほぼ正反射成分だけとなる。正反射方向は、図3に示すように、物体表面に入射する光の方向と物体表面の法線方向とで張られる平面(入射面)内で一意に決まる。そのため、正反射方向と入射方向が分かれば、法線方向を算出できる。ワンショットBRDFを用いると、入射方向は既知であり、反射方向は色によって特

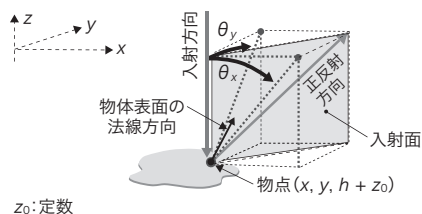


図3. 光の入射方向・正反射方向及び物体表面法線方向の関係

既知である物体表面への入射光の方向と、反射光の色によって特定できる正反射方向から、物体表面の法線方向を一意的に決定できる。

Relationship between incident and reflection directions and normal directions of object surface

定できる。そのため、法線方向を一意的に決定できる。

物体表面の物点の高さを h として法線方向と正反射方向との関係を用いると、 h は正反射光の反射角 θ_x 及び θ_y を用いて次の偏微分方程式(2)で記述できる⁽³⁾。

$$\nabla h(x, y) = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

この式は、一つの軸に対する反射角成分からその軸に沿ったプロファイルを算出できる。そのため、対象領域の端部が平坦ならば、その平坦部を起点にして算出したプロファイルを並べることで、3D形状を求められる。このように、ワンショットBRDFで得られた1枚の画像だけから高さ分布を計算できる。

式(2)を解くために、図4のような教師なしのDNNを利用したアルゴリズムを構築した。ここで、入力は一ショットBRDFによる撮像画像であり、画素位置を (x_i, y_i) ($i=1, \dots, M$)とし、画素の色相から算出した反射角 θ_x の値を θ とする。このアルゴリズムは、GPU (Graphics Processing Unit) による並列化で高速化が可能であり、特に、入力画像の画素数が大きいほど、効果が顕著に現れると考えられ

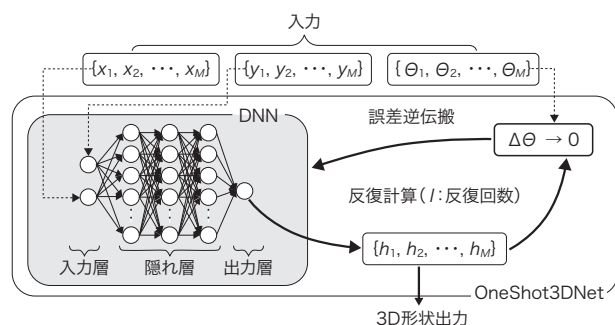


図4. DNNを用いた3D形状の再構成アルゴリズム

誤差逆伝搬法によって、反復計算ごとにDNNを最適化しながら $\Delta\theta$ をゼロに近づけることにより、高さ分布が理想値に近づいていく。

3D reconstruction algorithm based on DNN

る。ここでは、このアルゴリズムをOneShot3DNetと呼ぶ。

OneShot3DNetでは、訓練データを事前に用意する必要なしに、式(2)を反復計算で解ける。ここで損失量 $\Delta\theta$ は、式(2)に基づき、式(3)と定義する。 Δ 付き記号は、各記号の微小量を表す。

$$\Delta\theta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{2\Delta h(x_i, y_i)}{\Delta x} + \theta_i \right| \quad (3)$$

この $\Delta\theta$ がゼロになると式(2)が満たされる。そこで、誤差逆伝搬法によって反復計算ごとにDNNを最適化しながら $\Delta\theta$ をゼロに近づける。これにより、高さ分布が理想値に近づいていく。DNNはPython言語向けの機械学習ライブラリーであるPyTorchを用いて実装し、一つの入力層と三つの隠れ層（各100ノード）、及び一つの出力層から構成した。

4. 3D計測技術の実験検証

開発した技術の妥当性を確かめるために、シリコンウエハー表面の高低差ナノレベルのリッジ（隆起）極微小欠陥をテストサンプルとして用いた。スキニング型白色干渉計で精密に実測したこのリッジの最大高さは32 nmであり、横幅は約100 μm である。

図5(a)は、ワンショットBRDFの試作機によって撮像した未処理画像である。図5(b)は、その画像からリッジ周辺を切り出して拡大し、色相と反射角の関係に基づいて反射角分布を算出したものである。撮像の視野は12×8 mmであり、画素サイズは2.18×2.18 μm である。

図5で示した反射角分布を、OneShot3DNetアルゴリズムに入力することでリッジの3D形状を再構成する。図6は、反復計算回数 l に対する $\Delta\theta$ の変化を示す。複数の異なる

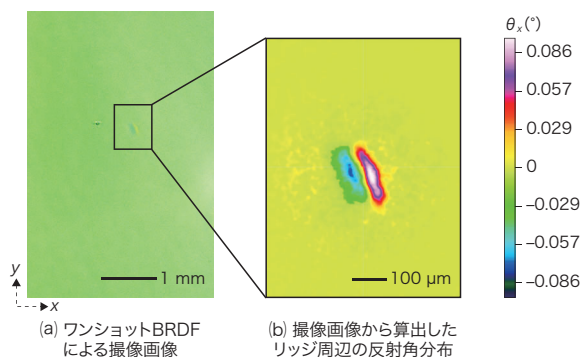


図5. ワンショットBRDFによる撮像画像と反射角分布の算出結果

ワンショットBRDFによる撮像画像のリッジ周辺を切り出して拡大し、反射角分布のカラーマップに変換した。

Image captured using prototype optical system and angular distribution of reflected light converted from captured image

