

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360057

研究課題名（和文） デポラリゼーション顕微鏡によるナノ形状計測

研究課題名（英文） Nano profile measurement by depolarization microscope

研究代表者

大谷 幸利（Yukitoshi Otani）

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・教授

研究者番号：10233165

研究成果の概要（和文）：光学的にナノ形状の検出を可能とするために、光ファイバー・プローブ型によるデポラリゼーション（偏光解消）顕微鏡を提案した。また、ストークス・パラメータの検出には2重回転法を用い、一般解から1対3の回転比が最適であることを見いだした。開発したデポラリゼーション顕微鏡によって、形状によって生じる反射光や散乱光の偏光情報から高精度なナノ形状計測を可能にした。

研究成果の概要（英文）：An optical fiber type of polarimeter which is based on a depolarization microscopy is proposed to evaluate the surface profiles of nanostructures. The best combination of rotating speed of a retarder and an analyzer for dual rotating Stokes polarimeter is carried out in the proportion of one part to three from generated analysis for Stokes parameters detection. A nanostructure profile is determined from the polarization information which happens reflection and scatter of sample structures by depolarization microscopy

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2012年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：超精密計測，ナノ形状，ミューラー行列，散乱光解析，偏光解消

1. 研究開始当初の背景

超精密加工技術の向上に呼応して三次元加工技術がナノメートルからサブナノメートルオーダーに至っている。ここでの形状評価技術は、ナノメートルオーダーの感度が求められており、原子間力顕微鏡（AFM）や電子顕微鏡が主流である。しかしながら、AFMにおいては、計測領域が数百 μm 角という限界や大領域化のためには計測時間を要している。

一方、電子顕微鏡においては、真空中などの環境や観察のための特殊な処理を必要とする。

これらの計測法に対して、古くから試みられている光学的手法を用いた計測法は、回折による限界があり、波長以下に空間分解能を向上させることは困難であった。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

たスキャ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不可能である。

ここでの問題は以下の通りである。

- (1) ナノ形状より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。
- (2) 形状分析のための散乱・回折問題を数値解析的に解くライブラリーを作成し、分光計測の結果とのマッチングをとっている。つまり、これらの問題は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。一般に散乱光は偏光状態が解消されており、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。

我々は、すべての偏光状態を標記できるミューラー行列に注目した。特に、デポラリゼーション（偏光解消）に着目したスキャトロメトリは世界中で取り組んでいる研究グループはまったく見当たらなかった。そこで我々は、ナノ構造からの反射散乱光の偏光状態をミューラーマトリックスから偏光解消顕微鏡を新規に開発することは、十分意義があることであるだけでなく、計測分野の発展に寄与できると考え本研究に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究の目的は光学的にナノ形状の検出を可能とするために、ミューラー行列偏光計によるデポラリゼーション（偏光解消）顕微鏡を提案する。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が発生しない。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。ここでは偏光情報、つまり、複屈折、旋光、二色性、円二色性、偏光解消の波長特性を高精度に実時間でかつその場評価を可能とするデポラリゼーション顕微鏡を新規に製作し、これによってナノ構造の検出を試みた。初年度は、透過型のデポラリゼーション顕微鏡の構築した。これは、光源からの光ファイバプローブによって近接場照明される。近接場距離を一定に保つため、およびサンプルの2次元分布を得るためにピエゾ型xyzステージを導入した。またストークス・パラメータを高速で得るために2重回転偏光計を構築した。これによって、すべてのサンプルの偏光状態、すなわち、複屈折、円複屈折（旋光性）、複吸収（二色性）、円複吸収（円二色性）およ

