

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889012

研究課題名(和文) 変調照明シフトによる二次元超解像法の開発

研究課題名(英文) Development of 2-dimensional super-resolution with structured light shift

研究代表者

工藤 良太 (Kudo, Ryota)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：70706697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：一般的な散乱体微細構造の計測は、従来の光学式計測では困難である。そのため、三光束干渉定在波シフトを用いた超解像光学式計測技術を開発している。産業応用を見据え、提案手法の二次元表面構造への適用可能性を検証した。試料構造に対応した方向に照明を複数回施し、一次元的な超解像処理を行い、その結果を融合することによる二次元超解像処理を実現した。この手法により、実際の半導体微細構造を想定した試料、通常の光学式計測では解像できない試料において、二次元的な超解像による構造再構成に成功した。また、二次元構造における欠陥検出可能性が従来手法より向上することを検証した。

研究成果の概要(英文)：Measurement of General scatterers microstructure is difficult in conventional optical measurement. Therefore, super-resolution optical measurement technology using three-light-flux interference standing wave shift has been developed. In anticipation of the industrial applications, it was verified the applicability of the proposed method to the two-dimensional surface structure. Applying a plurality of times the illumination in a direction corresponding to the sample structure and subjected to one-dimensional super-resolution processing, and realizes two-dimensional super-resolution processing by fusing the results. In a sample assuming actual semiconductor microstructures, a sample that can not be resolved in the normal optical measurements, two-dimensional super-resolution is succeeded by this technique.

研究分野：計測工学，精密工学，光応用技術

キーワード：超解像光学 変調照明 アルゴリズム 逐次再構成計算 コヒーレント結像 二次元表面計測 暗視野  
散乱光検出

## 1. 研究開始当初の背景

半導体などの微細加工製品の製造現場においては、歩留まりを高める等の目的で高解像度の計測技術が必要である。AFMや電子顕微鏡といった計測技術は十分な分解能が得られるものの、計測対象へのダメージや、計測スピードが不十分であるという問題がある。そこで変調照明シフトによる超解像光学式計測手法を開発している。この手法は、従来二光束干渉によって変調照明を生成していたが、三光束干渉による定在波照明によってより理想的な解像特性が得られると予想されている。

## 2. 研究の目的

三光束干渉による定在波照明を利用した超解像手法の特性を精査する必要がある。実用アプリケーションを考えると、二次元の観察対象に対して超解像を実現する必要がある。二次元超解像を目的として、一次元超解像の特性をさらに詳細に明らかにしつつ、二次元超解像の実現可能性を調査する。変調照明と観察対象試料との相対的角度変化によって、主に強度情報が変化することが知られており、二次元超解像実現のためには、この現象を考慮することも必要である。

## 3. 研究の方法

二次元超解像の準備段階として、理論・実験の両面から一次元超解像の特性を調査する[2][3]。二次元超解像を行うためには、変調照明と試料の相対的角度を変化させつつ、超解像処理を行うことが考えられる。そのような処理が行えるような基本的アルゴリズムを作成し、二次元超解像をシミュレーションにおいて実行する。一次元超解像においては確認できない新たな特性を二次元超解像において検証する。この知見をもとに二次元超解像処理を改良する。上述のように、二次元超解像処理には、変調照明と試料の相対的角度を変化させることが必要であるが、この相対的角度変化により、得られる強度情報が変化することを実験的に確認している。この現象に対応するような二次元超解像処理を考案する。より具体的内容については4章「研究成果」において詳述する。

## 4. 研究成果

(1)微細加工構造の計測を高解像性、非破壊性、高スループット性のもとで行うニーズに答えるために、定在波照明をシフトさせることによる超解像光学式検査方法を提案し開発している。この方法は、定在波照明分布をナノスケールシフトさせ、複数の光散乱像を取得する。取得した複数像に対して計算機による後処理を加えることで、定在波照明の高周波情報を解像結果に反映させ、かつデジタ

ル超解像による周波数の外挿効果により、回折限界を超えた解像を行う。

従来の二光束干渉定在波を用いた手法[1]においては、光源に由来する結像条件とアルゴリズムが前提とする結像条件に矛盾があった。そのため解像結果において悪影響が生じるケースがある。この問題を解決し、結像条件を揃えて、コヒーレント結像条件において超解像を達成するため、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、理論的に検討した[2]。提案手法の実験的検証を目指した基礎実験装置を設計、開発し[3]、コヒーレント結像逐次再構成型超解像検証のための基礎的実験を行った結果、一次元の超解像処理を実現した[3]。超解像処理の実際の応用面を考えたとき、二次元領域の超解像の達成が重要であると考えられる。

