



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2報) *

一定在波照明シフト実験による解像原理の実験的検証

白杵 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 (2nd report)

- Experimental Verification of Resolution Property by Standing Wave Illumination Shift-

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 second report, to verify the resolution property experimentally, we developed the apparatus for the basic experiment and performed the super-resolution experiment using line and space sample. As a result, the sample structures were clearly resolved beyond the Rayleigh limit, and improvement of robustness with redundant shift was experimentally confirmed.

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

1. 緒 言

我々は、半導体ウエハに代表される超精密加工表面の生産ラインにおける欠陥計測¹⁾を、高解像性、高いスループット性のもとで行うために、変調照明シフトによる超解像法を提案し開発している²⁾。変調照明を用いた超解像顕微鏡^{4)~6)}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適用可能な、ノイズに対してロバストな計測手法の開発が期待できる。変調照明はマスクの縮小結像や定在波等により生成され、高い空間周波数を有する照明であり、計算機による後処理で変調照明の高周波情報を像に反映させることによってレイリー限界を超えた解像が可能^{2)~6)}となる。前報⁷⁾では超解像アルゴリズムの構築、シミュレーションによる解像特性の理論的検討、変調照明の複数シフトによるノイズに対するロバスト性向上の検証を行い、超精密加工表面欠陥計測に対する有効性を示した。本報では、提案手法の解像原理を実験的に検証するために、変調照明として定在波照明を採用した基礎実験装置の開発を行い、定在波照明シフトによる超解像実験を行った。その結果、開発した装置が本手法に適用可能であること、レイリー限界より微細な構造を解像可能であること、照明光の複数シフトによりノイズに対するロバスト性が向上すること、微細パターン上の微小欠陥を検出可能であることを示し、本手法の超精密加工表面欠陥計測に対する有効性を実験的に確認した。

2. 変調照明シフトによる超解像光学式欠陥計測手法

本手法は、変調照明を用いることによって、像に結像光学系により定まる遮断周波数より高い周波数の情報を反映させ、レイリー限界以上の解像力を達成する手法である。本手法の概念図を図1に示す。物体(測定試料)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、それらを用いて解像計算を行う。計算機による後処理で変調照明の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。また、より多数の像を用いて解像計算を行うことによりランダムノイズを平均化させることが可能で、ロバストな解像手法が期待できるため、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。本手法のもう一つの特徴として、低NA(深い焦点深度)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⁷⁾なことが挙げられる。ゆえに、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手法である。

通常の光学結像は点像分布関数(*psf*)と測定試料面上の物体分布(例えば、散乱のしやすさを表す物理量の分布)のコンボリューションで表現することが可能であり、線形システムとして記述することが可能である。*psf*、物体分布、複数像から構成される線形連立方程式を解くことによって変調照明の高周波情報を反映させ超解像を実現する。一般に、光学結像方程式の逆問題は数学的に条件が悪く、特に取得像にノイズが混入した場合に解の収束が困難となる。そこで、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超解像再構成アルゴリズム構築した⁷⁾。超解像再構成アルゴリズムの概念図を図2に示し、手順を以下

* 原稿受付 平成19年8月13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

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。なお、初期推定解は一定値とし、計算機上で変調照明初期位置における初期推定算出像を得る。
- (2) 実験において、変調照明初期位置における取得像を得る。
- (3) 変調照明初期位置における算出像と取得像との誤差を求める。
- (4) 誤差を推定解に分配 (フィードバック) し再構成解を得る。
- (5) 再構成像を改めて推定解とし、変調照明の次のシフト位置において同様の再構成計算を行う。画像数が N 枚の場合 N 回の再構成計算を行う。
- (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の情報を解像結果に反映させることが可能となる。

