

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5035904号
(P5035904)

(45) 発行日 平成24年9月26日(2012.9.26)

(24) 登録日 平成24年7月13日(2012.7.13)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 B 11/06 (2006.01) G O 1 B 11/06 H

請求項の数 12 (全 15 頁)

| | | | |
|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| (21) 出願番号 | 特願2008-32333 (P2008-32333) | (73) 特許権者 | 504139662 |
| (22) 出願日 | 平成20年2月13日 (2008. 2. 13) | | 国立大学法人名古屋大学 |
| (65) 公開番号 | 特開2009-192331 (P2009-192331A) | | 愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 |
| (43) 公開日 | 平成21年8月27日 (2009. 8. 27) | (74) 代理人 | 100068755 |
| 審査請求日 | 平成23年2月10日 (2011. 2. 10) | | 弁理士 恩田 博宣 |
| | | (74) 代理人 | 100105957 |
| | | | 弁理士 恩田 誠 |
| | | (72) 発明者 | 福澤 健二 |
| | | | 愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 国立大 学法人名古屋大学 内 |
| | | (72) 発明者 | 吉田 智彦 |
| | | | 愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 国立大 学法人名古屋大学 内 |
| | | 審査官 | 有家 秀郎 |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 膜厚分布測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

被写体に対向した対物レンズと、当該被写体の像を結像する結像レンズとを有した結像系と、

当該結像系に設けられた検光子と、

同結像系により結像した像を検出面で検出する撮像装置と、

光源と、前記対物レンズの光軸とその光軸をずらし、その焦点面を前記対物レンズの後側焦点面と一致するように配置して、当該光源からの光を集光する集光レンズとを有し、前記対物レンズを介して前記被写体を p 偏光に対する反射率がおおむね最小となるような入射角で平行光を照明する斜め照明系と、

当該斜め照明系の光路に設けられた偏光子と、

同斜め照明系の前記偏光子と前記被写体の間に設けられた位相補償子とを備えた膜厚分布測定装置。

【請求項 2】

請求項 1 の膜厚分布測定装置であって、

前記結像レンズの前側焦点面を前記対物レンズの後側焦点面に一致させたことを特徴とする膜厚分布測定装置。

【請求項 3】

請求項 2 の膜厚分布測定装置であって、

前記結像レンズの後側焦点面を前記撮像装置の検出面に一致させたことを特徴とする膜厚

分布測定装置。

【請求項 4】

前記斜め照明系は、前記被写体全体を照明するとともに、その正反射光は前記撮像装置の検出面全面を平行光で均一に照射することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

【請求項 5】

前記結像系により前記撮像装置の検出面には、前記被写体の散乱光による像を結像させることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

【請求項 6】

前記斜め照明系に設けられ、当該斜め照明系の光路を屈曲させるビームスプリッタ若しくはハーフミラーを前記結像レンズと前記対物レンズの間に備えたことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 5 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

10

【請求項 7】

前記光源において、その可干渉距離が、装置を構成する光学素子間距離よりも小さいことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 6 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

【請求項 8】

前記光源がスーパー・ルミネッセント・ダイオードから構成されていることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

【請求項 9】

前記光源が白色光源から構成されていることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

20

【請求項 10】

前記対物レンズは、無限遠光学系であることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 9 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

【請求項 11】

前記位相補償子は、 $\lambda/4$ 板であることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 10 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

【請求項 12】

前記検出面は、マトリクス状に設けられた CCD から構成されることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 11 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、膜厚分布測定装置に関し、詳細には、極薄の膜厚をエリプソメトリー（偏光解析法）を用いた方法で測定する膜厚分布測定装置に関する。

【背景技術】

【0002】

次世代ハードディスク装置では、ヘッドがディスクと接触しながら走行する潤滑方式への移行が予想されており、この場合ディスクの表面に厚さ 1 nm 程度の均一な潤滑膜が塗布されることが要求される。また、ナノインプリントリソグラフィーでは、nm オーダーの液体薄膜を用いて微細パターンを転写するための均一な薄膜が必要となる。ポリマーエレクトロニクスでも、パターンニングして微細な素子を形成する均一な液体分子薄膜が必要となる。いずれの場合も、正確かつ効率的に、極薄の膜厚の分布が定量的に測定されなければならない。

40

【0003】

従来、液体あるいは固体薄膜の分布観測には、図 6 に示すような走査型エリプソメータが広く用いられてきた。このようなエリプソメータは、光源 102 から照射された光コリメーションレンズ 103 で平行光とされ、偏光子 104 で直線偏光とされ、 $\lambda/4$ 板 105 で円偏光又はだ円偏光に変換され、試料走査用ステージ 106 上に載置された試料である基板 107 上の潤滑膜 108 に照明光 109 を照射する。試料である潤滑膜 108 は、

50

試料走査用ステージ 106 により順次走査されていく。この照明光 109 は潤滑膜 108 で反射し、照明光 109 の入射角と等しい反射角で反射光 110 が反射する。その反射光 110 は、対物レンズ 111 を通過して検光子 112 を通って結像レンズ 113 により光検出装置 114 に入射して測定される。

【0004】

また、走査型エリプソメータ 101 の試料走査用ステージを廃し、光検出装置 114 を高感度 CCD カメラなどのアレイ状の撮像素子に代えたエリプソメトリー顕微鏡では、一挙に広範囲の観測ができるようになり、効率的な薄膜厚の分布観測ができるようになった。

