

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02018/038064

発行日 令和1年7月11日(2019.7.11)

(43) 国際公開日 平成30年3月1日(2018.3.1)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード(参考)
GO1J 4/04 (2006.01)	GO1J 4/04	Z 2K008
GO3H 1/04 (2006.01)	GO3H 1/04	

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 57 頁)

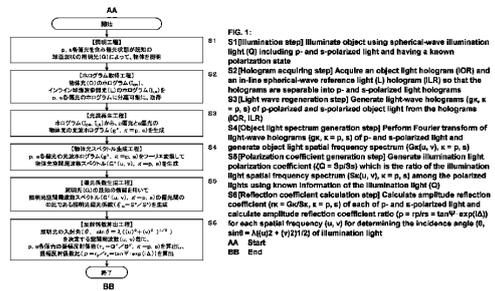
出願番号 特願2018-535670 (P2018-535670)	(71) 出願人 513099603
(21) 国際出願番号 PCT/JP2017/029829	公立大学法人兵庫県立大学
(22) 国際出願日 平成29年8月21日(2017.8.21)	兵庫県神戸市西区学園西町8-2-1
(31) 優先権主張番号 特願2016-163989 (P2016-163989)	(74) 代理人 100084375
(32) 優先日 平成28年8月24日(2016.8.24)	弁理士 板谷 康夫
(33) 優先権主張国 日本国(JP)	(74) 代理人 100125221
	弁理士 水田 慎一
	(74) 代理人 100142077
	弁理士 板谷 真之
	(72) 発明者 佐藤 邦弘
	兵庫県姫路市書写2167 兵庫県立大学
	姫路書写キャンパス内
	Fターム(参考) 2K008 AA06 FF17 FF21 HH01 HH06
	HH11 HH18 HH20 HH28

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 エリブソメトリ装置およびエリブソメトリ方法

(57) 【要約】

本発明は、測定効率を向上できるエリブソメトリ装置および方法を提供する。本方法は、45°直線偏光した球面波状の照明光Qで物体を照明し(S1)、照明光Qの集光点近くに集光点を有する球面波状の参照光Rを用いて、反射光である物体光OをホログラムI_{OR}に取得し、さらに照明光Qと同じ集光点を有する球面波参照光Lで参照光RのホログラムI_{LR}を取得する(S2)。各ホログラムをp, s偏光の各ホログラムI_{OR}, I_{LR}, = p, sに分離して処理し、物体光波を抽出して、物体光空間周波数スペクトルG(u, v), = p, sを生成する(S3)(S4)。振幅反射係数比 = G^p / G^s = tan(θ)から入射角毎のエリブソメトリ角(θ), (θ)を得る。照明光Qが含む入射角θの異なる多数の光によって、多数の反射光のデータをホログラムに一括取得して処理できる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

物体から放射される光の偏光解析に用いるエリブソメトリ装置であって、

p 偏光と s 偏光とを含み偏光状態が既知の非平行の光である照明光 (Q) によって照明された物体から放射される物体光 (O) のデータを、オフアクシス参照光 (R) を用いて、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能に、物体光ホログラム (I_{OR}) として取得し、前記オフアクシス参照光 (R) のデータを、インライン球面波参照光 (L) を用いて、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能に、参照光ホログラム (I_{LR}) として取得するデータ取得部と、

前記物体光 (O) の偏光解析を行うデータ解析部と、を備え、

10

前記データ解析部は、

前記データ取得部によって取得された前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) のデータを用いて前記物体光 (O) の p 偏光の光波と s 偏光の光波のそれぞれを表す光波ホログラム ($g(x, y)$, $= p, s$) をホログラム面においてそれぞれ生成する光波再生部と、

前記 p 偏光と s 偏光の光波ホログラム ($g(x, y)$, $= p, s$) の各々を平面波展開して p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v)$, $= p, s$) をそれぞれ生成する物体光平面波展開部と、

前記照明光 (Q) の既知の情報を用いて、前記ホログラム面において、前記照明光 (Q) の p 偏光の照明光空間周波数スペクトル ($S^p(u, v)$) に対する s 偏光の照明光空間周波数スペクトル ($S^s(u, v)$) の比である照明光偏光係数 ($Q = S^s(u, v) / S^p(u, v)$) を生成する偏光係数生成部と、

20

前記 p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v)$, $= p, s$) と前記照明光偏光係数 (Q) とを用いて、空間周波数 (u, v) 毎に s 偏光の振幅反射係数 ($r_s = G^s(u, v) / S^s(u, v)$) に対する p 偏光の振幅反射係数 ($r_p = G^p(u, v) / S^p(u, v)$) の比である振幅反射係数比 ($= r_p / r_s = Q G^p(u, v) / G^s(u, v)$) を算出する演算部と、を備える、ことを特徴とするエリブソメトリ装置。

【請求項 2】

前記データ取得部は、

30

レーザが放射するコヒーレント光から球面波状の前記照明光 (Q) と、球面波状の前記オフアクシス参照光 (R) と、前記インライン球面波参照光 (L) と、を生成して伝搬させる光学系と、

光強度を電気信号に変換して出力する受光素子と、

前記物体光 (O) と前記オフアクシス参照光 (R) との干渉縞のオフアクシスホログラムである前記物体光ホログラム (I_{OR})、および前記インライン球面波参照光 (L) と前記オフアクシス参照光 (R) との干渉縞のオフアクシスホログラムである前記参照光ホログラム (I_{LR}) を、前記受光素子を用いて取得して保存する保存部と、

前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) の各々が、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能なホログラムとして取得されて前記保存部に保存されるように、前記レーザから前記受光素子に至る光路上に、前記光路を伝搬する光の偏光状態を設定する偏光設定器と、を備え、

40

前記データ解析部は、

前記物体光ホログラム (I_{OR}) から偏光毎に分離してなる p 偏光と s 偏光の物体光ホログラム (I_{OR} , $= p, s$) をそれぞれ生成し、前記参照光ホログラム (I_{LR}) から偏光毎に分離してなる p 偏光と s 偏光の参照光ホログラム (I_{LR} , $= p, s$) をそれぞれ生成する偏光分離部と、

前記 p 偏光と s 偏光の物体光ホログラム (I_{OR} , $= p, s$) と前記 p 偏光と s 偏光の参照光ホログラム (I_{LR} , $= p, s$) とから、前記オフアクシス参照光 (R) の成分を除去した p 偏光と s 偏光の物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL} ,

50

= p , s) を生成するインライン化部と、を備え、

前記光波再生部は、前記偏光分離部と前記インライン化部とによって生成された前記 p 偏光と s 偏光の物体光複素振幅インラインホログラム (J_{OL} , = p , s) から前記インライン球面波参照光 (L) の成分をその球面波光としての特性を用いることによって除去して、前記光波ホログラム ($g(x, y)$, = p , s) を生成する、ことを特徴とする請求項 1 に記載のエリブソメトリ装置。

【請求項 3】

前記偏光設定器は、前記オフアクシス参照光 (R) を互いにオフアクシスとなる p 偏光のオフアクシス参照光 (R^p) と、 s 偏光のオフアクシス参照光 (R^s) とに分割する参照光分割部を備え、

10

前記データ取得部は、前記参照光分割部によって分割された前記 p 偏光と s 偏光のオフアクシス参照光 (R , = p , s) を互いに重ねて用いて、前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) とを、それぞれ p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能なホログラムとして取得する、ことを特徴とする請求項 2 に記載のエリブソメトリ装置。

【請求項 4】

前記参照光分割部は、ウォラストンプリズムを用いて前記オフアクシス参照光 (R) を p 偏光と s 偏光とに分割することを特徴とする請求項 3 に記載のエリブソメトリ装置。

【請求項 5】

前記受光素子は、CCD であり、

20

前記偏光設定器は、前記受光素子が受光する光の偏光状態を前記 CCD の画素毎に設定する偏光子アレイを備えていることを特徴とする請求項 2 に記載のエリブソメトリ装置。

【請求項 6】

物体から放射される光の偏光解析に用いるエリブソメトリ方法であって、

p 偏光と s 偏光とを含み偏光状態が既知の非平行の光である照明光 (Q) によって照明された物体から放射される物体光 (O) のデータをオフアクシス参照光 (R) を用いて、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能に、物体光ホログラム (I_{OR}) として取得し、前記オフアクシス参照光 (R) のデータをインライン球面波参照光 (L) を用いて、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能に、参照光ホログラム (I_{LR}) として取得し、

30

前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) のデータを用いて前記物体光 (O) の p 偏光の光波と s 偏光の光波のそれぞれを表す光波ホログラム ($g(x, y)$, = p , s) をホログラム面においてそれぞれ生成し、

前記 p 偏光と s 偏光の光波ホログラム ($g(x, y)$, = p , s) の各々を平面波展開して p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v)$, = p , s) をそれぞれ生成し、

前記照明光 (Q) の既知の情報を用いて、前記ホログラム面において、前記照明光 (Q) の p 偏光の照明光空間周波数スペクトル ($S^p(u, v)$) に対する s 偏光の照明光空間周波数スペクトル ($S^s(u, v)$) の比である照明光偏光係数 ($\rho_Q = S^s(u, v) / S^p(u, v)$) を生成し、

40

前記 p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v)$, = p , s) と前記照明光偏光係数 (ρ_Q) とを用いて、空間周波数 (u , v) 毎に s 偏光の振幅反射係数 ($r_s = G^s(u, v) / S^s(u, v)$) に対する p 偏光の振幅反射係数 ($r_p = G^p(u, v) / S^p(u, v)$) の比である振幅反射係数比 ($\rho = r_p / r_s = \rho_Q G^p(u, v) / G^s(u, v)$) を算出することを特徴とするエリブソメトリ方法。

【請求項 7】

レーザが放射するコヒーレント光から球面波状の前記照明光 (Q) と、球面波状の前記オフアクシス参照光 (R) と、前記インライン球面波参照光 (L) と、を生成して伝搬させ、

前記物体光 (O) と前記オフアクシス参照光 (R) との干渉縞のオフアクシスホログラ

50

ムである前記物体光ホログラム (I_{OR})、および前記インライン球面波参照光 (L) と前記オフアクシス参照光 (R) との干渉縞のオフアクシスホログラムである前記参照光ホログラム (I_{LR}) を、取得して保存し、

前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) の各々から、偏光毎に分離してなる p 偏光と s 偏光の物体光ホログラム ($I_{OR, p, s}$) および p 偏光と s 偏光の参照光ホログラム ($I_{LR, p, s}$) とを生成し、

前記 p 偏光と s 偏光の物体光ホログラム ($I_{OR, p, s}$) と前記 p 偏光と s 偏光の参照光ホログラム ($I_{LR, p, s}$) とから、前記オフアクシス参照光 (R) の成分を除去した p 偏光と s 偏光の物体光複素振幅インラインホログラム ($J_{OL, p, s}$) を生成し、

前記 p 偏光と s 偏光の物体光複素振幅インラインホログラム ($J_{OL, p, s}$) から前記インライン球面波参照光 (L) の成分をその球面波光としての特性を用いることによって除去して、前記光波ホログラム ($g(x, y, p, s)$) を生成する、ことを特徴とする請求項 6 に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 8】

前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) の取得は、前記球面波状のオフアクシス参照光 (R) を、互いにオフアクシスと成る p 偏光のオフアクシス参照光 (R^p) と s 偏光のオフアクシス参照光 (R^s) とに分割し、前記分割された前記 p 偏光と s 偏光のオフアクシス参照光 (R, p, s) を互いに重ねて用いて行われ、

前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) のそれぞれの前記 p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムへの分離は、前記 p 偏光と s 偏光のオフアクシス参照光 (R, p, s) が互いにオフアクシスであることに基づくフィルタリングによって行われる、ことを特徴とする請求項 7 に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 9】

前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) の取得は、受光素子である CCD を用いて行われ、前記受光素子は p 偏光用の偏光子と s 偏光用の偏光子とを前記 CCD の画素毎に交互に配置して備えており、

前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) のそれぞれの前記 p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムへの分離は、前記 CCD の画素毎のデータを p 偏光のデータと s 偏光のデータに分離して行われる、ことを特徴とする請求項 7 に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 10】

異なる波長の複数のコヒーレント光を重ねて用いて前記物体光ホログラム (I_{OR}) と前記参照光ホログラム (I_{LR}) とを取得し、

前記異なる波長毎に前記振幅反射係数比 ($= r_p / r_s$) を算出する、ことを特徴とする請求項 6 乃至請求項 9 のいずれか一項に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 11】

前記 p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v, p, s)$) と、前記 p 偏光と s 偏光の照明光空間周波数スペクトル ($S(u, v, p, s)$) とを、座標回転変換によってそれぞれ前記物体の表面に平行な面における表現に変換して前記振幅反射係数比 ($= r_p / r_s$) を算出する、ことを特徴とする請求項 6 乃至請求項 10 のいずれか一項に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 12】

前記照明光 (Q) として球面波光を用いて前記物体光ホログラム (I_{OR}) を取得し、偏光に対する反射特性が既知である反射鏡を用いて前記球面波光とした照明光 (Q) をホログラム面に向けて反射させることにより、前記照明光 (Q) を前記インライン球面波参照光 (L) として用いて、前記参照光ホログラム (I_{LR}) を取得する、ことを特徴とする請求項 7 乃至請求項 12 のいずれか一項に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 13】

10

20

30

40

50

前記物体光ホログラム (I_{OR}) の取得は、前記物体の表面における前記照明光 (Q) による照射スポットのサイズを顕微観察のためのサイズに設定して行い、

前記 p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v)$, $= p, s$) を生成する処理は、

前記 p 偏光と s 偏光の光波ホログラム ($g(x, y)$, $= p, s$) の各々について、空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間して、実質的にサンプリング点数を増大させ、

前記サンプリング点数を増大させた p 偏光と s 偏光の光波ホログラムを、それぞれ複数枚の微小ホログラム ($g_i(x, y)$, $= p, s$) に分割し、

前記分割によって生じた前記微小ホログラム ($g_i(x, y)$, $= p, s$) を p 偏光と s 偏光のそれぞれについて互いに重ね合わせて p 偏光と s 偏光の合成微小ホログラム ((x, y) , $= p, s$) を生成し、

前記 p 偏光と s 偏光の合成微小ホログラム ((x, y) , $= p, s$) の各々を平面波展開して前記 p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v)$, $= p, s$) をそれぞれ生成する、処理を備え、

平面波の分散関係を満たす空間周波数 (u, v, w) と前記サンプリング点数の増大を経て生成された前記 p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v)$, $= p, s$) とを用いて、前記物体光 (O) の光軸と前記物体の表面とが交わる位置における前記物体光 (O) の p 偏光と s 偏光の再生光波 ($h(x, y)$, $= p, s$) を生成し、

前記 p 偏光と s 偏光の再生光波 ($h(x, y)$, $= p, s$) を座標回転変換によってそれぞれ前記物体の表面に平行な面における表現に変換して成る p 偏光と s 偏光の回転再生光波 ($b(x', y')$, $= p, s$) を生成し、

前記照明光偏光係数 (Q) と前記 p 偏光と s 偏光の回転再生光波 ($b(x', y')$, $= p, s$) とを用いて、前記照射スポットの各点 (x', y') における振幅反射係数比 ($= Q b^p(x', y') / b^s(x', y')$)、または、前記物体の表面における顕微観察のための画像 ($|b|^2$, $= p, s$) を算出する、ことを特徴とする請求項 6 に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 14】

前記物体の表面と前記ホログラム面との成す角度 (θ) を取得し、

前記照明光 (Q) が前記物体のブリュースタ角 (θ_B) を入射角として含む状態で前記物体を照明して前記物体光ホログラム (I_{OR}) を取得し、

前記物体の表面と前記ホログラム面との成す前記角度 (θ) を用いて、前記 p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v)$, $= p, s$) と、前記 p 偏光と s 偏光の照明光空間周波数スペクトル ($S(u, v)$, $= p, s$) とを、座標回転変換によってそれぞれ前記物体の表面に平行な面における表現に変換して前記振幅反射係数比 (ρ) を算出し、

前記振幅反射係数比 (ρ) から偏光解析用のエリプソメトリ角 (ψ, χ) を前記照明光 (Q) に含まれる複数の入射角 (θ) について取得し、

前記入射角 (θ) を変数とし前記照明光 (Q) を反射する前記物体の屈折率 (n) をパラメータとするモデル曲線によって前記エリプソメトリ角 (ψ, χ) をフィッティングすることにより、前記屈折率 (n) の値を得る、ことを特徴とする請求項 6 に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 15】

前記物体光ホログラム (I_{OR}) の取得は、前記照明光 (Q) を球面波状とし、前記物体の表面における複数の測定点を包含する広い面を、前記照明光 (Q) の集光点の手前または後方において照明して行い、

前記振幅反射係数比 (ρ) の算出は、前記複数の測定点の各点について行う、ことを特徴とする請求項 6 に記載のエリプソメトリ方法。

【請求項 16】

10

20

30

40

50

前記物体光ホログラム (I_{OR}) の取得は、前記照明光 (Q) を球面波状とし、前記物体の表面の位置に前記照明光 (Q) の集光点を配置して行う、ことを特徴とする請求項 6 に記載のエリプソメトリ方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、エリプソメトリ装置およびエリプソメトリ方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来から、物質の光学特性、より一般に誘電体特性を調べる技術としてエリプソメトリ (偏光解析技術) が知られている。エリプソメトリでは、入射光が物質から反射するときの偏光状態の変化を測定する。偏光状態の変化から、物質の誘電体特性を知ることができる。偏光状態の変化は、p 偏光と s 偏光の振幅反射係数 r_p , r_s の比として測定される。振幅反射係数 r_p , r_s は複素数であって、その比である振幅反射係数比 r_p / r_s も複素数であり、2つのエリプソメトリ角 ψ , χ によって $r_p / r_s = \tan(\chi) \exp(i\psi)$ と表わされる。測定結果として得られるエリプソメトリ角 ψ , χ は、個々の物質の光学特性および反射膜の厚さ等に依存する。エリプソメトリを用いるエリプソメトリ装置およびエリプソメトリ方法は、膜厚が光波長以下の薄膜を扱う半導体分野などにおいて、薄膜の膜特性や膜厚を測定するために用いられる。

10

【0003】

薄膜測定用のエリプソメトリ装置は、エリプソメータと呼ばれる。エリプソメータは、薄膜から反射された光における偏光状態の変化を測定して薄膜の光学定数、膜厚、層構成構造などを求めるために用いられる。従来のエリプソメータは、偏光子を機械的に回転させる型の装置と、光弾性を利用して偏光変調する型の装置に大別される。偏光子の回転には、検光子 (偏光子) の回転と補償子の回転とがある。入射光の偏光状態の設定と、反射光の偏光状態の検知とによって、入射光から反射光への変化の際の偏光状態の変化が測定される。

20

【0004】

測定は、異なる条件のもとで、または、最適条件のもとで測定するため、偏光子を機械的に回転させたり、光弾性変調器に光を透過させて光を変調させたりしながら、反射光の光強度変化を測定することで行われる。偏光状態の設定や検知のための偏光子の機械的回転や光の位相変調の操作は、測定時間を長くする。そこで、偏光子を回転する駆動部をなくして高速化をはかるエリプソメータが提案されている (例えば、特許文献 1 参照)。

30

【0005】

振幅反射係数比 r_p / r_s の他に、波長の情報を用いることにより薄膜測定の精度を高められる。この場合、単層膜の膜厚や光学定数の測定だけでなく多層膜の構造解析ができる。波長情報を用いるエリプソメータに、分光エリプソメータがある。分光エリプソメータは、偏光解析技術 (エリプソメトリ) と分光解析技術 (スペクトロスコーピ) とを組み合わせ用いる。測定には、回転偏光子や回転補償子または光弾性変調器などの偏光用機器に加え、高性能な分光器が必要であり、装置が高価になる。

40

【0006】

また、反射光などの光波を解析する技術に、光強度のデータと光波の位相のデータとを併せてホログラムと呼ばれる写真乾板などの記録媒体に記録して解析するホログラフィがある。近年のホログラフィは、撮像素子と半導体メモリなどを用いて、光波の光強度と位相とをデジタルデータとして記録したり、計算機上でホログラムを生成したりして、解析することが行われている。このようなホログラフィは、デジタルホログラフィと呼ばれている。

【0007】

デジタルホログラフィにおいて、ホログラムの記録や処理の高速化と高精度化を達成するための種々の技術が提案されている。例えば、複素振幅インラインホログラムを高速か

50

つ正確に記録して解析するために、記録したホログラムに空間周波数フィルタリングと空間ヘテロダイン変調とを適用するワンショットデジタルホログラフィが提案されている（例えば、特許文献2参照）。従来の光学顕微鏡の問題を解決するために、結像レンズを使用せずに大開口数の物体光を正確にワンショット記録する方法、記録物体光の平面波展開を行って高分解能3次元像を正確に計算機再生する方法、および無歪な高分解能3次元動画像を記録し再生できるレンズレス3次元顕微鏡が提案されている（例えば、特許文献3参照）。

【0008】

また、培養液中細胞や生体組織の内部構造を高分解能で計測するために、反射型レンズレスホログラフィック顕微鏡と波長掃引レーザ光を用いる高分解能断層撮像法が提案されている（例えば、特許文献4参照）。さらに、入射角の異なる光を照射して記録した複数の大開口数物体光から開口数が1を超える物体光を合成する方法、および回折限界を超える分解能を持つ超高分解能3次元顕微鏡が提案されている（例えば、特許文献5参照）。

10

【0009】

また、デジタルホログラフィに関連して、測定試料を透過させたビームと、透過しないビームとを干渉させてCCDで受光し、この干渉像をフーリエ変換することによって測定試料の光学定数を求める、分散フーリエ変換スペクトロメトリ(DFTS)による方法が知られている（例えば、非特許文献1参照）。同様に、測定試料を透過したビームと、透過しないビームの干渉像をフーリエ変換して光路長を計算して厚さを算出する、干渉分光法による薄膜の厚さを測定する方法が知られている（例えば、非特許文献2参照）。さらに、ホログラムを用いて生成した平行光を測定試料に照射し、測定試料を透過した光を分割して、位相を変化させた後に干渉させ、その干渉縞の強度変化を測定して膜厚を算出する、干渉コントラスト法膜厚測定方法が知られている（例えば、特許文献6参照）。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】米国特許第7411677号

【特許文献2】国際公開第2011/089820号

【特許文献3】国際公開第2012/005315号

【特許文献4】国際公開第2014/054776号

30

【特許文献5】国際公開第2015/064088号

【特許文献6】特開昭62-192604号公報

【非特許文献】

【0011】

【非特許文献1】エイ・アール・ハーベイ(A. R. Harvey)著「デターミネーションオブザオプティカルコンスタンツオブシンフィルムズインザビジブルバイスタティックディスペルシブフーリエトランスフォームスペクトロスコピ(Determination of the optical constants of thin films in the visible by static dispersive Fourier transform spectroscopy)」、レビューオブサイエンティフィックインスツルメンツ(REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS), Vol. 69, No. 10, pp. 3649-3658(1998)