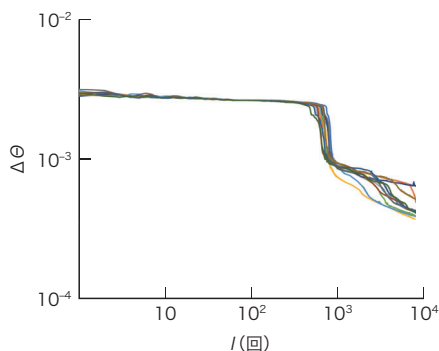


図6. $\Delta\theta$ と l の関係

l が1,000回を超えると $\Delta\theta$ は急激に小さくなり、 10^{-3} オーダー以下となる。

Relationship between loss ($\Delta\theta$) and iteration number (l)

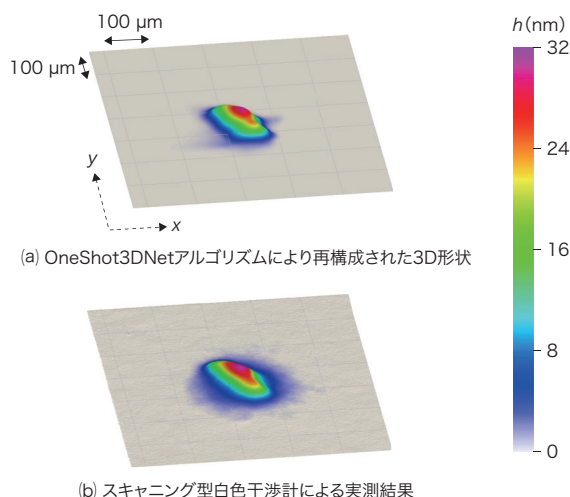


図7. 開発手法による3D形状の再構成結果とスキャニング型白色干渉計による実測結果の比較

開発手法による3D形状の再構成結果と実測結果は良く一致しており、誤差は $-18 \sim +6\%$ の範囲であった。

Comparison of reconstructed 3D shape and measurement data obtained by scanning white-light interferometer

色の線は、DNNの初期設定がそれぞれ異なることを示す。 l が1,000回を超えると、 $\Delta\theta$ は急激に小さくなり、 10^{-3} オーダー以下となることが分かる。

図7(a)は、 l を8,000回にしたときに再構成された3D形状の斜視図であり、図7(b)はスキャニング型白色干渉計で時間を掛けて精密に実測した表面の斜視図である。両者は良く一致しており、誤差は $-18 \sim +6\%$ の範囲であった。これは製造工程での検査として十分に実用的であると考えられる。

5. あとがき

開発した技術により、シリコンウエハー表面のナノレベル

の高低差を持つ極微小欠陥でも、1枚の画像から3D形状の再構成が可能であることを実証した。撮像光学系には光でこの原理を応用し、反射光の微細な方向変化を色相情報として捉えるカラーマッピング技術を導入した。これにより、傾斜角が僅かな欠陥も高感度に検出できるようになった。

更に、教師なしのDNNを用いて、撮像画像から3D形状を再構成するアルゴリズムを開発した。シリコンウエハー表面のナノレベルのリッジ欠陥に対して開発技術を適用した結果、精密計測との一致度は高く、誤差は $-18 \sim +6\%$ の範囲に収まり、製造工程での検査用途として十分な実用性が確認された。加えて、この技術は 12×8 mmの広い視野でもナノレベルの欠陥検出が可能であり、半導体をはじめとする多様な製造工程における迅速な外観検査の実現、品質の向上、及び生産効率の改善に大きく貢献できると考えられる。

文 献

- (1) 大野博司, ほか, 微小欠陥を瞬時に鮮明な画像にできる撮像技術. 東芝レビュー. 2021, **76**, 6, p.38-41. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2021/06/f03.pdf>>, (参照 2025-07-18).
- (2) Ohno, H. One-shot color mapping imaging system of light direction extracted from a surface BRDF. OSA continuum. 2020, **3**, 12, p.3343-3350.
- (3) Ohno, H. One-shot three-dimensional measurement method with the color mapping of light direction. OSA continuum. 2021, **4**, 3, p.840-848.
- (4) Nicodemus, F. E. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. Appl. Opt. 1965, **4**, 7, p.767-775.
- (5) Ohno, H. Symplectic ray tracing based on Hamiltonian optics in gradient-index media. J. Opt. Soc. Am. A. 2020, **37**, 3, p.411-416.
- (6) Ohno, H.; Usui, T. Points-connecting neural network ray tracing. Opt. Lett. 2021, **46**, 17, p.4116-4119.
- (7) Ohno, H.; Usui, T. Gradient-index dark hole based on conformal mapping with etendue conservation. Opt. Express. 2019, **27**, 13, p.18493-18507.



大野 博司 OHNO Hiroshi, Ph.D.

総合研究所 先端デバイスR&Dセンター 機械・システム研究部
博士(理学) 日本光学会・応用物理学会・画像電子学会・
精密工学会・Optica・SPIE会員
Mechanical Systems R&D Dept.



加納 宏弥 KANO Hiroya

総合研究所
先端デバイスR&Dセンター 機械・システム研究部
日本光学会・日本機械学会会員
Mechanical Systems R&D Dept.



大野 啓文 OHNO Akifumi

東芝情報システム(株)
エンベデッドシステム事業部 商品企画部
Toshiba Information Systems (Japan) Corp.