

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-25857

(P2010-25857A)

(43) 公開日 平成22年2月4日(2010.2.4)

(51) Int.Cl.
G 0 1 N 21/27 (2006.01)F 1
G 0 1 N 21/27テーマコード (参考)
2 G 0 5 9

審査請求 未請求 請求項の数 19 O L (全 36 頁)

(21) 出願番号 特願2008-189921 (P2008-189921)
(22) 出願日 平成20年7月23日 (2008.7.23)(71) 出願人 000005049
シャープ株式会社
大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号
(74) 代理人 110000338
特許業務法人原謙三国際特許事務所
(72) 発明者 北澤 田鶴子
大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号
シャープ株式会社内
Fターム(参考) 2G059 AA01 AA02 BB01 BB04 EE01
JJ12 JJ17 KK01

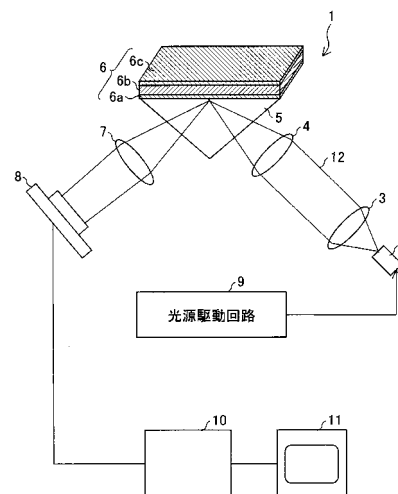
(54) 【発明の名称】 表面プラズモンセンサー、入射角算出装置、表面プラズモンセンサーシステム、入射角計算プログラム、及び前記入射角計算プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体

(57) 【要約】

【課題】簡易な構成で、センサーチップ交換時のセンサーチップの傾き及び高さの変化による測定誤差を補正する。

【解決手段】光源2から出射される光ビーム12の波長において透光性を有するプリズム5と、プリズム5の光ビーム12の入射側とは反対側の表面上に形成されている金属膜6aと、第1金属膜6a上に形成されている誘電体膜6bと、誘電体膜6bに形成されている第2金属膜6cとを備え、プリズム5を透過した光ビーム12が、所定範囲の入射角で、プリズム5及び第1金属膜6a間、第1金属膜6a及び誘電体膜6b間、誘電体膜6b及び第2金属膜6c間、並びに、第2金属膜6cと試料13との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じた反射光を検出する光検出器8とを備えており、光検出器8が検出した反射光の反射率に、3つ以上の極小値が存在している。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、
前記誘電体基板の前記光ビームの入射側とは反対側の表面上に形成されている第 1 金属膜と、

前記第 1 金属膜上に形成されている誘電体膜と、

前記誘電体膜上に形成されている第 2 金属膜とを備えた表面プラズモンセンサーにおいて、

前記光源から出射される光ビームのうち前記誘電体基板を透過した光ビームが、所定範囲の入射角で、前記誘電体基板及び前記第 1 金属膜間、前記第 1 金属膜及び前記誘電体膜間、前記誘電体膜及び前記第 2 金属膜間、並びに、前記第 2 金属膜と検出対象を含む液体又は気体との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じた反射光を検出する検出手段とを備えており、

前記検出手段が検出した前記反射光の、前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3 つ以上の極小値が存在していることを特徴とする表面プラズモンセンサー。

【請求項 2】

前記誘電体膜の膜厚は、前記光ビームの波長より短い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ー。

【請求項 3】

前記第 1 金属膜及び第 2 金属膜の材料は異なる材料で構成されていることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の表面プラズモンセンサー。

【請求項 4】

前記第 2 金属膜の材料は、金を主成分とすることを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載の表面プラズモンセンサー。

【請求項 5】

前記光源の波長は、600 nm 以上、1550 nm 以下であることを特徴とする請求項 4 に記載の表面プラズモンセンサー。

【請求項 6】

前記第 2 金属膜における前記検出対象を含む液体又は気体を接触させる接触面上に、特定の物質を吸着する吸着層が設けられていることを特徴とする請求項 1 から 5 までのいずれか 1 項に記載の表面プラズモンセンサー。

【請求項 7】

前記誘電体基板は、前記表面プラズモンセンサーから着脱可能であることを特徴とする請求項 1 から 6 までのいずれか 1 項に記載の表面プラズモンセンサー。

【請求項 8】

光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、
前記誘電体基板の前記光ビームの入射側とは反対側の表面上に形成されている第 1 金属膜と、

前記第 1 金属膜上に形成されている誘電体膜と、

前記誘電体膜上に形成されている第 2 金属膜とを備えた表面プラズモンセンサーにおいて、

前記光源から出射される光ビームのうち前記誘電体基板を透過した光ビームが、所定範囲の入射角で、前記誘電体基板及び前記第 1 金属膜間、前記第 1 金属膜及び前記誘電体膜間、前記誘電体膜及び前記第 2 金属膜間、並びに、前記第 2 金属膜と検出対象を含む液体又は気体との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じた反射光を検出する検出手段とを備えており、

