

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03941

研究課題名(和文) ナノ3次元構造と構成元素の検出のための分光偏光ナノトポメトリ

研究課題名(英文) Spectral polarization nano topometry for 3D nanostructure and constituent element

研究代表者

大谷 幸利 (Otani, Yukitoshi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10233165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、スーパーコンティニューム白色光源を二酸化テルル製の音響光学チューナブルフィルタ(AOTF)で分光し、光弾性変調器(PEM)による高速でかつ高精度な分光ストークス偏光計と分光ミューラー行列偏光計を確立したこと、部分ミューラー行列の解析および高速回転の位相子と同期をとることで高精度な完全ミューラー行列計測を可能としたこと、光学シミュレーション解析法である境界要素法(BEM)偏光情報の構造的複屈折情報と複吸収(二色性)から3次元ナノ構造を決定するシミュレーションを行い数nmの計測感度を持つことが確認できたこと、さらに、分光特性から3次元ナノ構造および材料(構成元素)解析の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a spectral Stokes polarimeter and a spectral Mueller matrix polarimeter with high speed and accuracy by photo-elastic modulators. A super continuum laser is used for a light source by selecting specified spectrum using a Tellurium dioxide acoustic-optic tunable filter. A three-dimensional nano-structure is analyzed by structured birefringence and diattenuation from high precision partial and full Mueller matrix comparing with simulated data by boundary element method(BEM). We succeeded to determine a few nano meters of sensitivity of nano structures and show the possibilities for constituent element from spectral information.

研究分野：光工学

キーワード：ナノ形状計測 ナノ構造 ナノ材料 分光偏光計 シングルピクセルカメラ

1. 研究開始当初の背景

超精密加工技術の向上に伴い三次元計測技術がナノメートルからサブナノメートルオーダに至ろうとしている。製造現場における要求は、100×100mmにおける10nm欠陥検出、つまり、「関東平野においてパチンコ玉の欠陥を探す」というイメージの計測技術である。さらには、その欠陥の構成元素を知ることが必要である。現在のナノ形状評価技術は電子顕微鏡や原子間力顕微鏡 (AFM) が主流であるが、ナノメートルオーダの感度を得ることが出来ることに対して、十分な空間領域の評価ができなかったり、点計測のために計測時間を要するという問題がある。

さらに、電子顕微鏡においては、電子線を効率的に得るため原理的に真空中で観察が求められる。そのため、サンプルの表面状態が限られたり、さらには、サンプルに金蒸着など特殊な処理を必要とする場合もある。

これらの計測法に対して、光学顕微鏡のような光学的手法を用いた計測法は、回折限界があり、波長以下の空間分解能を得ることが困難であった。このような中で、半導体製造分野においてナノ周期構造を捉えるためにレフレクトメトリやエリプソメトリを用いたスカトロメトリが提案されている。これはレーザや白色光を用いてナノ構造を捉えることができるという画期的な手法であるが、2次元断面内にある1次元の周期構造のみに解析可能であった。つまり、加工計測のように任意のナノ3次元形状の計測には適用が難しかった。特に、ナノ形状よる生じる散乱光の偏光状態を分光エリプソメータで計測しているため、エリプソパラメータと言われる複素反射係数の位相差と反射振幅比のみを計測している。この場合は基本的に「完全偏光」を扱っていることになる。一般に散乱光は偏光状態が解消 (スクランブル) されており、さまざまな偏光状態が混在している部分偏光や偏光解消 (デポラリゼーション) を扱う必要がある。また、一般に、これらのエリプソメータは、点計測であり、ナノ3次元構造の検出は困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、3次元ナノ構造からの散乱光を分光偏光イメージングによって波長に対するストークス・パラメータとして計測することでその材料の光学特性および3次元形状を同時に捉えることである。一般的に光は回折限界があるため波長以下の空間的な形状計測は困難である。特に、波長以下の構造になると高次の回折光を得ることが出来ない。しかしながら、ナノ形状によって生じる反射光や散乱光の偏光状態が変化することが知られている。一方、これらの変化量は一義的に決まらないので、3次元ナノ構造および材料 (構成元素) を電磁場解析によって偏光変化量をライブラリー化する。ここでは偏光情報、つまり、複屈折、旋光、二色性、

円二色性、偏光解消を高精度にかつその場評価を可能とするストークス・イメージングを新規に製作し、これによってナノ3次元構造の検出を試みる偏光ナノトポメトリの開拓に取り組むものである。

3. 研究の方法

本研究は、分光偏光ナノトポメトリの設計、試作および電磁場解析である厳密結合波解析 (RCWA)、時間領域差分法 (FDTD) および境界要素法 (BEM) によるナノ構造のシミュレーションおよび有効媒質近似 (EMA) を用いてその材料の構成元素を決定という3つのプロセスに分けて遂行した。

