チャネルド分光偏光計測法を用いた スナップショット分光エリプソメータの研究

学位論文内容の要旨

半導体などの薄膜を調べる手段として分光エリプソメータが様々な分野で広く用いられている。この方法は、測定対象の膜厚や複素屈折率を非接触かつ非破壊で、また極めて高い精度で測定できるという特徴を有している。特に、半導体素子の微細化に伴い、素子を構成する様々な膜の膜厚やその面内ムラが歩留まりに影響することから、インラインでの膜厚管理の重要性が高まってきている。分光エリプソメータは入射光から反射光への偏光状態の変化を調べるための分光偏光計測が重要な役割を果たす。現用の代表的な偏光計測法としては、回転移相子法、位相変調法などがあげられる。これらの方法では、機械的ないし能動的な偏光制御素子を用いて、照射光または反射光に変調をかけ、これに伴うスペクトルの変化から偏光状態を求めている。このため、この偏光制御素子の性能が、従来の分光エリプソメータの精度や応答速度性能などを決める主要因となっており、その性能改善にこれまで数多くの研究がなされてきた。しかしながら、もしこのような偏光制御素子を用いないで分光エリプソメータが実現できれば、これらの制約がなくなり、従来法では不可能であるような装置内インライン計測などの新しい応用の開拓が期待できる。

このような背景の下、これまでの分光偏光計測法とは異なり能動的な偏光制御素子をもたないスナップショット計測法の一つとして、高次移相子での偏光干渉によるチャネルドスペクトルを利用した分光偏光計測法、チャネルド分光偏光計測法、が1998年に提案された。そして、この計測法を応用したチャネルド分光エリプソメータ(CSE)の最初のプロトタイプが2000年に報告された。しかしながら、このプロトタイプでは、原理確認が主であり、精度については確認がなされていない。実際、従来手法のエリプソメータとの測定値の間には大きなずれが生じていた。また、計測の繰返し性や各種の外乱の影響についても評価がなされていない。CSEは、インラインでの検査などで極めて有用となることが期待できるが、現状の報告では、計測誤差の問題で、実工程には応用困難であるのが現状である。

そこで、本研究では、CSEにおいて、従来の分光エリプソメータで最も高精度な計測手法の一つとされている回転移相子法と同等の計測精度を実現するため、計測の原理に立ち戻った理論の再構築と試作機による実験実証を行った。初めに試料の分光偏光パラメータを求めるためのチャネルド分光偏光計測法の新たな構成を提案し、その手法を一般化した理論として構築する。この理論により、試料の透過や反射によって引き起こされる波面や光軸の変動の影響を全く受けない計測を実現した。次に、従来の研究では明らかとなっていなかった他の系統誤差及び外乱の影響による誤差の要因を物理的に明らかにし、その影響を低減する手法を提案する。そして、CSEを試作し、膜厚計測の精度や繰返し性において従来手法である回転移相子法の分光エリプソメータの精度の比較を行う。また、

最後に今回の研究を応用した新しいミューラー行列偏光計測法の提案も行う。

本論文は以下の 8 章から構成される。なお、本研究の成果は第 4 章から第 8 章である。

第 1 章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べた。また、ここで、現用の代表的な薄膜計測手法・偏光計測手法をいくつか紹介し、本研究で用いたチャンネル分光偏光計測法との相違点を概説した。

第 2 章では、偏光、薄膜の光学干渉、および分光エリプソメトリーの基本原理について述べた。

第 3 章では、チャンネル分光偏光計測法の計測原理とこれまで成し遂げられてきたことを概説した。そして、この計測法を応用した最初の CSE を概説し、その問題点について考察する。