40

【非特許文献2】チン・シャオ(Qing Xiao)他著「アスペクトラルインターフェロメトリックメソッドトゥメジャーシックネスウィズラージレンジ(A spectral interferometric method to measure thickness with large range)」、オプティカルコミュニケーションズ(Optics Communications), 282, pp. 3076-3080(2009)

【発明の開示】

50

【0012】

しかしながら、上述した特許文献1に示されるようなエリプソメータにおいては、これを薄膜の測定に用いる場合に、測定条件、例えば、入射光の入射角度の条件を変えた複数の測定結果を用いて測定精度を高めることについて、なんら解決されていない。特許文献2乃至5はエリプソメトリについて開示するものではない。また、非特許文献1に示される方法は最大1mm程度の膜厚測定を意図し、非特許文献2に示される方法は数 μm から数mmまでの膜厚測定を意図するものであり、半導体分野などにおける高精度な薄膜測定に適用できるものでない。特許文献6に示されるような測定方法は、ホログラムを用いて再生した平行度の高い平行光を用いるものであり、エリプソメトリに適用できるものではない。

10

【0013】

従来の分光エリプソメータは、広い面積の薄膜を測定する場合、測定点を薄膜上で移動させながら測定する必要がある。このために、広い薄膜の膜厚分布や膜厚の不均一性を測定するには長時間を要する。波長の情報を用いる分光エリプソメータは、照明光源として波長スペクトル幅の広い光を用いており、スポットサイズは一般に数mmであり、空間分解能が低い。分光エリプソメータは、データ解析において誘電率の波長依存性、例えば、屈折率 n の波長依存性 $n = n(\lambda)$ を表す誘電関数のモデルが必要である。このモデル作成のために解析は複雑になりやすく、また、解析値がモデル依存性を持つことがある。

【0014】

本発明は、上記課題を解消するものであって、簡単な構成により、測定効率を向上できるエリプソメトリ装置およびエリプソメトリ方法を提供することを目的とする。

20

【0015】

上記課題を達成するために、本発明のエリプソメトリ装置は、物体から放射される光の偏光解析に用いるエリプソメトリ装置であって、p偏光とs偏光とを含み偏光状態が既知の非平行の光である照明光(Q)によって照明された物体から放射される物体光(O)のデータを、オフアクシス参照光(R)を用いて、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとに分離可能に、物体光ホログラム(I_{OR})として取得し、オフアクシス参照光(R)のデータを、インライン球面波参照光(L)を用いて、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとに分離可能に、参照光ホログラム(I_{LR})として取得するデータ取得部と、物体光(O)の偏光解析を行うデータ解析部と、を備え、データ解析部は、データ取得部によって取得された物体光ホログラム(I_{OR})と参照光ホログラム(I_{LR})のデータを用いて物体光(O)のp偏光の光波とs偏光の光波のそれぞれを表す光波ホログラム($g(x, y)$, $\lambda = p, s$)をホログラム面においてそれぞれ生成する光波再生部と、p偏光とs偏光の光波ホログラム($g(x, y)$, $\lambda = p, s$)の各々を平面波展開してp偏光とs偏光の物体光空間周波数スペクトル($G(u, v)$, $\lambda = p, s$)をそれぞれ生成する物体光平面波展開部と、照明光(Q)の既知の情報を用いて、ホログラム面において、照明光(Q)のp偏光の照明光空間周波数スペクトル($S^p(u, v)$)に対するs偏光の照明光空間周波数スペクトル($S^s(u, v)$)の比である照明光偏光係数($Q = S^s(u, v) / S^p(u, v)$)を生成する偏光係数生成部と、p偏光とs偏光の物体光空間周波数スペクトル($G(u, v)$, $\lambda = p, s$)と照明光偏光係数(Q)とを用いて、空間周波数(u, v)毎にs偏光の振幅反射係数($r_s = G^s(u, v) / S^s(u, v)$)に対するp偏光の振幅反射係数($r_p = G^p(u, v) / S^p(u, v)$)の比である振幅反射係数比($R = r_p / r_s = Q \cdot G^p(u, v) / G^s(u, v)$)を算出する演算部と、を備える、ことを特徴とする。

30

40

【0016】

また、本発明のエリプソメトリ方法は、物体から放射される光の偏光解析に用いるエリプソメトリ方法であって、p偏光とs偏光とを含み偏光状態が既知の非平行の光である照明光(Q)によって照明された物体から放射される物体光(O)のデータをオフアクシス参照光(R)を用いて、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとに分離可能に、物体光ホログラム(I_{OR})として取得し、オフアクシス参照光(R)のデータをインライン

50

球面波参照光 (L) を用いて、 p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能に、参照光ホログラム ($I_{L,R}$) として取得し、物体光ホログラム ($I_{O,R}$) と参照光ホログラム ($I_{L,R}$) のデータを用いて物体光 (O) の p 偏光の光波と s 偏光の光波のそれぞれを表す光波ホログラム ($g(x, y), = p, s$) をホログラム面においてそれぞれ生成し、 p 偏光と s 偏光の光波ホログラム ($g(x, y), = p, s$) の各々を平面波展開して p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v), = p, s$) をそれぞれ生成し、照明光 (Q) の既知の情報を用いて、ホログラム面において、照明光 (Q) の p 偏光の照明光空間周波数スペクトル ($S^p(u, v)$) に対する s 偏光の照明光空間周波数スペクトル ($S^s(u, v)$) の比である照明光偏光係数 ($r_Q = S^s(u, v) / S^p(u, v)$) を生成し、 p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル ($G(u, v), = p, s$) と照明光偏光係数 (r_Q) とを用いて、空間周波数 (u , v) 毎に s 偏光の振幅反射係数 ($r_s = G^s(u, v) / S^s(u, v)$) に対する p 偏光の振幅反射係数 ($r_p = G^p(u, v) / S^p(u, v)$) の比である振幅反射係数比 ($= r_p / r_s = r_Q G^p(u, v) / G^s(u, v)$) を算出することを特徴とする。

10

【 0 0 1 7 】

本発明のエリブソメトリ装置および方法によれば、非平行の照明光が含む多数の入射角を有する入射光による反射光のデータを一括してホログラムに記録し、光波の平面波展開などの後処理によって、入射角に対応する多数の波数ベクトル毎にエリブソメトリ角 θ を求めるので、測定効率を向上できる。

20

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 8 】

【 図 1 】 本発明の第 1 の実施形態に係るエリブソメトリ方法のフローチャート。

【 図 2 】 図 1 の光波再生工程の詳細を示すフローチャート。

【 図 3 】 第 2 の実施形態に係るエリブソメトリ装置の模式的構成を示す側面図。

【 図 4 】 図 3 の要部詳細図。

【 図 5 】 同装置によるインライン球面波参照光のホログラム取得を説明する側面図。

【 図 6 】 同装置に用いられる受光素子の平面図。

【 図 7 】 物体の反射面と受光素子の受光面 (ホログラム面) の位置関係を説明する側面図。

30

【 図 8 】 図 7 における受光面を反射面に平行にする回転変換を説明する図。

【 図 9 】 同装置の変形例を示す側面図。

【 図 1 0 】 図 9 の要部詳細図。

【 図 1 1 】 同変形例におけるインライン球面波参照光のホログラム取得を説明する側面図。

【 図 1 2 】 第 3 の実施形態に係るエリブソメトリ装置の模式的構成を示す側面図。

【 図 1 3 】 図 1 2 の要部詳細斜視図。

【 図 1 4 】 (a) は図 1 2 の装置によって得られる物体光のオフアクシスホログラムの表示例を示す図、 (b) は (a) の説明図。

【 図 1 5 】 第 4 の実施形態に係るエリブソメトリ装置の模式的構成を示す側面図。

40

【 図 1 6 】 同装置の変形例を示す側面図。

【 図 1 7 】 第 5 の実施形態に係るエリブソメトリ装置の模式的構成を示す側面図。

【 図 1 8 】 同装置の変形例を示す側面図。

【 図 1 9 】 第 6 の実施形態に係るエリブソメトリ装置の模式的構成を示す側面図。

【 図 2 0 】 (a) は第 7 の実施形態に係るエリブソメトリ装置の模式的構成を示す側面図、 (b) は (a) の上面図。

【 図 2 1 】 第 8 の実施形態に係るエリブソメトリ方法および装置によって得られる物体光のオフアクシスホログラムを説明図。

【 図 2 2 】 第 9 の実施形態に係るエリブソメトリ方法に用いるエリブソメトリ装置の模式的構成を示す側面図。

50

【図 2 3】(a) は第 10 の実施形態に係るエリブソメトリ方法における処理の対象となるホログラムの部分図、(b) は(a) のホログラムにおける空間サンプリング間隔を増やす様子を示す図。

【図 2 4】(a) はホログラムを高速に処理する方法が適用されるホログラムの概念図、(b) は同ホログラムを分割して重ね合わせた概念図、(c) は(b) のホログラムを合成したホログラムの概念図。

【図 2 5】(a) は単一のホログラムと再生像の概念図、(b) はホログラムを高速に処理する方法の原理を説明するために複数の再生用ホログラムと再生された複数の像とを示す概念図。

【図 2 6】(a) は物体光のオフアクシスホログラムの表示例を示す図、(b) は(a) の説明図。

【図 2 7】(a) は図 2 6 (a) のオフアクシスホログラムをヘテロダイン変調して得られるホログラムの表示例を示す図、(b) は(a) の説明図。

【図 2 8】第 11 の実施形態に係るエリブソメトリ装置のブロック構成図。

【図 2 9】(実施例 1) 薄膜について取得されたエリブソメトリ角 の測定値の面分布を示す画像。

【図 3 0】図 2 9 の角 と共に取得されたエリブソメトリ角 の測定値の面分布を示す画像。

【図 3 1】図 2 9 の角 を回轉變換した結果を示す画像。

【図 3 2】図 3 0 の角 を回轉變換した結果を示す画像。

【図 3 3】図 3 1 の角 および計算して得た角 を入射角依存性として示すグラフ。

【図 3 4】図 3 2 の角 および計算して得た角 を入射角依存性として示すグラフ。

【図 3 5】(実施例 2) 他の薄膜について測定して得たエリブソメトリ角 、および計算して得た角 を、入射角依存性として示すグラフ。

【図 3 6】図 3 5 の角 と共に取得された角 、および計算して得た角 を、入射角依存性として示すグラフ。

【図 3 7】(実施例 3) SiO_2 薄膜について測定して得たエリブソメトリ角 の測定値と屈折率を固定し膜厚を変えて計算した角 の計算値とを入射角依存性として示すグラフ。

【図 3 8】同薄膜について角 と共に取得されたエリブソメトリ角 の測定値と屈折率を固定し膜厚を変えて計算した角 の計算値とを入射角依存性として示すグラフ。

【図 3 9】図 3 7 のエリブソメトリ角 の測定値と膜厚を固定し屈折率を変えて計算した角 の計算値とを入射角依存性として示すグラフ。

【図 4 0】図 3 8 のエリブソメトリ角 の測定値と膜厚を固定し屈折率を変えて計算した角 の計算値の計算値とを入射角依存性として示すグラフ。

【図 4 1】(実施例 4) 屈折率の繰り返し測定結果を示すグラフ。

【図 4 2】膜厚の繰り返し測定結果を示すグラフ。

【発明を実施するための形態】

【0019】

以下、本発明の実施形態に係るデジタル・ホログラフィを用いたエリブソメトリ装置およびエリブソメトリ方法について、図面を参照して説明する。

【0020】

(第 1 の実施形態：エリブソメトリ方法)

図 1、図 2 は、第 1 の実施形態に係るエリブソメトリ方法を示す。このエリブソメトリ方法は、図 1 に示すように、照明工程 (S1)、ホログラム取得工程 (S2)、光波再生工程 (S3)、物体光スペクトル生成工程 (S4)、偏光係数生成工程 (S5)、および反射係数算出工程 (S6) を備えている。

【0021】

照明工程 (S1) では、p 偏光と s 偏光とを含み偏光状態が既知の非平行の光である照明光 Q によって、物体が照明される。非平行の照明光 Q は、例えば、球面波光であり、互

40

10

20

30

40

50

いに異なる波数ベクトルを有する光の集合から成る。ホログラム取得工程 (S2) では、オフアクシス参照光 R を用いて、照明光 Q の反射光である物体光 O のオフアクシスホログラム I_{OR} 、インライン球面波参照光 L のオフアクシスホログラム I_{LR} が、それぞれ p, s 各偏光のホログラムに分離可能に取得される。インライン球面波参照光 L は、物体光 O を仮想的にインラインホログラムとして記録するためのインライン照明光である。仮想的の用語は、インラインホログラムが、後処理によって得られることを表現している。また、インライン球面波参照光 L は、物体光 O が有する集光点の位置に、球面波光の集光点を有する光である。オフアクシスホログラム I_{OR} , I_{LR} は、同時ではなく別時間に記録され、これらのホログラムの後処理によって、インラインホログラムが得られる。

【0022】

光波再生工程 (S3) では、これらのホログラム I_{OR} , I_{LR} を用いて、p 偏光と s 偏光のそれぞれの物体光の光波ホログラム g , $g' = p, s$ がホログラム面 (受光素子の受光面) において生成される。物体光スペクトル生成工程 (S4) では、p, s 各偏光の光波ホログラム g , $g' = p, s$ をフーリエ変換して成る物体光空間周波数スペクトル $G(u, v)$, $G'(u, v) = p, s$ が生成される。

【0023】

空間周波数 (u, v) は、ホログラム面に入射する物体光 O の波数ベクトルを表し、ホログラム面に対する物体光 O の入射角 $\theta = \arcsin(\sqrt{u^2 + v^2})$ の関係によって与える。物体光 O は照明光 Q の反射光であるので、入射角 θ は反射光が受光面に入射する際の入射角である。照明光 Q が物体の表面すなわち反射面に入射する際の入射角 θ' は、物体の表面に入射する照明光 Q の波数ベクトルを表す空間周波数 (u', v') に対応する。入射角 θ' は、照明光 Q の反射光 (すなわち物体光 O) に関する反射角と同じである。

【0024】

ここで、エリプソメトリにおける入射面を定義する。エリプソメトリにおける入射面は、物体表面への入射光の波数ベクトルとその反射光の波数ベクトルとが含まれる 1 つの平面として定義される (入射面は反射面ではないことに注意)。入射面は、反射面すなわち物体表面に対して直交する。ホログラム面は、入射面に対して直交する旨想定されるが、この限りではない。

【0025】

偏光係数生成工程 (S5) では、照明光 Q の既知の情報を用いて、ホログラム面において、p, s 各偏光の照明光空間周波数スペクトル $S(u, v)$, $S'(u, v) = p, s$ の比である照明光偏光係数 $Q = S^s / S^p$ が生成される。照明光空間周波数スペクトル $S(u, v)$, $S'(u, v) = p, s$ は、照明光 Q が物体表面位置において偏光状態に影響しない理想的な反射面によって反射されてホログラム面に入射する状況を想定した場合の、照明光 Q のホログラム面への入射光の空間周波数スペクトルである。

【0026】

照明光偏光係数 Q は、無次元量であり、座標変換に影響されない。照明光偏光係数 Q は、照明光 Q の偏光状態を調整して $Q = 1$ とすることができる。照明光 Q は、例えば、照明光 Q の代表光として選んだ光軸光についての入射面に対して 45° に直線偏光し、かつ、ホログラム面に対する集光点の位置が知られた球面波光を好適に用いることができる。このような 45° 直線偏光の場合、 $S(u, v)$, $S'(u, v) = p, s$ を算出することなく $Q = 1$ が得られる。照明光 Q は、球面波光に限られず非平行の光であればよく、偏光解析の際に偏光状態が測定や計算によって既知であって照明光偏光係数 Q が得られればよい。照明光 Q の照明光空間周波数スペクトル $S(u, v)$, $S'(u, v) = p, s$ が得られれば、照明光偏光係数 Q が得られる。

【0027】

反射係数算出工程 (S6) では、ホログラム面に対する物体光 O の入射角 θ を決定する空間周波数 (u, v) 毎に、振幅反射係数比 $R = Q G^p / G^s$ が算出される (R は複素反射率比とも呼ばれる)。計算処理はホログラム面上で行われる。振幅反射係数比 R は、

10

20

30

40

50

s 偏光の振幅反射係数 $r_s = G^s(u, v) / S^s(u, v)$ に対する p 偏光の振幅反射係数 $r_p = G^p(u, v) / S^p(u, v)$ の比、すなわち、 r_p / r_s であり、照明光偏光係数 Q を用いて、 $r_p / r_s = Q G^p / G^s$ となる。振幅反射係数比 r_p / r_s は、振幅を角度で表すエリブソメトリ角 (u, v) と位相を表すエリブソメトリ角 (u, v) とを用いて、 $r_p / r_s = \tan \delta \cdot \exp(i\phi)$ と表わされる。振幅反射係数比 r_p / r_s の測定値から、ホログラム面で空間周波数 (u, v) 毎に定義されたエリブソメトリ角 (u, v) , (u, v) 、または入射角 θ 毎に定義されたエリブソメトリ角 (θ) , (θ) の実測値データが得られる。

【0028】

実測値 r_p / r_s のデータは、照明光 Q に多数の (u', v') または θ の光が含まれているので、入射角 θ の関数として、測定値が曲線上に並んだ態様で得られる。照明光 Q が、集光点を有し、その集光点の位置に物体の表面すなわち反射面があると、反射光は点状に局在した領域から物体光 O となって放射される。この場合、互いに異なる多数の波数ベクトル (u', v') または入射角 θ を有する照明光 Q によって 1 点 (反射点という) が照射され、反射点において入射角 θ が異なる多数の実測値 r_p / r_s のデータが得られる。このような一点集中測定の方法によれば、実測値 r_p / r_s の多数のデータを用いて物体の 1 点における物性の光学測定を高精度に行うことができる (例えば、図 3 参照)。

【0029】

また、非平行の光を含む照明光 Q が、物体の表面の広い面積を反射面として照明する場合、反射面の各点は、それぞれ 1 種類の波数ベクトル (u', v') または入射角 θ を有する光によって照射される。この場合、広い反射面全体の各点 (x', y') 毎に実測値 r_p / r_s が 1 つずつ得られる。反射面には、入射角 θ が分布しており、入射角 θ に応じて分布した実測値 r_p / r_s のデータが得られる。このよう広範囲分布測定の方法によれば、実測値 r_p / r_s のデータの分布を用いて物体の表面における光学特性の分布、例えば、膜厚や表面粗さの分布を、迅速に測定することができる (例えば、図 17 参照)。

【0030】

ここで、例えば、薄膜について上述の一点集中測定の方法によって得られたエリブソメトリ角 (u, v) , (u, v) の測定値を用いて、その薄膜の膜厚 d や屈折率 n を求めることについて説明する。エリブソメトリ角 (u, v) は、ホログラム面における周波数空間 (u, v) において得られている。薄膜の膜厚 d や屈折率 n をパラメータとして用いて、各エリブソメトリ角 (u, v) の計算値 C_{AL} , C_{AL} を、物体表面における周波数空間 (u', v') において定義されたエリブソメトリ角 $C_{AL}(u', v')$, $C_{AL}(u', v')$ 、または $C_{AL}(\theta)$, $C_{AL}(\theta)$ として算出する。算出された物体表面におけるエリブソメトリ角 $C_{AL}(u', v')$, $C_{AL}(u', v')$ を、座標変換によって、ホログラム面におけるエリブソメトリ角 $C_{AL}(u, v)$, $C_{AL}(u, v)$ 、または $C_{AL}(\theta)$, $C_{AL}(\theta)$ に変換する。

【0031】

ホログラム面における実測値 r_p / r_s のデータに対し、ホログラム面における計算値 C_{AL} , C_{AL} を最適フィッティングするパラメータ d , n を、薄膜の膜厚 d や屈折率 n の測定値として得ることができる。なお、実際の物体表面の反射面におけるエリブソメトリ角 (u', v') , (u', v') は、ホログラム面を物体表面に一致させる座標回転の変換処理によって得られる。そこで、物体表面すなわち周波数空間 (u', v') における実測値 r_p / r_s のデータに対し、物体表面における計算値 C_{AL} , C_{AL} を最適フィッティング処理して膜厚 d や屈折率 n を測定値として得ることもできる (図 7、図 8 参照)。

【0032】

次に、図 2 を参照して、上述の光波再生工程 (S 3) を説明する。光波再生工程 (S 3) は、偏光分離工程 (S 3 1)、複素振幅ホログラム生成工程 (S 3 2)、インライン化工程 (S 3 3)、光波ホログラム生成工程 (S 3 4) を備えている。

【0033】

10

20

30

40

50

偏光分離工程 (S31) では、ホログラム I_{OR} , I_{LR} が、それぞれ p , s 各偏光のホログラム (I_{OR} , I_{LR} , $= p, s$) に分離される。複素振幅ホログラム生成工程 (S32) では、ホログラム I_{OR} , I_{LR} , $= p, s$ に空間周波数フィルタリングが適用されて、直接像成分から成る複素振幅ホログラム J_{OR} , J_{LR} , $= p, s$ が生成される。

【0034】

インライン化工程 (S33) では、複素振幅ホログラム J_{OR} , J_{LR} , $= p, s$ から、オフアクシス参照光 R の成分を除去した、複素振幅インラインホログラム J_{OL} , $= p, s$ が生成される。複素振幅インラインホログラム J_{OL} , $= p, s$ は、実質的に、物体光 O とインライン球面波参照光 L というインライン参照光との干渉縞のデータを各偏光毎に記録したホログラムに相等する。光波ホログラム生成工程 (S34) では、複素振幅インラインホログラム J_{OL} , $= p, s$ から、インライン球面波参照光 L の成分を除去した、物体光 O のみを含む光波ホログラム g , $= p, s$ が生成される。エリブソメトリ方法の詳細は、エリブソメトリ装置の説明の後に、数式表現を交えて説明する。

10

【0035】

(第2の実施形態：エリブソメトリ装置)

図3乃至図8は、上記のエリブソメトリ方法を実施するために用いられる第2の実施形態に係るエリブソメトリ装置1を示す。この実施形態は、一点集中測定の方法を実施する装置構成に対応する。図3、図4に示すように、エリブソメトリ装置1は、レーザ20と、光の伝播を行う光学系2と、測定対象のサンプルである物体3からの反射光を参照光とともに受光して光強度を電気信号に変換して記録する受光素子4と、光強度の信号を処理して記憶する計算機5と、を備えている。物体3は、例えば、シリコンウエハの表面に形成されたシリコン酸化膜の薄膜である。レーザ20は、コヒーレント光20aを放射する単一波長光の光源である。受光素子4は、例えばCCDである。

20

【0036】

光学系2は、レーザ20からのコヒーレント光20aを照明光Qと参照光Rとに分岐するビームスプリッタBSを備えている。照明光QはビームスプリッタBSを直進する光であり、参照光RはビームスプリッタBSで90°分岐された光である。照明光Qの光路には、偏光子P1と、光のビーム径を拡大するレンズ21, 22と、レンズ22からの光を収束させる集光レンズ23とが、この順に備えられている。参照光Rの光路には、光の向きを変えるミラーM1, M2と、偏光子P2と、光のビーム径を拡大するレンズ24, 25と、レンズ25からの光を収束させる集光レンズ26と、集光した光の向きを変えるマイクロミラーM3とが、この順に備えられている。