3. 定在波照明を用いた基礎実験装置の開発

3.1 基礎実験装置の構築

変調照明シフトによる超解像法の有効性を実験的に検証する

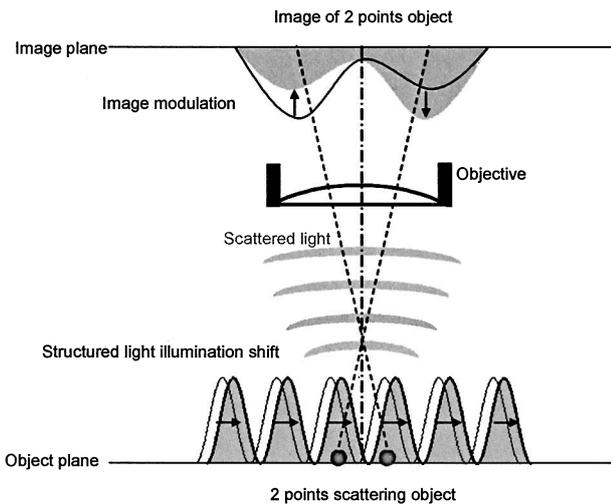


Fig.1 Schematic diagram of the structured light illumination shift and the scattered light image modulation

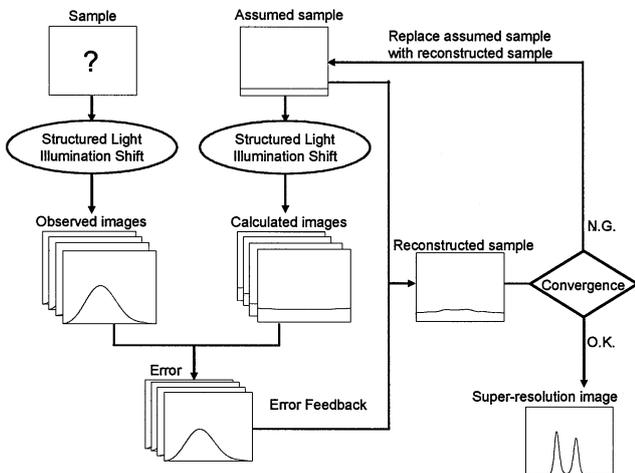


Fig.2 Block diagram of iterative super-resolution reconstruction

ために、基礎実験装置を構築した⁹⁾。開発した超解像再構成アルゴリズムはインコヒーレント結像を前提としているため、変調照明としてインコヒーレント光源とマスクの縮小結像による照明を採用すべきであるが、本報では原理確認を第一に考え、変調照明として、生成が容易かつ制御性が高いコヒーレントなレーザ光源の二光束干渉による定在波を用いることとした。コヒーレント結像で原理確認が可能な条件に関しては次節で検討する。

装置の光学系を模式的に図3に示す。ビームスプリッタ1により二光束に分けられたレーザは対物レンズにより試料面に干渉し、定在波照明を生成する。定在波照明のピッチは二光束の試料面に対する入射角によって定まる。よって、対物レンズの瞳に入射する二光束の間隔、すなわちミラー3とミラー4の間隔を変化させることにより定在波ピッチが制御可能となる。結像系において、試料表面からの正反射光は、正反射光のレンズ5による集光点において暗視野周波数フィルタにより遮光され、散乱光のみが対物レンズとレンズ5による無限遠補正系および結像レンズによる有限系を通して CCD に結像する。また、ミラー1 に PZT を用いて変位を与えることにより二光束の一方の光束に位相差を与え、定在波照明をシフトさせる。CCD で取得した定在波照明のシフト位置毎の複数画像を用いて計算機により超解像再構成を行う。

3.2 超解像再構成アルゴリズムの適用条件の検討

前報において構築した超解像再構成アルゴリズムは、点物体の像として点像強度分布関数を扱っており、像が強度の重ねあわせで表現される系、すなわちインコヒーレント結像系を前提としている。しかし、変調照明として二光束干渉による定在波を用いた場合は、像は位相を考慮した振幅の重ねあわせの二乗で表現される系、すなわちコヒーレント結像系となる。従って、インコヒーレント結像とコヒーレント結像の差異を調査し、コヒーレント結像の超解像再構成アルゴリズムへの適用性の検討を行うことが必要となる。

