

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4報）*

—コヒーレント結像逐次再構成型超解像法の実験的検証—

工藤良太** 高橋哲*** 高増 潔***

Super-Resolution Optical Measurement for Ultra-Precision Machined Surface Defects by Using Structured Light Illumination Shift (4th report)

- Experimental Verification of Super-resolution Method with Coherent Image Iterative Reconstruction -

Ryota KUDO, Satoru TAKAHASHI and Kiyoshi TAKAMASU

Demands for ultra-precision machined surface such as semiconductor wafer are rapidly growing. However, because of shrinking design rules of the semiconductor, it is uprising the difficulty of detecting nano-defects. To keep process yield in manufacture line, we must develop a defect measurement system with higher resolution, throughput, non-destructiveness and robustness. As such a measurement system, we have proposed the application of the structured light illumination (SLI) microscopy. The proposed method is optical inspection system and that resolving power exceeds the diffraction limit. Conventional proposed method has a difficulty about imaging system. Despite the imaging system is coherent system, the imaging system required in conventional super-resolution algorithm is incoherent system. We proposed algorithm based on coherent system, and three-light-flux interference standing wave illumination that enables new algorithm usage. In the fourth report, to verify super-resolution method with coherent image iterative reconstruction experimentally, we develop the experimental apparatus. As the result of basic experiment, 230 nm structure which can't be resolved by conventional method is resolved by proposed method, under the condition of Rayleigh limit 541 nm.

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

1. 緒 言

半導体ウエハに代表される超精密加工表面の需要は年々増している。半導体ウエハの構造のサイズは ITRS（半導体技術ロードマップ）¹⁾においても予想される通り、縮小の過程をたどっており、微小欠陥による歩留まり低下が問題となっている。歩留まりの改善のために超精密加工表面の生産ラインの欠陥計測²⁾が必要である。この目的に合う計測手法として高解像性、高スループット性、非破壊性を持ち合わせた手法が求められている。我々が提案、開発している変調照明シフトによる超解像法は上記の需要を満たす可能性のある手法であり、実験的に超解像を実現した例もある³⁻⁶⁾。この手法は空間的に変調され周期的な分布を有する照明（Structured light illumination）の高周波分布情報を利用することによって、処理結果の解像度を、回折限界を超えた状態にする手法である。他の変調照明を用いた超解像顕微鏡⁷⁻⁹⁾においては、多くの場合試料からの蛍光の発光などの位相情報を無視できる光学応答を前提とし、インコヒーレント結像条件を必要とする。よって蛍光マーキングが困難な半導体ウエハ等のサンプルの観察には向かない手法である。一方、我々の提案手法においては、コヒーレント結像条件における半導体ウエハなどの一般の散乱体サンプルの回折限界を超えた解像を目指す。

第2報までの手法^{4,5)}には問題となる特性があった。それは、変調照明としてコヒーレントな光源であるレーザの二光束干渉による定在波照明を利用する一方、逐次再構成超解像アルゴリズム

ムはインコヒーレント結像条件を仮定したものであることによる問題である。そのため処理結果が試料構造を必ずしも再構成できないケースがあった。これは主に定在波照明の隣接するピークが逆位相であることに起因している。そのため、前報において従来の二光束干渉による定在波に、新たに試料に対する落射照明を加えた三光束干渉によって定在波全域において同位相の照明を生成して利用することによるコヒーレント結像逐次再構成型超解像手法を提案した。新たな照明方法においては照明の全領域で位相が同符号である性質がある。新照明手法により逐次再構成超解像アルゴリズムはコヒーレント結像条件においても適用可能となったことが理論的に示された¹⁰⁾。本報においてはコヒーレント結像逐次再構成型超解像法の実験的検証を目指し、基礎実験装置を開発した。三光束干渉定在波の生成、かつ暗視野散乱光検出を実験的に実現した。構造が既知であるようなサンプルのピッチ情報を援用し、定在波のピッチや、シフトステップサイズ、位相を求める手法を開発した。取得した画像情報、定在波情報を利用して、超解像実験を行った。その結果、従来手法では解像できない条件、サンプルの解像をコヒーレント結像逐次再構成型超解像法によって可能であることを実証した。従来手法に対する優位性だけでなく、レイリー限界が541 nmの条件化で、230 nmの解像を達成する超解像特性についても実証した。

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、回折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、照明位置を図

* 原稿受付 平成26年11月13日

掲載決定 平成27年3月2日

** 正会員 東京大学(現、大阪大学；大阪府吹田市山田丘2-1)

*** 正会員 東京大学；(東京都文京区本郷7-3-1)

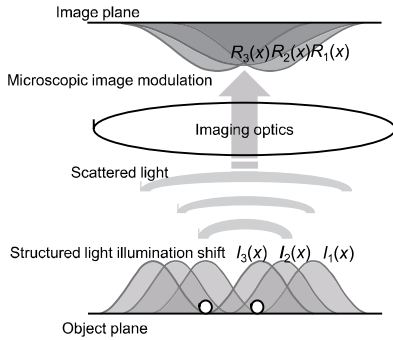


Fig.1 Scattered light image modulation with structured light illumination shift¹⁰⁾

中の I_1 , I_2 , I_3 のように空間シフトさせる。シフト位置毎の変調像を複数取得し(図中の R_1 , R_2 , R_3)、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、回折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。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。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高い解像力を実現することが可能であり超長作動距離顕微鏡への応用が見込まれる⁷⁾ことが挙げられる。

