

# 変調照明シフトによる超精密加工表面の超解像光学式欠陥計測に関する研究 (第1報) \*

— 解像特性の理論的検討 —

臼杵 深\*\* 西岡宏晃\*\*\* 高橋 哲† 高増 潔†

Super-Resolution Optical Measurement for Ultra-Precision Machined Surface Defects by Using Structured Light Illumination Shift (1st report)  
- Theoretical Verification of Resolution Property -

Shin USUKI, Hiroaki NISHIOKA, Satoru TAKAHASHI and Kiyoshi TAKAMASU

Demands for ultra-precision machined surface such as semiconductor wafer are rapidly growing. However, shrinking design rules of the semiconductor reduce process yield in manufacturing line. One of the biggest factors of the reduced yield is a nano-defect on the large area surface, so we must develop a defect measurement system with higher resolving power, throughput, non-destructiveness and robustness. Therefore an optical method with higher resolving power beyond the Rayleigh limit is required. In order to develop an optical inspection system with high resolving power, we have proposed the application of the structured light illumination (SLI) microscopy for the defect measurement of the ultra-precision machined surface. It is expected that the resolving power of the system exceed the Rayleigh limit by the SLI, and the robustness is enhanced by a image reconstruction algorithm using multiple images with shifts of the SLI. In the first report, to verify the resolution property of the method, we carried out theoretical examination and the computer simulation. As a result, the proposed method makes it possible to observe a structure with robustness and higher resolution beyond the Rayleigh limit and it is suggested that this method is available to measure defects on the ultra-precision machined surface.

**Key words:** optical defect measurement, ultra-precision machined surface, structured light illumination, super-resolution

## 1. 緒 言

近年、デジタル家電製造業界の著しい発展に伴って、半導体ウエハに代表される超精密加工表面の需要が高まっている。しかしながら、半導体デバイスの配線パターンの微細化による生産ラインにおける歩留まりの低下が深刻な問題となっている<sup>1)</sup>。歩留まり低下の主な要因の1つは微小欠陥によるものであり、超精密加工表面における欠陥は粒子状、フィルム状の付着異物から表面上のスクラッチ等に至るまで様々であることから、欠陥の有無の検出以外にも欠陥レビュー（欠陥部の詳細な構造の可視化、発生原因の追求）が強く求められている<sup>2)</sup>。すなわち、高い解像力が欠陥計測技術に要求される。また、300mm 大口径ウエハの生産に伴って、高いスループット性をもつ計測技術も求められている。つまり、高解像力を持ち且つ高スループットな欠陥計測技術の開発が急務である<sup>3)</sup>。従来の半導体欠陥計測技術は主として光学式と電子ビーム式に大別される。光学式に関しては、暗視野光学系により微小欠陥を検出する技術<sup>4)</sup>があるが、解像力は光源波長および対物レンズのNAで制限され、波長以下の微細構造の解像が困難という問題がある。また、高解像力を有する電子ビーム式検査は計測時に真空環境を要するという問題や、コンタミネーションによる計測対象へのダメージも懸念される。従って、レイリー限界を超えた高い解像力を有する光学式の計測法が求められている。

そこで我々は空間的に変調され周期的な分布を有する照明

(structured light illumination) による超解像顕微法<sup>6)~8)</sup>を生産ラインにおける超精密加工表面の欠陥計測に適用することを提案する<sup>9)</sup>。変調照明を用いた超解像顕微法は、Far-fieldにおける光学的観察手法でありながら、変調照明の空間周波数情報を結像分布に反映させることで、レイリー限界を超えた解像が可能であるため、有効な超解像アプリケーションとしての実用化を目指し、広く研究開発が進められている。しかし、これまで、そのアプリケーションとしては、バイオイメージング<sup>6)~8)</sup>などの基礎研究用途が中心であり、生産ラインにおける検査技術といった製造現場への適用例については未だ確立されたものは報告されていない。

本論文では、変調照明を用いた超解像顕微法において、照明シフトと共に複数像を取得する特徴を積極的に活かすことで、様々な外乱ノイズが想定される製造現場における超解像光学式欠陥計測への適用を試みる。具体的には、ノイズに対するロバスト性向上を目指し、多数の照明シフトによる複数像を反映可能な逐次的解像アルゴリズムを構築する。そして計算機シミュレーションにより、構築アルゴリズムによる解像特性の理論的検討を行い、提案手法の有効性について検討する。

## 2. 変調照明シフトによる超解像光学式欠陥計測手法

### 2.1 変調照明シフトによる超解像欠陥計測法の提案

一般的な光学顕微鏡の解像力の限界は、近接する二つの点物体の像が二つであると識別できる最小間隔で定められており、レイリー限界解像力  $R_{\text{Rayleigh}}$  は

$$R_{\text{Rayleigh}} = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

となる。ここで、NA は対物レンズの開口数、 $\lambda$  は光源波長である。こ

\* 原稿受付 平成 19 年 7 月 4 日

\*\* 学生会員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

\*\*\* 東京大学大学院 (現, 東京電力株式会社; 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