【0005】

ここで、本発明の原理である消光型エリプソメトリーについて説明する。

試料と空気などの媒質界面で、光がある入射角を持って反射したときに、入射平面内にある偏光成分 (p 偏光)、垂直な偏光成分 (s 偏光) について、複素振幅反射率 ($r_{\text{exp}(i)}$) が異なり、この違いは試料表面の屈折率に依存する。試料表面の屈折率は、基板上の薄膜の膜厚に依存するので、エリプソメトリー顕微鏡では、p 偏光と s 偏光の複素振幅反射率の振幅比 ($= r_p / r_s$) と位相差 ($= \phi_p - \phi_s$) の試料各点における分布を測定することにより、膜厚分布を求める。ここで、 r および ϕ の添え字 p、s は、それぞれ、p 偏光、s 偏光に対するものであることを示す。エリプソメトリー顕微鏡で検出される試料のある点 (x, y) から得られる光強度 $I(x, y, \theta)$ は、以下で与えられる。

【0006】

【数 1】

$$I(x, y, \theta) = \frac{r_s^2 I_0}{2} \left\{ \Psi(x, y, \theta)^2 \cos^2 A + 2\Psi(x, y, \theta) \sin A \cos A \sin(2P + \Delta(x, y, \theta)) + \sin^2 A \right\}$$

…(1)

【0007】

ここで、 r_s は s 偏光に対する振幅反射率、 I_0 は入射光強度、 θ は照明光の入射角、P、A はそれぞれ偏光子、検光子の回転角の設定値である。

消光型エリプソメトリーの手法を用いて膜分布を測定する場合、まず、試料薄膜を形成していない基板面からの反射光強度を 0 になるように調整する。すなわち、入射光を偏光子で直線偏光とし、基板面における反射で楕円偏光に変化するのを、再度、1/4 波長板と検光子偏光板で完全に消光するように調整する。式 (1) を用いて説明すると、 $2P + \Delta = \pi/2$ 、 $\cos A + \sin A = 0$ 、となるように、偏光子角 P および検光子角 A を調整し、基板から反射光 I を 0 に近づける。基板面はおおむね均一な反射率分布を有するので、この工程は、基板面での正反射 (入射角 = 反射光となる反射角) した光を消光する工程となる。つぎに、上で調整した P、A を用いて、試料薄膜を形成した基板を観測する。反射率が基板のみの場合とは異なるので、すなわち、振幅比 と位相差 は基板のみの場合と異なる値を取り、上で調整した P、A に対する消光条件を満たさず、反射光 I が 0 とならない。そして、振幅比 と位相差 は、薄膜の屈折率すなわち膜厚に依存するので、この反射光の強度は膜厚に依存する。こうして、試料薄膜の膜厚分布に対応した光強度像が得られる。

【0008】

ところで、消光型エリプソメトリーにおいては、最適な入射角の存在、斜め照明系の必要性がある。p 偏光と s 偏光の複素振幅反射率は入射角に依存する。試料が誘電体など光を吸収しない物質で構成されており、試料 (屈折率 n_s) と空気 (屈折率 n_0) の界面で光が反射した場合、 $\theta_B = \tan^{-1}(n_s / n_0)$ で求められるブリュースター角 θ_B において、p 偏光に対する反射率は 0 となるが、s 偏光の反射率の入射角依存性は、p 偏光のそれに比べ小さいので、p 偏光と s 偏光の反射率の差が最も大きくなる。このため、エリプソメトリー顕微鏡では、入射角をブリュースター角 θ_B 付近に設定すると最も良好な

10

20

30

40

50

コントラストを有する膜分布像が得られる。例えば、試料をシリコン基板とした場合、ブリュースター角 θ_B は約 74 度である。また、試料に金属などの光吸収する材質を含む場合、p 偏光に対する反射率が完全に 0 とはならないが、一般に入射角 60 から 70 度付近で、p 偏光に対する反射率は最小値を取るため、p 偏光と s 偏光の複素振幅反射率の差が最も大きくなり、最も良好なコントラストを有する膜分布像が得られる。すなわち、一般的にエリプソメトリー顕微鏡では、p 偏光に対する反射率を最小とする入射角付近が最も良好な像コントラストを実現する入射角となる。

【0009】

このように、エリプソメトリーを用いる方法では、試料の p 偏光に対する反射率が最小となるように法線から 60 ~ 70 度程度の大きな傾きの入射角で試料に照明光を照射し、その反射光を入射角と同様の反射角付近の斜め方向から観測していた。

10

【0010】

そして、試料を斜めから観測するため、焦点深度の問題から狭い視野しか得られないという問題があった。図 4 に示すように、所定の p 偏光に対する反射率が最小となるような入射角 θ に対物レンズを傾けて観察した場合、対物レンズの焦点深度が $\pm z$ であるとき、試料上では $\pm x$ の範囲しか焦点が合わず、たとえレンズの視野や撮像素子が広い範囲の観察が可能であっても、焦点深度の制限から細い帯状の試料しか観察できなかった。視野 x は、光の波長 λ を、対物レンズの開口数を NA とすると、おおむね $\lambda / (2 NA^2 \sin \theta)$ となる。高倍率の対物レンズほど、開口数 NA は大きくなるため、視野が小さくなる。例えば、100 倍の対物レンズの NA は 0.9 程度であり、この対物レンズと波長 $\lambda = 546 \text{ nm}$ の光源を用い、入射角 θ を 70 度に設定したときの視野 x は $0.4 \mu\text{m}$ となる。一方、通常の光学顕微鏡において、対物レンズの光軸は試料面に垂直に配置されるので視野の狭小化の問題は発生せず、100 倍の対物レンズを用いた場合、視野として数十 μm 程度が可能であった。このように、対物レンズの光軸を試料面に対して斜めに配置する観測系では、実用的に有用な視野が確保できず、高倍率観測が困難であった。

20

【0011】

加えて、一般に高倍率の対物レンズは作動距離が小さく、対物レンズの光軸を試料面に対して斜めに配置する観測系では、対物レンズと試料基板の接触を避けるためには、試料をレンズから遠ざけて、つまり低倍率で観察するか、照射角を小さくして p 偏光に対する反射率が最小となるような入射角から外れる角度で、つまり低コントラストで観察するかしなければならなかった。