通常の光学結像は点像分布関数 (psf) と、測定試料面上の散乱効率分布かつ照明分布から表される、光学応答分布と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。点像分布関数、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を構築した⁷⁾。

第2報までの手法のように、レーザ光を光源としたコヒーレント結像条件で画像を取得し、インコヒーレント結像逐次再構成型超解像法を行うことには問題がある。前報で示したコヒーレント結像逐次再構成型超解像法は、照明分布の位相を利用したアルゴリズムによって行われる。このアルゴリズムは、結像振幅分布 $r_o(x)$ と点像振幅分布関数 $psf_o(x)$ 、さらに照明振幅分布 $i_o(x)$ を用いて得られる

$$r_o(x) = psf_o(x) \otimes [i_o(x) \cdot a(x)] \quad (1)$$

という振幅レベルでの光学結像式の逆問題を解くことによって実現される。

上記逆問題を解くに当たって、計測データから結像振幅分布 $r_o(x)$ と照明振幅分布 $i_o(x)$ を推定する必要がある。位相が全領域で同符号に揃うような照明方法によって、これを可能とする。その照明方法とは具体的には従来の二光束干渉による定在波照明 (standing wave illumination: SWI) に、二光束による定在波の時間的位相変化に同調しつつ、また振幅強度も二光束干渉定在波の最大値と一致させて、試料上方よりバイアス平面波照明を加え、三光束干渉させることにより、定在波照明の位相を全領域で同符号にするものである¹⁰⁾。三光束干渉による定在波照明のイメージ

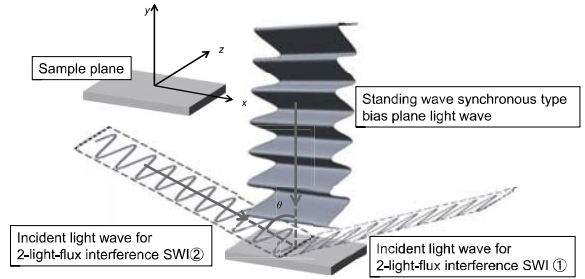


Fig.2 Schematic of three-light-flux interference¹⁰⁾

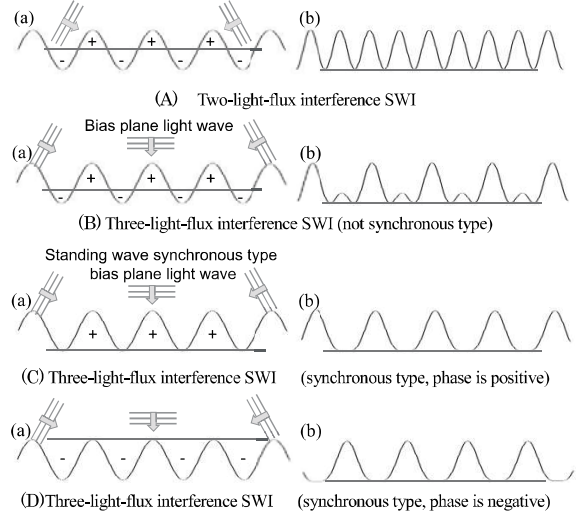


Fig.3 Comparison of SWI distribution¹⁰⁾

(a) Amplitude distribution, (b) Intensity distribution

ジを図2に示す。二光束の偏光方向は全て図中の z 軸方向である。このような偏光制御によって効率的に三光束干渉による定在波電場分布の同符号化が実現される。

二光束干渉と三光束干渉における定在波分布の比較を図3に示す。図3(C), (D)に示すように理想的に位相同調して三光束が干渉している場合には、強度分布のピッチは、図3(A)(b)で示される二光束干渉定在波の強度分布のピッチの二倍となる。一方三光束が位相同調していない場合には図3(B)(d)のように強度分布に弱いピークが発生する。この分布は位相の全領域同符号化が達成されておらず、コヒーレント結像逐次再構成型超解像処理の実現は難しい。従って、提案手法においては三光束の位相を同調しながらの干渉が重要となる。また二光束干渉定在波は、斜方照明の相対的な位相差を利用した空間シフト時に、時間的な位相も変化する性質があるため、三光束干渉定在波をシフトする場合には、動的に位相同調制御をする必要がある。位相同調制御を可能とする実験装置は第3章において示される。

超解像再構成アルゴリズムの概念図を図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。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) 実験により、変調照明初期位置における強度取得像を得て、平方根を取ることで擬似的に実効振幅取得像を得る。

- (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. コヒーレント結像逐次再構成型超解像法検証のための基礎的実験装置

コヒーレント結像逐次再構成型超解像法実現のための実験装置に必要な機能および、必要機能を満たす設計について示す。図5に設計した装置の模式図を示す。ビームスプリッタ(BS)と偏光ビームスプリッタ(PBS)により光路を3つに分割し、三方向入射を実現する実験系である。

3.1 三光束干渉定在波生成実現のための機能

3.1.1 偏光制御機構

- ・三方向それぞれの照明光の偏光状態によっては試料面上で想定する照明分布を実現することができない。試料面上で偏光方向が紙面に垂直であるような状態で三方向の照明光が干渉することが必要となる。
- ・PBSとλ/2波長板、偏光板(PP)を利用することにより、試料面上で三方向の照明光は全て紙面に垂直な偏光状態となる。

3.1.2 振幅制御機構

- ・落射照明の振幅が斜方照明と比較して小さすぎると照明光の位相の正負にまたがった状態を補正し、同位相に保つことが不可能になるため、振幅を制御する必要がある。
- ・λ/2波長板①とPBS①を利用して、斜方照明と落射照明の光量を調整する。さらに落射照明の光路にλ/2波長板②と偏光板を設置し、さらに光量、換言すれば振幅を制御する。

