

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02154

研究課題名（和文）光周波数コムによる光スピンホール効果を用いたサブナノ構造の形状測定

研究課題名（英文）Surface measurement with sub-nano order resolution by using Spin Hall effect of light generated by optical frequency comb

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） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、サブナノオーダーの構造不均一性を光学的に検出できる偏光測定解析技術を構築することである。機械的な測定誤差を排除するために、光スピンホール効果による反射位置のシフト量を測定量とすることで機械駆動を必要としない偏光測定光学系を構築した。具体的には、サブ10nm前後の金の薄膜を標準試料として用いることで測定光学系の精度検定を行い、さらには、オプティカルフラットの表面粗さをサブナノオーダーで検出した。また、サンプルを走査することにより表面粗さの二次元マッピングを行うことでこれまで検出が不可能であった研磨痕を明らかにすることができた。なお、波形測定精度の向上のために機械学習も導入した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子光学的な効果として注目されているスピンホール効果を産業応用を可能としたことは意義深い。また、偏光計測に関しても、従来は、測定精度はある程度得られていたが長期的な安定性が欠けるため2次元データを取得するのが困難であった。それに対して、従来よりも高感度かつ安定的にデータを得ることができるようになったため、2次元データを取得できるだけでなく、水分子の層なども検出できるようになった。社会的には、より高精度な検査手法として導入が可能になる点で意義がある。

研究成果の概要（英文）：The spin Hall effect of light (SHEL) associated with spin-orbit interactions, describes a transport phenomenon with optical spin-dependent splitting, while the splitting shift is corresponded to the polarization state of light. Since the core of ellipsometry is calculating surface qualities according to polarization state of optical probe, we proposed a new ellipsometry based on SHEL shift. According to weak measurement and ellipsometry theory, we can realize the evaluation of surface roughness variation by the measurement of SHEL shift. The special texture detected obtained by 2D distribution figures seem to provide a possibility for roll-off areas and polishing marks detection.

研究分野：精密計測，生産工学

キーワード：光スピンホール効果 表面粗さ 薄膜計測 エリプソメトリ 偏光計測 弱値増大効果

1. 研究開始当初の背景

近年、ナノテクノロジーの急速な進展に伴い、高機能製品に必要とされる 10nm 以下の精度が必要とされる超薄膜や微細周期構造、高精度分子設計技術を利用した高性能デバイスの開発が進められている。これらのデバイスは、試作レベルでは作製に成功しているものの、量産化技術が確立されていない。これは、そもそも、サブナノオーダーという要求精度に対して、測定法が潜在的に有する測定誤差が大きく、製造物の不具合を効率よく検出できないためにスループットが向上しないことが主たる要因である。すなわち、サブナノオーダー以下の不均一性を高感度に検出できる手法が提案されれば、高品質な加工やデバイスを安定的かつ大量に市場に供給することが可能になる。

一般的に、構造の不均一性を観測するためには、薄膜計測として実績のある偏光状態の変化から推定する手法が用いられている。構造の不均一性は、有効媒質理論という近似理論により薄膜光学モデルとして表現することができる。すなわち、サンプルに照明した光の反射前後の偏光状態の変化量は、薄膜の膜厚と相関があるため、有効媒質理論を介してサブナノ構造の形状と対比することができるのである。しかしながら、偏光計測に潜在的に存在する光学素子の機械的な駆動による測定誤差や計測速度、測定光の波長の曖昧さによる分解能の低さに課題があり、構造評価に用いることができないのが現状である。