30

【0012】

一方、特許文献 1 に記載されたような試料平面上の被検物体に対して垂直な光軸を有する対物レンズを備えた物体の光学的検査のための装置等が提案されている。この発明においては、照明装置内の偏光子、撮像装置内の検光子、及び該装置のいずれかにある位相補償子を含む偏光デバイスを備えている。そして、照明装置には対物レンズの軸と平行であるが対物レンズの軸に関してある程度傾けられている円錐体状の光で、被検物体を照らすように対物レンズの軸から側方に変位されている軸に沿って、光源からの光を対物レンズの軸方向へ方向付ける。こうして消光型エリプソメトリーの手法により照らされた被検物体の試料からの散乱光を強調して、試料平面内の欠陥などを光学的検出するものであった。図 5 に示すように、試料の全面が焦点深度 $\pm z$ 内に入り、レンズの視野や撮像素子が許す限り広範囲な観察ができた。

40

【特許文献 1】特開平 6 - 250092 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

しかしながら、特許文献 1 に記載されている例は、そもそも本発明の前提である、微小な膜厚差を有する膜分布を高感度かつ定量的に測定しようとする目的のものではない。すなわち、暗視野顕微鏡の発展として、基板からの背景正反射光（入射角 = 反射角の光）を消光型エリプソメトリーの方法で除去し、試料面上の欠陥などの微小構造の有無のみを検

50

出しようとしたものである。以下に本発明との差異を説明する。

【0014】

p偏光とs偏光の複素振幅反射率は入射角に依存し、振幅比と位相差は入射角に依存するため、式(1)で示したように、エリプソメトリー顕微鏡で得られる像の光強度も入射角に依存する。そのため、エリプソメトリー顕微鏡像では、p偏光に対する反射率を最小とする入射角付近の入射角 $\theta = \theta_B$ を設定し、その後、最適なコントラストに得るように偏光子角Pおよび検光子角Aを調整する必要がある。ここで、振幅比と位相差は入射角に依存するため、設定した偏光子角Pおよび検光子角Aは、 θ_B 以外の入射角に対しては、必ずしも最適なコントラストを与えない。そして、照明光が複数の入射角を持つ光から構成される場合、最適なコントラストの達成が困難となる。このように、最適なコントラストを得るためには、照明光として、入射角の分布のない光、すなわち、平行光とするのが必須である。

10

【0015】

加えて、平行光を照明として用いたエリプソメトリー顕微鏡においては、試料の点(x, y)について、光強度から振幅比と位相差を求め、さらに、 θ_B と試料薄膜の膜厚の関係を求めることにより、像の光強度を膜厚に換算できる。例えば、二つの偏光子角 $P = P_1$ と $P = P_2$ に対する光強度 I_1 と I_2 を測定して式(1)に代入し、連立2元方程式を解くことにより、試料各点における (x, y, θ) を得ることができる。 θ_B と試料薄膜の膜厚の関係は、通常のエリプソメータなど一般的な方法で求めることができる。 θ_B と試料薄膜の膜厚の関係から、光強度分布 $I(x, y, \theta)$ を膜厚分布に換算することができる。

20

【0016】

ただし、 θ_B は入射角に依存するので、照明光が複数の入射角を持つ光から成る場合、式(1)から、各入射角に対する光強度信号が重畳され、像の光強度から膜厚分布への換算は、上に述べた簡単な工程では行えず実現困難となる。

【0017】

このように、エリプソメトリー顕微鏡において、試料の視野域を照射する光は、入射角の分布を持たない光であることが必須である。すなわち、視野域を平行光で照明することが必須である。

【0018】

以上のように、特許文献1に記載されている例は、微小構造からの散乱光と正反射光との弁別のみをねらいとしており、そのため、照明光の角度分布に関しては特定の条件を求めている。すなわち、膜厚分布の高コントラスト観測および定量観測に必要な、平行な照明光をその発明の要件としていない。このように、特許文献1に記載されている例では、膜厚に対応した像コントラストを最適化するのが困難で、さらに散乱光の振幅比と位相差は定量的に求めることは困難であるため、像の光強度から膜厚分布を求めることが困難である。従って、特許文献1に記載されている例では、微小な膜厚分布から成る微小構造について、その有無のみを低いコントラストで見ることしかできない。

30

【0019】

本発明は、このような従来技術に存在する問題点に着目してなされたものであり、その目的としては、薄膜の微小構造を高いコントラストで観測でき、かつ膜厚を定量的に測定することができる膜厚分布測定装置を提供することにある。

40

【課題を解決するための手段】

【0020】

上記課題を解決するため、請求項1に記載の膜厚分布測定装置では、被写体に対向した対物レンズと、当該被写体の像を結像する結像レンズとを有した結像系と、当該結像系に設けられた検光子と、同結像系により結像した像を検出面で検出する撮像装置と、光源と、前記対物レンズの光軸とその光軸をずらし、その焦点面を前記対物レンズの後側焦点面と一致するように配置して、当該光源からの光を集光する集光レンズとを有し、前記対物レンズを介して前記被写体をp偏光に対する反射率が最小となるような入射角で平行光を

50

照明する斜め照明系と、当該斜め照明系の光路に設けられた偏光子と、同斜め照明系の前記偏光子と前記被写体の間に設けられた位相補償子とを備えたことを要旨とする。

【 0 0 2 1 】

請求項 2 に記載の発明では、請求項 1 の膜厚分布測定装置であって、前記結像レンズの前側焦点面を前記対物レンズの後側焦点面に一致させたことを要旨とする。

請求項 3 に記載の発明では、請求項 2 の膜厚分布測定装置であって、前記結像レンズの後側焦点面を前記撮像装置の検出面に一致させたことを要旨とする。

【 0 0 2 2 】

請求項 4 に記載の発明では、請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記斜め照明系は、前記被写体全体を照明するとともに、その正反射光は前記撮像装置の検出面全面を均一に照射することを要旨とする。