† 正 会 員 東京大学大学院

の式は光源波長を一定とすると、対物レンズの  $NA$  により限界解像力が定まることを意味する。換言すると、空間周波数領域において対物レンズの瞳関数で定まる遮断周波数より高い周波数を有する物体構造は解像不能ということになる。つまり、レイリー限界以上の解像力を達成するためには、像に遮断周波数より高い周波数の情報を反映させる必要がある。そこで、高周波の情報として変調照明を用いることにより超解像を行う。変調照明シフトによる散乱光像変調の概念図を図1に示す。物体に変調照明を行い、照明位置をシフト(位相シフト)させる。シフト位置毎の変調像を複数取得し、それらによって解像計算を行う。変調照明としては、二光束干渉による定在波照明<sup>7)</sup>、定在エバネッセント光<sup>8)</sup>、マスクの縮小結像による方法<sup>10)</sup>等が挙げられる。例えば、空間的に高い周波数でスリットが刻まれたマスクを高  $NA$  の対物レンズおよび高倍率の結像光学系で縮小結像させることにより、空間的に高い周波数の分布を有する変調照明が可能となる。よって、計算機による後処理で高周波情報を反映させることが出来れば、レイリー限界を超えた解像が期待される。

さらに、本手法において、変調照明を複数回シフトさせ、シフト位置毎に取得した複数像により解像計算を行う場合、解像プロセス自体が本質的にランダムノイズの平均除去効果を含むため、ノイズに対してロバストな解像手法の実現が期待でき、生産ラインにおける計測法として有効であると考えられる。

## 2.2 変調照明シフトによる超解像の原理

一般に散乱光分布  $s(x)$  の結像分布  $r(x)$  は点像分布関数  $psf(x)$  を用いて

$$r(x) = psf(x) \otimes s(x) \quad (2)$$

と表される。すなわち散乱光分布  $s(x)$  と点像分布関数  $psf(x)$  のコンボリューションによって結像分布  $r(x)$  が決まる。式(2)をフーリエ変換すると

$$R(f) = OTF(f) \cdot S(f) \quad (3)$$

となる。ここで、結像  $r(x)$  のフーリエ変換を  $R(f)$ 、散乱光分布  $s(x)$  のフーリエ変換を  $S(f)$ 、点像分布関数  $psf(x)$  のフーリエ変換を  $OTF(f)$  とおいた。この  $OTF(f)$  が光伝達関数 (Optical Transfer Function) であり、結像系の周波数伝達特性を表す。また、変調照明を用いた場合、散乱光分布の物体分布および照明分布に対する線形性を仮定すると、結像分布  $r(x)$  は式(2)より

$$r(x) = psf(x) \otimes [i(x) \cdot a(x)] \quad (4)$$

となる。ここで、 $psf(x)$  が点像分布関数、 $i(x)$  が照明分布、 $a(x)$  が物体分布である。例えば、変調照明分布  $i(x)$  を

$$i(x) = \frac{1 + \cos(2\pi f_m x + \theta)}{2} \quad (5)$$

の様な周期的関数であるとし(ただし変調周波数を  $f_m$ 、位相シフトを  $\theta$  として強度の最大値が1となるように規格化)、式(5)を式(4)に代入して両辺をフーリエ変換すると、物体分布  $a(x)$  のフーリエ変換を  $A(f)$  として

$$R(f) = \frac{1}{2} OTF(f) A(f) + \frac{1}{4} e^{i\theta} OTF(f) A(f - f_m) + \frac{1}{4} e^{-i\theta} OTF(f) A(f + f_m) \quad (6)$$

となる<sup>7)</sup>。式(6)は照明分布の変調周波数  $f_m$  が結像分布の帯域に反映していることを意味する。変調照明による超解像顕微鏡法は、この帯域拡大を超解像原理としている。

## 2.3 レイリー限界値に基づいた限界解像力の導出

本論文では、前節で示した変調照明による超解像原理を生産ラインにおける計測法として適用するにあたり、解像特性を定量的

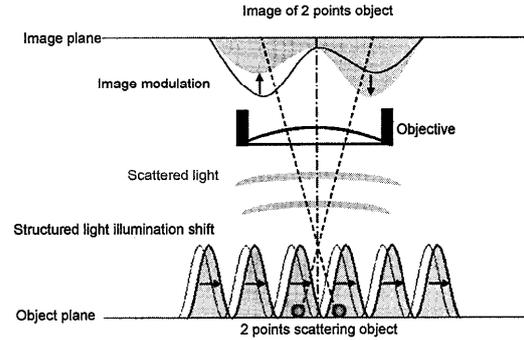


Fig.1 Schematic diagram of the structured light illumination shift and the scattered light image modulation