前記誘電体膜の屈折率は、前記誘電体基板の屈折率より小さく、かつ前記第 2 金属膜に接触させる前記検出対象を含む液体又は気体の屈折率より大きいことを特徴とする表面プラズモンセンサー。

【請求項 9】

前記誘電体膜の膜厚は、前記光ビームの波長より短いことを特徴とする請求項 8 に記載の表面プラズモンセンサー。

【請求項 10】

前記検出手段が検出した前記反射光の、前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3 つ以上の極小値が存在していることを特徴とする請求項 9 に記載の表面プラズモンセンサー。

【請求項 11】

請求項 1 から 7 まで及び 10 のいずれか 1 項に記載の表面プラズモンセンサーから取得した前記 3 つ以上の極小値のうち、低角側極小値に対応する最小入射角と、高角側極小値に対応する最大入射角とを参照して、前記低角側極小値及び前記高角側極小値間に存在する少なくとも 1 つの中間極小値に対応する中間入射角を算出する算出手段を備えることを特徴とする入射角算出装置。

10

【請求項 12】

前記算出手段は、前記最小入射角を θ_1 、前記中間入射角を θ_2 、及び前記最大入射角を θ_3 とし、これらに対応する反射光が検出される前記検出手段の受光面上の位置をそれぞれ位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 とするとき、

$$(x_2 - x_1) / (x_3 - x_1) = (\theta_2 - \theta_1) / (\theta_3 - \theta_1)$$

の関係を用いて、前記最小入射角 θ_1 及び前記最大入射角 θ_3 から前記中間入射角 θ_2 を算出することを特徴とする請求項 11 に記載の入射角算出装置。

20

【請求項 13】

前記最小入射角 θ_1 及び前記最大入射角 θ_3 をあらかじめ記録する記録部と、

前記位置 x_1 、前記位置 x_2 、及び前記位置 x_3 を特定する検出位置特定手段とを備えており、

前記算出手段は、前記記録部から前記最小入射角 θ_1 及び前記最大入射角 θ_3 を読み出すと共に、前記検出位置特定手段が特定した前記位置 x_1 、前記位置 x_2 、及び前記位置 x_3 を用いて、前記中間入射角 θ_2 を算出することを特徴とする請求項 12 に記載の入射角算出装置。

【請求項 14】

前記算出手段は、前記最小入射角を θ_1 、前記中間入射角を θ_2 、及び前記最大入射角を θ_3 とし、これらに対応する反射光が検出される前記検出手段の受光面上の位置をそれぞれ位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 とし、前記多重反射で生じた反射光のうち、前記検出手段の受光面へ垂直に入射する光ビームの前記受光面上での位置を x_0 とし、前記受光面と前記誘電体基板との間に配置される検出レンズの焦点距離を f とし、並びに添え字を $i = 1, 2, 3$ とするとき、

30

$$\tan(\theta_i) = (x_i - x_0) / f$$

の関係を用いて、前記最小入射角 θ_1 及び前記最大入射角 θ_3 から前記中間入射角 θ_2 を算出することを特徴とする請求項 11 に記載の入射角算出装置。

【請求項 15】

前記最小入射角 θ_1 及び前記最大入射角 θ_3 、並びに前記焦点距離 f をあらかじめ記録する記録部と、

40

前記位置 x_1 、前記位置 x_2 、及び前記位置 x_3 、並びに前記位置 x_0 を特定する検出位置特定手段とを備えており、

前記算出手段は、前記記録部から前記最小入射角 θ_1 、前記最大入射角 θ_3 、及び前記焦点距離 f を読み出すと共に、前記検出位置特定手段が特定した前記位置 x_1 、前記位置 x_2 、及び前記位置 x_3 、並びに、前記位置 x_0 を用いて、前記中間入射角 θ_2 を算出することを特徴とする請求項 14 に記載の入射角算出装置。

【請求項 16】

前記誘電体基板の形状及び屈折率を考慮して前記中間入射角 θ_2 の値を補正する補正手段を備えていることを特徴とする請求項 11 から 15 までのいずれか 1 項に記載の入射角算出装置。

50

【請求項 17】

請求項 1 から 7 まで及び 10 のいずれか 1 項に記載の表面プラズモンセンサー及び請求項 11 から 16 までのいずれか 1 項に記載の入射角算出装置を含んでいることを特徴とする表面プラズモンセンサーシステム。

【請求項 18】

請求項 11 から 16 までのいずれか 1 項に記載の入射角算出装置における各手段としてコンピュータを動作させるための入射角計算プログラム。

【請求項 19】

請求項 18 に記載の入射角計算プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、表面プラズモン共鳴を利用して、検出対象を含む液体又は気体の屈折率を検出するための表面プラズモンセンサー、当該表面プラズモンセンサーと連携して前記屈折率に対応する光ビームの入射角を算出する入射角算出装置、これらを連携させた表面プラズモンセンサーシステム、入射角計算プログラム、及び前記入射角計算プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体に関するものである。

