

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2014

課題番号：26630018

研究課題名(和文)局在光場動的制御を用いた次世代微細機能構造のナノ欠陥超解像計測への挑戦

研究課題名(英文)Challenging exploratory research on super resolution measurement of nano defects for next-generation functional fine structures by controlling dynamic localized light distribution

研究代表者

高橋 哲 (Takahashi, Satoru)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：30283724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：検査面上に照射した集光ビームスポットを、そのスポット分布が重複する形でナノシフト(局在光動的制御)させた際に検出される複数の遠隔場検出光散乱像群に対して、集光ビームスポット強度分布の重みと光学系の点像分布関数を考慮した逆演算を施すことで、通常の遠隔場応用光学的手法では困難な集光ビームスポット内の情報を、回折限界を超越した空間分解能で取得する、といった新しい光学的ナノ欠陥計測法の実現を目指した。理論・実験の両面から解析を行った結果、遠隔場光学系に関わらず回折限界超越を実現するという提案手法の基本コンセプトを実証した。

研究成果の概要(英文)：We proposed the novel high resolution optical measurement, which can be applied to the inspection for nano-scale functional structures such as semiconductor patterns, micro mechanical functional devices. With the proposed method, super optical resolution beyond the diffraction limit can be expected by analyzing the multiple far-field optical images detected by scanning the Gaussian beam spot with a nano-scale shift. Both theoretical and experimental analyses verified the validity of the fundamental core concept that the proposed method can perform a super resolution inspection for fine structures beyond the diffraction limit.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：欠陥計測 ナノ欠陥 光計測 超解像計測

1. 研究開始当初の背景

100nm 以下の微細構造製造技術は、量子的性質の発現やマクロスケールでは実現できない光学的（例えば直角行路を有する微細光回路）、力学的機能（例えば、超撥水性）等の特異な物理制御が可能であることから、次世代高機能デバイス実現の上で重要な要素技術の一つであり、製造デバイスの高付加価値化を目指している日本の製造業にとって最重要課題の一つといえる。それらを実現する加工技術は従来半導体加工技術の高度化の他、EUV 光源の適用や、ナノインプリント加工技術、EB・FIB 加工技術、自己組織化ボトムアップ製法等など様々な加工原理が提案され、活発に研究・開発が進められている。

一方、これらの加工された微細機能構造の評価技術としては、従来より、高速性、非破壊性等といった現場適用性の高さから有効に使われてきた遠隔場光学的手法の適用は、波長に基づく回折限界のため困難となる。結果として、SEM, STEM, TEM 等の電子線利用型計測法 [1]や AFM, STM, NSOM 等に代表される走査型プロービング手法[2]が適用されることが多いが、それらは、真空環境の必要性や近接プローブ走査に起因するスループット低下、サンプル非侵襲性の悪化といった問題が潜在し、製造プロセスの評価技術としては限定した適用に限られていた。そのため、次世代微細機能構造を高い信頼性をもって創製するためには、従来遠隔場光学的手法が有していたような現場適用性の高さをもちつつ、数 10nm 以下の解像力を有する新しい構造欠陥計測評価手法の確立が不可欠となっている。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本申請研究は、遠隔場光学的手法が本質的に有している高速性、非破壊性等といった現場適用性の高さを維持しつつ、数 10nm の空間分解能で微細機能構造の欠陥計測が可能で新しい手法の提案と理論・実験両面からの有効性検証を目的とするものである。

3. 研究の方法

検査面上に照射した集光ビームスポットを、そのスポット分布が重複する形でナノシフト（局在光動的制御）させた際に検出される複数の遠隔場検出光散乱像群（図 1）に対して、集光ビームスポット強度分布の重みと光学系の点像分布関数を考慮した逆演算（図 2）を施すことで、通常の遠隔場応用光学的手法では困難な集光ビームスポット内の情報を、回折限界を超越した空間分解能で取得する、といった新しい光学的ナノ欠陥計測法の実現を目指し、理論・実験の両面から提案コンセプトの検証を試みた。なお本研究において逆演算アルゴリズムとしては、Richardson-Lucy デコンボリューションア