第 4 章では、試料の分光偏光パラメータを求めるための新たなチャンネル分光偏光計測法の構成を提案した。この新しい構成は、2 枚の高次移相子が、分光偏光計の光照射部である偏光変調器 (PSG) に組み込まれた構成となっている。この PSG を、チャンネル分光偏光変調器 (CSPSG) と呼ぶ。この CSPSG を用いた分光偏光計 (SP-CSPSG) は、従来のチャンネル分光偏光計と同じように、能動的な偏光制御素子を必要としないという利点を持つ。さらに、試料による波面や光軸の変動による影響を全く受けないという、従来のチャンネル分光偏光計にはない利点を持つ。この原理を複屈折サンプルの計測によって、実験的にも確認した。

第 5 章では、CSPSG を用いた CSE を提案し、本研究で最初の試作機 (プロトタイプ 1) 試作した。通常の分光エリプソメータに比べ非常に小型なセンサヘッド (160 mm (W) × 53 mm (H) × 30 mm (D)) と、最短で 20 ms の受光時間を実現した。実験では SiO₂ 薄膜の膜厚を計測し、市販の回転移相子法の分光エリプソメータと計測結果と近い値であることを確認した。また、試料の傾きによって引き起こされる反射光の光軸の変動による影響を受けないことを確認した。

第 6 章では、CSE プロトタイプ 1 にも内在していた系統誤差および外乱の影響による誤差を低減させるため、誤差要因を物理的に検討し、その要因と誤差低減手法を理論的に明らかにした。そして、誤差低減のための設計見直しをおこなった CSE プロトタイプ 2 を試作した。従来の CSE の系統誤差の主な要因は、高次移相子のフレネル反射の偏光依存性とエリプソメトリックパラメータの復調時における帯域の影響であることを明らかにした。これらの影響を、高次移相子の厚み比の変更と、信号処理アルゴリズムの改良により低減させた。また、従来の CSE で、安定性と繰返し性を低減させる誤差の主要な要因であった、光ファイバーの曲げの影響と高次移相子の温度特性の影響を理論的に示した。そして、ファイバー曲げによる影響は、拡散板をファイバー出射面に設置することで計測値の変動を低減させた。また、温度変化に対しての安定性の向上のためには、CSE 向けに改良した自己較正手法を採用した。誤差低減手法の有効性を CSE プロトタイプ 2 により実験的に確認した。プロトタイプ 2 は、膜厚約 3nm ~ 約 4000nm の SiO₂ 薄膜の計測において、市販の回転移相子法の分光エリプソメータでの計測結果と、非常に高い精度で計測結果が一致した。また、光ファイバーの曲げや温度変化に対する安定性も、膜厚計測値で 0.11nm 以内であった。

第 7 章は、本研究の派生技術として、CSPSG を用いたミューラー行列偏光計の提案を行った。また、実験によりその原理を確認した。

最後に、第 8 章にて、本論分の結論を述べた。

CSE のセンシングヘッドはコンパクトな手のひらサイズであり、最短で 20ms の受光時間を実現した。そのような小型センサヘッドと高速応答性の実現は、CSE の構成がシンプルで、機械的ないし能動的な偏光制御素子を必要としないためである。さらに、本研究での計測の原理に立ち戻った理論の再構築と試作機による実験実証により、回転移相子法と同等の計測精度を実証した。このことにより、CSE により、従来の手法では困難であったインラインでの膜厚のモニタリングなど、まったく新しい応用の開拓が期待できる。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	岡	和 彦
副 査	教 授	馬 場	直 志
副 査	教 授	折 原	宏
副 査	教 授	森 田	隆 二

