

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560043

研究課題名(和文)物体の偏光指紋の構築及びその応用

研究課題名(英文)Construction and its application of the polarization fingerprint

研究代表者

金 蓮花 (JIN, Lianhua)

山梨大学・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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、物体表面による散乱光の完全な情報を迅速・コンパクトに取得・表現できる「偏光指紋」を構築することが目的である。本研究では大きく分けて、i)偏光指紋の定義の提案、ii)偏光指紋計測用の散乱偏光情報の取得装置の開発、iii)金属と誘電体の偏光指紋の構築、iv)偏光指紋の物体同定への応用を視野に、散乱モデルの確立を試み、理論解析を行った。

研究成果の概要(英文)：This project aims to build the “polarization fingerprint” of an object, which includes complete information on light scattered by the object surface. In this project, following works were fulfilled: i) proposed definition of the polarization fingerprint, ii) developed polarization fingerprint measurement system, iii) constructed polarization fingerprint of the metal and dielectric samples, iv) established simple scattering model and carried on theoretical analysis.

研究分野：工学

キーワード：光散乱 偏光計測 光計測 散乱モデル

1. 研究開始当初の背景

物体の光散乱を利用し、構造や物質同定を行う試みはこれまで多くなされてきた。例えば、化学分野では、レイリー散乱モデルを用いて高分子の相分離現象やゲル化現象の解析が行われている。また、半導体分野とくにリソグラフィ分野では、回折散乱モデルを用いて試料の周期的な構造の良否の判定を行っている。

物体の完全な情報を得るためには完全な散乱情報が必要となる。現在、光散乱情報の表す方法として2方向散乱分布関数(BSDF)を用いられることがほとんどである。2方向散乱分布関数とは入射光パワーと試料からの散乱光パワーの比例関係を表すものであり、入射角・散乱角、プローブ光の波長などのパラメータの関数である。BSDF値で物体の特定が可能なることから、物体の散乱情報を総括した情報をシグネチャー・コードとして記録していた。しかし、BSDFの値が入射光の入射角と偏光方位に強く依存するため、一つの物体のシグネチャー・コードを記録する場合、すべての入射角に対して偏光方位毎に計測を行う必要がある。一つの物体におけるコードデータは膨大になり、実際の計測も困難である。

入射角・入射偏光方位に関係なく迅速にコンパクトに散乱情報を取得・記録する実用的方法が必要であった。

2. 研究の目的

物体表面による散乱光は半球に広がる。本研究は、その散乱光の情報を迅速・コンパクトに取得・表現できる「偏光指紋」を構築することを目的とした。また、これらの「偏光指紋」から物体同定への応用を視野に、散乱モデルの確立を試みした。

3. 研究の方法

(1) 「偏光指紋」の提案

BSDF値は散乱光の光強度の分布を示すものである。我々は、光強度と関係のない、光の偏光状態に注目し、半球に広がる物体表面による散乱光の情報として、散乱角毎における散乱光の偏光状態を物体の「偏光指紋」とした。

(2) 散乱光の偏光計測装置の開発

物体表面に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検出した。各散乱角における偏光情報を計測するために、光検出側のアームを回転させる必要があった。そこで、回転精度が0.05°の自動回転ステージを導入し、装置の制御ソフトの開発により計測精度および速度を向上させた。

光変調を行うため、ニオブ酸リチウム(LiNbO₃)位相変調素子と光弾性位相変調器

(PEM)の導入をそれぞれ検討した。ニオブ酸リチウム位相変調素子は光変調をDCからGHZ周波数までの広い範囲で行うことができる。周波数を自由に選択できるため、光信号処理に使用するロックインアンプのスペックについての要求が低いことと偏光情報のイメージング計測に利用できるという大きいメリットがあった。しかし、光変調に必要な印加電圧が非常に大きいと言う欠点があった。光弾性位相変調器は素子の動作原理から限られた範囲内の周波数でしか光変調ができないため、ロックインアンプの性能への制限がある。しかし、素子の厚みが薄く、光学系のアライメントに適したため、最終的に計測装置には光弾性位相変調器を導入し、偏光計測を行った。