30

【0037】

集光レンズ23を経由した照明光Qは、集光レンズ23によって球面波となっている。照明光Qは、実質的に物体3の表面に集光点(仮想の点光源、球面波の中心点)が位置するように集光される。照明光Qは、物体3の表面または内部で反射され、その反射光が球面波状に広がる物体光Oとなる。物体光Oは、拡がりながら受光素子4に入射する。最終的に放射される照明光Qと参照光Rは、それぞれ集光点を有する光であればよく、高精度の集光レンズ23, 26を用いることなく、レンズ22, 25によって、球面波状の光を生成するようにしてもよい。球面波状の光は、集光点を有する。

40

【0038】

集光レンズ26を経由した参照光Rは、集光レンズ26によってオフアクシス球面波となる。参照光Rの集光点(仮想の点光源)は、照明光Qの集光点の近傍に設定されている。参照光Rがオフアクシスであるとは、例えば、参照光Rの集光点と物体光Oの集光点または物体光Oの集光点に相当する照明光Qの集光点とが、受光素子4の受光面上のどこから見ても重ならない状況にあることを表す。小さく形成されたマイクロミラーM3が参照光Rの集光点の位置に、配置されている。参照光Rは、マイクロミラーM3によって、反射されて、球面波となって受光素子4に入射する。物体光Oと参照光Rとは、受光素子4

50

の受光面において干渉縞を形成する。物体光 O のデータと参照光 R のデータは、干渉縞のオフアクシスホログラムである物体光ホログラム I_{O_R} として、受光素子 4 によって取得され、計算機 5 によって保存される。

【0039】

また、図 5 に示すように、エリプソメトリ装置 1 は、インライン球面波参照光 L を生成して伝搬させる構成を備えることができる。この参照光 L 用の光学系は、ビームスプリッタ B S と偏光子 P 1 との間に挿入したミラー M 4 と、ミラー M 4 からの光を反射するミラー M 5 , M 6 と、偏光子 P 3 と、光の径を拡大するレンズ 2 7 , 2 8 と、レンズ 2 8 からの光を収束させる集光レンズ 2 9 とを、この順に備えている。この参照光 L 用の光学系を設定する場合、物体 3 は、取り除かれる。

10

【0040】

参照光 L 用の光学系は、照明光 Q 用の光学系を、物体 3 の表面（反射面）に関して鏡像の位置に配置した構成を有している。インライン球面波参照光 L は、照明光 Q の集光点（または物体 3 の表面に関する、照明光 Q の集光点の鏡像点）の位置に集光点を有する。インライン球面波参照光 L がインラインであるとは、例えば、球面波参照光 L の集光点と物体光 O の集光点または物体光 O の集光点に相当する照明光 Q の集光点とが、光学的な意味で、受光素子 4 の受光面の法線上に並んで見える、幾何学的配置にあることを表す。

【0041】

インライン球面波参照光 L は、参照光 R のデータをオフアクシスホログラムである参照光ホログラム (I_{L_R}) として取得して保存するための参照光である。インライン球面波参照光 L は、ホログラムデータのデジタル処理における基準光としての役割を有する。インライン球面波参照光 L は、参照光 R のデータを含まないホログラムである複素振幅インラインホログラム J_{O_L} を生成するために用いられる。インライン球面波参照光 L は、その球面波としての特性により、集光点の位置と波長または周波数とを決めることにより、数式で表現して、デジタル処理に用いることができる。

20

【0042】

インライン球面波参照光 L の集光点の位置（ホログラム面からの距離）の情報は、インライン球面波参照光 L を照明光として用いて寸法既知パターンを有する目盛板などの物体を照明し、その目盛の画像をスケールホログラム I_{S_R} として取得することによって得られる。スケールホログラム I_{S_R} から目盛板の画像を再生する際に、ホログラム面から参照光 L の集光点までの距離がパラメータとして用いられる。再生画像が原寸大の大きさに再生できるパラメータの値が、参照光 L の集光点までの距離となる。画像再生面における再生画像の寸法は、受光素子（例えば C C D）の既知の画素ピッチによって測定できる。

30

【0043】

エリプソメトリ装置 1 は、レーザ 2 0 から受光素子 4 に至る光路上に、光路を伝搬する光の偏光状態を設定する偏光設定器を備えている。偏光設定器は、物体光ホログラム I_{O_R} と参照光ホログラム I_{L_R} の各々が、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能なホログラムとして取得されて保存されるように光の偏光状態を設定する。偏光設定器には、偏光子 P 1 , P 2 , P 3 が含まれる。偏光子 P 1 , P 2 , P 3 は、照明光 Q、参照光 R , L を、例えば、入射面に対して 4 5 ° 傾いた直線偏光に調整し設定する。なお、偏光子 P 1 , P 2 , P 3 は、平行光状態の光に対して p , s 各偏光状態を設定している。この p , s 偏光状態が設定された平行光が、非平行光、例えば球面波状の光や球面波光とされた場合、p , s 偏光状態に変化が生じるが、その変化は、実用上無視できるか、または計算処理時に補正処理等により、対応することができる。

40

【0044】

図 6 に示すように、受光素子 4 は、C C D の画素 4 0 をアレイ状に 2 次元配列して構成されている。各画素は、光センサである。受光素子 4 は、受光素子 4 が受光する光の偏光状態を設定する偏光子 P a , P b を、C C D の画素 4 0 毎に、光センサの前面に備えている。多数の偏光子 P a , P b は、交互に 2 次元配置されて偏光子アレイ P A を構成する。隣接する画素 4 0 の偏光子 P a , P b は、隣接する画素 4 0 が互いに異なる偏光を受光す

50

るように、互いに直交する偏光軸を有する。偏光子 P a と偏光子 P b は、それぞれ、例えば、p 偏光 ($\theta = p$) と s 偏光 ($\theta = s$) を透過させる偏光子である。

【 0 0 4 5 】

偏光子アレイ P A は、受光素子 4 の前面に配置された偏光設定器である。偏光子アレイ P A は、物体光ホログラム I_{O_R} と参照光ホログラム I_{L_R} の各々が、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能なホログラムとして取得されて保存されるように、受光素子 4 が受け取る光の偏光状態を設定する。受光素子 4 は、画素毎に p 偏光用の偏光子 P a または s 偏光用の偏光子 P b を備えているので、受光素子 4 に入射する光を p 偏光と s 偏光に分離して、各偏光状態 ($\theta = p, s$) 毎に分離可能なホログラムを 1 回の受光によって取得できる。

10

【 0 0 4 6 】

すなわち、偏光子アレイ P A を前面に備える受光素子 4 によれば、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能に、ホログラムのデジタルデータを取得することができる。例えば、受光素子 4 によって物体光ホログラム I_{O_R} のデータを取得し、得られたデータを p 偏光を受光した画素のデータと s 偏光を受光した画素のデータとの 2 グループに分離した後処理によって、p 偏光の物体光ホログラム $I^P_{O_R}$ と s 偏光の物体光ホログラム $I^S_{O_R}$ とを分離して生成することができる。

【 0 0 4 7 】

受光素子 4 として、偏光子アレイ P A を備えた C C D を用いると、p 偏光と s 偏光のそれぞれが作るホログラムのデータを同時にワンショット記録することができる。p 偏光と s 偏光のホログラムを同時記録することにより、従来分光エリプソメータにおける回転偏光子または光弾性変調器を使用せずに、必要な光の偏光状態のデータを瞬時に記録することができる。

20

【 0 0 4 8 】

画素毎に偏光子を付けた C C D などの受光素子 4 を用いない場合には、照明光 Q と参照光 R の各光路上の偏光子 P 1 , P 2 を用いて、レーザ光の偏光を切り替えることにより、画素毎の偏光子を有していない受光素子 4 によって、p 偏光と s 偏光のホログラムを別々に取得することができる。この場合、p 偏光と s 偏光の偏光毎の各ホログラムの取得に際し、参照光 R と照明光 Q が同一の経路を伝搬するように、参照光 R および照明光 Q に及ぼす外部振動等のノイズ発生要因を排除する必要がある。

30

【 0 0 4 9 】

(偏光子と偏光)

照明光 Q (入射光) が物体 3 によって反射して物体光 O (反射光) が生じるとき、物体 3 の影響によって、入射光の偏光状態と反射光の偏光状態との間に変化が発生する。エリプソメトリは、入射光の偏光状態と反射光の偏光状態との間の偏光状態の変化を測定して偏光解析に利用する。反射前後の偏光状態の変化から、反射物体の誘電体特性を知ることができる。偏光状態の変化は、p 偏光と s 偏光の各々に対する振幅反射係数 r_p, r_s の比という無次元量として得られる。

【 0 0 5 0 】

エリプソメトリ方法とエリプソメトリ装置 1 は、光の干渉を記録するホログラムに基づいて振幅反射係数 r_p, r_s を得るために、例えば、p 偏光と s 偏光との間に位相差がない直線偏光とした照明光 Q および参照光 R , L を用いる。これらの光を直線偏光の状態に設定するために、光路上の偏光子 P 1 , P 2 , P 3 が用いられる。例えば、偏光子 P 1 を用いて、照明光偏光係数 $\theta_Q = S^S(u, v) / S^P(u, v)$ を 1 に設定したり、他の値に設定したりすることができる。

40

【 0 0 5 1 】

なお、偏光子 P 2 を通過した後の参照光 R を反射するマイクロミラー M 3 は、p 偏光と s 偏光との間に位相差を発生させる。そこで、ホログラムから参照光 R の成分を除去するために、インライン球面波参照光 L の情報が用いられる。光の干渉は、p 偏光の参照光 R と p 偏光の物体光 O との間、および s 偏光の参照光 R と s 偏光の物体光 O との間などのよ

50

うに、偏光状態が同じ光の間で発生する。

【 0 0 5 2 】

(ホログラムデータと処理)

ホログラムデータとその処理を数式表現に基づいて説明する。ホログラムには、オフアクシス参照光 R、インライン球面波参照光 L、物体光 O などが関与する。ここで、x y z 右手系直交座標系を設定する。座表系の原点は、受光素子 4 の受光面 (ホログラム面) の中央に設定し、x, y 軸を受光面内に設定し、z 軸を受光面に光が入射する向きとは反対向きに設定する。受光面から立ち上がる法線の向きが z 軸の正方向であり、入射面内に x 軸がある。位置座標 (x, y) を用いて、物体光 O (x, y, t)、オフアクシス参照光 R (x, y, t)、およびインライン球面波参照光 L (x, y, t) を、それぞれ一般的な形で、下式 (1) (2) (3) で表す。これらの光は互いにコヒーレントな角周波数の光である。各式中の係数、引数、添え字などは、一般的な表現と意味に解釈される。以下の各式において、位置座標 (x, y, z)、空間周波数 (u, v, w)、偏光状態 (= p, s) の明示などは、適宜省略される。

10

【 0 0 5 3 】

【 数 1 】

$$O(x, y, t) = O_0(x, y) \exp[i(\phi_O(x, y) - \omega t)] \quad (1)$$

$$R(x, y, t) = R_0(x, y) \exp[i(\phi_R(x, y) - \omega t)] \quad (2)$$

$$L(x, y, t) = L_0(x, y) \exp[i(\phi_L(x, y) - \omega t)] \quad (3)$$

20

【 0 0 5 4 】

上式における O (x, y, t) と R (x, y, t) が作る合成光の光強度 $I_{OR}(x, y)$ 、および L (x, y, t) と R (x, y, t) が作る合成光の光強度 $I_{LR}(x, y)$ は、それぞれ下式 (4) (5) で表される。これらの光強度 I_{OR} , I_{LR} が、受光素子 4 を通して、ホログラムのデータとして取得される。

【 0 0 5 5 】

【 数 2 】

$$I_{OR}(x, y) = O_0^2 + R_0^2 + O_0 R_0 \exp[i(\phi_O - \phi_R)] + O_0 R_0 \exp[-i(\phi_O - \phi_R)] \quad (4)$$

$$I_{LR}(x, y) = L_0^2 + R_0^2 + L_0 R_0 \exp[i(\phi_L - \phi_R)] + L_0 R_0 \exp[-i(\phi_L - \phi_R)] \quad (5)$$

30

【 0 0 5 6 】

上式 (4) (5) において、右辺の第 1 項は物体光 O またはインライン球面波参照光 L の光強度成分、第 2 項はオフアクシス参照光 R の光強度成分である。また、各式の第 3 項と第 4 項は、それぞれ物体光 O またはインライン球面波参照光 L がオフアクシス参照光 R によって変調されて作られる、直接像成分と共役像成分である。

【 0 0 5 7 】

なお、上記第 3 項の直接像成分が、必要な物体光 O または参照光 L の情報すなわち上式 (1) (3) の $O_0 \exp(i \phi_O)$ と $L_0 \exp(i \phi_L)$ を含む項である。この第 3 項の直接像成分は、その物体光 O または参照光 L の位相部分 $[i \phi_O]$, $[i \phi_L]$ が、これらの光を定義している上式 (1) (3) の位相部分 $[i \phi_O]$, $[i \phi_L]$ と同じである。他方、第 4 項の物体光 O または参照光 L の位相部分 $[-i \phi_O]$, $[-i \phi_L]$ は、これらの光を定義している上式 (1) (3) の位相部分 $[i \phi_O]$, $[i \phi_L]$ の複素共役になっており、このことにより、第 4 項が共役像成分と呼ばれる。

40

【 0 0 5 8 】

オフアクシス参照光 R を用いることにより、そのオフアクシスの効果によって、ホログラムを空間周波数空間において表現したときに直接像成分 (第 3 項) が光強度成分 (第 1, 2 項) および共役像成分 (第 4 項) から分離するホログラムを取得できる。空間周波数

50

フィルタリングを適用して上式(4)(5)の第3項のみを取り出すことにより、物体光Oを記録した物体光複素振幅ホログラム J_{OR} と、インライン球面波参照光Lを記録した複素振幅ホログラム J_{LR} が、それぞれ下式(6)(7)のように得られる。これらの複素振幅ホログラムは、オフアクシス参照光Rの成分を含んでいるホログラムである。

【0059】

【数3】

$$J_{OR}(x, y) = O_0(x, y)R_0(x, y) \exp[i(\phi_O(x, y) - \phi_R(x, y))] \quad (6)$$

$$J_{LR}(x, y) = L_0(x, y)R_0(x, y) \exp[i(\phi_L(x, y) - \phi_R(x, y))] \quad (7)$$

10

【0060】

空間周波数フィルタリングは、上式(4)(5)を空間周波数空間における表現に変換するフーリエ変換と、バンドパスフィルタによるフィルタリングと、その後の、逆フーリエ変換とによって行われる。なお、受光素子4における画素が画素ピッチdで2次元配列されているとすると、受光素子4を用いて記録可能なホログラムの最高空間周波数は、空間周波数 $f_s = 1/d$ となる。

【0061】

上記の式(6)を式(7)で割る除算処理を行うと、式(6)からオフアクシス参照光Rの振幅 R_0 と位相 ϕ_R を取り除くことができる。この処理は、位相の引き算を行う処理、すなわち周波数変換を行う処理であり、ヘテロダイン変調の処理である。これにより、インライン球面波参照光Lに対する物体光Oの複素振幅インラインホログラム J_{OL} が下式(8)のように得られる。

20

【0062】

【数4】

$$J_{OL}(x, y) = (O_0(x, y)/L_0(x, y)) \exp[i(\phi_O(x, y) - \phi_L(x, y))] \quad (8)$$

【0063】

エリブソメトリ装置1において、照明光Q、参照光R、受光素子4の配置を固定した状態で、サンプルである物体3を移動させることにより測定位置を次々と変えて、多数のホログラム I_{OR} を取得する場合、または物体3を取り替えてホログラム I_{OR} を取得する場合、これらのホログラム I_{OR} に対して共通のホログラム I_{LR} を用いて上式(8)の処理をすることができる。つまり、インライン球面波参照光Lについては、1枚のオフアクシスホログラム I_{LR} に記録し、1枚の複素振幅ホログラム J_{LR} を作成しておけばよい。物体光Oについては、異なる物体3や、同じ物体3上の異なる位置からの各物体光O毎に、各1枚のオフアクシスホログラム I_{OR} を取得するだけで、上式(6)に示すように、各物体光Oの複素振幅オフアクシスホログラム J_{OR} を算出できる。さらに上式(7)に示す1枚の複素振幅ホログラム J_{LR} を用いて、上式(8)の複素振幅インラインホログラム J_{OL} を算出できる。

30

【0064】

40

式(8)に $L_0(x, y) \exp(i\phi_L(x, y))$ を乗じることにより、上式(8)からインライン球面波参照光Lの成分を除去することができ、物体光Oの光波だけを含んでいるホログラムが得られる。このホログラムの用語は、光波を再生するために必要なデータを全て含んでいるという意味で用いられている。インライン球面波参照光Lの振幅 $L_0(x, y)$ は、一定値であると見做して残しておくこともできる。振幅 $L_0(x, y)$ は、p, s各偏光間の割り算処理によって相殺されることもあり、エリブソメトリの結果にあまり影響しない。位相成分 $\exp(i\phi_L(x, y))$ は、参照光Lが球面波であることから、その集光点の位置を受光素子4に対して求めておくことにより、容易に関数式の形に求めることができる。

【0065】

50

式(8)に $L_0(x, y) \exp(i\phi_0(x, y))$ を乗じることにより、振幅因子 $L_0(x, y)$ による振幅変調と、位相因子 $\exp(i\phi_0(x, y))$ によるヘテロダイン変調が実行され、受光素子4の表面(ホログラム面、 xy 平面、または面 $z=0$)における物体光Oの光波を表す光波ホログラム $g(x, y)$ が下式(9)のように得られる。光波ホログラム $g(x, y)$ を生成する工程は、物体光Oを再生する工程である。光波ホログラム $g(x, y)$ の絶対値の二乗 $|g(x, y)|^2$ をディスプレイに表示して、物体光Oを画像として見ることができる。

【0066】

【数5】

$$g(x, y) = O_0(x, y) \exp[i(\phi_0(x, y))] \quad (9)$$

10

【0067】

(物体光の平面波展開)

電磁波に関するヘルムホルツ方程式の厳密解として平面波がある。この厳密解である平面波を用いて物体光Oの光波を展開することができる。この平面波展開は、上式(9)の光波ホログラム $g(x, y)$ をフーリエ変換することにより実行される。すなわち、フーリエ変換が平面波展開である。平面波展開の結果、物体光Oについての空間周波数スペクトル $G(u, v)$ が下式(10)のように得られる。空間周波数スペクトル $G(u, v)$ は、波数ベクトル (u, v) を有する平面波の複素振幅であり、複素振幅 $G(u, v)$ とも称される。

20

【0068】

【数6】

$$G(u, v) = \iint g(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (10)$$

【0069】

上式(10)中の u, v は、それぞれ x 方向と y 方向のフーリエ空間周波数である。 z 方向のフーリエ空間周波数 w は、下式(11)のように、平面波の分散式(波数と波長の関係式)から求められる。分散式は、 $(n/\lambda)^2$ の形で屈折率 n を含む。下式(11)は $n=1$ の場合を示し、 λ は光波長である。

30

【0070】

【数7】

$$w(u, v) = \sqrt{1/\lambda^2 - u^2 - v^2} \quad (11)$$

【0071】

(座標回転による光波変換)

次に、図7、図8を参照して、ホログラム面の回転について説明する。第1の実施形態における図1の反射係数算出工程(S6)では、ホログラム面上の座標系において、振幅反射係数比 $R(u, v)$ が得られる。振幅反射係数比 $R(u, v)$ を、 $R(u, v) = \tan \theta \cdot \exp(i\phi)$ と表現した場合、エリプソメトリ角 $\theta(u, v)$ 、 $\phi(u, v)$ がホログラム面上で得られる。以下では、物体3の表面に平行な面上の座標系における振幅反射係数比 $R(u, v)$ 等を求めることを説明する。

40

【0072】

図7に示すように、実質的に物体3の表面に集光点を有する照明光Qすなわち入射光が入射すると、その反射光である物体光Oが物体3から球面波状に放射される。この状況は、一点集中測定の方法に対応する。このような集光点を有する照明光Qは、多数の互いに非平行の波数ベクトルを有する光の集合であり、コーン状になって物体3に入射する。図7は、照明光Qの代表的な、例えば照明光Qの光軸光の波数ベクトルを含む入射面につい

50

ての断面を示し、その断面すなわちエリプソメトリにおける入射面に含まれる任意の波数ベクトルを有する入射光と反射光とについて示している。照明光 Q とその反射光（物体光 O）には、図 7 に表示されない、紙面の一方から入射して反射し、紙面の他方に伝搬する多数の光が含まれ、これらの多数の光が同じ入射角を有する光として偏光解析に用いられる。

【 0 0 7 3 】

物体光 O は、z 軸方向とは逆向きに進んで、受光素子 4 の受光面（z = 0）に入射する。物体 3 は、例えば、その表面に積層された薄膜を有し、薄膜の上下両面が平面であると想定する。物体光 O は、照明光 Q の反射光と考えられる。照明光 Q に含まれる θ_1 、 θ_2 等の入射角（物体 3 の表面に立てた法線 NL と光線との間の角度）を有する光は、それぞれ反射角 θ_1 、 θ_2 等を有する反射光となり、これらの反射光の集合が物体光 O となる。

10

【 0 0 7 4 】

ここで、受光素子 4 の受光面における x y z 座標系に対し、物体 3 の表面（反射面）に平行な x' y' 平面とこれに垂直な z' 軸とからなる x' y' z' 右手系直交座標系を考える。両座標系の原点、および y 軸と y' 軸は、それぞれ一致させる。x y 平面に対する x' y' 平面の傾き角を角度 α で表す。すなわち、物体 3 の表面とホログラム面とは、互いに角度 α をもって対面しており、y 軸は両面の光軸に平行である。

【 0 0 7 5 】

上式 (10) の空間周波数スペクトル $G(u, v)$ は、x y z 座標系において定義された波数ベクトル (u, v) を有する平面波の、ホログラム面（x y 平面、z = 0 平面）における複素振幅である。この複素振幅 $G(u, v)$ を、図 8 に示すように、x' y' z' 座標系において定義された波数ベクトル (u', v') を有する平面波の、物体 3 の表面に平行な x' y' 平面における複素振幅 $H(u', v')$ に変換する。複素振幅 $H(u', v')$ は、複素振幅 $G(u, v)$ を用いて、下式 (12) で表される。 $J(u', v')$ は、下式 (13) で示されるヤコビアンである。ヤコビアンは、回転変換の前後で光波のエネルギー保存を満たすためのものである。また、 w' は上式 (11) により、 u' 、 v' の関数 $w' = w'(u', v')$ として得られる。

