

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04694

研究課題名(和文) 偏光指紋による物体同定のための光学モデル化およびその応用

研究課題名(英文) Development and application of optical model for object recognition with the polarization fingerprint

研究代表者

金 蓮花 (JIN, Lianhua)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：40384656

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：物体による光散乱は構造や物質によりその強度分布や偏光状態が異なる。散乱光中の偏光情報は、試料の屈折率、表面粗さ、プローブ光の波長により異なる。「偏光指紋は」、3次元空間に広がる散乱光の偏光特性を2次元パターンに表すものである。本研究では、「偏光指紋」で見出してきた多様な変化の因果関係を解明するために、計測装置の改良から、基礎計測、基礎データの解析を行い、散乱面における一定の所見を見出した。

研究成果の概要(英文)：The intensity distribution and polarization state of scattering depend on the sample surface. The polarization information in the scattered light differs according to the refractive index and surface roughness of the sample, and the wavelength of the probe light. "Polarized light fingerprint" characterizes the polarization properties of scattered light spreading in a three-dimensional space as a two-dimensional pattern. In this research, to have clear relationship of "polarized light fingerprint" with several factors, we carried on from the measurement system development to fundamental measurements and analysis, and found certain theories on the scattering surface.

研究分野：光計測

キーワード：scattering polarization

1. 研究開始当初の背景

物体による光散乱は構造や物質によりその強度分布や偏光状態が異なる。散乱光中の偏光情報は、試料の屈折率、表面粗さ、プローブ光の波長により異なる。そこで、物体の光散乱を利用した構造や物質同定の試みが多く行われている。

我々は、3次元空間に広がる散乱光の偏光特性を2次元パターンに表す「偏光指紋」について提案してきた。「偏光指紋」は、同一散乱面での偏光特性を等高線として、散乱光の散乱角毎における偏光状態(ストークスパラメータ S_1, S_2, S_3 と偏光度 DOP) を表したものである。本研究では、「偏光指紋」で見出してきた多様な変化の因果関係を解明するために、計測装置の改良から、基礎計測、基礎データの解析を行う。

2. 研究の目的

「偏光指紋」は、試料表面の粗さ状態やプローブ光の波長等によって変化していく。本研究は、従来の「偏光指紋」に散乱光強度分布情報(ストークスパラメータ S_0) を追加し、基礎計測から、それと変化要素との関係を突き止める光学モデルを確立することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 粗さ状態の異なる試料の選択

試料表面の粗さ状態により、試料の「偏光指紋」は変化する。光散乱が生じる理由の一つは表面凹凸を繰り返す周期構造(格子型構造)による回折散乱がある。回折散乱は、物体表面の局所反射による散乱現象とは散乱光強度分布が異なる。偏光情報は光強度とは全く異なる情報であり、光強度に依存しない。ここでは、表面粗さの周期構造を持つ試料と持たない試料表面の偏光指紋を取得し、その違いを調べる。

(2) 単波長から多波長領域測定装置の開発

広領域の光源を導入することにより、単波長で行われてきた計測を、多波長領域でできるように試みた。

広領域用光源として、最初は光ファイバを用いた白色光光源を検討したが、表面の粗さが大きい試料に対しては散乱が強く、その強度が非常に弱くなるため、計測不可能であった。そこで、青色(405 nm、450 nm)、緑色(516 nm、543 nm)、赤色(632 nm)のレーザ/半導体レーザ光を光源としての計測を検討した。物体表面で散乱される光の強度は、散乱角毎にその変動は大きく、また表面状態によりその偏光情報が非常に弱くなる。僅かな偏光状態を正確に取得するため、散乱光の偏光情報に光変調を加え、ロックインアンプを用いてその変調状態を検出する。光変調は、

素子の厚みが薄い光弾性位相変調器(PEM)で行う。一般の PEM は単波長用対応であり、コントローラに内蔵されている機能で、ソフトウェア上で多波長用に変更できる。しかし、PEM 自体に多重反射干渉防止膜が蒸着されているため、青色(405 nm、450 nm)レーザ光での計測に大きな不確定性が現れた。緑色(516 nm)半導体レーザ光においては、長時間の計測向けの安定性が欠けていた。上述した理由から、最終的には He-Ne レーザ(543 と 632 nm)光源を用いた計測およびデータ解析を行った。

(3) 点計測から面計測用装置への改良

試料表面の粗さ状態は均一ではなく、場所毎に異なる。つまり粗さ分布をもつ。レーザビームを試料表面に照射し、生じた散乱光の偏光情報を測定する場合、従来は点計測であるため、得られた情報は照射面内の情報を平均化したものだと考えてよい。場所毎の情報の平均化情報への影響を調べるために、面計測(2次元計測)用装置への改良を試みた。レーザ光は、試料以外のところ(例えば、光学素子の欠陥など)でも偏光情報の変化をもたらす可能性があるため、インコーヒレント光の LED(532 nm)光源を用いた。光受光側に感度の高い CMOS 素子を導入し、(2)で述べた散乱光強度が非常に弱い状態でも計測を可能にした。