(2)三光束干渉による定在波照明シフトで解像度を向上し、超解像を実現するための概要を述べる。試料面上に二光束を斜方から入射する。さらに試料上方より落射照明を加え、三光束を干渉させることにより、定在波照明の位相を全領域で等しくする。三光束干渉による定在波照明のイメージを Fig. 1 に示す。従来の斜方照明二光束干渉による定在波では電場分布において位相が正負逆であるような領域が隣り合って存在するため、取得像から電場分布を推定することが困難だが、新照明方式では従来の二光束により生成される定在波に同期してバイアスをかける上方からの第三の光束(平面波)により全領域で定在波照明が等位相となるため、取得像の平方根を取ることにより容易に実効的な電場分布を疑似的に推定できる。得られた電場分布を利用することにより、コヒーレント結像逐次再構成超解像法が実現される。従来から用いられている二光束のうち一方の光路に微小な位相差を持たせることにより、定在波照明はナノオーダーでシフト(変位)する。定在波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。光散乱変調を含む複数の像を計算機によって後処理(逐次的なフィードバック近似計算)をすることで、回折限界を超えた解像を行う。

(3)提案超解像手法は、定在波照明の高周波変調情報を利用するため、二次元超解像を実現するためには、二次元の照明変調情報が必要となる。しかしながら上述した三光束干渉による定在波照明は、一次元の変調情報しかもたない。さらなる多光束の干渉による二次

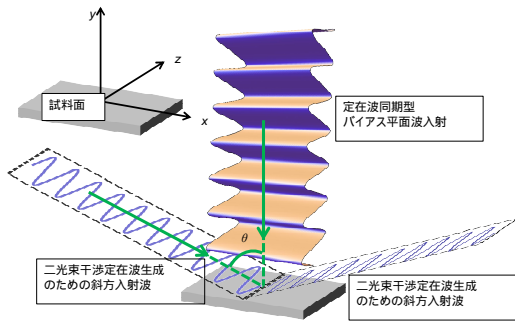


Fig. 1 三光束干渉イメージ

元変調定在波照明を利用することが考えられるが、現実には四光束以上の多光束の干渉を、位相を適切に同期しながら実現することには困難が予想される。そこで、より簡便な方法として、三光束干渉定在波照明と解像対象サンプルの相対的な角度を変化させて、二次元の照明変調情報を得る。最も簡便な方法として、照明の初期状態を設定(照明設定)し、三光束干渉定在波照明シフトを行ったのち、照明分布と解像対象との相対的角度を90度回転させる。そして新たな照明設定において、照明シフトを行う。この操作によって得られた画像群は、全体としては二次元の照明変調情報を含むことになる。照明設定と照明設定による画像群を全て同時に用い、超解像処理することは可能であるが、現状のアルゴリズム処理では、連続体において、真の解像対象形状と対応しないケースがあるため、同時処理は真の解像対象の構造を再構成できないことがある。より適切な処理として考えられるのは以下のようなものである。照明設定と照明設定による画像群は、それぞれ個別にコヒーレント結像逐次再構成型超解像処理を施され、得られた二つの処理結果を合成することによって最終的な二次元超解像処理結果を得る。

(4) 上述した二方向の三光束干渉定在波照明シフトに基づく二次元超解像手法を検証するため、フーリエ光学に基づいた計算機シミュレーションを行った。Table 1 にシミュレーション条件を示す。基礎的検証を目指しているため、対物レンズNAは比較的低位設定し、回折限界は541 nmである。定在波ピッチは解像に十分な値に設定した。逐次再構成回数に関しても基礎的検証を意識して、1回と設定した。Fig. 2 に示すのが解像対象サンプルである。Fig. 2(a)に示すようにサンプルはグリッド状の構造を持っている。ライン間隔は420 nmと設定した。本報では、二方向の定在波照明シフトによる二次元超解像法の検証が目的であるため、照明の変調方向に対応した分布を採用した。回折限界は541 nm