20

【 0 0 7 6 】

【 数 8 】

$$H(u', v') = G(u' \cos \alpha + w' \sin \alpha, v') |J(u', v')| \quad (12)$$

30

$$J(u', v') = \cos \alpha + \frac{u'}{w'} \sin \alpha \quad (13)$$

【 0 0 7 7 】

上述のように、ホログラム面における物体光である $g(x, y)$ をフーリエ変換して、物体光を波数ベクトル毎に分離し、個別の波数ベクトル (u, v) を有する平面波の複素振幅 $G(u, v)$ が得られる。さらに、上式 (12) の回転変換によって、 $G(u, v)$ から $H(u', v')$ が得られる。複素振幅 $H(u', v')$ は、物体光 O に含まれる平面波成分であって、物体 3 の表面に平行な x' y' 座標に基づいて定義される波数ベクトル (u', v') を有する平面波である。同様に、照明光空間周波数スペクトル $S(u, v)$ を回転変換して、 (u', v', w') 空間で定義される照明光空間周波数スペクトル $T(u', v')$ が得られる。

40

【 0 0 7 8 】

（角度 α の決定方法）

上述の座標回転を行うには、物体 3 の表面（例えば、薄膜層を有する基板平面）と受光素子 4 の受光面（ホログラム面）とが成す角度 α の値を正確に測定または設定しておく必要がある。角度 α は、屈折率 n が正確に分かっている平板基板を測定試料（物体 3）としてエリプソメトリ方法に従ってエリプソメトリ角 θ の測定値を求める処理により、下記の如く多量のホログラムデータに基づいて高精度で求めることができる。

【 0 0 7 9 】

50

薄膜の無い平板基板は、p 偏光に対する反射係数 r_p が 0 になるブリュースタ角 θ_B を有する。ブリュースタ角 θ_B は、平板基板の屈折率 n を使って $\theta_B = \tan^{-1} n$ と表される。ブリュースタ角 θ_B と一致する入射角 θ に対し、 $r_p = 0$ になり、ブリュースタ角 θ_B 前後の入射角変化に対し、 r_p の値は -180° から 0° に不連続的に変化する。ブリュースタ角 θ_B とその前後の角度を入射角 θ として含む照明光 Q を用いることにより、この、 r_p のゼロ点と r_p の不連続点という各、 r_p が敏感に変化する特異点を含む領域で、エリブソメトリ角 θ の測定値を算出するためのホログラムデータを取得する。

【0080】

物性値が既知の平面基板に対する r_p と θ の入射角依存性は、計算により、計算値曲線として求められる。そこで、角度 θ をパラメータとして、平板基板、例えばガラス BK7 板、に対するホログラムデータを用いて、パラメータ値である角度 θ を変えながら r_p の値を算出し、算出値が計算値曲線と一致するときのパラメータの値を角度 θ として決定する。

10

【0081】

(屈折率 n の測定方法)

逆に、角度 θ に替えて屈折率 n を未知のパラメータとすると、既知の角度 θ の下で、物体 3 (バルク基板またはバルク基板上の薄膜) についての未知の屈折率 n を高精度で測定することができる。屈折率 n は、例えば、次の手順で測定することができる。物体の表面とホログラム面との成す角度 θ を取得する。照明光 Q が物体 3 のブリュースタ角 θ_B を入射角として含む状態で物体 3 を照明して物体光ホログラム I_{OR} を取得する。物体 3 の表面とホログラム面との成す角度 θ を用いて、p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル $G(u, v)$ 、 $r_p = p, s$ と、p 偏光と s 偏光の照明光空間周波数スペクトル $S(u, v)$ 、 $r_p = p, s$ とを、座標回転変換によってそれぞれ物体 3 の表面に平行な面における表現に変換して振幅反射係数比 r_p を算出する。

20

【0082】

振幅反射係数比 r_p から偏光解析用のエリブソメトリ角 θ を照明光 Q に含まれる複数の入射角 θ について取得する。入射角 θ を変数とし照明光 Q を反射する物体 3 の屈折率 n をパラメータとするモデル曲線によってエリブソメトリ角 θ をフィッティングする。最適フィッティングを実現するパラメータ n として、屈折率 n の測定値が得られる。

30

【0083】

(平面波展開を用いた偏光解析法)

ここで改めて、エリブソメトリ方法およびエリブソメトリ装置 1 に登場する各光 (簡略表記による照明光 Q 、参照光 R, L 、物体光 O) に、偏光状態 $r_p = p, s$ を導入する。光の偏光状態 r_p は、図 7 に示した xz 平面または $x'z'$ 平面 (すなわちエリブソメトリにおける入射面) を基準にして、光の電場の振動方向が入射面に平行な p 偏光 ($r_p = p$)、および光の電場の振動方向が入射面に垂直な s 偏光 ($r_p = s$) に分類される。偏光状態は、各記号に付した上付き、または下付きの添え字 r_p, p, s によって表示する。

【0084】

物体光ホログラム I_{OR} と参照光ホログラム I_{LR} のデータは、例えば、図 6 の受光素子 4 を用いて、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能に取得され、これらのデータは、p 偏光のデータと s 偏光のデータとに分離される。これにより、p 偏光と s 偏光の物体光ホログラム I_{OR} 、 $r_p = p, s$ と、p 偏光と s 偏光の参照光ホログラム I_{LR} 、 $r_p = p, s$ とが得られる。これらの各偏光状態 $r_p = p, s$ 毎に分離されたオフアクシスホログラムのデータを用いて、各偏光状態 $r_p = p, s$ 毎に分離された物体光複素振幅ホログラム J_{OR} 、参照光複素振幅ホログラム J_{LR} 、複素振幅インラインホログラム J_{OL} 、光波ホログラム $g(x, y)$ が得られる。

40

【0085】

さらに、各偏光状態 $r_p = p, s$ 毎に分離された空間周波数スペクトル $G(u, v)$ または別称の複素振幅 $G(u, v)$ 、および空間周波数スペクトル $H(u', v')$ または別称の複素振幅 $H(u', v')$ が得られる。入射光である照明光 Q についても、

50

各偏光状態 = p, s 毎に分離された照明光空間周波数スペクトル $S(u, v)$ 、または別称の複素振幅 $S(u, v)$ 、および照明光空間周波数スペクトル $T(u', v')$ または別称の複素振幅 $T(u', v')$ が得られる。

【0086】

エリブソメトリ(偏光解析)で得られるエリブソメトリ角 Ψ は、下式(14)に示す p 偏光の反射前後の振幅反射係数 r_p の s 偏光の反射前後の振幅反射係数 r_s に対する比である振幅反射係数比 $\rho = r_p / r_s$ を極座標表示し、その振幅の因子と位相の因子のそれぞれを表す角度として定義される。振幅反射係数比 ρ は、下式(15)(16)に示すように、振幅反射係数 r_p, r_s の定義に基づき、反射光の複素振幅 $H(u', v')$ と入射光の複素振幅 $T(u', v')$ とを用いて、下式(17)のように書き換えられる。入射光の複素振幅 $T(u', v')$ は、照明光 Q の偏光状態の既知の情報に基づいて算出した照明光空間周波数スペクトル $S(u, v)$ を座標回転したものである。この座標回転に伴い、照明光偏光係数 $\rho_Q = S^s / S^p$ は、 $\rho_Q = T^s / T^p$ で表される。照明光偏光係数 ρ_Q は座標回転に対して不変であり、 $\rho_Q = S^s / S^p = T^s / T^p$ である。

10

【0087】

【数9】

$$\rho(u', v') = \frac{r_p(u', v')}{r_s(u', v')} = \tan \Psi(u', v') \exp(i\Delta(u', v')) \quad (14)$$

20

$$r_p = H^p(u', v') / T^p(u', v') \quad (15)$$

$$r_s = H^s(u', v') / T^s(u', v') \quad (16)$$

$$\rho(u', v') = \tan \Psi(u', v') \exp(i\Delta(u', v')) = \frac{H^p(u', v') / T^p(u', v')}{H^s(u', v') / T^s(u', v')} \quad (17)$$

【0088】

上式(17)は、照明光偏光係数 $\rho_Q = T^s(u', v') / T^p(u', v')$ を用いて、下式(18)となる。

【0089】

30

【数10】

$$\rho(u', v') = \tan \Psi(u', v') \exp(i\Delta(u', v')) = \xi_Q \frac{H^p(u', v')}{H^s(u', v')} \quad (18)$$

【0090】

ここでは、照明光 Q の偏光状態を特定の既知の状態に設定することにより、照明光 Q の複素振幅 T^p, T^s のデータを用いないようにする方法を説明する。物体 3 への入射光である照明光 Q は、通常、直線偏光となるように設定される。これは、図 3 における光学系 2 の偏光子 P 1 を調整してなされる。照明光 Q が、入射面に対して角度 θ の偏光面を有する直線偏光の場合、照明光偏光係数 ρ_Q は、その角度 θ のみで決まる。振幅反射係数比 ρ は、照明光 Q を直線偏光とすることにより、物体光 O の複素振幅 H^p, H^s と角度 θ を用いて計算できる。

40

【0091】

偏光子 P 1 を使って照明光 Q を角度 $\theta = 45^\circ$ の斜め偏光にすると、照明光 Q の p 偏光成分と s 偏光成分の振幅と位相の分布が等しくなり、複素振幅 $T^p(u', v'), T^s(u', v')$ が一致する。すなわち $\rho_Q = T^s / T^p = 1$ となる。従って、 45° 斜め偏光の照明光 Q を用いる場合、振幅反射係数比 ρ は、照明光 Q についての複素振幅 $T^p(u', v'), T^s(u', v')$ のデータを用いることなく、物体光 O についての複素振幅 $H^p(u', v'), H^s(u', v')$ だけを用いて計算することができる。

50

【0092】

上式(14)～(18)における空間周波数(u' , v')は、平面波の波数ベクトルであって、下式(16)で表される入射角 θ に対応する。この入射角 θ は、ダッシュ記号が付されていないが、物体3の表面(x' , y' 面)への入射角である。以下同様に、ダッシュ記号なしで物体3の表面(x' , y' 面)への入射角を表す。互いに異なる波数ベクトル(u' , v')に対し、同じ入射角 θ または異なる入射角 θ が重複して対応する。つまり、照明光Qがコーン状の形態で反射面に入射するので、1つの入射角 θ に複数の(u' , v')の組が対応し得る(図7参照)。振幅反射係 $r_p(u', v')$, $r_s(u', v')$ は、入射角 θ の関数として得られる。従って、物体3の誘電体特性を反映したエリプソメトリ角 α , β が、入射角 θ の関数 $\alpha = \alpha(\theta)$, $\beta = \beta(\theta)$ 、または空間周波数の関数 $\alpha = \alpha(u', v')$, $\beta = \beta(u', v')$ として多数得られる(例えば、図31、図32参照)。

10

【0093】

【数11】

$$\sin \theta = \lambda \sqrt{(u')^2 + (v')^2} \quad (19)$$

【0094】

上述のように、上式(17)または(18)から、物体3への入射角 θ に対応した波数ベクトル(u' , v')毎に、エリプソメトリ角 α , β が得られる。異なる値の波数ベクトル(u' , v')を有する複素振幅 $H(u', v')$, $T(u', v')$ は、球面波状または非平行の照明光Qおよび物体光Oに多数含まれている。本実施形態のエリプソメトリ方法やエリプソメトリ装置1において、波数ベクトル(u' , v')の異なる多数の複素振幅 $H(u', v')$ を導出するために、物体光ホログラム I_{OR} が用いられる。物体光ホログラム I_{OR} は、光の波長や偏光状態を1条件に固定したワンショットで取得することができる。つまり、本実施形態によれば、照明光Qの集光点を物体3の表面に位置させる一点集中測定により、任意の特定の測定点に対して、値の異なる多数の入射角 θ についてのエリプソメトリ角 α , β が、ワンショットの物体光ホログラム I_{OR} から取得でき、しかも各入射角 θ あたり複数の測定値のデータが大きなサンプル数で同時に得られる。

20

30

【0095】

(エリプソメトリ装置の変形例)

図9、図10、図11は、エリプソメトリ装置1の変形例を示す。この変形例のエリプソメトリ装置1は、上述の図3、図4、図5に示したエリプソメトリ装置1における参照光R用の光学系のうち、ミラーM1とマイクロミラーM3以外の光学素子について、照明光Q用の光学素子を共用する。すなわち、参照光Rは、図3のミラーM2、偏光子P2、レンズ24、25、および集光レンズ26に替えて、照明光Q用の光学素子である偏光子P1、レンズ21、22、および集光レンズ23を伝搬する。

【0096】

レーザ20からのコヒーレント光20aは、ビームスプリッタBSで分岐され、ミラーM1によって反射され、照明光Q用の光路に斜め入射されて、参照光Rとして伝搬する。集光レンズ23から出射された参照光Rは、例えば、その集光点の位置で、マイクロミラーM3によって反射されて、受光素子4の方向に向かう。参照光ホログラム I_{LR} を取得するためインライン球面波参照光Lを伝搬させる光学系は、上述の図5に示したエリプソメトリ装置1における参照光L用の光学系と同様である。この変形例のエリプソメトリ装置1は、物体光ホログラム I_{OR} を取得する光学系の構成が簡単になる。

40

【0097】

(第3の実施形態)

図12、図13、図14は、第3の実施形態に係るエリプソメトリ装置1を示す。この第3の実施形態のエリプソメトリ装置1は、第2の実施形態で示した偏光子アレイPA(

50

図6)が備わっていない通常の受光素子を用いて、p偏光とs偏光のホログラムを、別時間ではなく、同時に記録するものである。この場合、オフアクシス参照光Rは、同一光源から放たれた参照光R用の光を、p偏光の参照光 R^p と、s偏光の参照光 R^s とに分離した後に、レンズを使って異なる点に集光される。それぞれの集光点(仮想光源)から放たれる参照光 R , $= p, s$ が、球面波状のオフアクシス参照光Rとして用いられる。

【0098】

この第3の実施形態は、偏光した参照光Rが、異なる偏光状態にある物体光Oとは干渉することではなく、同じ偏光状態の物体光Oとのみ干渉する、という原理に基づく。従って、p偏光とs偏光のホログラムは、互いに重ね合わせた状態で、1枚のホログラムに、同時にワンショット記録することができる。ワンショット記録したホログラムから、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとを分離して抽出するために、p偏光とs偏光のオフアクシス参照光 R , $= p, s$ が互いに異なる位置に集光点を有するオフアクシス関係にあることが用いられる。

10

【0099】

互いに集光点の位置が異なる複数の参照光を用いて記録したホログラムの空間周波数スペクトルは、各集光点に対応して、空間周波数空間の異なる領域に現れる。従って、本実施形態のエリブソメトリ装置1を用いて同時記録したホログラムをフーリエ変換することにより、p偏光とs偏光の各ホログラムを、偏光毎に分離して取り出すことができる。これは、次のように言い換えられる。干渉縞をフーリエ変換して空間周波数空間における表現にすることにより、受光した光が波数ベクトルによって表現され、各光がどこから飛来したか、すなわち、各光の光源である集光点を見ることができる。

20

【0100】

第3の実施形態をより具体的に説明する。図12に示すエリブソメトリ装置1は、上述の第2の実施形態(図3、図4、図5)のエリブソメトリ装置1において、参照光R用の光路に、ウォラストンプリズムWPを備えている。ウォラストンプリズムWPは、参照光R用の光路における、光のビーム径を拡大するレンズ24, 25の後であって、レンズ25からの光を集光させる集光レンズ26の手前に、挿入配置されている。

【0101】

参照光Rの光路上のレンズ24, 25、ウォラストンプリズムWP、および集光レンズ26は、オフアクシス参照光Rを互いにオフアクシスとなるp偏光のオフアクシス参照光 R^p と、s偏光のオフアクシス参照光 R^s とに分割する参照光分割部RXを構成する。参照光分割部RXは、ウォラストンプリズムWPを用いてオフアクシス参照光Rをp偏光とs偏光とに分割する。参照光分割部RXは、物体光ホログラム I_{OR} と参照光ホログラム I_{LR} の各々が、p, s各偏光のホログラムに分離可能なホログラムとして取得されるように機能する偏光設定器である。エリブソメトリ装置1は、参照光分割部RXによって分割されたp偏光とs偏光のオフアクシス参照光 R , $= p, s$ を受光面上で互いに重ねて用いて、各ホログラム I_{OR}, I_{LR} を、それぞれ取得する。

30

【0102】

また、本実施形態のエリブソメトリ装置1は、第2の実施形態とは異なり、受光素子4が多数の偏光子Pa, Pbを互いに交互に2次元配置した偏光子アレイPAを備えていない。言い換えると、本実施形態のエリブソメトリ装置1は、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとに分離可能な物体光ホログラム I_{OR} を取得するために、偏光子アレイPAに替えて、ウォラストンプリズムWPを備えている。同様に、エリブソメトリ装置1は、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとに分離可能な参照光ホログラム I_{LR} を取得できる。

40

【0103】

図13は、マイクロミラーM3を受光素子4側から見た状況を示している。図13に示すように、ウォラストンプリズムWPは、互いに光学軸が直交する2つの直角プリズムPr1, Pr2を傾斜面同士で接合して接合面IFPを構成し、偏光方向による屈折角の違いによって、接合面IFPを通過する光を偏光状態の異なる2つの偏光に分離する。参照

50

光 R は、直線偏光状態でウォラストンプリズム WP に入射し、それぞれ p 偏光の参照光 R^p と s 偏光の参照光 R^s とに分離されて集光レンズ 26 に入射し、マイクロミラー M3 上の互いに離れた位置に、すなわち互いにオフアクシスとなる位置に、集光する。

【0104】

マイクロミラー M3 上の 2 点に集光した p 偏光と s 偏光の参照光 R^p , R^s は、マイクロミラー M3 で反射され、異なる 2 つ点光源から放たれた球面波参照光として、受光素子 4 に向けて伝播する。照明光 Q は、マイクロミラー M3 の下方の物体 3 の表面における集光点 Q_f に照射されている。照明光 Q の集光点 Q_f と、p 偏光と s 偏光の参照光 R^p , R^s の集光点とは、互いにオフアクシスの関係にあり、受光素子 4 から見て、3 つの集光点が互いに重ならない異なる位置に配置されている。

10

【0105】

本実施形態のエリブソメトリ装置 1 を用いるエリブソメトリ方法は、以下の如く表現される。物体光 O のホログラムは、球面波状のオフアクシス参照光 R を互いにオフアクシスとなる p 偏光のオフアクシス参照光 R^p と、s 偏光のオフアクシス参照光 R^s とに分離し、分離された p 偏光と s 偏光のオフアクシス参照光 R^p , R^s を用いて 1 枚の物体光ホログラム I_{O_R} として取得される。

【0106】

インライン球面波参照光 L のホログラムは、物体光の場合と同様に、p 偏光と s 偏光のオフアクシス参照光 R^p , R^s を用いて 1 枚の参照光ホログラム I_{L_R} として取得される。物体光ホログラム I_{O_R} と参照光ホログラム I_{L_R} の各々の、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムへの分離は、p 偏光と s 偏光のオフアクシス参照光 R^p , R^s が互いにオフアクシスであることに基づくフィルタリングによって行われる。つまり、図 14 に示すように、集光点が異なる光は互いにフィルタリングでき、分離できる。

20

【0107】

図 14 (a) (b) は、空間周波数空間におけるオフアクシスホログラムの p 偏光と s 偏光の共役像成分 a_p , a_s、光強度成分 b、および p 偏光と s 偏光の直接像成分 c_p , c_s を示す。p 偏光と s 偏光とを同時記録したホログラムに空間周波数フィルタリングを適用して s 偏光と p 偏光の直接像成分 c_p , c_s、つまり s 偏光と p 偏光の複素振幅インラインホログラムを分離して取り出すことができる。この空間周波数フィルタリングにより、共役像成分と光強度成分（直流成分）だけでなく、ホログラムに記録された迷光や記録の際に生じたノイズも除去される。

30

【0108】

本実施形態によれば、集光点の位置が異なる p 偏光と s 偏光の参照光 R^p , R^s を用いて、ホログラムを取得することにより、偏光子アレイ PA を備えない通常の受光素子 4 を用いて、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能に、ホログラムを取得できる。また、偏光子アレイ PA を用いないので、p 偏光と s 偏光のホログラムを、それぞれ受光素子 4 の全ての画素を使って、互いに重ね合わせた状態で、記録できる。

【0109】

偏光子アレイ PA を備えた受光素子 4 は、市販機種が少なく高価であり、偏光子アレイ PA の消光比が単体の高性能偏光子と比べて 1 桁以上低く精密測定のためには不十分である。本実施形態のエリブソメトリ装置 1 は、これらの課題を解決できる。

40

【0110】

(第 4 の実施形態)

図 15 は、第 4 の実施形態に係るエリブソメトリ装置 1 を示す。この実施形態のエリブソメトリ装置 1 は、上述の第 3 の実施形態のエリブソメトリ装置 1 において、マイクロミラー M3 に替えて、ハーフミラー HM を用いている。参照光 R は、ハーフミラー HM によって反射されて、受光素子 4 に入射する。参照光 R の集光点と照明光 Q の集光点とは、幾何学的に離れているが、光学的には互いに近接しており、かつ、オフアクシスの関係にある。物体光 O は、ハーフミラー HM を透過して、受光素子 4 に入射する。また、インライン球面波参照光 L は、物体光 O と同様に、ハーフミラー HM を透過して、受光素子 4 に入

50

射する。

【0111】

本実施形態のエリプソメトリ装置1によれば、マイクロミラーM3を用いた光学系と比べて、ハーフミラーHMを、集光レンズ26の集光点や照明光Qの集光点の位置よりも離して、例えば、受光素子4寄りに配置できる。従って、物体3の測定面の上方空間を広くすることができ、光学系の設計や調節が容易になり、試料(物体3)を配置するスペースも広くすることができる。

【0112】

(変形例)

図16は、ハーフミラーHMを用いる図15のエリプソメトリ装置1の変形例を示す。この変形例のエリプソメトリ装置1は、ウォラストンプリズムWPを備えてなく、また、1つの受光素子4に替えて、偏光子P4を前面に有する受光素子4と偏光子P5を前面に有する受光素子4とを備えるものである。偏光子P4を有する受光素子4は、ハーフミラーHMを透過する物体光Oまたはインライン球面波参照光Lと、ハーフミラーHMで反射する参照光Rを、偏光子P4を通して受光する。偏光子P5を有する受光素子4は、ハーフミラーHMで反射する物体光Oまたはインライン球面波参照光Lと、ハーフミラーHMを透過する参照光Rを、偏光子P5を通して受光する。

10

【0113】

偏光子P4を有する受光素子4は、例えば、p偏光のホログラムを取得し、偏光子P5を有する受光素子4は、例えば、s偏光のホログラムを取得する。この変形例によれば、ウォラストンプリズムWPおよび偏光子アレイPAを用いることなく、ホログラムをp偏光のホログラムとs偏光のホログラムとに分離した状態で取得することができる。

20

【0114】

(第5の実施形態と変形例)

図17、図18は、第5の実施形態に係るエリプソメトリ装置1とその変形例を示す。図17に示すエリプソメトリ装置1は、上述の図3、図4、図5に示したエリプソメトリ装置1の照明光Q用の光学系を、より広い面積を照明可能にする構成としたものである。この実施形態は、広範囲分布測定の方法を実施する装置構成を有する。照明光Qは、レンズ21によって拡径され、レンズ22によって集光されて、その集光点の手前で物体3を照明する構成とされており、図3の集光レンズ23を用いていない。参照光ホログラム I_{LR} を取得するためのインライン球面波参照光L用の光学系は、照明光Q用の光学系を、物体3の表面に関して鏡像の位置に配置する構成を有する。インライン球面波参照光Lは、照明光Qの集光点に対応する位置に集光点を有する。

