

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4464561号
(P4464561)

(45) 発行日 平成22年5月19日(2010.5.19)

(24) 登録日 平成22年2月26日(2010.2.26)

(51) Int.Cl.

F I

GO 1 N 21/21 (2006.01)

GO 1 N 21/21 Z

GO 1 J 4/04 (2006.01)

GO 1 J 4/04 A

GO 1 N 21/27 (2006.01)

GO 1 N 21/27 Z

請求項の数 8 (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2000-542645 (P2000-542645)
 (86) (22) 出願日 平成11年3月25日(1999.3.25)
 (65) 公表番号 特表2002-510797 (P2002-510797A)
 (43) 公表日 平成14年4月9日(2002.4.9)
 (86) 国際出願番号 PCT/US1999/006608
 (87) 国際公開番号 WO1999/051955
 (87) 国際公開日 平成11年10月14日(1999.10.14)
 審査請求日 平成18年2月10日(2006.2.10)
 (31) 優先権主張番号 09/057,245
 (32) 優先日 平成10年4月8日(1998.4.8)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 500049141
 ケーエルエーテンカー コーポレイショ
 ン
 アメリカ合衆国、95035、カリフォル
 ニア州、ミルピタス、ワン テクノロジイ
 ドライブ
 (74) 代理人 100075144
 弁理士 井ノ口 壽
 (72) 発明者 ノートン、アダム イー、
 アメリカ合衆国、94303、カリフォル
 ニア州、パロ アルト、ロス ロード 3
 696

審査官 横尾 雅一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 軸外球面鏡と屈折素子を用いる分光計測システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

試料に対して分光楕円偏光法計測を行うための装置であって、
 広帯域放射を出射する光源と、
 前記広帯域放射を偏光してサンプリング・ビームを生成する偏光子と、
 前記試料上の狭いスポットに対して前記サンプリング・ビームを合焦する実質的に色収
 差のない光学系であって、前記光学系は球面鏡と少なくとも2つの屈折素子とを含み、前
 記サンプリング・ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、前記素子のうちの
 少なくとも1つは前記鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記素子のう
 ちの少なくとも1つによって前記光学系が実質的に色収差を生じないようになされる光学

10

系と、
 前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を分析し、それによって出力ビー
 ムを生成する検光子と、

前記出力ビームを検知して検知出力を供給する検知手段と、
 前記検知手段からの出力を処理して試料との相互作用によって生じたサンプリング・ビ
 ームの振幅と位相における偏光状態の変化を測定する手段と、
 を有する装置。

【請求項 2】

試料に対して分光計測を行うための装置であって、
 前記試料と相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを出力する光源と

20

、
検知手段と、

前記試料上の狭いスポットに対して前記サンプリング・ビームを合焦するか、あるいは前記試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて前記検知手段に対して前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を合焦する実質的に色収差のない光学系であって、前記光学系は球面鏡と少なくとも2つのレンズとを含み、前記サンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、前記レンズのうちの少なくとも1つは前記鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記レンズのうちの少なくとも1つによって前記光学系が可視波長と紫外線波長とにわたって実質的に色収差を生じないようになされる光学系と、

10

を有する装置。

【請求項3】

試料に対して分光計測を行うための装置であって、

前記試料と相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを出力する光源と

、
検知手段と、

前記試料上の狭いスポットに対して前記サンプリング・ビームを合焦するか、あるいは前記試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて前記検知手段に対して前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を合焦する実質的に色収差のない光学系であって、前記光学系は球面鏡と少なくとも2つのレンズとを含み、前記サンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、前記レンズのうちの少なくとも1つは前記鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記レンズのうちの少なくとも1つによって前記光学系が実質的に色収差を生じず、前記レンズのうちの少なくとも1つはメニスカス・レンズであるようになされる光学系と、

20

を有する装置。

【請求項4】

試料に対して分光計測を行う装置であって、

前記試料と相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを出力する光源と

、
検知手段と、

30

前記試料上の狭いスポットに対して前記サンプリング・ビームを合焦するか、あるいは前記試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて前記検知手段に対して前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を合焦する実質的に色収差のない光学系であって、前記光学系は球面鏡と少なくとも2つのレンズとを含み、前記サンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、前記レンズのうちの少なくとも1つは前記鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記レンズのうちの少なくとも1つによって前記光学系が実質的に色収差を生じず、前記レンズのうちの2つは実質的に逆数の倍率度を有するようになされる光学系と、

を有する装置。

【請求項5】

40

試料に対して分光楕円偏光法計測を行うための方法であって、

広帯域放射を出力するステップと、

前記広帯域放射を偏光してサンプリング・ビームを生成するステップと、

球面鏡と少なくとも2つの屈折素子とを含む実質的に色収差のない光学系によって前記試料上の狭いスポットに対して前記サンプリング・ビームを合焦するステップであって、前記サンプリング・ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、前記素子のうちの少なくとも1つは前記鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記素子のうちの少なくとも1つによって前記光学系が実質的に色収差を生じないようになされる合焦するステップと、

前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を分析し、それによって出力ビー

50

ムを生成するステップと、

前記出力ビームを検知して検知出力を供給するステップと、

前記検知出力を処理して試料との相互作用によって生じたサンプリング・ビームの振幅と位相における偏光状態の変化を測定するステップと、

を有する方法。

【請求項 6】

試料に対して分光計測を行うための方法であって、

前記試料と相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを出力するステップと、

前記試料上の狭いスポットに対して前記サンプリング・ビームを合焦するか、あるいは前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を前記試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて光学系によって合焦するステップであって、前記光学系は球面鏡と少なくとも2つのレンズとを含み、前記サンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、前記レンズのうちの少なくとも1つは前記鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記レンズのうちの少なくとも1つによって前記光学系が可視波長と紫外線波長とにわたって実質的に色収差を生じないようになされる合焦するステップと、