10

【 0 0 2 3 】

請求項 5 に記載の発明では、請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記結像系により前記撮像装置の検出面には、前記被写体の散乱光による像を結像させることを要旨とする。

【 0 0 2 4 】

請求項 6 に記載の発明では、請求項 1 乃至請求項 5 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記斜め照明系に設けられ、当該斜め照明系の光路を屈曲させるビームスプリッタ若しくはハーフミラーを前記結像レンズと前記対物レンズの間に備えたことを要旨とする。

20

【 0 0 2 5 】

請求項 7 に記載された発明では、請求項 1 乃至請求項 6 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記光源において、その可干渉距離が、装置を構成する光学素子間距離よりも小さいことを要旨とする。

【 0 0 2 6 】

請求項 8 に記載された発明では、請求項 1 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記光源がスーパー・ルミネッセント・ダイオードから構成されていることを要旨とする。

【 0 0 2 7 】

請求項 9 に記載の発明では、請求項 1 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記光源が白色光源から構成されていることを要旨とする。

30

請求項 10 に記載の発明では、請求項 1 乃至請求項 9 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記対物レンズは、無限遠光学系であることを要旨とする。

【 0 0 2 8 】

請求項 11 に記載の発明では、請求項 1 乃至請求項 10 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記位相補償子は、 $\lambda/4$ 板であることを要旨とする。

請求項 12 に記載の発明では、請求項 1 乃至請求項 11 のいずれか 1 項に記載の膜厚分布測定装置において、前記検出面は、マトリクス状に設けられた CCD から構成されることを要旨とする。

40

【発明の効果】

本発明によれば、薄膜の微小構造を高いコントラストで観測でき、かつ膜厚を定量的に測定することができるという効果がある。

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 3 0 】

以下、本発明の膜厚分布測定装置をエリプソメトリー顕微鏡 1 に具体化した実施形態について図 1 ~ 図 3 を参照して説明する。

図 1 は、エリプソメトリー顕微鏡 1 (以下適宜「本顕微鏡 1」という。)全体の構成を示す。

【 0 0 3 1 】

50

図1に示すように、光源2で発生させた照明光は、光ファイバ3により導かれて所定位置で略点光源として拡散光である照明光L1として発光し、コリメートレンズ4により光軸AX1を中心とする平行光である照明光L2とされる。この照明光L2は、偏光子5により、直線偏光とされた照明光L3となる。そして、λ/4板からなる位相補償子6により、だ円偏光(円偏光を含む)である照明光L4とされる。

【0032】

図2に示すように、この平行光な、だ円偏光である照明光L4は、集光レンズ7により収束光のだ円偏光の照明光L5として集光される。この対物レンズ8の光軸AX2と直交した光軸AX1を持つ照明光L5は、ビームスプリッタ9により対物レンズ8の光軸AX2と平行で、かつ光軸AX2からシフトされた光軸AX3となるように90度屈曲され、照明光L6となる。照明光L6は、集光レンズ7の前側焦点面10であり、かつ対物レンズ8の後側焦点面11である位置で一旦集光され、再び拡散する照明光L7となる。この照明光L7は、対物レンズ8の光軸AX2からシフトした光軸AX3から入射し、対物レンズ8の前側焦点面12である試料面13で平行な照明光L8として試料Sを照射する。

【0033】

これら、光源2、光ファイバ3、コリメートレンズ4、偏光子5、位相補償子6、集光レンズ7から斜め照明系が構成されている。

試料Sを照射した照明光L8は、試料Sで正反射して正反射光(入射角=反射光の関係を満たす光)である反射光R1となり、対物レンズ8に再び入射する。そして、この平行な反射光R1は、対物レンズ8により一旦集光され反射光R2となり、後側焦点面11から再び拡散する反射光R3となる。この対物レンズ8を保持する鏡筒14は、斜め照明系及び結像系の絞りとしての機能も有している。この拡散する反射光R3はビームスプリッタ9を透過し、結像レンズ15で平行な反射光R4とされ、検光子16を通過した後、平行な反射光R4は撮像装置17(図1参照)の検出面18全体を均一に照射する。

【0034】

これら、対物レンズ8、結像レンズ15、検光子16、撮像装置17の検出面18で、結像系が構成されている。

検出面18に照射された反射光R4は、CCD素子により電気信号に変換され、液晶ディスプレイからなるモニタ19に映し出される。このとき、反射光R4は、検出面18全体を覆う平行光となっているため、各CCD素子には、この正反射光に起因するコントラストの偏りは与えない。

【0035】

次に、本顕微鏡の機能について詳細に説明する。本顕微鏡1においては、対物レンズ8に斜め照明系および結像系の両方を構成する光学素子の機能を持たせることとした。そのため、斜め照明系・結像系の二つの観点から光学設計を行う必要がある。以下、図2、3を参照して説明する。

【0036】

(光源)

光源2は、SLD(Super Luminescent Diode)により構成されている。仮に光源に、He-NeレーザーあるいはLD(Laser Diode)のように可干渉距離(コヒーレンス長)の長いレーザーなどを光源に用いた場合、装置光学系を構成する光学素子で光の一部が反射することにより、光干渉が発生し、干渉縞像が現れてしまう。例えば、λ/4板からなる位相補償子6で反射され後方に進んだ光が、さらに偏光子5により反射され再度前方に進んで検出面に到達したとする。このとき、これらの反射を経ず直進した光で検出面に同時に達する光も存在する。これらの反射を経た光と反射を経ず直進した光とは異なった光路長を進んで来るので、位相が異なり検出面で干渉を生ずる。すなわち、このとき検出面には干渉縞像が生じ、薄膜像に重畳して雑音像が生ずることになる。ここで、一般に、その可干渉距離よりも大きな光路差を有する光同士は干渉しない。そこで、その可干渉距離が、装置を構成する光学素子間距離よりも十分小さい光源を用いると、干渉縞像の発生を抑えることができる。この光源2では、可干渉距離の短いレーザーSLDにより

