

## 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24年6月8日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560046

研究課題名（和文） リアルタイム分光エリプソメータの開発

研究課題名（英文） The development of the spectroscopic real-time ellipsometer

研究代表者

川畑 州一（KAWABATA SHUICHI）

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：10118747

研究成果の概要（和文）：本研究では分光の透過型 FDP(Four Detector Polarimeter)を製作し、それを偏光検出器に用いたリアルタイム分光エリプソメータの開発を行った。開発においては、装置のキャリブレーションにおいて工夫を加え精度の向上を実現した。そして、開発した分光エリプソメータを用いてシリコン基板上の酸化膜とガラス基板上の金膜の予備測定を行った。シリコン基板上の酸化膜の場合、公称値 130 nm に対して 125 nm の値が得られ、また、金膜においてもその分光データ  $\Psi_{(\lambda)}$ 、 $\Delta_{(\lambda)}$  が他の分光エリプソメータで得られたと値とほぼ一致した。これらの結果から、試作した分光透過型 FDP ならびにそれを組み込んだリアルタイム分光エリプソメータが実用的にも満足のいく性能であることが確認できた。

研究成果の概要（英文）：The real-time spectroscopic ellipsometer was developed. The spectroscopic transmission type Four Detector Polarimeter (FDP) was equipped to the ellipsometer as the polarization detector of light, which was originally developed also. In the calibration of the FDP, some innovative methods were applied to increase its accuracy. The preliminary measurements were carried out by using the real-time spectroscopic ellipsometer for the samples of a SiO<sub>2</sub> film on a silicon substrate and a thick gold film on a glass substrate. The measured thickness of the SiO<sub>2</sub> film was 125 nm for the sample of 130 nm. And the spectroscopic data  $\Psi_{(\lambda)}$  and  $\Delta_{(\lambda)}$  of the gold film by the real-time spectroscopic ellipsometer agreed well with the data by another spectroscopic ellipsometer. The usability of the developed spectroscopic FDP and the real-time spectroscopic ellipsometer was confirmed experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

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、ポラリメータ、エリプソメトリー、分光計測、偏光計測干渉計

1. 研究開始当初の背景

半導体作製技術を始め、液晶・高分子材料・超薄膜作製技術など様々な分野で精密偏光計測のニーズが高まっている。エリプソメーターはこれらの光学的異方性や複素屈折率、ナノメーターの膜厚を精密に計測できる優れた計測装置である。

一般に、偏光状態を精密に計測し、光物性を正しく評価するためには、1) 高精度な機械要素で構成されたエリプソメーターを、2) 精密に制御し、3) 正しい光学モデルを用いて解析する、ことが要求される。近年、多くの企業から様々な光学配置のエリプソメーターが販売されているが、精密なアライメントや複雑な較正が必要で熟練した操作が要求される。

現在の分光エリプソメーターの主流は、偏光子または位相子を機械的に回転させながら反射光強度変化を計測する方法である。一方、高速計測を目的として、機械的な駆動部がなく1ショットで計測可能な手法も提案され始めているが、分光計測が可能で、且つ、全てのストークスパラメーターをリアルタイムで決定できる装置は未だ例がない。

本研究では、独自に開発した偏光検出器(透過型 FDP: Four Detector Polarimeter)を分光偏光計測装置へと発展させる。目標の装置は、広い波長範囲で分光計測ができ、駆動部もなく、高速計測が可能で且つ、部分偏光をも精密に計測ができるという優れた特性を有するので、半導体・液晶分野は勿論のこと、高分子などの異方性材料の開発分野、生体応用、表面・界面ダイナミクスや固体・液体界面ダイナミクスの計測など、これまで使用が困難視されていた分野にも応用でき、偏光計測の拡大につながるものと期待できる。

## 2. 研究の目的

研究は、近紫外から赤外域の広い波長域において、サンプルの偏光解析パラメーター  $\Psi \cdot \Delta$  をリアルタイムに且つ、高精度で計測できる小型分光エリプソメーターの開発を目的とする。分光エリプソメーターの心臓部である T-FDP(Transmission type Four Detector Polarimeter)と非点収差補正した多チャンネル型ポリクロメーターをそれぞれ新規に開発する。