前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を検知するステップと、

を有する方法。

【請求項 7】

試料に対して分光楕円偏光法計測を行うための装置であって、

広帯域放射を出射する光源と、

前記広帯域放射を偏光して前記試料と相互作用を行うためのサンプリング・ビームを生成する偏光子と、

検光子と、

前記試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて前記検光子に対して前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を合焦する実質的に色収差のない光学系であって、前記検光子は前記修正ビームにตอบสนองして出力ビームを出力し、前記光学系は球面鏡と少なくとも2つの屈折素子とを含み、前記修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、前記素子のうちの少なくとも1つは前記鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記素子のうちの少なくとも1つによって前記光学系が実質的に色収差を生じないようになされる光学系と、

前記出力ビームを検知して検知出力を供給する検知手段と、

前記検知出力を処理して試料との相互作用によって生じた振幅と位相における偏光状態の変化を測定する手段と、

を有する装置。

【請求項 8】

試料に対して分光楕円偏光法計測を行うための方法であって、

広帯域放射を出力するステップと、

前記広帯域放射を偏光して前記試料と相互作用を行うためのサンプリング・ビームを生成するステップと、

前記試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を前記試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて光学系によって合焦するステップであって、前記光学系は球面鏡と少なくとも2つの屈折素子とを含み、前記修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、前記素子のうちの少なくとも1つは前記鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記素子のうちの少なくとも1つによって前記光学系が実質的に色収差を生じないようになされる合焦するステップと、

前記修正ビームの放射を分析して出力ビームを生成するステップと、

前記出力ビームを検知して検知出力を供給するステップと、

前記検知出力を処理して試料との相互作用によって生じたサンプリング・ビームの振幅

10

20

30

40

50

と位相における偏光状態の変化を測定するステップと、
を有する方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は一般に光学計測装置に関し、特に、軸外構成と屈折素子において放射を合焦する球面鏡を含む分光光学計測システムに関する。

【0002】

【従来の技術】

楕円偏光計は薄膜の厚さと光学定数の測定並びにバルク材料の光学定数の測定に使用される。高い入射角で試料に光ビームを向け、反射ビームまたは透過ビームの偏光に対する試料の影響を分析することにより楕円偏光計は機能する。集積回路のようなパターン化された試料の計測に使用される楕円偏光計は、完全に異なる材料あるいはフィルムスタックによって囲まれた狭いフィーチャ(幅50ミクロン以下のことが多い)の範囲内で計測可能でなければならない。この囲まれたフィーチャに当たる、検知器によって集束された極く少量の光でさえ、計測時に誤差を引き起こす可能性がある。したがって、試料上へ光を合焦し、また、試料からの光を集束する光学系は、測定可能な最少フィーチャの外側の領域に当たる放射や、その領域から検知される放射を最小化するように設計されなければならない。そしてこの条件は装置が使用する波長の範囲全体にわたって満たされなければならない。またこの光学系は光の偏光に対する影響が最低限のものとなるようにする必要がある。さらに光学系は、しばしば非常に大きなものになる場合がある平らな試料を物理的に妨げてはならない。

【0003】

波長範囲が比較的狭い場合、顕微鏡用屈折対物レンズは適切に機能して試料上の狭いスポットに合焦する。波長範囲が広い場合、屈折対物レンズは非常に大きな色収差を示す。凹凸面鏡を用いる(Schwarzschild設計のような)反射対物レンズが知られているがこれらには色収差がない。しかし、狭いスポットと高い開口数(NA)とを設けるために何らかの著しい縮小化を必要とする場合、内部鏡に対する入射角が非常に高くなり、偏光が変更される。小さな開口数ビームの処理しかできない偏光プリズムの中を光はまず通過しなければならないので、縮小化が必要となる。次いで、この光は、狭いスポットをつくるために合焦用光学系によってより大きなNAビームへ変換されなければならない。

【0004】

理論的には、(レーザー光源から得られるような)視準ビームを試料上へ合焦する理想的反射光学素子は軸外放物面鏡であり、(光ファイバーの端部のような)小さな光源を試料上へ合焦するための理想的形状は軸外楕円面鏡である。軸外楕円面鏡は、米国特許第5,508,526号に記載されているような分光楕円偏光計の中で従来用いられてきた。このような非球面鏡は、その表面に対する小さな入射角で広範囲の可能な縮小化を行うことができる。非球面鏡には色収差が発生せず、(少なくとも理論的には)その他の収差も発生しない。これらの鏡は、光学性能に対して最低限のインパクトしか持たないいくつかのタイプの低倍率またはゼロ倍率の屈折素子と組み合わせることができる。このような素子の例として、(偏光状態を故意に変えるために楕円偏光法で頻繁に使用される)補償板や波長板と、(気流の制御を行ったり、真空中または気体中に試料を囲むために用いられる)ウィンドウと、(1997年4月8日出願の米国特許出願第08/835,533号に記載されているような)アポダイズ用フィルタと、(較正と診断を行うのに役に立つ)その他の光学フィルタと、(合焦や倍率の調節に潜在的に有用な)低倍率レンズがある。一般に、これらの素子の最大許容厚や倍率はビームのNAに依存して逆比例する。