例としてレイリー限界 650nm の結像系、変調照明ピッチ 500nm, 1750nm を用いて二点物体の解像シミュレーションを行う。表1に条件を示す。前報⁷⁾で定式化した変調照明による超解像の解像限界 R_{SLI} をあらわす理論式 (λ は光源波長, T は変調照明のピッチ)

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

より、変調照明ピッチ 500nm, 1750nm における解像限界はそれ

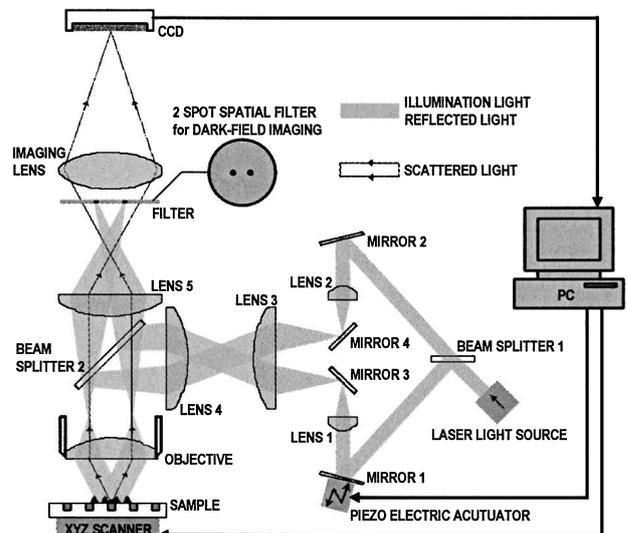


Fig.3 Schematics of apparatus for basic experiment

ぞれ 314nm, 497nm となる。二点物体の間隔は、1750nm の解像限界値より大きい値の 500nm とし、解像領域において二点物体を 700nm と 1200nm に配置した。変調照明のシフト数は 3 回、シフト量は 50nm とした。まず、変調照明ピッチ 500nm において定在波照明を想定したコヒーレント結像を用いた場合の結果を図 4(a)に、同図(b)にはインコヒーレント結像の場合の結果を示す。両者の解像結果が異なっており、コヒーレント結像を用いた場合にサイドローブが生じることが確認できた。

Table1 Condition of simulation

Wavelength of source: λ	488nm
Pitch of structured light illumination: T	500nm, 1750nm
Numerical aperture of objective: NA	0.46
Rayleigh limit: R_{Rayleigh}	650nm
Resolution limit by structured light illumination: R_{SLI}	314nm, 497nm
Structured light illumination shift step size: S_{shift}	50nm
Illumination shift times: t_{shift}	3

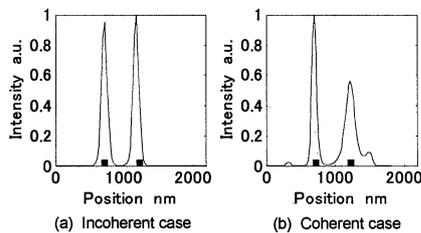


Fig.4 Super-resolution image in (a) incoherent and (b) coherent case with 500nm pitch of structured light illumination

