

機関番号：13801
 研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20569001
 研究課題名(和文) エバネッセント光の動的空間分布制御による次世代半導体表面ナノ欠陥の高速計測法
 研究課題名(英文) High-Speed Defect Measurement of Next-Generation Semiconductor Wafer Using Active Control of Evanescent Light
 研究代表者
 臼杵 深 (USUKI SHIN)
 静岡大学・若手グローバル研究リーダー育成拠点・特任助教
 研究者番号：60508191

研究成果の概要(和文)：定在エバネッセント光照明分布の動的制御，複数画像の逐次的再構成による超解像顕微鏡法を基礎的に検証するための装置を開発し，定在エバネッセント光生成，散乱光結像，離散的サンプルによる解像実験を行った．提案手法の基礎原理を実験的に確認することができた．更に，ピクセルサイズと解像力との関係を計算機シミュレーションにより検討したところ，変調照明の微小シフトによりピクセルサイズ以下の解像（サブピクセル標本化）が実現する可能性があることがわかった．本申請研究と関連した研究として，結像光路を動的にサブピクセルシフトさせ顕微鏡観察画像を高解像度化する手法を新たに提案し，シミュレーションおよび実験により有効性を検討した．更に，マルチビームの3次元干渉に基づいた広領域3次元空間変調照明の生成・制御手法を提案し，シミュレーションおよび実験により有効性を検討した．

研究成果の概要(英文)：First of all, the experimental apparatus was developed for fundamental verifications in generating and control of standing evanescent illumination, and in super-resolution microscopy based on multiple-image iterative reconstruction. As a result of experiments using scattered light imaging of discrete specimen, basic principles of the proposed method was confirmed. Furthermore, numerical simulations were performed to investigate the relationship between pixel size and resolving power in the proposed microscopic imaging technique. It was found that nano-scale displacements of standing evanescent illumination possibly provided us sub-pixel resolution (sub-pixel spatial sampling). Related works of this research were proposals and efficacy analyses of resolution improvement technique based on active shift of imaging path and wide-field three dimensional structured illumination generation technique using multiple-beam interference.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	0	1,100,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	630,000	3,830,000

研究代表者の専門分野：知的ナノ光計測

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：複数画像再構成，定在エバネッセント照明，空間変調照明，エバネッセント光，欠陥計測，超解像，ナノ計測，半導体表面計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 光計測は本質的に非破壊・非浸襲であり、遠隔センシングによる高速化の可能性があることから広範な分野において親和性が高い。ゆえ、新たな光学計測技術開発を目指し国内外問わず活発に研究活動が行われている。現行する光計測技術は、情報取得方法の観点から、点計測走査型、面内一括計測型に大別できる。一般に面内一括型は、光情報の並列処理性を利用したもので高速処理が可能な反面、光学的解像限界に支配されるため原理的にナノ解像度を達成することは困難である。一方、点計測走査型は共焦点顕微鏡法の他、多光子吸収法、STED 顕微鏡法、近接場光学顕微鏡法等があるが、それぞれ超解像を実現し、10nm の高解像度を誇るものも存在する。しかし、計測領域全域にわたり点走査の必要がありスループットが低い。つまり、光計測技術には本質的に、解像度とスループットの間トレードオフの関係が潜在していた。以上の光学計測技術に対し、本研究における計測技術は、面内一括型の高スループット性、近接場光学技術のもつ超解像性を高度に融合した、新しい光学計測技術である。

(2) 半導体欠陥計測技術の動向としては、既に実用化されている技術として、ベアウエハ上微粒子の暗視野散乱光検出技術がある。この技術は sub-100nm サイズの欠陥の有無判別を行うものであるのに対して、本提案手法は欠陥の有無の判別にとどまらず、欠陥レビューが可能であるといえる。例えば、散乱体が波長以下の領域に複数個配置された場合の解像を行うことが可能となる。以上の点で本手法がアドバンテージを有しているといえる。光学的超解像計測技術の動向として、変調照明（定在波）による超解像顕微鏡法を蛍光体に対して適用し、蛍光顕微鏡としてサブ波長以下の解像を行った例はあるが、散乱体に対して適用し、半導体欠陥計測に応用した例は未だ無い。

2. 研究の目的

(1) 本申請研究は、近接場光（エバネッセント光）計測技術の特徴である高分解能計測特性と面内局在エネルギーの動的空間分布制御による超解像計測特性を高度に融合することによって、sub-100nm の解像力、面内一括光学画像処理による高速計測性を有する全く新しい次世代半導体欠陥計測手法の確立を目的としている。