と設定したため、Fig.2(b)の通常の光学顕微鏡による観察像に対応する画像を見ると、サンプルの構造を正しく判別することはできない。

Table 1 シミュレーション条件

光源波長	488 nm
対物レンズ NA	0.55
回折限界	541 nm
定在波ピッチ	508 nm
逐次再構成回数	1

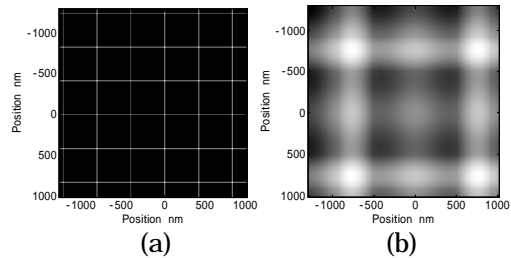


Fig. 2 解像対象サンプル

(a) 解像対象サンプルのグリッド状二次元分布構造, (b) サンプルの通常の光学顕微鏡による観察像

Fig. 3 には二方向の定在波照明シフトを行ったのち、それぞれの方向の照明設定においてコヒーレント結像逐次再構成超解像処理を行った結果を示す。Fig. 3(a)は横方向に変調した照明分布を用いて超解像処理を行った例であり、Fig. 3(b)は縦方向に対応した例である。それぞれの画像に表れたラインは、解像対象サンプルの分布と対応している。しかしながらラインは、超解像効果が与えられた方向に垂直なもののみが確認される。照明の変調方向に存在する連続体構造を正しく反映していない結果となった。しかしながらそれぞれの結果において、解像対象の構造を再構成しているため、得られた2つの結果を合成することにより、解像対象の構造を得ることができると考えられる。

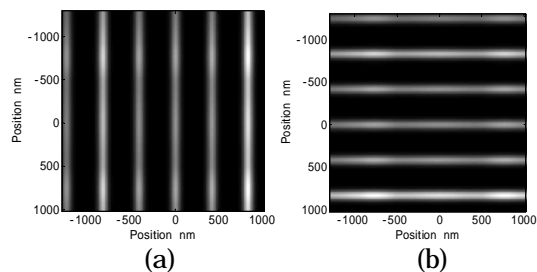


Fig. 3 単一方向への超解像処理結果

(a) 横方向へ超解像効果を与えた結果, (b) 縦方向へ超解像効果を与えた結果

Fig.3 の 2 つの結果を合成した結果を Fig. 4 に示す Fig. 2(a)の解像対象サンプルの構造と一致した構造が示されている。回折限界(541 nm)以下のサイズの構造を持つ(420 nm)ため、通常の観察手法においては Fig. 2(b)のように構造が判別できない対象を超解像処理によって、二次元領域で再構成することに成功した。この手法は、変調照明と試料の相対的角度変化による強度情報の変化にも対応した方法である。Fig.3 のそれぞれの画像は、実験的に散乱光強度が強い構造を解像したと対応している。そのため、この手法は二次元超解像実験との高い親和性があると考えられる。

次に本手法の欠陥検出特性について調査した。Fig.2 のサンプルに対し、付着物と構造欠落を想定した欠陥を導入したものを Fig.5(a)に示す。このサンプルを光学顕微鏡で観察すると Fig.5(b)のように構造が明らかではない。理想的な構造から得られる取得像が予測されていれば、欠陥が存在することは予測できる可能性があるが、欠陥の他の構造との位置関係は不明である。このサンプルに対し、Fig.4 と対応する処理をした結果を、Fig.6 に示す。Fig.6 では欠陥の存在が確認でき、かつサンプルのもつグリッド状構造との相対的位置関係が明らかになっている。本手法における欠陥検出の実現可能性が示された結果といえる。

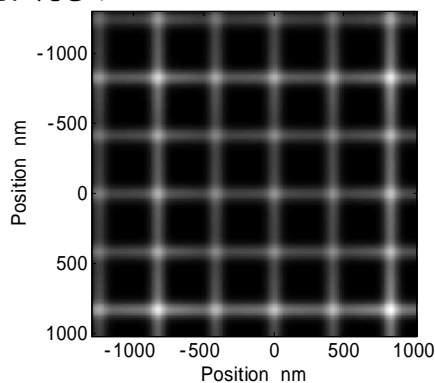


Fig. 4 二次元超解像処理結果 (Fig.3(a),(b)の合成)