に評価するために、レイリー限界値を指標として限界解像力の定式化を試みる。式(6)において、第1項では物体分布のフーリエ変換  $A(f)$  に光伝達関数  $OTF(f)$  がかかった形になっている。これは一様照明を用いた結像と同様であり、結像帯域  $f$  は遮断周波数  $f_c$  を用いて

$$-f_c \leq f \leq f_c \quad (7)$$

となる。一方、式(6)の第2項および第3項では物体分布のフーリエ変換  $A(f)$  を  $\pm f_m$  平行移動してから光伝達関数  $OTF(f)$  がかかった形になっている。したがって、照明分布の変調周波数情報を反映させた像は第1項から第3項を合成して得られ、結像帯域は最終的に

$$-f_c - f_m \leq f \leq f_c + f_m \quad (8)$$

となる。これは、変調照明を用いると、帯域が照明分布の変調周波数  $f_m$  分拡大することができることを表している。一般の顕微鏡結像系において  $OTF$  は対物レンズの瞳関数と一致し、レイリー限界解像力  $R_{\text{Rayleigh}}$  は遮断周波数  $f_c$  を用いて

$$R_{\text{Rayleigh}} = \frac{1.22}{f_c} \quad (9)$$

と表現される。変調照明を用いた場合の限界解像力  $R_{\text{SLI}}$  は式(8)および式(9)から

$$R_{\text{SLI}} = \frac{1.22}{f_c + f_m} \quad (10)$$

となる。照明分布の変調周波数  $f_m$  は、変調照明のピッチ  $T$  (照明強度分布のピーク間距離) を用いて

$$f_m = \frac{1}{T} \quad (11)$$

と表され、式(1)および式(9)から

$$f_c = \frac{2NA}{\lambda} \quad (12)$$

であることから、限界解像力  $R_{\text{SLI}}$  は

$$R_{\text{SLI}} = \frac{1.22}{\frac{2NA}{\lambda} + \frac{1}{T}} \quad (13)$$

となる。

## 2.4 変調照明による解像特性

定式化した変調照明による限界解像力の式(13)に基づき解像特性を定量的に検討する。図2に光源波長を488nm、対物レンズ  $NA$  を0.95とした場合の変調照明ピッチに対する限界解像力  $R_{\text{SLI}}$  をレイリー限界値とともに示す。変調照明のピッチは、例えば高  $NA$

によるマスクの縮小結像を用いることで 300nm 程度が期待できる<sup>11)</sup>。この場合、レイリー限界値313nmに対して限界解像力169nmが実現可能である。よって、本手法により従来のおよそ2倍の解像力が期待できることがわかる。

図3に光源波長を488nm, 変調照明ピッチを300nmとした場合の対物レンズNAに対する限界解像力 $R_{SLI}$ をレイリー限界値とともに示す。図3より低NAの対物レンズを用いた場合においてもレイリー限界を超えて高い解像力を実現することが可能であることが確認できる。よって、深い焦点深度で高い解像力が実現可能なため、計測対象の振動に強く、高速走査が可能となり、高いスループットでの欠陥計測が期待できる。

### 3. 超解像再構成アルゴリズムの構築

#### 3.1 光学結像のマトリックスによる記述

変調照明による限界解像力を定式化し、レイリー限界を超えた解像が可能であることを確認したが、拡大された帯域情報は通常の結像方法では像に反映されない。そこで、変調照明をシフトさせシフト位置毎の複数像を取得しコンピュータで後処理することで拡大された帯域情報を像に反映させる。そのためのアルゴリズムの構築を行う。

通常の光学結像はシフトインバリエント(点像分布関数の分布形状は物体の絶対的位置によらず不変)であるため、点像分布関数と物体分布のコンボリューションで表現することが可能であり、よって、マトリックスによって線形システムとして記述することが可能である。式(4)の離散表現は

$$r_i = \sum_{j=1}^N psf_{|i-j|} i_j a_j \quad (1 \leq i \leq N) \quad (14)$$

で表される。ここで、 $r_i$ ,  $psf_{|i-j|}$ ,  $i_j$ ,  $a_j$  は結像分布  $r(x)$ , 点像分布関数  $psf(x)$ , 照明分布  $i(x)$ , 物体分布  $a(x)$  を離散表現したものである。添え字の  $i$  は像側の離散化位置,  $j$  は物体側の離散化位置を表している。式(14)をマトリックスで記述したものが

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_i \\ \vdots \\ r_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} psf_{|0|} i_1 & \cdots & psf_{|1-N|} i_j & \cdots & psf_{|1-N|} i_N \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ psf_{|i-1|} i_1 & & psf_{|i-j|} i_j & & psf_{|i-N|} i_N \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ psf_{|N-1|} i_1 & \cdots & psf_{|N-j|} i_j & \cdots & psf_{|0|} i_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_j \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} \quad (15)$$

