OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Ellipsometry Based on Spin-Orbit Interaction of Light
Author(s)	Faiz, Naila Zahra
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105443
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name (NAILA ZAHRA FAIZ)	
Title	Ellipsometry Based on Spin–Orbit Interaction of Light (光のスピン-軌道角運動量相互作用を用いたエリプソメトリー)

The downsizing demand for devices stimulates the development of new materials and the fabrication of surfaces with intricate properties. These progresses lead to the demand for a precise measurement of subtle changes in interface properties. Ellipsometry is one of the established instruments for such needs due to its precision and multi-parameter measurement capability. However, its reliance on rotating elements and temperature-sensitive retarders can introduce operational complexity and long-term stability issues.

This work proposes a new ellipsometry technique employing the Spin–Orbit Interaction (SOI) of light, introduced as the Spin Hall Effect of Light (SHEL) ellipsometry. While not exactly ellipsometry in the conventional sense, the approach shares several similarities. In conventional ellipsometry, the target interface is characterized by ellipsometric angles retrieved from intensity-based polarization measurement. In SHEL ellipsometry, the target parameter is retrieved by measuring the polarization-dependent subwavelength beam shift emerging from the spin–orbit interaction. While conventional ellipsometry uses a pair of polarizers as polarization state generation and analyzer, a pair of polarizers in SHEL ellipsometry defines the almost orthogonal initial and final polarization states to realize the weak measurement scheme, allowing amplification of the SHEL shift.

First, a proof of concept to validate the proposed SHEL ellipsometry is carried out by examining several experimental parameters. Quantitative validation was performed by refractive index retrieval, demonstrating the quantitative capability of SHEL ellipsometry. The varying thickness of film layer profiles manifested in the variation of the beam shifts proves that SHEL observation qualitatively draws the structural profile on the nanoscale. Lastly, surface roughness variations as small as 0.6 nm, confirmed from AFM measurement, can be resolved through effective medium approximation modeling. The measurement scheme is inherently extendable from pointwise probing to line scans and ultimately to 2D areal mapping, enabling fast localized analysis as well as wide area observation.

The second stage is the extension of the SHEL ellipsometry working range to access high-sensitivity measurement at near Brewster incidence. Under horizontally polarized incidence, the SHEL shift shows an intrinsically amplified amplitude near Brewster's incidence, demonstrating promising enhancement for measurement. To access this high-sensitivity regime, the requirement of an appropriate weak measurement parameter is formulated through gain calculation. The results show not only better sensitivity reflected in the thin film thickness and 2D roughness measurement but also establish practical guidelines for implementation near Brewster operation for SHEL ellipsometry. Additionally, the anomalous SHEL shift at the Brewster angle is shown to be beneficial in approximating unknown material refractive indices and in calibrating the incident angle.

The results presented in this thesis establish SHEL ellipsometry as a practical and scalable measurement framework that translates fundamental concepts of spin–orbit optics into a robust optical metrology tool to achieve sub-nanometer sensitivity under realistic experimental conditions. As such, this represents a concrete step toward bridging fundamental quantum-optical physics and industrially relevant nanoscale measurement technologies.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名（ NAILA ZAHRA FAIZ ）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　准教授	水谷　康弘
	副 査　教授	井野　秀一
	副 査　教授	榎本　俊之
	副 査　教授	高谷　裕浩

論文審査の結果の要旨

本論文は，量子光学現象である光のスピンホール効果を応用した偏光解析法を用いることで，表面粗さや膜厚をサブナノオーダかつ長時間安定的に測定する手法の構築を目的としている．

第１章では，背景から目的に至る経緯が記載されている．デバイスの小型化に対する要求は，新材料の開発や複雑な特性を持つ表面の創成を促進している．こうした進展は，界面特性の微細な変化に対する精密測定への需要をもたらした．これまでに，サンプル表面での光との相互作用を解析するエリプソメトリが，その測定精度や測定可能パラメータの多様性という観点から，産業界のニーズに応える確立された手法であった．しかし，従来法の測定光学系では回転素子や温度に敏感な位相差板を用いるため，操作の複雑さや長期安定性の確保が課題であるとの説明がなされた．