10

20

30

40

50

構成されている。装置光学系を構成する光学素子間距離は、1 mmから10 cmのオーダーであるのに対して、SLDの可干渉距離は、10 μ mのオーダーであり十分小さい。SLDに代えて、ファイバレーザーやハロゲンランプを用いた白色光源や、ASE (Amplified Spontaneous Emission)、LED (Light Emitting Diode 発光ダイオード) 等により光源2を構成してもよい。

【0037】

また、図では模式的に単一のコリメートレンズを描いたが、正確な平行光を生成する各種光学素子や光学器具等が用いられる。

(斜め照明系)

対物レンズ8の光軸AX2と直交する光軸AX1を持つ集光レンズ7を配置し、ビームスプリッタ9により照明光L5の光軸AX1を光軸AX2と平行になるように直角に屈曲させて、照明光L6の光軸AX3は光軸AX2と平行かつ、光軸AX2とは一定距離シフトした位置となる。

【0038】

集光レンズ7の前側焦点面10は、対物レンズ8の後側焦点面11と一致するように配置される。

すなわち、集光レンズ7の焦点距離を f_1 とすると、集光レンズ7と、対物レンズ8の後側焦点面11までとの距離は、 f_1 に設定してある。対物レンズ8の作用により、その後側焦点面11に一点に集光された光は、対物レンズ8の中心からシフトした位置に入射されると、対物レンズ8の通過後、対物レンズ8の光軸である光軸AX3に対して近接する方向に傾いた照明光L8となる。したがって、鏡筒14及び対物レンズ8の光軸AX2を試料面13に対して垂直にしなくても、試料Sに対してp偏光に対する反射率が最小となるような入射角を達成する斜め照明を実現できる。

【0039】

ここで、本顕微鏡1の対物レンズ8として現在広く用いられている無限補正光学系用のレンズを用いた場合は、図2のように試料面13を対物レンズ8の前側焦点面12に配置する。また、本顕微鏡1の対物レンズ8は、球面収差とコマ収差を補正する正弦条件を満たすように設計されているので、照明光の入射角と対物レンズ8の光軸AX3からのずれ量 y_1 の間には、対物レンズ8の焦点距離を f_0 として、以下の式(2)の関係が成立する。

【0040】

【数2】

$$y_1 = f_0 \sin \theta \cdots (2)$$

【0041】

すなわち、入射角 θ は、対物レンズ8の焦点距離 f_0 と入射光の対物レンズ8の光軸AX3からのずれ量 y_1 で調整することができる。照明光L6、L7の光軸AX3と対物レンズ8の中心(光軸AX3)とのずれ量 y_1 については、対物レンズ8の瞳径 y_A および試料面上での視野の大きさを y_s とすると、図2から以下の式(3)の制限がある。

【0042】

【数3】

$$y_1 + \Delta y_s \leq y_A \cdots (3)$$

【0043】

ここで、対物レンズ8を通過した照明光L8は平行光となっているので、対物レンズ面における光束半径と試料面13の視野範囲はともに y_s となる。式(2)と同様に、正弦条件を満たす対物レンズの瞳径 y_A と開口数NAの間には以下の式(4)が成立する。

【0044】

10

20

30

40

50

【数4】

$$y_A = f_0 NA \cdots (4)$$

【0045】

式(2)、(4)を式(3)に代入すると、 θ について以下の条件を得る。

【0046】

【数5】

$$\theta \leq \sin^{-1} \left(NA - \frac{\Delta y_s}{f_0} \right) \cdots (5)$$

10

【0047】

また、 y_s と照明光の光束半径 y_1 の関係は、集光レンズ7と対物レンズ8の焦点距離の比 f_1 / f_0 を M_1 として、以下の式(6)の関係になる。

【0048】

【数6】

$$\Delta y_1 = M_1 \Delta y_s \cdots (6)$$

20

【0049】

アレイ状のCCD素子をもった撮像装置17の検出面18の入射面内方向の長さを y_c とする。試料面13上の視野を拡大し、CCDカメラの検出面の大きさ程度になるように設定したとき、 y_c と y_s の関係は、集光レンズ7と対物レンズ8の焦点距離の比 f_2 / f_0 を M_2 として、以下の式(7)の関係になる。

【0050】

【数7】

$$\Delta y_c = M_2 \Delta y_s \cdots (7)$$

30

【0051】

このとき式(5)は、

【0052】

【数8】

$$\theta \leq \sin^{-1} \left(NA - \frac{\Delta y_c}{M_2 f_0} \right) \cdots (8)$$

【0053】

例として、撮像素子として検出面18の対角サイズが約13mm(0.5インチ)のCCDカメラを用い、対物レンズ8として $NA = 0.95$ 、倍率 $M_2 = 100$ 、 $f_0 = 2$ mmのものをを用いた場合、式(7)から θ の最大値は約65度となり、エリプソメトリ顕微鏡に要請される入射角を実現できる。

40

【0054】

このとき、対物レンズ8の瞳径 y_A は1.9mm、この際の照明光の光軸AX3と対物レンズ8の光軸AX2とのずれ量 y_1 は約1.81mmである。そして、この例では、試料面上の視野の大きさ y_s として約90 μ mが確保できる。上に例示した仕様の対物レンズ8の例としては、株式会社ニコン社のCFI LU Plan Apo EPI 100Xがある。また、集光レンズ7として、 $f_1 = 200$ mmのものをを用いれば、入射光束の半径 y_1 は約9mmとなる。

50

【 0 0 5 5 】

(結 像 系)

