

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13914

研究課題名(和文) 光相関イメージング法を用いた2次元エリプソメトリの開発

研究課題名(英文) Ghost Imaging Ellipsometry

研究代表者

水谷 康弘 (Mizutani, Yasuhiro)

大阪大学・工学研究科 ・准教授

研究者番号：40374152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、近年物理学分野で新たに提唱された光相関イメージング法と高精度エリプソメトリーと組み合わせることで、2次元エリプソメトリーを開発することである。エリプソメーターは、測定原理に高速偏光変調された測定光を用いるためCCDなどの2次元センサを利用することができず膜厚の分布を一度に計測することはできなかった。そこで、光相関イメージング法という手法を用いた点型光検出器を用いたイメージング法に着目した。これは、点計測手法による像再現法であるため既存の2次元イメージングに取って代わる手法として有効である。本課題では、測定原理を新たに構築し原理検証を行った。

研究成果の概要(英文)：2D measurement method for an phase-modulated ellipsometry (PME) was developed by applying the computational ghost imaging (CGI). The PEM was useful method for detecting elliptical parameters precisely. However there is a problem for detecting the 2D distribution because of using high frequency modulated signals. To overcome the problem, we focused on the CGI which can be constructed by single pixel detector. DMD projector was used as a light source in the proposed PME optical setup. As a results, we have succeeded to detect correlation signals and 2D distribution of the elliptical parameters of silicon wafer and Au thin film.

研究分野：精密計測

キーワード：ゴーストイメージング エリプソメトリ 偏光計測 画像計測 高感度画像計測

1. 研究開始当初の背景

エリプソメーターは、薄膜の膜厚測定法として一般的に普及している測定法であり、測定精度はオングストロームオーダーと高精度な膜厚計測法である。しかし、測定原理に高速偏光変調された測定光を用いるため CCD などの 2 次元センサを利用することができず膜厚の分布を一度に計測することはできなかった。

このような背景に対して、近年、基礎物理学分野で光相関イメージング法という手法を用いた点型光検出器を用いたイメージング法が報告されている [T.B. Pittman, et al., Phys. Rev. A 52, R3429 (1995)]. これは、点計測手法による像再現法であるため既存の 2 次元イメージングに取って代わる手法として有効である。

これまでに、申請者は、光相関イメージング法にも着目して研究を進めており、従来の画像計測との違いや特徴を明らかにしてきた。一方で、エリプソメトリーの開発と応用研究に従事しておりエリプソパラメーターが薄膜の膜厚測定だけでなく、微細形状計測にも適用できることを突き止めてきた。しかしながら、面分布を一括測定することに課題が残っており本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、図 1 に示すように、近年物理学分野で新たに提唱された光相関イメージング法と高精度エリプソメトリーと組み合わせることで、2 次元エリプソメトリーを開発することである。

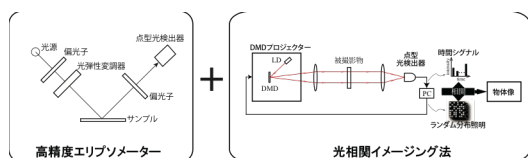


図 1 光相関イメージング法による 2 次元エリプソメーターの概要。

3. 研究の方法

(1) 研究方法の概要

2 次元エリプソメトリーを構築するために、高精度エリプソメーターに高速光相関イメージング法を適用した。まず、初年度に、光相関イメージング法のハードウェアと解析技術を改良することで高速光相関イメージング法を確立した。さらに、最終年度において、高精度エリプソメーターの照明光学系に DMD プロジェクターを導入することで実現した。

(2) 高速化への取り組み

平成 27 年度は、図 2 に示すとおり、光相関イメージング法を高速化するために、効率的な照明パターンを考案した。光相関イメージング法の光学系は、ランダムな強度分布を照

明するための DMD プロジェクター、被撮影物体およびピンフォトダイオードに代表されるような点型光検出器で構成される。このような光学系を用いたときの測定時間は、プロジェクターの投影切り替え時間とランダム分布照明の照明回数に依存する。

光相関イメージング法において、照明する回数が増えれば増えるほど鮮明な画像を得ることができる。しかしながら、ランダムな強度分布を有する光を用いているために非効率的なデータ取得法であると言える。そこで、被撮影物体の空間周波数に着目することで効率化を図る。一般的に、物体は周波数領域で表現することができる。すなわち、基本的な周波数の重ね合わせで表現できる。したがって、各周波数成分での相関を考えれば良いため照明する光に周期的な配列を用いることを考えた。具体的には、規則的な波数を直行行列で表したアダマール行列を用いた。

