

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5900970号
(P5900970)

(45) 発行日 平成28年4月6日(2016.4.6)

(24) 登録日 平成28年3月18日(2016.3.18)

(51) Int.Cl. F 1
GO 1 N 21/41 (2006.01) GO 1 N 21/41 1 0 1

請求項の数 9 (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2012-554845 (P2012-554845)	(73) 特許権者	504237050
(86) (22) 出願日	平成24年1月26日 (2012.1.26)		独立行政法人国立高等専門学校機構
(86) 国際出願番号	PCT/JP2012/051707		東京都八王子市東浅川町701番2
(87) 国際公開番号	W02012/102350	(74) 代理人	100080160
(87) 国際公開日	平成24年8月2日 (2012.8.2)		弁理士 松尾 憲一郎
審査請求日	平成27年1月23日 (2015.1.23)	(72) 発明者	松田 豊稔
(31) 優先権主張番号	特願2011-14067 (P2011-14067)		熊本県合志市須屋2659-2 熊本高等
(32) 優先日	平成23年1月26日 (2011.1.26)		専門学校内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(72) 発明者	小田川 裕之
			熊本県合志市須屋2659-2 熊本高等
			専門学校内
		審査官	横尾 雅一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 表面プラズモンセンサ、及び屈折率の測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

周期構造を有する金属層を備え、試料が配置された反射板と、
前記反射板にコニカルマウントでp偏光又はs偏光の入射光を照射する光源と、
前記反射板で反射した反射光を受光する受光部と、
前記光源が前記反射板に照射する前記入射光の入射角と、前記入射光の入射面が前記周期構造の周期方向に対して成す方位角と、前記光源が入射する前記入射光の波長の何れか1つをパラメータとして変化させながら、前記反射光の楕円率がゼロになる前記パラメータに基づいて前記試料の屈折率を測定する計測部と、を備えることを特徴とする表面プラズモンセンサ。

【請求項2】

前記計測部が入射角又は方位角をパラメータとして変化させながら前記反射板の楕円率がゼロになる前記パラメータに基づいて前記試料の屈折率を計測する場合において前記計測部が測定した前記楕円率がゼロになるように前記パラメータを変更するように前記反射板を制御する制御部をさらに備えることを特徴とする請求項1に記載の表面プラズモンセンサ。

【請求項3】

前記光源は、屈折率測定の基準となる基準物質を反射板に配置したときの楕円率がゼロとなる入射角、方位角及び波長を有する前記入射光を前記試料に照射し、

前記計測部は、前記反射光から得た楕円率に基づき前記試料の屈折率を測定することを

特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の表面プラズモンセンサ。

【請求項 4】

前記楕円率がゼロとなる前後の前記楕円率の変動量が大きくなるように、前記反射板の方位角を調整して前記入射光に対する相対的な格子の溝の形状を変化させることを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 3 の何れか 1 項に記載の表面プラズモンセンサ。

【請求項 5】

入射面に対して前記反射光の平行な成分及び垂直な成分の位相差を略直角、前記反射光の反射率が前記平行な成分と前記垂直な成分とで略等しくなるように、前記反射板の方位角を調整して前記入射光に対する相対的な格子の溝の形状を変化させることを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 4 の何れか 1 項に記載の表面プラズモンセンサ。

10

【請求項 6】

前記光源は、前記反射板の前記金属層が設けられた面と対向する面から入射されるように前記入射光を照射し、

前記金属層は薄膜周期構造を有することを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 5 のいずれか 1 項に記載の表面プラズモンセンサ。

【請求項 7】

周期構造を有する金属層を備える反射板に配置された試料の屈折率を測定する表面プラズモンセンサを用いた屈折率の測定方法であって、

光源から前記反射板にコニカルマウントで p 偏光又は s 偏光の入射光を照射するステップと、

前記試料を透過して前記反射板で反射した反射光を受光部で受光するステップと、
前記光源が前記反射板に照射する前記入射光の入射角と、前記入射光の入射面が前記周期構造の周期方向に対して成す方位角と、前記光源が入射する前記入射光の波長の何れか 1 つをパラメータとして変化させながら、前記反射光の楕円率がゼロになる前記パラメータに基づいて前記試料の屈折率を測定するステップと、を備えることを特徴とする屈折率の測定方法。

20

【請求項 8】

前記反射板は、光を透過する基板と、当該基板の一方の面の上に積層されて周期構造を有する金属層とを備え、前記金属層の面であって前記基板に当接しない面の上に試料が配置され、

前記光源は、前記基板の他方の面の側から入射光を照射し、

前記受光部は、前記基板の他方の面の側に反射した反射光を受光することを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 5 のいずれか 1 項に記載の表面プラズモンセンサ。

30

【請求項 9】

光を透過する基板と、当該基板の一方の面の上に積層されて薄膜周期構造を有する金属層とを備え、前記金属層の面であって前記基板に当接しない側の面の上に試料が配置される反射板と、

前記基板の他方の面の側から入射光を照射する光源と、

前記基板の他方の面の側に反射した反射光を受光する受光部と、

前記光源が前記反射板に照射する前記入射光の入射角と、前記入射光の入射面が前記周期構造の周期方向に対して成す方位角と、前記光源が入射する前記入射光の波長の何れか 1 つをパラメータとして変化させながら、前記反射光の楕円率がゼロになる前記パラメータに基づいて前記試料の屈折率を測定する計測部と、

40

前記計測部が入射角又は方位角をパラメータとして変化させながら前記反射板の楕円率がゼロになる前記パラメータに基づいて前記試料の屈折率を計測する場合において前記計測部が測定した前記楕円率がゼロになるように前記パラメータを変更するように前記反射板を制御する制御部と、を備え、

入射面に対して前記反射光の平行な成分及び垂直な成分の位相差を略直角、前記反射光の反射率が前記平行な成分と前記垂直な成分とで略等しくなるように前記反射板の方位角を調整して前記入射光に対する相対的な格子の溝の形状を変化させてあり、

50

前記計測部は、前記反射板に屈折率が既知の基準物質を前記試料として配置したときに前記反射光の楕円率がゼロになる値に前記入射光の波長、入射角、及び、方位角を固定した状態で前記受光部が受光した反射光の楕円率に応じた値を前記試料の屈折率とすることを特徴とする表面プラズモンセンサ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、表面プラズモンセンサ、及び該表面プラズモンセンサを用いた屈折率の測定方法に関する。

【背景技術】

10

【0002】

液体等の屈折率を光学的に測定するセンサとして表面プラズモンセンサが知られている。金属表面に波長の入射光を照射したときの反射率の入射角特性（吸収曲線）を測定すると、特定の入射角（以下、吸収角 θ_{sp} と呼ぶ）で反射率が急激に減少する。この現象は、プラズモン共鳴吸収と呼ばれ、入射光と金属表面に存在する表面プラズモンとの電磁波結合によって生じる現象であり、入射光の電力が金属表面に捕捉（共鳴吸収）された結果、反射光強度が減少する。

【0003】

表面プラズモンセンサは、プラズモン共鳴吸収を利用して液体等の試料の屈折率を測定するセンサである。表面プラズモンセンサには、金属表面にプリズムを配置したものや、例えば特許文献1に開示されるように金属表面に等間隔に溝を刻んだ周期構造を有するものがある。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2008-216055号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

表面プラズモンセンサでは、予め屈折率 n_s が既知の基準物質の吸収角 θ_{sp} を求めておき、屈折率 n を測定した試料の吸収角 θ'_{sp} と基準物質の吸収角 θ_{sp} との差 $\Delta\theta$ ($= \theta_{sp} - \theta'_{sp}$) から試料の屈折率 n ($= n_s + \Delta n$) を求める。

30

上述したように吸収角 θ_{sp} は、反射率が急激に減少する角度であるため、吸収角 θ_{sp} を測定するには最小点検出を行わなければならない、測定が複雑であるという問題があった。

【0006】

本発明は、上述の点を鑑みてなされたものであり、容易に屈折率を測定できる表面プラズモンセンサ、及び屈折率の測定方法を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0007】

40

上記課題を解決するため、本発明に係る表面プラズモンセンサは、周期構造を有する金属層を備え、試料が配置された反射板と、前記反射板にコニカルマウントでp偏光又はs偏光の入射光を照射する光源と、前記反射板で反射した反射光を受光する受光部と、前記光源が前記反射板に照射する前記入射光の入射角と、前記入射光の入射面が前記周期構造の周期方向に対して成す方位角と、前記光源が入射する前記入射光の波長の何れか1つをパラメータとして変化させながら、前記反射光の楕円率がゼロになる前記パラメータに基づいて前記試料の屈折率を測定する計測部と、を備えることを特徴とする。

【0008】

また、本発明に係る屈折率の測定方法は、周期構造を有する金属層を備える反射板に配置された試料の屈折率を測定する表面プラズモンセンサを用いた屈折率の測定方法であっ

50

て、光源から前記反射板にコニカルマウントで p 偏光又は s 偏光の入射光を照射するステップと、前記反射板で反射した反射光を受光部で受光するステップと、前記光源が前記反射板に照射する前記入射光の入射角と、前記入射光の入射面が前記周期構造の周期方向に対して成す方位角と、前記光源が入射する前記入射光の波長の何れか 1 つをパラメータとして変化させながら、前記反射光の楕円率がゼロになる前記パラメータに基づいて前記試料の屈折率を測定するステップと前記受光部で受光した反射光に含まれる偏光方向の異なる 2 種類の波の位相情報に基づいて前記試料の屈折率を測定するステップと、を備えることを特徴とする。

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、容易に屈折率を測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図 1】本発明の第 1 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 2】本発明の第 1 実施形態に係る金属層を示す図。

【図 3】本発明の第 1 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 4】本発明の第 1 実施形態に係る反射光を説明する図。

【図 5】本発明の第 1 実施形態に係る反射光を説明する図。

【図 6】本発明の第 1 実施形態に係る反射板を示す図。

【図 7】本発明の第 1 実施形態に係る楕円率の変動の測定方法を説明する図。

【図 8】本発明の第 1 実施形態に係る反射光の楕円率の変動を示す図。

【図 9】本発明の第 1 実施形態に係る反射光の位相を示す図。

【図 10】本発明の第 1 実施形態に係る反射光の反射率を示す図。

【図 11】本発明の第 1 実施形態に係る楕円率の入射角特性を示す図。

【図 12】本発明の第 1 実施形態に係る反射率の入射角特性を示す図。

【図 13】本発明の第 2 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 14】本発明の第 3 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 15】本発明の第 3 実施形態に係る楕円率の変動の測定方法を説明する図。