(3) 散乱モデル確立の試みおよび理論解析

上述した計測装置を用いて、金属と誘電体をサンプルとして、散乱光の偏光計測を行い、サンプルの「偏光指紋」を構築した。その「偏光指紋」から逆にサンプルを同定することを視野に、散乱モデルの確立を試みた。ここでは各散乱角における散乱光を試料の散乱表面の局所 facet による反射現象として考え、エリプソン解析方法を用いて解析を行った。

4. 研究成果

図1に開発した散乱光の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た。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、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。本システムは、縦散乱角0~150度、横散乱角-45~45度における散乱光の偏光計測に対応できる。

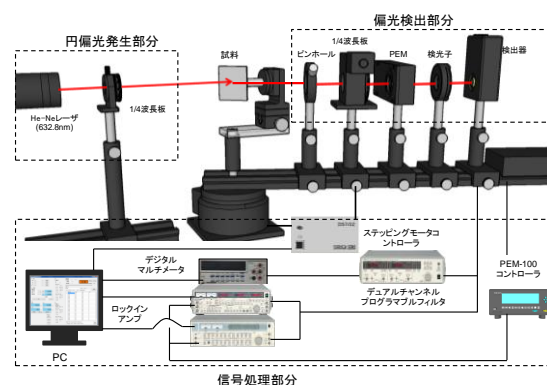
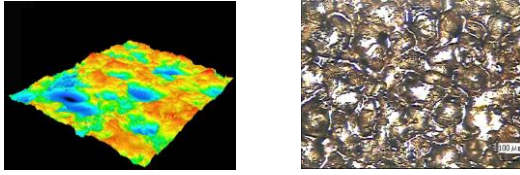


図1 散乱光の偏光情報計測システム

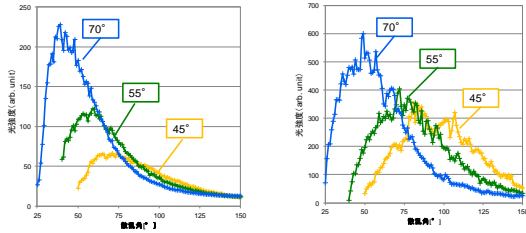
試料は表面粗さが異なる誘電体(BK7 ガラス)と金属(SS400 軟鋼)を5種類用いた。軟鋼は放電加工により異なる散乱表面を製作した。図2カラーレーザ顕微鏡で計測したガラス(粗さ Ra=2.2 μm)と軟鋼(Ra=40.94 μm)