3.1.3 斜方照明と落射照明の位相同調機構

- ・斜方照明と落射照明の位相が同調していない状態では、斜方

照明により生成される定在波の正負にまたがる位相を完全に同位相に揃えることができず、理想的な条件での三方向入射の定在波の周期の他に、理想条件定在波の2分の1ピッチの周期の照明分布(図3(B)(b))が生じてしまうと考えられる。正負逆の位相が生じた条件ではコヒーレント結像逐次再構成型超解像処理を行うことができないため、位相を同調する必要がある。

- ・ミラー①に装着している圧電素子(PZT①)を駆動させ、微小変位を与えることで落射照明の位相を変化させ、斜方照明の位相と同調させる。

3.1.4 落射照明の平面波入射機構

- ・落射照明は平面波でなければ、理想的な位相の同符号化が実現できず、照明分布を既知として扱うことが困難となる。また平面波入射によって面一括して三光束干渉定在波を生成可能となり、広範囲の一括超解像処理が可能となる。
- ・通常対物レンズを通して入射する光線は集束ビームとなるが、対物レンズ以外に第二レンズを導入することで落射照明を平面波とする。具体的には対物レンズの後側焦点と、第二レンズの前側焦点を一致させる配置によって平面波とする。

3.1.5 定在波照明のナノシフト機構

- ・横方向にシフトした複数の定在波照明分布を利用するために、生成定在波をナノスケールでシフトすることが必要である。
- ・ミラー③に装着したPZT②の微小駆動により斜方照明間に光路差(位相差)を発生させ、生成した定在波をナノスケールで空間シフトさせることが可能である。空間シフト時に時間的な位相もシフトすることから、三光束干渉定在波の位相同調を保ったままの空間シフト実現のためには、ミラー①に装着したPZT①を用いた動的な位相同調制御が必要となる。

3.2 散乱光検出機能

3.2.1 顕微拡大機構

- ・結像系の対物レンズと結像レンズの間に偏光制御などのために光学素子を入れつつ、顕微拡大を実現する。
- ・無限遠補正光学系により顕微観察を実現する。

3.2.2 暗視野散乱光検出

- ・サンプルの微小構造を高感度に検出するため暗視野散乱光検出であることが望ましい。
- ・試料面からはサンプルからの散乱光とともに落射照明由来の反射光が発生する。λ/2波長板③とPBS②の組み合わせにより散乱光の一部と反射光を分離し、散乱光のみを冷却CCD上に結像させる(図6)。

図7に構築装置の写真を示す。表1に構築装置の照明分布に関する仕様を示す。

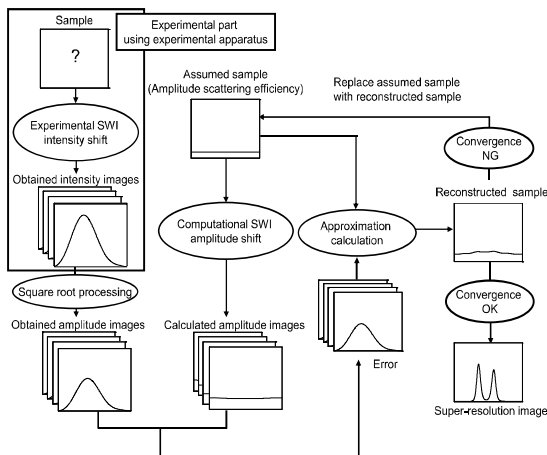


Fig.4 Block diagram of iterative super-resolution reconstruction¹⁰⁾

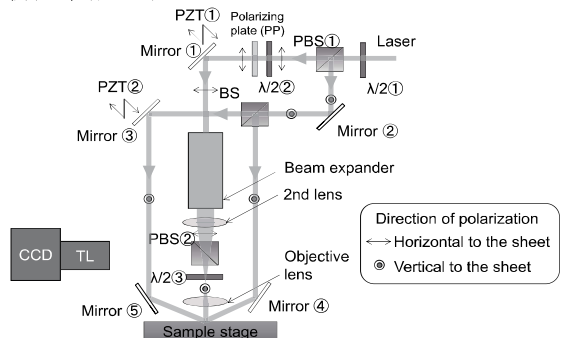


Fig.5 Schematic of experimental apparatus for verification of super-resolution method with three-light-flux interference standing wave illumination shift (Incident light path)

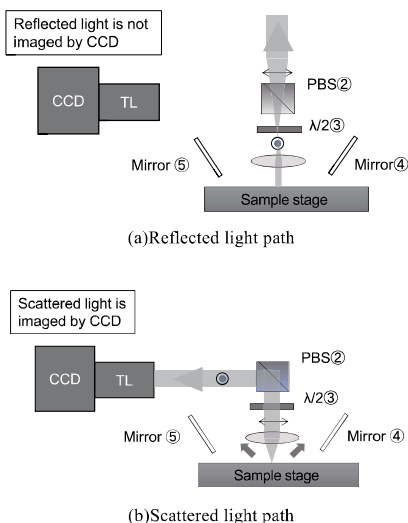


Fig. 6 Separation of reflected and scattered light with polarization control

4. コヒーレント結像逐次再構成型超解像実験装置の基本的機能検証

構築した実験装置の基本的機能検証を行う。具体的には、三光束干渉定在波の生成機能確認、および生成定在波のナノシフト機能確認、また、超解像処理に不可欠な定在波に関するパラメータ、①定在波ピッチ、②定在波シフトステップサイズ、③定在波の空間的位相情報の同定を行う。