30

【0115】

このエリプソメトリ装置1は、物体3における広い面積について、物体光ホログラム I_{OR} を取得できる。照明光Qが照明する物体3上の各点において、互いに異なる入射角、より厳密には互いに異なる波数ベクトル (u', v') を有する照明光Qによって照明され、各入射角に対応する反射角を有する物体光Oのデータが、1枚の物体光ホログラム I_{OR} のデータとしてワンショットで取得される。この実施形態では、物体3上の各点において、それぞれ1種類の波数ベクトル (u', v') を有する照明光Qによって照

40

【0116】

図18に示す変形例は、図17の集光用のレンズ22に替えて、凹面鏡M8を用いるものである。照明光Qの光学系は、ビームスプリッタBS、偏光子P1、光のビーム径を拡大するレンズ21、22、拡大用のレンズ22からの光を収束させる集光レンズ23、反射鏡M7、および凹面鏡M8をこの順に備えている。反射鏡M7は、拡大用のレンズ22から出射されて集光レンズ23で収束された後の球面波状に広がる照明光Qを凹面鏡M8に向けて反射する。凹面鏡M8は、反射鏡M7からの照明光Qを集光し、その集光点の手前で物体3を照明する。また、参照光Rの光路には、集光レンズ26の手前に、ウォラス

50

トンプリズムWPを有する。従って、受光素子4は、偏光子アレイPAを備えていない。この変形例によれば、大口径集光用のレンズ22を用いていないので、レンズ22の収差の影響を受けない軽量の構成とすることができる。

【0117】

この実施形態および変形例のエリブソメトリ装置1は、例えば、大面積薄膜のための高速膜厚分布測定に適用することができる。これらのエリブソメトリ装置1は、薄膜の膜厚分布を測定するため、口径の大きい光で薄膜を照射し、薄膜からの反射光を集光点の後方で記録する。口径の大きいレンズや楕円面ミラーまたはパラボリックミラーを使って作成した球面波を、集光点の手前で薄膜に照射する。薄膜で反射された光は、伝播した後に1点に集光する。この反射光を集光点の後方において、ホログラムとしてワンショット記録し、記録されたホログラムから、反射面に2次元的に分布した各点毎に、波数ベクトルが異なる反射平面波光を用いて、偏光解析用のエリブソメトリ角 θ を求めることができる。

10

【0118】

球面波または球面波状の照明光Qによって、その集光点を外して物体3、例えば、薄膜の表面を照射すると、入射角は薄膜上の点それぞれにおいて異なることになる。従って、空間周波数(波数ベクトル)と広範囲に分布した薄膜上の各点とを、1対1に対応付けることができ、広範囲分布測定ができる。反射光すなわち物体光を分解して成る平面波の偏光状態を使って、平面波の空間周波数に対応する測定点において、膜厚を決定し、2次元薄膜平面上の膜厚分布や膜厚の不均一性を解析することができる。

20

【0119】

また、図17、図18の装置において、物体3を平面に沿って2次元的に所定間隔で移動させて、照明光Qに対する物体3の表面の位置を相対的に順次変化させることにより、物体3の表面の各点に対する入射角 θ を一括して変化させることができる。従って、物体3を所定間隔で移動させる毎に物体光Oのホログラムを記録すると、反射面上の全点において、記録したホログラムの枚数分の他種類の入射角 θ に対するデータが一括して得られる。また、第2の実施形態に示した一点集中測定のためのホログラムデータ取得と、本実施形態の広範囲分布測定のためのホログラムデータ取得とを組み合わせると、より高度な測定ができる。例えば、一点集中測定を1回または物体3を移動させて多数回行って光学物性値の基準測定値を決定し、広範囲分布測定を1回行って、その基準値からの変動を広い範囲で観察することができる。これらのエリブソメトリ方法により、より広い面積に渡って、膜厚分布や膜厚の不均一性などを解析するためのデータを短時間で蓄積でき、データ蓄積によって解析精度を高めることができる。

30

【0120】

(第6の実施形態)

図19は、第6の実施形態に係るエリブソメトリ装置1を示す。このエリブソメトリ装置1は、第5の実施形態とは、物体3の広い面積を照明する点で同じであるが、照明光Qの集光点が物体3よりも手前に位置する点で異なる。物体3の表面近くに、例えばその表面に平行に、ハーフミラーHMが配置されている。受光素子4は、物体光O、すなわち照明光Qの反射光を受ける位置に配置されている。

40

【0121】

照明光Qは、例えば、45°直線偏光である。参照光Rは、第3の実施形態(図13参照)と同様に、p, s各偏光(参照光R, $\theta = p, s$)がマイクロミラーM3上の異なる位置に集光して互いにオフアクシスの関係となるように、ウォラストンプリズムWPと集光レンズ26とを用いて分割されている。

【0122】

照明光Qは、集光レンズ23から出て集光点を形成した後、広がりながら伝搬し、一部がハーフミラーHMで反射され、他の一部がハーフミラーHMを透過して物体3を照射する。物体光Oは、照明光Qに照射された物体表面から放射されてハーフミラーHMを透過し、集光点を形成することなく、広がりながら受光素子4に向かう。

50

【0123】

参照光 R は、照明光 Q の集光点の近くに配置されたマイクロミラー M 3 の位置で集光し、反射されて、照明光 Q と同様に、広がりながら物体 3 に向かい、その一部がハーフミラー HM で反射されて広がりながら、物体光 O と同様に、受光素子 4 に向かう。ハーフミラー HM は、物体 3 によって反射されていない参照光 R を受光素子 4 に入射させるために設けられている。

【0124】

受光素子 4 に向かう物体光 O と参照光 R とは、大きく拡がって伝搬するので、物体 3 の測定面からの必要な光を全て受光するには、例えば、移動機構を用いて受光素子 4 の位置を変えて、各位置でホログラムを取得する必要がある。移動機構と受光素子 4 とに替えて、複数の受光素子 4 を固定配置するか、大きな受光面を有する受光素子 4 を用いてもよい。

10

【0125】

参照光 R と照明光 Q は、大開口数ホログラムかつ空間周波数帯域がより狭くなるホログラムを記録するために、互いに近接した 3 つの集光点（その 2 つは参照光 R の分割された各 p, s 偏光）から、いずれも物体 3 を照明する方向に伝播される。受光素子 4 には、参照光 R と照明光 Q のそれぞれについて、ハーフミラー HM で反射する光、物体 3 の表面で反射する光と、およびハーフミラー HM と物体 3 の表面との間で多重反射する光が入射する。

【0126】

これらの光による干渉縞は、取得された物体光オフアクシスホログラム I_{OR} に記録されている。ホログラム I_{OR} のデータに周波数フィルタリングを適用することにより、例えば、ハーフミラー HM で 1 回反射した各オフアクシス参照光 R^p, R^s と、照明光 Q が物体 3 の表面で 1 回反射してなる物体光 O と、が作る干渉縞成分のみを、分離して取り出すことができる。

20

【0127】

本実施形態のエリプソメトリ装置 1 によれば、第 5 の実施形態とその変形例における口径の大きいレンズ 2 2 や凹面鏡 M 8 が不要になる。本実施形態のエリプソメトリ装置 1 は、例えば、大口径薄膜試料の高速測定に適する。ただし、大口径のホログラムを記録するために、受光素子 4 を 2 次元的に配列した大口径受光装置、または受光素子 4 を 2 次元的に移動する駆動機構が必要になる。

30

【0128】

（第 7 の実施形態）

図 20 (a) (b) は、第 7 の実施形態に係るエリプソメトリ装置 1 を示す。このエリプソメトリ装置 1 は、複数（本実施形態では 3）の照明光 Q_1, Q_2, Q_3 を照射するための照明用光学系と、照明用光学系の各々に対応した受光素子 $4_1, 4_2, 4_3$ とを備えている。オフアクシス参照光 R、およびインライン球面波参照光 L についても、照明用光学系の各々に対応する光学系を備えている。これらの光学系は、例えば、物体 3 の特定領域を広角の入射角度のもとで、広角の反射光を同時に測定可能とするように構成されている。このような複数照明光を用いてホログラムの同時ワンショット記録をすることにより、例えば、広範囲の屈折率値を有する各種試料を次々と測定する際に、装置構成や測定条件を変更することなく迅速に行うことができる。

40

【0129】

（第 8 の実施形態）

図 21 は、第 8 の実施形態に係るエリプソメトリ方法およびエリプソメトリ装置によって得られる物体光のオフアクシスホログラムの例を示す。このエリプソメトリ方法および装置は、波長の異なる複数のコヒーレント光を同時に用いて物体光ホログラム I_{OR} の取得をワンショットで行い、同様に、その波長の異なる複数のコヒーレント光を同時に用いて参照光ホログラム I_{LR} の取得をワンショットで行う。

【0130】

50

この方法に用いるエリブソメトリ装置 1 は、例えば、第 3 の実施形態に示したエリブソメトリ装置 1 において、レーザ 20 を多波長光源とすればよい。このような装置と方法を用いて、 n 種類の波長 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ を有する照明光 Q 、参照光 R, L によって取得されたホログラムは、波長の間隔等を適切に設定することにより、図 20 に示すように、空間周波数空間において、各成分を分離できる。空間周波数空間における共役像成分や直接像成分は、偏光 $= p, s$ 毎、および波長 $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ 毎に、互いに分離される。

【0131】

複数波長の光を用いることにより、エリブソメトリ角 θ の波長依存性すなわちエネルギー依存性を得ることができる。このような測定で測定点数を増やすことにより、測定精度を向上できる。また、単一波長光による測定においては偏光特性の周期性に起因する不確定性の問題があるが、本実施形態の方法と装置によれば、この問題を回避でき、測定値を確定することができる。従来方法においては、例えば、屈折率 n の波長依存性 $n = n(\lambda)$ をモデル化して用いているが、本方法および装置によれば、屈折率 n の波長依存性 $n = n(\lambda)$ そのものを測定値として得ることができる。

10

【0132】

(第 9 の実施形態)

図 22 は、第 9 の実施形態に係るエリブソメトリ方法に用いるエリブソメトリ装置を示す。本実施形態は、インライン球面波参照光 L に照明光 Q を兼用するエリブソメトリ方法とエリブソメトリ装置 1 に関する。上述の、例えば第 1 の実施形態の図 5 やその変形例の図 11 に示したインライン球面波参照光 L を生成伝播させるための光学系は、空間的に広がっているのでコンパクト化が望まれ、またホログラム $I_{L,R}$ の取得頻度が少ないので光学素子の稼働率が低く改善が望まれる。本実施形態は、この課題を解決するものである。

20

【0133】

図 22 に示すエリブソメトリ装置 1 の光学系 2 は、例えば、第 3 の実施形態のエリブソメトリ装置 1 の光学系 2 において、物体 3 の位置に反射鏡 M_L を配置したものである。照明光 Q をホログラムデータ処理の基準光となるインライン球面波参照光 L として用いて参照光ホログラム $I_{L,R}$ を取得するには、物体 3 の位置に反射鏡 M_L を配置し、その反射鏡 M_L によって照明光 Q を受光素子 4 (ホログラム面) に向けて反射させればよい。この場合、照明光 Q は、集光レンズ 23 によって基準光たり得る球面波とする。また、反射鏡は、偏光に対する反射特性が既知のものとする。反射鏡の反射特性は、ホログラムデータを処理する際に既知であればよい。

30

【0134】

各ホログラムの取得は、照明光 Q として球面波光を用いて物体光ホログラム $I_{O,R}$ を取得し、偏光に対する反射特性が既知である反射鏡 M_L を用いて、球面波照明光 Q をホログラム面に向けて反射させることにより、照明光 Q をインライン球面波参照光 L として用いて、参照光ホログラム $I_{L,R}$ を取得して行われる。

【0135】

反射鏡 M_L の反射特性のデータは、振幅反射係数比 r_{mk} を算出する際に、インライン球面波参照光 L に対する反射鏡 M_L による反射の影響を補正するために用いられる。補正処理を以下に説明する。ここで、反射鏡 M_L の各偏光に対する反射特性、すなわち振幅反射係数 $r_{mk}, k = p, s$ 、および反射鏡 M_L で反射された参照光 L の空間周波数スペクトルである複素振幅 $H_m(u', v')$ 、 $k = p, s$ 、を導入する。反射鏡 M_L で反射された参照光 L の複素振幅 H_m は、反射鏡 M_L で反射された場合の照明光 Q の複素振幅である。

40

【0136】

反射鏡 M_L で反射されて成る参照光 L を用いる場合、振幅反射係数比 r_{mk} には、下式 (20) (21) (22) の如く、複素振幅 $H(u', v')$ 、 $H_m(u', v')$ 、 $T(u', v')$ 、および振幅反射係数 r_{mk} が関与する。これらの諸量は、ホログラム面を物体 3 の表面に平行な面に回転変換した後の表現とされている。複素振幅 $H(u',$

50

, v'), $T(u', v')$ は、前出の式(15)(16)に記載のものと同一である。エリプソメトリ装置1には、これらの式で示される補正処理を行うソフトウェアを、補正処理部として備えることができる。

【0137】

【数12】

$$r_{mp}(u', v') = H_m^p(u', v') / T^p(u', v') \quad (20)$$

$$r_{ms}(u', v') = H_m^s(u', v') / T^s(u', v') \quad (21)$$

$$\rho(u', v') = \tan \Psi(u', v') \exp(i\Delta(u', v')) = \frac{H^p(u', v') / T^p(u', v')}{H^s(u', v') / T^s(u', v')} \quad 10$$

$$= \frac{H^p(u', v') H_m^s(u', v') r_{mp}(u', v')}{H^s(u', v') H_m^p(u', v') r_{ms}(u', v')} \quad (22)$$

【0138】

本実施形態によれば、インライン球面波参照光Lを生成伝搬させるための空間、特に物体3の背後空間を確保して光学系を配置する必要がなく、コンパクトにエリプソメトリ装置1の光学系2を構成することができる。また、本実施形態のエリプソメトリ装置1は、参照光ホログラム I_{LR} を取得する際に配置される反射鏡MLを備えるだけで、照明光Qを生成伝播させる光学系をそのまま用いることができるので、インライン球面波参照光L用の光学系を大幅に簡略化でき低コスト化できる。反射鏡MLと補正処理部とを用いる構成は、他の実施形態や変形例、例えば、図9、図10のエリプソメトリ装置1に適用することができる。

20

30

40

50

【0139】

(第10の実施形態)

図23乃至図25を参照して、光波ホログラムgと空間サンプリング間隔 Δ について説明する。上述の各実施形態における球面波状の照明光Qと球面波状の参照光Rとは、集光点がホログラム面の手前(前面側)にあって互いに近接している。このような物体光Oと参照光Rとの干渉縞は、例えばニュートンリングの中心付近の明暗パターンの如く、ホログラム面において緩やかに変化する。球面波状の光同士の干渉縞のホログラムは、大開口数であっても、球面波照明光と非球面波参照光とを用いる場合よりも、空間周波数帯域を狭くできる。ここで、物体光Oに関するホログラムの開口数NAは、物体光Oの仮想点光源からホログラム面への垂線と仮想点光源からホログラム面の周辺点に向かう線とが成す角 θ を用いて、 $NA = \sin \theta$ である。

【0140】

物体光Oと参照光Rの干渉縞のホログラムは、球面波状の光の集光点を互いに近接させることによって空間周波数帯域が狭められている。このようなホログラムから、物体光Oのみのホログラムを単独で取り出すと、空間周波数帯域が広がる。このことから、物体光Oの波面を表す上式(9)の光波ホログラム $g(x, y)$ は、上式(8)の複素振幅インラインホログラム $J_{OL}(x, y)$ に比べて、より広い空間周波数帯域を有することができる。

【0141】

光波ホログラム $g(x, y)$ の空間変化は、ホログラム中心から離れるにつれて大きくなりホログラムの端で最大になる。ホログラムの開口数をNA、光波長を λ とすると光波ホログラム $g(x, y)$ の最大空間周波数 f_M は、 $f_M = NA / \lambda$ で表される。そして、この広帯域の光波ホログラム $g(x, y)$ を離散値で表すためには、サンプリング定理の制約から、空間サンプリング間隔 Δ を、例えばデータ補間を用いて、 $\Delta = 1 / (2 f_M) = \lambda / (2 NA)$ 以下の値に設定する必要がある。サンプリング定理の制約を打開するために、サンプリング点増加とデータ補完が行われる。狭い帯域の複素振幅インラインホログラム J_{OL} は、受光素子4の画素ピッチdで緩やかに変化するので、データ補間におい

ては 3 次式を用いた高速計算が可能である。

【 0 1 4 2 】

図 2 3 (a) (b) は、光波ホログラム $g(x, y)$ を得るために、データ補間を用いてホログラムの空間サンプリング間隔を小さくする方法を示す。複素振幅インラインホログラム J_{OL} は、結像レンズを用いることなく得られている。従って、空間サンプリング間隔を細分化して光波長程度まで小さくしても歪みは発生しない。そこで、実質的に画素数を増やす画素数増大工程によってサンプリング間隔を小さくすることができる。

【 0 1 4 3 】

画素数増大工程において、受光素子 4 の画素ピッチ d に対応する空間サンプリング間隔 d を有する複素振幅インラインホログラム J_{OL} に対して、空間サンプリング間隔 d を細分化して空間サンプリング間隔とする。その後、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間を行って実質的に画素数を増やす。データ補間の方法として、画像処理における周知の 3 次式によるデータ補間や sinc 関数によるデータ補間を用いることができる。データ補間として sinc 補間を用いれば、3 次式を用いた補間に比べて数値計算に時間がかかるが、より正確な結果を得ることができる。

【 0 1 4 4 】

複素振幅インラインホログラム J_{OL} に対してデータ補間によって画素数を増やした結果を、改めて複素振幅インラインホログラム J_{OL} とする。なお、受光素子 4 の画素ピッチ d は、画素の配列方向 (x, y 方向) で互いに異なってもよく、空間サンプリング間隔も画素の配列方向で互いに異なるものとして行うことができる。画素数を増やした複素振幅インラインホログラム J_{OL} は、画素数増大工程の処理を行わない場合のホログラムに較べて、上述の画素ピッチ d と空間サンプリング間隔との比に基づいて、歪みなしで倍率 d / 倍に拡大された像、すなわち分解能を高めた像を記録したホログラムとなる。

【 0 1 4 5 】

(高速処理)

図 2 4 (a) (b)、図 2 5 (a) (b) は、光波ホログラム $g(x, y)$ を高速に処理する方法を示す。高速フーリエ変換 (FFT) を用いてホログラムデータを処理する場合、必要なサンプリング点数が大きくなりすぎると、光波ホログラム $g(x, y)$ の処理が困難になる。ところで、異なる周波数帯域に記録されたそれぞれの情報は空間的に重ねても失われずに保存される。このことを利用すると、広帯域の大開口数物体光である光波ホログラム $g(x, y)$ を重ねて、広帯域の微小ホログラム (データ点数の少ないホログラム) を作成することができる。また、ホログラムは、分割した各領域の各々に、光波を再生するための情報を保持している。

【 0 1 4 6 】

そこで、図 2 4 (a) に示すように、光波ホログラム $g(x, y)$ を幅 d_x, d_y の複数枚の微小ホログラム g_i に分割し、図 2 4 (b) (c) に示すように、各微小ホログラム g_i を互いに重ね合わせて合成微小ホログラムを生成する。この合成微小ホログラムに対して、上式 (10) に基づく計算を行えば、計算時間を短縮して複素振幅 $G(u, v)$ が得られる。図 2 5 (a) は、幅 D の光波ホログラム $g(x, y)$ を幅 d_x, d_y の微小ホログラム g_1, g_2, g_3 に分割する様子を示す。この光波ホログラム $g(x, y)$ は、1 枚で光波 (再生像 $3'$) を再生する。

【 0 1 4 7 】

このような光波ホログラム $g(x, y)$ を、図 2 5 (b) に示すように、例えば x 方向に幅 d_x だけずらしながら重ねたホログラムは、幅 d_x の周期的なホログラムになり、多数の同じ再生像 $3'$ を幅 d_x の間隔ごとに再生できる。計算点数は、重ね合わせた微小ホログラム g_i の枚数の逆数分に圧縮される。つまり、 n 枚重ねると、計算量は、 $1/n$ になる。

【 0 1 4 8 】

(離散フーリエ変換による高速処理)

上記の複素振幅 $G(u, v)$ の算出は、空間サンプリング間隔の細分化とデータ補間、

10

20

30

40

50

ホログラムの分割と重ね合せによる合成微小ホログラムの作成、およびホログラムのフーリエ変換による平面波展開処理を経ている。この算出方法は、サンプリング間隔の細分化とデータ補間およびホログラムの重ね合せの計算に時間を要する。データ補間を行わずに微小分割ホログラム g_i から直接的に複素振幅 $G(u, v)$ を求めることができれば、算出の高速化が図られる。

【0149】

上式(9)で表される光波ホログラム g は、中央部から端に行くほどその空間周波数が高くなる。球面波参照光 L の焦点 z_L から各分割ホログラム g_i の中心に向けて照射した平行光 L_i を考えると、物体光 O と平行光 L_i とのなす角度は小さくなる。平行光 L_i の位相を $\phi_i(x, y)$ で表し、ホログラム g_i に位相因子 $\exp(-i\phi_i)$ を乗じると、 $g_i \exp(-i\phi_i)$ の空間周波数は低くなる。

10

【0150】

下式(23)に示すように、画素数 $N \times N$ のホログラム g_i における画素 (k, l) の座標 (x, y) を、 $(x, y) = (kd, ld)$ で表す。また、下式(24)に示すように、整数値の組 (m_{ic}, n_{ic}) を導入する。これにより、下式(25)に示すように、画素 (k, l) における位相 $\phi_i(k, l)$ を、整数化した値 (m_{ic}, n_{ic}) を用いて表す。

【0151】

【数13】

$$x = kd, \quad y = ld \quad (23)$$

20

$$m_{ic} = INT(\Delta \sin \theta_{ix} / \lambda), \quad n_{ic} = INT(\Delta \sin \theta_{iy} / \lambda) \quad (24)$$

$$\phi_i(k, l) = 2\pi \left(\frac{m_{ic}k + n_{ic}l}{N} \right) \quad (25)$$

【0152】

ここに、 θ_{ix} と θ_{iy} はそれぞれホログラム g_i へ入射する平行光 L_i の x 方向と y 方向の入射角を表す。サンプリング点 $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ と、 $l = 0, 1, 2, \dots, N-1$ における値 $g_i(k, l) \exp(-i\phi_i(k, l))$ 、および、その離散フーリエ変換 $G_i'(m, n)$ は、それぞれ下式(26)(27)で与えられる。

30

【0153】

【数14】

$$G_i'(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \{g_i(k, l) \exp[-i2\pi(\frac{m_{ic}k + n_{ic}l}{N})]\} \exp[-i2\pi(\frac{mk + nl}{N})] \quad (26)$$

$$g_i(k, l) \exp[-i2\pi(\frac{m_{ic}k + n_{ic}l}{N})] \quad (27)$$

40

$$= \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} G_i'(m, n) \exp[i2\pi(\frac{mk + nl}{N})]$$