このような社会的背景に対して、近年、偏光状態の変化が反射位置の変化にもたらす影響が報告されている。これは、照明する光子の角運動量保存則から説明されている。光子の角運動量は、偏光状態を表すスピン角運動量と、光子の位置を表す軌道角運動量からなっている。すなわち、反射前後で偏光状態が変化すると、角運動量を保存する必要があるため、光子の反射位置がシフトする。したがって、反射位置の変化を計測することでサンプルによる偏光状態の変化量を測定することができる。この変化量は、申請者が計算したところによると、薄膜が薄くなるほど、すなわち、構造が微細になるほど顕著になる傾向がある。しかしながら、これまでに、光スピンホール効果とサブナノ構造との相互作用が明らかにされておらず、また、測定光の波長に曖昧さが存在するため誤差が発生し、測定法として応用されるに至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、サブナノオーダーの構造不均一性を光学的に検出できる偏光測定解析技術を構築することである。機械的な測定誤差を排除するために、光スピンホール効果による反射位置のシフト量を測定量とする。

3. 研究の方法

偏光状態の変化量から構造を特定するために、図1に示すとおり、光スピンホール効果(Spin Hall Effect of Light: SHEL)による反射位置の変化量を測定した。物体表面のナノオーダーの微細な構造は屈折率の変化として捉えることができる。すなわち、物体表面に薄膜が均一に形成されていることと等価である。この物体表面に、観測光である直線偏光|H>の光を入射すると、物体からの反射光の偏光は、物体表面の微細形状に依存した変化を伴う。このとき、光子の角運動量は保存されるのであるが、角運動量を構成している要素は軌道角運動量とスピン角運動量である。偏光状態はスピン角運動量に相当するため、反射による偏光変化、すなわち、スピン角運動量の変化すると、角運動量保存則から軌道角運動量が変化する。この変化は、マクロな視点で見ると、反射光の位置のわずかな変化 $\delta_r$ として現れる。したがって、反射位置の変化量を測定することにより、間接的に物体表面の粗さを測定することができる。

SHEL による反射光のシフト量を測定するために、図2に示すとおり、弱値測定が可能な偏光光学系を導入した。SHEL によるシフト量は、計算によるとサブマイクロオーダーの変化となる。したがって、一般的な光学系では回折限界により測定することは困難である。そこで、直交偏光状態からのずれ量を測定する弱値測定光学系を導入した。He-Ne レーザから出射され

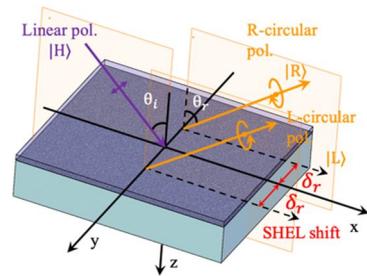


図1 光スピンホール効果の原理。

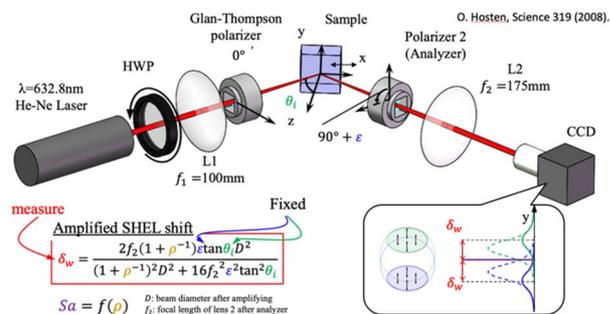


図2 弱値増大効果による SHEL シフト量測定光学系。

た光は、強度調整用の波長板(HWP)を透過した後に、レンズにより集光しながら偏光軸が  $0^\circ$  に設置された偏光子を透過した後にサンプル上に照射される。サンプル表面で生じた SHEL によりシフトした光は、偏光軸が  $90^\circ$  に設置された偏光子を透過した後にレンズによりコリメートされ CCD カメラにより検出される。このとき、検出器側の偏光子を  $90^\circ$  からわずかにずらすことによりシフト量を検出することができる。

カメラ画像でのシフト量を定量化するためには画像解析から光強度の中心位置を測定する必要がある。このとき、測定環境中に存在する擾乱により測定にばらつきが生じる。そこで、機械学習を導入することにより測定のばらつきを低減させるとともにサブピクセル分解能の測定システムを構築する。