4.1 モアレ縞を利用した三光束干渉定在波の生成機能確認

装置において生成される三光束干渉定在波のピッチは、装置の光学系の回折限界よりも小さいため、定在波の生成は、照明パターンと周期構造サンプルとの間に生じるモアレ縞を観察することによって間接的に確認する。二光束干渉定在波で生じるモアレ縞の性質 θ を応用して、三光束干渉定在波を確認する。

図8に示すようにピッチ a の周期構造をもつサンプルに対し、ピッチ T の二光束干渉定在波で相対角度 θ により照明すると、ピッチ d かつ周期構造に対して φ の傾きを持つモアレ縞が生成する。 a, T, θ, d, φ には式(2), (3)で示されるような関係式が存在する。

$$d = \frac{aT}{\sqrt{a^2 + T^2 - 2aT \cos \theta}} \quad (2)$$

$$\sin \varphi = \frac{b \sin \theta}{\sqrt{a^2 + T^2 - 2aT \cos \theta}} \quad (3)$$

a, d, φ が既知であれば、 T, θ を算出することができる。この性質は三光束干渉定在波においては必ずしも成立しないが、二光束干渉定在波のピッチと傾きを得ることはできる。

図9にライン&スペースパターンの周期構造サンプルに対して、定在波照明を行った結果を示す。このサンプルは2種類のピッチのパターンが配置されており、左から順に440 nm, 400 nmである。周期構造に対し、定在波照明を行うと、モアレ縞が発生する。予め行った計算機シミュレーションから、三光束干渉定在波によって生じるモアレ縞は、二光束干渉定在波によって生じるモアレ縞と比較してピッチが二倍となり、かつモアレ縞の方向

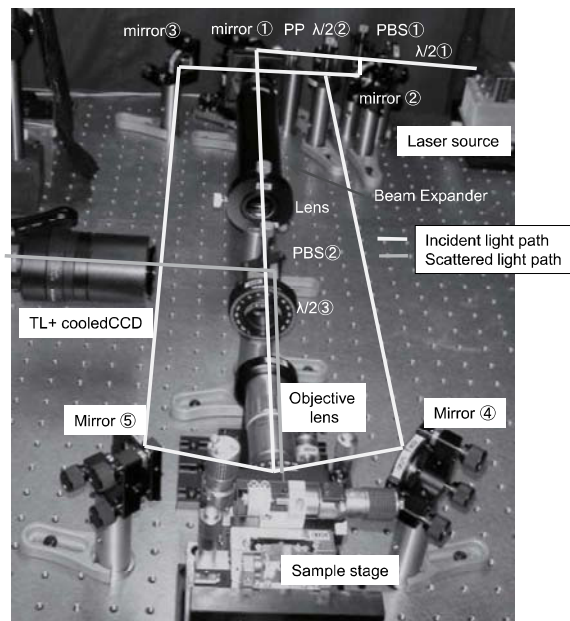


Fig. 7 Photograph of experimental apparatus

Table 1 Specification of experimental apparatus

SWI pitch: two-light flux	244 nm ~ 321 nm
three-light-flux	488 nm ~ 642 nm
Resolution of SWI shift	0.8 nm
Range of SWI shift	4.15 μm
Resolution of epi-illumination phase shift	1.6 nm

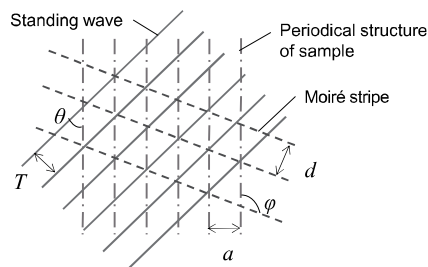


Fig. 8 Schematics of moiré stripe between standing wave and periodical structure of sample

(傾き)は変化しないことが確認されている。図9(a)に示したのはサンプルに対し、斜方照明の二光束を入射した例である。斜方照明の入射角度 75° から予想される二光束干渉定在波のピッチは252.5 nmである。一方図9(b)においては斜方照明二光束に加え、落射照明を行っている。図9(b)中に落射照明は図の上方から入射しているように描かれているが、実際には紙面上方からの入射である。落射照明はサンプルに対して、垂直に入射するように調整されている。図9(a), (b)にはともに、モアレ縞が確認される。ここから周期的照明パターンの定在波が生成されていることを間接的に確認した。

生成モアレ縞から、二次元フーリエ変換を利用して、ピッチと傾きを算出した値を表2に示す。表2から明らかなように、二光束干渉から三光束干渉に切り替えることによってモアレ縞ピッチはほぼ二倍になり、また傾きはほとんど変化しない。この結果

から三光束干渉定在波が生成していることを間接的に確認した。

4.2 モアレ縞を利用した定在波ピッチの算出

表 2 のデータとモアレ縞の性質を利用して定在波ピッチを逆算した。図 9(a)のラインピッチ 440 nm のデータから得られた結果は、定在波ピッチ 254.3 nm となった。図 9(a)のラインピッチ 400 nm のデータから得られた結果は、定在波ピッチ 253.7 nm であった。平均して定在波ピッチは約 254.0 nm とする。この結果は実験条件として設定した斜方照明の入射角 75° から算出される値 252.5 nm とほぼ一致している。このことから開発装置が定在波ピッチの制御性を有しており、定在波ピッチを実測値から算出可能であることを確認した。また、三光束干渉定在波のピッチは、上記値の二倍の 508.0 nm であると想定できる。