ルゴリズム[3]を複数像入力に拡張して実施した。

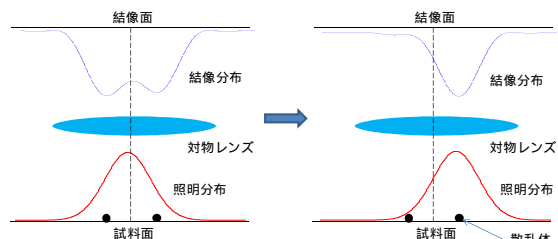


図 1. 集光ビームスポット重複シフトによる光学取得像の微小変動

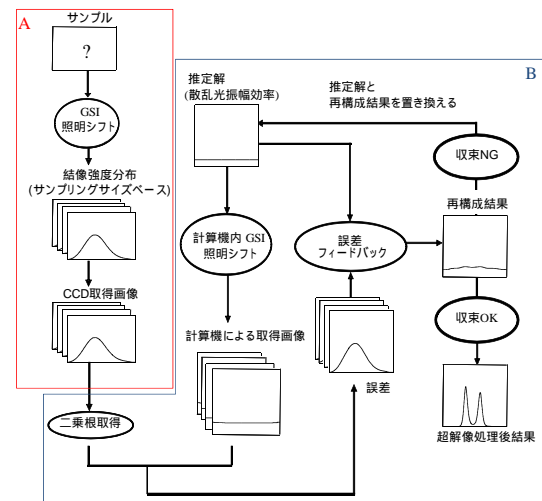


図 2. 超解像フローの概念図(ガウシアンスポット照明: GSI)

4. 研究成果

(1) 解像力向上特性の理論解析

提案手法における解像特性を理論的に解析するため、数値シミュレーションを行った。ここでは解像に最も影響を与えられと考えられるパラメータのうち、光学系の拡大倍率に焦点を絞り離散二点サンプルに対して解像特性を評価した。一般の光学顕微鏡の場合、倍率が高いほど、微細構造を拡大観察することができる。しかし、回折限界以下の細かい構造によるぼやけた像に対して拡大倍率を上げることがは無意味であり、拡大倍率の増加に伴う解像力の向上は見られない。しかし提案手法においては、ボケ画像を逐次再構成数値演算に用いるため、ボケ画像自体の面内サンプリングを向上させることは、最終解像力の観点で重要な意義を有すると思われる。シミュレーション条件を表 1 に示す。ここで、サンプリングサイズは CCD の分解能で決まり、具体的には CCD1 pixel が試料面上で占める領域の二倍である。

図 3 (A), (B) は拡大倍率の変化による解像特性変化の具体例であり、設定サンプルと超解像処理後の再構成像を示している。拡大倍率 300 倍の場合(A)は、距離 60 nm 離れたサンプルが解像されているが、距離 56 nm のサンプルについては解像できていない。一方、拡大倍率 2000 倍の場合(B)は、30 nm のサンプルについては解像できていないが、32 nm

サンプルでは解像が可能であることが分かる。これより、通常の顕微鏡では、回折限界により無意味な倍率拡大値においても、提案超解像手法の解像力はその拡大倍率値に依存し、拡大倍率の増加に伴い向上することが分かる。そこで、拡大倍率と分解能の関係について調査した(図4)。具体的には、各拡大倍率について解像可能な離散二点間の距離の最小値を調査した。ここで、シミュレーションにおける解像基準は、レイリー限界における二つのピークと、ピーク間にある谷との比とした。拡大倍率が500倍までは、提案手法による分解能が向上し、サンプリングサイズまでの解像が可能である。しかし、拡大倍率が1000倍以上の場合では、分解能は拡大倍率に依存した向上が見られず、30 nm程度に漸近する。このことは、提案手法は基本的にはCCDサンプリングサイズまでの解像力を有するが、30 nm程度が本質的限界となることを示唆しており、今後は、ノイズ付加による解像特性の変化等に着目するなど、解像限界に関して、更に詳細な調査を行う。

表1. 超解像シミュレーション条件

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| 光源波長 | 488 nm |
| スポット照明径 | 300 nm |
| 対物レンズ NA | 0.95 |
| レイリー限界 | 313 nm |
| スポット単位シフト距離, シフト回数 | 40 nm, 50 回 |
| 再構成ループ回数 | 400,000 |
| CCD pixel サイズ | 8.3 μ m |
| 拡大倍率 | 90, 200, 300, 500, 1000, 1500, 2000 |
| サンプリングサイズ | 184, 83, 56, 34, 16.6, 11, 8.4 |