以上の考えをもとに、アダマール行列をもとにした循環パターン照明の適用とし、最終的には高速光相関イメージング法を開発した。

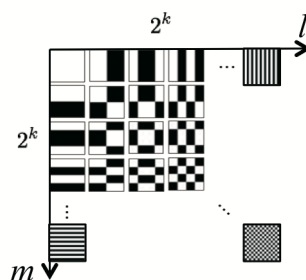


図 2 光相関イメージング法を効率化するためのアダマール行列を用いた照明パターン。

(3) 光相関エリプソメーターの構築

平成 28 年度は、図 4 に示すとおり、高速光相関イメージング法を高精度エリプソメトリーに導入し、実際に異なる媒質の 2 次元偏光分布を計測した。

高精度エリプソメトリーは、光弾性変調器を中心とした偏光解析法である。光学系は、偏光子、光弾性変調器および点型光検出で構成した。光弾性変調器では観測光の偏光状態を変調させることでロックインアンプによる検出値を演算することにより偏光情報を計測した。ロックインアンプを用いた計測であることからバックグラウンドノイズに対して強く高精度な測定ができる。

前年度までに開発している高速光相関イメージング法を適用した。具体的には、循環パターンを DMD プロジェクターから出射する。循環パターンは複数あるが、各パターンごとに、サンプル上で反射した光が最終的にレンズで点検出器に集光されることにより計測が実現した。50kHz 以上の応答速度の点検出器は一般的に多数あるため変調信号の解析が可能

となる。

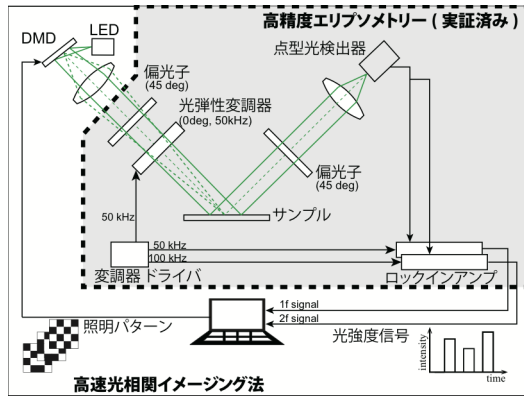


図3 高速光相関イメージング法を用いた2次元エリプソメーターの原理.

4. 研究成果

(1) 構築した装置

図4に、構築した高速光相関イメージング装置を示す。アダマール行列パターンを有する照明を照射するためにDMDプロジェクターを用いた。プロジェクターから出射された光は、主軸方位 45° の偏光子に導入され直線偏光とされた後に、偏光状態を時間的に変調するための光弾性変調器(PEM)に導入される。PEMは、周波数50kHzで偏光変調される。その後、サンプルに照明され、サンプルの有する Δ および ϕ により反射後の偏光状態が変化する。その後、主軸方位 45° に設定された偏光子を投下した後に時間的に変化する光検出器により強度が測定される。変調された光は、ロックインアンプを用いて50kHzおよび100kHz成分の振幅を習得する。その後、計算機上で相関計算を行いサンプルの Δ および Ψ の2次元分布を得る。

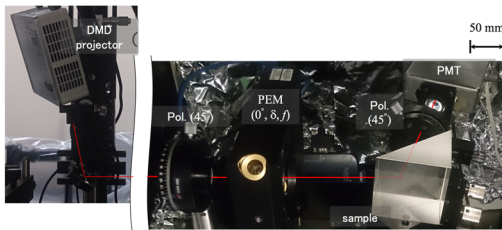


図4 構築した高速光相関イメージング法を用いた2次元エリプソメーター.

(2) アダマール行列の有効性

アダマール変換行列をもとにした照明パターンの有効性について検証した。図5に、測定に用いたサンプルと画像を示す。サンプルは、四角い穴の開いたものを用いた。また、比

較のために、一般的な走査型イメージング、ランダムなパターンを用いた光相関イメージングおよびアダマールパターンを用いた手法を示す。さらに、いずれの手法とも照明光強度を調整することでSN比を変化させながら画像を取得した。図5より、走査型イメージング法は、高SN比条件下では良好なイメージを提供しているが、低SN比では、不鮮明な画像となった。これに対して、光相関イメージングでは、ランダムなパターンを有した照明法では、繰り返し数は多いものの、低SN比環境においても画像を取得できることがわかる。一方、アダマール行列を用いた照明法では、測定回数は4000あまりにもかかわらず、ランダムパターンを用いるよりも鮮明な画像が得られることがわかる。

図6に、図5で取得した画像のコントラ

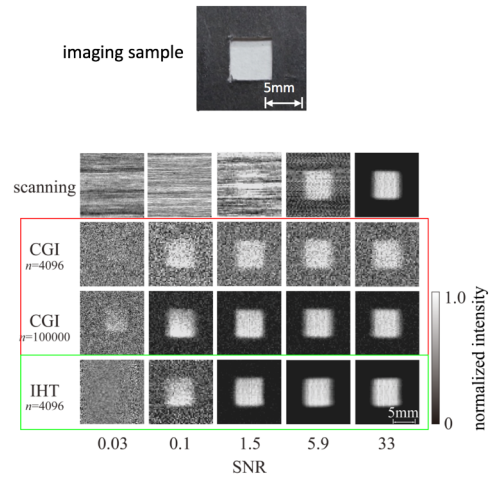


図5 取得画像の従来法との比較.