4.3 三光束干渉定在波のナノシフト機能の確認

次に、三光束干渉定在波を動的に制御してナノシフト可能であるか確認する。斜方照明の一方の位相を PZT②駆動によって微小変位させることによって、定在波は空間的にシフトする。また、三光束干渉定在波のシフトのためには、上記の斜方照明の位相変化に伴って、落射照明の位相も動的に同調させる必要がある。斜方照明の位相変化時に落射照明の位相を同調させない場合の、取得散乱光像変化を図 10 に示す。図 10(a)から図 10(b)では斜方照明の光路上に設定された定在波シフト用 PZT②が 86 nm 駆動されている。図 10(b)においては図 10(a)の暗部に相当する領域に

新たな明部が見れる。図 10(a)のモアレ縞と比較して、図 10(b)のモアレ縞はピッチが 1/2 となっている。これは三光束が位相同調していないことを表している。さらに PZT②が 86 nm 駆動した図 10(c) においてはモアレ縞のピッチが図 10(a)と同等になっている。図 10(b)で新たに現れた明部によってモアレ縞が形成され、図 10(b)のもう一方の明部が暗くなる。動的位相同調しない場合には、三光束干渉定在波が分布を保ったまま空間シフトしないことが間接的に確認できた。一方で三光束の位相を動的に同調させた例を図 11 に示す。定在波シフト用 PZT②を 100 nm ずつ、落射照明位相同調用 PZT①を 50 nm ずつ駆動させることによってモアレ縞がピッチをたもったままシフトしている。モアレ縞シフトから間接的に三光束干渉定在波がシフト可能であることを確認した。

4.4 定在波シフトに伴う強度変化を利用した、定在波パラメータの同定

三光束干渉定在波のシフトによる複数画像を利用して、定在波のシフトステップサイズと空間的位相情報を得ることができる。図 11 に示すような取得画像のうち、一点における明るさの定在波シフトによる変化をプロットしたものを図 12 に示す。明るさ変化は三光束干渉定在波の強度分布を反映したものとされている。このデータにおいて、理想的な三光束干渉定在波の数式、具体的には正弦波にバイアスとして 1 を足し、最小値を 0 とした振幅の式を二乗して強度を算出した式(4)の左辺をベースとし、フィッティングを行う。出力されたものが図 12 に示されている。

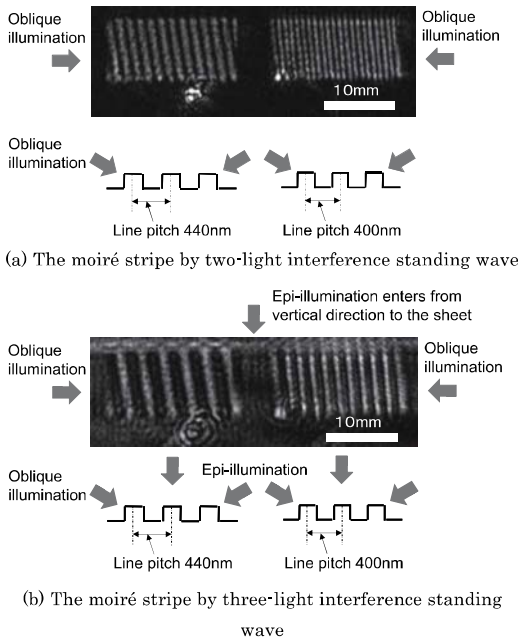


Fig. 9 Observed images of line & space pattern by experimental apparatus

Table 2 Calculated results of pitch and inclination of moiré stripe

	Pitch of moiré stripe	Inclination of moiré stripe
Two-light-flux interference SWI + Line pitch 440 nm	1615 nm	9.0°
Three-light-flux interference SWI + Line pitch 440 nm	3246 nm	10.1°
Two-light-flux interference SWI + Line pitch 400 nm	941 nm	5.2°
Three-light-flux interference SWI + Line pitch 400 nm	1887 nm	5.4°

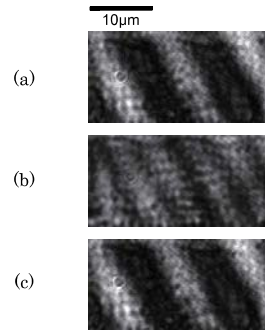


Fig. 10 Observed moiré stripe shift by three-light-flux interference standing wave shift (without phase synchronize) PZT shift for changing only oblique illumination phase (a) reference position, (b) PZT②86 nm shift from (a), (c) PZT②86 nm shift from (b)

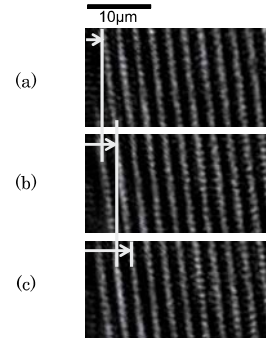


Fig. 11 Observed moiré stripe shift by three-light-flux interference standing wave shift (with phase synchronize) PZT shift for changing epi-illumination and oblique illumination phase (a) reference position, (b) PZT①50 nm, PZT②100 nm shift from (a), (c) PZT①50 nm, PZT②100 nm shift from (b)

$$\left(\left(A \left[\sin \left(\frac{2\pi}{B} - C \right) + 1 \right] \right) + D \right)^2 \quad (4)$$

$$= \left(\left(60.5 \left[\sin \left(\frac{2\pi}{66.8} - 0.854 \right) + 1 \right] \right) + 10.6 \right)^2$$