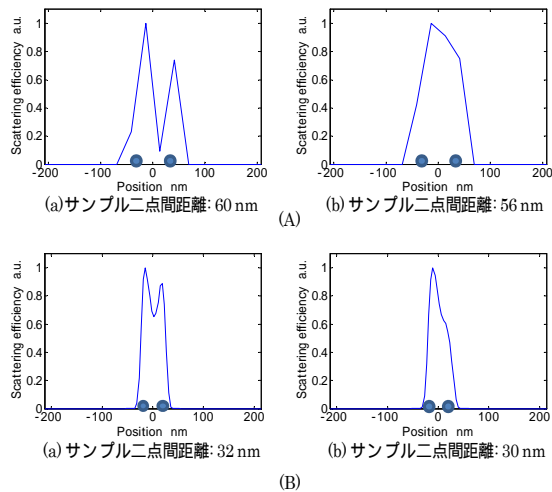


図3. 拡大倍率の変化による分解能向上の具体例
拡大倍率: (A) 300倍 (B) 2000倍

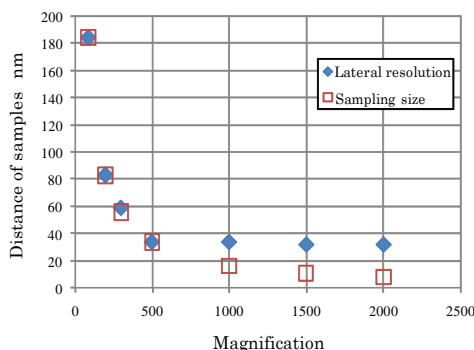


図4. 拡大倍率と分解能の関係

(2) 回折限界超越計測性の実証実験

提案手法の最も重要な、回折限界を超越した超解像計測特性が本当に発現するか、実証実験を試みた。図5が具体的な実験装置構成の模式図である。模式図の光路中の矢印は平面内の偏光方向であることを示す。また同心円記号によって垂直偏光であることを示す。まず、実験装置の入射照明光路について説明する。レーザー光源から射出される直径1 mmの直線偏光は、半波長板(図中 $\lambda/2$)、偏光板からなる光量調節機構によって平面内偏光となり、また、光量を調節される。その後ビームエキスパンダで対物レンズの入射瞳に干渉しない限界のサイズまで径を拡大される。この拡大はサンプル面におけるスポット径を可能な限り小さくするために行われる。その後、光は偏光ビームスプリッター(PBS)、 $\lambda/2$ を透過した後垂直偏光へと変換され、対物レンズに入射後集光され、サンプルを照明する。スポット径をビームウェスト値に制御するために光軸方向に駆動するステージを導入するまた光軸に対して垂直な方向には高精度自動1軸ステージを導入し、照明光をシフトさせるのではなくサンプルステージをシフトすることによって、照明光とサンプルを相対的にシフトする。上述の方式を取るのには、照明光をシフトした場合光路が対物レンズ中心からずれ、入射照明光の垂直度が悪化するためである。次に、反射・散乱光路について述べる。照明由来の反射光は垂直偏光であるため、 $\lambda/2$ を通過する際に平面内偏光に変換され、そのままPBSを透過してCCD方向に進まない。よってCCDで検出されない。一方散乱光には垂直偏光成分以外に平面内偏光成分が含まれ、平面内偏光成分は $\lambda/2$ によって垂直偏光となるため、PBSにより反射される。反射された散乱光は結像レンズ(図中TL)を通り、CCD上に結像される。すなわち、この系では散乱体の偏光解消によって、選択的に散乱光をCCDに結像させ、暗視野散乱光検出を実現する。また、顕微拡大機能獲得のために対物レンズと結像レンズによる無限遠補正系を構築し、複数の対物レンズを使用可能とすることにより拡大倍率を可変とする(表2に開発装置仕様、図6に開発装置写真)。