【図 16】本発明の第 3 実施形態に係る楕円率の方位角特性を示す図。

【図 17】本発明の第 4 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 18】本発明の第 4 実施形態に係る楕円率の変動の測定方法を説明する図。

【図 19】本発明の第 4 実施形態に係る楕円率の波長特性を示す図。

【図 20】本発明の第 5 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 21】本発明の第 5 実施形態に係る楕円率の変動の測定方法を説明する図。

【図 22】本発明の第 6 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 23】本発明の第 6 実施形態に係る楕円率の入射角特性を示す図。

【図 24】本発明の第 7 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 25】本発明の第 7 実施形態に係る楕円率の入射角特性を示す図。

【図 26】本発明の第 8 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【図 27】本発明の第 8 実施形態に係る入射角 - 楕円の傾き角特性を示す図。

【図 28】本発明の第 8 実施形態に係る受光強度特性を示す図。

【図 29】本発明の第 8 実施形態に係る受光強度の測定方法を説明する図。

【図 30】本発明の第 8 実施形態に係る受光強度特性を示す図。

【図 31】本発明の第 9 実施形態に係る表面プラズモンセンサの概略図。

【発明を実施するための形態】

【0011】

(第 1 実施形態)

本発明の第 1 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 1 を説明する。図 1 は、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 1 の概略を示す図である。

図 1 の表面プラズモンセンサ 1 は、周期構造を有する金属層 10 を備える反射板 11 と

10

20

30

40

50

、反射板 1 1 上に入射光を照射する光源 1 2 と、反射板で反射した反射光を受光する受光部 1 3 と、反射光の楕円率の変動から反射板 1 1 上に配置された試料の屈折率 n を測定する計測部 1 4 と、を備える。

【 0 0 1 2 】

各部の詳細を説明する。

反射板 1 1 は、例えばシリコン等の基板 1 5 と、基板 1 5 上に積層された例えばアルミニウム等の金属層 1 0 と、を有する。

【 0 0 1 3 】

図 2 は、金属層 1 0 の一例を示す図である。金属層 1 0 の基板と対向する面には、光の波長程度の間隔 d で、凹凸形状が周期的に形成されている。金属層 1 0 は、周期 d の周期構造を有する。この凹凸形状が繰り返し形成される方向を周期方向と称する。

10

【 0 0 1 4 】

図 2 (a) に示すように、金属層 1 0 の基板 1 5 と接していない面に周期構造が形成されており、かつ一方向 (図 2 (a) では x 方向) に周期的に凹凸形状が形成された周期構造を一次元周期構造と呼ぶ。この場合、周期方向は、 x 方向となる。

【 0 0 1 5 】

図 2 (b) に示すように、金属層 1 0 の基板 1 5 と接していない面に周期構造が形成されており、かつ二方向 (図 2 (b) では x 、 y 方向) に周期的に凹凸形状が形成された周期構造を二次元周期構造と呼ぶ。この場合、周期方向は、 x 方向及び y 方向となる。

【 0 0 1 6 】

図 2 (c) に示すように、金属層 1 0 が、図 2 (a)、(b) より薄い、例えば数 nm ~ 数十 nm の金属薄膜で形成されている場合に、金属層 1 0 の基板 1 5 と接する面及びこれに対向する面の両面に周期構造が形成されており、かつ一方向 (図 2 (c) では x 方向) に周期的に凹凸形状が形成された周期構造を一次元薄膜周期構造と呼ぶ。この場合、周期方向は、 x 方向となる。

20

【 0 0 1 7 】

図 2 (d) に示すように、金属層 1 0 が、図 2 (a)、(b) より薄い、例えば数 nm ~ 数十 nm の金属薄膜で形成されている場合に、金属層 1 0 の基板 1 5 と接する面及びこれに対向する面の両面に周期構造が形成されており、かつ二方向 (図 2 (d) では x 、 y 方向) に周期的に凹凸形状が形成された周期構造を二次元薄膜周期構造と呼ぶ。この場合、周期方向は、 x 方向及び y 方向となる。

30

【 0 0 1 8 】

なお、図 2 (c)、(d) では、金属層 1 0 の両面に周期構造を形成しているが、基板 1 5 と対向する片面のみに周期構造を形成してもよい。

【 0 0 1 9 】

このように、凹凸形状が繰り返し形成される方向によって、金属層 1 0 の表面には複数の周期構造が形成され得る。本実施形態の金属層 1 0 は、上述したどの周期構造を有していてもよいが、ここでは x 方向を周期方向とする一次元周期構造を有するものとして説明する。

【 0 0 2 0 】

図 3 に示すように、反射板 1 1 は、金属層 1 0 の周期方向 (x 方向) と、光源 1 2 から出射される入射光が入射する面 $S 1$ (以下、入射面 $S 1$ と呼ぶ。詳細は後述。) と、が直交しないように斜めに配置される。このように、入射面 $S 1$ と周期方向とが直交しないような反射板 1 1 の配置をコニカルマウントと呼ぶ。入射面 $S 1$ と周期方向とのなす角を方位角 と呼ぶ。本実施形態の反射板 1 1 は、 0° 、 90° となるように配置される。入射光と 0 次回折光 (以下、反射光と呼ぶ) の波数ベクトルは、入射面内に存在する。

40

【 0 0 2 1 】

図 1 に戻る。

反射板 1 1 の上には屈折率 n の測定対象となる試料 1 6 や、試料 1 6 の屈折率 n 測定の基準となる基準物質等が配置される。

50

【 0 0 2 2 】

光源 1 2 は、例えば半導体レーザや発光ダイオードなどの受光素子で構成される。光源 1 2 からは p 波を有する入射光が照射される。光源 1 2 は、入射光を照射する角度（以下、入射角と呼ぶ。図 3 を参照。）を変化させながら入射光を照射する。光源 1 2 には、入射角を変動させるために必要な駆動装置（図示せず）を含む。なお、図示しない駆動装置以外にも、例えばレーザダイオードアレイを用いるなどして光学的に入射角度を変化させてもよい。

【 0 0 2 3 】

受光部 1 3 は、例えばフォトダイオードなどで構成される。受光部 1 3 は、p 波及び s 波を有する反射光を受光する。受光部 1 3 は、入射光の入射角の変動に連動して反射光を受光するための駆動装置を含む。なお、受光部 1 3 もフォトダイオードアレイを用いるなどして光学的に受光部 1 3 の反射光の反射角を変えるようにしてもよい。

10

【 0 0 2 4 】

計測部 1 4 は、受光部 1 3 が受光した反射光の楕円率を測定し、楕円率の変動を測定する。計測部 1 4 は、測定した楕円率の変動から、楕円率がゼロとなる入射角 θ_0 （以下、吸収角 θ_0 と称する。）を測定する。計測部 1 4 は、反射板 1 1 に基準物質が配置された場合の吸収角 θ_0 と、試料 1 6 が配置された場合の吸収角 θ'_0 との差 $\Delta\theta_0$ （ $= \theta'_0 - \theta_0$ ）から試料 1 6 の屈折率 n を測定する。

【 0 0 2 5 】

次に、試料 1 6 の屈折率 n を測定する方法を説明する。

20

図 4 を用いて、受光部 1 3 が受光する反射光について説明する。図 4 (a) に示すように、反射光には入射面 S 1 に対して平行な p 波成分と、垂直な s 波成分とに分けられる。光を進行方向から見ると p 波と s 波との位相差に応じて、光の電界ベクトルは、図 4 (b) のように楕円状に旋回しているように見える。このとき長軸の長さを a 、短軸の長さを b とすると楕円率 $\tan \psi$ は、 $\tan \psi = b / a$ で求められる。また、光の電界ベクトルが成す楕円の長軸が x 方向に対して成す角を楕円の傾き角 ψ と呼ぶことにする。

【 0 0 2 6 】

p 波と s 波との位相差 $\Delta\phi$ がゼロより小さい、即ち p 波に比べ s 波が遅れている場合、図 5 (a) に示すように、光は進行方向から見て楕円状に左旋回している。これを左楕円偏光と呼ぶ。このときの楕円率 $\tan \psi$ はゼロより小さくなる。

30

【 0 0 2 7 】

p 波と s 波との位相差 $\Delta\phi$ がゼロ、即ち p 波及び s 波の位相が同じ場合、図 5 (b) に示すように、光は進行方向から見て直線状に振動している。これを直線偏光と呼ぶ。このときの楕円率 $\tan \psi$ はゼロとなる。

【 0 0 2 8 】

p 波と s 波との位相差 $\Delta\phi$ がゼロより大きい、即ち p 波に比べ s 波が進んでいる場合、図 5 (c) に示すように、光は進行方向から見て楕円状に右旋回している。これを右楕円偏光と呼ぶ。このときの楕円率 $\tan \psi$ はゼロより大きくなる。

【 0 0 2 9 】

このように反射光の楕円率 $\tan \psi$ は、p 波及び s 波の位相に依存している。従って計測部 1 4 で反射光の楕円率 $\tan \psi$ を測定することで p 波及び s 波の位相関係を知ることができる。

40

【 0 0 3 0 】

図 6 に示すように、反射板 1 1 をコニカルマウントとした場合、p 波の入射光を反射板 1 1 に入射すると、p 波及び s 波の反射光が得られる。

【 0 0 3 1 】

次に、図 7 を用いて反射板 1 1 上に試料 1 6 を配置した場合の反射光の楕円率（以下、試料 1 6 の楕円率と呼ぶ）の変動を測定する方法について説明する。本実施形態では、入射光の入射角を変更した場合の試料 1 6 の楕円率の変動を計測する。

【 0 0 3 2 】

50

反射板 11 上に試料 16 を配置し (S 101)、入射角 θ 、波長 λ の入射光を光源 12 から照射する (S 102)。光源 12 は、p 波の入射光を照射する。