【背景技術】

【0002】

近年、表面プラズモン共鳴を利用した表面プラズモンセンサーが多く開発されている。表面プラズモンセンサーは、検出対象を含む液体又は気体（以下、単に「試料」と言い、検出対象を含まない液体又は気体は、「試料」とは呼ばないこととする。）の屈折率を検出するためのものであり、溶液の濃度測定、蛋白質・高分子の検出等に広範に用いられている。また、表面プラズモンセンサーは、検出対象を含む液体又は気体の屈折率の時間変化を追うことにより、通常、金属膜上に設けられる該検出対象を吸着する吸着層への該検出対象の吸着過程や反応の時間変化等も検出することができる。

20

【0003】

ここで、従来の溶液の濃度を測定するための表面プラズモンセンサーを例として、表面プラズモンセンサーの具体的な構成について説明する。表面プラズモンセンサーの最もシンプルな構成は、石英やガラスなどの誘電体基板（プリズム）上に金属膜が形成されており、該金属膜の該誘電体基板が形成されている側から、光ビームを照射し、この反射率を測定するものである。

30

【0004】

前記表面プラズモンセンサーでは、前記屈折率を検出するために、表面プラズモン共鳴を利用している。表面プラズモン共鳴とは、誘電体基板上の金属膜に適切な偏光方向及び入射角で光ビームを入射させた場合、該光ビームの該金属膜に平行な方向の波数と、表面プラズモンの波数とが一致すると、共鳴を起こす現象のことである。なお、表面プラズモンとは、金属表面の自由電子が、金属表面に平行な方向に振動する粗密波である。

【0005】

すなわち、前記表面プラズモンセンサーでは、前記光ビームを前記金属膜に照射したとき、該光ビームが適切な入射角及び偏光方向で該金属膜に入射されると、該光ビームは該金属膜上において表面プラズモンに変換される。そのため、前記光ビームの前記金属膜に対する反射率は、表面プラズモンに変換された分だけエネルギーが利用されるために小さくなる。

40

【0006】

図 7 は、前記表面プラズモンセンサーにおける、入射角と反射率との関係を示す図である。図 7 に示すように、横軸を入射角、縦軸を反射率としたグラフとして表現すると、反射率がある入射角で極小値を持つことが分かる。この極小値の部分、暗線という。以下の説明においては、前記暗線における反射率の極小値を反射率 R_{min} とし、このときの

50

入射角を入射角 θ_{min} とする。前記入射角 θ_{min} の検出は、実際には検出器の受光面上の位置から換算される。すなわち、図 7 に示されるグラフは、検出器の受光面上の光強度分布に対して、位置を角度に換算することにより得られる。

【0007】

光ビームのエネルギーを表面プラズモンに変換するには、光ビームの偏光方向が、前記誘電体基板と前記金属膜との間に形成された界面の法線と前記光ビームの光軸とを含む面を入射面とし、該入射面に対して平行な偏光方向（p 偏光）であることが好ましい。なお、前記光ビームの偏光方向が、前記入射面に対して垂直な偏光方向（s 偏光）では、前記表面プラズモン共鳴は起こらない。

【0008】

前記表面プラズモンセンサーは、表面プラズモン共鳴を利用して入射角 θ_{min} を求めることにより、予め計算された入射角 θ_{min} と前記溶液の屈折率との関係から、該溶液の屈折率を算出することができる。

【0009】

非特許文献 1 には、前記金属膜の膜厚及び前記入射角 θ_{min} は、前記金属膜上に接触する媒質の屈折率に依存していると記載されている。したがって、前記入射角 θ_{min} と前記反射率との関係は、前記金属膜上に接触する溶媒又は溶液の屈折率に応じて異なる。そのため、前記表面プラズモンセンサーは、前記分子を含まない溶媒を前記金属膜に接触させた場合と、前記分子を含む溶液を前記金属膜に接触させた場合とにおける屈折率変化を検出することができる。

【0010】

試料に 1 種の検出対象しか含まれていない場合は、屈折率から濃度を換算することができるが、試料に複数の検出対象が含まれる場合は、屈折率から特定の検出対象の濃度を求めることはできない。そこで、通常、表面プラズモンセンサーは、金属膜の表面にさらに特定の分子を吸着できる吸着層を設け、試料中の特定の分子を検出する構成としている。そして、前記表面プラズモンセンサーは、前記屈折率変化を用いて、予め計算された屈折率と前記溶液の濃度との関係から、該溶液の濃度を算出することができる。

【0011】

表面プラズモンセンサーは、種々の工夫や改善が重ねられており、例えば特許文献 1 では、さらに検出感度を上げるために、プリズムの上に第一の金属薄膜、誘電体、第二の金属薄膜からなる多層膜を形成することで、暗線の幅を狭くし、角度分解能を上げている。