の表面状態を示す。



(a) ガラス (b) 軟鋼

図 2 試料の表面状態



(a) ガラス (b) 軟鋼

図 3 入射角の変化 (45°, 55°, 70°) による In-plane 散乱光分布の変動

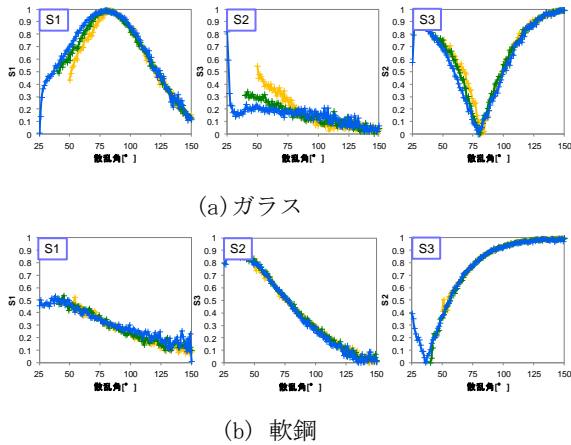


図 4 入射角の変化 (45°, 55°, 70°) による In-plane 散乱光偏光状態(S1, S2, S3)の分布

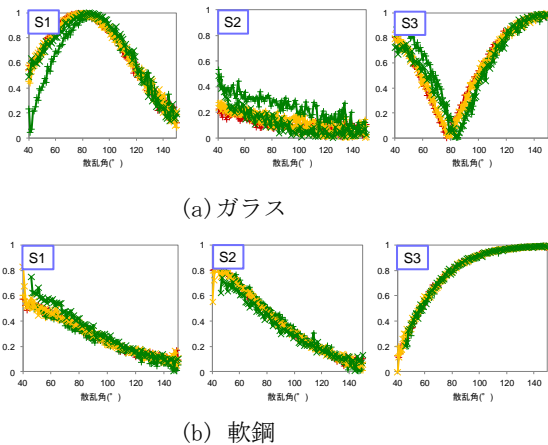
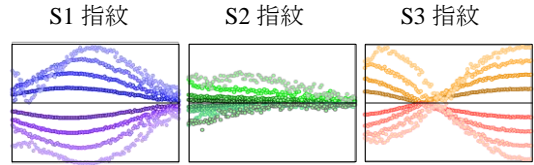
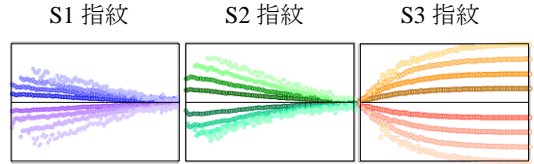


図 5 入射角の変化 55°時の In-plane と Out-of-plane 散乱光偏光状態(S1, S2, S3)の分布



(a) ガラス



(b) 軟鋼

図 6 ガラスと軟鋼の偏光 (S1, S2, S3) 指紋 (横軸: 縦散乱角 40-150°)

図 3 は入射角を 45°, 55°, 70°と変えていた時、縦散乱角における両試料の In-plane 散乱光強度分布を示す。これらの結果から、散乱光強度分布は入射角に強く依存し、光強度分布と物体との関係をみたいとき、不都合が多いことが分かる。一方、図 4 で示す散乱光の偏光状態(ストークス・パラメータ S1, S2, S3)分布は入射角にほぼ依存せず、測定対象物により違うことが分かる。この現象は Out-of-plane 散乱光の偏光状態の分布でも起こることが分かった。(図 5 参照)。これらの各散乱角における偏光状態を用いて、試料の偏光指紋を構築した。図 6 はガラスと軟鋼の偏光指紋を示す。材料によって偏光指紋が異なることが一目瞭然である。これらの偏光指紋は材質の表面粗さ状態にもより変化することが分かった。散乱光の情報を視覚的にとらえる偏光指紋から物体を同定することを視野に、facet 散乱モデルを用いて偏光解析を行った。図 5 の結果からエリプソパラメータを取得し、エリプソ解析を行い試料表面の屈折率と粗さ表面の厚みを予測することを試みた。また、これらの結果を滑らかな材料表面の計測結果と比べた。

軟鋼試料は材質により屈折率が大きく変わるため、正確な屈折率が報告されてない。本研究では軟鋼試料表面をミラー面に加工し、市販のエリプソメータを用いて試料の屈折率を測定した。波長 632.8 nm におけるガラスと SS400 の屈折率は 1.519 と 2.26-j3.35 であった。しかし、散乱面の屈折率はこれらの結果と完全に異なり、その違いは試料表面の粗さが粗いほど大きかった。本研究で用いた試料の表面粗さはプローブ光の波長より大きく、有効媒質理論の適用範囲を超えている。本研究から、facet 散乱モデルが散乱光の解析にある程度有効であるが、同時に完全ではないことが証明できた。より正確な散乱モデルを確立するためには、多重散乱、散乱光同士の干渉、統計光学の偏光状態あるいはエリ

プソパラメータへの影響を詳しく分析する必要があることが分かった。現在これらを解決するための基礎実験，基礎解析が進行中である。

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 7 件)