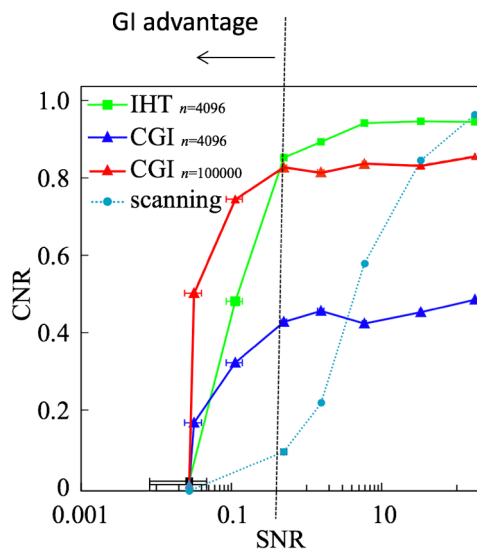


図6 取得した画像のコントラストのノイズ依存性の比較.

ストを定量的に示す. 高 SN 比環境下では一般的なイメージング法を用いると良質な画像を得ることができるが, 低 SN 下では光相関を用いた手法の方がより鮮明な画像が得られることがわかる. また, アダマールパターンを用いた手法は多数回繰り返したよりも劣るものの, 同回数より高品質な画像が得られることがわかる. このことより, 超微弱光での画像取得ではランダムパターンを用いた光相関法を, 微弱光ではアダマールパターンを用いた手法を, 高 SN 比環境下では一般的な手法を用いることがよいということがわかる.

(3) 数値計算による測定原理の確認

数値計算により光相関エリプソメトリーの測定原理を確認した. ここでは, サンプルの有する偏光状態が, 一定の Δ もしくは ψ としたときに, おおのちに独立で Δ および ψ を測定できるかを確認した. 図 7 に, 数値計算結果を示す. 図 7 左図では, ψ を一定とし Δ を変化させながら数値計算的に算出した結果である. また, 図 7 右は, 左図と Δ と Ψ を入れ替えた. いずれの結果からも, Δ および ψ を独立で測定できることがわかる. 以上より, 本提案手法の有効性を数値的に確認した.

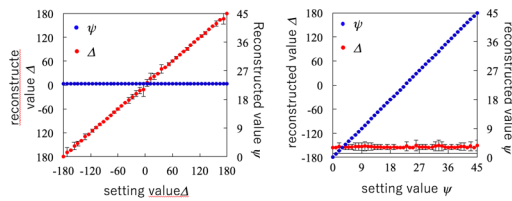


図 7 数値計算による光相関イメージング法の確認.

(4) エリプソパラメーターの測定結果

4-(1)で構築した装置の偏光測定部のみの確認を行った. ここでは, サンプルを SiO₂ プリズムとし, サンプルへの入射角度を変化させながら Δ および ψ を測定した. いずれの測定結果とも理論値と実験値がよい一致を示し, 本装置の偏光測定装置としての有効性を確認した.

サンプルとして, シリコンウエハ上に金薄膜を蒸着したサンプルを用いた. 図 9(a)に, サンプルを示す. この混合サンプルにたいしてアダマール行列を用いた照明による光相関イメージングを取得した. ロックインアンプで取得した各変調周波数成分の振幅と相関を取得した結果を図 9 に示す. 図 9(b)から(c)は, それぞれ, バイアス成分の 2 次元分布, 50kHz の 2 次元分布, および 100kHz の 2 次元分布である. いずれの周波数の成分ともに測定可能であることがわかる. 以上の周波数を解析することで, 図 10 に示すとおり, Δ の 2 次元分布を得ることができ, 本提案手法の有

効性を示すことができた.

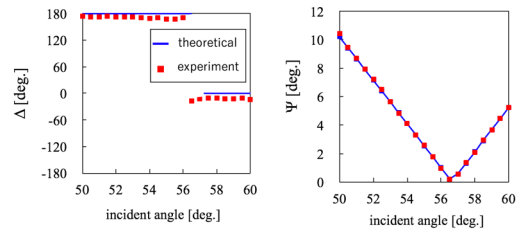


図 8 構築した装置のエリプソメトリとしての原理検証.

