

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04518

研究課題名（和文）ミュラー行列顕微鏡の創製

研究課題名（英文）Development of a Mueller Matrix Microscope

研究代表者

金 蓮花（JIN, LIANHUA）

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：40384656

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非接触で微細構造と材料物性を同時に観察評価できる“斜め照射・斜め観測”用「ミュラー行列顕微鏡」の創製を目的とし、顕微鏡装置の設計・製作、ミュラー行列像から物性・構造解析を行う解析ツールの開発、顕微鏡の応用を行った。具体的には、ダブル球面鏡を用いた結像系の導入を行い、イメージング光学系の色収差ゼロを実現した。解析ツールとしては、顕微鏡の透過・反射両モードにより得られるエリプソメトリパラメータを用いた解析方法を新たに提案した。エリプソメトリの面計測における空間分解能定義について提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で設計・開発したイメージング光学系により、一般の光学系に存在する収差の波長依存性問題を解決できた。また、本研究で提案した解析ツールは、これまでのエリプソメトリにおける計測・データ解析時間を短縮することに繋がった。

研究成果の概要（英文）：In this work, we aimed to develop a Mueller matrix microscope which is capable of ellipsometry measurement under oblique illumination and oblique observation. For imaging system of this microscope, we constructed a double spherical mirror system to realize zero chromatic aberration. We proposed a film thickness extraction method from ellipsometry parameters obtained by both transmission and reflection modes of the microscope. A definition of spatial resolution 2 dimensional measurement of ellipsometry was proposed.

研究分野：光計測

キーワード：ミュラー行列顕微鏡 エリプソ顕微鏡 反射型イメージング光学系 空間分解能

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光学顕微鏡は、電子顕微鏡や走査型プローブ顕微鏡に比較すると空間解像度が劣っているが、非接触でのその場試料観察が可能であるという大きな特長があり、材料工学や生物学をはじめとして多くの分野で利用されている。主な光学顕微鏡として、位相差顕微鏡や微分干渉顕微鏡、偏光顕微鏡、共焦点レーザ走査型顕微鏡、蛍光顕微鏡等が挙げられる。光学顕微鏡は、試料の観察を目的としたもので、透過型または落射型の照射方式で試料の観測を行う。一方、観察から得られる試料物性や微細構造の情報は限られている。

斜め照射光が反射される際、試料表面と空間媒質の境界条件により p 偏光と s 偏光の振幅と位相に変化が生じるため、反射光の複素成分には試料の誘電率・微細構造等の情報が多く反映されることになる。ミューラー行列は、それら材料の偏光特性を表現する最も完全な物理量であり、物質と偏光の相互作用を多く含む。

### 2. 研究の目的

本研究では、微細構造と材料物性を同時に観察評価できる“斜め照射・斜め観測”用「ミューラー行列顕微鏡」の創製を目的とする。具体的に、ダブル球面鏡を用いた結像系を利用した顕微鏡装置の開発、2次元ミューラー行列エリプソメトリー計測方法・装置の開発、ミューラー行列から物性・構造解析を行う解析ツールの開発を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) ダブル球面鏡を用いた結像系の導入

光学顕微鏡では一般に観測対象物の観測に透過型レンズ結像系を用いる。レンズは色収差を持つため、光源のプローブ光波長を変える場合、試料の焦点距離に変動が生じてしまい、正確な計測ができなくなる。そこで、本研究では、ダブル球面鏡を用いた反射型結像系を導入することで色収差ゼロを実現した。また、計測における顕微鏡の空間分解能について新たな概念を提案した。

#### (2) 反射・透過型イメージングミューラー行列エリプソメトリー計測装置の開発

単波長計測によるデータ解析を可能とするために反射・透過両モードで観測・計測可能なイメージングミューラー行列エリプソメトリー装置の開発を行った。

光源として LED (IBF-LX30A, LeImac) 平行光源を使用した。計測は中心波長  $633 \pm 5$  nm で行った。計測用画像は 8bit の CMOS カメラにより撮像した。カメラは、ピクセル大きさが  $5 \times 5 \mu\text{m}$  であり  $12480 \times 256$  ピクセルの測定範囲を持つ。反射モード計測では、試料位置を固定し、計測装置のアーム回転により、入射角の調整を行った。透過モード計測では、試料前後の光学系を固定し、試料を回転することにより、入射角の調整を行った。

#### (3) 反射・透過モード計測およびデータ解析ツールの開発

ミューラー行列エリプソメトリーデータ解析では、一般に計測データの分光情報を必要とする。しかし、イメージング計測では、光学フィルターを用いた波長走査法により分光計測を行うため、点計測用ミューラー行列エリプソメータより、計測時間が長くなる。そこで、単波長でのデータ解析方法を提案することにより、全体の計測・解析時間の短縮を図った。また、透過モード計測における試料基板の裏面反射影響について調べた。