式(4)中の A は電場振幅, B は B 回のシフトで定在波の一周期分, 空間的に横方向シフトすることを表している. あらかじめ求めた定在波ピッチ 508.0 nm をこの値で割ることにより, 定在波のシフトステップサイズ(ここでは 7.6 nm)を得る. C は定在波の試料面上の定在波の空間的位相情報を示す. D は三光束干渉定在波の理想状態からのバイアスを示すが, 超解像処理においては重要ではない. ここからシフト回数に対する定在波の周期, 定在波シフトステップサイズ, 定在波の位相が明らかになり, それらのパラメータは超解像処理に利用される. 取得された定在波パラメータ, ①定在波ピッチ, ②定在波シフトステップサイズ, ③定在波の空間的位相情報は超解像実験処理において, パラメータとして入力され, 使用される.

5. コヒーレント結像逐次再構成型超解像法の実験的検証

構築実験装置を用いたコヒーレント結像逐次再構成型超解像の基礎的検証実験を試みた. 同一サンプルを用いて従来のインコヒーレント結像逐次再構成型超解像実験および, 提案コヒーレント結像逐次再構成型超解像実験を行い, 結果を比較する. 提案手法の従来手法に対する優位性と, 回折限界を超えた解像特性を実証する.

5.1 使用サンプルおよび実験条件

図 13 に示すようなラインアンドスペースの構造を持つサンプルを用いた. 図 13 は SEM によるサンプルの観察像であり, 図 13(a) の横長の長方形枠で囲った一次元領域に超解像処理を施した. またこのサンプルは図 13(b)の測長結果に示すように, ライン幅は 230 nm , ラインピッチは 840 nm である. サンプルを実験装置で観察した結果を図 14 に示す. 落射照明の様な照明のみが施された観察像である. この観察像から 840 nm ピッチの構造はかろうじて判別できる. 実験装置は暗視野散乱光観察を行う装置であるために, 理想的な条件ではサンプルのエッジが検出され, 図 13(b)に示される 230 nm のライン幅が分解されるはずであるが実際には分解しない. インコヒーレント結像条件における解像指標であるレイリー限界は構築装置において 541 nm であり, コヒーレント結像条件においても解像限界は 541 nm 程度であると考えられるためである. 超解像処理によって, サンプル 230 nm 構造の分解を目指す.

実験条件を表 3 に示す. 入射角は装置で実現可能な最大程度の 75° と設定されており, 定在波ピッチは入射角に対応して, 実現可能な小さいピッチに設定した. シフトステップサイズは十分細かく,

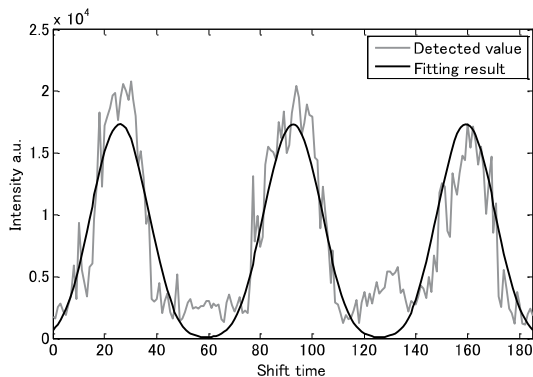
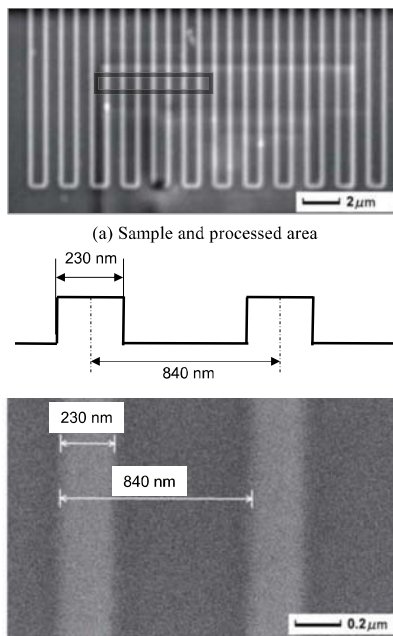


Fig. 12 Intensity modulation at one point of observed images with standing wave shift

シフト回数は十分大きな数とした. 対物レンズ NA は超解像性確認のための基礎的検証であるために比較的大きな 0.55 とした. CCD の 1 ピクセルがカバーするサンプル面上の領域は 93 nm であり, 解像対象の構造 230 nm に対して十分小さくないと考えられるために, 取得像のピクセルを単純に 16 分割した. 単純分割により高周波成



(b) Result of length measurement of line width and line pitch of sample using SEM
Fig. 13 SEM image of employed 840 nm line pitch line & space pattern sample

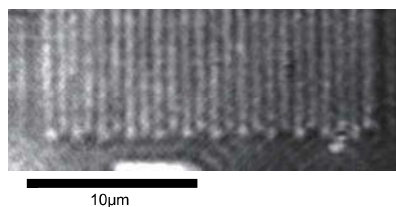


Fig. 14 Uniformed light illumination dark-field scattered light detection image of employed sample with experimental apparatus

Table 3 Conditions of super-resolution experiment with coherent image iterative reconstruction

SWI pitch: two-light flux	254 nm
SWI pitch: three-light flux	503 nm
SWI shift step size	7.3 nm
SWI shift times	70
Wavelength	488 nm
Objective lens NA	0.55
Rayleigh limit	541 nm
Area covered by 1 pixel	93 nm
Division number of 1 pixel	16
Iteration times	1, 10, 100, 1000