【0005】

これらの非球面鏡に関わる主要な問題点は、これらの非球面鏡が単刃ダイヤモンド旋削処理によってつくられるため、広範囲の空間周波数をカバーする多数の溝とリッジから成る形状誤差が表面に残るという事実である。各空間周波数成分によって特徴的角度で光が回

10

20

30

40

50

折され、これによって試料上の所望の狭いスポットの外側に迷光が増加する。ダイヤモンド旋削により生成されるこの特徴的誤差が、的確な楕円偏光計測が可能な最小ボックスサイズを制限する主要要因の1つである。従来型の研磨によってつくられた非球面鏡の方がより適正に機能するがこの系が必要とする開口と焦点距離とを設けなければならないので非常に費用がかかる。ガラス上のエポキシからなる薄い層に複製を行う手法も存在するが、これらの鏡の性能と耐久性は本出願ではまだ証明されていない。

【0006】

したがって、ダイヤモンド旋削の溝を取り除くために、従来の研磨だけの球面から成る光学系と非球面鏡を交換することが望ましい。しかも光学系は依然として上述のすべての要件を満たさなければならない。非球面鏡を傾斜した球面鏡と交換した場合、球面収差と、非点収差と、コマ(非対称収差)とが非常に大きくなる。傾斜した球面鏡から収差を補正するために存在する多くの設計がある。しかし、これらいずれの設計も楕円偏光法用として適切に機能するように適合させることができない。

10

【0007】

米国特許第4,208,585号と、第4,196,961号と、第3,598,468号とでは、傾斜した球面鏡の前か後のいずれかの位置に、傾斜したガラス・プレートが使用されている。楕円偏光法システムに対して適用する場合このアプローチには多くの欠点がある。これらの欠点として、紫外線(UV)と可視波長とでこのアプローチを使用する場合に、スペース上の制約、不適切な収差補正、過度の色収差が存在する。

【0008】

20

米国特許第4,230,394号と、第4,588,269号には、2つの球面鏡を直交平面で傾斜させるアプローチの利用が記載されている。この設計は、多くの楕円偏光法システムに必要な18:1という近似的縮小化を特に考慮して、楕円偏光法を行うために適切に収差を補正するものではない。

【0009】

米国特許第4,226,501号では、傾斜した鏡から収差を補正するために4つの球面鏡から成るレリーフ・システムが用いられている。各鏡に対する入射角は比較的小さいものの、4つの鏡が組み合わされる結果、光の偏光に対して非常に大きな影響が生じる。

【0010】

米国特許第5,168,386号では、傾斜した球面鏡の前または後に単一の正メニスカス・レンズが用いられ、入射光線と反射光線の双方がこの正メニスカス・レンズによってインターセプトされる位置にレンズを配置することができる。この設計は、狭い波長範囲については適正に機能するが、可視波長と紫外線(UV)波長とを含むような広い波長範囲については非常に多くの色収差を生じる。

30

【0011】

米国特許第4,135,820号ではフェーセット付きの(faceted)ビーム・コンバイナが用いられる。楕円偏光法を行うには、フェーセットの角が非常に多くの光を散乱して隣接パターンの中へ入り、フェーセットに対する入射角が非常に大きくなる。

【0012】

傾斜した球面鏡は、軸方向に左右対称のずっと大きな球面鏡(軸は物点と像点とによって設定される)の軸外セクションと考えることができる。共役比が1:1以外のとき、軸方向に左右対称の球面鏡によって純粋な球面収差が示される。軸外セグメントは、非点収差とコマ(非対称収差)の成分とを含むように思われる収差を生み出し、傾斜した球面鏡がこのような収差を有すると言われることが多い。しかし、レンズ設計を行うためには、軸外セグメントの収差は、軸方向に左右対称のより大きな鏡の球面収差のサブセットであると考えの方がさらに有益である。

40

【0013】

低いFナンバー系の開口全体にわたって適正に補正を行う設計を適合させて、すべての鏡とレンズの軸外セグメントを切り出すことにより楕円偏光法を利用できるようにすることもできよう。球面鏡の補正にレンズを使用するこのような多くの反射屈折による設計が存

50

在する。古典的な例の中にはシュミット・カメラとマクスツフ望遠鏡が含まれる(Kingslake著、“レンズ設計原理”14章、アカデミック・プレス社、カリフォルニア州サンディエゴ、1978年刊参照)。これらの設計のほとんどの適合に関する主要な問題点として、深紫外線から近赤外域(IR)を通じて使用するとき、これらの設計ではあまりに大きな色収差が発生するという事実がある。レンズの色収差の補正を行う古典的方法は異なる分散能を有するガラスから作られた2つの素子を用いてレンズを製作することである。UVの色収差は、UVを透過する材料は限定された数のものしか存在しないので、特殊な問題であるが、深紫外線を透過しかつ複屈折もしない材料は2つしか存在しない。複屈折材料によってビームの偏光が変わるので、偏光子や波長板の中で好適に使用されない場合、複屈折材料は望ましいものではない。さらに、ほとんどの光学系がかなり広い視野にわたって適正に補正像を生成しなければならないという点で、上記の系のほとんどの設計目標は楕円偏光法の設計目標とは異なる。これに対して、多くの楕円偏光法システムでは、視野の中心の実質的に単一点においてのみシステムによる最適化が必要とされる。