受光部 13 は、入射光が試料 16 を介して反射板 11 で反射した光 (反射光) を受光する (S 103)。

【0033】

計測部 14 は、反射光から反射光の楕円率を測定する (S 104)。

光源 12 は照射する入射光の入射角 θ を変更し、 $\theta + \Delta\theta$ とする (S 105)。

【0034】

楕円率を測定したい範囲の入射角 θ 全てで楕円率 $\tan \psi$ を測定していない場合 (S 106 の no) は、ステップ S 102 に戻る。一方、測定したい入射角 θ の範囲全てで楕円率 $\tan \psi$ を測定した場合 (S 106 の yes) は、試料 16 の楕円率変動測定を終了する。

10

【0035】

図 8 に、計測部 14 が測定した各入射角 θ における楕円率 $\tan \psi$ の変動のシミュレーション結果を示す。図 8 は、図 7 の楕円率変動測定のプロチャートに従って測定した試料 16 である空気の $\tan \psi$ - 特性曲線を示す図である。ここでは、反射板 11 としてホログラフィックアルミ格子を用いている。格子の溝の深さを $H = 72 \text{ nm}$ 、格子の周期 d を $d = 556 \text{ nm}$ 、方位角 ϕ を $\phi = 30^\circ$ 、波長 λ を $\lambda = 670 \text{ nm}$ とし、入射角 θ を $3^\circ < \theta < 15^\circ$ の範囲で変化させた。

【0036】

図 8 に示すように、 $\tan \psi$ - 特性曲線は、楕円率 $\tan \psi$ がゼロとなる吸収角 θ_0 の前後で正から負へと変化する。

20

【0037】

次に、図 9 に、計測部 14 が測定した各入射角 θ における位相 ϕ_p 、 ϕ_s 及び位相差 $\Delta\phi$ のシミュレーション結果を示す。ここでは、試料 16 として空気を用い、反射板 11 としてホログラフィックアルミ格子を用いている。格子の溝の深さを $H = 72 \text{ nm}$ 、格子の周期 d を、 $d = 556 \text{ nm}$ 、方位角 ϕ を $\phi = 30^\circ$ 、波長 λ を $\lambda = 670 \text{ nm}$ とし、入射角 θ を $10^\circ < \theta < 15^\circ$ の範囲で変化させた。

【0038】

図 9 の実線で示すグラフが p 波の位相 ϕ_p の変化を示しており、一点破線で示すグラフが s 波の位相 ϕ_s を示している。破線で示すグラフは、p 波と s 波との位相差 $\Delta\phi = \phi_s - \phi_p$ を示している。

30

【0039】

反射光の p 波の位相 ϕ_p は、入射角 θ が 13° から 14° の範囲で急激に変動し、s 波の位相 ϕ_s は滑らかに変動している。図 9 の p 波の位相 ϕ_p と s 波の位相 ϕ_s とが交差する入射角 θ が p 波と s 波との位相差 $\Delta\phi$ がゼロとなる入射角 θ_0 であり、楕円率 $\tan \psi$ がゼロとなる吸収角 θ_0 である。反射光の位相差 $\Delta\phi$ は、吸収角 θ_0 の前後で正から負、又は負から正へと変化する。つまり、反射光の楕円率 $\tan \psi$ は、吸収角 θ_0 の前後で正から負、又は負から正へと変化する。従って、 $\tan \psi$ を測定することで位相差 $\Delta\phi$ がゼロとなる吸収角 θ_0 を測定することができる。

40

【0040】

図 10 は、計測部 14 が測定した反射率 R のシミュレーション結果を示す図である。破線で示すグラフが p 波の反射率 R_p を示しており、一点破線で示すグラフが s 波の反射率 R_s を示している。実線で示すグラフは、p 波及び s 波の反射率 R_p 、 R_s を合わせた反射光の反射率 R を示している。

【0041】

図 10 に示すように、反射光の反射率 R が最も小さくなる入射角が吸収角 θ_0 となる。一般に反射光の反射率 R を用いて屈折率 n の測定を行う表面プラズモンセンサは、入射角を変動させながら p 波の反射率 R_p の変動を測定し、最小点検出を行うことで吸収角 θ_0 を測定する。一方、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 1 では、反射率 R の変動で

50

はなく楕円率 \tan の変動を測定し、楕円率 \tan がゼロになるゼロ点検出を行うことで吸収角 θ_0 を測定する。楕円率 \tan の吸収角 θ_0 と反射率の吸収角 θ_{sp} は、必ずしも同じ値となるわけではないが、非常に近い値となるため本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 1 では、反射率の吸収角 θ_{sp} ではなく楕円率 \tan の吸収角 θ_0 を用いて試料 16 の屈折率 n を測定する。

【0042】

次に、図 11、図 12 を用いて本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 1 が高精度に屈折率 n を測定できる点について説明する。屈折率 n がそれぞれ「1.0002」、「1.0003」、「1.0004」である試料 16 の反射光の楕円率 \tan の入射角特性を図 11 に、反射率の入射角特性を図 12 に示す。図 11、図 12 とともにシミュレーション結果を示す図である。なお、図 11、図 12 とともに吸収角 θ_0 、 θ_{sp} 付近の入射角特性を拡大して示している。図 11、図 12 の実線が屈折率「1.0002」、一点破線が「1.0003」、破線が「1.0004」の入射角特性を示している。

10

【0043】

図 11 では、各屈折率 n の入射角特性が略線形となっている。楕円率 \tan がゼロになる入射角であるため、楕円率 \tan の吸収角 θ_0 は、各入射角特性のゼロ点検出を行うことで測定できる。ゼロ点検出は容易にかつ高精度に測定できる。図 11 の各屈折率 n における吸収角 θ_0 は、屈折率「1.0002」で吸収角 $\theta_0 = 11.349^\circ$ 、屈折率「1.0003」で吸収角 $\theta_0 = 11.342^\circ$ 、屈折率「1.0004」で吸収角 $\theta_0 = 11.334^\circ$ となる。

20

【0044】

一方、図 12 では、各屈折率 n の入射角特性が下に凸の緩やかなカーブを描く非線形となっている。反射率の吸収角 θ_{sp} は、反射率が最小となる入射角であるため、各入射角特性の最小点検出を行えば反射率の吸収角 θ_{sp} は測定できる。しかしながら各屈折率 n の差が小さく、かつ入射角特性の Q 値が小さい場合、図 12 に示すように最小点が重なっているように見え、吸収角 θ_{sp} を高精度に測定することが難しい。

【0045】

上述したように楕円率 \tan の入射角特性は吸収角 θ_0 付近で略線形となるため、各屈折率 n の差が小さくても、その差を吸収角 θ_0 の差として検出できる。

【0046】

そこで、本実施形態の表面プラズモンセンサ 1 では、まず試料 16 として屈折率 n_s が既知である基準物質を反射板 11 上に配置し、図 7 に示す手順に従って反射光の楕円率 \tan の変動を測定し、吸収角 θ_0 を測定する。

30

次に、反射板 11 に屈折率 n を測定したい試料 16 を配置し、基準物質と同様の手順に従って楕円率 \tan がゼロとなる吸収角 θ'_0 を測定する。

測定した吸収角の差 θ_0 ($= \theta'_0 - \theta_0$) から基準物質の屈折率 n_s と、試料 16 の屈折率 n の差 n ($= n - n_s$) を測定する。

【0047】

なお、上述した測定方法では、基準物質の吸収角 θ_0 を測定しているが、基準物質の屈折率 n_s 及び吸収角 θ_0 が既知の場合は測定を省略してもよい。

40

【0048】

計測部 14 は、入射角 θ を反射光の楕円率 \tan を測定する毎に光源 12 から取得してもよく、楕円率 \tan がゼロになった時の入射角 θ を光源 12 から取得するようにしてもよい。あるいは、計測部 14 は、入射角 θ の範囲と入射角の変化分 (ステップ S105 の) から楕円率 \tan を測定した時の入射角を求めるようにしてもよい。このように、計測部 14 が光源 12 を制御し上述した屈折率 n の測定方法を実行するようにしてもよく、図示しない制御部を設け、制御部によって各部を制御するようにしてもよい。

【0049】

以上のように、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 1 は、楕円率 \tan の変動、具体的には楕円率 \tan がゼロとなる吸収角 θ_0 から試料 16 の屈折率 n を測定する。

50

楕円率 $t \tan$ の入射角特性は、吸収角 θ_0 付近で略線形となるため、楕円率 $t \tan$ がゼロとなる吸収角 θ_0 はゼロ点検出を行えば測定できるため、最小点検出のような複雑な検出が不要となり、吸収角 θ_0 を容易かつ高精度に測定することができる。そのため、例えば気体のように屈折率 n の差が微小な物質でも屈折率 n を測定することができる。

【0050】

(第2実施形態)

本発明の第2実施形態に係る表面プラズモンセンサ2を説明する。図13は表面プラズモンセンサ2の概略を示す図である。本実施形態に係る表面プラズモンセンサ2は反射板21の金属層20が図2(c)に示す一次元薄膜周期構造を有している点及び基板25側から入射光を入射している点で図1の表面プラズモンセンサ1と異なる。

10

【0051】

反射板21は、シリコン基板のように光を透過する基板25と、一次元薄膜周期構造を有する金属層20とを有する。反射板21は、光源12に近い方から基板25、金属層20との順に積層されており、金属層20の基板25と対向する面上に試料16が配置される。

【0052】

これ以外の構成及び屈折率の測定方法は、第1実施形態に係る表面プラズモンセンサ1と同じであるため説明を省略する。なお、本実施形態の金属層20は、両面に周期構造を有しているが、試料16が配置される面のみに周期構造を有するようにしてもよい。

【0053】

以上のように、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ2は、光源12と反射板21との間に試料16を配置できない場合であっても、第1実施形態と同様に試料16の屈折率 n を測定することができる。

20

【0054】

(第3実施形態)

本発明の第3実施形態に係る表面プラズモンセンサ3を説明する。図14は、表面プラズモンセンサ3の概略を示す図である。本実施形態に係る表面プラズモンセンサ3は、入射角 θ 及び波長 λ を一定とし、反射板31の方位角 ϕ を変動させながら楕円率 $t \tan$ の変動を測定する点で図1の表面プラズモンセンサ1と異なる。

