

Fraunhofer 回折による超精密加工表面テクスチャの 測定評価法に関する研究

学位論文内容の要旨

近年の高度情報化社会の発展において、大規模集積回路を生み出す半導体製造技術および光情報通信、光コンピュータ技術の中核となる光技術は欠かせないものとなってきており、それらの先端技術を支える基盤技術として、超精密加工技術の重要度はますます高まってきている。また、応用分野も多岐にわたっており、その発展は単なる既存製品の機能向上をもたらすのみでなく新たな製品を生み出していく原動力となっている。

現在 nm ($10^{-9}m$) の加工精度を実現している超精密加工は、機械、工具、材料といった基本的な加工要素の高精度、高機能化にとどまらず、設備保全技術、加工技術、計測技術、加工環境管理技術など加工に関する周辺技術の全てが高度に整備され、それらが適切に監視、制御されて初めて達成される。従って、安定した高精度加工の実現に加えさらに精度の向上をはかるためには、個々の要素技術の高精度化とともに加工プロセス全体を考慮した加工工程管理や製品管理のシステムを整えていく必要がある。そのためにはナノメータオーダの表面テクスチャを加工中あるいは加工直後に定量的に評価できるインプロセス計測技術の開発が不可欠な要素となってきており、従来の触針式粗さ計をインプロセス計測へ適用するためには、困難な問題が数多く残されているのが現状である。

そこで、本研究はインプロセス計測への対応を考慮した超精密加工表面テクスチャ測定評価技術の開発を目的とし、Fraunhofer回折に基づく新しい測定評価法の提案、表面テクスチャに含まれる粗さおよび傷などの表面欠陥と微細溝形状の具体的な評価方法の提示、さらに光学式非接触センサの試作および計算機による測定データ処理システムの開発とそれを用いた測定評価実験による本測定法の有効性の検証を行ったものであり、本論文はそれらの成果を纏めたものである。

本論文は全8章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、超精密加工表面テクスチャの測定評価法における問題点を指摘するとともにその原因の分析と解決へのアプローチについて概説し、本研究の必要性と目的及び研究の概要について述べている。

第2章では、まず超精密加工技術の現状について調査し、代表的なものとして超精密ダイヤモンド切削加工技術、超精密研磨加工技術そして微細溝のリソグラフィ加工技術についてまとめている。そして、特にリソグラフィ技術に関連し、加工環境によって測定技術への新しい要求が生まれている顕著な例としてクリーンルーム技術についても言及している。

次に従来のナノメータオーダの精度をもつ表面測定技術について調査し、表面テクスチャを構成する表面粗さ、表面微細欠陥そして表面微細溝形状の各々に対するインプロセス計測の観点から問題点を指摘し、本論文で提案している測定方法の位置づけを行なっている。

第3章では、本測定法の基本原理である光学的フーリエ変換の原理について述べており、Fraunhofer回折理論の数学的な展開とレンズの位相変換作用を用いた場合の光学系の構成方法についてまとめている。また、表面の微細な幾何学的形状とFraunhofer回折光強度の間の数学的関係を導入し、Fraunhofer回折光強度による表面テクスチャの評価方法について論じている。

第4章では、超精密切削加工によって創成される周期的表面粗さを対象とし、その測定評価法について検討している。まず、切削加工表面における幾何学的形状とFraunhofer回折光強度との関係の理論的な解析結果に基づく表面粗さの定量的な評価方法を提案し、計算機シミュレーションによる解析から200 nm以下の超精密切削加工表面粗さを10%以内の誤差で測定評価できることを明らかにした。さらに、公称値8 nm R_{max} の磁気ディスク表面に対する測定実験を行い、提案した測定評価法の有効性を示した。

次に、インプロセス測定センサの開発を行い、ナノメータオーダの粗さを持つ超精密ダイヤモンド切削面の回転中の測定を試み、本測定法のインプロセス測定への適用性を示した。また、これらの成果をもとに、切削加工中の工具摩耗や工具送り量などのモニタリングの基礎的な解析方法として、Fraunhofer回折による表面粗さのパワースペクトル推定法の解析を行なっている。