#### 4. 研究成果

構築した測定装置の検出の確認と設置パラメータの最適化を行った。図3に示すとおり、偏光子の角度を  $0.2^\circ$  づつ  $90^\circ$  をはさんで変化させるところシフトした光を検出した。このシフト検出より、構築したシ

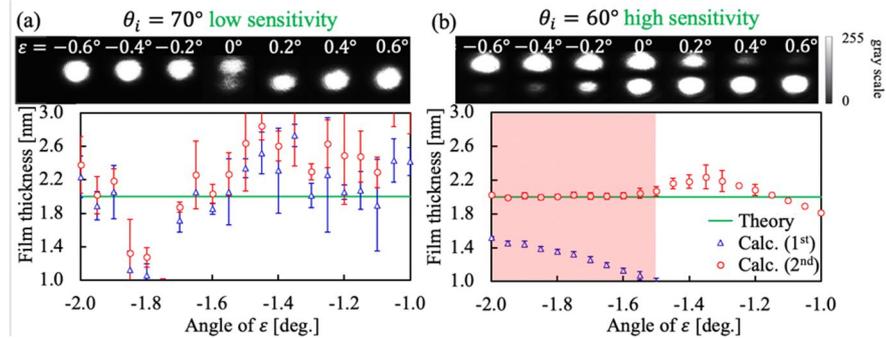


図3 SHEL シフトの測定結果。(a) 入射角度  $70^\circ$ 、(b) 入射角度  $60^\circ$ 。

テムで SHEL の観測が可能であることを確認した。また、サンプルに対する入射角度を  $60^\circ$  および  $70^\circ$  と変化させて同様の実験を行ったところ、入射角度を  $60^\circ$  としたときに、測定値が安定な領域があることが分かった。これらの結果より、以降の測定では、入射角度を  $60^\circ$  とし、検出器側の偏光子を  $1.8^\circ$  ずらした設定を用いた。なお、サンプルを設置するステージに xy 軸の自動ステージを設けることで、走査による 2 次元計測を可能にした。

測定結果の安定性を評価したところ、測定環境の湿度が影響していることが分かった。測定サンプルには、合成石英製オプティカルフラットを用いて、湿度を記録しながら 7000 秒 SHEL シフト量を測定した。図4に示すとおり、湿度と SHEL シフト量に相関が見られた。有効媒質理論を元にして計算したところ、水分子数層分が影響していることが分かった。この湿度の影響を除外するために、サンプルをホット

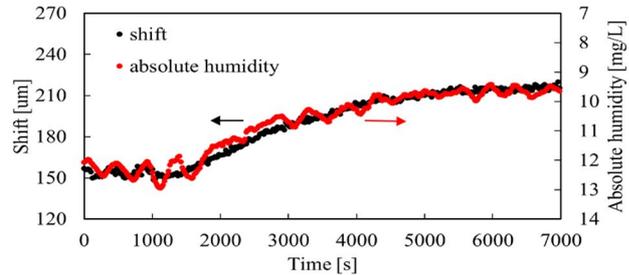


図4 SHEL シフト量と湿度との相関関係。

プレートで加熱してから測定を行うこととした。なお、本申請課題とは異なるが、構築したシステムが分子レベルでの検出が可能であることを示唆しており新たな展開が見られた。

オプティカルフラットの表面を xy ステージを用いて走査しながら表面粗さの 2 次元分布測定を行った。測定した箇所は、サンプルの端に近い領域の  $10\text{mm} \times 5\text{mm}$  の領域とした。図5に示すとおり、 $x=4\text{mm}$  付近で、筋がある領域とランダムな領域が分かれる測定結果となった。筋がある領域の詳細を確認したところ、 $150\mu\text{m}$  オーダのピッチがあることがわかった。この筋は、ラップ研磨の研磨痕と思われる。また、ランダムな表