【0055】

反射板31は、図示しない駆動装置を有しており、方位角 ϕ が変動するよう回転する。計測部34は、受光部13が受光した反射光の楕円率の変動を測定する。計測部34は、測定した楕円率がゼロとなる方位角 θ_0 (以下、吸収方位角 θ_0 と称する。)を測定する。計測部34は、反射板11上に基準物質が配置された場合の吸収方位角 θ_0 と、試料16が配置された場合の吸収方位角 θ'_0 との差 $\Delta\theta_0$ ($= \theta'_0 - \theta_0$) から試料16と基準物質との屈折率の差 n を測定する。

30

そのほかの構成は図1に示す表面プラズモンセンサ1と同様であるため説明を省略する。

【0056】

図15を用いて反射板31の方位角 ϕ を変化させる場合の反射光の楕円率 $t \tan$ の変動を測定する方法を説明する。ステップS104までは図7と同じであるため説明を省略する。

40

【0057】

反射光から楕円率 $t \tan$ を測定すると、反射板31は方位角 ϕ を変更し、 $\phi + \Delta\phi$ とする(S305)。楕円率の変動を測定する全ての方位角 ϕ で楕円率 $t \tan$ を測定していない場合(S306のno)は、ステップS102に戻る。一方、全ての方位角 ϕ で楕円率 $t \tan$ を測定した場合(S306のyes)は、試料16の測定を終了する。

【0058】

図16を用いて本実施形態に係る表面プラズモンセンサ3が屈折率 n を測定できる点について説明する。図16に、屈折率 n がそれぞれ「1.0003」、「1.00039」

50

、「1.0001」である試料16における反射光の楕円率 \tan の方位角特性を示す。実線が屈折率「1.0001」、破線が「1.0003」、一点鎖線が「1.00039」の方位角特性を示している。なお、図16では、入射角 θ を $\theta = 11.3^\circ$ とし、波長

を $\lambda = 670 \text{ nm}$ とした場合の空気の楕円率 \tan の変動を計測したシミュレーション結果を示している。

【0059】

図16では、各屈折率 n の方位角特性が略線形となっている。そのため、第1実施形態の入射角特性と同様に方位角特性を用いても楕円率 \tan がゼロとなる吸収方位角 θ_0 を容易にかつ高精度に測定することができる。

10

【0060】

本実施形態に係る表面プラズモンセンサ3では、まず、屈折率 n_s が既知である基準物質を反射板31上に配置し、図15に示す手順に従い方位角を変化させた場合の楕円率 \tan の変動を測定し、楕円率 \tan がゼロとなる吸収方位角 θ_0 を測定する。

次に、反射板31に屈折率 n を測定したい試料16を配置し、基準物質と同様の手順に従って楕円率 \tan がゼロとなる吸収方位角 θ'_0 を測定する。

測定した吸収方位角の差 $\Delta\theta_0$ ($= \theta'_0 - \theta_0$) から基準物質の屈折率 n_s と、試料16の屈折率 n の差 Δn ($= n - n_s$) を測定する。

【0061】

なお、上述した測定方法では、基準物質の吸収方位角 θ_0 を測定しているが、基準物質の屈折率 n_s 及び吸収方位角 θ_0 が既知の場合は測定を省略してもよい。

20

【0062】

計測部34は、反射板31の方位角 θ を、反射光の楕円率 \tan を測定する毎に反射板31から取得してもよく、楕円率 \tan がゼロになった時の方位角 θ を反射板31から取得するようにしてもよい。あるいは、計測部34は、方位角 θ の範囲と方位角 θ の変化分(ステップS305の $\Delta\theta$) から楕円率 \tan を測定した時の方位角 θ を求めるようにしてもよい。このように、計測部34が反射板31を制御し上述した屈折率 n の測定方法を実行するようにしてもよく、図示しない制御部を設け、該制御部によって各部を制御するようにしてもよい。

【0063】

以上のように、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ3によると、入射角 θ を一定としても方位角 θ を変動させると楕円率が変動するため、入射角 θ を変動させずに試料16の屈折率 n を容易にかつ高精度に測定することができる。

30

【0064】

(第4実施形態)

本発明の第4実施形態に係る表面プラズモンセンサ4を説明する。図17は、表面プラズモンセンサ4の概略を示す図である。本実施形態に係る表面プラズモンセンサ4は、入射角 θ 及び方位角 ϕ を一定とし、入射光の波長 λ を変動させながら楕円率 \tan の変動を測定する点で図1の表面プラズモンセンサ1と異なる。

【0065】

光源42は、例えば半導体レーザで構成される。半導体レーザは、図示しない制御部から制御信号が入力されることで、入射光の波長を変更することが可能である。光源42が該制御部を備える構成としてもよい。光源42は、入射光の波長 λ を変化させながら入射光を照射する。

40

【0066】

計測部44は、受光部13が受光した反射光の楕円率の変動を測定する。計測部44は、測定した楕円率がゼロとなる波長 λ_0 (以下、吸収波長 λ_0 と称する。)を測定する。計測部44は、反射板11上に基準物質が配置された場合の吸収波長 λ_0 と、試料16が配置された場合の吸収波長 λ'_0 との差 $\Delta\lambda_0$ ($= \lambda'_0 - \lambda_0$) から試料16と基準物質との屈折率の差 Δn を測定する。

50

そのほかの構成は図1に示す表面プラズモンセンサ1と同様であるため説明を省略する。

【0067】

図18を用いて入射光の波長 λ を変化させる場合の反射光の楕円率 $\tan \psi$ の変動を測定する方法を説明する。ステップS104までは図7と同じであるため説明を省略する。

【0068】

反射光から楕円率 $\tan \psi$ を測定すると、光源42は照射する波長 λ を変更し、 $\lambda + \Delta\lambda$ とする(S405)。楕円率の変動を測定する全ての波長で楕円率 $\tan \psi$ を測定していない場合(S406のno)は、ステップS102に戻る。一方、全ての波長で楕円率 $\tan \psi$ を測定した場合(S406のyes)は、試料16の測定を終了する。

10

【0069】

図19を用いて本実施形態に係る表面プラズモンセンサ4が屈折率 n を測定できる点について説明する。図19に、屈折率 n がそれぞれ「1.0003」、「1.00039」、「1.0001」である試料16における反射光の楕円率 $\tan \psi$ の波長特性を示す。破線が屈折率「1.0001」、実線が「1.0003」、一点破線が「1.00039」の波長特性を示している。図19では、入射角 θ_i を $\theta_i = 11.193^\circ$ とし、方位角 ϕ を $\phi = 5^\circ$ とした場合の空気の楕円率 $\tan \psi$ の変動を計測したシミュレーション結果を示している。

【0070】

図19では、各屈折率 n の波長特性が略線形となっている。そのため、第1実施形態の入射角特性と同様に波長特性を用いても楕円率 $\tan \psi$ がゼロとなる吸収波長 λ_0 を容易にかつ高精度に測定することができる。

20

【0071】

本実施形態に係る表面プラズモンセンサ4では、まず、屈折率 n_s が既知である基準物質を反射板11上に配置し、図18に示す手順に従い波長を変化させた場合の楕円率 $\tan \psi$ の変動を測定し、楕円率 $\tan \psi$ がゼロとなる吸収波長 λ_0 を測定する。

次に、反射板11に屈折率 n を測定したい試料16を配置し、基準物質と同様の手順に従って楕円率 $\tan \psi$ がゼロとなる吸収波長 λ'_0 を測定する。

測定した吸収波長の差 $\Delta\lambda_0$ ($= \lambda'_0 - \lambda_0$) から基準物質の屈折率 n_s と、試料16の屈折率 n の差 Δn ($= n - n_s$) を測定する。

30

【0072】

なお、上述した測定方法では、基準物質の吸収波長 λ_0 を測定しているが、基準物質の屈折率 n_s 及び吸収波長 λ_0 が既知の場合は測定を省略してもよい。

【0073】

計測部44は、入射光の波長 λ を、反射光の楕円率 $\tan \psi$ を測定する毎に光源42から取得してもよく、楕円率 $\tan \psi$ がゼロになった時の波長 λ_0 を光源42から取得するようにしてもよい。あるいは、計測部44は、波長 λ の範囲と波長 λ の変化分(ステップS405の $\Delta\lambda$) から楕円率 $\tan \psi$ を測定した時の波長 λ_0 を求めるようにしてもよい。このように、計測部44が光源42を制御し上述した屈折率 n の測定方法を実行するようにしてもよく、図示しない制御部を設け、該制御部によって各部を制御するようにしてもよい。

40

【0074】

以上のように、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ4によると、入射角 θ_i を一定としても波長 λ を変動させると楕円率が変動するため、入射角 θ_i を変動させずに試料16の屈折率 n を容易にかつ高精度に測定することができる。入射角 θ_i を変動させる必要がないため、光源42に駆動装置が不要となり、表面プラズモンセンサ4を小型化することができる。

【0075】

(第5実施形態)

図20を用いて第5実施形態に係る表面プラズモンセンサ5を説明する。本実施形態に

50

係る表面プラズモンセンサ 5 は、計測部 5 4 が計測する楕円率 tan に基づいて光源 5 2 が照射する入射光の波長 を制御する制御部 5 7 を備える。

【 0 0 7 6 】

光源 5 2 は、制御部 5 7 から入力される制御信号に基づき、半導体レーザ（図示せず）を制御し、波長 の入射光を照射する。計測部 5 4 は、受光部 1 3 が受光した反射光から楕円率 tan を測定する。計測部 5 4 は、楕円率 tan を制御部 5 7 に出力する。

【 0 0 7 7 】

制御部 5 7 は、計測部 5 4 から入力された楕円率 tan に基づき、光源 5 2 から楕円率 tan がゼロとなる波長 の入射光が照射されるように制御信号を生成する。制御部 5 7 は、制御信号を光源 5 2 に出力する。なお計測部 5 4 から制御部 5 7 に入力される情報は、楕円率 tan そのものでなくとも、制御部 5 7 が楕円率 tan がゼロか否かを識別することができる情報であればよい。計測部 5 4 から制御部 5 7 に対しては、例えば p 波と s 波との位相差 やどちらの位相が進んでいるのかといった情報を入力してもよい。