第5章では、超精密研磨加工によって創成されるランダム表面粗さを対象とし、その測定評価法について検討している。まず、ランダムな表面粗さを統計モデルで表わし、統計モデルとFraunhofer回折光強度との関係を理論的に解析し、それに基づいてランダム表面粗さの自乗平均平方根粗さを定量的に評価できる方法を提案している。また、ランダム表面モデルによる計算機シミュレーションによって120 nm以下の超精密研磨加工表面粗さを10%以内の誤差で測定可能であることを明らかにした。そして6 nm R_{rms} 程度のシリコンウェハ表面を測定し、さらにSTMによる測定結果との比較を行なって、提案した測定評価法の有効性を示している。

第6章では、ナノメータオーダの超精密加工表面上に発生したサブミクロンオーダの微細な傷およびピンホールなどの表面欠陥や、クリーンルーム内での加工において問題となる微小粒子などの表面付着異物の検出とそれらの評価方法を提

案している。まず、収束ビームを照射した場合の微細傷による回折光強度分布についての実験的検討を行ない、境界要素法を用いた電磁波散乱解析シミュレータによって微細傷の大きさと回折光強度の関係を明らかにしている。

次に、付着粒子およびピンホールの直径を回折パターンによって定量的に評価する方法について解析し、さらに両者の定性的識別方法として偏光特性を利用する方法を提案した。そして偏光・回折光学系を構成し、粒径 $1.0\ \mu\text{m}$ および $0.6\ \mu\text{m}$ のポリスチレンラテックス標準粒子の測定評価によって本測定法の有効性を示し、さらに偏光度によるピンホールとの識別方法の実験的検証を行なった。

第7章では、サブミクロンオーダーの幅あるいは深さをもつ微細な溝を対象とし、その測定評価法について検討している。まず、矩形溝形状モデルとFraunhofer回折光強度の関係の理論的な解析を行ない、溝のピッチ、幅、深さなどの形状パラメータを定量的に評価する方法を提案し、さらに計算機シミュレーションによって台形溝形状に対する本手法の適応性および溝表面の微小な粗さによる影響について解析した。また、ピッチ $2.0\ \mu\text{m}$ 、溝幅 $1.0\ \mu\text{m}$ 、溝深さ $100\ \text{nm}$ の標準格子板を用いた測定実験によって本測定法の有効性を示し、さらに光ディスクスタンプのトラッキング用案内溝の測定も行なっている。

次に、回折パターンから溝形状を復元できる新しい理論である逆散乱位相法を提案し、ピッチ $1.6\ \mu\text{m}$ 、深さ $100\ \text{nm}$ の溝形状モデルの復元シミュレーションによってその有効性を検証している。

第8章は本論文の結論であり、本研究で提案した回折光による超精密加工表面テクスチャの測定評価法の有効性とインプロセス計測への応用の可能性について論じ、超精密加工表面テクスチャを構成する表面粗さ、表面欠陥、付着異物そして表面微細溝形状の各々に対して開発された測定評価法について得られた知見をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 斎 橋 勝 政

副 査 教 授 池 田 正 幸

副 査 教 授 岸 浪 建 史

副 査 教 授 三 好 隆 志 (大阪大学大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Fraunhofer回折による超精密加工表面テクスチャの測定評価法に関する研究

本論文はインプロセス計測への適応性を考慮した超精密加工表面テクスチャ測定評価技術の開発を目的とし、表面テクスチャに含まれる粗さおよび傷などの表面欠陥と微細溝形状の具体的な評価方法を示し、さらに試作した光学式非接触センサ及び計算機による測定データ処理システムを用いた測定評価実験によって本測定法の有効性を検証し、Fraunhofer回折に基づく新しい測定評価法の研究成果を纏めたものである。本論文は全8章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、超精密加工表面テクスチャの測定評価法における問題点を指摘するとともにその原因の分析と解決へのアプローチについて概説し、本研究の必要性と目的及び研究の概要について述べている。