(4) 基礎計測およびデータ解析

粗さと表面構造の異なる試料を用いて、異なる波長における偏光指紋を採取し、データ解析を行った。

4. 研究成果

図1に開発した散乱光の多波長領域用偏光情報計測システムを示す。試料への入射光は右回り円偏光を用いる。それは、各散乱面における散乱光の偏光解析を行う際に、入射光の偏光状態を統一できるためである。試料からの散乱光は4分の1波長板(QWP)、PEM、検光子と光検出器で構成されている偏光検出部分により検出される。ローパスフィルタと2台のロックインアンプにより光信号処理を行い、散乱光の偏光状態を取得する。波長板はプローブ光の波長によりリタレーションが異なる。高精度の測定を実現するため、入射側と出射側に計測波長毎の QWP を導入した。

測定試料は、銅の表面にニッケルをメッキで仕上げ粗さ標準片にした。ニッケル層の厚さは約 400 μm であり、表面粗さはそれぞれ 3.7 (#95), 5.1 (#130), 10.2 (#260), 10.4 (#265) μm である。試料表面状態は仕上げ方法によりランダムな一次元粗さ(試料#95 と #265)と格子型一次元粗さ(試料#130 と #260)の2種類をもつ。図2は、各試料の表面状態を示す顕微鏡写真と Dektak で測定した表面

プロフィールを示す。図2から試料#130と#260における傾斜角は約11°であるのが分かる。

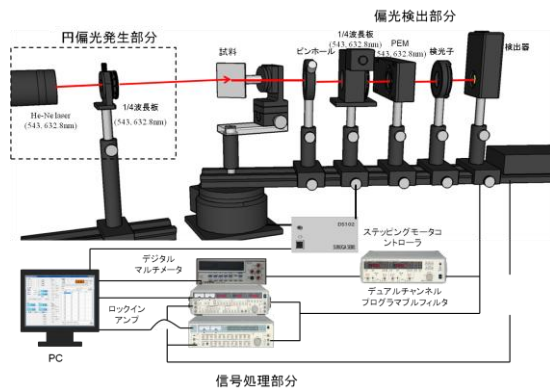


図1 多波長領域用偏光情報計測システム

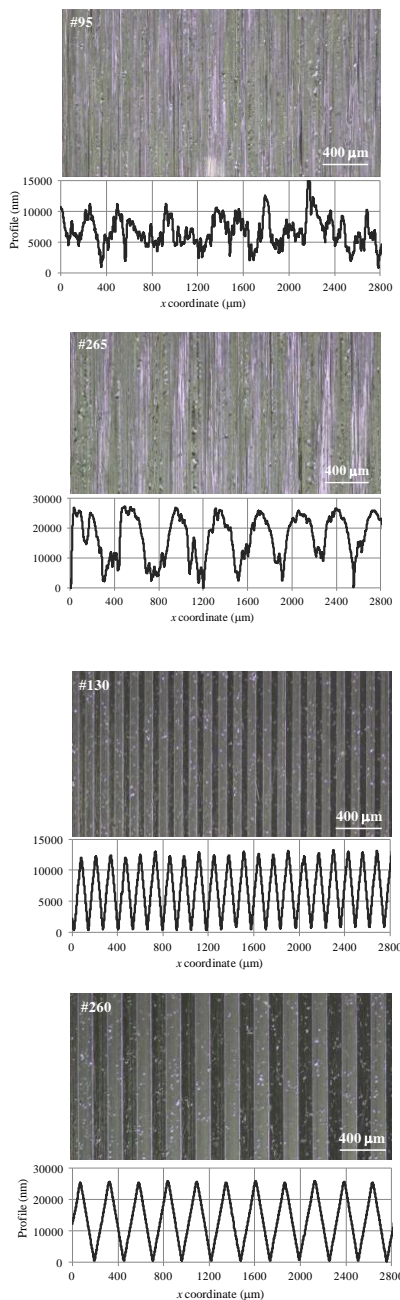
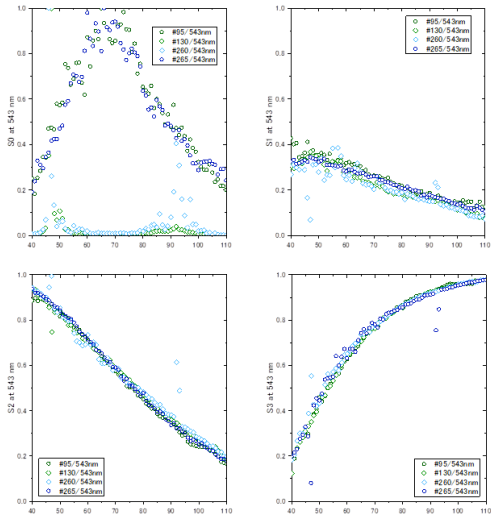
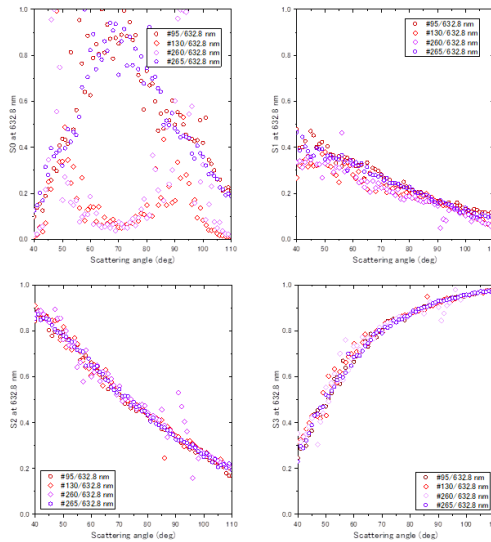