10

【 0 0 7 8 】

図 2 1 を用いて本実施形態における楕円率 tan の変動を測定する方法を説明する。ステップ S 1 0 4 までは図 7 と同じであるため説明を省略する。

【 0 0 7 9 】

計測部 5 4 は、楕円率 tan を測定（ステップ S 1 0 4）し、制御部 5 7 に測定した楕円率 tan を出力する。

20

制御部 5 7 は、楕円率 tan がゼロでない場合（ステップ S 5 0 6 の no）、波長を変更し + となるよう制御信号を生成する（ステップ S 5 0 7）。制御部 5 7 は、制御信号を光源 5 2 に渡すとステップ S 1 0 2 に戻る。一方、楕円率がゼロの場合（ステップ S 5 0 6 の yes）、楕円率変動測定を終了する。

【 0 0 8 0 】

図 1 9 に示すように、吸収波長 λ_0 付近の楕円率 tan の波長特性が、正の傾きを持つ略線形となっている場合に、ステップ S 5 0 7 で波長 を変更するときは、楕円率 tan が正の場合は波長 を短くするように、負の場合は長くするように変更してもよい。なお、楕円率 tan の波長特性は、吸収波長 λ_0 付近で負の傾きを持つ略線形となる場合もある。この場合は、楕円率 tan が負の場合は波長 を短くするように、正の場合は長くするように変更すればよい。

30

【 0 0 8 1 】

このように楕円率 tan に応じて波長 を変更することで楕円率変動測定の繰り返しステップ数を短くすることができる。

【 0 0 8 2 】

本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 5 では、まず、屈折率 n_s が既知である基準物質を反射板 1 1 上に配置し、図 2 1 に示す手順に従い波長を変化させた場合の楕円率 tan の変動を測定し、楕円率 tan がゼロとなる吸収波長 λ_0 を測定する。

次に、反射板 1 1 に屈折率 n を測定したい試料 1 6 を配置し、基準物質と同様の手順に従って楕円率 tan がゼロとなる吸収波長 λ'_0 を測定する。吸収波長 λ_0 、 λ'_0 から第 4 実施形態と同様に試料 1 6 の屈折率 n を測定する。

40

【 0 0 8 3 】

なお、屈折率 n の測定は、第 4 実施形態と同様に計測部 5 4 が行ってもよく、また制御部 5 7 が行ってもよい。制御部 5 7 が計測部 5 4 の機能を備えるように構成し、計測部 5 4 を省略してもよい。

【 0 0 8 4 】

以上のように、第 5 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 5 によれば、計測部 5 4 が楕円率 tan をフィードバックすることにより、測定した楕円率 tan に応じて光源 5 2 の波長 を変更できるようになる。これにより、吸収波長 λ_0 の測定を短時間で行うことができるようになり、試料 1 6 の屈折率測定時間を短縮することができる。

50

【0085】

なお、ここでは測定した楕円率 \tan に応じて光源 52 の波長 を変更しているが、波長 の代わりに入射角 を変更し、吸収角 θ_0 を測定するようにしてもよく、方位角 を変更し、吸収方位角 θ_0 を測定するようにしてもよい。なお、方位角 を変更する場合、制御部 57 は、光源 52 ではなく反射板 11 を制御する。

【0086】

(第6実施形態)

図 22 を用いて第 6 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 6 を説明する。

本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 6 は、計測部 64 での屈折率 n の測定方法が第 4 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 5 と異なる。それ以外の構成は同じであるため説明は省略する。

10

【0087】

まず、基準物質の吸収波長 λ_0 を測定する。これは第 5 実施形態と同様に測定するので説明を省略する。次に、屈折率 n を測定したい試料 16 を反射板 11 上に配置し、光源 52 から波長 λ が基準物質の吸収波長 λ_0 である入射光を照射する。計測部 64 は、受光部 13 が受光した反射光の楕円率 \tan を測定する。

【0088】

図 23 に示すように、反射板 11 上に配置した試料 16 の屈折率が n_s から $n_s + \Delta n$ に変化すると、楕円率 \tan の入射角特性も Δn 変化する。第 1 実施形態のように、楕円率 \tan がゼロになる吸収角 θ_0 の変化 $\Delta \theta_0$ を測定することで、屈折率 n_s の変化 Δn を計測してもよいが、一定の波長 λ_0 及び入射角 θ_0 における楕円率 \tan の変化 (図 23 中の矢印) を測定することで、屈折率 n_s の変化 Δn を計測してもよい。ただし、試料 16 の楕円率 \tan は、楕円率 \tan の入射角特性の直線部分である \tan^- から \tan^+ の範囲にあるものとする。

20

【0089】

そこで、本実施形態では、計測部 64 は、一定の入射角 θ で基準物質の楕円率 \tan がゼロとなる波長 λ_0 を測定し、該入射角 θ 及び波長 λ_0 で試料 16 の楕円率 \tan を測定する。計測部 64 は、測定した試料 16 の楕円率 \tan から試料 16 の屈折率 n の変化 Δn を測定する。

【0090】

なお、ここでは入射角を一定とし、波長 λ を変化させることで基準物質の楕円率 \tan がゼロとなる波長 λ_0 を測定したが、波長を一定とし、入射角 θ を変化させることで、基準物質の楕円率 \tan がゼロとなる入射角 θ_0 及び波長 λ_0 で試料 16 の楕円率 \tan を測定してもよい。また、波長 λ 、入射角 θ を一定とし、方位角 ϕ を変化させることで基準物質の楕円率 \tan がゼロとなる入射角 θ_0 及び方位角 ϕ_0 で試料 16 の楕円率 \tan を測定してもよい。

30

【0091】

以上のように、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 6 では、試料 16 の屈折率変化に伴う楕円率 \tan の入射角特性の直線部分の変化を利用して試料 16 の屈折率 n を測定するため、試料 16 の楕円率測定回数が 1 回で済む。これにより、計測時間を大幅に短縮することができる。また、図 23 に示すように、楕円率 \tan の入射角特性は楕円率 \tan がゼロとなる付近で急峻となるため、屈折率のわずかな差が楕円率 \tan の大きな変化となって現れやすい。従って、例えば気体のような屈折率 n の差が小さい物質であってもより高精度に屈折率 n を測定することができる。

40

【0092】

また、屈折率 n を測定したい試料 16 の楕円率 \tan の測定回数が 1 回で済むため、実験の再現性が良くなり、試料気体の違いにより \tan の値が変わるため、さらに高精度に屈折率 n を測定することができる。

【0093】

(第7実施形態)

50

図24を用いて第7実施形態に係る表面プラズモンセンサ7を説明する。

本実施形態に係る表面プラズモンセンサ7は、反射板71を調整することで屈折率 n の測定感度を向上させている点で表面プラズモンセンサ1と異なる。それ以外の構成は同じであるため説明を省略する。

【0094】

図25に、反射板71の方位角 θ 及び格子の溝の形状(ここでは、溝の深さ H)を変化させた場合の楕円率 \tan の入射角特性を示す。図25は、試料16として空気を用いた場合のシミュレーション結果を示す図である。楕円率 \tan の変動を測定する方法は、図7と同じである。

【0095】

図25に示すように、反射板71の方位角 θ 及び溝の形状(ここでは溝の深さ H)を変化させることで、吸収角 θ_0 付近の楕円率 \tan の傾きが変化していることがわかる。吸収角 θ_0 は楕円率 \tan の傾きが大きい方が高精度に求まる。そこで、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ7では、反射板71の方位角 θ 及び溝の形状(例えば溝の深さ H)を調整することで、吸収角 θ_0 付近の楕円率 \tan の傾きが最も大きくなるようにして楕円率 \tan の変動を測定する。

【0096】

反射板71の調整方法としては、反射板71の方位角 θ 及び溝の形状を変化させながら楕円率 \tan の入射角特性を測定し、吸収角 θ_0 付近の楕円率 \tan の傾きが最も大きくなる反射板71の方位角 θ 及び溝の形状を決定してもよい。

【0097】

また、吸収角 θ_0 の前後で反射光のp波とs波の位相差 $\Delta\phi$ を $\pm 90^\circ$ 、反射率を同じ($R_s = R_p$)になるように溝の形状と方位角 θ を選べば、楕円率 \tan が ± 1 に近づき、楕円率 \tan の吸収角 θ_0 の前後の傾きが大きくなる。従って、溝の形状と方位角を変化させながら、反射光のp波とs波の位相差 $\Delta\phi$ や反射率を測定し、吸収角 θ_0 付近の楕円率 \tan の傾きが最も大きくなる反射板71の方位角 θ 及び溝の形状を決定してもよい。なお、反射板71の調整は、屈折率 n を測定する前に1度行えば十分である。

【0098】

以上のように、本実施形態に係る表面プラズモンセンサ7は、屈折率 n を測定する前に反射板71を調整することで、吸収角 θ_0 付近の楕円率 \tan の傾きを大きくすることができる。これにより、吸収角 θ_0 を高精度に測定することができ、屈折率 n の測定感度を向上させることができる。

【0099】

ここでは、表面プラズモンセンサ1の反射板を調整するようにしているが、表面プラズモンセンサ2、4~6の反射板を同様に調整することで屈折率 n の測定感度を向上させるようにしてもよい。また、表面プラズモンセンサ3の反射板の溝の形状を調整し吸収角 θ_0 付近の楕円率 \tan の傾きを大きくし、吸収角 θ_0 の測定感度を向上させるようにしてもよい。

【0100】

(第8実施形態)：

本発明の第8実施形態に係る表面プラズモンセンサ8を説明する。図26は、表面プラズモンセンサ8の概略を示す図である。本実施形態に係る表面プラズモンセンサ8は、上述した楕円率 \tan 算出の元となる位相情報に基づいて屈折率を測定する点で上述した各実施形態に係る表面プラズモンセンサと異なる。

【0101】

上述した図9を参照して説明したように、反射光のp波の位相 ϕ_p 及びs波の位相 ϕ_s は、吸収角 θ_0 の前後で正から負、又は負から正へと変化し、反射光の位相差 $\Delta\phi$ も、吸収角 θ_0 の前後で正から負、又は負から正へと変化する。上述した例では、この特性を利用して吸収角 θ_0 を測定するにあたり、楕円率 \tan を測定することで位相差 $\Delta\phi$ がゼロとなる入射角を吸収角 θ_0 に特定していた。