である。ここで光学結像の係数行列  $K$  を

$$K = \begin{pmatrix} psf_{|0|} i_1 & \cdots & psf_{|1-N|} i_j & \cdots & psf_{|1-N|} i_N \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ psf_{|i-1|} i_1 & & psf_{|i-j|} i_j & & psf_{|i-N|} i_N \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ psf_{|N-1|} i_1 & \cdots & psf_{|N-j|} i_j & \cdots & psf_{|0|} i_N \end{pmatrix} \quad (16)$$

と定義すると、光学結像は物体分布行列  $A$  と結像分布行列  $R$  より  $R = KA$  (17)

となる。係数行列  $K$  は物体分布行列  $A$  を結像分布行列  $R$  に変換する行列であり、式(17)は光学結像が線形連立方程式で表現可能であることを意味する。 $R$  が拡大された帯域情報を有し、光学系の点像分布関数および照明分布が既知であれば式(17)の逆問題を解くことによって物体分布  $A$  の超解像が可能である。

#### 3.2 複数像による逐次的超解像再構成アルゴリズム

一般的に式(17)で表されるような光学結像の線形連立方程式の

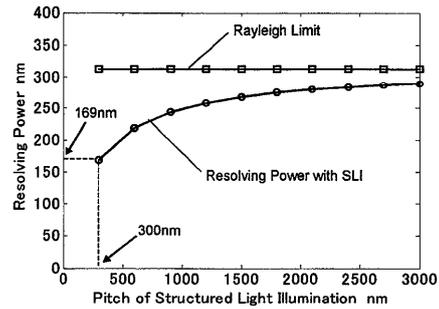


Fig.2 Relationship between resolving power and pitch of structured light illumination

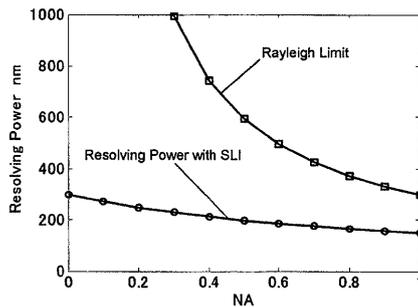


Fig.3 Relationship between resolving power and NA of objective

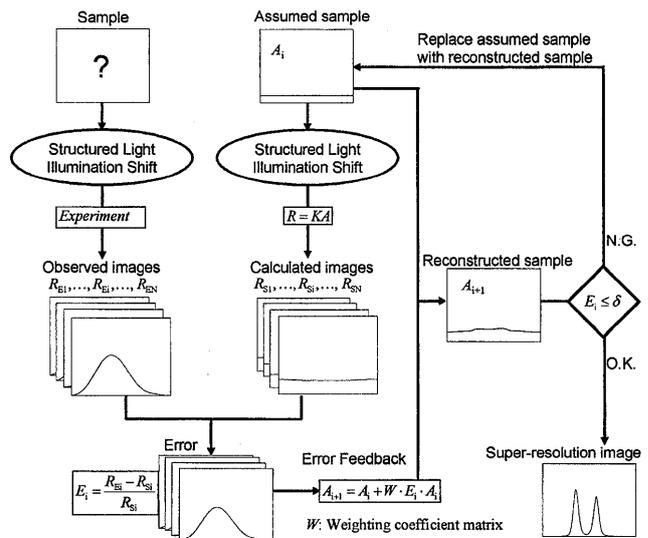


Fig.4 Block diagram of iterative super-resolution reconstruction based on multiple shift of illumination

逆問題は数学的に条件が悪く、特に取得情報にノイズが混入した場合に解の収束が困難となる。本論文では、複数照明シフトを随時適用させながら推定解を再構成していく逐次的超解像再構成アルゴリズムを構築した<sup>12)</sup>。本アルゴリズムの考え方をブロックダイアグラム(図4)に示し、手順を以下に示す。

- (1) 解像対象の物体分布を未知数として設定(推定解の設定)し、物体分布および変調照明分布に線形な強度をもつ散乱光の算出像を得る。つまり、物体分布に初期値として一定値  $A_1$  を与え、計算機上でシフト位置  $i$  における初期推定算出像

$$R_{Si} = KA_1 \quad (18)$$

を得る。

- (2) 実験による取得像  $R_{Ei}$  を得る。 $R_{Ei}$  は結像光学系により高周波の

帯域が欠落した像である。

(3)変調照明のシフト位置  $i$  における算出像と取得像との誤差

$$E_i = \frac{R_{Fi} - R_{Si}}{R_{Si}} \quad (19)$$

求める。つまり、算出像と取得像の差異を算出像に対する割合として求める。

(4)誤差  $E_i$  を推定解に分配(フィードバック)し再構成解を得る。つまり、(3)で求めた差異の割合を利用して推定解に修正を加える。ただし、物体面と結像面の(点像分布関数と照明分布で決定される)寄与関係を考慮に入れて、推定解の修正を行う。具体的には、シフト位置  $i$  における誤差分配行列  $D_i$  は