第2章では、まず超精密加工技術の現状について調査し、超精密ダイヤモンド切削加工技術、超精密研磨加工技術及び微細溝のリソグラフィ加工技術についてまとめ、クリーンルーム技術についても言及している。また、従来のナノメータオーダの精度をもつ表面測定技術について調査し、表面テクスチャを構成する表面粗さ、表面微細欠陥そして表面微細溝形状の各々に対してインプロセス計測の観点から問題点を指摘し、本論文で提案している測定方法の位置づけを行なっている。

第3章では、本測定法の基本原理である光学的フーリエ変換の原理について述べ、表面の微細な幾何学的形状とFraunhofer回折光強度の間の数学的関係を導入し、Fraunhofer回折光強度による表面テクスチャの評価方法について論じている。

第4章では、超精密切削加工によって創成される周期的表面粗さを対象とし、表面の幾何学的微細形状とFraunhofer回折光強度との関係の理論的な解析結

果に基づく表面粗さの定量的な評価方法を提案し、さらに、公称値 8 nm R_{max} の磁気ディスク表面に対する測定実験によって提案した測定評価法の有効性を示している。また、ナノメータオーダの粗さを持つ超精密ダイヤモンド切削面の回転中の測定によって本測定法のインプロセス測定への適用性を示し、さらに切削加工中の工具摩耗や工具送り量などのモニタリングの基礎的な解析方法として、表面粗さのパワースペクトル推定法の解析を行なっている。

第5章では、超精密研磨加工によって創成されるランダム表面粗さを対象とし、統計モデルで表わされるランダム表面粗さとFraunhofer回折光強度との関係を理論的に解析し自乗平均平方根粗さの定量的な評価方法を提案している。また、6 nm R_{rms} 程度のシリコンウェハ表面を測定し、STMによる測定結果との比較を行なって、提案した測定評価法の有効性を示している。

第6章では、超精密加工表面上に発生したサブミクロンオーダの微細な傷およびピンホールなどの表面欠陥及びクリーンルーム内での加工において問題となる表面付着異物の検出とそれらの評価方法を提案している。まず、収束ビームを照射した場合の微細傷による回折光強度分布についての実験的検討を行ない、次に付着粒子およびピンホールの直径を回折パターンによって定量的に評価する方法について解析し、さらに両者の定性的識別方法として偏光特性を利用する方法を提案している。そして偏光・回折光学系を構成し、粒径 1.0 μ m および 0.6 μ m の標準粒子を用いて本測定法の有効性を示し、さらに偏光度によるピンホールとの識別方法の実験的検証を行なっている。

第7章では、サブミクロンオーダの微細な溝を対象とし、矩形溝形状モデルとFraunhofer回折光強度の関係の理論的な解析を行ない、溝のピッチ、幅、深さなどの形状パラメータを定量的に評価する方法を提案し、ピッチ 2.0 μ m、溝幅 1.0 μ m、溝深さ 100 nm の標準格子板及び光ディスクスタンプのトラッキング用案内溝を用いた測定実験によって本測定法の有効性について検討している。また、回折パターンから溝形状を復元できる新しい理論である逆散乱位相法を提案し、ピッチ 1.6 μ m、深さ 100 nm の溝形状モデルの復元シミュレーションによってその有効性を検証している。

第8章は本論文の結論であり、本研究で提案した超精密加工表面テクスチャの測定評価法の有効性とインプロセス計測への応用の可能性について論じ、超精密加工表面テクスチャを構成する表面粗さ、表面欠陥、付着異物そして表面微細溝形状の各々に対して開発された測定評価法について得られた知見をまとめている。

以上のように本論文は、ナノメータオーダの表面微細形状による光の回折現象を利用した超精密加工表面テクスチャの新しい評価方法を提案すると共にその有効性について検証し、超精密加工面の表面計測評価技術に関する有益な新知見を得ており、精密工学および応用光計測工学の進歩に寄与するところ大である。よって著者は博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。