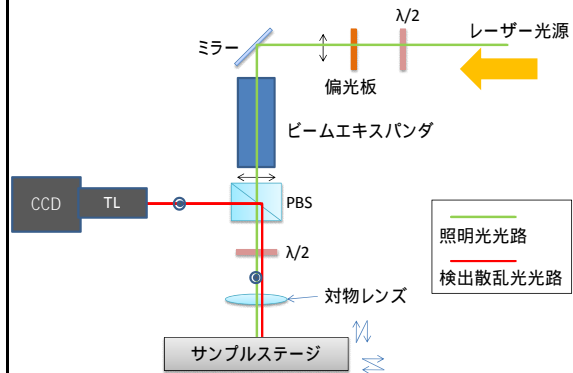


図5. 提案概念実証用実験装置

表2. 開発装置仕様

| | |
|------------------|---|
| 投光系 | 集光投射型 |
| 受光系 | 偏光解消型暗視野・無限遠補正光学系 |
| 光源 | 488 nm CW ブルーレーザ, 出力 150 mW |
| 受光デバイス | 16 bit CCD エリアセンサ |
| 対物レンズ N.A. | 0.46, 0.42, 0.55, 0.95 |
| 拡大倍率 | 18 倍, 45 倍, 90 倍, 90 倍 |
| サンプル面 CCD1 pixel | 461 * 461 nm ² , 185 * 185 nm ² , サポート範囲 |
| 観察視野 | 356 * 267 μm ² , 143 * 107 μm ² , 71 * 53 μm ² , 71 * 53 μm ² |
| スポット照明径 | 676 nm, 740nm, 565nm, 327 nm |
| スポット照明シフト分解能 | 1 nm |
| スポット照明シフト範囲 | ± 25 mm |

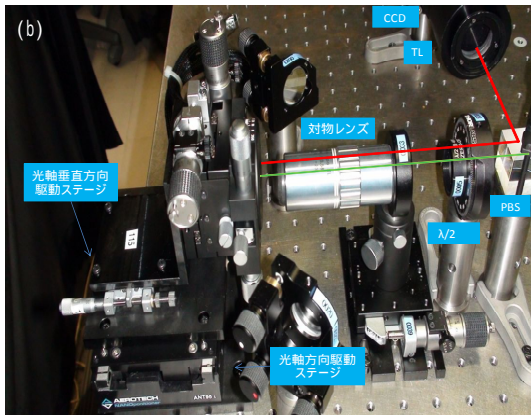
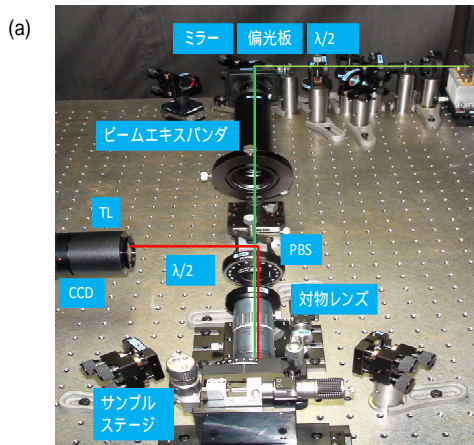


図6. 開発装置の写真 (a)全体, (b)サンプル近傍

次に開発装置を用いて、超解像計測検証実験を行った。ここでは、定量的な解像力評価のため、サイズが既知な標準ラインアンドスペースサンプルのエッジ部を離散二点散乱体とみなして、それらの超解像分離が可能であるかを調べた。具体的には、レイリー限界 540nm の光学システムにより 300nm ギャップの解像を試みた (実験条件詳細は表3)。

表3. 超解像実証実験の実験条件

| | |
|------------|--------|
| スポット照明径 | 624 nm |
| 照明シフト単位サイズ | 33 nm |
| 照明シフト回数 | 24 回 |
| 光源波長 | 488 nm |
| レイリー限界 | 541 nm |
| 結像 NA | 0.55 |
| 逐次再構成回数 | 1000 回 |

図7は照明重複シフト時における取得像の変化を示す。ガウシアン照明径 (約 630nm)

より十分小さなシフト量 (33nm) においても、取得像が変化していく様子が見られる。これらの照明重複シフトによって変調を受けた取得像 24 枚に対して超解像処理を施した (図8)。レイリー限界 (約 540nm) より小さな二点離散エッジ (300nm) が明確に分離されており、これにより、遠隔場光学系に関わらず回折限界超越を実現するという提案手法の基本コンセプトを実証した