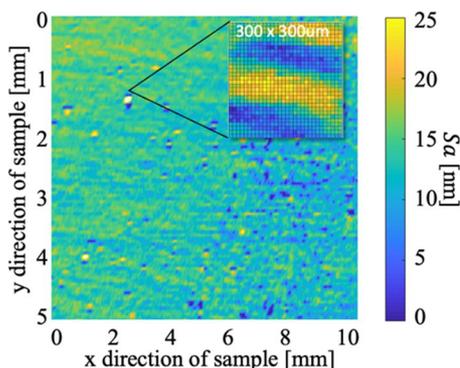


図5 オプティカルフラット表面粗さの 2 次元分布。

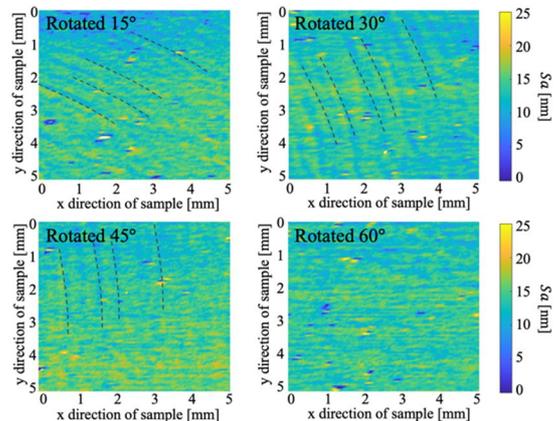


図6 オプティカルフラットを回転させながら表面粗さを測定した結果。

面粗さを有する領域は、研磨ができなかったエッジロールオフ部分であると思われる。そこで、サンプルを回転させながら測定をしたところ、図6に示すとおり、サンプルの回転に伴い筋の方向が回転していることが分かった。また、原子間力顕微鏡により別途表面粗さを測定しながら測定したが測定結果と良い一致をみせた。このことから、研磨の際のわずかな痕を測定できることが分かった。なお、この研磨痕の表面粗さはサブナノオーダーであり当初の目的を達成したと言える。

さらなる高精度化のために波形測定に機械学習を導入した。SHELによるシフト量を測定するためにはCCDで測定した光強度の中心位置を求める必要がある。これまでは、この中心位置は正規分布フィッティングにより求めていたが、サブピクセル以下の精度での測定が必要となった。図7に示すとおり、測定結果を、畳み込み層と全結合層が組み合わされた畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network: CNN)により測定データの特徴量を抽出することにより中心位置を求める。畳み込み層は、光学系に存在する収差に相当しており、また、全結合層は環境の擾乱に相当すると考えた。構築した機械学習システムの確認とCNNの構造を最適化するために、測定方法として信頼のある図8に示した白色三角測量システムを用いた。このシステムは、サンプルのz軸方向の位置を検出器の横方向に変換してサンプルの奥行き情報を得る方法である。図9(a)に示すとおり、CNNのパラメータを検討したところ、畳み込み層のたたみ込むピクセルは3ピクセルとし、活性化関数はシグモイド関数を用いると良いことが分かった。さらに、実際に測定したところ、図9(b)に示すとおり、サブピクセルで測定できることが分かった。ここで得られた結果は、一般的な測定に展開できる方法としても有用である。