【0012】

さらに、該多層膜では、s 偏光を入射すると、表面プラズモンとは異なる導波光に起因する暗線が現れる。この暗線は、第二の金属薄膜から $1\mu\text{m}$ 以上離れた位置の屈折率変化にも反応するため、表面プラズモンに起因する暗線の変化量から、導波光に起因する暗線の変化量を差し引くことで、温度変化などのバックグラウンドの変化を除去している。

【0013】

ところで、表面プラズモンセンサーは、吸着層により検出できる対象が決まってくるため、検出対象に応じて異なる吸着層を備えた金属膜を誘電体基板ごとに取り替えることにより、1 つの装置を用いて、多種の試料の検出を行うことが可能となる。（以下、該取替え部分をセンサーチップと呼ぶ。）しかし、センサーチップ交換時に位置（高さ）・傾きを再現させなければ、角度の誤差を生み、表面プラズモンセンサーが本来持つ、高い分解能が実現されないという問題点がある。

【0014】

そこで、前記問題点の解決方法として、特許文献 2 では、金属膜の上に誘電体層を設けることで、全反射領域に 2 本以上の暗線を発生させ、一方でセンサーチップの傾きを検出し、もう一方で本来の検出を行い、センサーチップの傾きを補正している。

【特許文献 1】特開平 10-267841 号公報（1998 年 10 月 9 日公開）

【特許文献 2】特開 2004-61419 号公報（2004 年 2 月 26 日公開）

【非特許文献 1】Surface Plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings, H

10

20

30

40

50

einz Raether, Springer-Verlag, 1988 p.118~p.123

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

しかしながら、前記従来技術には、さらに、以下のような問題点が存在する。

【0016】

まず、特許文献1では、前記センサーチップ交換時に位置（高さ）・傾きを再現させなければ、角度の誤差を生み、本来持つ高い分解能が実現されないという問題点については触れられていない。

【0017】

特許文献2では、センサーチップ交換時の誤差が傾きのみであれば、誤差を補正できるが、センサーチップの高さにも誤差があった場合には、正確に補正することができない。すなわち、センサーチップを交換する場合、プリズムとセンサーチップとの間をインデックスマッチング液などで満たす必要があるが、この場合、プリズムとセンサーチップとの間の距離（インデックスマッチング液の厚み）を一定にするのは難しい。この距離がセンサーチップ交換のたびに異なると、光が反射する位置が異なるため、暗線の角度（位置）が見かけ上シフトしてしまうという問題点がある。

【0018】

また、センサーチップを交換するのではなく、センサーチップとプリズムとからなる測定ユニットが回転台上に複数設けられており、該測定ユニットを回転させて順に測定する場合でも、回転時の振動や各ユニット間のサイズのバラツキなどが、同様の誤差を生む。

【0019】

本発明は、前記の問題点に鑑みてなされたものであり、その目的は、簡易な構成で、センサーチップ交換時のセンサーチップの傾き及び高さの変化による測定誤差を補正することができる表面プラズモンセンサーなどを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0020】

本発明の表面プラズモンセンサーは、前記課題を解決するために、光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、前記誘電体基板の前記光ビームの入射側とは反対側の表面上に形成されている第1金属膜と、前記第1金属膜上に形成されている誘電体膜と、前記誘電体膜上に形成されている第2金属膜とを備えた表面プラズモンセンサーにおいて、前記光源から出射される光ビームのうち前記誘電体基板を透過した光ビームが、所定範囲の入射角で、前記誘電体基板及び前記第1金属膜間、前記第1金属膜及び前記誘電体膜間、前記誘電体膜及び前記第2金属膜間、並びに、前記第2金属膜と検出対象を含む液体又は気体との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じた反射光を検出する検出手段とを備えており、前記検出手段が検出した前記反射光の、前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3つ以上の極小値が存在していることを特徴としている。

【0021】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記課題を解決するために、光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、前記誘電体基板の前記光ビームの入射側とは反対側の表面上に形成されている第1金属膜と、前記第1金属膜上に形成されている誘電体膜と、前記誘電体膜上に形成されている第2金属膜とを備えた表面プラズモンセンサーにおいて、前記光源から出射される光ビームのうち前記誘電体基板を透過した光ビームが、所定範囲の入射角で、前記誘電体基板及び前記第1金属膜間、前記第1金属膜及び前記誘電体膜間、前記誘電体膜及び前記第2金属膜間、並びに、前記第2金属膜と検出対象を含む液体又は気体との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じた反射光を検出する検出手段とを備えており、前記誘電体膜の屈折率は、前記誘電体基板の屈折率より小さく、かつ前記第2金属膜に接触させる前記検出対象を含む液体又は気体の屈折率より大きいことを特徴としている。

【0022】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記構成に加えて、前記検出手段が検出した前記反射光の、前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3つ以上の極小値が存在している。

【0023】

さらに、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記構成に加えて、前記誘電体膜の膜厚は、前記光ビームの波長より短いことが好ましい。

【0024】

前記構成によれば、本発明の表面プラズモンセンサーは、光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、前記誘電体基板の前記光ビームの入射側とは反対側の表面上に形成されている第1金属膜と、前記第1金属膜上に形成されている誘電体膜と、前記誘電体膜上に形成されている第2金属膜とを備えているものである。