#### (4) ミューラー行列顕微鏡の応用

開発したミューラー行列顕微鏡を用いて、位相子の複屈折位相差分布と石英基板上のシリコン薄膜膜厚分布計測を行った。

### 4. 研究成果

図 1 に本プロジェクトで開発したミューラー行列顕微鏡の模式図を示す。図 1 (a) と (b) はそれぞれ反射・透過モードで計測を行う際の顕微鏡装置の光学系配置を示す。図 1 (c) は CMOS カメラで得られる画像の例である。偏光発生器 (偏光子と移相子で構成される) と偏光分析器 (移相子と検光子で構成される) の間に測定試料を設置し、2つの位相子を 5:1 の回転比で回転させる。その際 CMOS カメラで得られる光変調信号の画像 (全部 60 枚) 情報から、試料におけるミューラー行列分布を抽出する。本顕微鏡の各光学素子における誤差 (位相誤差, 方位誤差) については、単位ミューラー行列をもつ空気の計測結果を用いて解析を行い、その後の試料計測で補正を行った。



図1 ミューラー行列顕微鏡の模式図。

(a) 反射モード, (b) 透過モード, (c) CMOSカメラで得られる画像の例

図2は、ミューラー行列顕微鏡計測に用いた液晶位相子と石英基板上に蒸着したシリコン薄膜試料の写真である。液晶位相子については、印加電圧を0~8Vに変えていた時の位相変化の分布を計測した(図3参照)。本計測は、透過モードのみで行われた。面計測データの平均結果は、市販の点計測用偏光計による測定結果とほぼ一致する値を示した。シリコン薄膜計測では、透過モードと反射モードでそれぞれミューラー行列分布を計測し、その後膜厚分布を抽出した。膜厚は4450Å付近の分布を示した(図4参照)。本値は、点計測用膜厚計測計による計測結果(約4200Å)に近い。