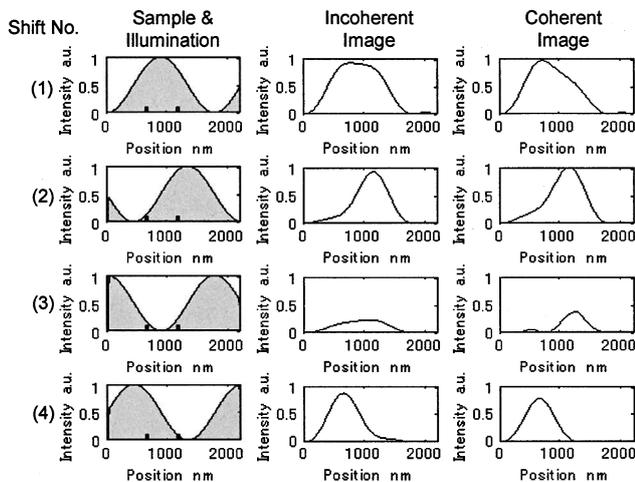


Fig.5 Incoherent images and coherent images of 2 points object

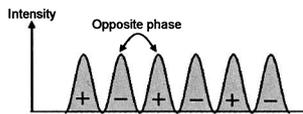


Fig.6 Phase distribution of standing wave illumination

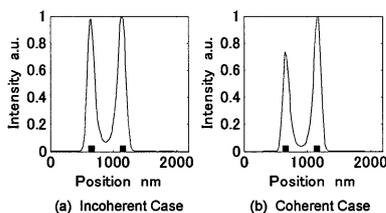


Fig.7 Super-resolution image in (a) incoherent and (b) coherent case with 1750nm pitch of structured light illumination

次に、変調照明ピッチを 1750nm とし、二点物体の解像シミュレーションをインコヒーレント結像の場合とコヒーレント結像の場合に対して行い、結像の差異および解像結果の差異を調査した。シミュレーション条件はピッチ 500nm の場合と同様とした。二点物体に対する照明位置、インコヒーレント結像、コヒーレント結像をシフト番号毎に図 5 に示す。シフト番号(1), (2)および(4)に関しては結像形態が類似しているのに対して、シフト番号(3)では結像形態が大きく異なっていることが確認できる。この理由を定在波照明の位相分布から考察する。定在波の位相分布は、定在波の山(ここで定在波の山とは定在波の節から次の節までの山状の分布)の内側において同位相であり、隣り合う定在波の山とは逆位相の関係がある(図 6)。図 5 のシフト番号(3)において、二点物体が隣り合う定在波の山にまたがって配置されており、定在波照明の位相分布において逆位相で散乱光が発生し、インコヒーレントとコヒーレントで差異が生じる。超解像再構成を行った結果を図 7 に示す。インコヒーレントの場合(a)とコヒーレントの場合(b)で超解像結果にも差異が生じているのが確認できる。しかし、サイドローブが見られなくなったこと、解像結果の差異が照明光ピッチ 500nm を用いた場合に比べて小さくなったことから、この照明光ピッチ (1750nm) においては、開発した装置を用いたコヒーレント結像が超解像再構成アルゴリズムに適用できていると考えられる。これは、照明光ピッチを大きくするほど、逆位相で散乱されインコヒーレントとコヒーレントで大きな結像差異が生じるシフト位置における結像強度分布が、他のシフト位置における結像強度分布と比較し、相対的に小さくなり、再構成計算に有意な寄与を及ぼさなくなるためと考えられる。このように、結像 NA で決定される適切な照明光ピッチを選定することで、コヒーレント結像を、等価的にインコヒーレント結像と扱え、本アルゴリズムに適用可能となることが分かった。

3.3 定在波照明生成および変調散乱光の暗視野検出実験

解像実験に先立って、開発装置の重要な機能である定在波照明の生成機能と変調散乱光の暗視野検出機能を実験的に確認した。実験装置の仕様を表 2 に示す。まず、鏡面および散乱面を有するサンプルに対して定在波照明を行い、定在波照明生成確認を行った。その様子を図 8 に示す。図 8 (a)にサンプル写真、図 8(b)に基礎実験装置における一様照明の像、図 8(c)に基礎実験装置による定在波照明の像、図 8 (d)に図 8(c)の定在波照明像の強度分布を示す。図 8(b)を見ると、鏡面部分の輝度は低く、散乱面の輝度のみが高くなっていることから、散乱光を暗視野検出できていることを確認した。また、図 8 (d)から、定在波照明の周期的強度分布を確認した。

次に、PSL 標準粒子 ($\phi=200\text{nm}$) を用いて散乱光変調の確認を行った。ウエハ上の標準粒子に対してピッチ 1200nm の定在波照明を行い、シフトステップサイズを 50nm としてシフトさせた場合の暗視野散乱光像の変化を CCD で検出した。図 9 に定在波照明のシフト回数に対して粒子像のピーク強度をプロットしたものを示す。その結果、開発した実験装置を用いて定在波の周期的強度分布に対応した散乱光の変調を確認した。