【0154】

上式(26)から分かるように $G_i'(m, n)$ は、 m, n に対して周期 N の周期関数になる。空間周波数の低い関数 $g_i \exp(-i\phi_i)$ の最大空間周波数 f_M は不等式 $f_M < 1/(2d)$ を満たすのでサンプリング定理に従って、区間 $-N/2 < m < N/2$ と $-N/2 < n < N/2$ における空間周波数成分 $G_i'(m, n)$ を用いて、周期関数 $g_i \exp(-i\phi_i)$ を正確に記述できる。つまり、周期関数 $g_i \exp(-i\phi_i)$ の空間

50

周波数成分として $G_i'(m, n)$ が得られる。また、周波数の高い関数 g_i の空間周波数成分として、上式 (27) より $G_i'(m + m_{ic}, n + n_{ic})$ が得られる。

【0155】

各ホログラム g_i の周波数成分 $G_i'(m + m_{ic}, n + n_{ic})$ はお互いに重なり合わないので、広い周波数帯域に亘って $G_i'(m + m_{ic}, n + n_{ic})$ を足し合わせることによって合成微小ホログラムの複素振幅 G を求めることができる。この方法では、サンプリング間隔の細分化やホログラムのデータ補間を行う必要がなく、複素振幅 G を高速に計算することが可能になる。

【0156】

(他の高速処理)

空間周波数成分 $G_i'(m, n)$ を計算する際には、不等式 $f_M < 1 / (2d)$ を満足させるために高周波数の関数 g_i を低周波数の関数 $g_i \exp(-i \dots)$ に変換した。ここでは、関数 g_i のサンプリング値 $g_i(k, l)$ に対する、下式 (28) の離散フーリエ変換を考える。

【0157】

【数15】

$$G_i(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} g_i(k, l) \exp[-i2\pi(\frac{mk + nl}{N})] \quad (28)$$

10

20

【0158】

高周波数の関数 g_i の最大空間周波数 f_M は不等式 $f_M < 1 / (2d)$ を満たさないの
で、区間 $-N/2 < m < N/2$ 、 $-N/2 < n < N/2$ における空間周波数成分 $G_i(m, n)$ を用いて周期関数 g_i を正確に表すことはできない。しかしながら、 $G_i(m, n)$ は上式 (28) から分かるように、 m, n に対して周期 N の周期関数となり、この周期性および上式 (26) (28) を使って $G_i(m, n) = G_i'(m + m_{ic}, n + n_{ic})$ が得られる。従って、高周波数の関数 g_i を区間 $m_{ic} - N/2 < m < m_{ic} + N/2$ と $n_{ic} - N/2 < n < n_{ic} + N/2$ における周波数成分 $G_i(m, n)$ を用いて正確に表すことが可能になる。周波数 f_M が不等式 $f_M < 1 / (2d)$ を満たさない場合においても、 $G_i(m, n)$ の周期性と上式 (28) を使って関数 g_i の周波数成分 $G_i(m, n)$ を直接的に求めることができる。上式 (28) は式 (26) と比較して簡単であり、式 (28) を用いると空間周波数成分をより高速に計算することができる。

30

【0159】

(周波数フィルタリングによるノイズ除去)

図26、図27を参照して、エリプソメトリ方法におけるノイズ除去を説明する。球面波照明光 Q を用いて照明する場合、物体光 $O(x, y, t)$ は球面波に近い光になる。また、複素振幅インラインホログラム J_{OL} は、球面波に近い物体光 O と球面波参照光 L との、インラインの、干渉縞のホログラムと見做すことができる。従って、複素振幅インラインホログラム J_{OL} の空間周波数幅は非常に狭くなる。一方、ホログラムを取得する際に生じるノイズは、広い空間周波数幅の全域に亘って分布する。このホログラムとノイズの空間周波数分布の違いを利用して、ノイズを大幅に取り除くことができる。

40

【0160】

図26(a)(b)は、物体光ホログラム I_{OR} を、フーリエ変換して、周波数空間における絶対値の2乗として表示している。共役像成分 a (図中左) と光強度成分 b (図中央)、および直接像成分 c (図中右) が、現れている。物体光ホログラム I_{OR} を参照光ホログラム I_{LR} で除算すると、図27(a)(b)に示すように、物体光ホログラム I_{OR} がヘテロダイン変調され、直接像成分 c が周波数空間 (u, v) の原点付近に移動する。この直接像成分 c は、上式 (8) の複素振幅インラインホログラム J_{OL} に対応する。

50

【0161】

除算で得られたホログラムに、空間周波数フィルタリングを適用し、原点近傍の複素振幅インラインホログラム $J_{o,l}$ のみを分離して取り出す。この空間周波数フィルタリングの計算処理により、共役像成分と光強度成分を取り除くことができ、さらに、ホログラム取得の際に混入した迷光やノイズの成分を、ほとんど完全に取り除くことができる。

【0162】

(第11の実施形態：エリプソメトリ装置)

図28は、第11の実施形態に係るエリプソメトリ装置1のブロック構成を示す。エリプソメトリ装置1は、物体3からの物体光Oのデータを取得して保存するデータ取得部10と、記録された物体光Oの偏光解析を行うデータ解析部11と、これらを制御する計算機5と、各データやプログラム(ソフトウェア)を記憶するメモリ5a(保存部)と、を備えている。

10

【0163】

データ取得部10は、光源10a、光学系10b、受光素子10c、および偏光設定部10dを備えている。データ取得部10の各部は、上述の図3、図5、図6等に示した、レーザ20(光源10a)、光学系2(光学系10b)、受光素子4(受光素子10c)、偏光子アレイPA(偏光設定器10d)に対応する。また、偏光設定器10dには、偏光子アレイPAの他に、参照光分割部RX、ウォラストンプリズムWP、偏光子P1, p2, p3等が含まれる。

【0164】

データ解析部11は、光波再生部11a、物体光平面波展開部11b、偏光係数生成部11c、演算部11d、および表示部11eを備えている。表示部11eは、液晶表示装置などの一般的な、画像を表示できるディスプレイである。

20

【0165】

また、光波再生部11aは、偏光分離部12a、複素振幅生成部12b、インライン化部12c、および光波ホログラム生成部12d、を備えている。演算部11dは、回転変換部13a、エリプソメトリ角算出部13b、およびフィッティング部13c、を備えている。

【0166】

データ解析部11の各部11a~11d, 12a~12d、および13a~13cは、計算機5上のソフトウェアによって構成される。計算機5は、通常の汎用計算機が備えている入出力装置、通信装置、記憶媒体装置などを備えている。

30

【0167】

データ取得部10は、上述の図1、図9、図12等に基づいて説明した、オフアクシスホログラムのデータを、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとに分離可能に、または分離した状態で取得する。データ取得部10は、照明工程(S1)の処理、ホログラム取得工程(S2)の処理を行う。

【0168】

また、データ解析部11の各部は、例えば、上述の図1、図2、図8、図22乃至図27に基づいて説明した処理を行う。例えば、光波再生部11aは光波再生工程(S3)の処理、物体光平面波展開部11bは物体光スペクトル生成工程(S4)の処理、偏光係数生成部11cは偏光係数生成工程(S5)の処理、演算部11dはエリプソメトリ角算出工程(S6)の処理を行う。

40

【0169】

光波再生部11aにおいて、例えば、偏光分離部12aは偏光分離工程(S31)の処理、複素振幅生成部12bは複素振幅ホログラム生成工程(S32)の処理、インライン化部12cはインライン化工程(S33)の処理、および光波ホログラム生成部12dは光波ホログラム生成工程(S34)の処理などを行う。

【0170】

演算部11dは、例えば、式(14)~(17)に基づいて説明した処理を行い、演算

50

部 1 1 d の回転変換部 1 3 a は図 7、図 8、および式 (1 2) に基づいて説明した処理、エリブソメトリ角算出部 1 3 b は式 (1 7) (1 8) に基づいて説明した処理を行う。また、演算部 1 1 d のフィッティング部 1 3 c は、エリブソメトリ角 θ を用いて膜厚 d や屈折率 n を求める処理を行う (図 3 3 乃至図 4 2 参照)。

【 0 1 7 1 】

(第 1 2 の実施形態)

本実施形態は、エリブソメトリ方法および装置を、例えば微細構造を有するシリコン半導体デバイスや MEMS デバイスなどの、物体 3 の表面構造の顕微観察と偏光解析とに適用するものである。本実施形態は、顕微鏡とエリブソメータとを合わせた装置または観察方法に関しており、顕微エリブソメトリまたは構造エリブソメトリなどと称することができる。この顕微エリブソメトリは、一点集中測定の方法と広範囲分布測定の方法の間に位置づけることができる。

10

【 0 1 7 2 】

(顕微鏡としての機能)

本実施形態に用いられるエリブソメトリ装置 1 は、例えば、図 3、図 1 2 の装置、図 1 7、図 1 8 の装置などにおいて、物体 3 の表面における照明光 Q の照射スポットのサイズを、顕微観察のサイズまたは物体表面上の構造を含むような、適宜のサイズとしたものであればよい。スポットサイズは、受光素子 4 の開口数との兼ね合いで、大き過ぎると解像度が低下して像が不鮮明になり、小さ過ぎると構造が見えなくなる。

20

【 0 1 7 3 】

球面波状の照明光 Q の照射スポットを適宜のサイズとして、物体光ホログラム I_{OR} と参照光ホログラム I_{LR} とを取得し保存する。また、物体 3 を平面に沿って 2 次元的に移動させながら多数枚の物体光ホログラム I_{OR} を取得することにより、微細構造をもつ物体上の各点における膜厚や光学定数について解析するためのデータを蓄積する。これらのホログラムから下記の手順に従って物体光を再生し、再生した p 偏光と s 偏光の物体光を用いて、物体面上の各点における偏光状態および画像を求めることができ、2 次元的な微細構造を持つ試料の膜厚や光学定数などの測定や観察が可能になる。

【 0 1 7 4 】

(物体光再生)

まず、図 1、図 2 の手順に倣って、オフアクシスホログラム I_{OR} 、 I_{LR} から p 偏光と s 偏光の光波ホログラム $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ から p 偏光と s 偏光の物体光空間周波数スペクトル $G(u, v)$ 、 $G(u, v)$ を生成する処理は、図 2 3、図 2 4 の処理を経て行われる。これらの処理は、 p 偏光と s 偏光のホログラムの各々について同様に行われるものであり、図 2 3、図 2 4 では偏光状態 $= p, s$ の記載が省略されている。

30

【 0 1 7 5 】

図 2 3 (a) (b) に示すように、 p 偏光と s 偏光の光波ホログラム $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ について、空間サンプリング間隔を細分化し、細分化によって生じた新たなサンプリング点に対してデータ補間して、実質的にサンプリング点数を増大させる (画素数増大工程)。

40

【 0 1 7 6 】

次に、上述の図 2 4 (a) (b) (c) に示すように、サンプリング点数を増大させた p 偏光と s 偏光の各光波ホログラム $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ を、幅 d_x 、 d_y の複数枚の微小ホログラム $g_i(x, y)$ 、 $g_i(x, y)$ 、 $g_i(x, y)$ に分割し (ホログラム分割工程)、分割によって生じた微小ホログラム $g_i(x, y)$ 、 $g_i(x, y)$ 、 $g_i(x, y)$ を p 偏光と s 偏光のそれぞれについて互いに重ね合わせて p 偏光と s 偏光の合成微小ホログラム $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ を生成する (ホログラム合成工程)。

【 0 1 7 7 】

次に、上術の式 (1 0) における光波ホログラム $g(x, y)$ に替えて p 偏光と s 偏光の合成微小ホログラム $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $g(x, y)$ をフーリエ変換することにより、合成

50

微小ホログラム (x, y) から物体光 O についての p 偏光と s 偏光の空間周波数スペクトル $G(u, v)$, $(u, v) = (p, s)$ をそれぞれ得る。空間周波数スペクトル $G(u, v)$ は、変換関数 $G(u, v)$ と呼ばれる。

【0178】

次に、物体光 O の光軸と物体 3 の観察対象表面（試料平面）とが交わる位置 $z = z_s$ における物体光 O の、p 偏光と s 偏光の顕微画像再生用の光波、すなわち再生光波 $h(x, y, z_s)$, $(u, v) = (p, s)$ を求める。再生光波 $h(x, y, z_s)$ は、平面波の分散関係である上述の式 (11) を満たす空間周波数 (u, v, w) および変換関数 $G(u, v)$, $(u, v) = (p, s)$ を用いて、下式 (29) によって生成される。なお、再生光波 $h(x, y, z_s)$ の生成位置 $z = z_s$ は、任意に設定できる。

10

【0179】

【数16】

$$h(x, y, z_s) = \iint G(u, v) \exp[i2\pi w(u, v)z_s] \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv \quad (29)$$

【0180】

再生光波 $h(x, y, z_s)$ は、物体光 O の空間周波数スペクトルとして求めた変換関数 $G(u, v)$ の重み付けによって、平面波を重ね合わせた波である。再生光波 $h(x, y, z)$ は、ヘルムホルツ方程式の厳密解であり、受光素子 4 の受光面すなわちホログラム面における光波 $g(x, y, 0)$ を境界条件として満たす。つまり、 $h(x, y, 0) = g(x, y, 0)$ である。

20

【0181】

再生光波 $h(x, y, z_s)$ を、上述の図 7、図 8 に示した座標回転と同様に座標変換して、それぞれ物体 3 の表面に平行な面における表現に変換して成る p 偏光と s 偏光の回転再生光波 $b(x', y')$, $(u, v) = (p, s)$ を求める。回転再生光波 $b(x', y')$ は、その絶対値の 2 乗 $|b|^2$ によって求めた光の強度を表示することにより、物体 3 の表面（反射面）を無歪の画像として見ることができる。また、2 次元的に移動させて順次記録した多数枚の物体光ホログラム I_{OR} に対して同様の処理を行い、試料平面上の各点における微細構造を画像として観察することができる。

【0182】

（構造エリブソメトリ）

振幅反射係数比 τ は、照射スポット内の各点において、各点の位置座標 (x', y') 、またはその点への入射角 (θ, ϕ) 毎に得られる。すなわち、照明光偏光係数 ρ_Q と、回転再生光波 $b(x', y')$, $(u, v) = (p, s)$ と、を用いて、s 偏光の回転再生光波 b^s に対する p 偏光の回転再生光波 b^p の比として、振幅反射係数比 $\tau = \rho_Q b^p(x', y') / b^s(x', y')$ が得られる。振幅反射係数比 τ から、 $\tau = \tan \alpha \cdot \exp(i\phi)$ の表式に基づいて、エリブソメトリ角 (α, ϕ) , (x', y') の面分布が得られる。また、2 次元的に移動させて順次記録した多数枚の物体光のホログラム I_{OR} に対して同様の処理を行い、試料平面上の各点に対してエリブソメトリ角 (α, ϕ) のデータを得ることができる。

30

40

【0183】

なお、球面波状の照明光 Q によって照明された物体 3 上の照射スポットの各点 (x', y') への入射光は、各点毎に異なる入射角 (θ, ϕ) を有する。入射角 (θ, ϕ) は、照明光 Q、物体 3、および受光素子 4 の配置により、光軸位置 $(x', y') = (0, 0)$ 、すなわち照射スポットの中心位置において $(\theta, \phi) = (0, 0)$ である（図 7 参照）。また、照射スポットの中心を離れた位置 (x', y') では、その位置ずれに応じた所定の補正角 d を用いて、 $(\theta, \phi) = (\theta_0, \phi_0) + d$ となる。

【0184】

本実施形態のエリブソメトリ方法および装置によれば、ワンショットの物体光ホログラム I_{OR} から、照明光 Q の照射スポットのサイズ内における、エリブソメトリ角 (α, ϕ) の

50

面分布が得られ、また微細構造を観察できる画像が得られる。従って、薄膜全体の微細構造を確認するために、測定点または観察点の数よりも少ない枚数のホログラムを取得すればよく、ホログラム記録枚数や計算量を大幅に低減できる。また、本実施形態によれば、薄膜上の構造を観察しながら各部の膜厚や光学定数を求めることが短時間で可能となる。

【0185】

(実施例1)

図29乃至図34は、実施例1を示す。実施例1では、上述の図9、図10、図11に示すエリプソメトリ装置1と同等の装置を使って、結晶シリコンSi基板上の自然酸化シリコンSiO₂層の膜厚測定を実施した。本実施例で使用した受光素子4は、画素毎に偏光子を備えるものではない。受光素子4は、有効画素数6576(H)×4384(V)、画素サイズ5.5μmのモノクロカメラリンクCCDカメラである。光源のレーザ20は、波長473nm、出力20mWの半導体励起固体レーザである。偏光子P1を使って光源のレーザ20から放たれた斜め偏光レーザ光をp偏光またはs偏光に切り替えて、それぞれの偏光に対して個別にホログラムI^p_{OR}とI^s_{OR}のデータを取得した。

10

【0186】

従って、このデータの取得の場合、ホログラムI_{OR}は、p偏光のホログラムと、s偏光のホログラムとに、はじめから分離された状態で取得されている。このようにp偏光とs偏光に対応する2枚のホログラムを別々に記録する場合、参照光Rと照明光Qのそれぞれの光学系を外部振動の影響から隔離する必要がある。そこで、図9に示したように、集光レンズ23(対物レンズ)を共用する構成のエリプソメトリ装置1を使って、参照光Rと照明光Qを同一の経路で伝搬させるようにした。

20

【0187】

自然酸化シリコンSiO₂層からのs偏光オフアキシスホログラムI^s_{OR}の周波数空間における共役像成分aと光強度成分bおよび直接像成分cが、上述の図26(a)(b)に示されている。また、上述の図27(a)(b)は、ヘテロダイン変調を行って直接像成分cを周波数空間の原点付近に移動させた後の周波数空間における各成分を示している。これらのp偏光とs偏光のホログラムに、空間周波数フィルタリングを適用して原点近傍の直接像成分c、つまり複素振幅インラインホログラムJ_{OL}、=p,sのみを分離して取り出した。

30

【0188】

取り出したJ_{OL}を使ってホログラム面上のp偏光の光波とs偏光の光波とを求め、それぞれの光波をフーリエ展開し、p偏光とs偏光に対して空間周波数スペクトルGを求めた。図29、図30は、それぞれ、周波数空間(u,v)において空間周波数スペクトルGを使って求めたエリプソメトリ角(u,v),(u,v)の値の分布を濃淡で示す。また、図31、図32は、それぞれ、(u,v),(u,v)に対して図7、図8に示した座標回転を行って得たエリプソメトリ角(u',v'),(u',v')の値の濃淡分布を示す。この座標回転の処理は、パラメータとして決定された後述の角度θ₁の値を用いて行われている。

【0189】

光波長をλとすると空間周波数(u',v')をもつ平面波の入射角θは、上式(19)の $\sin \theta = ((u')^2 + (v')^2)^{1/2}$ で表されるので、入射角θが一定の点が、原点を中心とする円上に並ぶ。つまり、原点を中心とする円上では入射角θは一定になる。エリプソメトリ角θ₁,θ₃も、円上で一定の値となる。そこで、例えば、各円上の複数のサンプル点についての平均値を、各円すなわち各入射角θに対するエリプソメトリ角として採用することができる。これらのことは、図31、図32において、その濃淡分布が同心円に沿って一様になっていることから分かる。また、濃淡分布から、エリプソメトリ角θ₁,θ₃が入射角θの関数になっていることが分かる。図中の角度θ₁,θ₃は、それぞれ図7に示した角度θ₁,θ₃に対応している。

40

【0190】

図33、図34は、それぞれエリプソメトリ角θ₁,θ₃の、入射角θに対する依存性を示

50

す。自然酸化シリコン SiO_2 層の膜厚 d をパラメータとして、計算曲線と測定曲線と比較し、入射角 θ の記録範囲における θ の計算値と測定値の間の平均二乗誤差が最小になるときのパラメータ d の値を膜厚の測定値として求めた。この処理には、エリブソメトリ装置 1 におけるフィッティング部 13c (図 28) を用いた。

【0191】

実施例で使用した試料では、自然酸化シリコン SiO_2 層の膜厚は $d = 3.22 \text{ nm}$ と求まった。図 33、図 34 から、エリブソメトリ角 θ の測定値が、入射角 θ の広い範囲に亘って計算値と非常によく一致していることが分かる。本実施例では、薄膜試料平面と CCD 平面 (ホログラム面) が成す角度 α (図 7) は測定しなかった。そこで、自然酸化シリコン SiO_2 層の屈折率の値 $n = 1.4637$ を与えて、膜厚 d と角度 α をパラメータとして測定値曲線と計算値曲線のフィッティングを行った。また、シリコン基板の屈折率 n として、 $n = 4.466$ を用いた。2つの曲線が一致するときのパラメータ値から、膜厚 d と角度 α の値を求めた。角度 α の値を正確に測定または設定しておく、計算曲線と測定曲線の比較から、膜厚 d の他に、酸化シリコンの屈折率 n の値を決定できる。

10

【0192】

本実施例のように、p 偏光ホログラムと s 偏光ホログラムを別々に、1 ショットではなく 2 ショットで、記録する場合、光路上のわずかな環境変化によってエリブソメトリ角 θ (位相差) に、一定のズレ (未知定数の付加による値のシフト) が生じる。そこで、計算値曲線と測定値曲線とを比較するフィッティング処理の際に、このズレを考慮してエリブソメトリ角 θ の測定値曲線を上下に平行移動させることにより、このようなズレに対処した。図 34 に示す計算値曲線と測定値曲線との比較において、 $\theta = -90^\circ$ 付近に不動点が見られる。

20

【0193】

(実施例 2)

図 35、図 36 は、実施例 2 を示す。実施例 2 では、実施例 1 と同じく上述の図 9、図 10、図 11 に示すエリブソメトリ装置 1 と同等の装置を使って、ガラス N-BK7 板にコーティングされたフッ化マグネシウム MgF_2 単層反射防止膜の膜厚測定を行った。図 35、図 36 は、それぞれエリブソメトリ角 θ の入射角 θ に対する依存性を示す。計算処理に当たり、ガラス基板 N-BK7 の屈折率 $n = 1.517$ 、フッ化マグネシウムの屈折率 $n = 1.374$ を用いた。実施例 1 と同様のフィッティング処理により、試料の膜厚 $d = 113.6 \text{ nm}$ が得られた。この反射防止膜の測定においても、実施例 1 の自然酸化シリコン SiO_2 層の測定と同様に、入射角 θ の広い範囲に亘ってエリブソメトリ角 θ の測定値が計算値と非常によく一致している。

30

【0194】

比較例として、従来分光エリブソメータを使って、同じ試料の MgF_2 単層反射防止膜の膜厚測定を行い、測定値 $d_1 = 114 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ を得た。エリブソメトリ装置 1 を用いた実施例 1 の測定結果は、従来分光エリブソメータを用いた測定値 d_1 に対し誤差範囲 $\pm 3 \text{ nm}$ 内で一致している。