(2) 本計測手法は、エバネッセント光の対向励起や DMD(Digital Micromirror Device) を用いた空間変調エバネッセント光により生成される高周波エネルギー分布の空間位置を動的に制御することによって複数の光学

結像情報を取得し、取得情報に対して計算機を用いて後処理を加えることにより、局在エネルギー分布の高周波情報や制御情報を算出解に反映させる手法である。本手法は、波長以下の高周波エネルギー分布をナノオーダーで動的空間位置制御するため、従来の解像限界を超えた sub-100nm 解像力の実現可能性を有している。更に、遠隔伝搬光結像の面内一括並列処理、光学計測の本質である非浸襲性、複数情報取得に基づいた外乱抑制、の観点から、次世代半導体の生産現場における高速計測手法として有効なアプリケーションとなることが期待できる。

3. 研究の方法

(1) レーザ照明の動的空間分布制御による超解像光学式欠陥検出法を確立するために、100nm 以下の超微細構造解像実験およびナノ欠陥検出実験を行う。具体的に、以下のようない計画の下で研究を遂行する。

- ① 超微細パターン、ナノ粒子、ナノ欠陥を含むサンプルの作成
- ② サンプルにおける散乱体位置の同定
- ③ レーザ照明の動的空間分布制御、変調散乱光検出を高い精度で行う装置の開発
- ④ 複数イメージ群の超解像処理技術の確立
- ⑤ 解析結果から超微細構造解像実験における問題点を抽出し、その都度、解決方策の考案および手法の改良を重ねることで、次世代半導体ナノ欠陥検査への適用を実現する。

(2) 検査対象が超微細構造であることに起因する検出系の S/N およびロバスト性の問題に取り組む。解決方策として、照明強度分布形状を変化させ光応答を複数パターン取得することによってランダムノイズを抑制することを提案し、方法の確立を目指す。具体的には以下のような計画の下で研究を遂行する。

- ① フーリエ結像理論に基づいた解像シミュレータの構築・改良
- ② ランダムノイズや系統的ノイズを考慮した解像シミュレーション
- ③ シミュレーションにおいて、照明分布の空間位置を制御するだけでなく、照明分布の空間周波数をも制御する。
- ④ 実験的な S/N やロバスト性の検討を併せて行い、最終的な欠陥計測システムへ導入する。

(3) エバネッセント場に存在するナノスケール微小散乱体からの散乱形態の理論的解明を行う。具体的には、FDTD 法に基づいて構築した近接場領域時系列電磁場解析シミュ

レータにより、計算機内でエバネッセント光を動的に空間分布制御し、エバネッセント場に存在するナノ散乱体からの遠方散乱光を解析可能なシミュレータを構築する。

(4) エバネッセント光の高精度動的空間分布制御技術を確立するために、上記シミュレーションによって得られた知見に基づき、高屈折率固体浸レンズや全反射プリズムを用いてエバネッセント光を生成する。第一の方法として、高面精度ミラーを用いてエバネッセント光を対向励起させ、 piezoアクチュエータにより位相変調させることで、照明分布を動的に制御する。

(5) 最後に本研究のコアである、エバネッセント光の動的空間分布制御による次世代半導体ウエハのナノ欠陥計測技術の開発を行う。以上において開発した技術を統合し、次世代半導体ウエハのナノ欠陥検出を、高安定性、高 S/N 性、高解像性のもとで行う。

4. 研究成果

(1) 照明光の動的空間分布制御による次世代半導体表面ナノ欠陥計測手法の確立を目的として、本研究課題と関連した研究である「変調照明シフトによる光学式超解像欠陥計測法に関する研究」において、光源波長 488nm, NA0.95, 回折限界 313nm の光学結像系を用いて、150nm ラインアンドスペースの解像および 250nm ラインアンドスペースの欠陥検出実験を行った。提案手法によって従来の光学顕微観察手法では解像することができないパターンを解像できること、ナノ欠陥を検出することが可能であることがわかった。以上から、この結果は次世代半導体の欠陥検査において意義深く重要である。

(2) 定在エバネッセント光照明分布の動的制御、複数画像の逐次的再構成による超解像顕微法を基礎的に検証するための装置を開発し、定在エバネッセント光生成、散乱光結像、離散的サンプルによる解像実験を行った。提案手法の基礎原理を実験的に確認することができた。この結果は、本研究課題を推進し、ナノ欠陥を高速に計測する手法の開発をするに際して意義深く重要である。

(3) ピクセルサイズと解像力との関係を計算機シミュレーションにより検討したところ、変調照明の微小シフトによりピクセルサイズ以下の解像（サブピクセル標本化）が実現する可能性があることがわかった。この結果は、CCD エリアセンサを含む顕微観察系のような空間サンプリングのサイズが有限な系においてもピクセルサイズ以下の解像が行えること、すなわち、視野を狭めずに高分