Table2 Experimental setup of the optical system

Wave length of source: λ	488nm
Positioning accuracy of PZT: p_{PZT}	1nm
Numerical aperture of objective: NA	0.46
Spot size of Spatial filter for dark field imaging: s_{dark}	0.5mm
Pixel size of cooled CCD camera: s_{CCD}	8.3 μm

4. 解像原理の実験的検証

4.1 ラインアンドスペースの解像実験

提案手法により、理論通りにレイリー限界を超えた解像が可能であるか実験的に検証した。ここでは、原理確認を目的として比較的低い $NA0.46$ の対物レンズを用いて実験を行った。サンプルとしてはシリコン基板に対して 500nm のラインアンドスペースが刻まれた測長用スケールを使用した。図10に光学顕微鏡像 ($NA0.95$) を示す。一般的に、エッジを有する物体を暗視野光学系で結像させた場合、エッジが強調される。そのため本サンプルに一樣照明を行い高 $NA0.95$ で暗視野観察すると 500nm 間隔のラインエッジが確認される (図11)。この場合ラインエッジ間隔 (500nm) がレイリー限界 (313nm) よりも大きいのでラインエッジ部分が検出されているのが確認できる。また、一樣照明下での結像 $NA0.46$ によるサンプル像を図12に示す。この場合、ラインピッチ ($1\mu\text{m}$) はレイリー限界 (647nm) よりも大きいのでラインエッジ間隔 (500nm) はレイリー限界 (647nm) よりも小さいため、ラインピッチはおおよそ解像可能だがラインエッジは解像されない。

次に、サンプルに対して定在波照明を行い、定在波照明をシフトさせ散乱光の変調情報を含む複数の像を取得した。表3に実験条件を示し、複数の像の強度分布を図13に示す。これを見ると定在波照明シフトによる変調が確認できる。これらの取得複数の像を用いて超解像後処理を行った。後処理結果を図14に示す。強度分布の平均ピーク間隔が 520nm であったことから、解像結果の分布形状が 500nm 間隔の周期的なラインエッジに対応しており、本手法により、レイリー限界 (647nm) を超えた解像が可能であることを確認した。

なお、図15は、サンプルを定在波照明に対して傾けた状態で照明をシフトさせ像を取得した場合の超解像処理結果である。図15(a)は角度 17° の場合でラインエッジ間隔が 522nm 、図15(b)は角度 50° の場合でラインエッジ間隔は 777nm となる。解像結果の強度分布の平均ピーク間隔が、角度 17° で 537nm 、角度 50° で 759nm であったことから、本節の実験における解像結果の強度分布のピークがラインエッジに対応していると考えられる。

