

審査の結果の要旨

氏名 叶世蔚

本研究は、従来光学的計測法では評価困難であった光学的回折限界以下の開口サイズを有する微細構造の深さ計測手法を新しく提案するものである。表面微細機能構造は、バルクでは困難な、多様な物理機能が発現可能なことから、その工学応用が活発に進められている。これら製品デバイスの品質管理において、発現機能を直接支配する微細構造の形状評価の重要性が高まっている。しかし、開口形状、開口幅等の表面に露出した開口部表面情報は、様々な計測手法が開発されている一方、深さ情報については、計測時間を要する触針式計測法のほかは、断面を切り出すといった破壊計測を行わざるを得なかった。本論文では、インプロセス計測への展開可能性を有した、遠隔場光学計測において、従来困難だった回折限界以下の開口を有する微細構造の深さ計測法を開発し、理論・実験の両面から、開発手法の有効性について検証した。本論文は、全9章で構成される。

第1章「緒論」では、既存の微細構造深さ計測法の特徴について、計測原理に基づき、分類、整理をしている。この背景整理を通して、本研究の目的と意義を明確にしている。

第2章は「回折限界以下開口溝の光学式深さ計測法の提案」であり、まず、**FDTD** 電磁場解析法を用いて、光学的回折限界以下の開口サイズを有する微細機能構造の近接場領域の光学応答を詳細に調査している。結果として、回折限界を下回るサブ波長サイズの微細溝においても、近接場領域では、依然、深さに応じた位相変動を伴った波面が存在すること明らかにしている。この理論知見に立脚すると、微細溝近傍の表面反射率を既知情報として扱うことができれば、近接場光だけでなく、インプロセス計測法と親和性の高い遠隔場光においても、微細溝近接場領域の光学応答場を推定可能であることを、光学結像理論を用いて論じている。また提案手法を、**FNRDM (Far-field-based Near-field Reconstruction Depth Measurement)** 法と定義している。

第3章は「提案 FNRDM 法の数値解析」であり、理論的観点から、提案手法の特性を解析するとともに、妥当性、および有効性の検討を行っている。具体的には、FDTD 電磁場解析法およびフーリエ結像光学を用いた数値解析を行い、遠隔場で取得される光強度分布のみから、光学的回折限界以下の開口サイズを有する微細溝深さを計測可能であることを示している。製造現場における検出ノイズを考慮した解析により、回折限界 313 nm の光学システム（波長 488nm, 開口数 0.95）において、開口幅 100 nm, 深さ 200 nm の微細溝を、10 %以下の誤差で計測可能であることを示している。

第4章は「低コヒーレンス照明をベースとした測定システム」であり、提案手法の実証を目指した測定システムの設計、構築を行い、構築システムの基本特性として再現性の評価を行っている。具体的仕様としては、スペckルノイズ軽減および透明体試料への適用性を目指し、低コヒーレンス照明を採用し、顕微拡大システムを含めたリニーク干渉計からなる光学測定システムとなっている。

第5章は「FNRDM 法の実験的検証」であり、第4章で設計、構築した実験装置を用いて、検証実験を行っている。具体的には、提案 FNRDM 法により、実際のマイクロ流体デバイスのナノチャネルの深さ計測を試みている。透明材基板上に、幅 300 nm、深さ 110 nm で設計されたナノチャネルに対して、回折限界が約 770 nm の検出光学系を適用した。結果、従来干渉計測法では、67 nm となったのに対し、提案手法では 107 nm となり、参照比較用の原子間力顕微鏡の測定値 114 nm に極めて近い計測値が得られた。また再現性は約 2 nm であった。以上より、提案手法で、回折限界 (770 nm) より大幅に小さい開口幅 (300 nm) の微細溝を、10%以下の誤差で計測可能であることを実証した。

第6章は「二波長干渉を利用した位相接続」である。一般的に干渉計測においては、測定光源波長の 1/2 以上の深さを計測する場合、絶対位相の不確定性の問題が発生する。ここでは、提案手法の深さレンジの向上を目指し、開発実験システムに二波長干渉計を組み合わすことで、絶対位相の確定を試みた。波長 532, および 520 nm の二波長を用いることで、深さ 1000 nm の微細溝の計測が可能であることを実験的に示している。

第7章「液相を利用した新位相接続法の検討」では、第6章とは全く異なった新しいアプローチによる絶対位相の推定方法を検討している。本提案手法は、揮発性液相を微細溝に滴下し、揮発時の計測値変動から、位相接続を行うもの

である。パーフルオロカーบอนを揮発性液相として想定した具体的検討を行い、一波長でも位相接続の可能性があることを論じている。

第8章「FNRDM 法の実践的応用の検討」では、実際のインプロセス環境で想定される微細溝の形状変動や、溝内壁および底部の表面粗さや、材質変動等が測定結果に及ぼす影響を考察している。結果、提案手法は、ロバスト性が極めて高い手法であることを数値解析により示している。

第9章は「結論および今後の課題」では、本研究のまとめと貢献について記載されている。

本研究は、従来不可能とされていた、光学的回折限界以下の開口サイズを有する微細構造の深さ計測が可能であることを、理論・実験の両面から実証したものであり、光計測学に対する学術的貢献に加え、製造現場で適用可能なインプロセス計測法として、次世代ものづくり現場に大きな貢献を果たすことが期待されるものである。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。