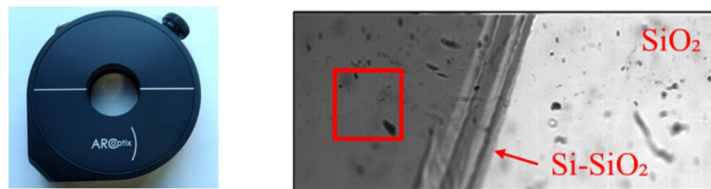


図2 計測試料写真。(左)液晶位相子,(右)Si/SiO<sub>2</sub>

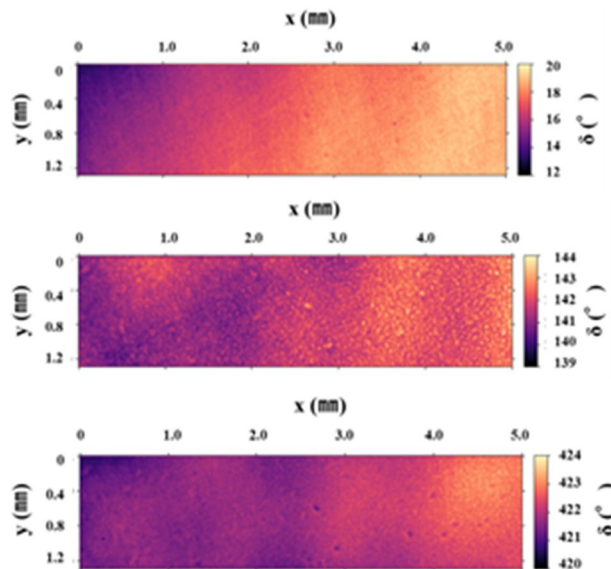


図3 印加電圧を(上)0V,(中)4V,(下)8Vに変えていた時の液晶位相子の位相変化

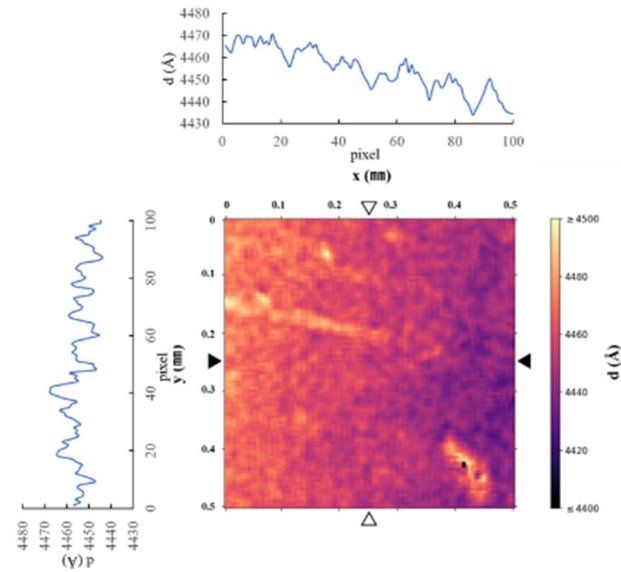


図4 シリコン薄膜の膜厚分布

本研究では、ミューラー行列エリプソメトリー顕微鏡の空間分解能について、計測結果を基に以下の概念を提案した。

$$r_e \cong 2.23 \frac{\lambda}{2NA}$$

ここで $\lambda$ はプローブ光の波長、 $NA$ はイメージング光学系の開口数を示す。

光学顕微鏡の空間分解能は、見分ける2点間の距離として、一般に以下のレイリーの定義に従う。

$$r \cong 1.22 \frac{\lambda}{2NA}$$

顕微鏡観察では、2点を見分ければよいが、エリプソメトリー顕微鏡計測では2点を見分けると同時に2点の光学特性なども正確に判断できなければならない。そこで、レイリー判断基準である、“2つ点像の分解の限界は、1点の焦点像のエアリーディスクの中心ともう1点の焦点像のエアリーディスクの第1暗環（エアリーディスクを取り巻く暗い同心環）が重なった状態である”ことから、“2つ点像による計測空間分解の限界は、1点の焦点像のエアリーディスクの第1暗環ともう1点の焦点像のエアリーディスクの第1暗環（エアリーディスクを取り巻く暗い同心環）が重なった状態である”ことに至った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jin Lianhua, Mogi Sota, Muranaka Tsutomu, Kondoh Eiichi, Gelloz Bernard	4. 巻 61
2. 論文標題 Characterization of thin films from reflection and transmission ellipsometric parameters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 018004 ~ 018004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac42af	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Jin Lianhua, Kondoh Eiichi, Iizuka Yuki, Otake Motoyuki, Gelloz Bernard	4. 巻 60
2. 論文標題 Lateral ellipsometry resolution for imaging ellipsometry measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 058003 ~ 058003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf5ac	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 金 蓮花, 春日翔貴, 近藤英一, 高和宏行	4. 巻 49
2. 論文標題 ミュラー行列の数値解析による多素子列偏光システムにおける各素子の偏光特性の抽出	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 289 ~ 295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 金 蓮花, 上原 誠, ジェローズ ベルナルド, 近藤 英一	4. 巻 86
2. 論文標題 エリプソメトリック顕微鏡 ~ 斜め観測用顕微鏡の設計とその応用 ~	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 533 ~ 536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lianhua Jin, Makoto Uehara, Takashi Iwao, Yuki Iizuka, Eiichi Kondoh, Bernard Gelloz	4. 巻 11523
2. 論文標題 Design of a spectroscopic imaging ellipsometer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 11523H ~ 11523H
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2574762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Eiichi Kondoh, Shota Takeuchi, Lianhua Jin, Ryota Koshino, Satomi Hamada, Shohei Shima, Hirokuni Hiyama
2. 発表標題 In-situ ellipsometric measurements of surface layer formation on Co in aqueous solutions corrosion inhibitor and oxidizer
3. 学会等名 Advanced Metallization Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茂木 壮太, 有元 圭介, 近藤 英一, 金 蓮花, ジェローム ベルナル
2. 発表標題 反射・透過型エリプソメトリー計測における透明基板内反射影響
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金 蓮花
2. 発表標題 エリプソ顕微鏡とその応用
3. 学会等名 第17回偏光計測研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金 蓮花, 茂木 壮太, 村中 司, 近藤 英一
2. 発表標題 反射・透過型エリプソメトリーによる薄膜厚計測
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Lianhua Jin, Makoto Uehara, Takashi Iwao, Yuki Iizuka, Eiichi Kondoh, Bernard Gelloz
2. 発表標題 Design of a spectroscopic imaging ellipsometer
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯塚 祐基, 金 蓮花, 近藤 英一, ジェロース ベルナル
2. 発表標題 深層学習を用いた画像処理によるイメージングエリプソメータの空間分解能向上の試み
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金 蓮花, 近藤 英一, 飯塚 祐基, 大竹 基之, ジェロース ベルナル
2. 発表標題 イメージングエリプソメトリーにおける分解能に関する考察
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金 蓮花
2. 発表標題 エリブソメトリー顕微鏡
3. 学会等名 第3回 日本光学会関西支部講演会「偏光を利用した光技術の展開」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

金 蓮花-山梨大学 <a href="http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/337/0033660/profile.html">http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/337/0033660/profile.html</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	近藤 英一  (Kondoh Eiichi)  (70304871)	山梨大学・大学院総合研究部・教授    (13501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------