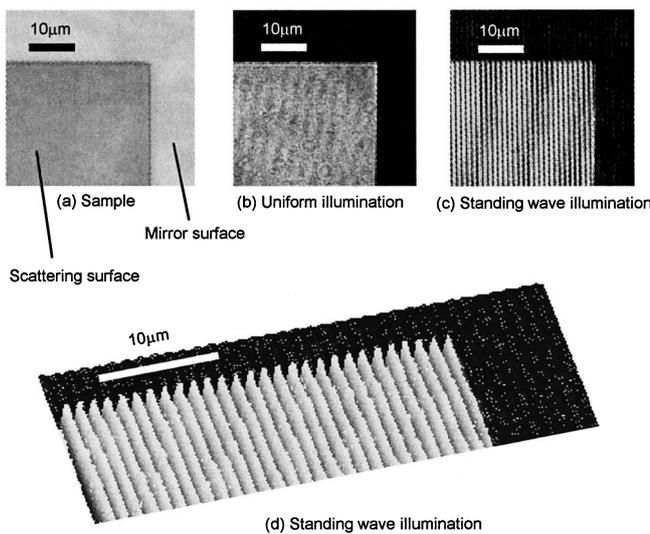


Fig.8 Generation of standing wave illumination

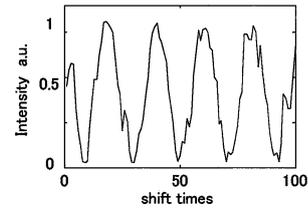


Fig.9 Modulation of scattered light from a particle

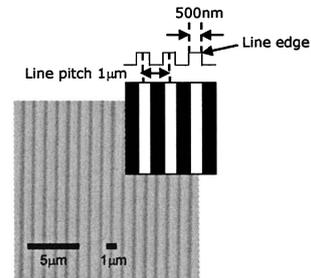


Fig.10 Line and space sample

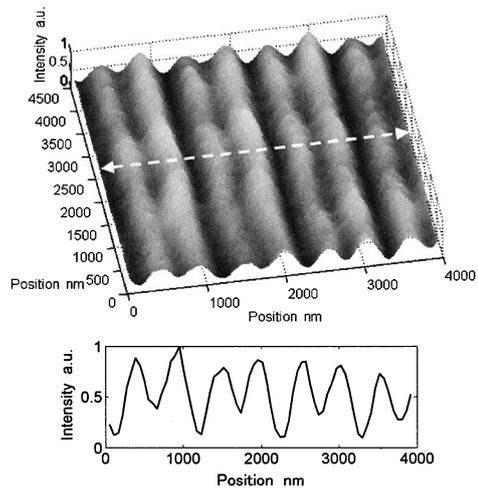


Fig.11 Dark-field scattered light image of sample: $NA=0.95$

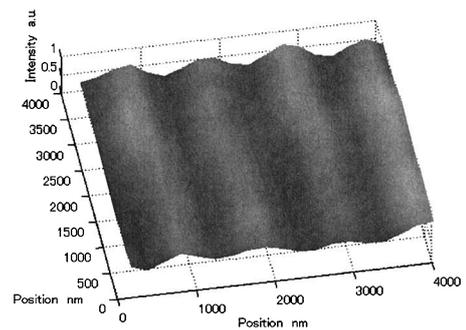


Fig.12 Dark-field scattered light image of sample: $NA=0.46$

Table3 Condition of super-resolution experiment

Pitch of standing wave illumination: T	1750nm
NA of objective: NA	0.46
Magnification of imaging optics: m	38
Standing wave shift step size: S_{shift}	80nm
Illumination shift times: t_{shift}	24
Iteration times: i	10

