

氏名	佐藤宣夫
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博第2333号
学位授与の日付	平成16年1月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科電子物性工学専攻
学位論文題目	PZT薄膜カンチレバーを用いた多機能走査プローブ顕微鏡の開発およびその応用に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 松重和美 教授 伊藤紳三郎 教授 酒井 明

論文内容の要旨

本論文はナノスケールでの物性(形状, 光学特性, 電気特性)評価の手法を確立することを目的として行われ, そのため自己検出型カンチレバーである, PZT ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3)$) 薄膜カンチレバーを用いたダイナミックモード動作型の多機能走査プローブ顕微鏡 (SPM) を開発し, その装置性能の評価ならびにナノスケール構造物性の評価への応用に関する研究成果をとりまとめたものであり, 以下に示す6章から構成されている。

第1章は, 本研究の背景にあるナノテクノロジー, その中核を担う顕微鏡技術について紹介し, SPMの唯一の問題点とも言える走査速度について言及している。またナノスケールでの機能性材料としての強誘電体薄膜の評価技術の必要性, およびMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を紹介することで, 本研究によって構築されるPZT薄膜カンチレバーを用いたダイナミックモード動作型の多機能SPMの必要性ならびに特長を述べている。さらに, それぞれの問題点の具体的な打開を研究課題とし, 本研究の目的として述べている。

第2章では, PZT薄膜カンチレバーを用いたプローブ顕微鏡の動作原理について記述している。AFMの歴史および原理を略説し, AFM動作に重要となる探針-試料間距離に働く力について考察している。

またカンチレバーを振動させて測定を行うモードである「ダイナミックモード」動作によるAFMの2種類の検出方法 (AM検出, FM検出) を紹介している。さらにAFMによって可能となるナノスケールでの光学特性ならびに電気特性への応用について述べている。

第3章では, 本研究装置の特長であるPZT薄膜カンチレバーの特性評価について記述している。PZT薄膜カンチレバーに堆積されるPZT薄膜の成膜, またSiNピラミッド形探針を有するSiカンチレバーに, 強誘電体薄膜プロセスならびにMEMS技術を応用する微細加工技術によって作製されるPZT薄膜カンチレバーの工程を紹介している。

また, カンチレバーにおいて重要となる探針先端, ならびに探針内部を走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察し, その評価を行うほか特性評価としての周波数特性および圧電特性を評価している。加えて, PZTカンチレバーを用いて構築されるダイナミックモード動作型の多機能SPMの基本構成ならびに近接場光学顕微鏡 (SNOM), ケルビンプローブ表面力顕微鏡 (KFM) として動作させるための装置構成および分解能について考察している。

第4章では, 機能性材料のナノスケール構造物性評価への応用について記述している。ポリビニルアルコール (polyvinylalcohol) ならびにサイズおよび組成の違う2種類のナノ微粒子を用いた試料を作成し, 一般的な光学顕微鏡, 電子顕微鏡と比較し, 本研究装置 (多機能SPM) は粒子識別の上で優位性があること明らかにしている。

また, 配向制御性が良く, π 電子共役系材料の中のチオフェン低重合体であるオリゴチオフェン5量体 (dimethyl quinque thiophen) 単分子膜のナノスケールにおける同一箇所での光学および電気特性評価に成功している。

さらに, ナノスケール機能性として着目される強誘電性材料におけるドメイン (domain) 構造の観察ツールとして本研究装置を活用している。観察試料としては無機強誘電体結晶および薄膜, また有機強誘電体薄膜を対象に, 光学顕微鏡では

不可能であったナノスケールでの光学および電気特性の評価に成功している。

第5章では、PZTカンチレバーによる微細加工および高速観察への展開について記述している。これまで変位センサとして用いていたPZTカンチレバーをアクチュエータとして利用することにより、ナノスケールでの微細加工、ならびにAFMにおける探針-試料間距離を行うフィードバック制御が可能であることを実証している、さらには実際このAFMの高速観察に成功している。

第6章では、本研究をまとめ、今後の課題について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、圧電カンチレバーを利用した新規多機能走査プローブ顕微鏡（SPM）の開発とその光・電子材料のナノレベル評価への応用に関して行った一連の研究成果をまとめたものである。本論文により得られた主な研究成果は以下の通りである。

1. 圧電性材料であるPZT ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$) 薄膜をセンサ機能を有するカンチレバーに適用し、ダイナミックモード型多機能SPMを提案し、計測システムを開発した。
2. PZT薄膜カンチレバーの探針先端を高分解能走査電子顕微鏡を用いて観察し、その周波数、圧電および偏光特性を詳細に調べることにより、多機能SPMのプローブとして適用可能であることを示した。
3. 高感度変位検出が可能な周波数変調（FM）検出法を採用することにより、ダイナミックモード原子間力顕微鏡（AFM）による表面形状像、散乱型の近接場光学顕微鏡（SNOM）による回折限界を超えた光学像、およびケルビンプローブ表面力顕微鏡（KFM）による表面電位像の観察が同一箇所可能であることを実証した。
4. 開発した多機能SPMをナノスケール構造を持つ複合材料の光・電子物性評価や強誘電体材料のドメイン評価に適用した。
5. SPMにおける観察速度の迅速化の課題に対し、フィードバック制御系の広帯域化による解決法を提案するとともに、PZT薄膜カンチレバーをアクチュエータとして利用することにより、表面形状の観察が最高8.5秒の短時間で可能となることを実証した。

以上、本論文ではPZT薄膜カンチレバーを用いた多機能SPMシステムを開発し、ナノサイズ・構造を有する各種先端電子材料の評価が可能であることを実証するなど、ナノテクノロジーにおける新たな要素技術を確立する上で、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年11月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。