分および分布の変化が生じるが、光学システム自体と同等のローパスフィルタを CCD 結像イメージに施すことにより、高周波の影響を減じることができる¹⁴⁾。別途行った検討により 16 分割程度ならば、解像結果に大きな結果を及ぼさないことが確認されている。再構成計算回数は超解像処理における逐次的なフィードバック近似計算の回数を表し、原理的には回数が大きいほど解像度が増すことが期待される。予め行われたシミュレーションにより 1000 回で十分な解像結果が得られることが示されている。実験条件としては 1,10,100,1000 回として解像の経過を確認する。従来のインコヒーレント結像逐次再構成型超解像実験と新たなコヒーレント結像逐次再構成型超解像実験における結果の比較を行う。

5.2 インコヒーレント結像条件を前提とする、従来手法による実験結果

従来のインコヒーレント結像逐次再構成型超解像実験の結果を図 15 に示す。再構成計算回数 1 回の図 15(a)においては、なんらかの周期構造が解像されているような結果を得ているが、サンプルの構造には対応していない。再構成計算回数図 15(b)10 回, (c)100 回, (d)1000 回の結果においてはもはや周期構造は観察されず、ランダムな再構成計算結果が出力された。従来手法において、本報の条件およびサンプルでの超解像は実現不能であることが示された。

5.3 コヒーレント結像条件に対応した提案手法による実験結果

コヒーレント結像逐次再構成型超解像実験の結果を図 16 に示す。再構成計算回数が図 16(a)1 回, (b)10 回でサンプルの 840 nm ピッチの構造が解像されている。図 16(c)100 回でラインが 2 つに分解され始める。図 16(d)1000 回ではラインが分解され、ライン幅 230 nm が分解された結果を得た。各ピークの幅は再構成計算回数の増加に対応して小さくなっていく。図 17 においてサンプルの模式図と超解像処理結果を比較する。サンプルは図 17(a)で示すような形状であるが、サンプルを暗視野散乱光観察すると図 17(b)で示されるように散乱効率の高いエッジ部分が検出され、さらに現実には光学系の遮断周波数の影響で、ぼやけた画像が得られる。図 17(c)は図 13 の一様照明における構築装置による観察像の一次元プロフィールである。230 nm の構造を解像できないために、2 つのエッジが 1 つのピークとして観察されている。図 17(d)は図 16(d)の再掲であるが、図 17(b)と良く一致している。暗視野散乱光観察結果として妥当な結果が得られたといえる。一様照明によっては解像されないレイリー限界以下の構造の解像に成功した。さらに同様に、一次元領域で超解像処理した結果を二次元的に並べた。その結果と、他の顕微鏡観察手法、すなわち SEM、比較的高い NA(0.80)の明視野および暗視野顕微鏡と構築装置落射照明時の一様照明暗視野観察による観察像を図 18 に示す。本論文における超解像処理は基礎的検証として、一次元の処理であるため、縦方向に関してはピクセル分割が行われておらず、ピクセルが粗い。横方向の分布に関して、超解像処理結果のエッジ部分が SEM 像と良く一致していることが確認できる。また、暗視野顕微鏡像と構築装置一様照明観察像において、回折の影響により分解されていない 230 nm 構造を超解像処理によって明瞭に分解している。他の光学的顕微鏡観察手法と比較して、超解像結果はサンプルの持つ構造を明らかにしている。振動等のノイズにより、解像結果の縦方向にずれはあるものの、レイリー限界が 541 nm の光学系を用いて、再現度高く 230 nm 構造の分解に成功している。

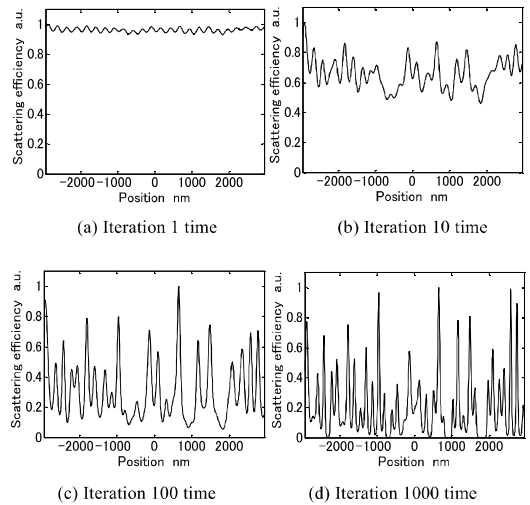


Fig. 15 Results of super-resolution experiment with two-light flux interference standing wave shift and incoherent image iterative reconstruction

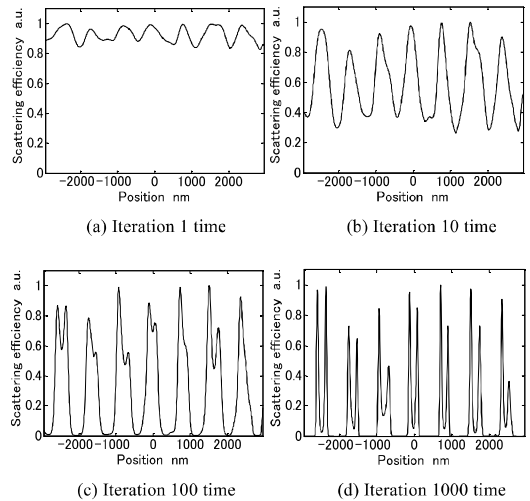


Fig. 16 Results of super-resolution experiment with three-light flux interference standing wave shift and coherent image iterative reconstruction