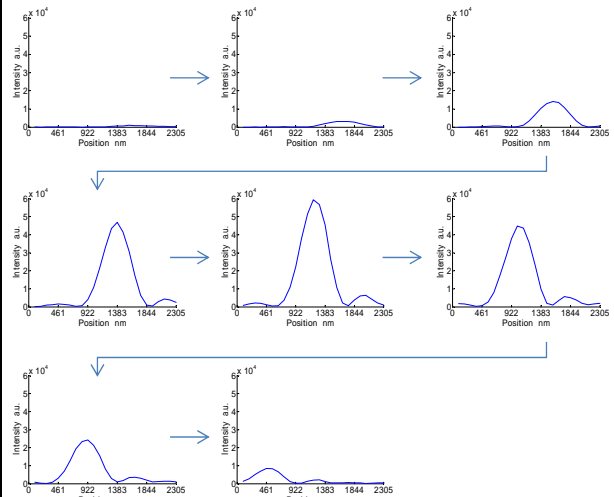


図7. スポット照明重複シフトによる取得像の変化例

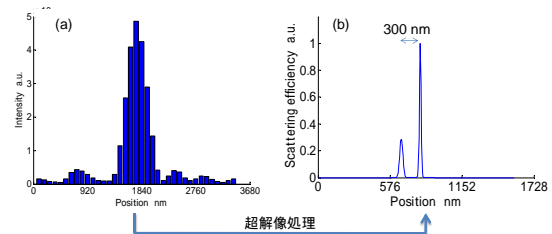


図8. 超解像結果 ((a)通常観察像, (b)提案手法)

<引用文献>

例えば, Lowney, J. R., Scanning 17, 281-286 (1995).
 例えば, Liu, H.-C., et.al, Proc. SPIE 6152, 61522Y (2006).
 LUCY LB, Astron. J. 79, 745-754(1974).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

S. Takahashi, H. Yokozeki, D. Fujii, R. Kudo, K. Takamasu, A novel dark field in-process optical inspection method for micro-openings on mirrored surfaces beyond the diffraction limit using active phase control, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 査読有, 63 巻, 2014, 465-468, DOI:10.1016/j.cirp.2014.03.035
 Hiroki Yokozeki, Ryota Kudo, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Lateral

resolution improvement of laser-scanning imaging for nano defects detection, *Advanced Optical Technologies*, 査読有, 3(4), 2014, 425-433, DOI:10.1515/aot-2014-0030

〔学会発表〕(計 8 件)

S. Takahashi, Challenge of Spatial Resolution Improvement of Optical Measurement Method Based on Localized Light Energy, 12th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII 2015), 2015 年 9 月 24 日, Taipei(Taiwan).

金成碩, 久米大将, 横関宏樹, 高橋哲, 高増潔, スポット重複移動情報を用いた光学式超解像検査法の開発, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 14 日, 北海道大学(北海道・札幌市).

横関宏樹, 久米大将, 高橋哲, 高増潔, スポット照明の重複シフトによる光学式超解像検査法(第 5 報) - 離散的サンプルを用いた提案超解像原理の実験的検証 -, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015 年 3 月 17 日, 東洋大学(東京都・文京区).

久米大将, 横関宏樹, 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 19 報) - 3 光束干渉定在波照明の自動生成法の検討 -, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015 年 3 月 17 日, 東洋大学(東京都・文京区).

高橋哲, 蛍光修飾を要さない回折限界超越観察技術の開発, 応用物理学会 / 第 135 回微小光学研究会, 2015 年 3 月 05 日, 上智大学(東京都・千代田区).

久米大将, 横関宏樹, 工藤良太, 高橋哲, 高増潔, 微細加工構造の超回折限界光学式計測法の開発, 日本機械学会 第 10 回生産加工・工作機械部門講演会, 2014 年 11 月 15 日, 徳島大学(徳島県・徳島市).

横関宏樹, 工藤良太, 高橋哲, 高増潔, スポット照明の重複シフトによる光学式超解像検査法(第 4 報) - スポット照明超解像型基礎実験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, 2014 年 9 月 16 日, 鳥取大学鳥取県・鳥取市).

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型超解像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, 2014 年 9 月 16 日, 鳥取大学鳥取県・鳥取市).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.photon.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 哲 (TAKAHASHI, Satoru)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号: 30283724

(2) 研究分担者

高増 潔 (TAKAMASU, Kiyoshi)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 70154896

(3) 連携研究者