

氏名	蒋金星(Jinxing Jiang)			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博甲第 8057 号			
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 24 日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Development of X-ray Reflectivity Imaging to Visualize Buried Functional Interfaces in Ultrathin Films (超薄膜の埋もれた機能界面を可視化するための X 線反射率イメージングの開発)			
主査	筑波大学教授(連係大学院)	工学博士	桜井健次	
副査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(工学)	武田佳彦	
副査	筑波大学准教授(連係大学院)	博士(理学)	唐捷	
副査	筑波大学教授	工学博士	上殿明良	
副査	東北大学准教授	博士(工学)	矢代航	

論 文 の 要 旨

本論文は、多くの材料の重要な機能が薄膜界面で発現することが多く、にもかかわらず、その構造が解明されることが少ないという現状認識のもと、埋もれた機能界面の不均一さを可視化する X 線反射率イメージングの装置及び計測・解析の手法開発の研究を報告している。第1章は、序論であり、埋もれた機能界面の構造を解明する新しい計測技術の開発の意義を論じるとともに、本研究の目的と論文の構成を説明している。第2章以後は、大きく第1部と第2部に分かれており、前者に属する第2, 3章では、薄膜材料の開発と機能に関する典型的な研究事例が論じられ、後者に属する第4章以後は、X 線反射率イメージングのインストルメンテーションが主題となっている。第2章では、0.1 ミクロン以下の膜厚の超薄膜において自己組織的なナノ粒子の生成・配列パターン構造を形成することに試み、成功した研究データを論じている。リーゼガング環の名で知られる、このタイプの構造は、先行研究では、2ミクロン以下の膜厚では作成することは不可能と断じられてきたが、低温環境を利用し、かつ水蒸気量を制御することにより拡散の条件を整え、再現性の良いパターン構造の作成ができることを示した。第3章は、接着界面を X 線反射率法で検討した研究データを論じている。接着の詳細なメカニズムは、今日に至るまで定説は確立されておらず、材料の選定と接着諸条件と機械的特性の試験結果との対応からの経験的な議論が主である。本研究では、X 線反射率法により、接着部の膜厚の時間的変化や紫外線照射による硬化を非破壊的に評価できることを示した。第4章では、X 線反射率イメージング法の基礎となる理論的背景を整理し、説明している。第5章は、放射光を用いた X 線反射率イメージング法の技術開発とその性能の実証について報告している。X 線反射率法は、積層膜の深さ方向の構造に敏感であり、第2章、第3章に示された

薄膜の層・界面の定量評価でも実際に威力を発揮しているが、空間分解能を持たないことに由来する限界がある。イメージング機能を付加することで、その限界をいかに打破し、同一試料内の場所による積層構造の違いを識別し、画像として示すことができるかを詳細に説明している。第6章は、第5章の研究内容を発展させ、X線反射率法において、微小ビームを用いない微小領域分析を行う方法を論じている。画像として取得したデータ群には、試料内の任意の地点の構造情報が含まれており、実際に個々の地点のX線反射率のプロファイルを抽出できることを実証した。第7章では、産業応用等を念頭におき、放射光を用いず、15Wの低出力X線源とファンビーム光学系によるインスツルメンテーションについて述べられている。第8章では本研究で得られた結論を総括している。また附章には、X線反射率イメージングのデータ処理のために作成したソフトウェアのソースコードが掲載されている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

薄膜の機能は、その膜構造、界面構造に左右されることが多く、構造を評価、検証する技術は不可欠である。現状、電子顕微鏡等による断面観察が有力であるが、そのような断面方向の構造が試料内の位置により異なることが多くあり、不均一さの解析もきわめて重要である。特に非破壊的な測定法の登場は長く待望されていた。本論文は、埋もれた界面を非破壊的に可視化するために、X線が薄膜の表面、界面で反射する際に生じる投影像を画像再構成の数学的处理によってX線反射率の画像を得る方法を研究し、その原理と方法と応用例を論じた。研究に用いられた機器の多くは、研究室で開発された独自の手製のものであったが、それらの中身を細部までよく理解し、装置技術に習熟し、データ解析にも多くの細かな注意を払っていることが、論文に記載されている内容からも、審査の際の質疑応答からも十分うかがうことができた。新規に開発されたX線反射率イメージング法は、将来、多くの薄膜系機能材料の構造研究に応用されることが期待される。この技術開発の動機にも背景にもあたる薄膜材料の研究、特に超薄膜のリーゼガング環の形成技術の開発では、X線技術の有用性をひとまず離れ、それ自体としてもたいへん興味深い成果が得られた点も評価に値する。

〔最終試験結果〕

平成29年 2月16日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって 合格 と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。