開発する T-FDP は偏光素子、キューブ型ハーフミラー、分光器のみで構成され、機械的な駆動部もない。そして、測定波長全域でサ

ンプルの偏光解析パラメーター  $\Psi \cdot \Delta$  を高速(1/30 秒以下)且つ、高精度( $\pm 0.1^\circ$  以下)に計測することを実現する。

開発した分光 T-FDP をエリプソメーターの偏光検出器として用いることにより、低開発費で現在市販されている分光エリプソメーターと同等の計測精度を実現し、リアルタイムでの測定が可能な分光エリプソメーターの開発を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 小型サイズの分光 T-FDP ユニットの開発

実用性と応用を考慮し、計測ヘッド部を小型化する。光軸を回転軸とし3つのキューブ型ハーフミラーを回転させた配置で構成するマウントホルダーを新規設計し作製する。光出力は光ファイバーを用いて検出する。

### (2) マルチチャンネル同時計測のための光ファイバー入力分光器の開発

4つの光検出器と入射光強度モニターの出力信号強度を計測し、偏光解析パラメーター  $\Psi \cdot \Delta$  を得る本装置は、検出器のばらつきや経時変化が測定精度に直接影響を及ぼす。また、複数検出器を使用する際に生じる計測時刻のタイムラグによる入射光の強度変動が測定精度を低下させる。

これらの誤差要因を排除するために、5つの光ファイバーからの射出光を1つの二次元検出器で検出できる多チャンネル入力の分光器を設計・試作する。また、ポリクロメーターの非点収差の補正も行う。

### (3) 分光 T-FDP ユニットの高精度装置関数計測技術の開発

予め4つの異なる偏光状態を規定して分光 T-FDP ユニットの装置関数を表す特性行列を決定するが、その際に使用する位相子の吸収二色性と位相角の  $\pm 90^\circ$  からのズレによる不完全性が計測精度を低下させる。そこで、位相子を用いず、金属試料の主入射角反射によって完全円偏光を生成し、反射型の1/4波長板として装置関数の決定に用いる。

## 4. 研究成果

透過型 Four Detector Polarimeter (透過型 FDP) は入射偏光を4つの光線に分岐させ、その光強度を測定することにより入射光の偏光状態を決定できる装置で、偏光素子を必要とせず構成もシンプルである。本研究では分光の透過型 FDP を製作し、それをを用いてリアルタ

イム分光エリプソメーターを開発した。

透過型FDPの測定部として、光軸を回転軸とし3つのキューブ型ハーフミラーを回転させた配置の透過型FDPヘッドを製作した。そしてまた、透過型FDPの光検出部となる光ファイバー入力分光器を開発し、各入力チャンネルにおける波長の校正を行った。開発した透過型FDPヘッドとFDPヘッドの射出光の分光CCDイメージを図1と2にそれぞれ示す。キューブ型ハーフミラーの全ての透過・反射光は集光レンズを通して光ファイバーに入力される。図2に示すように、5本の光ファイバーで導いた光がCCD上で500  $\mu\text{m}$ 間隔で分離されることが確認できた。

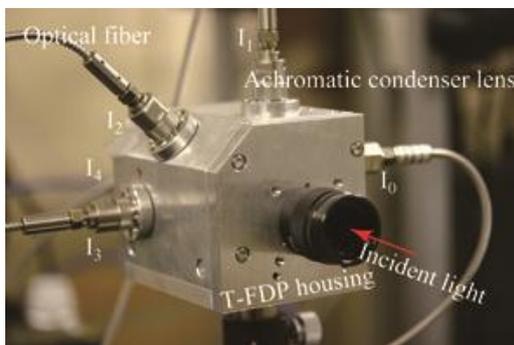


図1. 開発した透過型FDPヘッド。

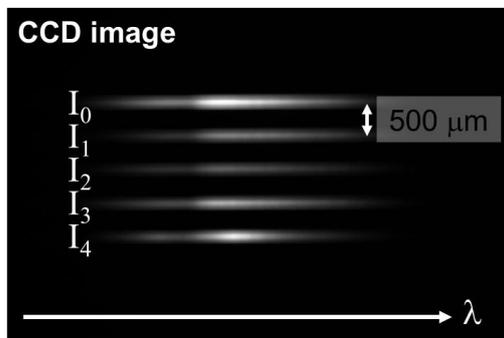


図2. 光ファイバーで導いたFDPヘッドの射出光の分光像。

ヘッド部と光検出部を光ファイバーで連結した透過型FDPを組み立て、独自に工夫したキャリブレーション法により可視域での装置の各波長毎の特性行列を求めた。次の2つの配置で偏光状態変化をポアンカレ球上に描画し動作確認を行った。1) 白色光源(LS)-偏光子(P)-透過型FDPを直線配置し偏光子を360°回転、2) 白色光源(LS)-偏光子(P)-633 nm用1/4波長板(C)-透過型FDPを直線配置し1/4波長板を360°回転。波長633 nmの偏光状態