10

【0014】

また、広い波長範囲にわたって適正に補正が行われ色収差がほとんどない“リング・フィールド”システムとして知られる1クラスの反射屈折システムも存在する。このような系は米国特許第3,748,015号によって例示されている。楕円偏光法アプリケーション用のこのようなレンズシステムに関する主要な問題点は、縮小化が約5:1未満に限定されることである。またこれらのレンズシステムは鏡に対する高い入射角を持つ傾向があり、これは望ましいことではない。さらに、上記レンズシステムはリング形状の広い視野にわたって良好な結像特性を持つように設計されていて、この特性のために上記レンズシステムは楕円偏光法に用いるには複雑なものになっている。

20

【0015】

このように、既存のいずれの系も楕円偏光法やその他の分光計測システムで用いるためには完全に良好なものであるとはいえない。したがって、改善された特徴を備えた球面鏡を使用する望ましい広帯域分光計測システムを提案する。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】

本発明の第1の態様は、試料に対して分光楕円偏光法計測を行うための装置を目的とし、該装置は、サンプリング・ビームを生成するための該広帯域放射を出射する光源及び広帯域放射を偏光する偏光計と、試料上の狭いスポット上にサンプリング・ビームを合焦する実質的に色収差のない光学系とを有し、前記光学系には球面鏡及び少なくとも2つの屈折素子とが含まれる。この場合、前記サンプリング・ビームは、鏡の軸から離れた方向から鏡に対して入射し、鏡からの軸外反射によって生じた球面収差が前記素子の中の少なくとも1つによって補正される。上記装置は、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を分析し、それによって出力ビームを生成する検光子と、出力を検知して検知出力を供給する検知手段と、該検知出力を処理して、試料との相互作用によって生じた、サンプリング・ビームの振幅と位相中の偏光状態の変化を測定する手段とをさらに有する。本発明のこの態様並びにその他の態様の文脈において、偏光子と検光子とは、放射の偏光を修正するいかなる素子あるいは素子の組合せをも含むことが可能であり、鏡の曲率中心と鏡上の照射領域の中心に関して鏡軸を設定することができる。

30

40

【0017】

本発明の別の態様は、試料に対して分光計測を行う装置を目的とし、該装置は、試料と相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを出力する光源と、検知手段と、試料上の狭いスポットに対してサンプリング・ビームを合焦する、あるいは、該試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて検知手段に対して、該試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を合焦する光学系とを有する。前記光学系の中には球面鏡と少なくとも2つのレンズとが含まれ、前記サンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡の軸から離れた方向から鏡に対して入射する。これらのレンズの中の少なくとも1つによって、鏡からの軸外反射によって生じた球面収差が補正され、前記光学系は可視波長と紫外線波長と

50

にわたって実質的に色収差を生じない。

【0018】

本発明のさらに別の態様は、試料に対して分光計測を行う装置を目的とし、該装置は、試料との相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを出力する光源と、検知手段と、試料上の狭いスポットに対してサンプリング・ビームを合焦する、あるいは、試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて検知手段に対して、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を合焦する、実質的に色収差のない光学系とを有する。この光学系の中には球面鏡と少なくとも2つのレンズとが含まれるサンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射する。これらのレンズの中の少なくとも1つは鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正するメニスカス・レンズである。

10

【0019】

本発明のもう1つの態様は、試料に対して分光計測を行う装置を目的とし、該装置は、試料との相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを出力する光源と、検知手段と、試料上の狭いスポットに対してサンプリング・ビームを合焦するか、あるいは、試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて検知手段に対して、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を合焦する、実質的に色収差のない光学系とを有する。これらの光学系の中には球面鏡と少なくとも2つのレンズとが含まれる。前記サンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射する。これらのレンズの中の少なくとも1つが鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、前記レンズの中の2つのレンズは実質的に逆数の倍率を有する。

20

【0020】

本発明のさらに1つの態様は、試料に対して分光楕円偏光法計測を行うための方法を目的とし、該方法は、広帯域放射を出力するステップと、該広帯域放射を偏光してサンプリング・ビームを生成するステップと、球面鏡と少なくとも2つの屈折素子とを含む実質的に色収差のない光学系によって試料上の狭いスポットに対してサンプリング・ビームを合焦するステップとを有する。サンプリング・ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射する。この場合、これらの素子の中の少なくとも1つが鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正する。上記方法は、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を分析し、それによって出力ビームを生成するステップと、検知出力を供給する出力ビームを検知するステップと、検知出力を処理して試料との相互作用によって生じたサンプリング・ビームの振幅と位相における偏光状態の変化を測定するステップと、をさらに有する。

30

【0021】

本発明のさらに別の態様は、試料に対して分光計測を行うための方法を目的とし、該方法は試料との相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを出力するステップと、試料上の狭いスポットに対してサンプリング・ビームを合焦するか、狭いスポットの試料からの、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を修正ビームに変えて光学系によって合焦するステップとを有する。前記光学系には球面鏡と少なくとも2つのレンズとが含まれる。このサンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射する。この場合、レンズの中の少なくとも1つが、鏡からの軸外反射によって生じた球面収差を補正し、上記光学系は可視波長と紫外線波長とにわたって実質的に色収差が生じない。上記方法は試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を検知するステップをさらに有する。

40

【0022】

本発明のいま1つの態様は、試料に対して分光楕円偏光法計測を行う装置であって、広帯域放射を出射する光源と、広帯域放射を偏光して試料との相互作用を行うためのサンプリング・ビームを生成する偏光計と、検光子と、試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて検光子に対して、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を合焦する実質的に色収差のない光学系とを有し、前記検光子がこのサンプリング・ビームの入力に応答し

