

速報

# 半導体ベアウエハ表面ナノ欠陥の超解像光学式計測に関する研究

工藤 良太\*, 高橋 哲\*, 高増 潔\*

Super-resolution optical inspection for nano-scale defects on surface of bare silicon wafer

Ryota KUDO, Satoru TAKAHASHI and Kiyoshi TAKAMASU

Key words : defect inspection, super-resolution optics, structured illumination, silicon bare wafer, Gaussian spot illumination(GSI)

## 1. 緒言

半導体ベアウエハ表面のナノ欠陥の光散乱計測<sup>1)</sup>においては、マイクロラフネスによって発生するノイズの影響に埋もれている欠陥からの信号を検出することは、検出する欠陥のサイズが小さくなるほど困難を増す。ナノ欠陥計測を高SN比で行うために、変調照明超解像<sup>2)</sup>における照明方法としてガウシアンスポット照明を採用することによる超解像光学式検査方法を提案する。この方法は、ガウシアンスポット照明パターンを照明領域を重複させつつナノオーダーでシフトさせ、複数の光散乱像を取得する。複数像に対して計算機による後処理を加えることで、ガウシアンスポット照明のナノシフトによる情報を解像結果に反映させ、通常的手法では得られないスポット内の情報を再現する画像を得るといものである。計算機シミュレーションにより提案手法の解像特性について調査した。検出対象の欠陥として設定した1点散乱体の周囲にベアウエハ表面のマイクロラフネスを想定しランダムなノイズを付加した条件下で超解像処理を行った結果、SN比が向上し、一様照明やスポット照明走査の計測方法<sup>3)</sup>では発見困難と思われる欠陥からの信号を判別できる画像を得た。

## 2. 変調照明シフトによる解像度向上法

### 2.1 ガウシアンスポット照明シフトによる取得散乱光の微小変調

PZTなどの微小駆動機構を用いることにより試料面上でガウシアンスポット照明をナノオーダーでシフト(変位)させる。ガウシアンスポット照明がシフトするとCCDで得られる散乱光の像は微小に変調する(図1)。

### 2.2 ガウシアンスポット照明シフトによる超解像処理手順

光散乱変調を含む複数の像を後処理することにより超解像像を行う。超解像像のための手順を以下に示す。

- (1) 解像を行うべきウエハ上に散乱パラメータを未知数として設定(推定解の設定)する。
- (2) レイリー限界に支配される像を実験的に得る。

- (3) ガウシアンスポット照明をナノシフトすることで、複数の算出像および実験による取得像を得る。
  - (4) 算出像と取得像の誤差を推定解にフィードバックし、再構成像を得て、再構成像を推定解と置き換える
  - (5) 逐次的に再構成計算(4)を繰り返して、解を収束させることによって、散乱体の超解像イメージを行う。
- 以上の手順をフローチャートにまとめたものが図2である。

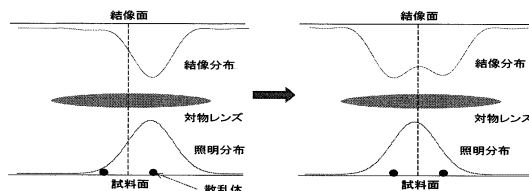


図1 ガウシアンスポット照明シフトによる結像の微小変調

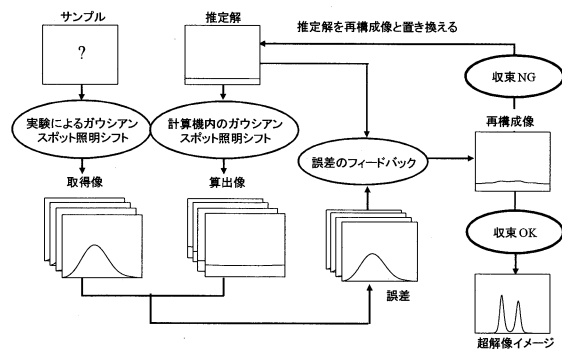


図2 超解像フローチャート

## 3. 超解像シミュレーション

提案手法による欠陥検出可能性を検討するためフーリエ光学に基づく計算機シミュレーションを行った。シミュレーション条件を表1に示す。ベアウエハ表面の欠陥検出可能性を検証するため、マイクロラフネスを想定したノイズをサンプルに加えて、超解像シミュレーションを行った。対象サンプルは検出対象である1点散乱体を中央に配置し、その散乱体に対して、最大値で10%の散乱効率を持つランダムノイズをバックグラウンドに与えたものである(図3(a))。このサンプルを一様照明し、図3(b)のような結像分布を得た。図3(b)はSN比の低い画像であり、中央部に検出したい散乱体由来の信号によるわ

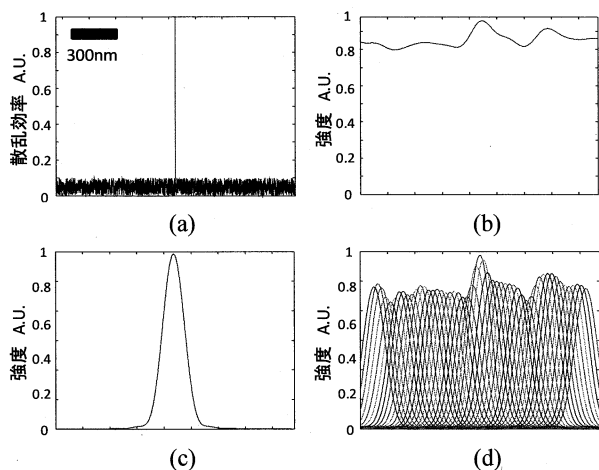
\* 東京大学工学系研究科精密工学専攻: 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1工学部14号館  
The University of Tokyo, Department of Precision Engineering  
<学会受付日:2012年7月4日>

