博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏　　　　　名	ZHANG Kaining
学　　　　　位	博士（工学）
学 位 記 番 号	新大院博（工）第533号
学位授与の日付	令和４年９月20日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当
博 士 論 文 名	Research on measurement of thickness and refractive index of glass plates with a spectrally resolved interferometer （スペクトル分解干渉計によるガラス板の厚さおよび屈折率計測に関する研究）
論 文 審 査 委 員	主査　　教授・鈴木　孝昌 副査　　教授・大河　正志 副査　　教授・村松　正吾 副査　　教授・新保　一成 副査　　准教授・崔　森悦

博士論文の要旨

高機能の電子光情報機器の発達に伴い、そこで用いられるガラス板の厚さ及び屈折率を高精度で測定することが重要となっている。これらの測定にはスペクトル分解干渉計(SRI)が従来から用いられているが、数mm以上の厚いガラス板の測定には高い波長分解能を有する大型なスペクトラルアナライザー（SPA)が必要となる。本論文では、波長分解能の低い小型軽量なSPAと干渉計の参照面を移動させる圧電素子ステージを用いて、数mmオーダーのガラス板の厚さを容易にかつ精度良く測定する方法について論じている。更に、この厚さ測定方法を用いてガラス板の屈折率を高精度に測定する方法について論じている。

第１章では、まずSRIが厚さ測定に最適な干渉計であることを説明し、従来のSRIによる測定方法について解決すべき問題点を明らかにするとともに本研究の方向付けを明確に示している。この方向付けによる着眼点は、位置可変な参照面、低分解能のSPA、スペクトル位相、異なる光学系構成、補償ガラス（CG)板、およびスペクトル位相の非線形成分であり、これらの活用による新規な厚さ計測の実現と屈折率計測への応用が目的であることを述べている。

第２章では、屈折率が未知の厚いガラス板の厚さ計測について論じている。ガラス板裏面から生じる干渉信号のフーリエ変換の振幅分布はガラス板の分散により大きな広がり幅を持つため、干渉信号を低分解能のSPAで検出できるように、フーリエ変換の振幅分布の信号位置を参照面の位置で調整する方法を提案している。更に固定参照面をガラス板の後方に導入する光学系構成を使用し、合計４つの異なる光学系構成でおのおの異なる参照面位置を設定することによって４つの異なるスペクトル位相を検出しており、これらのスペクトル位相からガラス板の屈折率およびビームスプリッタで生じる分散位相を含まない１つのスペクトル位相を得る方法を述べている。ガラス板の厚さはこのスペクトル位相分布の傾きから正確に測定できことを導いている。実験では、検出した信号位置の値は理論値と一致することを示しており、50nmの測定誤差で1mmのガラス板厚さを測定できることを明らかにしている。

第３章では、屈折率が既知の更に厚いガラス板の厚さ計測について論じている。厚さ1mm以上のガラス板によって生じるフーリエ変換面での振幅分布の大きな広がり幅を減少させるために補正ガラス(CG)板を導入している。ガラス板表面と参照面間で生じる干渉信号から１つのスペクトル位相を検出し、CGを参照側光路に挿入した後にガラス板裏面と参照面間で生じる干渉信号から２つ目のスペクトル位相を検出し、これらの２つのスペクトル

位相から１つの検出スペクトル位相を得る方法を述べている。この検出スペクトル位相の非線形成分を理論値と比較することによってガラス板と CG の厚さの差を求めることができ、検出スペクトル位相の線形成分を計算することによってガラス板の厚さを測定することができることを導いている。実験では、厚さ 1mm および 5mm のガラス板を、それぞれ 800nm および２μｍの誤差で厚さ測定ができることを明らかにしている。

第４章では、厚さ測定を伴うガラス板の位相屈折率計測について論じている。第２章で述べた厚さ測定方法に基づき、２つの光学系構成で検出される３つのスペクトル位相を組み合わせることによって厚さ 20μm の石英ガラスの厚さを 6nm 以下の誤差で測定できることを明らかにしている。理論的には３つのスペクトル位相の１つから屈折率が得られるが、フーリエ変換で得られるスペクトル位相分布には 2π の整数倍の位相不確定値が含まれているため、この不確定値を決定する必要があることを述べている。この決定をコーシーの分散公式を基にしたフィッティング関数でスペクトル位相分布をフィッティングすることによって行う方法を提案し、シミュレーション解析で本方法の有効性を明らかにしている。実験では、厚さの測定値、スペクトル位相分布、および 2π 位相不確定値の決定値から石英ガラスの屈折率分布を 0.0005 以下の誤差で測定できることを示している。

第５章では、本研究の成果を以下のように総括している。第２章では、位置可変な参照面と低分解能 SPA で干渉信号の検出を行っており、異なる光学系構成での干渉信号から得られる複数のスペクトル位相を用いることによって、ビームスプリッタの分散を除去し、ガラスの屈折率を必要としない厚さ測定を可能にしている。第３章では、1mm 以上の厚さを測定するために補正ガラス(CG)板を導入し、スペクトル位相分布の非線形成分と線形成分を分離して活用することにより厚さ 5mm の測定を行っている。第４章では、屈折率分布式から成る関数でスペクトル位相分布をフィッティングすることからスペクトル位相の 2π 位相不確定値を決定し、第２章の厚さ測定方法による厚さの測定値を用いてスペクトル位相から屈折率を求めている。

審査結果の要旨

従来の測定方法では数 mm 以上のガラス板の厚さを測定するためには約 0.05nm 以上の高い波長分解能を有する SPA が必要になるが、本博士論文では 0.5nm の低い分解能の SPA および 10nm の位置設定精度を持つ圧電素子ステージを使用することでガラス板の大きな厚さを測定できる新規な測定方法を提案している。更に、異なる光学系構成での干渉信号から得られる複数のスペクトル位相を用いることにより、ビームスプリッタによる分散の影響を除去するとともにガラス板の屈折率を必要としない厚さ測定方法を第２章で確立しており、厚さ 1mm を 50ｎｍ以下の誤差で測定できている。第３章では、1mm 以上の厚さ測定するために補正ガラス(CG)板を導入することで干渉信号の検出を可能にしている。ガラス板の屈折率を必要とするが、スペクトル位相分布の非線形成分と線形成分を分離して活用することによって厚さを測定する新規な方法を提案しており、厚さ 5mm を 2μm 以下の誤差で測定している。第４章では、スペクトル位相に含まれる 2π 位相不確定値を決定するために屈折率分布式を含む関数でスペクトル位相分布をフィッティングする新規な方法を提案しており、第２章の厚さ測定方法を用い、スペクトル位相から屈折率を 0.0005 以下の誤差で高精度に測定している。

以上のように、本論文では独創的で新規な測定手法を取り入れることによって、スペクトル分解干渉計による厚さ計測の簡便化および高精度化を実現しており、また従来正確な測定が困難であった屈折率分布計測を可能としている。これらの本論文の成果は高精密加工ガラスデバイスの厚さおよび屈折率計測におけるスペクトル分解干渉計の重要性を拡大するものであり、干渉計測の発展および高精密加工技術の向上に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分価値あるものと認定した。