を図3に示す。

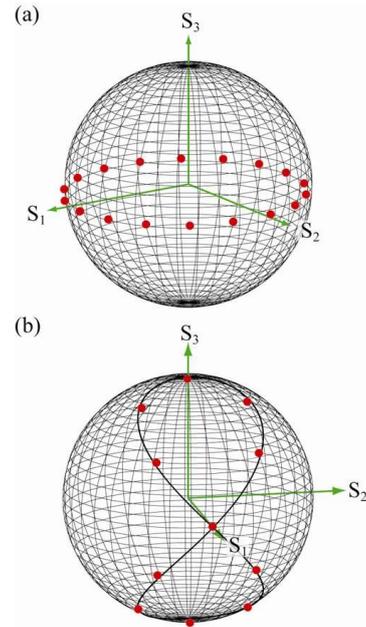


図3. (a) LS-P-FDP、(b) LS-P-C-FDPの2つの直線配置で計測した633 nmの偏光状態。

1)の時、ポアンカレ球の赤道上を、2)の時、ストークスパラメーターが $S_1=0$ 、 $S_3=\pm 1$ を通る”8”の字を描くことから、開発した透過型FDPが分光エリプソメーターの偏光検出器として十分に機能することが確認できた。

サンプルとして、シリコン基板上的酸化膜とガラス基板上的金厚膜の測定を行った。図4に入射角70°のシリコン基板上的酸化膜を、図5に入射角60°のシリコン基板上的金膜の分光エリプソメトリー計測の結果を示す。

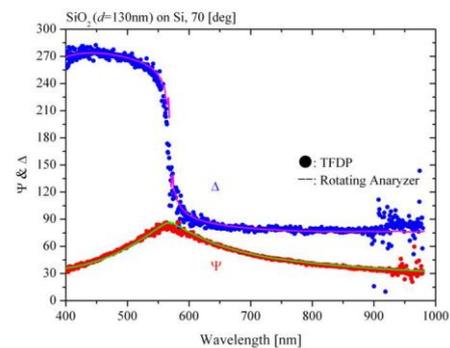


図4. シリコン基板上的酸化膜(公称値: 130 nm)の透過型FDPを用いた分光エリプソメトリー計測。実線は回転検光子法による分光エリプソメトリー計測値を示す。

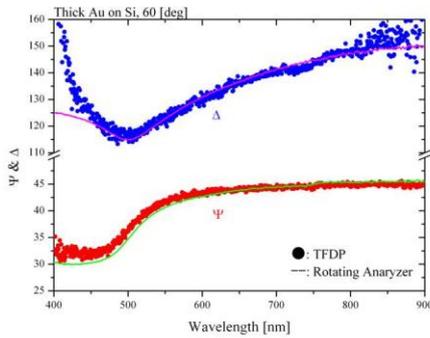


図5. シリコン基板上の金厚膜の透過型FDPを用いた分光エリプソメトリー計測。実線は回転検光子法による分光エリプソメトリー計測値を示す。

測定データを分光データの解析ソフトSCOUTで解析した。図6と7に解析で決定した光学定数を示す。

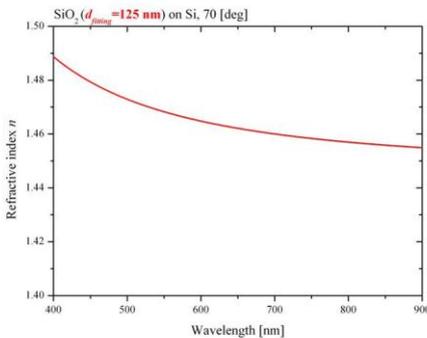


図6. 解析で得られたシリコン基板上の酸化膜の屈折率。

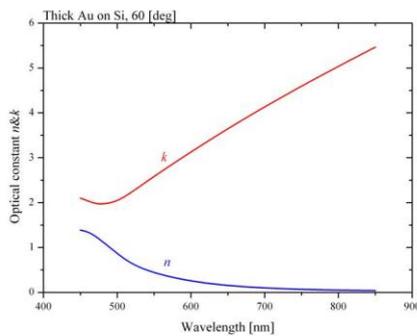


図7. 解析で得られたシリコン基板上の金厚膜の屈折率と消衰係数。

シリコン基板上の酸化膜の場合、公称値130 nmに対して125 nmの値が得られ、また、金膜でも分光回転検光子法で得られたデータとほぼ一致した。これらの測定から、試作した透過型FDPの実用性が確認できた。