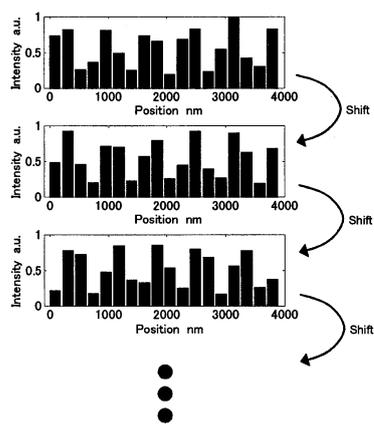


Fig.13 Multiple images with standing wave illumination shift

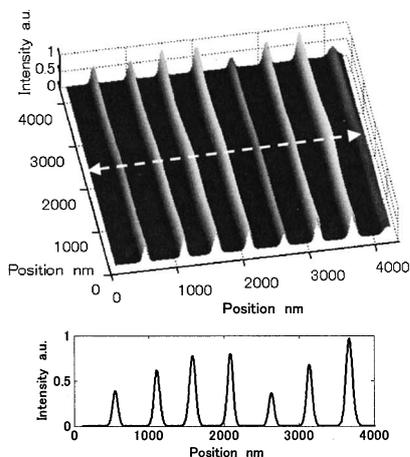


Fig.14 Super-resolution image of periodic line edges

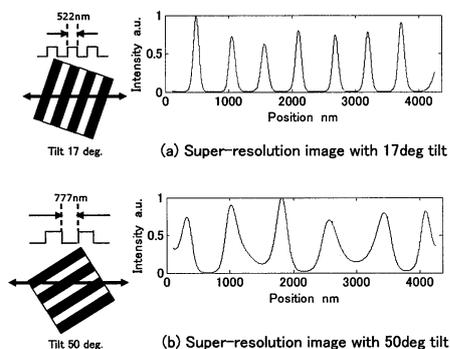


Fig.15 Super-resolution distribution of tilted line edges

4.2 照明光の冗長シフトによるロバスト性の向上

図9から散乱光の変調は定在波照明の周期的分布に対応しているものの、実際の取得像には10%程度のノイズを含んでいることが確認できる。ノイズ混入時における解像特性、すなわち冗長シフトによるロバスト性は、独立なシフトの回数(解像計算に有意な画像枚数)により定まると考えられる⁷⁾が、ここでは像の複数取得効果を明確にするために、シフトステップサイズは一定とし、シフト回数の解像結果への影響を検討した。図16(a)にシフト回数2回、(b)に9回、(c)に19回、(d)に39回とした場合の500nm間隔ラインエッジの解像結果を示す。シフト回数2回の場合にはノイズの影響により解像結果がサンプルと全く対応していないことがわかる。シフト回数9回の場合には、サンプル

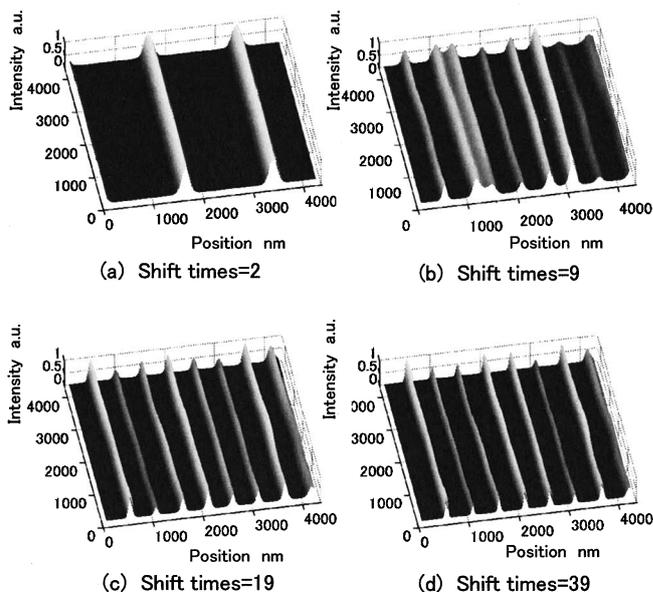


Fig.16 Super-resolution image of line edges with various shift times

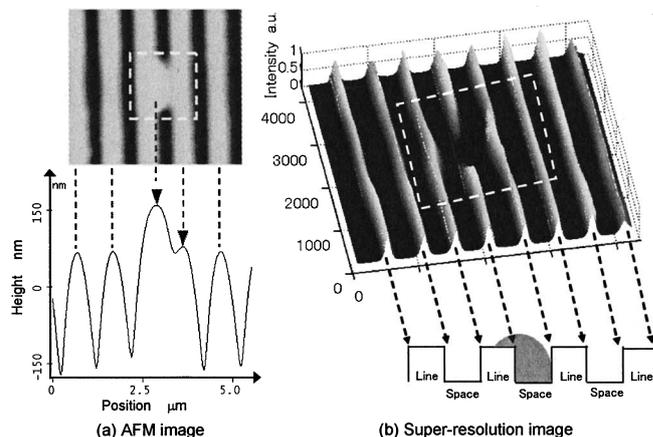


Fig.17 Super-resolution image of line edges with defect

のラインエッジの数との対応は確認できるが、解像結果のラインエッジの位置や間隔は不規則である。シフト回数が19回以上の場合には、解像結果のラインエッジの数、位置、間隔がともにサンプルと対応している。これは、シフトステップサイズ80nm、シフト回数19回で、おおよそ変調照明1ピッチ分(1750nm)の位相条件が揃うことに相当し、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。ゆえに、今回の実験条件においては、シフトの回数をおおよそ変調照明1ピッチ分の20回程度とすることで、実験におけるノイズに対応することが可能であり、冗長シフトによるロバスト性の向上を実験的に確認できたと考えられる。