50

て出力ビームを出力する装置を目的する。この光学系には球面鏡と少なくとも2つの屈折素子が含まれる。修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射する。これらの素子の中の少なくとも1つによって、鏡からの軸外反射によって生じた球面収差が補正される。上記装置は、出力ビームを検知して検知出力を供給する検知手段と、該検知出力を処理して、試料との相互作用によって生じたサンプリング・ビームの振幅と位相中の偏光状態の変化を測定する手段とをさらに有する。

【0023】

本発明のさらにいま1つの態様は、試料に対して分光楕円偏光法計測を行うための方法を目的とし、広帯域放射を出力するステップと、該広帯域放射を偏光して試料との相互作用を行うためのサンプリング・ビームを生成するステップと、試料上の狭いスポットから修正ビームに変えて、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を光学系によって合焦するステップとを有する。この光学系には球面鏡と少なくとも2つの屈折素子とが含まれ、前記修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射する。この場合、前記素子の中の少なくとも1つによって鏡からの軸外反射によって生じた球面収差が補正される。上記方法は、修正ビームの放射を分析して出力ビームを生成するステップと、該出力ビームを検知して、検知出力を供給するステップと、該検知出力を処理して、試料との相互作用によって生じたサンプリング・ビームの振幅と位相中の偏光状態の変化を測定するステップと、をさらに有する。

【0024】

【発明の実施の形態】

図1のシステム10を見ると、広帯域放射の光源(好適にはキセノン・アーク灯)12によって、開口14を通して光路16に沿って偏光子18への放射が行われる。偏光計18は放射を偏光し、この偏光放射は、システム10用の開口絞りとして機能するアポダイザ20の中を通過する。アポダイザ20からのビームはレンズ22と24を通過して球面鏡30まで通され、この球面鏡30によって試料32の表面の狭いスポット32a上へ放射が合焦される。このようにして開口の像はスポット32aで像面上へ合焦され、開口とスポットをつなぐ点線34がシステム10の光軸となる。試料32から反射された放射は集束鏡40によって集束され、集束鏡40は検光子42とその関連する開口(図示せず)を備えた分光計44へ集束された光を合焦する。分光計の出力はコンピュータ46によって分析され、試料とサンプリング・ビームとの相互作用によって生じた偏光の振幅と位相の変化が測定される。

【0025】

米国特許第5,608,526号の楕円面鏡を図1のような球面鏡と交換することにより、ダイヤモンド旋削によって生じる誤差という制限要因が取り除かれ、楕円偏光による確な計測を行うことができる範囲を成す最小ボックス・サイズからそのような制限が除かれる。本発明で達成されるボックス・サイズは40×40ミクロン以下にすることができる。好ましい実施例またはその他の実施例では、偏光子と検光子の中に、線形偏光子とウェーブ・プレートあるいは音響光学変調器のような、放射の偏光を修正する任意の素子を含むことができる。図1に図示のように、推奨実施例では、照射領域の鏡の曲率中心30bと中心30cに関して鏡上に鏡軸30aを設定することができる。図2と図3の構成用として同様の方法でこの鏡軸を設定することができる。

【0026】

試料32によって反射された放射の集束と検知の代わりに、試料が放射を透過する場合、鏡40'によって試料中を透過する放射の検知を行うことも可能である。この鏡40'は、図3の点線で示される検光子42'と分光計44'及びコンピュータ46'へ集束された放射を合焦し、それによってサンプリング・ビームと試料との相互作用によって生じた偏光の振幅と位相の変化が測定される。さらにその他の変更例では、試料によってまたは試料の中を通過して散乱した放射を集束して、サンプリング・ビームと試料との相互作用によって生じた偏光の振幅と位相の変化を測定することが可能となる。

【0027】

実施例では、屈折素子 2 2 は正レンズであり、屈折素子 2 4 は好適には負メニスカス・レンズであることが望ましい。実施例では、素子 2 2、2 4 は、紫外線波長範囲において、並びに、可視波長のような他の波長範囲において複屈折しない同じ光学材料からつくられる。素子 2 2、2 4 用の適切な光学材料には弗化カルシウムと融解石英が含まれる。

【0028】

図 1 に示すように、鏡 3 0 に対して入射する放射ビームは鏡軸 3 0 a に対してある角度をなしているが、これはこの鏡が軸外位置でビームを反射する場合の条件である。ビームとこの鏡の軸外との相対的位置に起因して、鏡の軸外反射は通常球面収差が生じる。負メニスカス・レンズを使用することにより、鏡 3 0 からのこのような軸外反射によって生じる球面収差が補正される。

10

【0029】

レンズ 2 4 によって導入される色収差の補正のために正レンズ 2 2 が用いられ、全体として考えると、レンズ 2 2、2 4 と球面鏡 3 0 は可視波長と紫外線波長にわたって実質的に色収差のない光デバイスを形成することになる。

【0030】

上記のすべての条件を考慮して、本発明の目標の 1 つは、狭いスポットに対して分光楕円偏光計で使用するための偏楕円面軸外鏡のための交換用光学系を設計することであった。この交換用光学系は、好適には、次の特徴、すなわち、すべて球面を備えた素子からつくられるという特徴を有することが望ましい。この交換用光学系は、好適には少なくとも 250 と 800 ナノメートルの間で、さらに好適には 190 と 850 ナノメートルの間で色収差がないことが望ましい。視野の中心においてのみ回折限界性能に近づくようにこれらの収差を補正する必要がある場合がある。上記のように、この光学系は軸外球面鏡と少なくとも 2 つのレンズとを有するものである。