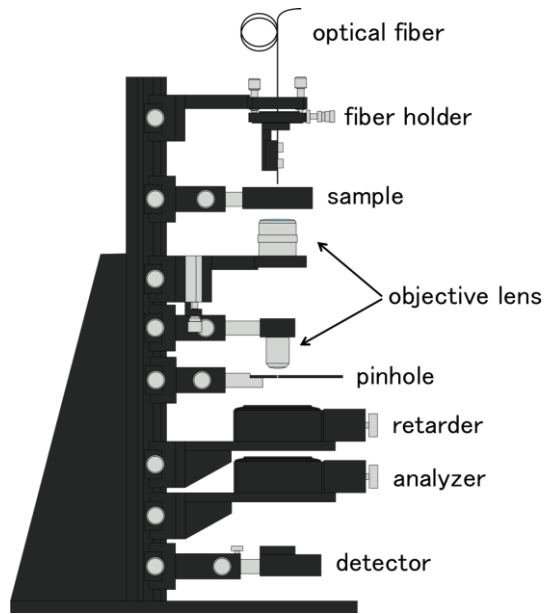
びデポラリゼーション（偏光解消）を4×4要素のミューラーマトリックスで表現した上で、任意の光学素子を透過する際の光の偏光状態をストークスパラメータとして解析する基本技術を確認する。また、透過型デポラリゼーション顕微鏡の有用性と様々分野で実証するため、光プローブによる結果を踏まえて、近接場プローブを用いたデポラリゼーション顕微鏡を構築した。この透過型デポラリゼーション顕微鏡と平行して、厳密結合波解析（RCWA）と境界要素法によって数値解析から得られたストークスパラメータからナノ構造の決定法を確認した。また、近接場プローブ検出される光強度は、とても微弱になるのでフォトンカウンティング検出器を導入し、これによる高ダイナミックレンジ偏光計を開発した。これらの検討結果から、光強度の検出感度が11桁という超高ダイナミックレンジが期待できる。フォトンカウンティング近接場ミューラー行列偏光計の確立の可能性を検討する。

3. 研究の方法

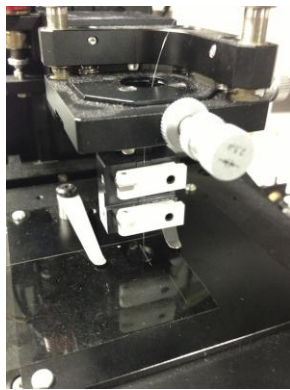
(1) 近接場プローブを用いたデポラリゼーション顕微鏡

図1に近接場プローブを用いたデポラリゼーション顕微鏡を示す。図1(a)の光学系が示すように、先端の尖った光ファイバ・プローブによりサンプルを近接場照明し、入射光の偏光状態を制御しながらサンプル透過後の偏光状態をストークス・パラメータとして計測するものである。このシステムはHe-Neレーザ、および入射偏光制御としてグラントムソンプリズムおよび回転四分一波長板からなる近接場光プローブ（図1(b)）に、サンプル、対物レンズ、回転位相子、回転検光子、検出器で構成されている。この装置全体写真を図1(c)に示す。He-Neレーザからの光を光ファイバに入射し、ファイバ先端からの微小化された出射光を利用する。偏光解析側では2つの対物レンズ微小領域の散乱光を検出する。位相子と検光子を1:3の比で回転させ変調を与え、検出器で光強度を得ることでストークス・パラメータが求まる。光強度が十分に検出できない場合には、フォトンカウンティング法によって光ダイナミックレンジ検出も可能である。

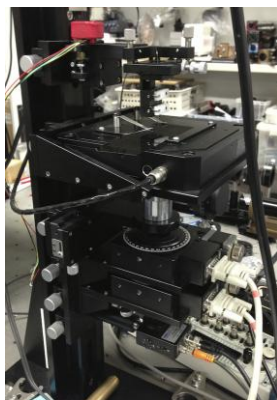
ステージはナノメートルの位置決め制度を持つxyステージでサンプルを移動させることが出来る。光ファイバは、チューニングフォークで位置センシング信号を用いて高精度のz軸ステージで位置決め制御される。



(a) 光学系



(b) ファイバープローブ部分



(c) 装置全体写真

図1 近接場プローブを用いたデポラリゼーション顕微鏡

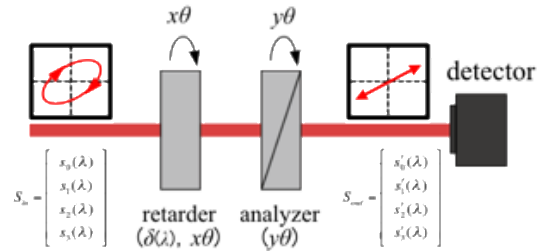


図2 分光ストークス・偏光計

(2) 分光ストークス・パラメータ計測

本研究では、位相子と検光子を二重回転させる手法を提案する。いままでに我々は位相子と検光子を1対3で回転させる手法を提案してきたが、二重回転させる手法は様々な回転比でも計測が可能であり、十分な検討を行っていなかった。そこで、回転比の条件によって解析式が異なる偏光子と位相子の二重回転型ストークス偏光計の解析式を一般化した。解析式を用いて様々な回転比による計測への影響を検討した。その中で、従来の1対3の回転比が最適解の一つであると結論づけた。図2の光学系は、ストークス・パラメータ、ミューラー行列を用いると次の関係式で表すことができる。