4.3 欠陥付きラインアンドスペースパターンの解像実験

本節では、提案手法を超精密加工表面の欠陥計測に適用するにあたって、ラインアンドスペースパターン上に欠陥が存在する部分に対して超解像イメージを取得し、欠陥検出特性を検討した。図17(a)に今回用いたサンプルのAFM像を示す。これより、欠陥がラインエッジの1つを覆っていることが確認できる。このサンプルに対して、定在波照明をシフトさせ、得られた複数像に対して超解像処理を行った。実験条件は前節と同様とした。図17(b)に超解像イメージを示す。これを見ると、イメージ

中央にラインエッジの欠如が観察出来る。以上から、レイリー限界647nmの結像系および超解像処理によって500nm間隔のラインエッジに影響を及ぼす欠陥を検出可能ということが分かった。

5. 結 論

提案手法の解像原理を実験的に検証するために、変調照明として二光束干渉による定在波を用いた基礎実験装置の開発およびラインアンドスペースを用いた超解像実験を行った。結果を以下にまとめる。

- (1)定在波の位相分布に注目して、コヒーレント結像の超解像再構成アルゴリズムへの適用性を検討した結果、結像 NA0.46、照明光ピッチ1750nmとすることで、定在波照明が本手法に適用可能となることを示した。
- (2)開発した基礎実験装置を用いて、周期的な分布を有する定在波照明が生成可能であること、定在波照明シフトによる散乱光の照明分布に対応した変調を暗視野検出可能であることを確認した。
- (3)ラインアンドスペースの解像実験において、解像結果の分布がラインエッジに対応しており、本手法を用いてレイリー限界(647nm)を超えたラインエッジ間隔(500nm)の解像が可能であることを示した。
- (4)照明光のシフト回数を、おおよそ変調照明1ピッチ分の20回程度とすることで、独立性の高い複数シフトが可能となり、ノイズが含まれる実験像を用いて超解像が実現出来ることを確認した。
- (5)レイリー限界647nmの結像系および超解像処理によって500nmのパターン上の異物欠陥が検出可能であることを確認した。

以上から本手法の超精密加工表面欠陥計測に対する実験的な有効性を示した。今後は、高いNAの対物レンズによる結像を使

用することで、より微細な構造の解像を実験的に行うとともに、高速計測性を考慮した画像取得数の最適化を進め、より実用に即した解析を行う。

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) K. Watanabe, S. Maeda, T. Funakoshi and Y. Miyazaki: DUV Optical Wafer Inspection System for 65-nm Technology Node, Hitachi Review, **54**, 1(2005)22.
- 2) 白杵深, 西岡宏晃, 高橋哲, 高増潔: 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.
- 3) S. Usuki, H. Nishioka, S. Takahashi and K. Takamasu: Super-resolution optical inspection for semiconductor defects using standing wave shift, Proc. of SPIE International Symposium on Optomechatronic Technologies, (2005) 60490C-1.
- 4) 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.
- 5) R. Fedosseev, Y. Belyaev, J. Frohn and A. Stemmer: Structured light illumination for extended resolution in fluorescence microscopy, Optics and Lasers in Engineering, **43**, (2005)403.
- 6) Peter T. C. So, Hyuk-Sang Kwon and Chen Y. Dong: Resolution enhancement in standing wave total internal reflection microscopy, Journal of Optical Society of America A, **18**, 11(2001)2833.
- 7) 白杵深, 西岡宏晃, 高橋哲, 高増潔: 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 -, 精密工学会誌, **74**, 5(2008).
- 8) S. Usuki, H. Nishioka, S. Takahashi and K. Takamasu: Development of super-resolution optical inspection system for semiconductor defects using standing wave illumination shift, Proc. of SPIE on Optics East 2006, (2006) 637508-1.