解能計測が可能な点で意義深く重要である。

(4) レーザ照明の動的空間分布制御による超解像光学式欠陥検出法を確立するにあたって、提案手法の実験的検討を行うための装置を構築した。この装置は、多光束レーザ光の干渉による定在波照明（周期的強度分布）の生成機能、位相シフトによる照明光の空間強度分布のナノオーダ制御機能、暗視野散乱光結像機能、落射照明による明視野顕微鏡観察機能、観察試料の高精度位置決め機能、レーザ照明のコリメートおよび偏光制御機能、を有する。

(5) 超長作動距離および高い開口数を有する対物レンズを用いて、ラインアンドスペース構造（NTT-ATN 製：0.1 μm ~1 μm 回折限界より微細な構造）の観察を行い、機能確認をするとともに、変調照明による超解像（モアレ効果）を半導体パターンのピッチ計測に応用した。その結果、回折限界 0.5 μm より微細な 0.2 μm のピッチを誤差 1%以内で計測した。

(6) 3次元変調照明を精密計測に応用することを提案したうえで上記構築装置による変調照明生成機能を3次元に拡張するための指針を立てた。装置改良に先だって3次元 FDTD法による3次元変調照明制御シミュレーションを行った。その結果、3次元方向それぞれに高い空間周波数（0.3 μm 程度）を有する局在エネルギー分布が1mmの空間領域に生成可能で、位相シフトによるナノオーダの空間位置制御が可能であることが分かった。

(7) 結像光路を動的にサブピクセルシフトさせ顕微観察画像を高解像度化する手法を新たに提案し、シミュレーションおよび実験により有効性を検討した。実験の結果、サブピクセル光軸（画像）変位によって、高解像度化、ノイズ抑制、エイリアシング誤差の低減を実現した。更に、MTF解析の結果、現実的な観察条件において、提案手法により0.1ピクセルの空間周波数が解像可能であることがわかった。

(8) 3次元空間変調照明を精密計測に応用することを目的として、マルチビームの3次元干渉に基づいた広領域3次元空間変調照明の生成・制御手法の提案を行った。実験装置構築に先だって、3次元変調照明に関する理論的解析（マルチビーム配置の最適化）、3次元 FDTD法による3次元変調照明生成・制御シミュレーションを行った。その結果、複数のレーザ光源の空間的配置の最適化、入射角制御、偏光制御によって、3次元方向それぞれに等方的に高い空間周波数を有する局在エネルギー分布が広領域に生成可能であるこ

とが分かった。更に、4 光束干渉実験装置を構築し、ポリスチレンラテックス標準粒子を計測対象として3次元空間変調照明を3次元的に空間シフトさせた。その結果、理論およびシミュレーションに即した周期的な輝度変調が観察され、広領域3次元空間変調照明の生成を確認した。

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6件)

- ① S. Usuki, K. T. Miura, High-Resolution Tolerance Against Noise Imaging Technique Based on Active Shift of Optical Axis, International Journal of Automation Technology, 査読有, 5巻, 2011, pp.206-211
- ② S. Usuki, H. Nishioka, S. Takahashi, K. Takamasu, Experimental verification of super-resolution optical inspection for semiconductor defect by using standing wave illumination shift, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読有, 46巻, 2010, pp.863-875
- ③ 高橋哲, 臼杵深, 高増潔, 定在エバネッセント波照明による超解像イメージング, 光学, 査読有, 38巻, 2009, pp.364-372

[学会発表] (計10件)

- ① S.Usuki, Resolution Improvement of Optical Imaging by Spatial Control of Light and Multi-Image Reconstruction (Invited Paper), International Symposium on Ultraprecision Engineering and Nanotechnology, 2011年3月15日, 東洋大学(東京都)
- ② S. Usuki, Multiple image reconstruction for high-resolution optical imaging using structured illumination (Invited Paper), SPIE Optics+Photonics 2010, 2010年8月3日, San Diego Convention Center (アメリカ)
- ③ 臼杵深, 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, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会, 2009年3月11日, 中央大学(東京都)
- ④ 臼杵深, 定在エバネッセント光を用いた超解像顕微法に関する研究, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2008年9月17日, 東北大学(宮城県)

[その他]

ホームページ等

<http://www.shizuoka.ac.jp/tenure/>

<http://ktml1.eng.shizuoka.ac.jp/profile/usuki/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

臼杵 深 (USUKI SHIN)

静岡大学・若手グローバル研究リーダー育成拠点・特任助教

研究者番号：60508191