ずかなピークが見られるものの、周囲のノイズと比較して散乱体を検出するのは困難であると考えられる。信号のピーク値と信号の次に強いピークとの比(信号ピーク/第二ピーク)を取ると、1.05 となる。次にガウシアンスポット照明による結像について検討する。散乱体位置とスポット照明のピーク位置を一致させた状態で結像分布を得たイメージが図 3(c)である。散乱体からの情報は空間的広がりをもって結像されている。スポット照明をシフトさせつつそれぞれの位置での結像分布を同時に表示すると図 3(d)ようになる。包絡線を取ると図 3(b)とほぼ同様の傾向を示しており、欠陥のある位置において周囲よりある程度大きなピークが見られる。信号ピーク/第二ピークは 1.12 である。一様照明と比較して信号の判別はしやすくなっているものの明確に欠陥があると判断できるほどではない。スポットをシフトさせつつ欠陥由来の信号を探索する従来の方針では欠陥を検出するのは困難であると思われる。

得られた複数の結像分布を用いて超解像処理を行った結果が図 4 である。周囲のノイズに比較して領域中央部の信号が大きい。信号ピーク/第二ピークは 1.28 である。SN 比が向上し、一様照明やスポット照明走査と比較して、欠陥からの信号を検出しやすくなっている。超解像処理によりノイズ情報に埋もれた欠陥の信号の検出可能性が示された結果である。

表 1 シミュレーション条件

光源波長	488nm
スポット照明径:D	300nm
対物レンズ NA	0.95
レイリー限界	313nm
スポット照明シフト回数	50
スポット照明シフトステップサイズ	50nm
再構成ループ回数	5000



(a)ノイズを加えた 1 点散乱体サンプル (b)一様照明による取得結像分布 (c)スポット照明による取得結像分布 (d)スポット照明シフトによる取得結像分布の変化

図 3 ノイズ混入条件でのシミュレーション像

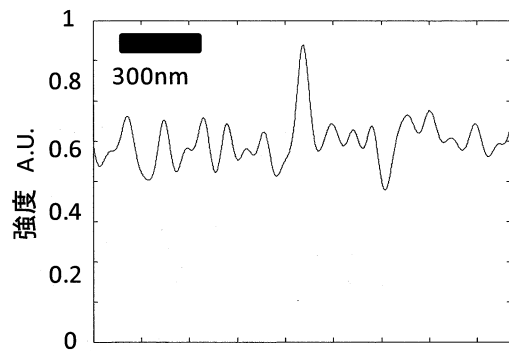


図 4 ノイズによって信号取得困難な対象欠陥に対する、ガウシアンスポット照明シフトによる超解像処理結果

#### 4. 結言

半導体ベアウエハ表面のナノ欠陥の計測を高 SN 比かつ高解像度で行う手法を提案した。提案手法は、ガウシアンスポット照明を走査することによる超解像光学式検査方法である。この方法は、PZT を用いてガウシアンスポット照明パターンを、照明領域を重複させつつナノオーダーでシフトさせることにより取得した複数の光散乱像に対して計算機による後処理を加えることで、ガウシアンスポット照明のナノシフト情報を解像結果に反映させ、信号強度を回復させ、スポット照明内部の構造の解像を行うというものである。

フーリエ光学に基づいた計算機シミュレーションにより提案手法の特性について調査した。検出対象の欠陥である 1 点散乱体の周囲に、ベアウエハ表面のマイクロラフネスを想定した最大で散乱体の 10%程度の散乱効率をもつようなランダムなノイズを付加したサンプルを用いて、提案手法によりノイズの影響を軽減できるか検証した。上記のサンプルに対して通常の光学的計測を行うと、一様照明によっては信号ピーク/(ノイズ由来の)第二ピークの値が 1.05、ガウシアンスポット照明の走査によっては 1.12 であった。得たい欠陥からの信号がノイズの影響で判別困難である。一方、サンプルに対し、ガウシアンスポット照明をナノシフトさせて複数の結像分布を取得し、その複数画像をもとに超解像処理を行った結果、SN 比が向上し、信号ピーク/第二ピークが 1.28 と大きく改善した。通常の計測法では発見困難な欠陥からの信号の判別可能性が向上した画像を得た。提案手法にノイズの影響から検出した信号を抽出する効果が存在することが確認できた。

今後は現実の半導体ベアウエハ上の欠陥により近いモデルを用いたシミュレーション、また実験により、提案手法の実現可能性をさらに詳細に検討する。さらに提案手法の SN 比の向上効果を量的に見積もる。

#### 5. 参考文献

- 1) F. Hirata, Y. Tatsuno, S. Takahashi, Y. Takaya, T. Miyoshi: Discrimination of Silicon Wafer Surface Defects by Laser Scattered Defect Pattern, Journal of Japan Society of Grinding Engineers, 42, 2 (1998) 85.
- 2) S. Usuki, H. Nishioka, S. Takahashi, K. Takamasu: Super-Resolution Optical Measurement for Ultra-Precision Machined Surface Defects by Using Structured Light Illumination Shift (1st report), J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 74, 5 (2008) 498.
- 3) H. Inoue et al.: Measurement of Ultra Fine Defects on the Si wafer Surface Using a Laser Light Scattering Method, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 68, 10 (2002) 1337.