【0025】

すなわち、誘電体基板に近い側から、第1金属膜、誘電体膜及び第2金属膜が、この順に積層された構成である。この積層構造は、簡易な構成であり、各種成膜技術によって簡単に作成することができる。

【0026】

また、前記構成によれば、前記反射光は、前記光源から出射される光ビームのうち前記誘電体基板を透過した光ビームが、所定範囲の入射角で、前記誘電体基板及び前記第1金属膜間、前記第1金属膜及び前記誘電体膜間、前記誘電体膜及び前記第2金属膜間、並びに、前記第2金属膜と検出対象を含む液体又は気体との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じる。

【0027】

なお、多重反射が生じているか否かは、反射光に3つ以上の極小値が存在するか否かによって調べることが可能である。

【0028】

ここで、図8(a)及び図8(b)に基づき、従来の表面プラズモンセンサーと、本発明の表面プラズモンセンサーとに生じる素励起の違いについて説明する。

【0029】

図8(a)は、前記従来の表面プラズモンセンサーに生じる素励起を示す図であり、図8(b)は、本発明の表面プラズモンセンサーに生じる素励起を示す図である。

【0030】

図8(a)に示すように、特許文献2に記載された従来の表面プラズモンセンサーは、基板(プリズム)、金属膜、及び誘電体膜からなる構成である。このとき、金属膜に光ビームが照射されると、特定の入射角で表面プラズモンが励起されると共に、別の特定の入射角で誘電体膜を導波路とする導波モードが励起される。

【0031】

ここで、表面プラズモンの励起について説明する。表面プラズモンは、金属膜が1つの場合、その上面・下面の2つの界面で励起され、それらが互いに結合した状態となっている。

【0032】

一方、金属膜が複数の場合、複数の金属膜の上面・下面の各界面で励起され、それらが互いに結合した状態になっている。

【0033】

ここで、試料に近い導波モードは、試料の屈折率変化の影響を受けて対応する暗線(極小値)の位置(入射角)が変動する。また、試料から離れた金属膜に生じる表面プラズモンは、試料の屈折率変化の影響を受けても、対応する暗線の位置が、ほとんど変動しない。

【0034】

ここで、「暗線の位置」としているのは、例えば、入射した光ビームの位置を検出する

10

20

30

40

50

ことが可能なエリアセンサなどの「受光面上における位置」が、光ビームの基板と金属膜との界面への入射角に対応するものであり、受光面上における位置を検出することは、前記界面への入射角度を検出することと等しいからである。

【0035】

一方、本発明の表面プラズモンセンサーは、誘電体基板（プリズム5）、第1金属膜（第1金属膜6a）、誘電体膜（誘電体膜6b）及び第2金属膜（第2金属膜6c）を備えており、図8（b）に示すように、誘電体膜内には、導波モードが励起され、第1金属膜及び第2金属膜の上面・下面の各界面にそれぞれ、表面プラズモンが生じる。これらの表面プラズモンは互いに結合し、結合の仕方でも互いに異なるモードとなる。

【0036】

そうすると、各モードの強度分布は異なり、第2金属膜のいずれかの界面で強度分布が強くなる表面プラズモンモードは、試料（試料13）の屈折率変化の影響を受けやすいと考えられるが、導波モード及び第1金属膜のいずれかの界面で強度分布が強くなる表面プラズモンモードは、試料の屈折率変化の影響を受けにくいものと考えられる。

【0037】

但し、本発明の表面プラズモンセンサーでは、このような状況の下で、さらに、導波モード及び第1金属膜のいずれかの界面で強度分布が強くなる表面プラズモンモードによる暗線を検出する検出手段とを備えており、この結果、前記検出手段が検出した前記反射光の、前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3つ以上の極小値が存在するように構成されている。

【0038】

前記3つ以上の極小値を識別可能に生じさせるためには、まず、その前提として第1金属膜及び第2金属膜の両方に表面プラズモンを生じさせる必要がある。また、この2つの表面プラズモンを生じさせるためには、「前記誘電体膜の屈折率は、前記誘電体基板の屈折率より小さく、かつ前記第2金属膜に接触させる検出対象を含む液体又は気体の屈折率より大きい」ことが必要である。

【0039】

また、前記2つの表面プラズモンは、前記誘電体膜の膜厚がある程度小さくなると、互いに影響を及ぼし合い、結合し、いくつかの表面プラズモンモード（結合モード）となる。この結合モードのそれぞれは、一般的には、エネルギーが低い状態とエネルギーが高い状態とに分離する。

【0040】

そこで、前記3つ以上の極小値を識別可能に生じさせるには、第1金属膜及び第2金属膜のそれぞれに生じる表面プラズモンを結合させて前記結合モードを生じさせる必要がある。また、この結合モードを生じさせるためには、「前記誘電体膜の膜厚は、前記光ビームの波長より短い」ことが好ましい。