## 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 T. Tsuru, Y. Kubota, T. Tadokoro and S. Kawabata, Development of spectroscopic transmission-type four detector polarimeter, Thin Solid Films, 519, 2707-2710, 2011, 査読有, DOI: 10.1016/j.tsf.2010.12.044
- ② T. Hiejima, Y. Takamizawa, T. Uchida and S. Kawabata, Ellipsometric determination of the optical properties of carbazole-containing poly (L-glutamate) thin film prepared from different solvents, Thin Solid Films, 519, 2972-2977, 2011, 査読有, DOI: 10.1016/j.tsf.2010.12.048
- ③ 川畑州一, 二見一男, 偏光解析法によるシリケート処理したアルミニウム表面の研究, 東京工芸大学工学部紀要, 34, 1-8, 2011, 査読無, <http://www.t-kougei.ac.jp/research/pdf/vol134-1-01.pdf>

[学会発表] (計12件)

- ① S. Kawabata, Real-time Measurement of the Thickness of Soap Films with the Polarimetric Interferometer, OSA's 95th Annual Meeting/Frontiers in Optics 2011, 2011. 10. 16, San Jose, Ca., USA
- ② 川畑州一, 津留俊英, 田所利康, 透過型分光 Four Detector Polarimeter, Optics and Photonics Japan 2010, 2010. 11. 9, 中央大学(駿河台)
- ③ 津留俊英, 久保田義人, 田所利康, 川畑州一, 振幅分割型ポラリメーターの入射偏光特性評価, 第71回応用物理学会学術講演会, 2010. 9. 15, 長崎大学文教キャンパス
- ④ 津留俊英, 久保田義人, 田所利康, 川畑州一, 振幅分割型ポラリメーターの分光偏光計測への応用, 日本液晶学会討論会, 2010. 9. 7, 九大医学部百年記念会館
- ⑤ 川畑州一, 日本における偏光解析法事始め, 偏光計測・制御技術研究グループ設立記念シンポジウム 応用物理学会分科会(日本光学会), 2010. 7. 16. 学習院創立百周年記念会館
- ⑥ T. Hiejima, Y. Takamizawa and S. Kawabata, Ellipsometric determination of the optical properties of carbazole-containing

poly (L-glutamate) thin film, 5th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE-V), 2010. 5. 27, State University of New York, Albany, NY, USA

- ⑦ T. Tsuru, Y. Kubota, T. Tadokoro and S. Kawabata, Development of the spectroscopic four detector polarimeter of transmission type, 5th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE-V), 2010. 5. 25, State University of New York, Albany, NY, USA
- ⑧ 久保田義人, 津留俊英, 田所利康, 川畑州一, 分光透過型 Four Detector Polarimeter の開発, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 18 日 東海大学
- ⑨ 王 汀, 新宅敏弘, 川畑州一, 6 光検出器を用いた偏光測定方法, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 18 日 東海大学
- ⑩ 川畑州一, 偏光計測干渉計の開発とその応用, Optics & Photonics Japan 2009, 2009 年 11 月 25 日朱鷺メッセ(新潟)
- ⑪ 川畑州一, 津留俊英, 田所利康, 透過型 Four Detector Polarimeter の試作と液晶配向解析への応用, 液晶学会液晶討論会, 2009 年 9 月 14 日 東京農工大学
- ⑫ 津留俊英, 山本正樹, エリプソメトリーによる多値情報記録再生技術, 光エレクトロニクス第 130 委員会第 268 回研究会, 2009 年 9 月 3 日 東京理科大学 森戸記念館

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川畑 州一 (KAWABATA SHUICHI)  
東京工芸大学・工学部・教授  
研究者番号 : 10118747

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

津留 俊英 (TSURU TOSHIHIDE)  
東北大学・多元物質研究所・助教  
研究者番号 : 30306526