学 位 論 文 題 名

チャンネル分光偏光計測法を用いた スナップショット分光エリプソメータの研究

近年、半導体素子の微細化に伴い、製造工程中での膜厚管理が重要となっている。この目的のため、薄膜の高感度な計測法である分光エリプソメトリーを、インラインでの膜厚管理に利用しようとする試みが盛んになされている。しかし現用の分光エリプソメータは、製造ライン中への組み込みには必ずしも適していなかった。その主な理由は、現用法では回転移相子や光弾性変調器などの機械的ないし能動的な偏光制御素子が必須であり、これに伴うたとえば応答速度や測定系の大きさなどの様々な制約が存在したためである。この点を背景として北海道大学で1998年に、上記のような偏光制御素子が一切不要なチャンネル分光偏光計測法が発明され、2000年にはそれを用いてスナップショット計測が可能な分光エリプソメータが試作された。ところがこのチャンネル分光エリプソメータ(CSE)は、その精度や安定度が非常に低く、半導体などの膜厚測定に利用するには性能が著しく不足していた。そこで本研究において著者は、CSEの様々な誤差原因を計測原理まで立ち返って精査し、それぞれの低減方法を確立した。さらに、小型かつ高速な分光エリプソメータの試作機を作製し、その有効性を検証した。この論文ではその成果が述べられている。

本論文の第1章では、研究の背景と目的について述べられている。続く第2章では、本研究の基礎となる偏光および分光エリプソメトリーの原理について概説されている。

第3章では、チャンネル分光偏光計測法とそれを用いたエリプソメータに関する過去の研究が説明され、その問題点について述べられている。

第4章では、筆者が考案した新しいチャンネル分光偏光計の構成について論じられている。筆者はまず、1枚の偏光子と2枚の高次移相子から構成されるチャンネル分光偏光変調器(CSPSG)を導入し、それを用いた新しい偏光計の構成を提案している。この新しい偏光計は、以前の系と比較して、高次移相子が受光系から照明系に移動されている点に特徴がある。この高次移相子の位置の変更により、試料による波面や光線方向の乱れの影響を、大幅に低減することが可能となった。一方で、この新しい構成においても、チャンネル分光偏光計測法のもつ利点、例えば機械的ないし能動的な偏光制御素子が不要であるという点などはほぼすべてが保たれている。著者は理論解析により、2つの構成それぞれによって得られる情報の違いを明かにするとともに、相反性が成り立つ試

料については両者が等価な情報を与えることを示している。

第5章では、CSPSGを用いた分光エリプソメータの基本原理について述べられている。CSPSGを導入することにより、以前のCSEの誤差要因の1つであった試料の傾きの変動による測定誤差が、大幅に低減された。さらに著者は、この原理に基づき第1の試作機を作製した。この試作機のセンサヘッドの大きさは160 mm (W) × 53 mm (H) × 30 mm (D)であり、通常の分光エリプソメータに比べ非常に小型である。これに加えて、最短で20 msの高速応答が実現されている。

第6章では、CSEの誤差解析について論ずるとともに、その対策を施した第2の試作機について述べられている。著者は第5章で述べた第1の試作機の特徴について詳細に調べ、その系統誤差の主な原因が高次移相子のフレネル反射の偏光依存性、および復調時の帯域制限であることを明らかにした。さらに、前者の影響は高次移相子の厚み比の変更により除去できることを示し、一方後者の影響は信号処理アルゴリズムの改良により低減できることを明かにした。また、第1の試作機における偶然誤差の主な原因が光ファイバーの揺れと高次移相子の温度ゆらぎにあることを発見し、それぞれの低減に拡散板の導入と自己較正アルゴリズムの採用が有効であることを見出している。筆者はこれらの対策を施した第2の試作機を作製し、その精度の検定を行った。膜厚約3 nm～約4000 nmのSiO₂薄膜の計測結果が、回転移相子法の分光エリプソメータでの計測結果と、高い精度で一致した。さらに、膜厚計測値で0.11 nm以内の安定度を得ている。

第7章では、本研究の派生技術であるCSPSGを用いたミューラー行列偏光計測について述べられている。

第8章は、本研究の結論である。

これを要するに、著者は、チャネルド分光エリプソメータにおいて、様々な誤差要因を体系的に解析し、各々について効果的な低減法を見出した。さらに、従来の分光エリプソメータに比べて格段に小型でかつ高速なセンサヘッドを実現し、実験により高精度な薄膜測定が可能であることを示した。本研究によって得られた知見は、光波センシング、応用物理学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。