$$D_i = W \cdot E_i \quad (20)$$

で表される。ここで、 $W$  は重み係数行列で、結像係数行列  $K$  の各成分を、 $K$  の行ごとの和で除算したものに置換した行列であり、物理的には結像誤差の推定解への寄与率を意味する。これにより、推定解からの修正変化分  $D_i \cdot A_i$  が求まる。よって、再構成解  $A_{i+1}$  は

$$A_{i+1} = A_i + D_i \cdot A_i \quad (21)$$

となる。

(5)再構成像を改めて推定解とし、シフト位置  $i+1$  において同様の再構成計算を行う。画像数の合計が  $N$  の場合、 $N$  回の再構成を行う。

(6) (1)~(5)の再構成を逐次的に行うことによって、誤差  $E$  を減少させ、解を収束させる。

すなわち、推定解から期待される結像と実験において得られる結像を比較し、それらの差異を係数行列の重みを考慮して次の推定解に反映させる。以上を逐次的に行うことで、推定解を測定試料の物体分布に近づけ、超解像イメージを得る。このような逐次的プロセスにより、多数の照明シフトによる取得像群を解像結果に反映させることが可能である。

#### 4. 計算機シミュレーションによる解像特性の理論的検討

##### 4.1 FDTD 法による微小散乱体からの取得散乱光の解析

本章では、解像能力評価の第一段階として、離散的な散乱体を対象として提案手法の解像特性を検討する。

本節では、まず、変調照明下において離散的な散乱体からの散乱形態を具体的に調べた。ここで、一般的に、散乱体の形状の影響を考慮して散乱現象を解析的に扱うことは困難であるため、FDTD 法(時間領域差分法)に基づいた数値解析手法<sup>13)</sup>により、変調照明下における散乱現象を解析した。そして、FDTD 法により計算した散乱光強度分布において、対物レンズ  $NA$  を考慮することにより、変調照明のシフトに対して離散的な散乱体からの散乱光の結像系を通過する光量(取得散乱光量)がどのような変化をするか調査した。

ここでは、変調照明として二光束干渉による定在波を用い、離散的な散乱体として球状散乱体とエッジを有する散乱体を例に、散乱体の形状依存性を調べた。図5(A)に球状散乱体による解析結果、図5(B)にエッジを有する散乱体による解析結果を示す。それぞれ図(a)にFDTDシミュレーションモデルを模式的に示す。FDTDシミュレーションにおける要素サイズを  $5\text{nm}$  とし、球状散乱体の径およびエッジを有する散乱体の幅は要素サイズを考慮して形状が表現可能な  $50\text{nm}$  とした。光学的な条件は現実的な値を想定し、光源は、波長を  $488\text{nm}$ 、入射角を  $76^\circ$ 、S 偏光とし、シリコンウエハ表面に存在する散乱体に対し変調照明を行った。この場合、変調照明ピッチは  $1080\text{nm}$  となる。図5(b)にFDTD法に基づいて

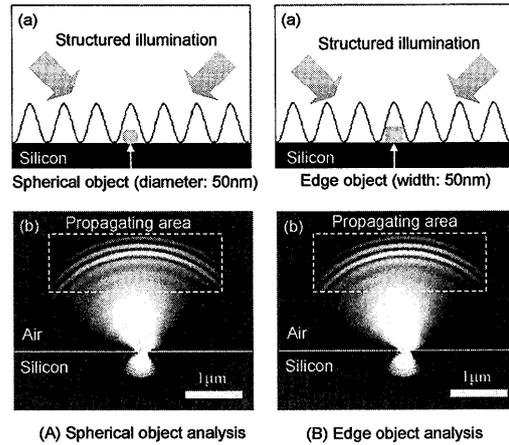


Fig.5 Analysis of scattered light from spherical object and edge object (a) FDTD simulation model, (b) Scattered light distribution

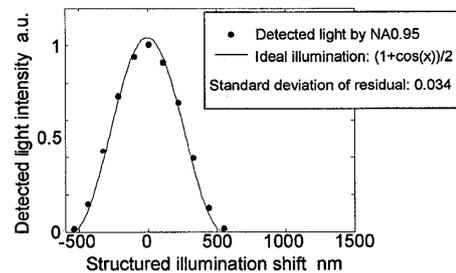


Fig.6 Relationship between structured illumination shift and detected light intensity by FDTD simulation

計算した変調照明下における散乱強度分布の例を示す。両者の散乱形態の差を明確にするために散乱光強度を正規化し、図中に示した散乱光伝播領域において、両者の強度分布の差を求め、領域内において合算したところ領域内散乱強度合計の0.4%程度であった。したがって、球状散乱体とエッジを有する散乱体とで散乱形態はほぼ同等と考えられる。よって、以下の解析では微小散乱体として球状散乱体のみを考えることにする。