10

20

30

40

50

【0102】

これに対し、本第8実施形態では、偏光板を用いることで反射光のp波とs波の位相差に相当する値を測定し、位相差がゼロとなる入射角（吸収角 θ_0 ）を測定することができる。これにより、楕円率 \tan の測定を行わずに吸収角 θ_0 を特定し、ひいては屈折率 n を特定することができる。すなわち、楕円率 \tan を測定するポラリメータ等の機器が不要となる。

【0103】

図26において、表面プラズモンセンサ8は、スプリッタ87と、偏光板88a, 88bと、2つの受光部83a, 83bを備えている。なお、その他の構成は図1に示す表面プラズモンセンサ1と同様であるため説明を省略する。

スプリッタ87は、反射板11が反射する反射光の経路上に配置されており、反射光の光束を2つに分割し、一方の光束を受光部83aへ入射させ、他方の光束を受光部83bへ入射させる。

【0104】

偏光板88aは、スプリッタ87にて分割された一方の光束の経路上に配置されており、この光束の中の特定方向に偏光した成分を選択的に通過させる。偏光板88bは、スプリッタ87にて分割された他方の光束の経路上に配置されており、この光束の中の特定方向に偏光した成分を選択的に通過させる。これにより、受光部83a, 83bは、特定方向に偏光した反射光をそれぞれ受光する。

【0105】

偏光板88aと偏光板88bは、異なる方向に偏光した成分を通過させるように透過軸の方向を調整されている。例えば、後述の図28や図30に示す例では、偏光板88aは、反射光の楕円の傾き角 θ と同じ向きに偏光した光を選択的に通過させるように調整し、偏光板88bは、反射光の楕円の傾き角 θ と直交する向きに偏光した光を選択的に通過させるように調整する。このように、楕円の傾き角が 90° 異なる光を各偏光板が選択的に通過することで、反射光の位相差の増減を測定することができる。

【0106】

換言すると、偏光板88a, 88bの少なくとも一方が、反射光の楕円の傾き角 θ の向きと直交する方向に偏光した光の一部を通過可能に調整されていればよい。これにより、少なくとも一方の受光部が反射光の位相差の増減傾向を測定することとなり、計測部84は、位相差が0になる吸収角 θ_0 を測定することができる。

【0107】

計測部84は、偏光板88a, 88bを介して受光部83a, 83bが受光した反射光の強度変動を測定する。そして、計測部84は、反射光の強度変動に基づいて吸収角 θ_0 を測定することができる。

【0108】

ここで、本実施形態における吸収角 θ_0 の測定方法について説明する。

図27は、入射角 θ と楕円の傾き角 α の関係を示す図である。同図には、各入射角 θ における楕円の傾き角 α の変動をシミュレーションした結果を示してある。ここでは、反射板11としてホログラフィックアルミ格子を用いている。格子の溝の深さを $H = 72 \text{ nm}$ 、格子の周期 d を $d = 556 \text{ nm}$ 、方位角 ϕ を $\phi = 30^\circ$ 、波長 λ を $\lambda = 670 \text{ nm}$ とし、入射角 θ を $3^\circ < \theta < 15^\circ$ の範囲で変化させた。同図に示すように、楕円の傾き角 α は吸収角 θ_0 を中心とするピークを有している。

【0109】

同図において、 θ_1 は楕円の傾き角 $\alpha = 30^\circ$ における入射角を表し、 θ_2 は楕円の傾き角 $\alpha = 70^\circ$ における入射角を表す。入射角 θ_1 , θ_2 は吸収角 θ_0 からずれているが、吸収角 θ_0 から数度の範囲内にある。

【0110】

図28は、入射光の楕円の傾き角 α を 30° として計測部84が測定した受光強度を示すシミュレーション結果を示す図である。ここでは、反射板11としてホログラフィック

10

20

30

40

50

アルミ格子を用いている。格子の溝の深さを $H = 72 \text{ nm}$ 、格子の周期 d を $d = 556 \text{ nm}$ 、方位角 $\theta = 30^\circ$ 、波長 λ を $\lambda = 670 \text{ nm}$ とし、入射角 θ_1 を $3^\circ < \theta_1 < 15^\circ$ の範囲で変化させた。同図において、受光部 83a の受光強度 E_a を一点鎖線で示し、受光部 83b の受光強度 E_b を二点鎖線で示し、受光強度の差分 $E_a - E_b$ を点線で示してある。

【0111】

受光強度 E_a 、 E_b や差分 $E_a - E_b$ は、入射角 θ_1 を略中心とする所定範囲において線形的に変化している。そこで、この所定範囲における線形的な変化を基準試料にて測定、又はシミュレーションし、その測定結果又はシミュレーション結果を校正データとして用いることにより、屈折率 n の変動に伴う入射角 θ_1 の変動を測定することができる。

10

【0112】

図 29 は、本実施形態に係る屈折率 n の測定手順を示すフローチャートである。同図に示す測定方法においては、反射板 11 上に試料 16 を配置した場合の試料 16 からの反射光の強度（以下、反射光強度 I と呼ぶ。）の変動を測定する。

【0113】

まず、反射板 11 上に試料 16 を配置し（S201）、入射角 θ_1 、波長 λ の入射光を光源 12 から照射する（S202）。ここでは、光源 12 は、p 波の入射光を照射する。この入射光の入射角 θ_1 は、上述した入射角 θ_1 を略中心とする所定範囲内の角度である。

受光部 83a、83b は、入射光が試料 16 を介して反射板 11 にて反射された反射光を受光する（S203）。

20

【0114】

計測部 84 は、反射光から反射光強度 I を測定する（S204）。

このようにして測定された反射光強度 I に基づいて、計測部 84 は、上述した校正データを参照しつつ反射光強度 I の校正データからの変動量 ΔI を特定する。そして、計測部 84 は、変動量 ΔI に基づいて基準物質の屈折率 n_s と試料 16 の屈折率の差 $n - n_s$ を測定する。

【0115】

なお、入射光の楕円の傾き角 θ は 30° に限るものではなく、楕円の傾き角 θ の取り得る角度の範囲内であれば様々に設定することができる。例えば、図 30 は、入射光の楕円の傾き角 θ を 70° として計測部 84 が測定した受光強度を示すシミュレーション結果を示す図である。ここでは、反射板 11 としてホログラフィックアルミ格子を用いている。格子の溝の深さを $H = 72 \text{ nm}$ 、格子の周期 d を $d = 556 \text{ nm}$ 、方位角 $\theta = 30^\circ$ 、波長 λ を $\lambda = 670 \text{ nm}$ とし、入射角 θ_1 を $3^\circ < \theta_1 < 15^\circ$ の範囲で変化させた。

30

【0116】

図 30 において、受光部 83a の受光強度 E_a を一点鎖線で示し、受光部 83b の受光強度 E_b を二点鎖線で示し、受光強度の差分 $E_a - E_b$ を点線で示してある。同図においても、受光強度 E_a 、 E_b や差分 $E_a - E_b$ は、入射角 θ_2 を略中心とする所定範囲において線形的に変化しているため、この所定範囲の校正データを用いることにより入射角 θ_2 の変動を測定することができる。

【0117】

以上のように、第 8 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 8 は、偏光板を用いて得られる位相差 $\Delta \phi$ に相当する値を用いて屈折率 n を測定することができる。すなわち、楕円率 $\tan \alpha$ の測定が不要であるため、ポラリメータ等のように楕円率 $\tan \alpha$ を測定する高価且つ複雑な機器を用いることなく、屈折率 n を測定することができる。

40

【0118】

（第 9 実施形態）

本発明の第 9 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 9 を説明する。図 31 は、表面プラズモンセンサ 9 の概略を示す図である。本実施形態に係る表面プラズモンセンサ 9 は、スプリッタを備えず、偏光板と受光部を 1 つずつ備える点で、上述した第 8 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 8 と異なる。

50

【 0 1 1 9 】

図 3 1 において、表面プラズモンセンサ 9 は、偏光板 9 8 と受光部 9 3 を備える。偏光板 9 8 は、反射光の経路上に配置されており、この反射光の中の特定方向に偏光した成分を選択的に通過させる。偏光板 9 8 は、これにより、受光部 9 3 は、特定方向に偏光した反射光を受光する。

【 0 1 2 0 】

計測部 9 4 は、偏光板 9 8 を介して受光部 9 3 が受光した反射光の強度変動を測定することができる。そして、計測部 9 4 は、反射光の強度変動に基づいて入射角（吸収角 θ_0 ）を測定することができる。そのほかの構成は図 2 6 に示す表面プラズモンセンサ 8 と同様であるため説明を省略する。また、屈折率 n の測定方法も、第 8 実施形態における受光強度 E_a 、 E_b に基づく屈折率の測定方法と同様であるため、説明を省略する。

10

【 0 1 2 1 】

以上のように、第 9 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 9 は、1 組の偏光板と受光部を用いて位相差 $\Delta\phi$ に相当する値を取得して屈折率 n を測定することができる。

【 0 1 2 2 】

なお、第 3 ~ 第 9 実施形態に係る表面プラズモンセンサ 3 ~ 9 の反射板を、第 2 実施形態と同様に基板 2 5 側から入射光が入射されるように構成するようにしてもよい。

【 0 1 2 3 】

また、第 1 ~ 第 7 実施形態において、楕円率 $\tan \psi$ の代わりに第 8、9 実施形態のように偏光板を用いて反射光の位相差 $\Delta\phi$ に相当する値を測定することにより測定した吸収角 θ_0 や吸収方位角 ϕ_0 、吸収波長 λ_0 を用いて屈折率 n を測定することもできる。

20

【 0 1 2 4 】

最後に、上述した各実施形態の説明は本発明の一例であり、本発明は上述の実施の形態に限定されることはない。このため、上述した各実施の形態以外であっても、本発明に係る技術的思想を逸脱しない範囲であれば、設計等に応じて種々の変更が可能であることは勿論である。