$$S_{out}(\lambda) = A_{3\theta} \cdot R_{\delta(\lambda), \theta} \cdot S_{in}(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 $A_{3\theta}$ 、 $R_{\delta(\lambda), \theta}$ はそれぞれ検光子、位相子のミューラー行列である。 S_{out} 、 S_{in} はそれぞれ検出器前とサンプル透過後のストークス・パラメータである。検出器で検出される光強度分布はこの式(1)を解いて得られる s_0 成分である。したがって、

$$I_x(\theta) = s'_0 = \frac{1}{2} I_0 \left[s_0(\lambda) + \sin^2\left(\frac{\delta(\lambda)}{2}\right) s_1(\lambda) \cos 2\theta - \sin^2\left(\frac{\delta(\lambda)}{2}\right) s_2(\lambda) \sin 2\theta + \sin(\delta(\lambda)) s_3(\lambda) \sin 4\theta + \cos^2\left(\frac{\delta(\lambda)}{2}\right) s_1(\lambda) \cos 6\theta + \cos^2\left(\frac{\delta(\lambda)}{2}\right) s_2(\lambda) \sin 6\theta \right] \quad (2)$$

となる。得られた光強度をフーリエ解析して、得られた係数 a_0 、 a_n 、 b_n より、位相子の複屈折位相差は、

$$\delta(\lambda) = 2 \tan^{-1} \left[\frac{a_2(\lambda) \mp b_2(\lambda)}{a_6(\lambda) \pm b_6(\lambda)} \right] \quad (3)$$

で求めることができる。

位相子の波長に対する複屈折位相差をあらかじめ測定しておくことにより、波長ごとの位相変調量に合わせてキャリブレーションが行える。

これにより得られるストークス・パラメータは、

$$S_{in} = \begin{bmatrix} s_0(\lambda) \\ s_1(\lambda) \\ s_2(\lambda) \\ s_3(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0(\lambda) \\ 2(a_2(\lambda) + a_6(\lambda)) \\ 2(b_6(\lambda) - b_2(\lambda)) \\ 2(b_4(\lambda) / \sin \delta(\lambda)) \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。

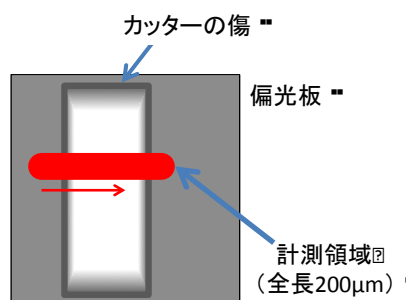
また、最後に全要素を s_0 成分で割ることで、規格化する。

4. 研究成果

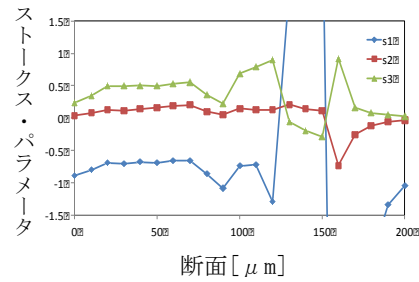
まず、基礎実験として、ファイバー先端の出射光の偏光状態とその光を方位 90° の偏光子、方位 0° の $1/4$ 波長板の二つのサンプルに透過させたとの偏光状態を計測した。各条件において 10 回計測を行いその結果を平均したものを表 1 に示す。この結果から、ファイバー先端の出射光は方位 49.9° で楕円率が 0 に近いことから直線偏光であることがわかった。また、方位 0° の偏光子、 $1/4$ 波長板を透過した後の偏光状態はそれぞれ方位 89.0° の直線偏光、楕円率 -0.818 の楕円偏光になった。方位 90° の偏光子を透過した光の偏光状態の測定結果が方位 89.0° の直線偏光であることから、今回の光ファイバー・プローブが偏光状態の計測が可能であることがわかった。

表 1 ストークス・パラメータ計測結果

	ストークス・パラメータ	方位 楕円率
ファイバー 先端	$S = \begin{bmatrix} 1.00 \\ -0.164 \\ 0.944 \\ -0.078 \end{bmatrix}$	$\psi = 49.9^\circ$ $\varepsilon = -0.041$
偏光子 (方位 90°)	$S = \begin{bmatrix} 1.00 \\ -1.04 \\ 0.035 \\ -0.031 \end{bmatrix}$	$\psi = 89.0^\circ$ $\varepsilon = -0.015$
$1/4$ 波長板 (方位 0°)	$S = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.031 \\ -0.195 \\ 0.975 \end{bmatrix}$	$\psi = -40.5^\circ$ $\varepsilon = -0.818$