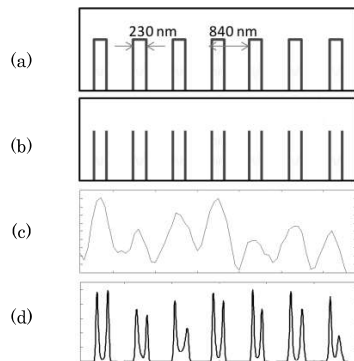


Fig. 17 Schematic and observed image of sample (1D area)
 (a) Schematic of sample,
 (b) Schematic of scattering efficiency distribution of sample,
 (c) Uniformed light illumination dark-field scattered light detection image of employed sample with experimental apparatus,
 (d) Super-resolution result (Fig. 15(d))

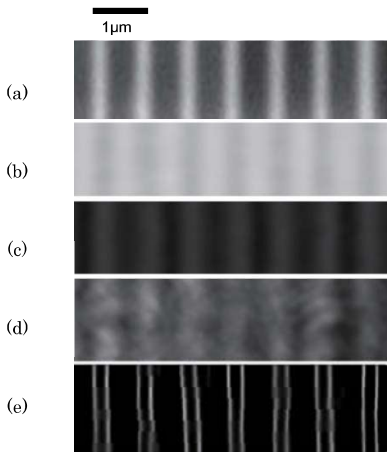


Fig. 18 Comparison of several microscopy

- (a) SEM, (b) Bright-field optical microscope (NA0.80, Rayleigh limit 372 nm), (c) Dark-field optical microscope (NA0.80, Rayleigh limit 372 nm), (d) Uniformed light illumination dark-field scattered light detection image with experimental apparatus (NA0.55, Rayleigh limit 541 nm), (e) Result of super-resolution experiment with coherent image iterative reconstruction (NA0.55, Rayleigh limit 541 nm)

6. 結 論

一般に散乱体によって構成される、半導体パターンなどの超精密加工表面を、回折限界を超える解像度で観察手法として我々が提案する、コヒーレント結像逐次再構成型超解像法を実験的に検証することを目指し、以下に示す成果を得た。

- (1) 実験的検証のための基礎実験装置を設計、構築した。構築実験装置は二光束を、位相を同調しながら干渉させることができる。
- (2) 構築装置によって実際に三光束干渉位相同符号型定在波を生成できているか検証実験を行った。
 - 周期構造を持つサンプルと定在波間に生じるモアレ縞を確認し、三光束を入射することによって、二光束干渉定在波照明時に観察されるモアレ縞の二倍のピッチのモアレ縞が生成することを確認し、間接的に三光束干渉定在波生成を確認した。
 - 観察されるモアレ縞ピッチと、周期構造サンプルの既知のピッチの情報から、定在波のピッチを算出することができる。
 - 動的な位相同調をしながら PZT 駆動をすることによってモアレ縞が分布を変化させることなく、空間シフトすることから、定在波がナノシフトすることを確認した。
 - ナノシフトによる光量変化の情報から定在波のシフトステップサイズと位相を得ることができる。
- (3) 算出した定在波パラメータを利用してコヒーレント結像逐次再構成型超解像法の実験的検証を行った。レイリー限界が 541

nm の条件下で 230 nm 構造を持つサンプルの解像を試みた。従来手法による処理では解像不能であることを確認し、一方でコヒーレント結像逐次再構成型超解像処理によってサンプル構造の再構成に成功した結果を得た。実験的に従来手法に対するコヒーレント結像逐次再構成型超解像法の優位性を確認し、レイリー限界(541 nm)以下の構造(230 nm)の再構成をすることでコヒーレント結像逐次再構成型超解像法の超解像性を検証した。

今後はコヒーレント結像逐次再構成型超解像法の適用範囲について理論・実験の両面から詳しく調査していく。また本報では実験に、複数の周波数情報を持つものの、単純な周期構造をもつサンプルに対して、超解像特性の基礎的な実験的検証を行ったが、任意の構造を持つサンプルに対する本手法の適用性を検討し、実験的に検証する。さらに、超解像処理結果のピークの空間的位置の正確性、ピークの太さが表す物理的な意味についての詳細な検討を行う。

謝 辞

本研究の一部は、GCOE プログラム「機械システム・イノベーション国際拠点」、財団法人豊田理化学研究所、JSPS 科研費 25889012 の支援を受けた。

参 考 文 献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors 2013 Edition, ORTC, (2013).
- 2) 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.
- 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) 臼杵深, 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)498.
- 5) 臼杵深, 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2報) 定在波シフト実験による解像原理の実験的検証一, 精密工学会誌, **74**, 6(2008)581.
- 6) R. Kudo, S. Usuki, S. Takahashi, K. Takamasu: Fundamental Verification for 2-Dimensional Super-Resolution Optical Inspection for Semiconductor Defects by Using Standing Wave Illumination Shift, The XIX World Congress IMEKO 2009 TC2-354, (2009)106.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 工藤良太, 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3報) - コヒーレント結像逐次再構成型超解像法の原理 -, 精密工学会誌, 投稿中
- 11) R. Kudo, S. Usuki, S. Takahashi, K. Takamasu: Simulation-Based Analysis of Influence of Error on Super-Resolution Optical Inspection, International Journal of Automation Technology, **5**, 2, (2011)167.