図2 試料の表面状態およびプロフィール



(a)



(b)

図3 波長(a) 543と(b) 632.8 nmにおける試料の「偏光指紋」

図3に、図2の試料を用いて得られた偏光指紋の波長分散を示す。試料#130と#260の試料表面は格子型一次元粗さを持ち、 S_0 の偏光指紋で現れる2箇所ノピーク位置から、傾斜角は約11°であることが導ける。本現象は波長に依存しない。 S_1 - S_3 の偏光指紋情報からは、回折散乱による指紋の大きな変動が確認されてない。そのことから、回折散乱の場合でも、局所反射モデルを用いたデータ解析が一定の有効性をもつことが分かる。また、 S_1 - S_3 の偏光指紋では、粗さと波長依存性が確認された。偏光指紋情報から、エリプソメトリ解析を行い、試料の見かけ屈折率を求め、その結果を表1に示す。

全ての試料における見かけ屈折率は、バルクニッケルの屈折率より小さい。この現象は、表面粗さをもつ試料によく現れることであ

ランダムな一次元粗さをもつ試料#95 と #265 に対しては、すべての波長において、表面粗さが大きくなるほど、見かけ屈折率が小さくなっている。しかし、波長が 632.8 nm のとき、試料#130 と#260 の粗さは大きく異なるが、その見かけ屈折率は等しくなっている。波長が 543 nm においても、見かけ消衰係数は粗さにより変化しない。このことから、散乱面における見かけ屈折率は、マクロ的な粗さ状態（粗さが光波長より大きい）にほとんど依存せず、マイクロ的な粗さ状態（粗さが波長より小さい）に大きく依存すると考えられる。表 1 からは、すべての試料の見かけ屈折率が、波長が長くなると大きくなることが確認できる。バルク型表面の測定の場合、ニッケルの屈折率は波長により小さくなっている。これは、波長が短い光ほど、粗い表面により散乱が強く、偏光計測への影響が強くなるため見かけ屈折率が小さくなると考えられる。

表 1. 異なる波長における見かけ屈折率

Sample No.	Wavelength 543 nm		Wavelength 632.8 nm	
	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>
# 95	1.45	2.76	1.65	2.96
# 130	1.27	2.94	1.46	3.21
# 260	1.20	2.94	1.46	3.21
# 265	1.34	2.81	1.58	2.95

続いて、本研究で開発した 2 次元偏光情報測定システムについて述べる。図 1 で示す点計測用測定システムと異なり、光源には LED（波長 532 nm）を用いた。光受光部分には 12 ビットの CMOS を導入し、4.8×6.4 mm の空間領域を一括で測定できるようにした。これにより試料の場所毎の粗さ分布による偏光情報を調べた。

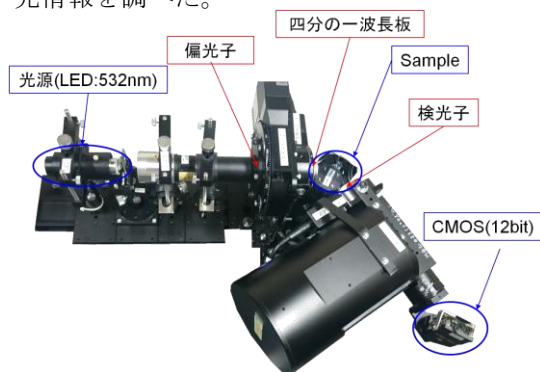


図 3 2 次元偏光情報計測システム

図 4 は、本計測システムを用いて試料#265 を測定したときの偏光情報の一つである PSI 分布を示す。図 2 から分かるように試料表面は様々な方向を向く局所反射面をもつ。各局所反射面における入射角が異なるため、PSI は場所毎に大きく異なると考えられる。しか