変調照明による球状散乱体からの散乱光の散乱角度を求め、対物レンズの  $NA$  を考慮することにより、散乱光の結像系を通過する光量(取得散乱光量)を具体的に計算する。そして、取得散乱光量変化と理想的な照明分布との関係を解析する。例として、対物レンズ  $NA$  が  $0.95$  の場合の取得散乱光量を正規化した変調照明のシフトに対してプロットしたグラフを図6に示す。理想的な照明分布として正弦波状の分布を想定した場合に、取得散乱光量変化の理想的な照明分布からのずれは標準偏差で3%程度であった。これは、 $1080\text{nm}$  の変調照明ピッチに対して、散乱体が十分小さい  $50\text{nm}$  径の散乱体であれば、散乱体の形状によらず理想的な照明強度分布に対応した散乱光量が結像されることを意味する。したがって、この条件のもとで、照明強度に線形な応答を示す散乱光結像を扱うことが可能であることを確認した。

##### 4.2 二点散乱体像による解像特性の検討

提案手法の解像特性を理論的に検討するために、二点散乱体を対象として計算機シミュレーションを行った。

シミュレーションのモデルを図7に、条件を表1に示す。変調照明ピッチ  $300\text{nm}$  に対して、試料面のサンプリングサイズを十分小さい値に設定し、孤立した散乱体を配置することで、前節に示した照明強度に線形な散乱光が結像される条件を満たすことが可能となる。また、変調照明分布(ピッチ)やシフトステップサイ

ズをサンプリングサイズにより離散表現しているため、サンプリングサイズを離散化誤差の影響が生じない値に設定する必要がある。以上の観点から、本シミュレーションにおいては、サンプリングサイズを1.2nmとした。すなわち、離散的散乱体として、照明強度に対して線形に応答する散乱体として扱った。対物レンズのNAを0.95、光源波長を488nmとした。この場合、レイリー限界値は313nmとなる。ここでは、複数のシフト回数を扱うことが可能な構築アルゴリズムの適用性を検証するために、シフトの回数は8回とし、合計9枚の像を計算に用いた。また、逐次的再構成の回数は、解の収束に十分な値である10000回に設定した。上記の解像計算の場合、計算時間は一般的な計算機を用いて1分程度であった。

図8にレイリー限界に相当する313nm間隔の二点散乱体に対して変調照明を行い、照明をシフトして得られた複数像および超解像再構成を行った結果を示す。像の強度変調が照明分布に対応していること、通常の結像において辛うじて解像可能であった二点散乱体が明確に分離されていることが確認出来る。以上から複数像を用いた超解像が実現できた。

次に、二点散乱体の間隔を、スパローの基準に相当する値(250nm)、変調照明帯域から推定される解像限界値(169nm)に設定し、レイリー限界を超えた解像の可能性や解像理論の妥当性を確認した。図9に二点散乱体の解像結果((A): 250nm間隔、(B): 169nm間隔)を示す。同図(a), (b)はそれぞれ、通常の結像、超解像イメージである。250nm間隔の場合、通常の結像において、像強度分布中央に窪みが見られず、平坦部が確認され、スパロー基準に対応していることがわかる。169nm間隔の場合、通常の結像においては、もはや一点散乱体との区別が困難である。一方、超解像イメージにおいては、両者ともに独立な二点として識別が可能である。従って、複数像を構築アルゴリズムに適用することにより、変調照明帯域から推定される解像力の限界が実現できることが確認された。

#### 4.3 冗長シフトによるノイズに対するロバスト性の向上

本超解像手法を生産ラインにおける超精密加工表面の欠陥計測に適用するためにはノイズに対するロバスト性が求められる。本報では、様々な外乱ノイズのうち、特に複数取得像にランダムノイズが混入した場合に特化し、シフト数とノイズに対するロバスト性の関係を調べた。

シミュレーション条件は前節と同様とし、二点散乱体の間隔が169nmの場合において、全ての取得像に最大輝度の30%のランダムノイズを付加した。図10にノイズが混入した二点散乱体の取得像例を示す。このように、ノイズを付加させた複数像を用いて二点散乱体の解像シミュレーションを行った。ここでは、像の複数取得効果(シフト回数の効果)を明確にするために、シフトステップサイズを一定値の30nmとした。

図11にシフト回数が0回、6回、20回の場合の二点散乱体の超解像イメージを示す。シフト数が0回の場合、ノイズの影響で不規則な分布となっているが、6回、20回とシフト回数を増やすことで二点の識別が可能になる。一般に、変調照明による超解像顕微鏡法では、Frohnらの解析<sup>9)</sup>が示すように、変調照明を2回シフトし3枚の像を用いることで変調照明の帯域効果が反映され超解像が可能とされているが、本条件下の様にノイズ混入時においては、更なるシフト回数の増加が解像力向上に反映していることがわかる。なお、このランダムノイズ混入時における解像力向上は、単純な加算平均によるノイズ除去効果を上回ることが確認されており、今後この項目について詳細に解析する予定である。