20

【0031】

照明光学系によって像面中のスポット・サイズを測定する場合、主光線は、楕円偏光計のシステム設計に依存して、好適には、約 60° と 80° の間の範囲にわたることが可能な、試料に対する入射角を有することが望ましい。集束光学系によって像面中のスポット・サイズを決定する場合、主光線は、好適には、やはり楕円偏光計のシステム設計に依存して、60° と 80° の間の範囲にわたることが可能な、試料からの集束角を有することが望ましい。

30

【0032】

共役比は、好適には、楕円偏光計設計の要件に依存して 1 : 1 と無限大 : 1 との間で変動することが望ましい。球面鏡を使用する光学系は、好適には、ビーム光の偏光に対して大きな影響を与えないこと、また、大きな平らな試料を妨げないことが望ましい。この光学系は好適には、本来の非球面鏡系の場合のように、長い共役側の中へ挿入される、小倍率、ゼロ倍率または低倍率の屈折素子と互換性があることが望ましい。

【0033】

素子 2 0 は好適には、融解石英基板上のアポダイジング用フィルタであることが望ましい。屈折素子 2 2 は弗化カルシウムから好適につくられた正レンズであることが望ましい。素子 2 4 は同じ材料からつくられた負メニスカス・レンズである。好適には、素子 2 2、2 4 は実質的に同じアッペ数を持つことが望ましい。アポダイザはこの系用の開口絞りとして機能する。レンズ 2 2、2 4 の頂点は、開口 1 4 と試料上の像によって設定された軸 3 4 上に配置される。オプションとして、レンズ 2 2、2 4 を平行に移動し、次いで一緒にわずかに傾斜させて色収差補正の波長範囲をほんの少し広げることもしることができる。通常の像面から試料 3 2 を 90° 傾けて、鏡に対する低い入射角で試料に対する高い入射角が生じるようにする。また、これによって物体と光学系をすべて試料と同じ側に在るようにすることができる。残りの特定条件については以下に示す。この特定条件の中で、レンズ 2 2、2 4 の表面 2 2 a、2 4 a は光源 1 2 からの到来ビームに面し、レンズ表面 2 2 b、2 4 b は入来ビームから離れる方に面する。

40

表面	曲率半径 [mm]	次の表面までの厚さ [mm]	傾き [°]
物体	0	2 6 1 . 1 1 7	0
アポダイザ	0	2 . 0	0
アポダイザ裏側	0	3 . 0	0
表面 2 2 a	1 1 6 . 4 2 6	2 . 0	0
表面 2 2 b	- 3 8 . 8 8 4	0	0
表面 2 4 a	2 8 . 2 5 3	0 . 5	0
表面 2 4 b	1 4 . 1 4 5	6 1 . 3 8 2	0
鏡	3 6 . 2 6 7	- 1 9 . 2 4 1	0
試料	0		9 0

10

【 0 0 3 4 】

物体と像とを含むすべての距離が軸に沿って計測される。アポダイザの開口の直径の半分は 3 mm であり、軸の上方で 4 . 5 mm 偏心している。試料に対する主光線の入射角は 7 2 . 9 5 ° であり、縮小化は 1 6 . 9 8 である。

【 0 0 3 5 】

開口数と入射角はアポダイザのサイズと位置を変えることにより変更することができる。試料側に口径食(けられ)あるいは非常に非テレセントリックな状態を生じるほど物体平面に近接していない限り、アポダイザの軸方向位置は重要ではない。アポダイザを物体から遠く離すことにより、アポダイザをより大きく製造し、また製造し易くすることが可能になる。

20

【 0 0 3 6 】

上記システムが狭い波長範囲用として設計された場合、異なる曲率を持つ素子 2 4 だけが、傾斜した球面鏡によって導入された球面収差を適切に補正するものとなる。色収差を補正するために素子 2 2 が追加される。素子 2 2 によって素子自身の球面収差がほんの少量付加されることになるが、この球面収差も素子 2 2 によって補正される。しかし、素子 2 2 は素子 2 4 に対して逆のバランスをとる色収差をつくりだす形状をしている。言い換えれば、レンズ 2 4 によって、鏡 3 0 による軸外反射によって生じた球面収差の補正(好適には過補正)が行われる。またレンズ 2 4 によってそれ自身の色収差が導入される。レンズ 2 2 は、レンズ 2 4 によって生じた色収差を補正するだけでなく、レンズ 2 4 によって生じた球面収差の補正も行う。理想的にはレンズ 2 2、2 4 の組合せはゼロ倍率ではあるが、システムによっては、何らかの倍率を持つこの 2 つのレンズの組合せがシステムのパフォーマンスに著しい影響を与えることはないであろう。

30

【 0 0 3 7 】

上記設計プロセスは、曲率を最適化して色収差と球面収差をバランスさせるプロセスである。設計をし易くする 1 つのファクタとして、視野の中心においてだけ最適化を達成しなければならないということがある。別のポジティブなファクタとして、欠落している開口の軸上部分にわたって収差を補正する必要はないということがある。互いに対面する素子 2 2、2 4 の表面は異なる形状または曲率を有する。

【 0 0 3 8 】

レンズ 2 2、2 4 用として弗化カルシウムが用いられる。その理由は弗化カルシウムが UV を良好に透過し、補正しなければならない色収差を最少化する低い分散を有するためである。実際問題として、弗化カルシウムは非常に多くの残留応力誘起複屈折を有してもよい。この場合、融解石英を用いることもできるが、その結果は僅かに劣るものとなる。レンズ・グループの傾斜は、弗化カルシウム設計よりも融解石英設計の方により効果がある。300 nm 以上の波長を使用するために波長範囲を狭めた場合、さらにいくつかのタイプのガラスが透過的になり、350 nm 以上の波長を使用するために波長範囲を狭めた場合には、多くの他のタイプのガラスが透過的になる。狭められた波長範囲に対して、高価でないガラスを使用することができ、おそらく異なる分散を持つ 2 枚のガラスの選択によって性能にわずかな改善がある。これらの UV 材料は、狭められた波長範囲にわたって