次に結像系について検討する。エリプソメトリー顕微鏡 1 では、膜厚分布を反映した位相の差により反射率の異なる微小構造として検出される。図 2 に示したように、照明光 L 8 は、試料面 1 3 上の試料 S 全体を照射し、試料 S において反射する。この照明光 L 8 と反射光 R 1 は入射角 = 反射角の関係を満たす光である。また、試料 S の表面は平滑な面として形成されている。このため、反射光 R 1 のうち、正反射光は、試料面の微小膜厚構造に関する情報を含んでおらず、膜厚判定のノイズとなる。

【 0 0 5 6 】

しかしながら、対物レンズ 8 を斜め照明系と結像系で兼用し、その光路も近いとため、反射光 R 1 は、この対象とする微小構造の像と正反射光のなす像が重畳された像が撮像装置 1 7 の検出面 1 8 で検出される。特に、正反射光の光線が検出面において不均一に照射されれば、不要な光強度分布を生じ、正しい膜厚の判断ができない。そこで、この正反射光の影響をなくす必要がある。

【 0 0 5 7 】

図 3 に示すように、試料 S に照射された光線の一部は微小構造により種々の反射角を持つ光となって散乱される。試料 S を試料面 1 3 (対物レンズ 8 の前側焦点面 1 2) に配置しているので、試料 S 各点からの散乱光 O 1 は、対物レンズ 8 を通過後、試料面 1 3 上の位置により光軸 A X 2 と、平行及び平行ではない角度をなす平行な散乱光 O 2 となる。平行な散乱光 O 2 となっているので、図 3 に示すように、結像レンズ 1 5 の後側焦点面 2 1 に撮像装置 1 7 の検出面 1 8 を配置することで、試料 S の各点からの散乱光 O 3 により結像させる。試料面 1 3 上の微小構造の大きさを h_s とすると検出面 1 8 上のその像の大きさ h_d は、結像レンズ 1 5 の焦点距離を f_2 とし、対物レンズ 8 と結像レンズ 1 5 と焦点距離の比 f_2 / f_0 を M_2 とし以下式 (9) で与えられる。

【 0 0 5 8 】

【 数 9 】

$$h_d = M_2 h_s = \frac{f_2}{f_0} h_s \cdots (9)$$

【 0 0 5 9 】

これは一般に、無限補正光学系の光学顕微鏡における結像倍率の設定と同様のものである。また、一般に、 M_2 は、対物レンズ 8 の設計倍率と同程度に設定される。

本実施形態では、図 2 に示すように、正反射光を含む反射光 R 1 は対物レンズ 8 の後側焦点面 1 1 で集光させる。そして、結像レンズ 1 5 の前側焦点面 2 0 を対物レンズ 8 の後側焦点面 1 1 に一致させることで、反射光 R 1 は結像レンズ 1 5 を通過した後に反射光 R 4 を平行光とする。これにより、検出面 1 8 における光強度分布をできるだけ一様にすることができる。正反射光を含む反射光 R 4 が撮像装置 1 7 の検出面 1 8 上で結像する強度分布は、結像レンズ 1 5 の後側焦点面 2 1 の集光スポット像に対応した分布像であるため、上の配置は、不要な集光スポット像を無限遠に結ばせるようにしたことに等しい。以上のように、結像系を対物レンズ 8 と結像レンズ 1 5 のみで構成する場合、結像レンズ 1 5 の前側焦点面 2 0 と対物レンズ 8 の後側焦点面 1 1 を一致させ、さらに、撮像装置 1 7 の検出面 1 8 を結像レンズ 1 5 の後側焦点面 2 1 に一致させることが望ましい。通常の無限補正光学系の顕微鏡において、撮像装置 1 7 の検出面 1 8 を結像レンズ 1 5 の後側焦点面 2 1 に一致させることは必要であるが、結像レンズ 1 5 の前側焦点面 2 0 と対物レンズ 8 の後側焦点面 1 1 を一致させることは、必ずしも必要でない。

【 0 0 6 0 】

また、上で挙げた例では、結像レンズ 1 5 として、焦点距離 $f_2 = 200 \text{ mm}$ のものを用いれば、像倍率 $M_2 = 100$ 倍となる。

(偏 光 子)

偏光子 5 は、周知の偏光板を用い照明光 L 1 を直線偏光にすることができ、照明光 L 1

10

20

30

40

50

の光軸 A X 1 に対して回転可能に設けられ、直線偏光の方向を 90 度の範囲で変更できる。

【 0 0 6 1 】

(位相補償子)

位相補償子 (コンペンセーター) 6 は、直線偏光を円偏光に変換する。本実施形態の位相補償子 6 は、 $\lambda/4$ 板 ($1/4$ 波長板) からなる。光源によるが、本実施形態では、広域のスペクトルを有する S L D 光源を用いているため、無着色のアクロマティックリターダを用いる。

【 0 0 6 2 】

なお、理想的な位相補償子は、リターデーションが正確に 90 度 (又は $1/4$ 波長) である光学的な位相遅延器であるが、正確なリターデーションが光軸や波長によってかわってしまうために用いることが難しい。そのため、本実施形態では、回転する偏光子と回転する位相補償子の組合せとなっており、偏光していない光をどのような楕円偏光にも変換できる。

【 0 0 6 3 】

(撮像装置)

撮像装置 1 7 の検出面 1 8 を構成する撮像素子は、電荷結合素子 (CCD: Charge Coupled Device) をマトリクス状に整列させたアレイ状の素子である。

【 0 0 6 4 】

なお、撮像素子は、C C D に限定されるものではなく、C M O S (相補性金属酸化膜半導体) イメージセンサ (シーモスイメージセンサ) を用いた構成としてもよいが、感度・ノイズの点で C C D が好ましい。さらに冷却 C C D カメラも熱ノイズが少なく好ましい。

【 0 0 6 5 】

(測定手順)