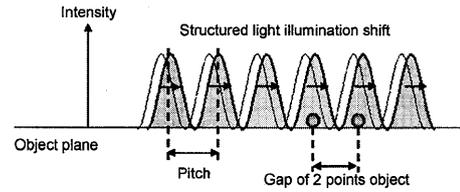


Fig.7 Simulation model for resolving 2 points object

Table1 Parameter setup for super-resolution

Wavelength of source	488nm
Pitch of structured light illumination	300nm
Sampling size	1.2nm
NA of objective	0.95
Rayleigh limit	313nm
Shift times	8
Shift step size	30nm
Iteration Times	10000
Gap of 2 points object	313nm, 250nm, 169nm

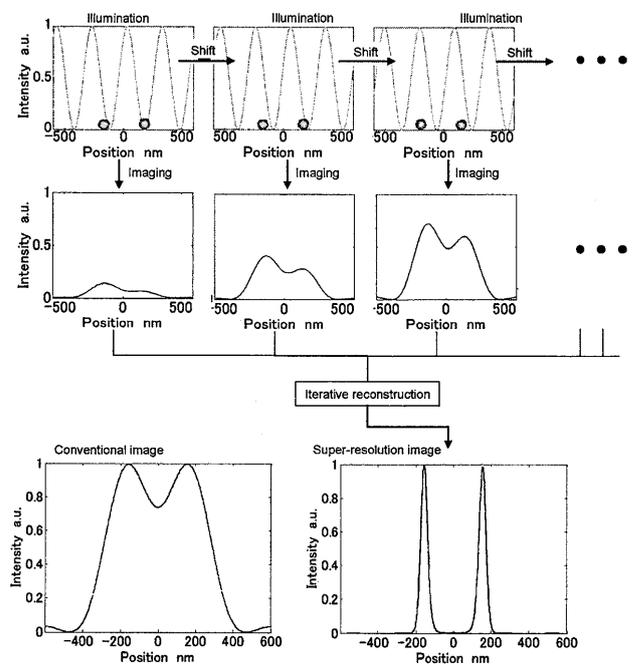


Fig.8 Resolving the Rayleigh limited gap (313nm) by Structured light illumination shift and iterative reconstruction of multiple images

冗長シフトの効果を定量的に評価するために、二点散乱体像の低い方のピーク強度Pおよびバレー強度Vの比V/Pを二点散乱体識別性能の指標とし、シフト回数を変化させてシミュレーションを行った。図12にシフト回数に対するV/Pの平均値を標準偏差とともに示す。データ数はそれぞれのシフト回数に対して20回とした。冗長シフトによりノイズに対するロバスト性が向上し、シフト回数を10回以上とすることにより、30%のノイズ環境下で169nm間隔の二点散乱体を明確に識別できることを確認した。これは、設定シフトステップサイズ30nm、シフト回数が10回で、変調照明1ピッチ分(300nm)の位相条件が揃うことに相当し、解像計算に対し独立性の高い複数シフトがノイズ抑制効果をもたらしたことを意味する。

## 5. 結論

本論文では、変調照明シフトによる超解像法を超精密加工表面

の生産ラインにおける欠陥計測に適用することを提案し、変調照明による限界解像力の定式化、変調照明の冗長シフトの効果を反映させるための逐次的再構成アルゴリズムの構築、計算機シミュレーションによる解像特性の理論的検討を行った。以下に結果をまとめる。

- (1)変調照明の帯域情報を解像結果に反映させることにより、解像力をレイリー限界のおよそ2倍まで高めることが可能であることを示した。
- (2)変調照明による超解像は低 NA (深い焦点深度) においてもレイリー限界を超えた解像が実現できる可能性があり、計測対象の振動に強く、高速走査が可能となり、高いスループットの計測技術の開発が期待できることを示した。
- (3)計算機シミュレーションにより、変調照明ピッチとして300nmを想定した場合に、構築アルゴリズムを用いてレイリー限界より小さい169nmの間隔を持つ二点散乱体を独立な二点として解像することが可能であることを示した。
- (4)変調照明の冗長シフト回数を10回以上とすることにより、30%のノイズ環境下で169nm間隔の二点散乱体の明確な識別が可能であり、ノイズに対する高いロバスト性のもとで超解像の実現が可能であることを示した。

以上から、変調照明シフトを用いた超解像法を用いることによって、レイリー限界を超えた高解像力を有する計測手法を、高スループット性、ノイズに対する高いロバスト性のもとで実現できる可能性があり、本手法が生産ラインにおける超精密加工表面の欠陥計測に有効であることが示された。

今後は、構築アルゴリズムの収束性解析、より実環境に即した解像特性解析を進めると共に、実験的に有効性を検討していきたい。

謝 辞

本研究の一部は、倉田記念日立科学技術財団による平成17年度第38回倉田奨励金、及び平成18年度～平成19年度文部省科学研究費補助金萌芽研究(課題番号16656049)により、行われたことを記して御礼申し上げます。また、研究を遂行する上で有意義な議論をいただいた日立製作所生産技術研究所前田俊二博士に感謝の意を記します。