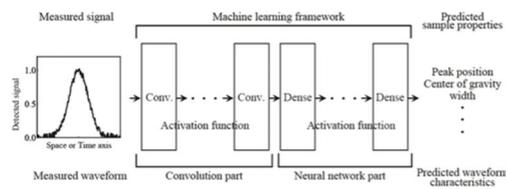


図7 中心位置推定のためのCNN。

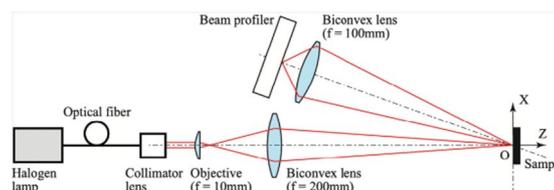


図8 白色三角測量光学系。

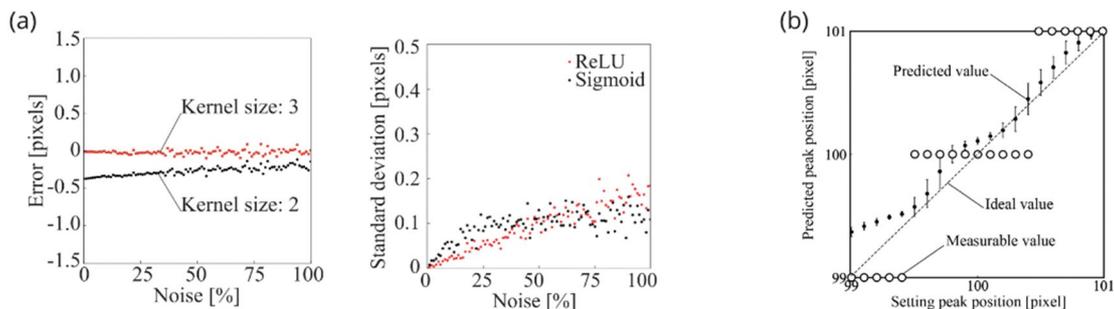


図9 CNNのパラメータ最適化によるサブピクセル精度の測定結果。(a)CNNパラメータ検討結果、(b)精度検定結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mizutani Y., Kataoka S., Nagai Y., Uenohara T., Takaya Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Structure estimation of deep neural network for triangulation displacement sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cirp.2022.04.043	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 Mizutani Yasuhiro, Kataoka Shoma, Uenohara Tsutomu, Takaya Yasuhiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Ghost Imaging with Deep Learning for Position Mapping of Weakly Scattered Light Source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 37～45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41871-020-00085-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 4件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yasuhiro Mizutani, Shoma Kataoka, Tsutomu Uenohara, Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 First Photon-detection Ghost imaging for weak light imaging
3. 学会等名 The 7th Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC2021)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kataoka, Shoma, Mizutani, Yasuhiro, Uenohara, Tsutomu, Takaya, Yasuhiro
2. 発表標題 Ghost imaging with probability estimation using convolutional neural network: improving estimation accuracy using parallel convolutional neural network
3. 学会等名 SPIE Technologies and Applications of Structured Light（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Mizutani, Li Zhehan, Yoshiyasu Tadokoro, Tsutomu Uenohara, Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 Scanning 2D Surface Profilometry by using Spin-Hall Effect of Light
3. 学会等名 International Symposium on Optomechatoronic Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水谷康弘
2. 発表標題 機械学習で深化するシングルピクセルイメージング
3. 学会等名 2021年度光学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naila Zahra, Yasuhiro Mizutani, Zhehan Li, Tsutomu Uenohara, Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 Ellipsometry based on spin Hall effect of light (SHEL) using modified weak measurement for surface area measurement
3. 学会等名 Optical Technology and Measurement for Industrial Applications Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 LIZHEHAN, 水谷康弘, 上野原努, 田所利康, 高谷裕浩
2. 発表標題 Development of Ellipsometry Based on Spin Hall Effect of Light (5th report)-2D distribution of SHEL shift for evaluation of sub-nanometer surface topography-
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhehan Li, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 Detection of Surface Roughness by Ellipsometry based on Spin Hall Effect of Light
3. 学会等名 ICPE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Li Zhehan, 水谷 康弘, 上野原 努, 高谷 裕浩
2. 発表標題 光スピンホール効果エリプソメトリの開発 (第4報) 表面粗さ計測の解析的検討
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 High-speed single pixel imaging with deep learning
3. 学会等名 OIT2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水谷康弘, 片岡将磨, 上野原努, 高谷裕浩
2. 発表標題 ゴーストイメージングによる散乱計測
3. 学会等名 2021年度応用物理学会秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Best Innovation Award, International Symposium on Optomechatoronic Technology 2021.

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	高谷 裕浩  (Yasuhiro Takaya)  (70243178)	大阪大学・工学研究科・教授    (14401)	

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
---------	---------