次に、このように構成されたエリプソメトリー顕微鏡 1 における測定手順を説明する。

まず、試料 S をセットして、光源 2、モニタ 1 9 の電源を投入する。

【 0 0 6 6 】

続いて、偏光子 5、位相補償子 6、検光子 1 6 を初期位置にセットする。

そして、偏光子 5、位相補償子 6 を相互に回転しながら、モニタ 1 9 でコントラストを確認し、所定の部分が消失したら、記録を取る。

【 0 0 6 7 】

或いは一連の操作を自動で行い、最もコントラストの良好な画像により所定の手順で膜厚を算出する。

次に、光強度の膜厚分布への換算について説明する。試料の各点について像の光強度を以下のような方法で膜厚分布に換算することができる。少なくとも二つの偏光子の設定角 $P = P_1$ と $P = P_2$ とに対する、光強度 I_1 と I_2 とを測定し、式 (1) に代入し連立 2 元方程式を解くことにより、振幅比 と位相差 を得る。振幅比 と位相差 と試料薄膜の膜厚の関係は、通常のエリプソメータなど一般的な方法で求める。これらから、光強度 $I (x , y)$ と膜厚の関係が得られ、像の光強度分布を定量的な膜厚分布に換算する。もちろん、これは一例であり、試料各点の振幅比 と位相差 を求める工程、振幅比 と位相差 と試料薄膜の膜厚の関係を求める工程を含む種々の工程により実現できる。

【 0 0 6 8 】

本実施形態では、以下のような効果を得ることができる。

(1) 本実施形態のエリプソメトリー顕微鏡 1 では、斜め照明系と結像系とを、同じ対物レンズ 8 を共用して構成し、平行光による斜め照明と対物レンズ 8 の光軸 A X 2 を被写体である試料 S に対して垂直に配置することの両立を可能としたため、対物レンズ 8 と試料 S とを極めて接近させることができ、試料 S の微小な膜厚分布を高いコントラスト、定量観測、広い視野、および高い倍率の全てを同時に実現できる。

【 0 0 6 9 】

(2) また、結像レンズ 1 5 の前側焦点面 2 0 を対物レンズ 8 の後側焦点面 1 1 に一致

10

20

30

40

50

させるとともに、結像レンズ15の後側焦点面21を撮像装置17の検出面18に一致させた。このため、試料面13の試料Sの散乱光による実像を検出面18に結像することができるとともに、照明光L8の直接の正反射光の反射光R4は平行光とされ、検出面18での不要な光の強度分布を生じさせないという効果がある。

【0070】

(3)とくに、斜め照明系は、被写体である試料Sを照明するとともに、その正反射光は撮像装置17の検出面18全面を平行光で照明するため入射角分布を持った照明光を用いた場合に比べ、上の式(1)で示したように、より効果的に低減させることできる。さらに、正反射光は撮像装置17の検出面18の全面を均一に照射するため、照明光が試料Sの実像の検出を妨げることがない。

10

【0071】

(4)そして、結像系により撮像装置17の検出面18には、試料Sの散乱光による実像が結像されるため、コントラストの高い像から膜厚を測定できる。

(5)斜め照明系に設けられ、斜め照明系の光路を屈曲させるビームスプリッタ9を備えるため、全体の構成をコンパクトにすることができる。なお、ビームスプリッタに替えてハーフミラーを用いてもよい。

【0072】

(6)光源2がSLDから構成されているため、白色で非コヒーレントな光で、明るく光線の干渉が少ない像で観測ができる。

(7)また、光源は、白色光源でも同様に非コヒーレントな光を得ることができる。

20

【0073】

(8)前記対物レンズは、無限遠光学系であるので、設計の自由度が高く、対物レンズを共有しても好ましい光学構成とすることができる。

(9)位相補償子6は、 $\lambda/4$ 板から構成され、容易に高いコントラストの観測ができる。特に、回転させることで、偏光子5により直線偏光とされた照明光L3を希望の円偏光若しくは円偏光に変換できる。

【0074】

(10)検出面18は、マトリクス状に設けられたCCDから構成されるため、高感度で低ノイズの画像を得ることができ、迅速な観測が可能となる。

なお、上記実施形態は以下のように変更してもよい。

30

【0075】

本実施例では、集光レンズ7により、対物レンズ8の後側焦点面の一点に集光される例を述べたが、同心円状に集光する照明法、いわゆる輪帯照明によっても、試料面に対して斜めに傾いた平行光で試料を照明することができる。あるいは、試料面に対して斜めに傾いた平行光で試料を照明する、その他の照明法によって置き換えられて実施可能なことはいうまでもない。

【0076】

集光レンズ7若しくはその近傍に絞りを設け、照明光L8の光束を絞るようにしてもよい。対象により光束の径を絞ることでコントラストの改善を図ることができる。

位相補償子6は、 $\lambda/4$ 板に替えて、石英製の光弾性変調器としてもよい。位相変調型として高速に位相補償子の変調を行うことができる。CCDカメラとの組合せで高速に処理することができる。

40

【0077】

なお、斜め光学系、結像系ともに模式的な図で説明しているものであり、これと等価の光学系とすることができることは言うまでもない。又、当業者によりその構成は付加され、省略され、置き換えられて実施されうることはもちろんである。