参 考 文 献

- 1) "International Technology Roadmap for Semiconductors, Metrology (2006 update)", Semiconductor Industry Association, (2006).
- 2) K. Kameyama et al: Semiconductor Defect Classification using Hyperellipsoid Clustering Neural Networks and Model Switching, Proc. IJCNN99, (1999).
- 3) Mark A. Schulze et al: Semiconductor wafer defect detection using digital holography, Proc. SPIE's Advanced Microelectronic Micromanufacturing, 27-28, (2003).
- 4) George W. Mulholland et al: Modeling, Measurement, and Standards for Wafer Inspection, Proc. the Government Microcircuits Applications and Critical Technologies Conference, (2003).
- 5) Kenji Watanabe et al: DUV Optical Wafer Inspection System for 65-nm Technology Node, Hitachi Review, 54, 1(2005)22.
- 6) M. G. L. Gustafsson: Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy, Journal of Microscopy, 198, 2(2000)82.
- 7) J. Frohn et al: Structured light illumination for extended resolution in fluorescence microscopy, Optics and Lasers in Engineering, 43, (2005)403.
- 8) Peter T. C. So et al: Resolution enhancement in standing wave total internal reflection microscopy, Journal of Optical Society of America A, 18, 11(2001)2833.
- 9) 臼杵深ら: 定在波シフトによる半導体ウエハ表面の超解像光学式欠陥検査 (第1報), 2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2006)1170.

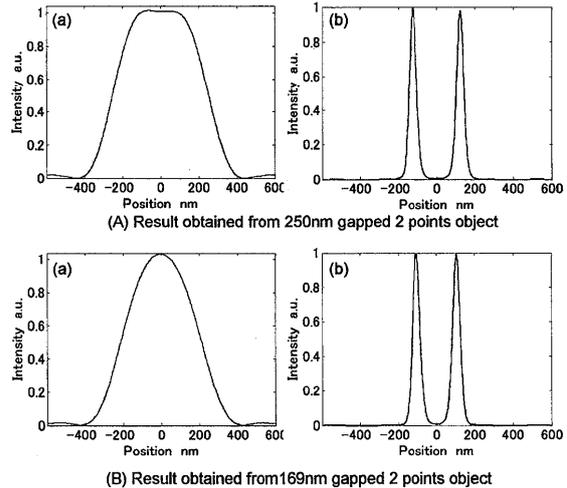


Fig.9 Comparison of conventional image and super-resolution image  
(a) Conventional image of 2 points object  
(b) Super-resolution image of 2 point object

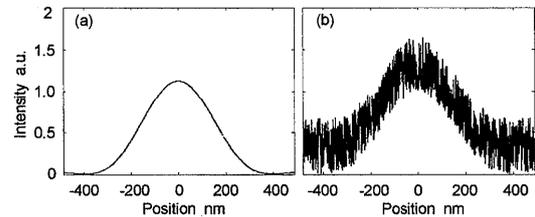


Fig.10 Obtained image for super-resolution  
(a): Noiseless image, (b): Image with 30% random noise

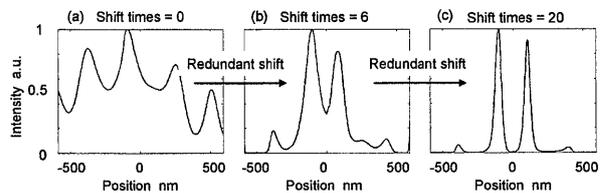


Fig.11 2 points super-resolution images under noise  
(Shift times: 0(a), 6(b), 20(c))

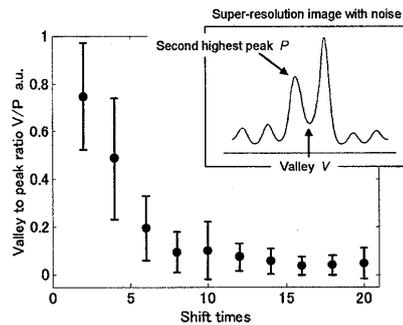


Fig.12 Enhancement of robustness by redundant shift

- 10) Neil MAA et al: Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope, Optics Letters, 22, 24(1997)1905.
- 11) Chin-Lung Lin et al: Lithographic Performance at 0.3 to 0.35 Micron Patterns by Using i-line Stepper with off-axis Illumination Technology, Proceedings of SPIE, 2726, (1996)437.
- 12) H. Nishioka et al: A Super-Resolution Microscopy with Standing Evanescent Light and Image Reconstruction Method, Proc. of IMEKO World Congress., 12, TC2 (2006).
- 13) K. S. Yee: Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans. Antennas Propag., 14, 4(1966)302.