し、図 4 の測定結果からは、場所毎の PSI の値は平均値の 37.45°とあまり差がない。この偏光測定結果から、2 次元計測で得られる値は、同じ向きを示す局所反射面による結果であると推定できる。本研究成果で得られた所見から局所反射面光学モデルは一定な有効性をもつと言える。しかし、局所反射面光学モデルによる散乱面評価はまだ定性的な面が大きい。定量的な結果を得るためには、さらなる高精度・高感度・高分解能をもつ測定装置による精密な計測と基礎データが必要になるだろう。

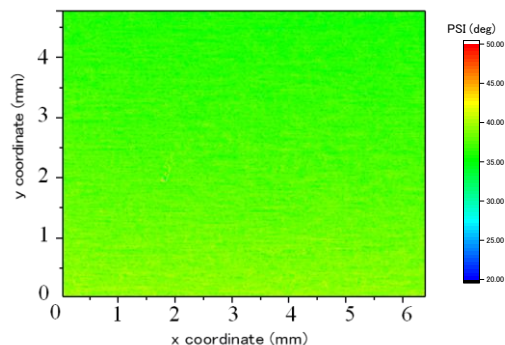


図 4 2 次元偏光情報測定結果

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 3 件)

- (1) L. Jin, T. Tanaka, E. Kondoh, B. Gelloz, and M. Uehara, “Extracting calibrated parameters from imaging ellipsometric measurement,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 56(11), 116602 (2017). DOI: 10.7567/JJAP.56.116602 (査読有)
- (2) L. Jin, T. Taguchi, E. Kondoh, and B. Gelloz, “Polarization characteristics of diffraction scattering from metal rough surface,” *Applied Surface Science*, 421, 565-570 (2017). DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.10.142 (査読有)
- (3) L. Jin, K. Yamaguchi, M. Watanabe, S. Hira, E. Kondoh, and B. Gelloz, “Polarization characteristics of scattered light from macroscopically rough surfaces,” *Optical Review*, 22(4), 511-520 (2015). DOI: 10.1007/s10043-015-0117-2 (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- (1) L. Jin, C. Zhou, and E. Kondoh, “Polarization dispersion of Scattering from Macroscopically Rough Surface,” The 24th congress of the International Commission of Optics (ICO-24), (Aug. 2017) Tokyo, Japan.
- (2) L. Jin, T. Taguchi, and E. Kondoh, “Polarization characteristics of diffraction scattering from metal rough surface,” 7th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE-7), (June 8, 2016) Berlin,

Germany.

- (3) 金 蓮花, 菅尾 亮介, 上原 誠: “イメージングエリプソメトリーにおける NA の影響” 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス (東京)
- (4) (招待) 金 蓮花: “高精度イメージングエリプソメトリー” 精密工学会 2018 年度春季大会, シンポジウム「偏光計測の基礎と応用」, 2018 年 3 月 15 日, 中央大学 後楽園キャンパス (東京)
- (5) (招待) 金 蓮花, 上原 誠: “広範囲・高分解能・高精度イメージングエリプソメータの開発” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2017, 2017 年 11 月 1 日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 (東京)
- (6) 金 蓮花, 上原 誠: “イメージングエリプソメトリーにおける偏光素子の誤差解析” 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 17 日, パシフィコ横浜(神奈川県)
- (7) 金 蓮花, 周 聡, 近藤 英一: “ラフな表面における散乱光の偏光特性の波長依存性” 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 15 日, パシフィコ横浜(神奈川県)
- (8) 鈴木 雄也, 近藤 英一, 渡邊 満洋, 金 蓮花, 濱田 聡美, 嶋 昇平, 檜山 浩國: “エリプソメトリ測定による Si ウェハ表面の粒子検出評価” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年 9 月 16 日, 新潟県新潟市朱鷺メッセ (新潟県)
- (9) 金 蓮花, 田口 拓馬, 近藤 英一: “ラフな表面による回折散乱光の偏光特性” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 21 日, 東京工業大学 (東京)
- (10) 金 蓮花, 小林 大地, 高和 宏行, 近藤 英一: “セル中の試料の複屈折特性のその場計測方法” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 15 日, 名古屋国際会議場 (愛知県)

[その他]

ホームページ等

<https://nerdb-ap.yamanashi.ac.jp/tmp/33660/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 蓮花 (JIN, Lianhua)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号: 40384656

(2) 研究分担者

近藤 英一 (KONDOH, Eiichi)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号: 40304871