分光偏光ナノトポメトリは、ナノ三次元形状を得るためにストークス・パラメータからナノトポグラフィ検出法を確立した。特に、散乱光は全方位角に広がるので、これに対応するような光学系と従来の装置の改造を施した。ここでは、スーパーコンティニウム白色光源からの入射光を二酸化テルル製の音響光学チューナブルフィルタ (AOTF) で分光し偏光状態を高速に変調するために2つの光弾性変調器 (PEM) を導入し、部分ミューラー行列の解析および高速回転の位相子と同期をとることで高精度な完全ミューラー行列計測を可能とした。検定のための基準光源やナノメートルオーダの構造を持つワイヤグリッド偏光子の透過および反射の偏光特性を評価した。防震環境を向上させることで分光ストークス・イメージングの高精度化をはかった。

得られた波長に対する偏光情報、つまり、分光ミューラー行列や分光ストークス・パラメータからナノ3次元形状情報と構成元素情報を得るシミュレーション法を検討した。電磁場解析である厳密結合波解析 (RCWA)、時間領域差分法 (FDTD) および境界要素法 (BEM) があるが、特にBEMに絞って偏光情報の構造的な複屈折情報と複吸収 (二色性) から3次元ナノ構造を決定するシミュレーションを行い数nmの計測感度を持つことが確認できた。

さらに、分光特性を計測可能であるので、材料による違いの評価から3次元ナノ構造および材料 (構成元素) 解析の可能性を示した。

4. 研究成果

本研究の成果は、スーパーコンティニウム白色光源からの入射光を二酸化テルル製の音響光学チューナブルフィルタ (AOTF) で分光し、光弾性変調器 (PEM) による高速かつ高精度な分光ストークス偏光計と分光ミューラー行列偏光計を確立したこと、部分ミューラー行列の解析および高速回転の位相子と同期をとることで高精度な完全ミューラー行列計測を可能としたこと、光学シミュレーション解析法である境界要素法 (BEM) 偏光情報の構造的な複屈折情報と複吸収 (二色性) から3次元ナノ構造を決定するシミュレーションを行い数nmの計測感度を持つことが確認

できたこと, さらに, 分光特性から材料による違いの評価から3次元ナノ構造および材料(構成元素)解析の可能性を示したことが挙げられる。

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4件)

Nathan Hagen, Yukitoshi Otani : Stokes polarimeter performance: general noise model and analysis, Applied Optics, 57(15), 4283-4296 (2018).

K.Bhattacharyya, David I.Serrano-García, Yukitoshi Otani : Accuracy enhancement of dual rotating Mueller matrix imaging polarimeter by diattenuation and retardance error calibration approach, Optics Communications, 392(2017) 48-53.
David I.Serrano-García, Yukitoshi Otani : Dynamic phase measurements based on a polarization Michelson interferometer employing a pixelated polarization camera, Advanced Optical Technologies. 20160054, 2192-8584 (2016).

J.Cervantes-L, David I.Serrano-García, Yukitoshi Otani, Barry Cense : Mueller-matrix modeling and characterization of a dual-crystal electro-optic modulator, Optics Express 24(21) (2016) pp. 24213-24224.

[学会発表](計30件)

David I. Serrano-García, Yukitoshi Otani : Dynamic interferometric measurements employing a pixelated polarization sensor and FFT spatial-temporal filtering techniques, Proc.of SPIE Vol.10749-33(2018).

P.Mukherjee, Nathan Hagen, Yukitoshi Otani : Glucose sensing in the presence of scattering particles using decomposition of partial Mueller matrix, Proc. of SPIE Vol.10711, 107110Y(2018).

堀口智央, 柴田秀平, 大谷幸利, ネイザンヘーガン, 037 バイオイメージングのための反射型ミューラー行列顕微鏡~第2報~, 精密工学会春季大会(2018)。

David I.Serrano-García, Yukitoshi Otani : Interferometric measurements based on polarization phase shifting techniques employing a pixelated polarization sensor, International Conference on Applied Electronics (ICAppIE), October (2017). (Invited paper) Yukitoshi Otani, Shuhei Shibata, Hiroshi Hasegawa : Spectroscopic Stokes imaging polarimeter for defect detection, ISOT2017 (2017).

(Invited paper) Shuichi Kawabata, Shuhei

Shibata and Yukitoshi Otani : A simple and fast Stokes polarimeter, ISOT2017 (2017).
Nia Natasha TIPOL, Shuichi KAWABATA and Yukitoshi OTANI: A partial Mueller matrix ellipsometer using two photoelastic modulator-polarizer pairs, ISOT 2017, (2017).