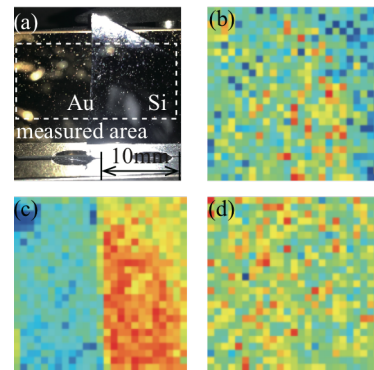


図 9 テストサンプルと各周波数の画像.

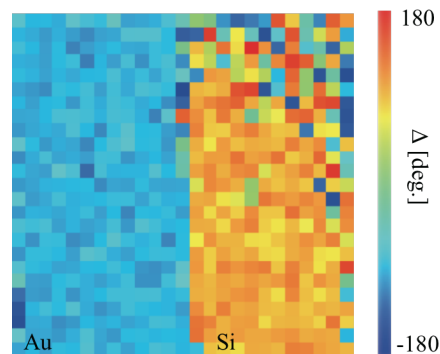


図 10 金とシリコンのエリプソパラメーターの 2 次元分布.

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)
Kyuki Shibuya, Katsuhiro Nakae, Yasuhiro Mizutani, Tetsuo Iwata: Comparison of reconstructed images between ghost imaging and Hadamard transform imaging, Opt. Rev, Vol. 22, No. 6, pp. 897-902, 2015.

[学会発表] (計 11 件)
・田口寛樹, 水谷康弘, 高谷裕浩: 微弱励起

光による光相関を用いた蛍光イメージングに関する研究(第2報)-単一光子検出における高感度イメージング法の検討-, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017年3月13日, 慶応大学(神奈川県・横浜市).

・ Sho Onose, Masashi Takahashi, Hirotugu Yamamoto, Yasuhiro Mizutani, Takeshi Yasui: Single Pixel Imaging with a High-Frame-Rate LED Digital Signage, IDW 2016 (The 23rd International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2016), 2016年12月7日, Fukuoka (Japan).

・ (invited) Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya, Yukitoshi Otani: Ghost imaging ellipsometry, International Symposium on Optomechatronic Technology (ISOT) 2016, 2016年11月9日, Tokyo (Japan).

・ (invited) Yasuhiro Mizutani, International Symposium on Optical Memory 2016, 2016年10月16日, Kyoto (Japan).

・ (invited) Yasuhiro Mizutani, Hiroki Taguchi, Yasuhiro Takaya: Single-pixel imaging by Hadamard transform and ghost imaging and its application for hyperspectral imaging, Proc. SPIE, 10021, 2016年10月13日, Beijing (China).

・ 田口寛樹, 水谷康弘, 高谷裕浩: 微弱励起光による光相関を用いた蛍光イメージングに関する研究(第1報)-光相関イメージングにおける効率的な照明法の検討-, 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2016年9月7日, 茨城大学(茨城県・水戸市).

・ Nabila Makhtar, Quang Duc Pham, Yasuhiro Mizutani, Yoshio Hayasaki: Optical frequency comb profilometry based on a single-pixel phase imaging, Proc. SPIE, 9960, 2016年8月28日 San Diego (USA).

・ 田口寛樹, 水谷康弘, 高谷裕浩: 光相関による微弱蛍光イメージング, 精密工学会2016年度関西地方定期学術講演会論文集, 2016年6月10日, 島津製作所(京都府・京都市).

・ (招待講演) 水谷康弘, 澁谷九輝, 高谷裕浩: 微弱光イメージングを可能にするゴーストイメージング, レーザー学会学術講演会第36回年次大会, 2016年1月9日, 名城大学(愛知県・名古屋市).

・ Yasuhiro Mizutani, Kyuki Shibuya, Yoshihiko Makiura, Hiroki Maruoka, Tetsuo Iwata, Yasuhiro Takaya: Fluorescence microscope by using computational ghost imaging, International Symposium on Optomechatronic Technology (ISOT) 2015, 2015年10月14日, Neuchatel (Swiss).

・ Kyuki Shibuya, Yasuhiro Mizutani, Hirotugu Yamamoto, Takeshi Yasui, Tetsuo Iwata: Optical detection of Micro defect by single pixel imaging, CLEO-PR, 2015年8月24日, Busan (Korea).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://www-optim.mech.eng.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水谷 康弘 (Yasuhiro Mizutani)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40374152

(2) 研究分担者

岩田 哲郎 (Tetsuo Iwata)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部・教授

研究者番号: 50304548

高谷 裕浩 (Yasuhiro Takaya)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70243178