【図面の簡単な説明】

【0078】

【図1】本実施形態のエリプソメトリ顕微鏡全体の模式図である。

【図2】本実施形態の斜め照明系を示す断面図である。

50

【図3】本実施形態の結像系を示す断面図である。

【図4】本実施形態のエリプソメトリー顕微鏡の焦点深度を示す図である。

【図5】従来の走査型のエリプソメータの焦点深度を示す図である。

【図6】従来の走査型のエリプソメータを示す図である。

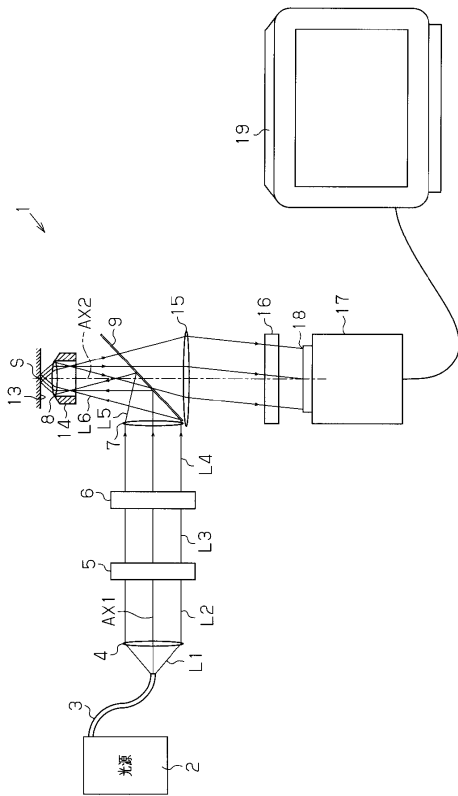
【符号の説明】

【0079】

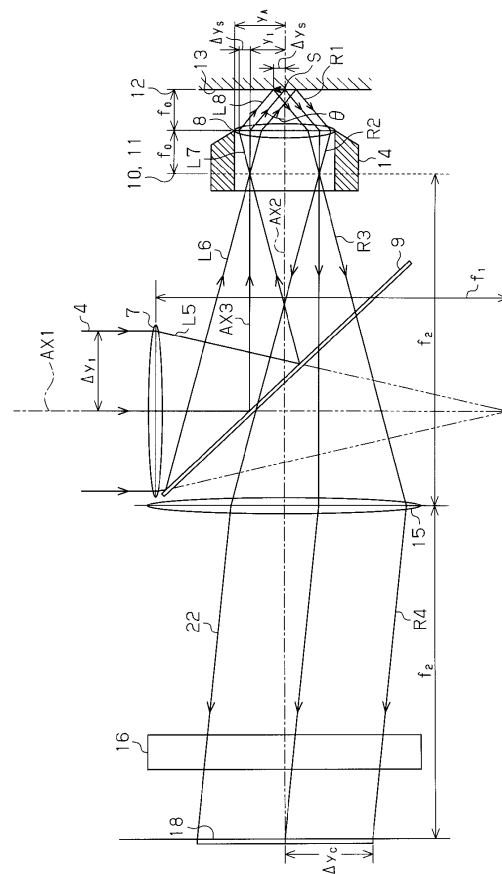
1...エリプソメトリー顕微鏡、2...光源、3...光ファイバ、4...コリメートレンズ、5...偏光子、6...位相補償子(/ 4板)、7...集光レンズ、8...対物レンズ、9...ビームスプリッター、10...集光レンズの前側焦点面、11...対物レンズの後側焦点面、12...対物レンズの前側焦点面、13...試料面、14...鏡筒、15...結像レンズ、16...検光子、17...撮像装置、18...検出面、19...モニタ、20...結像レンズの前側焦点面、21...結像レンズの後側焦点面、S...被写体としての試料、AX1~AX3...光軸、L1~L6...照明光、R1~R4...反射光、O1~O3...散乱光、...入射角。

10

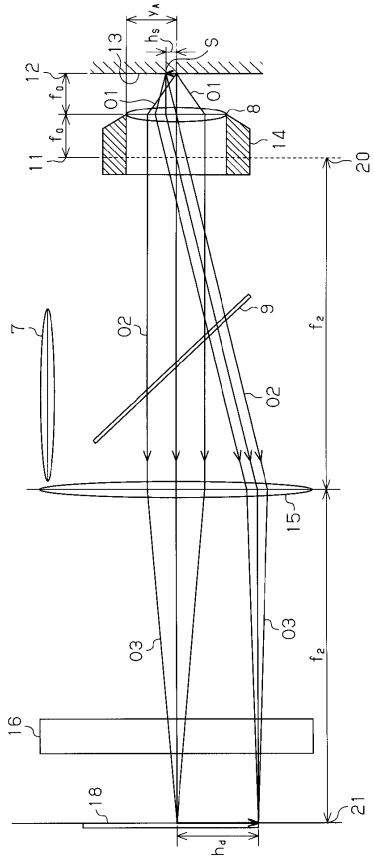
【図1】



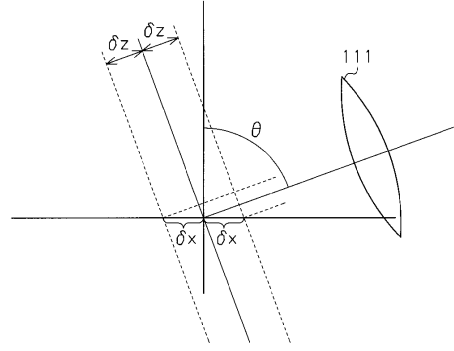
【図2】



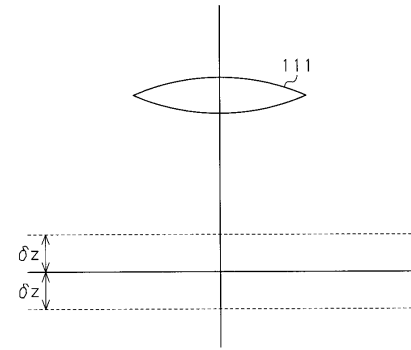
【図3】



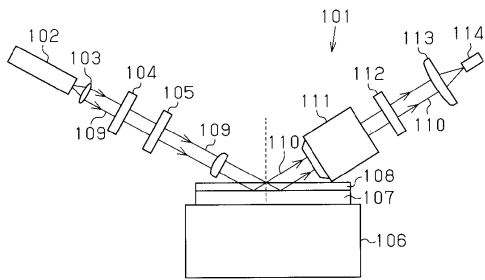
【図4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2007-155480(JP,A)
特開平8-82511(JP,A)
特表平10-501072(JP,A)
特開平6-250092(JP,A)
特開平10-267631(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/00 - 11/30
G01N 21/00 - 21/958