【0195】

(実施例 3)

図 37 乃至図 40 は、実施例 3 を示す。実施例 3 では、上述の図 12 に示すエリブソメトリ装置 1 と同等の装置を使って、厚さ 1 mm のガラス BK7 板上の酸化シリコン SiO_2 薄膜を試料として膜厚測定を行った。使用した光源のレーザ 20 は、波長 473 nm の半導体励起固体レーザである。物体光のホログラム I_{OR} は、s 偏光物体光と p 偏光物体光とを、同時記録して取得した。上述の図 14 (a) (b) は、本実施例で取得した物体光ホログラム I_{OR} について示しており、空間周波数空間における各成分 (共役像成分 a_p , a_s 、光強度成分 b 、および直接像成分 c_p , c_s) が、それぞれ分離されている。

40

【0196】

同時記録したホログラム I_{OR} に空間周波数フィルタリングを適用して、s 偏光と p 偏光の直接像成分 c_p , c_s をそれぞれ分離して、p 偏光と s 偏光のそれぞれの複素振幅ホ

50

ログラム $J_{OR, p, s}$ を取り出した。この空間周波数フィルタリングにより、共役像成分、光強度成分、さらにホログラムに記録された迷光、および記録の際に生じたノイズが取り除かれる。取り出した複素振幅ホログラム $J_{OR, p, s}$ を使って、既知の角度 θ と、実施例 1, 2 に示した処理と同様の処理によって、入射角 θ 毎にエリブソメトリ角 (u', v') , (u', v') の測定値を得た。既知の角度 θ は、屈折率が既知のガラス BK7 板を用いて別途の測定で得た（上述「角度 θ の決定方法」参照）。

【0197】

酸化シリコン SiO_2 薄膜の膜厚を決定するため、膜厚 d と屈折率 n をパラメータとして、 θ の計算値を求めた。入射角 θ の記録範囲における θ の計算値と測定値の間の平均二乗誤差、および θ の計算値と測定値の間の平均二乗誤差が最小になるときのパラメータ d, n の各値を、膜厚 d と屈折率 n の測定値として決定した。測定値として、膜厚 $d = 87 \text{ nm}$ 、屈折率 $n = 1.474$ が得られた。

10

【0198】

図 37、図 38 は、それぞれエリブソメトリ各 θ , ϕ について、酸化シリコン SiO_2 薄膜について得た測定値と、屈折率 $n = 1.474$ を固定し、3 種類の膜厚 d について得た計算値とを、入射角 θ の依存性として示す。また、図 39、図 40 は、それぞれエリブソメトリ各 θ , ϕ について、酸化シリコン SiO_2 薄膜について得た測定値と、膜厚 $d = 87 \text{ nm}$ を固定し、3 種類の屈折率 n について得た計算値とを、入射角 θ の依存性として示す。図 37 乃至図 40 に示すように、シリコン SiO_2 薄膜について決定された膜厚 $d = 87 \text{ nm}$ および屈折率 $n = 1.474$ によるエリブソメトリ角 θ , ϕ の計算値が、入射角 θ の広い範囲に亘って、計算値と良く一致していることが分かる。

20

【0199】

（実施例 4）

図 41、図 42 は、実施例 4 を示す。本実施例 4 では、繰り返し測定精度の評価を行った。薄膜測定、例えば膜厚と屈折率の測定、の精度に影響を及ぼす要因として、レーザの安定性や受光素子 4 で生じる雑音、試料薄膜表面の粗度、偏光子の消光比、データ解析で生じる計算誤差、などが挙げられる。これらの影響を評価するために、繰り返し測定の実験をした。

【0200】

実験では、厚さ 1 mm のガラス BK7 板上の SiO_2 薄膜を試料として、波長 $\lambda = 473 \text{ nm}$ のレーザ光を使って、実施例 3 と同様の条件で、ホログラム取得を繰り返した。試料の測定位置は固定し、約 20 秒間隔で物体光ホログラム I_{OR} を 30 枚取得し、参照光ホログラム I_{LR} を 1 枚取得した。これらのホログラムデータを用いて、各物体光ホログラム I_{OR} 毎に、膜厚と屈折率を算出した。

30

【0201】

図 41 は屈折率 n の測定結果を示し、図 42 は膜厚 d の測定結果を示す。これらの測定から、膜厚 $d = 87.01 \text{ nm}$ 、標準偏差 0.13 nm 、および屈折率 $n = 1.4740$ 、標準偏差 0.0002 という結果が得られ、高い繰り返し精度が確認された。

【0202】

（本発明のエリブソメトリ装置および方法の特徴）

本発明の装置および方法は、ホログラフィを用いるものであり、物体光 O のデータを p 偏光と s 偏光に分離可能なホログラムのデータとして、ワンショットデジタルホログラフィを使って、少ないショット数で多量な振幅位相データを正確に取得することができる。ホログラムデータを、コンピュータを使った後処理の数値計算によって、各 p, s 偏光毎に、照明光 Q の入射角に関連付けられる空間周波数が異なる多数の平面波に展開することができ、 p 偏光と s 偏光に含まれる多数の平面波の振幅と位相が求まる。従って、ホログラフィと平面波展開とを用いて、単一波長光による多数の入射角 θ を用いて偏光解析をすることができる。この点、多波長光を用いる従来の分光エリブソメータとは異なる。

40

【0203】

本発明の装置および方法により、以下が達成される。

50

(1) ホログラムのワンショット記録によって、薄膜の瞬時測定または高速測定が可能になる。すなわち、従来の分光エリプソメータは、回転偏光子や回転補償子を使用するので測定時間が長く、1つの測定点に対して数秒から数百秒の時間を要するので実時間計測は難しい。この欠点を補うために光弾性変調器を使った分光エリプソメータが開発されているが、装置が高価になり、温度変化に弱く、また、光弾性変調器のキャリブレーションが必要である。本発明の装置および方法によれば、測定時間はホログラム記録のフレームレートより決まり、高速CCDの使用によって高速な薄膜データ取得が可能になる。

【0204】

(2) 装置の価格を低く抑えることが可能になる。分光器、回転偏光子、光弾性変調器などの高価な器具を使用しないので、装置の価格を低く抑えることができる。偏光子付きCCDまたはウォラストンプリズムを用いることもでき、用いない構成とすることもできる。また、装置構成が簡単であり、測定時の装置の補正操作を簡略化できる。

10

【0205】

(3) CCDによる多量のホログラムデータの取得と、後処理の数値計算によるノイズ除去および光波の平面波展開により、精度の高い膜厚測定が可能になる。すなわち、記録ホログラムの空間周波数フィルタリングを行って記録時に生じた迷光やノイズを除去でき、ホログラムに含まれる多量のデータを使った数値計算により、反射光を異なる空間周波数をもつ多数の、例えば、数万～数千万個の平面波に分解できるので、薄膜からの反射光の偏光状態を高精度で取得できる。また、誘電関数のモデル化、例えば屈折率の波長依存性 $n = n(\lambda)$ のモデル化が不要であり、従って、誘電関数のモデル化によるデータ解析の複雑さや解析結果の不確定さを避けることができる。

20

【0206】

(4) 測定の空間分解能を高めることが可能になる。すなわち、単一波長レーザ光を使用する構成とすることができるので、照明光のスポットサイズをミクロン程度に縮小でき、測定の空間分解能を、そのミクロン程度のスポットサイズまで高めることができる。

【0207】

(5) 広い薄膜に対する瞬時記録または高速連続記録が可能になる。すなわち、口径の大きいレンズや凹面鏡を使って、薄膜を数cm～数十cm口径の広い範囲で照射し、薄膜からの球面波反射光を集光点の前方または後方においてホログラムとしてワンショット記録して偏光解析に用いることができる。記録された光の平面波展開を行うことにより、反射光を異なる空間周波数をもつ平面波に分解し、それぞれの平面波を偏光解析に用いる。空間周波数と薄膜上の測定点を1対1に対応づけることができる。分解した平面波毎の偏光情報と平面波の空間周波数の情報とを用いて、照射した範囲内の測定点の膜厚を決定でき、薄膜の膜厚分布や膜厚不均一性を解析することが可能になる。

30

【0208】

(6) 膜厚測定の感度と精度が光波長に依存することに対応するため、膜厚測定に適した波長域のレーザ光を使用することにより、高精度の測定が可能である。また、多波長光を用いたホログラムの一括取得とその後の解析による測定が可能であり、光波長をパラメータとして変化させることにより、光定数の光波長依存性を測定することができる。

【0209】

本発明の装置および方法は、デジタルホログラフィを用いてp偏光とs偏光の振幅位相情報を正確に瞬時記録し、膨大な記録データを活用して数値解析することにより、下記課題を達成できる。

40

- (1) 偏光子の機械的回転および光の弾性変調の不要化。
- (2) 分光器を使用しない簡潔で安価な構成。
- (3) 微小スポットサイズの照明光による空間分解能の高上。
- (4) 誘電関数のモデル化を必要としないデータ解析。
- (5) 大面積薄膜の偏光解析のための高速膜厚分布測定。
- (6) 波長可変レーザ光を使った光学定数の光波長依存性の測定。

【0210】

50

本発明には、以下の技術が含まれる。

(1) 薄膜で反射した p 偏光と s 偏光の光を、1 枚のオフアクシスホログラムに、p 偏光のホログラムと s 偏光のホログラムとに分離可能にワンショットまたは少数ショットで記録し、記録ホログラムから p 偏光オフアクシスホログラムと s 偏光オフアクシスホログラムを分離して取り出す技術。

(2) 分離した偏光オフアクシスホログラムをヘテロダイン変調して薄膜反射光と参照光がインラインになるように変換し、空間周波数フィルタリングを行って反射光のみを記録した複素振幅インラインホログラムを分離して取り出し、ホログラム中に記録された迷光やノイズを取り除く技術。

(3) ノイズ除去後の p 偏光と s 偏光の光波を平面波展開し、それぞれの空間周波数に対して p 偏光成分と s 偏光成分との振幅比と位相差を求めて偏光状態を表す技術。

(4) それぞれの空間周波数に対する p 偏光成分と s 偏光成分との振幅比と位相差を使ってデータ解析し、膜厚や光学定数の値を決定する技術。

(5) 広い薄膜からの反射光をワンショットまたは数ショットで記録し、平面波展開を適用して記録ホログラムから広い薄膜上の膜厚分布を取得する技術。

(6) 波長が異なる複数の単一波長レーザ光を薄膜の膜厚や膜構造に応じて使い分けて光波長の情報を活用して測定精度を高める技術、および波長可変レーザを使って測定対象物質の光定数の光波長依存性を測定する技術。

【0211】

本発明は、以下の技術を用いることができる。

(1) レーザとして緑色のパルスレーザを用いて、受光素子（例えば CCD）の受光面に、オフアクシス参照光と微小被写体から放射される物体光とを、レンズ等を通さずに、直接照射し、参照光と物体光が作る干渉縞を大開口数オフアクシスホログラムとしてワンショットまたは少数ショットで記録する技術。

(2) 記録ホログラムに空間ヘテロダイン変調と空間周波数フィルタリングを適用して大開口数複素振幅インラインホログラムを求める技術。

(3) ホログラムを分割した後にサンプリング間隔の細分化とデータ補間およびホログラムの空間ヘテロダイン変調を行う技術。

(4) それぞれの分割微小ホログラムの重ね合わせを行って無歪高分解能自由焦点画像を再生するための合成微小ホログラムを作成する技術。

【0212】

(物体光 O のデータを導出する方法について)

オフアクシスホログラムである物体光ホログラム I_{O_R} から、物体光 O のみのデータを取得するには、参照光 R のデータが必要になる。参照光 R のデータが得られれば、物体光ホログラム I_{O_R} から参照光 R の成分を除去することができる。参照光 R のデータを得て物体光 O のデータを得る方法として、以下の 3 方法が考えられる。以下の方法 1、方法 2、方法 3 のいずれも、偏光状態 = p, s 毎に処理が行われる。また、方法 2、方法 3 では、フーリエ変換、フーリエ逆変換、座標変換（図 7、図 8 参照）、および振幅反射係数の計算が加わる。

【0213】

(方法 1)

インライン球面波参照光 L を用いて、参照光 R をホログラムに記録する。図 5、図 11 に示すような光学系 2 を使ってホログラム I_{L_R} を取得する。インライン球面波参照光 L は、例えば、その集光点（球面波の点光源）の位置から受光素子 4 までの距離を用いて、数式で正確に表すことができるものとする。この参照光 L のデータと、ホログラム I_{L_R} のデータとから、参照光 R のデータを得る。参照光 R のデータを用いて、物体光ホログラム I_{O_R} のデータから物体光 O のデータを得る。

【0214】

(方法 2)

照明光 Q をミラーで反射させて記録する。この方法 2 は、第 9 の実施形態（図 22）に

10

20

30

40

50

において説明した方法である。図3、図9、図17に示すような光学系2において、物体3（試料）をミラー（物体ミラーと称する、図22の反射鏡MLに対応する）に置き換えて、照明光Qの物体ミラーからの反射光L'を、ホログラム $I_{L',R}$ に記録する。この方法2は、方法1における参照光Lに替えて、照明光Qと物体ミラーとの組を用いて、反射光L'を参照光Lの代用にするものである。この場合、照明光Qが球面波であって、数式で正確に表すことができるものとする。また、反射光L'が物体ミラーによる反射の影響を受けたものであるので、照明光Qの数式表現を補正する補正処理が必要である。

【0215】

（反射の補正処理）

物体ミラーの複素屈折率 $N = n - ik$ の情報を用いて、p偏光とs偏光に対する、物体ミラーの反射係数 r を算出する。方法1の場合と同様に照明光Qを数式表示し、数式表示した照明光Qのデータと反射係数 r のデータとを用いて、反射光L'のデータを算出する。得られた反射光L'のデータと、ホログラム $I_{L',R}$ のデータとから、参照光Rのデータを算出する。参照光Rのデータを用いて、物体光ホログラム $I_{O,R}$ のデータから物体光Oのデータを算出する。

10

【0216】

（方法3）

球面波R1とマイクロミラーM3の反射係数 r から算出する。図3、図9、図17に示すような光学系2において、参照光Rのデータを算出する。参照光Rが球面波であって、数式で正確に表すことができるものとする。また、参照光Rは、マイクロミラーM3による反射の前後で位相が変化しているため、反射後の光を参照光R'とする。そこで、この区別を明記して、物体光Oのホログラムを、ホログラム $I_{O,R'}$ と表記する。反射後の参照光R'のデータは、方法2の反射光L'と同様に、マイクロミラーM3の複素屈折率 $N = n - ik$ の情報を用いて算出した反射係数 r のデータと、数式表示した参照光Rのデータとを用いて算出される。得られた参照光R'のデータを用いて、物体光ホログラム $I_{O,R'}$ のデータから物体光Oのデータを算出する。

20

【0217】

なお、本発明は、上記構成に限られることなく種々の変形が可能である。例えば、上述した各実施形態とその変形例の構成を互いに組み合わせた構成とすることができる。本発明は、照明光Qおよび参照光Rに球面波光を用いずに、非平行光の照明光Qおよび参照光Rを用いることができる。ホログラムを、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとに分離可能に取得することには、p偏光のホログラムとs偏光のホログラムとを初めから別個のホログラムとして取得することが含まれる。

30

【産業上の利用可能性】

【0218】

本発明のエリブソメトリ装置およびエリブソメトリ方法は、ホログラフィを用いるものであり、少ないショット数で多量の振幅位相データが得られるので、高速で高精度な測定が可能であり、非常に高い感度で偏光解析ができる。本発明のエリブソメトリ装置およびエリブソメトリ方法は、使用している原理や技術の観点から、光学やホログラフィ、光計測、応用光情報、顕微鏡、精密薄膜測定等の分野に属し、これらの分野における用途に利用できる。

40

【0219】

また、本発明の装置および方法は、高速で精密かつ高分解能な測定が要求される薄膜測定に適用でき、半導体、化学、ディスプレイ、光学膜・材料、データメモリ、プロセス評価の他に、生体・医療計測の分野などにおける、各種用途に適用できる。本発明の装置および方法は、光を使って、データ記録を瞬時かつ非接触で行えるので、プロセスの実時間計測やフィードバック制御に利用できる。例えば、薄膜形成、エッチング、酸化・熱処理などのプロセス評価に利用できる。また、溶液中で行われるプロセス、例えば溶液中薄膜形成プロセスなどの評価や制御に利用できる。

【0220】

50

本願は日本国特許出願2016-163989に基づいており、その内容は、上記特許出願の明細書及び図面を参照することによって結果的に本願発明に合体されるべきものである。

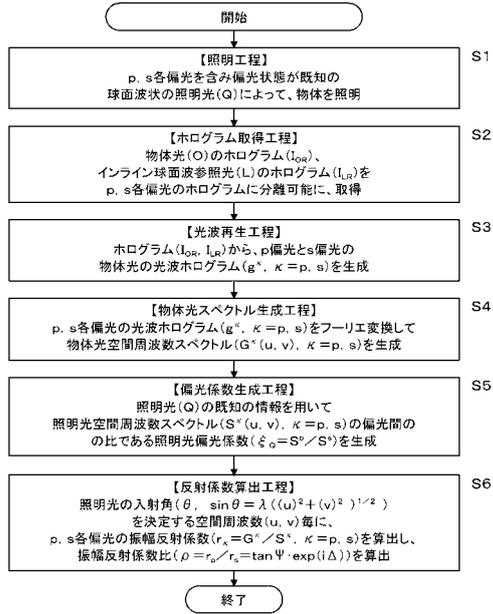
【符号の説明】

【0221】

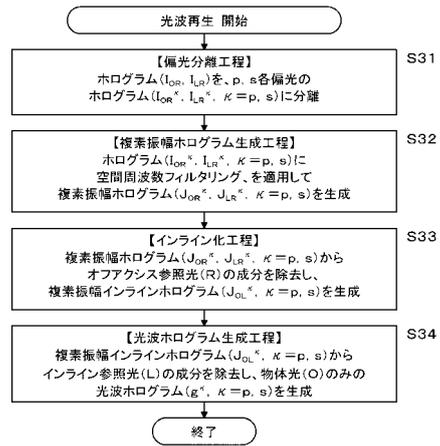
1	エリブソメトリ装置	
10	データ取得部	
10a	光源	
10b	光学システム	
10c	受光素子	10
10d	計算部	
10e	参照光波取得部	
10f	複素振幅取得部	
11	データ解析部	
11a	光波再生部	
11b	物体光平面波展開部	
11c	偏光係数生成部	
11d	演算部	
11e	表示部	
12a	偏光分離部	20
12b	複素振幅生成部	
12c	インライン化部	
12d	光波ホログラム生成部	
13a	回転変換部	
13b	エリブソメトリ角算出部	
13c	フィッティング部	
2	光学系	
20	レーザ	
21, 22, 24, 25, 27, 28	レンズ	
23, 26, 29	集光レンズ	30
3	物体	
4, 41, 42, 43	受光素子	
5	計算機	
5a	メモリ(保存部)	
BS	ビームスプリッタ	
G, G	ホログラム面における物体光の空間周波数スペクトル、複素振幅	
H, H	回転変換後の物体光の空間周波数スペクトル、複素振幅	
HM	ハーフミラー	
I _L R	参照光オフアクシスホログラム	
I _O R	物体光オフアクシスホログラム	40
J _L R	複素振幅ホログラム	
J _O R	複素振幅ホログラム	
J _O L	複素振幅インラインホログラム	
L	インライン球面波参照光	
M1 ~ M6	ミラー	
M7	反射鏡	
M8	凹面鏡	
ML	球面波参照光Lを反射する反射鏡	
O	物体光	
P1, P2, P3	偏光子(偏光設定器)	50

P A	偏光子アレイ (偏光設定器)	
P a , P b	偏光子	
Q , Q 1 , Q 2 , Q 3	照明光	
R , R , R ^P , R ^S	オフアクシス参照光	
R X	参照光分割器 (偏光設定器)	
S , S	ホログラム面における照明光の空間周波数スペクトル、複素振幅	
T , T	回転変換後の照明光の空間周波数スペクトル、複素振幅	
W P	ウォラストンプリズム (偏光設定器)	
b	回転再生光波	
d	画素ピッチ	10
f _M	最大空間周波数	
g	ホログラム面における光波ホログラム	
g _i	微小ホログラム	
h	物体の位置における再生光波	
n	屈折率	
r ^P , r ^S	振幅反射係数	
(u , v)	ホログラム面における空間周波数または波数ベクトル	
(u' , v')	回転変換後のホログラム面における空間周波数または波数ベクトル	
	エリプソメトリ角	
	エリプソメトリ角	20
	合成微小ホログラム	
	合成微小ホログラム	
	物体の表面とホログラム面との成す角度	
	空間サンプリング間隔	
	入射角、反射角	
B	ブリュースタ角	
	波長	
	偏光状態	
Q	照明光偏光係数	
	振幅反射係数比	30

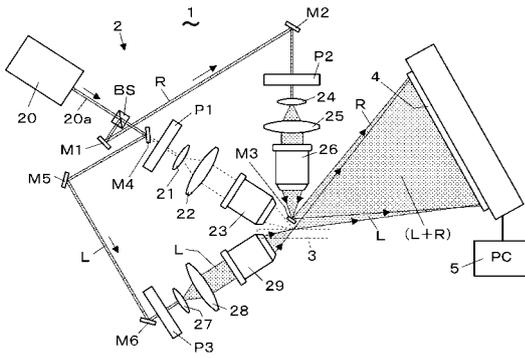
【 図 1 】



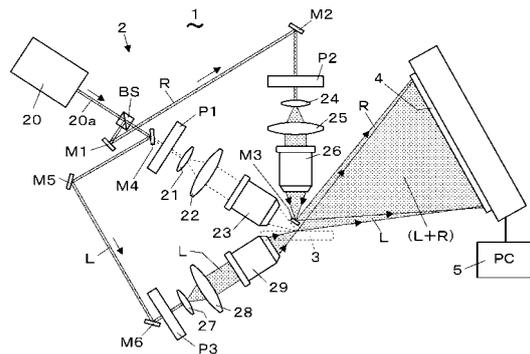
【 図 2 】



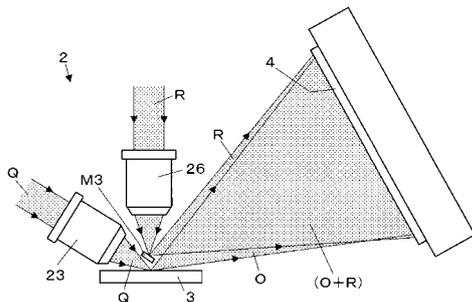
【 図 3 】



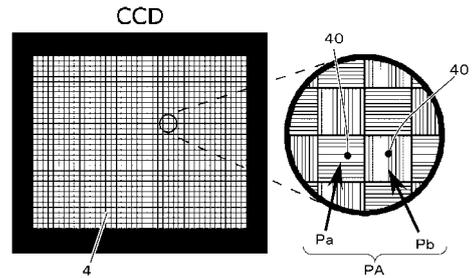
【 図 5 】



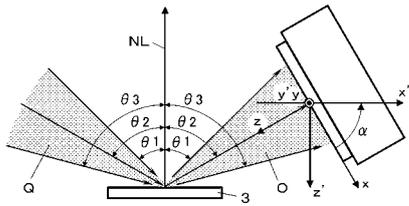
【 図 4 】



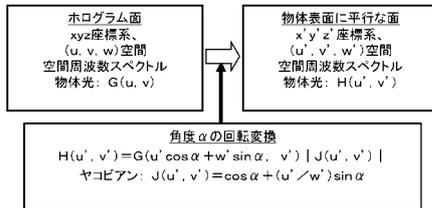
【 図 6 】



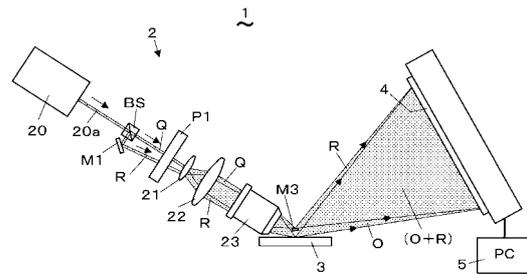
【 図 7 】



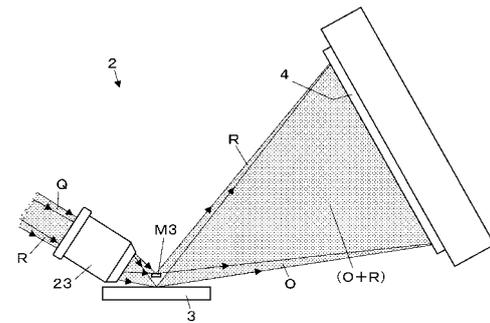
【 図 8 】



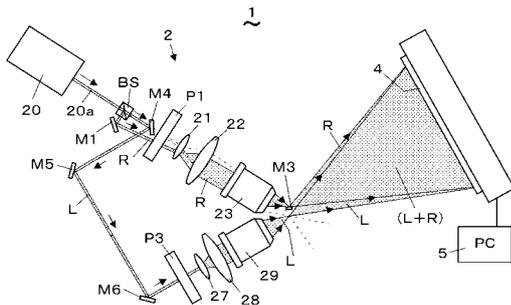
【 図 9 】



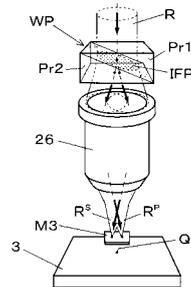
【 図 10 】



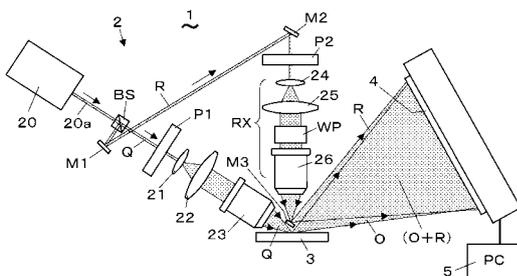
【 図 11 】



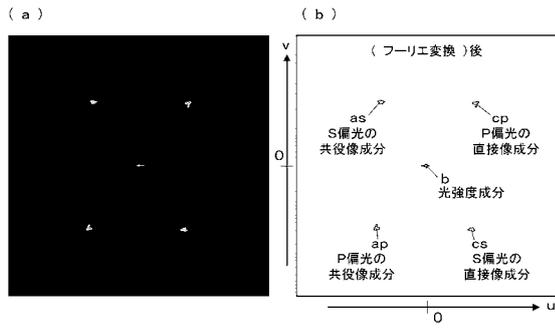
【 図 13 】



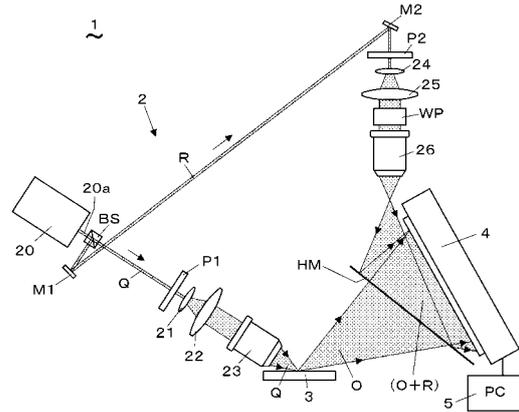
【 図 12 】



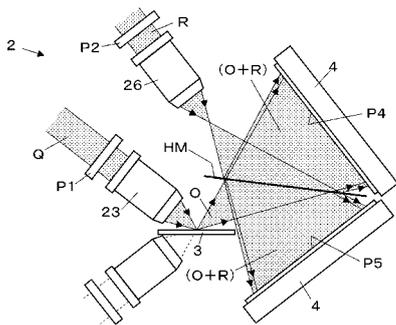
【 図 1 4 】



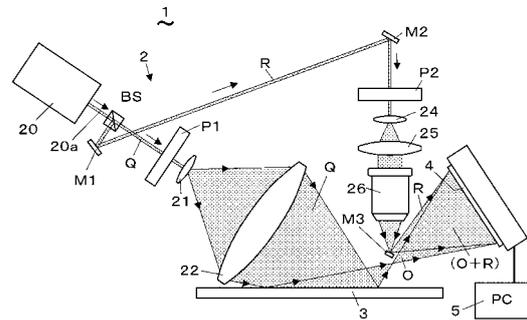
【 図 1 5 】



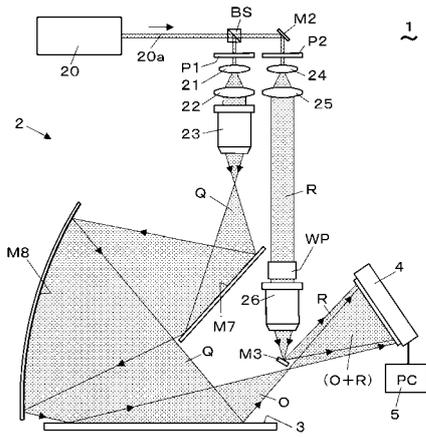
【 図 1 6 】



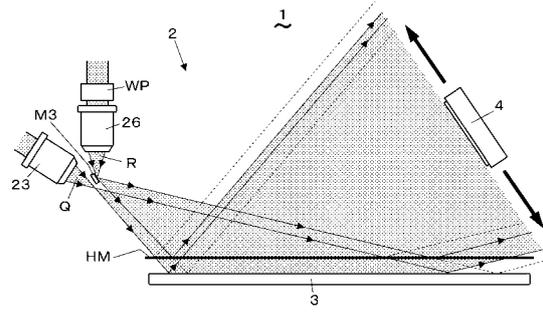
【 図 1 7 】



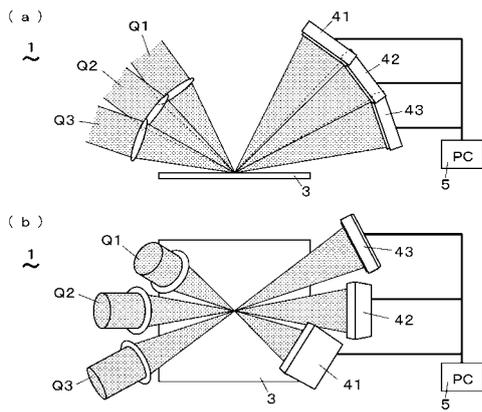
【 図 1 8 】



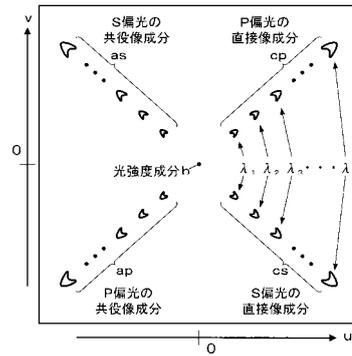
【 図 1 9 】



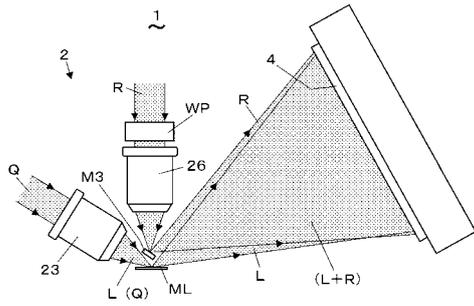
【 図 2 0 】



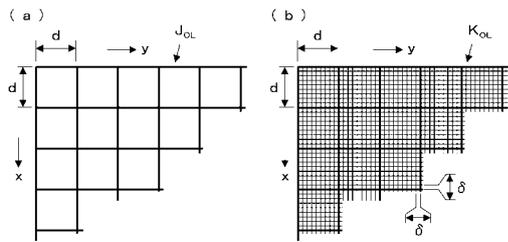
【 図 2 1 】



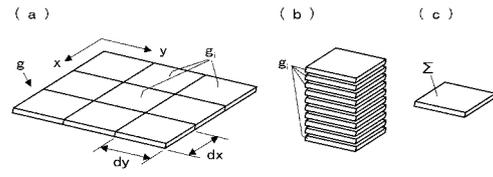
【 図 2 2 】



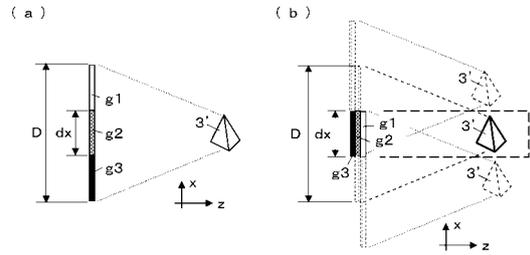
【 図 2 3 】



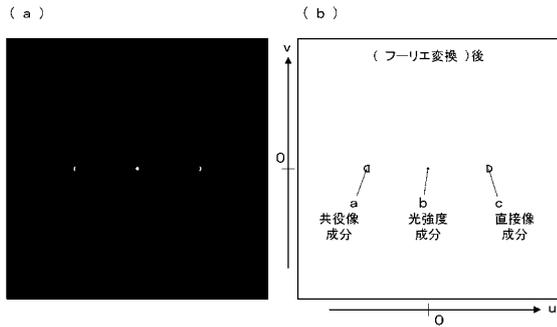
【 図 2 4 】



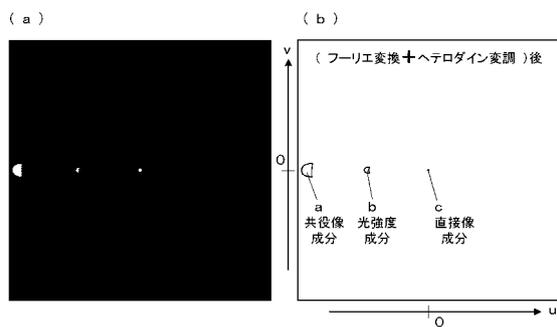
【 図 2 5 】



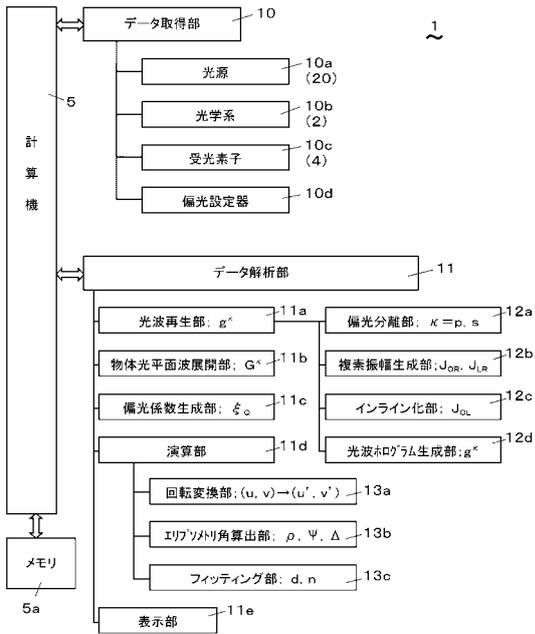
【 図 2 6 】



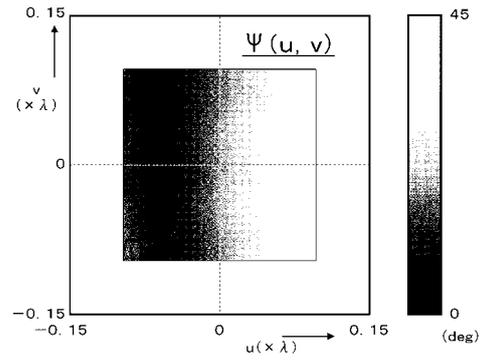
【 図 2 7 】



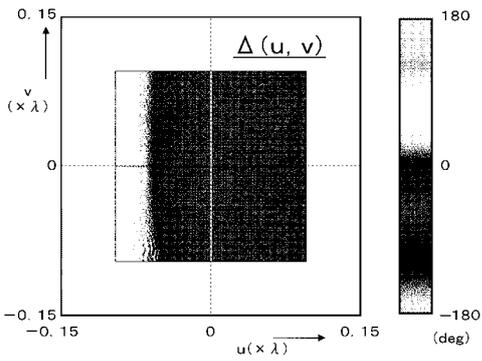
【図 28】



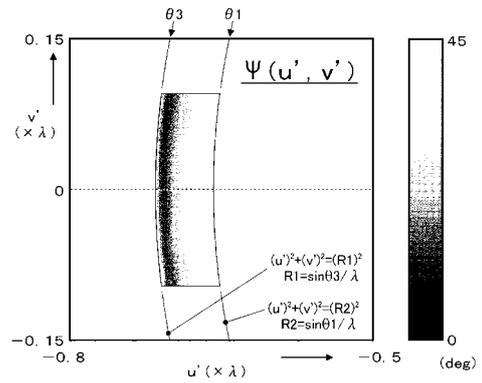
【図 29】



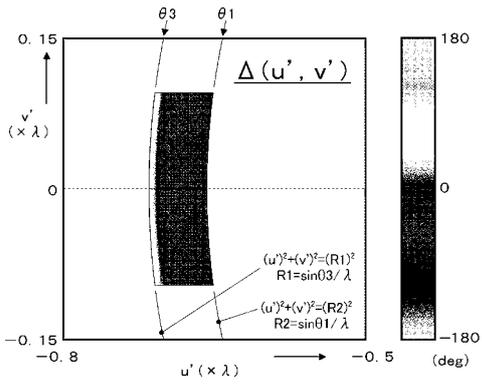
【図 30】



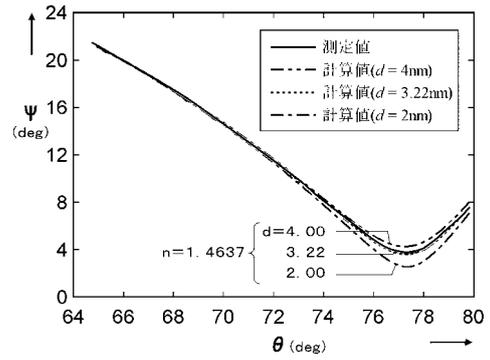
【図 31】



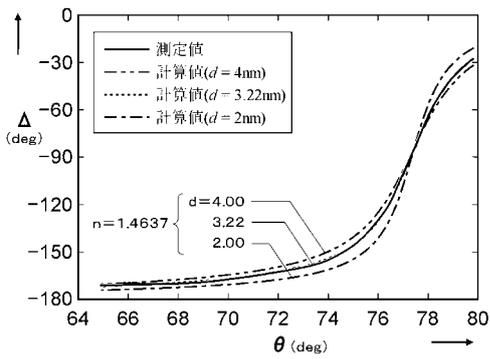
【 図 3 2 】



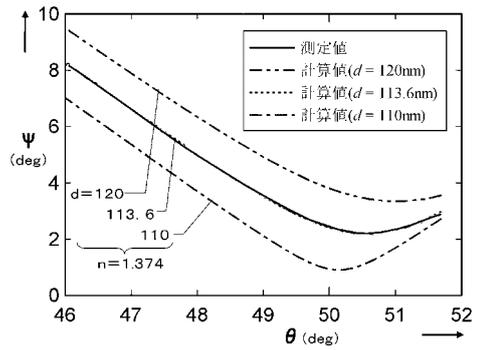
【 図 3 3 】



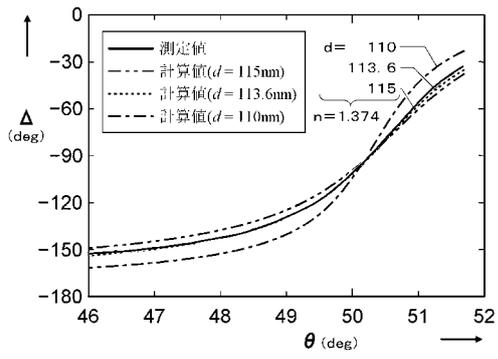
【 図 3 4 】



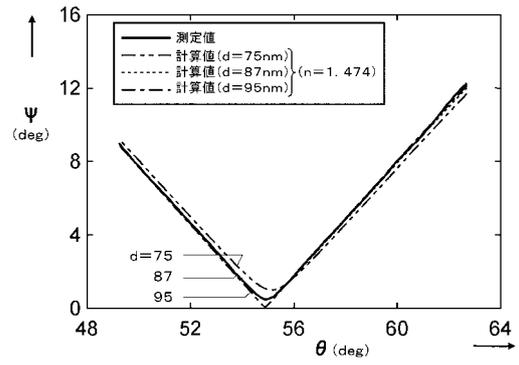
【 図 3 5 】



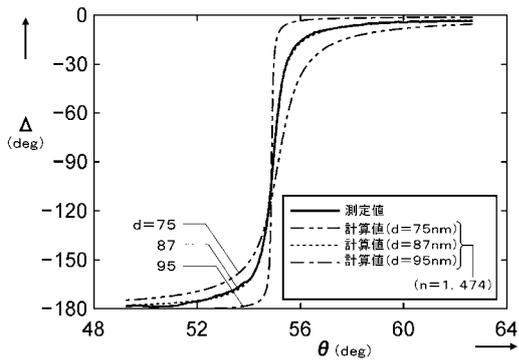
【 図 3 6 】



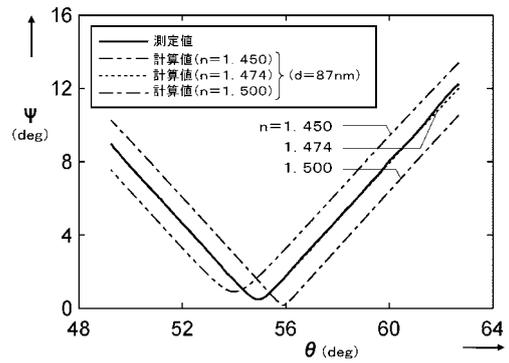
【 図 3 7 】



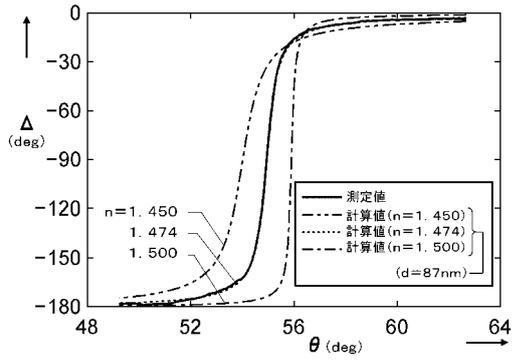
【 図 3 8 】



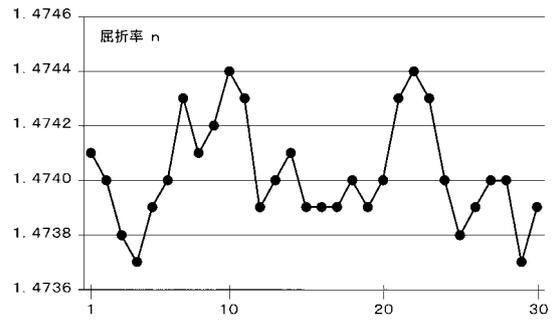
【 図 3 9 】



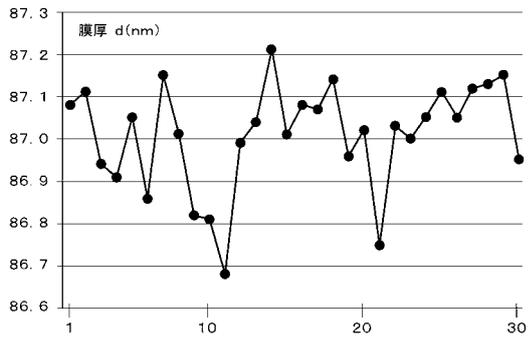
【 図 4 0 】



【 図 4 1 】



【 図 4 2 】



【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2017/029829
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01J4/04(2006.01)i, G03H1/04(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01J4/00-4/04, G03H1/04, G01N21/21, G02B21/00 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2017 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2017 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2017 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JSTPlus/JST7580 (JDreamIII)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2012/002207 A1 (National University Corporation Kyoto Institute of Technology), 05 January 2012 (05.01.2012), & US 2013/0100333 A1	1-16
A	JP 2012-154847 A (Ricoh Co., Ltd.), 16 August 2012 (16.08.2012), (Family: none)	1-16
A	JP 2009-535609 A (Micronic Laser Systems AB.), 01 October 2009 (01.10.2009), & US 2007/0252986 A1 & WO 2007/124930 A1 & CN 101479563 A	1-16
A	US 2001/0052979 A1 (TREADO et al.), 20 December 2001 (20.12.2001), (Family: none)	1-16
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 16 October 2017 (16.10.17)		Date of mailing of the international search report 31 October 2017 (31.10.17)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/029829

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	ZHU, Meijuan et al., A new method for acquiring the complex hologram in optical scanning holography, Proc. of SPIE, 2011, Vol. 8134, pp. 81340R-1 - 81340R-6	1-16

国際調査報告		国際出願番号 PCT/JP2017/029829	
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01J4/04(2006.01)i, G03H1/04(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01J4/00-4/04, G03H1/04, G01N21/21, G02B21/00			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2017年 日本国実用新案登録公報 1996-2017年 日本国登録実用新案公報 1994-2017年			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) JSTPlus/JST7580 (JDreamIII)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
A	WO 2012/002207 A1 (国立大学法人京都工芸繊維大学) 2012.01.05 & US 2013/0100333 A1	1-16	
A	JP 2012-154847 A (株式会社リコー) 2012.08.16 (ファミリーなし)	1-16	
A	JP 2009-535609 A (マイクロニック レーザー システムズ アク チボラゲット) 2009.10.01 & US 2007/0252986 A1 & WO 2007/124930 A1 & CN 101479563 A	1-16	
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー		の日の後に公表された文献	
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの		「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの		「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの	
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)		「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの	
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		「&」同一パテントファミリー文献	
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願			
国際調査を完了した日 16.10.2017		国際調査報告の発送日 31.10.2017	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 塚本 丈二	2W 3304
		電話番号 03-3581-1101 内線 3258	

国際調査報告

国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 7 / 0 2 9 8 2 9

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	US 2001/0052979 A1 (TREADO et al.) 2001.12.20 (ファミリーなし)	1-16
A	ZHU, Meijuan et al., A new method for acquiring the complex hologram in optical scanning holography, Proc. of SPIE, 2011, Vol. 8134, pp. 81340R-1 - 81340R-6	1-16

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT

(注) この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。