【0041】

すなわち、「前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3つ以上の極小値が存在している」という条件は、「前記誘電体膜の屈折率は、前記誘電体基板の屈折率より小さく、かつ前記第2金属膜に接触させる検出対象を含む液体又は気体の屈折率より大きい」及び「誘電体膜の膜厚は、前記光ビームの波長より短い」という2つの条件に置き換えることができる。

【0042】

ただし、「誘電体膜の膜厚は、前記光ビームの波長より短い」については、好ましいという意義での条件であり、誘電体膜の膜厚が前記光ビームの波長よりも多少大きくても、充分近ければ良い。

【0043】

前記構成によれば、本発明の表面プラズモンセンサーでは、前記3つ以上の極小値のうち、屈折率変化によって位置が変動する少なくとも1つの極小値を屈折率測定に用い、残りの変動しない2つの極小値をセンサーチップ交換による測定誤差の補正に用いることが

10

20

30

40

50

できる。

【0044】

例えば、センサーチップが交換前の規定位置にある場合に、変動しない2つの暗線が発生する位置を予め記録しておき、センサーチップ交換時に、変動しない2つの暗線が、予め記録されている前記規定位置で発生するように、センサーチップの傾き及び高さを調節することにより、測定誤差を補正することができる。

【0045】

このとき、2つの暗線の間隔が異なる場合は傾きを、間隔は等しいが位置が異なる場合は、高さを調節すればよい。また、2つの暗線の間隔及び位置が異なる場合には、傾き及び高さの両方を調整することになる。

【0046】

なお、ここでの補正は、センサーチップの傾き及び高さ自体を調整するものであるが、以下で説明するように、センサーチップの傾き及び高さの変化に応じて測定値（又は入射角の値）自体を算出する方法も考えられる。なお、この測定値（又は入射角の値）自体を算出する方法については、以下で、詳細に説明する。

【0047】

また、表面プラズモンの結合モードのうち、試料の屈折率変化の影響を受けやすいモードに対応する暗線は、導波光を励起することにより現れる暗線（導波モード）より幅が狭いので、検出に用いる場合には検出分解能を高くすることができ、測定誤差の補正に用いる場合には補正精度を高くすることができる。

【0048】

以上より、簡易な構成で、センサーチップ交換時のセンサーチップの傾き及び高さの変化による測定誤差を補正することができる表面プラズモンセンサーを提供することができる。

【0049】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記構成に加えて、前記第1金属膜及び第2金属膜の材料は異なる材料で構成されていても良い。

【0050】

前記構成によれば、以下で説明する前記低角側極小値、中間極小値、及び高角側極小値（暗線）の半値幅が狭くなり、前記検出分解能及び前記補正精度を高くすることができる。

【0051】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記構成に加えて、前記第2金属膜の材料は、金を主成分とすることが好ましい。

【0052】

検出対象を含む液体又は検出対象を含む気体は、第2金属膜に直接接触させる。そのため、第2金属膜は前記液体又は前記気体によって化学反応を起こさない安定した金属から構成されていることが望ましい。

【0053】

この点、金は、非常に安定した金属であり、錆びないために耐久性が高く、さらに、表面プラズモンを効率よく励起する。

【0054】

このため、前記構成によれば、本発明の表面プラズモンセンサーの第1金属膜及び第2金属膜のうち、少なくとも第2金属膜の材料として金を用いることにより、前記検出対象を含む液体又は前記検出対象を含む気体によって化学反応を起こさず、該液体又は該気体の屈折率を高い分解能で検出するとともに、第2金属膜の酸化による経時劣化を防ぐことができる。

【0055】

なお、金には不純物が含まれていてもよいが、一般に不純物濃度が高くなると、前記極小値の半値幅が広くなり、検出分解能を下げることになるため、金の純度は高い方が好ま

10

20

30

40

50

しい。

【0056】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記構成に加えて、前記光源の波長は、600nm以上、1550nm以下であることを特徴としている。

【0057】

ここで、第2金属膜（又は第1金属膜）上に表面プラズモンを励起させるためには、光源から出射される光ビームの波長が重要である。上述したように、少なくとも第2金属膜は金から構成されていることがもっとも望ましいが、金から構成された第2金属膜上に表面プラズモンを励起するためには、600nm～1550nmの波長の光ビームを該第2金属膜に照射することが望ましい。

10

【0058】

前記光源から約600nm～約1550nmの波長の光ビームを金から構成された前記第2金属膜に照射することにより、表面プラズモンの励起効率が高まり、高い分解能で前記検出対象を含む液体又は前記検出対象を含む気体の屈折率を検出することができる。

【0059】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記構成に加えて、前記第2金属膜における前記検出対象を含む液体又は気体を接触させる接触面上に、特定の物質を吸着する吸着層が設けられていても良い。

【0060】

前記構成によれば、第2金属膜表面の屈折率変化は、ほぼ吸着対象の物質に由来すると考えられることから、第2金属膜表面の屈折率変化から、吸着対象の物質の濃度変化を検出することができる。