Shuhei Shibata, Shuichi Kawabata, Yukitoshi Otani : Real-time Stokes polarimeter using three polarized beam splitter, SPIE Optics and Photonics, San Diego (2017).

Shuhei Shibata, Shuichi Kawabata, Yukitoshi Otani : Real-time Stokes polarimeter using three polarized beam splitter, SPIE Optics and Photonics, San Diego (2017).

(招待講演)大谷幸利: 偏光カメラを用いた3次元形状計測および欠陥検出, 長さクラブ(2017)。

堀口智央, ネイザンヘーガン, 大谷幸利 : バイオイメージングのための反射型分光ミューラー行列顕微鏡, 第59回光波センシング技術研究会(2017)。

大谷幸利, 長谷川潤, 柴田秀平: 欠陥検査のための分光イメージング偏光計, IMEC2017, 山梨・甲府(2017)。

柴田秀平, 川畑州一, 大谷幸利: 6個の光検出器によるリアルタイム・ストークス偏光計, 光計測シンポジウム2017(2017)。

柴田秀平, 川畑州一, 大谷幸利: PBSによる小型リアルタイム偏光計, 応用物理学会秋季大会(2017)。

柴田秀平, 高野航, ネイザンヘーガン, 大谷幸利 : 偏光カメラを用いた微分干渉顕微鏡による層動画計測, 精密工学会秋季大会(2017)。

大谷幸利, 柴田秀平, 高野航, ネイザンヘーガン: 偏光カメラを用いた微分干渉顕微鏡, 第60回光波センシング技術研究会(2017)。

(Invited paper) Y.Otani, S.Shibata, H.Ishiwata, M.Matsuda, T.Yatagai : Real-time 3D reconstruction by differential interference contrast microscope using pixelated polarization camera, International Conference on Light and Light based technologies (2016)。

P.Mukherjee, Nathan Hagen, Yukitoshi Otani : Decomposition of partial Mueller matrix to measure simultaneously birefringence and depolarization characteristics in real time, ISOT2016, Tokyo (2016).

Nia Natasha Tipol, Shuichi KAWABATA, Yukitoshi OTANI: A partial Mueller matrix polarimeter using two photoelastic modulator and polarizer pairs, ISOT2016, Tokyo (2016).

Nia Natasha TIPOL, Shuichi KAWABATA, Yukitoshi OTANI : A partial Mueller matrix

polarimeter using two photoelastic modulator and polarizer pairs, The 63rd Japan Society of Applied Physics Spring Meeting 2016, Japan (2016).

P.Mukherjee, David I. Serrano-Garcia¹, Yukitoshi Otani : Dual Photoelastic Modulator and Rotating wave plate based Mueller matrix polarimeter to measure the optical properties of scattering media, Japanese Society of Applied Physics (2016).

K.Bhattacharyya, Yukitoshi Otani, David I. Serrano Garcia : Mueller matrix imaging polarimeter with non-ideal retarder calibration, Japanese Society of Applied Physics (2016).

柴田 秀平、川畑 州一、大谷 幸利 : 6個の光電検出器によるリアルタイム・ストークス偏光計, 第12回偏光計測研究会(2016).

二宮真, 大谷幸利, 柴田秀平, 鎌田葉 : 分光ミューラー行列のデコンポジションを用いたスキャットロメトリによるナノ構造計測, 精密工学会季大会(2016).

堀口智央, 大谷幸利 : ルート法偏光解析を導入した分光ミューラー行列顕微鏡, 精密工学会季大会(2016)

【招待講演】大谷幸利, 柴田秀平 : ピクセル偏光カメラのキャリブレーションとその応用, 応用物理学会秋季大会(2016).

柴田 秀平, 長谷川 潤, U1aB1 イメージングストークス偏光計によるバイオへの応用, Optics and Photonics Japan 2016, Tokyo, Japan, (2016).

二宮真, 柴田秀平, 杉坂純一郎, 大谷幸利 : 1aB2 ラインセンサー型分光ミューラー行列偏光計の 1pC7 空間情報を利用したナノ構造の欠陥検出, Optics and Photonics Japan 2016, Tokyo, Japan, (2016).

大谷幸利, 長谷川 潤 : 欠陥検査のための分光ストークス・フルフィールドイメージング, 光計測シンポジウム(2016).

柴田秀平, 大谷幸利, 早崎芳夫, 谷田貝豊彦 : 微弱光ストークス偏光計とその応用, 第58回光波センシング技術研究会(2016).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.otanilab.org>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷幸利 (Yukitoshi Otani)

宇都宮大学・工学系研究科・教授

研究者番号 : 10233165

(2) 研究分担者

セラノオ ダビット (David I. Serrano)

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・特任研究員

研究者番号 : 80747270

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

ネイザン・ヘーガン (Nathan Hagen)

川畑 州一 (Shuichi Kawabata)