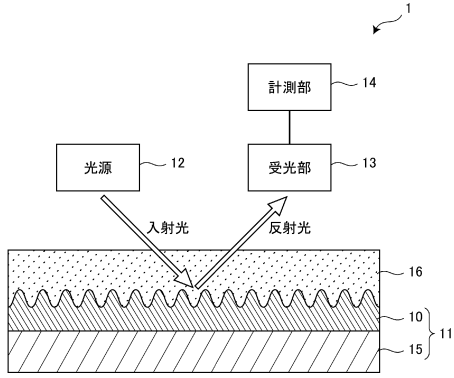
【符号の説明】

【 0 1 2 5 】

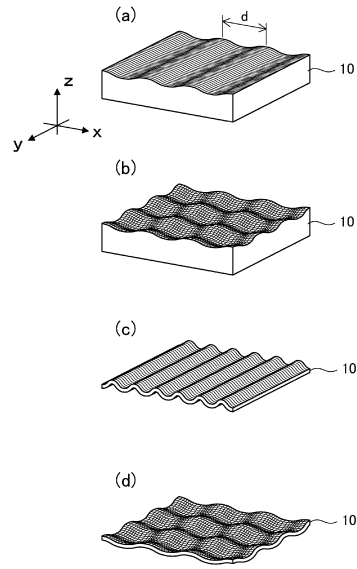
1 1, 2 1, 3 1, 7 1 ... 反射板、1 2, 4 2, 5 2 ... 光源、1 3, 8 3 a, 8 3 b ... 受光部、1 4, 3 4, 4 4, 5 4, 6 4, 8 4, 9 4 ... 計測部、5 7 ... 制御部、8 7 ... スプレッタ、偏光板 ... 8 8 a, 8 8 b