第２章では，本研究で提案する測定方法の原理が示されている．本研究では，光のスピン軌道相互作用を利用した新しいエリプソメトリとして，「光のスピンホール効果（Spin Hall Effect of Light: SHEL）エリプソメトリ」を提案している．従来型のエリプソメトリとの比較から，原理は異なるものの，本提案手法は装置構成の観点でいくつかの有している類似点いついて紹介された．一方で，測定原理においては，従来のエリプソメトリでは，強度ベースの偏光測定から得られる偏光角によってサンプル界面を特徴付けていたが，SHEL エリプソメトリでは，スピン軌道相互作用から生じる偏光依存の「波長以下のビームシフト（SHEL シフト）」を測定することでサンプルの情報を導出するという基礎原理からの説明がなされた．また，従来法が偏光状態の生成と解析に一対の偏光子を用いるのに対し，SHEL エリプソメトリにおける一対の偏光子は，弱測定（Weak Measurement）による SHEL シフトの増幅を実現するために用いられる点の説明があった．これらの偏光子は，サンプル入射前およびサンプル反射後の偏光状態を規定するものであり，ほぼ直交する状態であるクロスニコル近傍に配置することで実現している旨の説明があった．

第 3 章では，原理検証実験の説明があった．ここでは，いくつかの実験パラメータを検討することで，提案する SHEL エリプソメトリの原理を実証している．具体的には，入射角度および直交状態からのずれ角である．理論的考察を行った後に，数値計算および実験の両面から実証試みている．ここでは，屈折率の導出による定量的検証をもって SHEL エリプソメトリの定量性を確認している．その結果，サブナノメートルオーダの薄膜層における厚さプロファイルの変化がビームシフトの変化として検出され，SHEL 観測がナノスケールの構造

プロファイルを定性的に測定できることが証明された．さらに，原子間力顕微鏡測定で値付けされた 0.6 nm の表面粗さの変化も，有効媒質近似モデリングを通じて分解可能であることを示している．この測定方法を，点計測からラインスキャン，そして最終的には 2 次元面マッピングへと拡張することで，高速な局所分析と広域観測の両立を実現できることを示している．

第 4 章では，SHEL エリプソメトリの感度をさらに向上させるために，サンプルの光学特性が急激に変化するブリュースター角に着目した提案原理の拡張を行っている．具体的には，水平偏光入射下において，SHEL シフトはブリュースター角近傍で大きく増幅された振幅を示し，測定における感度向上効果が実証された．この高感度領域での測定を実現するために，直交状態からのずれ量などの弱測定パラメータの要件を定式化している．その結果，薄膜の厚さや 2 次元粗さ測定における感度向上に寄与するだけでなく，SHEL エリプソメトリのブリュースター角近傍での動作に関する実用的な指針を確立している．さらに，ブリュースター角における異常な SHEL シフトは，未知の材料の屈折率推定や入射角の校正において有益であることもあわせて示された．

第５章では，本論文で提示された成果は，SHEL エリプソメトリが実用的かつ拡張可能な測定フレームワークを確立したものである．これは，量子光学におけるスピン軌道相互作用の基礎概念を，現実的な実験条件下でサブナノメートルの感度を達成するだけでなく，長時間測定可能な光学計測ツールへと応用展開するものである．すなわち，本研究は，基礎的な量子光学物理を産業的に重要なナノスケール計測技術へ展開する方法であると結論づけている．

以上のように，本論文は，長時間安定性に優れた表面計測技術を創出したものであり，膜厚測定や微小欠陥検査など半導体関連分野を含めた産業分野への大きな貢献が期待されるとともに，学術的にも意義深い研究成果を収めている．よって本論文は博士論文として価値あるものと認める．