20

【0061】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記構成に加えて、前記誘電体基板は、前記表面プラズモンセンサーから着脱可能であることを特徴としている。

【0062】

前記構成によれば、検出対象に応じて第1金属膜、誘電体膜、第2金属膜及び吸着層を誘電体基板ごとに取り替えることが可能となる。これにより、1つの装置を用いて、多種の検出対象の検出や、感度や測定範囲・測定対象等を適宜変更することができる。例えば、異なる吸着層を用いることにより、異なる吸着対象を検出することができる。また、第1金属膜、誘電体膜、及び第2金属膜が、他の材料や膜厚から構成されており、誘電体基板ごとに取り替えることにより、前記表面プラズモンセンサーの感度や測定範囲・測定対象等を適宜変更することができる。

30

【0063】

また、本発明の入射角算出装置は、前記構成に加えて、前記表面プラズモンセンサーから取得した前記3つ以上の極小値のうち、低角側極小値に対応する最小入射角と、高角側極小値に対応する最大入射角とを参照して、前記低角側極小値及び前記高角側極小値間に存在する少なくとも1つの中間極小値に対応する中間入射角を算出する算出手段を備えることが好ましい。

【0064】

前記構成によれば、センサーチップの高さ・傾きが変わっても、試料の屈折率の影響を受けにくい表面プラズモンの結合モードに対応する低角側極小値における最も入射角が小さい最小入射角と、試料の屈折率の影響を受けにくい導波モードに対応する高角側極小値における最も入射角の大きい最大入射角を特定する（又は検出する）ことができる。

40

【0065】

なお、最も屈折率差が大きい、誘電体基板と試料との屈折率差に基づく臨界角は、低角側極小値より高角側に存在する。つまり、低角側極小値は、第1界面に対する全反射領域ではない角度に現れている。よって、これは表面プラズモンの結合モードに起因する暗線ではなく、導波光（導波モード）に起因する暗線であると考えられる。

【0066】

50

また、これにより、高角側極小値及び中間極小値は、表面プラズモンの結合モードに起因する暗線であることが導かれる。

【0067】

さらに、高角側極小値は、試料の屈折率変化の影響を受けにくく、中間極小値は、屈折率変化の影響を受けやすい傾向を示す。

【0068】

よって、この特定された前記最小入射角及び前記最大入射角とを参照して、前記低角側極小値及び前記高角側極小値間に存在する少なくとも1つの中間極小値に対応する中間入射角を算出することができる。なお、この中間入射角自体を算出する具体的方法については、以下で、詳細に説明する。

10

【0069】

また、上述したセンサーチップの傾き及び高さ自体を調整する例では、センサーチップが交換前の規定の位置にある場合に、前記最小入射角及び前記最大入射角に対応する変動しない2つの低角側極小値及び高角側極小値が発生する位置を予め記録しておき、センサーチップ交換時に、変動しない2つの低角側極小値及び高角側極小値が、予め記録されている前記規定の位置で発生するように、センサーチップの傾き及び高さを調節するようにすることにより、測定誤差を補正することができる。

【0070】

このとき、2つの低角側極小値及び高角側極小値の間隔が異なる場合は傾きを、間隔は等しいが位置が異なる場合は、高さを調節すればよい。また、2つの低角側極小値及び高角側極小値暗線の間隔及び位置が異なる場合には、傾き及び高さの両方を調整することになる。

20

【0071】

以上により、センサーチップ交換による、センサーチップの高さ及び傾きの変化による誤差を補正して、試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0072】

また、本発明の入射角算出装置は、前記構成に加えて、前記算出手段は、前記最小入射角を $\theta 1$ 、前記中間入射角を $\theta 2$ 、及び前記最大入射角を $\theta 3$ とし、これらに対応する反射光が検出される前記検出手段の受光面上の位置をそれぞれ位置 $x 1$ 、位置 $x 2$ 、及び位置 $x 3$ とすると、

30

$$(x 2 - x 1) / (x 3 - x 1) = (\theta 2 - \theta 1) / (\theta 3 - \theta 1)$$

の関係を用いて、前記最小入射角 $\theta 1$ 及び前記最大入射角 $\theta 3$ から前記中間入射角 $\theta 2$ を算出しても良い。

【0073】

なお、本発明の入射角算出装置は、前記構成に加えて、前記最小入射角 $\theta 1$ 及び前記最大入射角 $\theta 3$ をあらかじめ記録する記録部と、前記位置 $x 1$ 、前記位置 $x 2$ 、及び前記位置 $x 3$ を特定する検出位置特定手段とを備えており、前記算出手段は、前記記録部から前記最小入射角 $\theta 1$ 及び前記最大入射角 $\theta 3$ を読み出すと共に、前記検出位置特定手段が特定した前記位置 $x 1$ 、前記位置 $x 2$ 、及び前記位置 $x 3$ を用いて、前記中間入射角 $\theta 2$ を算出することが好ましい。