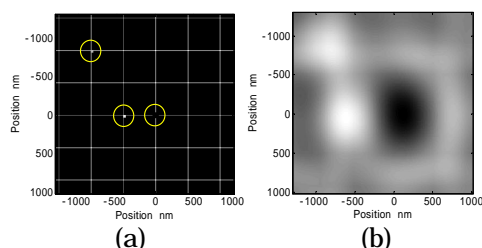


Fig. 5 欠陥つき解像対象サンプル (a)解像対象サンプル構造,(b)サンプルの通常の光学顕微鏡による観察像

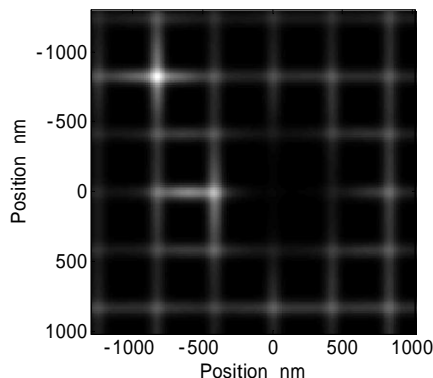


Fig. 6 二次元超解像処理結果

(5)半導体の欠陥計測における、高速・非破壊・高解像度の新たな光学的超解像計測手法の開発を行っている。三光束干渉定在波シフトを用い、コヒーレント結像逐次再構成型超解像を実現する。一次元方向の超解像の実現可能性を理論・実験の両面から特性を精査した。本手法を実際の現場において応用するためには、さらに二次元領域の超解像処理が重要となる。二次元領域の超解像手法として、定在波照明と解像対象サンプルとの相対的な角度を変化させることにより、二次元的な照明変調情報を取得し、超解像処理の解に反映させる方法を採用した。フーリエ光学に基づいたシミュレーションにより実現可能性の検証を試みた。定在波と解像対象サンプルの角度を相対的に 90 度変化させた、2 つのパターンの画像群を取得し、それぞれのパターンにおいて超解像処理を行った。その結果、得られた 2 つの画像において、超解像効果の及んだ方向に対して、回折限界 541 nm の条件で 420 nm 構造を分解する超解像性を達成した。それぞれの画像において、超解像効果の及んだ方向と垂直な方向の分布については、情報が失われる結果となった。しかしながら 2 つの画像を合成することにより失った情報をそれぞれ補い、最終的に解像対象サンプルの構造を再構成することに成功した。この結果により二次元超解像の基礎的な実現可能性を検証した。この手法は変調照明と試料との相対的角度の変化による強度情報の変化にも対応できる手法であり、実験的な応用可能性が高い。さらに提案手法による欠陥検出特性についても検討した結果、試料構造の超解像と欠陥の検出、試料構造中の欠陥の位置確認の実現可能性があることが示された。

<引用文献>

- [1] 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)精密工学会誌, 74 巻 5 号, 2008, 498-503

- [2] 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超解像法の原理 -, 精密工学会誌, 81巻6号, 2015, (掲載予定)
- [3] 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4報) - コヒーレント結像逐次再構成超解像法の実験的検証 -, 精密工学会誌, 81巻7号, 2015, (掲載予定)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

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4報) - コヒーレント結像逐次再構成超解像法の実験的検証 -, 精密工学会誌, 査読有, 81巻7号, 2015, (掲載予定)

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超解像法の原理 -, 精密工学会誌, 査読有, 81巻6号, 2015, (掲載予定)

[学会発表](計 4件)

工藤 良太, 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18報) - コヒーレント結像逐次再構成超解像法による二次元超解像法のシミュレーションによる検討 -, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会

Ryota Kudo, Hiroki Yokozeki, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Coherent Imaging Algorithm of Super-Resolution Optical Inspection with Structured Light Shift, LEM21 (2013)

工藤 良太, 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17報) - コヒーレント結像逐次再構成超解像法の実験的検証 -, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会

工藤 良太, 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16報) - コヒーレント結像逐次再構成超解像装置の基本的機能検証 -, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会

[その他]

ホームページ: R.Kudo Homepage - 工藤良太のホームページ | 光で測ろう!  
<http://www001.upp.so-net.ne.jp/precopt/>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

工藤良太 (KUDO, Ryota)

大阪大学工学研究科附属超精密科学研究センター・特任研究員

研究者番号: 70706697