40

50

優れた結果を生み出す。

【 0 0 3 9 】

実際問題として、設計は、Z e m a x (アリゾナ州タクソンのフォーカス・ソフトウェア社から入手可能)のようなレイ・トレーシング・ソフトウェアを利用して所定の構成に対して最適化される。この設計を最適化するための変数と制約には多くの組合せがあり得る。1つの実験では、2つの共役距離と開口位置とサイズを固定した。2つのレンズ厚もまた固定し、中心が接触する実際に使用する薄さにした。すべての6つ曲率を変更可能とし、また、屈折レンズ・グループの位置も同様に変更可能にした。設計クライテリアによって、210～800ナノメートルの波長範囲にわたってRMS波面誤差が最少化された。この結果生じたピークから谷の波面誤差はすべての波長について0.15ウェーブ未満であ

10

【 0 0 4 0 】

この設計に関する残りの問題点として、2つの屈折レンズからの貢献が鏡からの貢献より少ないものの、光学表面に対する入射角に起因して偏光に対する影響を無視できないということがある。このような影響は計算可能であり、次いで、この影響を減じて少なくすることができる。

【 0 0 4 1 】

この設計のいくつかの可能な変更例が存在する。その主な変更例としては、設計を最適化して、ウェーハに対する広範囲の倍率と入射角に対応できる変更例がある。前述した種々の平らな光学素子は、その厚さが約20mm未満であれば、設計の開示されたバージョンの長い共役中に挿入することが可能である。補正のためにレンズを再設計する場合、平らな素子は以前より厚くなることさえあり得る。鏡の前または後のいずれかにほとんど任意の厚さを有する、レイ・ファン(ray fan)に対して垂直な表面を有する不遊素子を挿入することができる。残りの素子を再び最適化して低倍率のレンズを適合するようにする限り、光路のほとんどの位置にでも低倍率レンズを挿入することが可能である。既存のレンズの各々を2つまたはそれ以上のレンズに“分割”して、最適化により多くの自由度を与えることもできる。わずかな性能の改善のためにレンズ対を傾斜させる代わりに、2つの素子を互いに対して平行に移動してもよい。わずかな性能の改善のために球面鏡をマンジャン・ミラーにしてもよい。

20

30

【 0 0 4 2 】

2つの屈折素子22、24は、レンズの代わりに、プリズムまたは上述のような所要の機能を有する他の光学素子であってもよい。

【 0 0 4 3 】

図2は図1の楕円偏光計と構成が類似している楕円偏光計の概略図であるが、本発明の第2の実施例を例示するために、入力開口が楕円偏光計の光路の異なる位置に配置されている。図1のように光源12と偏光子18の間に開口14を配置する代わりに、図2に図示のように偏光子18とアポダイザ20との間に開口14を配置してもよい。コンピュータ46、46'は図を単純化するために図2では省かれている。

【 0 0 4 4 】

照明光学系中に鏡30とレンズ22、24を有する光学系を使用する代わりに、図3に示すように集束側にこのような光学系を用いることも可能である。図3は、本発明の第3の実施例を例示するために試料と相互作用した球面鏡とそれに関連する屈折素子が、放射集束用として使用される楕円偏光計100の概略図である。図3に示すように、光源12からの放射は偏光子18の中を通り、鏡40によって試料32上へ合焦される。試料の狭いスポット32aから反射された放射は、球面鏡30によって集束され、レンズ24、22及びアポダイザ20の中を通過して検光子42の中を通り開口14へ合焦され、次いで、分光計44まで達する。分光計の出力44はコンピュータ46へ出力され、試料とサンプリング・ビームの相互作用によって生じた偏光の振幅と位相の変化が測定される。したがって、物体はスポット32aであり、また、像は開口14において形成される。したがって

40

50

、これらをつなぐ点線 3 4 がシステム 1 0 0 の軸となる。スポット 3 2 a のサイズは開口 1 4 によって限定される。試料から反射された放射を検知する代わりに、図 3 の点線で示すように、偏光子 1 8 'の中を通り鏡 4 0 'によって合焦された後、光源 1 2 'が試料の中を通過して透過(あるいは試料によって修正)した放射を検知することもまた可能である。

【 0 0 4 5 】

本発明の異なる実施例では、図 1 と図 2 の鏡 3 0 に到達前のサンプリング・ビームの開口数と、鏡 3 0 による反射後の図 3 の修正ビームの開口数とはアポダイザ 4 2 によって好適に 0 . 4 3 以下に限定される。球面鏡 3 0 に対する、図 1 と図 2 のサンプリング・ビームの入射角と図 3 の修正ビームの入射角とは、好適には、鏡軸 3 0 a から 1° ~ 10° の範囲内にあることが望ましい。レンズ 2 2、2 4 のアップ数は好適には 2 % 以上異動しないことが望ましい。