- (1) L. Jin, S. Kasuga, E. Kondoh, and B. Gelloz, "Correction of the large retardation window effect for ellipsometry measurements by using quasi-Newton method," *Applied Optics*, Vol. 54, Iss. 10, 2991-2998, (2015). DOI: 10.1364/AO.54.002991 (査読有)
- (2) L. Jin, Y. Wakako, K. Takizawa, and E. Kondoh, "In Situ imaging ellipsometer using a LiNbO₃ electrooptic crystal," *Thin Solid Films*, 571, 532-537, (2014). DOI: 10.1016/j.tsf.2014.05.017 (査読有)
- (3) L. Jin, S. Kasuga, and E. Kondoh, "General window correction method for ellipsometry measurements," *Opt. Express*, Vol. 22, Iss. 23, 27811-27820, (2014). DOI: 10.1364/OE.22.027811 (査読有)
- (4) L. Jin and E. Kondoh, "Correction of large birefringent effect of windows for in-situ ellipsometry measurements," *Optics Letters*, 39 (6), 1549-1552, (2014). DOI: 10.1364/OL.39.001549 (査読有)
- (5) L. Jin, R. Yagi, K. Takizawa, and E. Kondoh, "Fast Imaging Ellipsometer Using a LiNbO₃ Electrooptic Crystal," *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 (3), 036702-1-036702-7, (2013). DOI: 10.7567/JJAP.52.036702 (査読有)
- (6) 金蓮花, 大矢 敏史, 高和 宏行, 近藤英一, "有機結晶の偏光特性を利用した新しい教材," *応用物理教育*, 36 巻 2号, 21-26, 2012. (査読有)
- (7) T. Saitou, M. Nurdin, H. Kowa, N. Umeda, K. Takizawa, E. Kondoh, and L. Jin, "Birefringence Polarimeter Using Dual LiNbO₃ Electrooptic Crystal Modulators" *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 082201-1-082201-5, (2012). DOI: 10.1143/JJAP.51.082201 (査読有)

[学会発表] (計 12 件)

- (1) 金蓮花, 春日翔貴, 近藤英一: "準ニュートン法を用いたエリプソメトリー計測の窓補正" 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 14 日, 東海大学 (神奈川県)
- (2) 金蓮花, 丹沢 貴之: "シングルスリットによる回折光の偏光特性" 第 62 回応用物

理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 13 日, 東海大学 (神奈川県)

- (3) 春日翔貴, 近藤英一, 金蓮花: "その場エリプソメトリーにおける窓の補正方法およびその応用", *Optics & Photonics Japan 2014*, 2014 年 11 月 6 日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 (東京都)
- (4) 金蓮花, 春日翔貴, 近藤英一: "エリプソメトリーにおける観測窓補正の一般化" 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-PA6-2, 2014 年 9 月 19 日, 北海道大学 (札幌市)
- (5) 金蓮花, 近藤英一: "エリプソメトリーにおける観測窓の影響及び補正" 第 10 回偏光計測研究会, 独立行政法人物質・材料研究機構, 2014 年 9 月 1 日 (茨城県)
- (6) 金蓮花, 近藤英一: "その場エリプソ計測における観測窓の影響の補正" 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 17 日, 青山学院大学 (神奈川県)
- (7) 山口晃司, 近藤英一, ジェローム ベルナル, 金蓮花: "ラフな鉄表面による散乱光の偏光特性および光学モデリング" 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 17 日, 青山学院大学 (神奈川県)
- (8) Yamaguchi, A. Muhammad, B. Gelloz, E. Kondoh, and L. Jin, "Scattering light pattern of rough surface," The 6th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, (May, 30, 2013) Kyoto, Japan,
- (9) Y. Wakako, K. Takizawa, E. Kondoh, and L. Jin, "In-Situ imaging ellipsometer using a LiNbO₃ electrooptic crystal," The 6th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, (May, 28, 2013) Kyoto, Japan.
- (10) 若子裕亮, 滝沢國治, 近藤英一, 金蓮花: "LiNbO₃ 電気光学結晶を用いたその場イメージングエリプソメーターの開発" 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 27 日, 神奈川工科大学 (神奈川県).
- (11) 山口晃司, アティラ ムハマド, 近藤英一, 金蓮花: "ラフな面における In-plane 散乱光パターン" 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 27 日, 神奈川工科大学 (神奈川県)

(12)金 蓮花, 山口 晃司, 近藤 英一:“偏
光指紋による物体の同定” Optics &
Photonics Japan 2012, (Oct. 23, 2012) 東
京都船堀タワーホール

[その他]

ホームページ等

http://erdb.yamanashi.ac.jp/rdb/A_DispatchDetail.Scholar?fid=0&id=0A0A3CE32AB61572

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