30

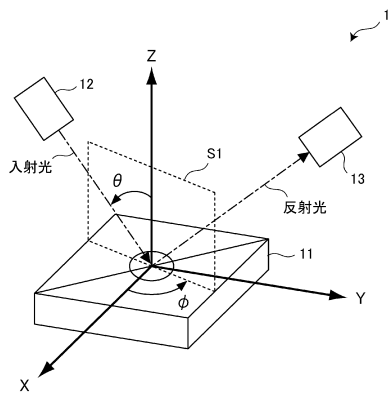
【図1】



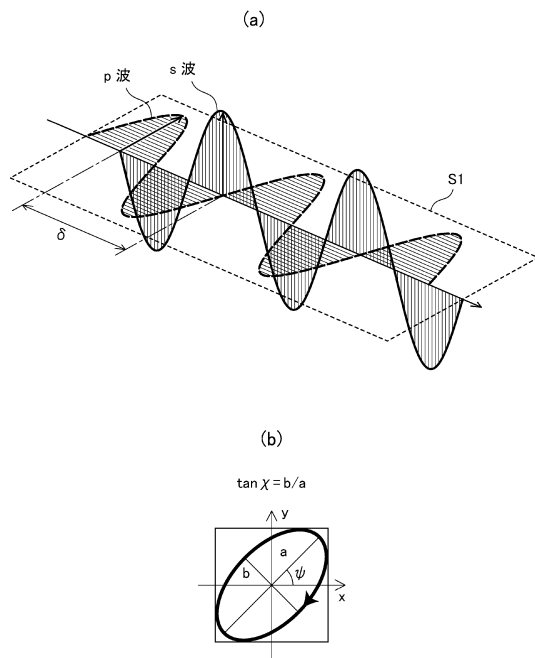
【図2】



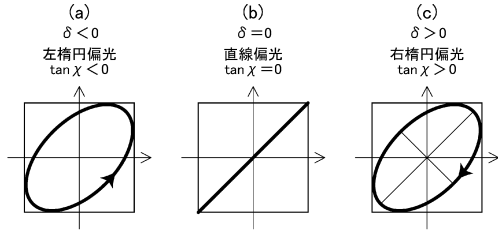
【図3】



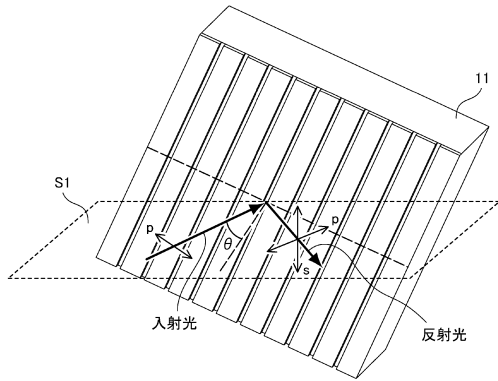
【図4】



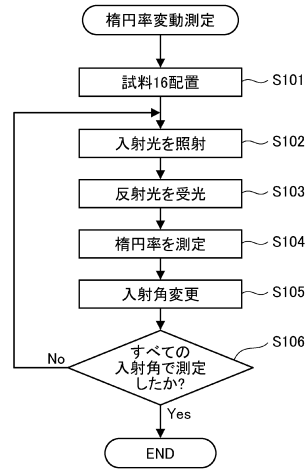
【図5】



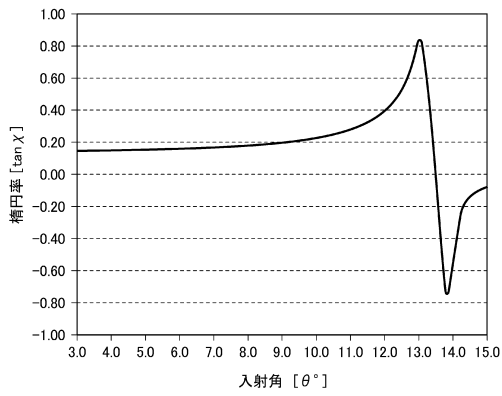
【図6】



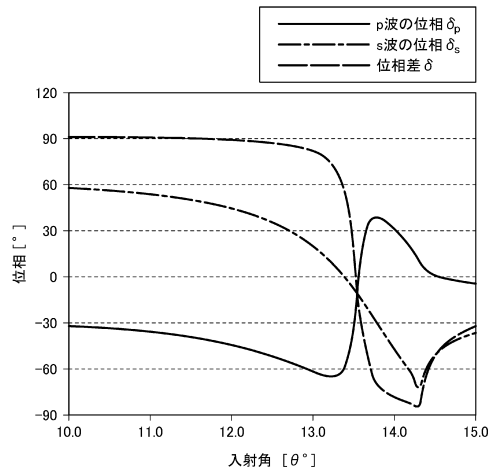
【図7】



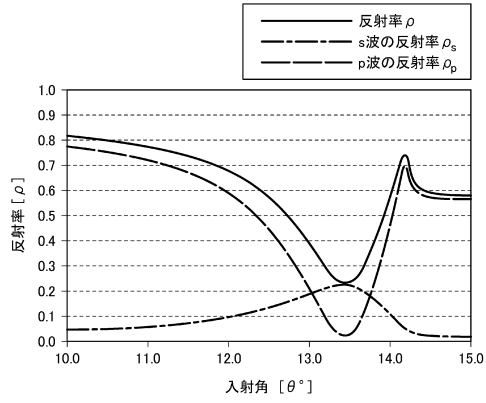
【図8】



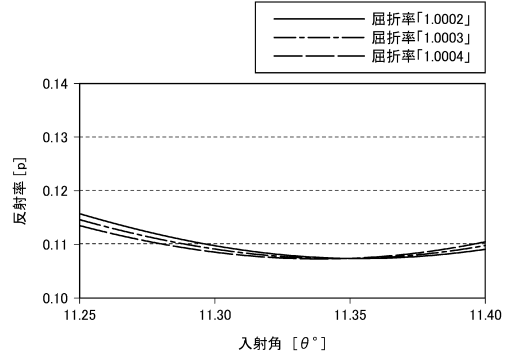
【図9】



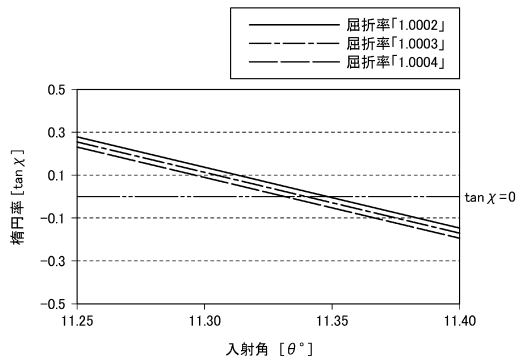
【図10】



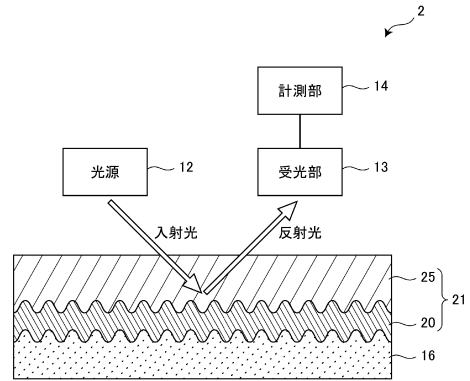
【図12】



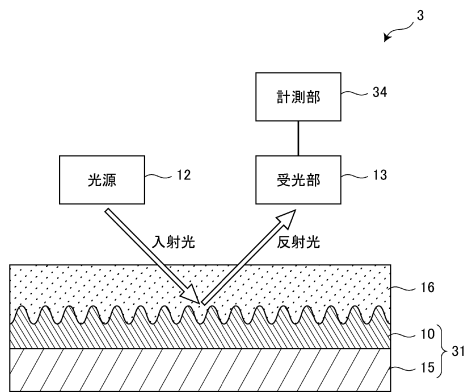
【図11】



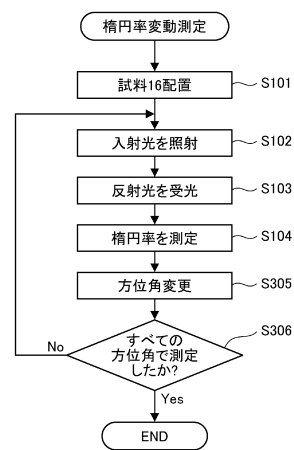
【図13】



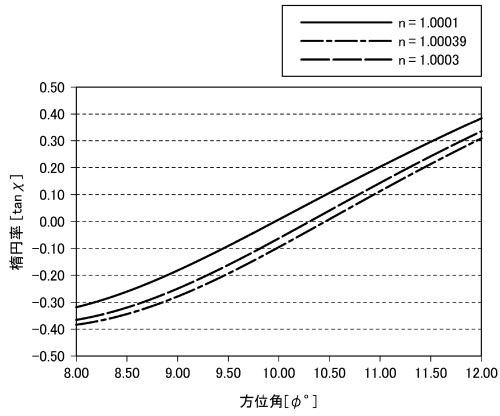
【図14】



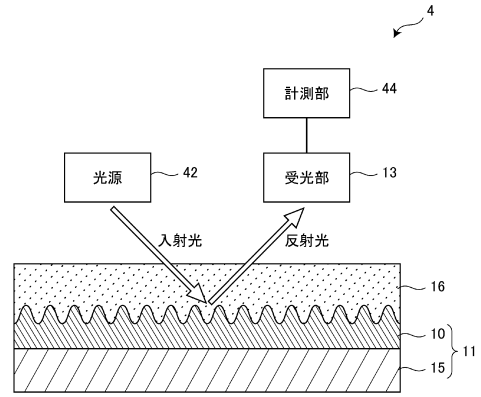
【図15】



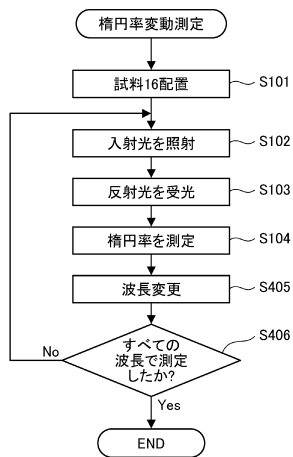
【図 16】



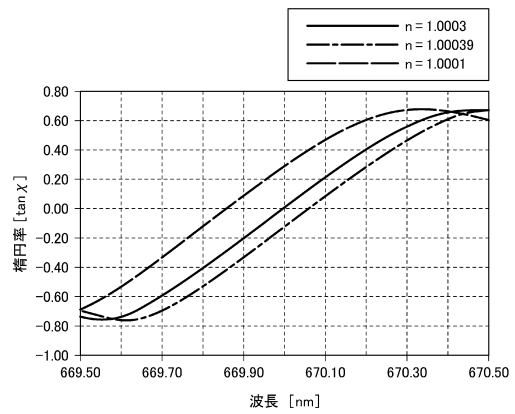
【図 17】



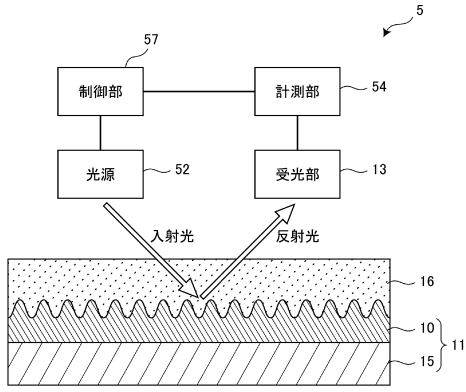
【図 18】



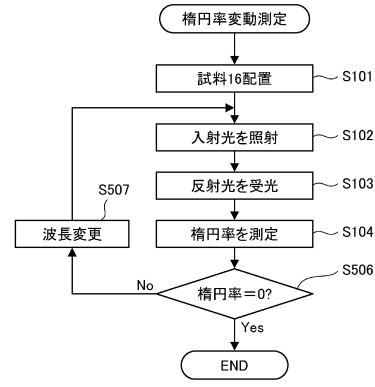
【図 19】



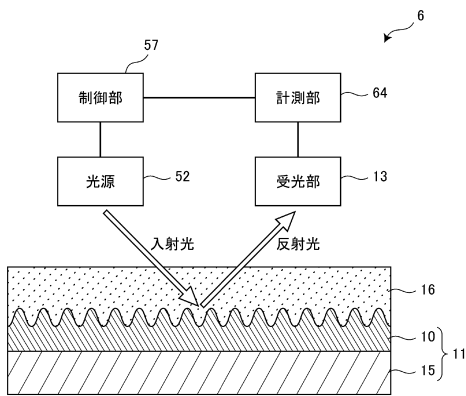
【図20】



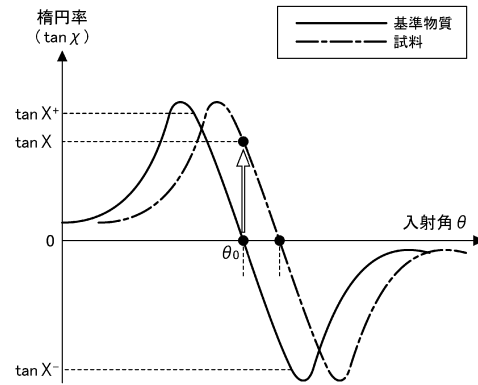
【図21】



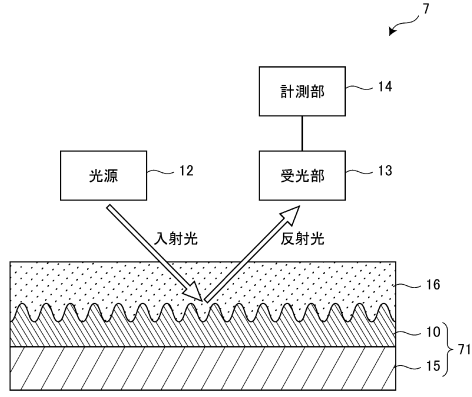
【図22】



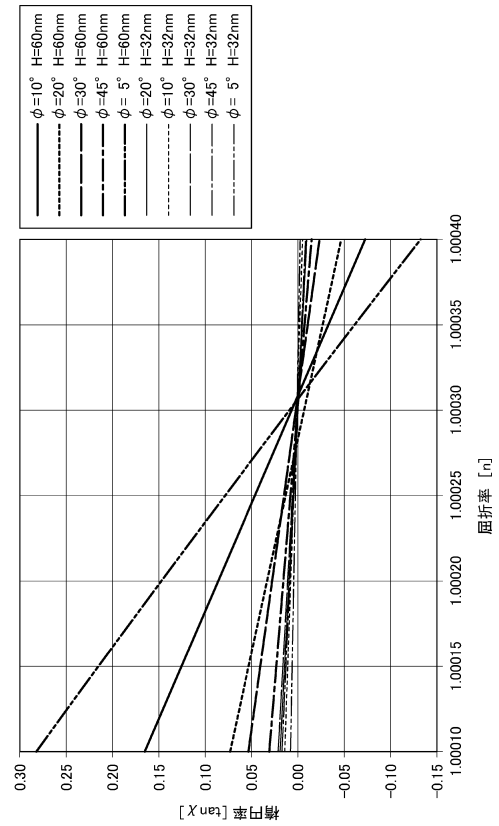
【図23】



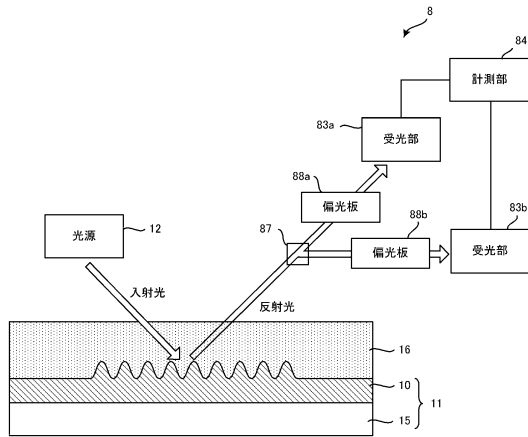
【図24】



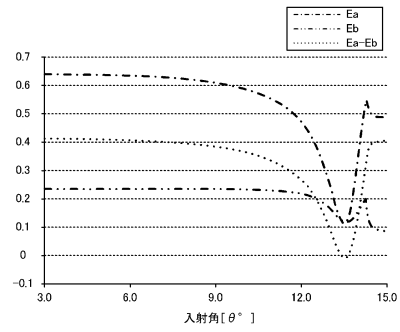
【図25】



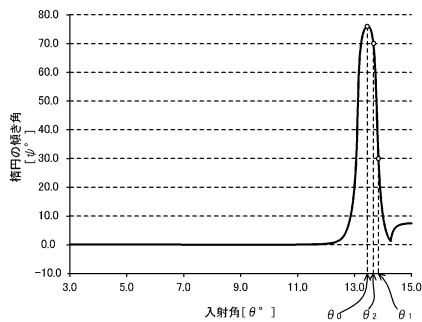
【図26】



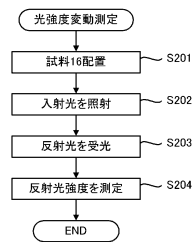
【図28】



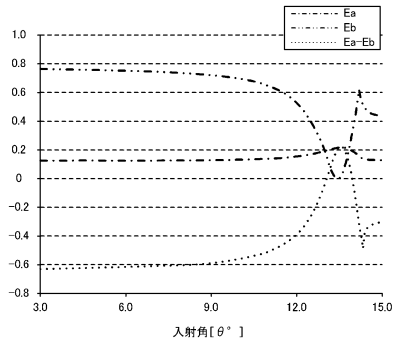
【図27】



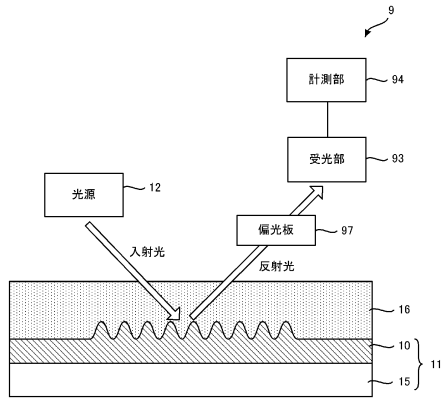
【図29】



【図 30】



【図 31】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2008-292425(JP,A)
特開2009-210495(JP,A)
周山大慶、外3名、コニカルマウントされた金属格子における表面プラズモンの共鳴吸収, 電気学会研究会資料 電磁界理論研究会 EMT-05-1~11・13, 2005年 1月21日, 第29頁-第34頁
Bai B, Artificial optical activity in chiral resonant nanogratings, Proceedings of SPIE, 2009年11月25日, Vol.7393, pp.73930K-1 - 73930K-11
周山大慶、外4名、金属格子における表面プラズモンの励振と屈折率測定への応用, 電気学会研究会資料, 日本, 2007年 1月29日, EMT-07-12, 第61頁-第66頁

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 21/00 - 21/61
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)