10

【 0 0 4 6 】

軸外球面鏡 3 0 と素子 2 2、2 4 とを有する実質的に色収差のない光学系は、回折構造の線幅や他のパラメータを計測する散乱計測法(scatterometry)のような、楕円偏光法以外の分光計測用として利用することができる。そのような利用を行うとき、偏光子と検光子とを省くことにより図 1 ~ 3 に示すような構成を修正したり、同じ偏光状態で放射を通過させるように構成を配置することが可能である。したがって、本発明のさらに一般的な応用では、本発明のシステムは、試料との相互作用を行うための広帯域放射のサンプリング・ビームを提供するものとなる。このシステムの光学系は、試料上の狭いスポットにサンプリング・ビームの合焦を行うか、狭いスポットの試料からの、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射を修正ビームに変えて合焦を行うものである。この光学系には球面鏡と少なくとも 2 つのレンズとが含まれる。サンプリング・ビームまたは修正ビームは鏡軸から離れた方向から鏡に対して入射し、そこでレンズの中の少なくとも 1 つによって、鏡からの軸外反射によって生じた球面収差の補正が行われる。このシステムでは、試料と相互作用したサンプリング・ビームの放射の検知がさらに行われる。一実施例では、この光学系は可視波長と紫外線波長とにわたって実質的に色収差が生じない。別の実施例では、光学系のレンズの中の少なくとも 1 つは、球面鏡による軸外反射によって生じた球面収差を補正するメニスカス・レンズである。さらに別の実施例では、2 つのレンズが実質的に逆数の倍率を有するため光学系は広帯域の波長にわたって実質的に色収差が生じない。

20

30

【 0 0 4 7 】

様々な実施例を参照して本発明を上述したが、添付クレームとその均等物とによって画定される本発明の範囲から逸脱することなく、様々な変更と改変を行うことができることは理解できるであろう。

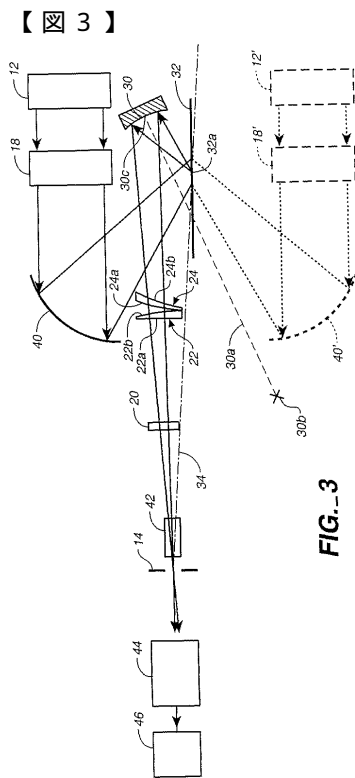
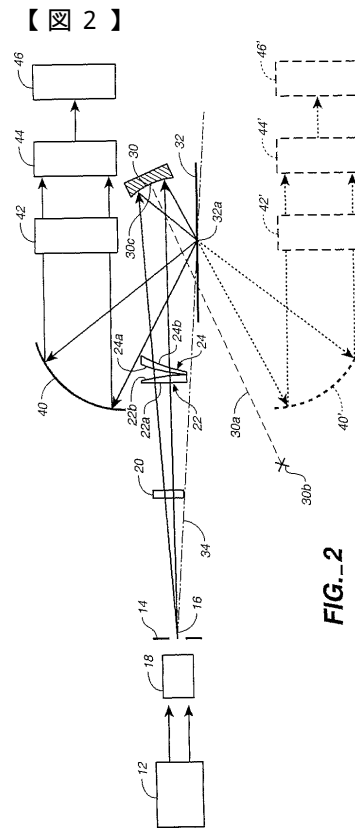
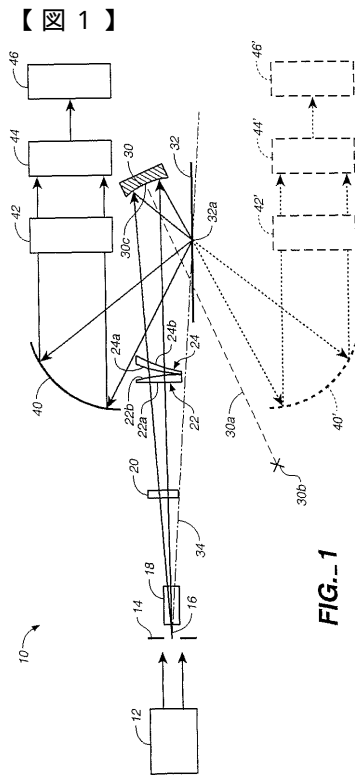
【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の第 1 の実施例を例示する、球面鏡と屈折系を用いる楕円偏光計の概略図である。

【図 2】 本発明の第 2 の実施例を例示する、図 1 の楕円偏光計と構成上類似する楕円偏光計の概略図であるが、この場合、入力開口が楕円偏光計の光路中の異なる位置に配置される。

40

【図 3】 本発明の第 3 の実施例を例示する、試料と相互作用した放射を集束するために、球面鏡とこれに関連する屈折素子とを用いる楕円偏光計の概略図である。説明を単純にするために、異なる図中の同一のいくつかの部分は同じ参照番号によって同一のものであることを示す。



フロントページの続き

(56)参考文献 特開昭 63 - 127133 (JP, A)

特開昭 63 - 108236 (JP, A)

特開昭 63 - 066424 (JP, A)

Chindaudom P, Vedam K, Determination of the optical function $n(\lambda)$ of vitreous silica
by spectroscopic ellipsometry with an achromatic compensator, Applied Optics, 199
3年11月 1日, Vol.32, No.31, p.6391-6398

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 21/00-21/61

G01N 21/84-21/958

G01J 4/00-4/04

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)