(a) 計測領域



(b) 断面のストークス・パラメータ

図 2 偏光フィルムの微小傷の偏光計測

次に、図 2 に偏光フィルムをカッターで傷を付けたサンプルの偏光計測結果を示す。図 2 (a) はサンプルの傷の計測領域を表す。図 2 (b) 傷に対して光ファイバー・プローブ直交に移動していった時のストークス・パラメータを示す。エッジ部分で S_3 成分が大きく変化しており、偏光解消の影響である事がわかる。

次に、試料として、ナノスケールアルミワイヤがガラス板に高さ 150nm 、ピッチ 144nm で周期的に配置された構造を持つワイヤグリッド偏光子で、この形状の光の伝搬の様子を境界要素法でシミュレーションし、透過型分光ミューラー行列偏光計と比較検討した。図 3 にミューラー行列偏光計の計測結果とナノ周期構造を境界要素法によってシミュレーション解析しミューラー行列に変換した値とを標本分散により比較することで、構造サイズを推定した。図 3 に標本分散をカラーマップ化した結果を示す。標本分散が 0 に近いところが実際に測定値と境界要素法によるシミュレーション値を分散値に注目して比較し、ナノ周期構造評価の可能性を示したので報告する。

光ファイバーを利用したデポラリゼーション顕微鏡を構築し、空間分解能を高めることが出来た。また、ストークス・パラメータが高精度で計測可能となった。

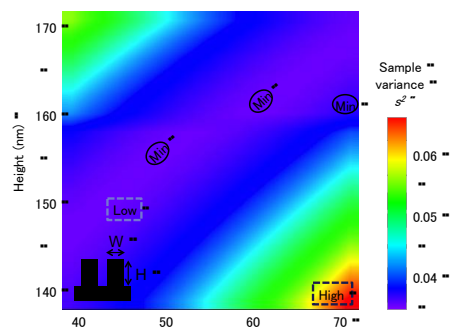


図 3 ミューラー行列偏光計の計測結果とナノ周期構造を境界要素法による検討

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1件)

M. Ginya, Y. Mizutani, T. Iwata, Y. Otani : All polarization properties of PLZT ferroelectric ceramics observed in two dimensional distributions under applied voltage by the Mueller matrix, Sensors and Actuators A: Physical (2013) DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2012.11.023>. (査読有)

[学会発表] (計6件)

①水谷亮太, 若山俊隆, 大谷幸利: 一般化二重回転型ストークス偏光計, 応用物理学関係連合講演会, 2013年3月27日, 神奈川工業大学, 神奈川.

② Yukitoshi Otani : Nano-structure inspection by dual-rotating Mueller matrix spectro-polarimeter, SEM Congress & Exposition on Experimental & Applied Mechanics, 2012年6月13日, Costa Mesa, CA, USA, 招待講演.

③ Ryota Mizutani, Tomoharu Ishikawa, Miyoshi Ayama, Yukitoshi Otani : Imaging Stokes polarimeter by dual rotating retarder and analyzer and its application of evaluation of Japanese lacquer, Photonics Asia - Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications II, 2012年11月6日, Beijing China.

④江馬 雅好, 喜入朋宏, 茨田 大輔, 早崎 芳夫, 大谷 幸利, 谷田貝 豊彦, 広ダイナミックレンジ光強度検出機構を用いたストークス散乱偏光計, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2012, 2012年10月25日, タワーホール船堀, 東京.

⑤水谷亮太, 大谷幸利: 光ファイバプローブ型ストークス偏光計, 精密工学会秋季大会, 2011年9月21日, 金沢大学, 石川.

⑥ R. Mizutani, Y. Otani : Stokes polarimeter with optical fiber probe, ISOT2011, 2011年11月2日, Hong Kong, China.

[図書] (計1件)

Y. Mizutani, Y. Otani (M. Losurdo, K. Hingerl (Eds.)) Chapter 8 Ellipsometry at the Nanostructure, Ellipsometry at the Nanoscale (Springer, 2013) pp. 313-323.

[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.opt.utsunomiya-u.ac.jp/~otani/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 幸利 (OTANI YUKITOSHI)

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・教授

研究者番号: 10233165

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし