

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760042

研究課題名（和文）2次元偏光解析による3次元形状計測法の開発

研究課題名（英文）Three-dimensional shape measurement by imaging ellipsometry

研究代表者

津留 俊英 (TSURU TOSHIHIDE)

山形大学・地域教育文化学部・准教授

研究者番号：30306526

研究成果の概要（和文）：薄膜表面の屈折率や膜厚計測など様々な分野で利用されているエリプソメトリーを応用した新しい3次元形状計測法を提案し、これを実現する計測装置を作製した。高精度化と高速化を目指し液晶可変リターダーを用いたイメージングエリプソメーターを開発した。また、全傾斜方位角を識別できる照明法を考案し、有効に機能することを確認した。開発した計測装置、照明装置、3次元再構築ソフトウェアを用いた精密3次元形状計測の各種応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Ellipsometry is widely utilized for investigating surface and optical properties of thin films. We proposed a new concept for 3D shape measurement of specular objects by ellipsometry. For precise and fast measurement, imaging ellipsometer using a liquid crystal variable retarder was developed. A high precision achieved by our proposed method is expected for 3D shape measurement in various applications.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：応用光学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：偏光、エリプソメトリー、形状計測

1. 研究開始当初の背景

エリプソメトリーは、規定した偏光を水平または垂直に配置した平面試料に斜めに入射して、反射光の偏光状態を精密計測し、薄膜の屈折率と厚さを決定する方法として知られている。計測時の光の入射角と入射面方位角は既知の変数とし、これらは計測中には固定される。ここで、平面試料を立体に拡張し滑らかな表面の反射を考えると、観察方向から見える表面内の任意の反射点で、反射の法則を満たす“明るい”正反射光が存在する。照明光として、物体の反射面の方位と傾きに依存しない円偏光を用いると、

- ・ 反射楕円偏光の方位角は入射面方位角

に対して、

- ・ 楕円の短軸と長軸の長さの比で定義される楕円率角は入射角に対して、それぞれ単調に変化する。従って、反射特性が既知の物体に対して、反射楕円偏光の精密計測によって反射点の法線ベクトルが決定できる。法線が決まれば、積分操作で形状が再構築できる。本手法の原理検証のために試作機を作製した。回転検光子法による偏光画像の解析から再構成した3次元形状は、干渉計では計測困難な急峻なエッジを持つステンレス製立方体試料を良く再現できた。

一般に、物体を顕微鏡や望遠鏡などで観察すると、物体の厚さ方向の情報が失われた2

次元投影像となる。奥行き方向の情報を持った3次元画像を得るには、厚さ方向の移動と同期させながら2次元画像を取得し、コンピューター処理によって3次元画像を構築しなければならない。既に実用化され広く利用されている3次元形状計測法として、三角測量法を基本とした計測法、干渉計測法、モアレトモグラフィー、パターン投影法などが開発されているが、これらの方法も3次元形状を得るためには複数枚の画像計測が必須である。また、距離計測によらない形状計測法としてロボティクス分野では非偏光照明下の物体の散乱光の偏りを利用した3次元形状計測法が提案されている。一方、本研究では、エリプソメリー計測を用いることから、媒質伝播中の偏光変化は無視でき、◎計測環境に制限が無く、◎結像光学系も使え、◎波長に制限も無い、など汎用性が高い。

2. 研究の目的

本研究は、エリプソメリーの原理を用いて物体表面を構成する微斜面の法線ベクトル情報を精密直読し3次元形状を再構築する3次元形状計測装置を作製し、各種応用への実用化要件を明らかにすることを目的とする。

- ・ 物体表面または界面で反射の法則を満たす方向に必ず光が反射される
- ・ 反射楕円偏光の傾きは入射面に対して、楕円率角は入射角に対して単調に変化する

という基本的な2つの光学の性質を利用したエリプソメリーによる新しい3次元形状計測法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 楕円偏光成分と非偏光成分を3%程度以下に抑えた円偏光照明装置の作製

傾斜角と傾斜方位角の計測精度 0.1° を実現するには照明光に含む楕円・非偏光成分を3%以下に抑えなければならない。照明装置には市販の円偏光フィルムを使用する。円偏光フィルムは直線偏光フィルムと $1/4$ 波長フィルムを貼り合わせたものであるが、貼り合わせの軸精度や $1/4$ 波長フィルムの設計波長からのズレなど生じている可能性がある。そこで本研究では、分光エリプソメーターを用いて円偏光フィルムの円偏光度を計測し、円偏光度 97%以上の波長に合わせて2次元偏光解析装置を作製する。

(2) 偏光イメージングカメラによる偏光特性の基礎データ取得

作製する円偏光照明装置で様々な素材と形状の試料を照明し、偏光イメージングカメラを用いて偏光特性の基礎データを取得する。画像検出の光学系は、顕微鏡応用を目指

した高 NA 光学系、カメラ・望遠鏡応用を目指した低 NA 光学系をそれぞれ使い、実用化要件を明らかにする。金属試料は現有スパッタリング成膜装置を使用し、入射波長の侵入長以上の充分厚い膜を成膜し試料とする。

(3) 3次元化アルゴリズムの開発

現有の多入射角エリプソメーターを用いて複素屈折率を精密計測し、反射楕円方位角-入射角変換テーブルを作成する。試料毎に計算した変換テーブルに従い偏光画像の各画素の入射角と傾斜方位角を決定し、微小反射面の法線ベクトルを得る。これらを積分操作で3次元形状復元するプログラムを作成する。ロボティクス分野の復元アルゴリズムや干渉計測法の縞解析アルゴリズムを参考に

(4) 2次元偏光解析装置(イメージングエリプソメーター)による3次元形状計測装置の開発

傾斜角と傾斜方位角の計測精度 0.1° を実現するためには反射楕円の主軸方位角と楕円率角を 0.1° の精度で決定しなければならない。本研究では、偏光特性の基礎データ取得と実用化技術要件を明らかにするために偏光イメージングカメラを使用する。一方、高精度化のために振幅分割型イメージングエリプソメーターを開発する。無偏光ビームスプリッターで透過と反射光強度を1:1に分岐し、それぞれ偏光ビームスプリッターまたは偏光ビームスプリッターと波長板の組み合わせによって直交2偏光成分に分離し、CCDで同時計測し2次元偏光画像を得る。具体的には、(垂直直線偏光成分と水平成分直線偏光成分)、(+45°直線偏光成分と-45°直線偏光成分)、(右円偏光成分と左円偏光成分)の合計6つの偏光画像を取得する。これらの画像からデジタルフーリエ変換し偏光状態を決定する。

また、液晶を用いた位相変調型エリプソメーターを試作し、振幅分割型と測定精度や計測速度について比較検討し、高精度化に適した手法を見極める。

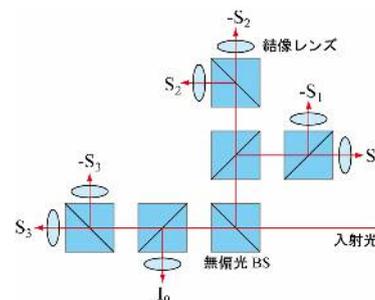


図1. 振幅分割型イメージングエリプソメーター

4. 研究成果

(1) 円偏光照明装置の開発

① 円偏光フィルムの分光特性

市販の円偏光フィルムを照明装置に用いて計測精度 0.1° を実現するために、円偏光フィルムの円偏光度を分光計測した。計測には自作の回転検光子法による分光エリプソメータを用いた。コリメートしたキセノン光源からの白色光を円偏光フィルムに入射し、出射光を直線配置した回転検光子型分光エリプソメータへと導いた。波長 500–600 nm の計測結果を図 2 に示す。図のように、この波長域では目標とする円偏光度 97% を満たす。特に、540 nm では完全円偏光に近い円偏光が得られることから、より高精度な計測が期待できる。

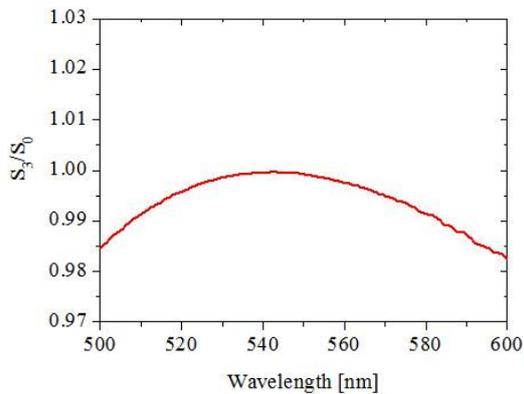


図 2. 円偏光フィルムの円偏光度の分光特性

② 左右円偏光照明法

当初提案した試料の全方位から右円偏光照明する方法の場合、傾斜方位角が 180° 異なる同一傾斜角で同一の偏光楕円が反射され、これらを識別することはできない。

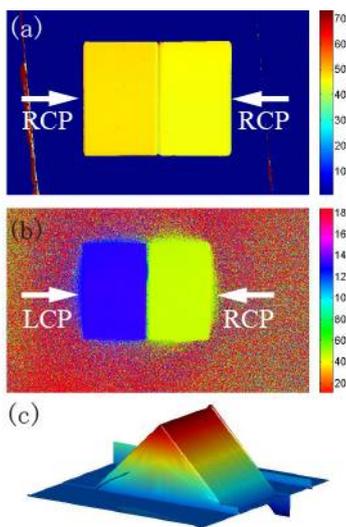


図 3. (a), (b) 直角プリズムの反射楕円方位角分布。(a)は両方向から右回り円偏光(RCP)を、(b)は左回り(LCP)と右回り円偏光を照明

光に使用した。(c) 直角プリズムの3次元再構成図。

金を充分厚く成膜した直角プリズムの2つの斜面に右回り円偏光を照明したときの反射楕円方位角分布の実測値を図 3(a)に示す。2つの斜面は同一色、すなわち、同じ方位角を持つことから、両者の傾斜方位角を区別することができない。そこで、本研究では、右円偏光と左円偏光を入射できる照明装置を作製した。図 3(b)に左右円偏光照明した時の反射楕円方位角分布を示す。反射楕円は予測通りの振る舞いを示し、方位角が 180° 異なる同一傾斜角の識別が可能となった。

図 3(c)に左右円偏光照明によって決定した傾斜角と傾斜方位角から再構築した3次元形状を示す。3次元化には研究成果(3)に記す再構成法を用いた。

(2) 偏光イメージングカメラによる偏光特性

フットニクラティス社製偏光イメージングカメラを用いて、金属を含む様々な素材と形状の試料の偏光画像計測を行った。図 4に人の手の反射楕円方位角分布を示す。

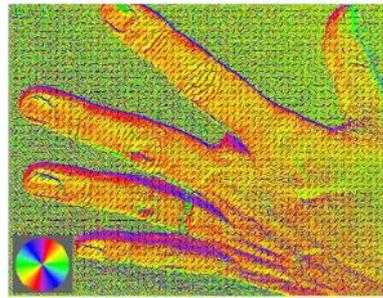


図 4. 偏光イメージングカメラを用いて計測した”手“の反射楕円方位角分布。

これまで、入射光が正反射する程度に滑らかな表面を持つ物質が本研究の計測対象と考えていたが、金属以外の人の肌や植物なども計測対象と成り得ることが分かった。ただし、反射偏光には非偏光成分を含んでいると考えられることから、金属表面のような精密計測は期待できない。

(3) 3次元形状の再構成法

2次元画像の偏光解析で決定する反射楕円の楕円率角から傾斜角が、楕円方位角から傾斜方位角が得られることから、各反射点の微斜面の法線ベクトルが決定できる。微斜面の傾きを積分し、かつ、各点を滑らかに接続する3次元再構成ソフトウェアを作成した。直角プリズムと円錐ミラーの3次元形状の再構成結果を図 3(c)と図 7(c)にそれぞれ示す。

(4) イメージングエリプソメータの開発

2次元偏光解析を実現するために、図1に示すような振幅分割型イメージングエリプソメーターを試作した。実機は、3つのビームスプリッターで入射光を4分岐し、4つのCCDで偏光画像計測する構成とした。本手法は、構成要素が多い点や4つの画像の位置合わせなど考慮すべき要素が多いことから、大面積の液晶を用いた位相変調方式の採用を検討した。

ネマティック液晶を使用した液晶可変リターダー (liquid crystal variable retarder: LCVR) は、機械的な駆動部が無く、電気的に偏光を制御できるため高速偏光イメージングが期待できる。LCVRは印可電圧によって位相量 δ を調整できる。方位角 $M=45^\circ$ のLCVRから射出された光を、方位角 $A=90^\circ$ の直線偏光子を通して検出する光強度 I は次式で表せる。

$$I = I_0 \{1 + \sin 2\Psi \sin \Delta \sin \delta + (\cos 2\Psi \sin 2M + \sin 2\Psi \cos \Delta \cos 2M) \cos \delta\} \quad (1)$$

$$= I_0 (1 - S_3 \sin \delta - S_1 \cos \delta)$$

ここで、 Ψ 、 Δ は試料の偏光解析パラメーターを、 S_1 、 S_3 はストークスパラメーターである。ストークスパラメーターの S_2 成分が計測できないため、例えば $\Psi=30^\circ$ 、 $\Delta=120^\circ$ の楕円偏光と $\Psi=30^\circ$ 、 $\Delta=60^\circ$ の楕円偏光は楕円率角が等しく、方位角が異なる楕円であるが、本手法ではこれらを識別することができない。しかし、ほとんどのバルク試料の光反射で生じる偏光楕円は、 $0^\circ < \Delta < 90^\circ$ 、 $270^\circ < \Delta < 360^\circ$ であるから、実用上問題ないと考えられる。

液晶は、印可電圧で位相量を自由に調整できる利点があるが、位相量は印可電圧に比例せず、また、位相量は波長によって異なる。従って、(1)式から偏光解析パラメーターを決定するためには、LCVRの位相量と印可電圧の関係の予め計測する必要がある。実測したLCVR位相量の印可電圧特性を図5に示す。

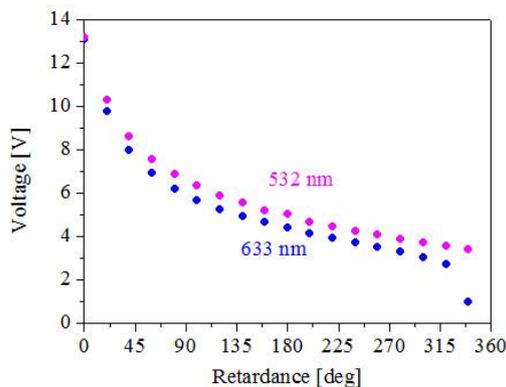


図5. 液晶可変リターダーの位相量の印可電圧特性。

波長 632.8 nm の He-Ne レーザーを入射光

として、消光法、回転検光子法、液晶変調法の3種類の方法でガラス基板上に十分厚く成膜した金を通常配置で偏光解析した。計測結果を表1に示す。なお、入射側の偏光子は同一のグラントムソンプリズム (消光比: $\sim 10^{-7}$) を使用し、消光法と液晶変調法は同一の検光子 (グラントムソンプリズム (消光比: $\sim 10^{-7}$)) を用いた。液晶変調法は、他の2つの従来法と比べて同等の精度で偏光解析することができた。

表1. 異なる3つの手法で計測した金厚膜の偏光解析パラメーター

	Ψ [deg]	Δ [deg]
消光法	43.48	101.81
回転検光子法	43.10	101.42
液晶変調法	42.60	102.96

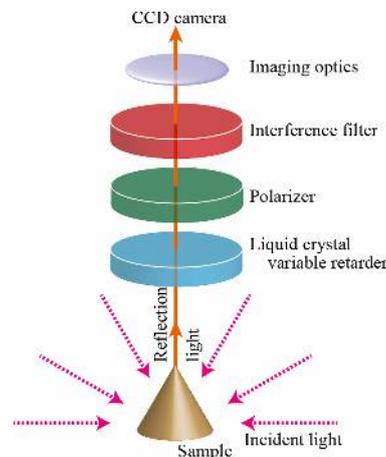


図6. 開発した液晶可変リターダーを用いたイメージングエリプソメーターの概略図。

液晶変調法が従来法と同等の精度で偏光解析できることが明らかとなったため、図6に示す液晶変調法による3次元形状計測装置を試作した。装置は液晶可変リターダー (LCVR)、消光比 10^{-4} の直線偏光フィルム、干渉フィルター、結像レンズ、CCDカメラから成る。CCDカメラには14ビットのダイナミックレンジを持つ白黒CCDを採用した。計測は、予め計測した位相量-印可電圧特性に従って位相を変化させ、その都度、光強度画像を取得する。取得した画像をデジタルフーリエ変換することによって、2次元偏光画像を得る。

液晶変調法で計測したアルミニウムを成膜した円錐ミラーの反射偏光の楕円率角分布と楕円方位角分布を図7(a)、(b)にそれぞれ示す。円錐の傾斜角は全て同一であることから、反射楕円の楕円率角も同一に、傾斜方位角は円周に沿って連続的に変化することから、反射楕円方位角も連側的に変化する。計測結果は、楕円率角は全面同一色、すなわち、同じ楕円率角を、楕円方位角は連続かつ

滑らかに変化しており、予測通りの結果が得られた。

計測した反射楕円の楕円率角から傾斜角を、反射楕円方位角から傾斜方位角をそれぞれ求め、各反射点の法線ベクトルを決定した。本研究で作成した3次元形状再構成ソフトウェアを用いて再構築した円錐ミラーの3次元形状を図7(c)に示す。

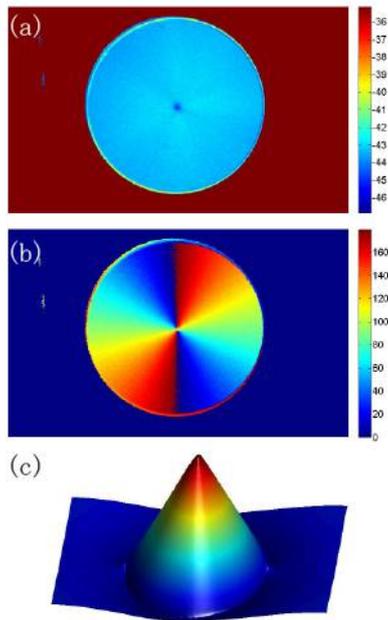


図 7. 液晶によるイメージングエリプソメータを用いて計測した Al をコートした円錐ミラーの反射楕円の(a) 楕円率角分布、(b) 方位角分布。(c) 計測した楕円率角と方位角から再構築した円錐ミラーの3次元形状。

本研究によって、距離計測に依らない新しい形状計測法とこれを実現する計測装置を開発した。偏光解析法による3次元形状計測法は、リモートセンシング特性と高い傾斜角および傾斜方位角精度を持つことから、これまで適用が困難だった計測環境や計測対象などへの応用が期待できる。

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1件)

1. Toshihide Tsuru, “Tilt-ellipsometry of object surface by specular reflection for three-dimensional shape measurement”, Opt. Express **21** (2013) 6625-6632, 査読有
DOI: 10.1364/OE.21.006625

[学会発表] (計4件)

1. 津留俊英、”偏光計測による立体イメー

ジング”、2012年 日本光学会年次学術講演会 (Optics & Photonics Japan 2012)、2012年10月24日、東京都 タワーホール船堀

2. 津留俊英、”液晶可変リターダーを用いた傾斜エリプソメトリーによる3次元形状計測”、第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月12日、愛媛県 愛媛大学・松山大学

3. 津留俊英、”傾斜エリプソメトリーによる3次元形状計測”、第59回応用物理学関係連合講演会、2012年3月18日、東京都 早稲田大学

4. 山本治美、松川裕章、荒木秀和、津留俊英、”偏光イメージングのものづくり現場への応用”、第7回偏光計測研究会、2011年11月11日、東京都 東京工芸大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津留 俊英 (TSURU TOSHIHIDE)

山形大学・地域教育文化学部・准教授

研究者番号：30306526