40

【0074】

前記構成によれば、前記位置 $x 1$ 、前記位置 $x 2$ 、及び前記位置 $x 3$ のそれぞれの間隔の変化は、センサーチップの高さの変化に対応し、前記位置 $x 1$ 、前記位置 $x 2$ 、及び前記位置 $x 3$ のそれぞれの間隔が変化しない場合、位置の変化は、センサーチップの傾きの変化に対応する。

【0075】

また、前記位置 $x 1$ 及び前記位置 $x 3$ を結ぶ線分の内分点を前記位置 $x 2$ と考えたときの内分比自体は、センサーチップの高さ及び傾きが変化してもほとんど変化しないと考えることができる。

【0076】

50

よって、上記の単純な算出式により、センサーチップ交換による、センサーチップの高さ・傾きの変化による誤差を補正して、前記中間入射角 θ_2 を算出できるので、より正確な試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0077】

また、本発明の入射角算出装置は、前記構成に加えて、前記算出手段は、前記算出手段は、前記最小入射角を θ_1 、前記中間入射角を θ_2 、及び前記最大入射角を θ_3 とし、これらに対応する反射光が検出される前記検出手段の受光面上の位置をそれぞれ位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 とし、前記多重反射で反射光のうち、前記検出手段の受光面へ垂直に入射する光ビームの前記受光面上での位置を x_0 とし、前記受光面と前記誘電体基板との間に配置される検出レンズの焦点距離を f とし、並びに添え字を $i = 1, 2, 3$ とするとき、

$$\tan(\theta_i) = (x_i - x_0) / f$$

の関係を用いて、前記最小入射角 θ_1 及び前記最大入射角 θ_3 から前記中間入射角 θ_2 を算出しても良い。

【0078】

なお、本発明の入射角算出装置は、前記構成に加えて、前記最小入射角 θ_1 及び前記最大入射角 θ_3 、並びに前記焦点距離 f をあらかじめ記録する記録部と、前記位置 x_1 、前記位置 x_2 、及び前記位置 x_3 、並びに前記位置 x_0 を特定する検出位置特定手段とを備えており、前記算出手段は、前記記録部から前記最小入射角 θ_1 、前記最大入射角 θ_3 、及び前記焦点距離 f を読み出すと共に、前記検出位置特定手段が特定した前記位置 x_1 、前記位置 x_2 、及び前記位置 x_3 、並びに、前記位置 x_0 を用いて、前記中間入射角 θ_2 を算出することが好ましい。

【0079】

前記構成によれば、センサーチップ交換による、センサーチップの高さ・傾きの変化による誤差を補正して、より正確な試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0080】

また、本発明の入射角算出装置は、前記構成に加えて、前記誘電体基板の形状及び屈折率を考慮して前記中間入射角 θ_2 の値を補正する補正手段を備えていることが好ましい。

【0081】

前記構成によれば、例えば、「誘電体基板の形状及び屈折率と中間入射角 θ_2 の補正率との関係を示すテーブル情報」などをあらかじめ計算して所定の記録部などに記憶させておき、このテーブル情報を参照して、「中間入射角 $\theta_2 \times$ 補正率」を計算することで、前記誘電体基板の出射面での屈折（誘電体基板の形状や屈折率の変化）の影響を考慮して中間入射角 θ_2 の値を補正することができる。

【0082】

ただし、ここでは、「補正後の中間入射角 = 中間入射角 $\theta_2 \times$ 補正率」であるとしている。

【0083】

なお、誘電体基板の形状としては、三角型（三角柱）、台形型（台形柱）、楔形、半円柱型、及び半球型等が例示できる。

【0084】

以上の入射角算出装置によれば、上述したセンサーチップの傾き及び高さ自体を調整する例のような面倒な作業・動作等を人が行なう又は他の装置に行わせる必要がない。また、センサーチップを交換するのではなく、センサーチップとプリズムとからなる測定ユニットが回転台上に複数設けられており、該測定ユニットを回転させて順に測定する場合でも、好適な測定システムを構成することが可能となる。

【0085】

よって、センサーチップ交換による、センサーチップの高さ・傾きの誤差、並びに誘電体基板の形状や屈折率の違いによる誤差を補正して、さらに正確に、試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0086】

また、本発明の表面プラズモンセンサーシステムは、前記表面プラズモンセンサー及び前記入射角算出装置を含んでいることが好ましい。

【0087】

なお、前記表面プラズモンセンサー、前記入射角算出装置及び前記表面プラズモンセンサーシステムにおける各手段、各機能及び各処理のそれぞれは、コンピュータによって実現してもよく、この場合には、コンピュータを各手段として動作させ、コンピュータに各機能を実現させ、若しくはコンピュータに各処理を実行させることにより前記表面プラズモンセンサー、前記入射角算出装置及び前記表面プラズモンセンサーシステムを、コンピュータにて実現させるプログラム及び入射角計算プログラム、並びにこれらを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体も、本発明の範疇に入る。

10

【発明の効果】

【0088】

本発明の表面プラズモンセンサーは、以上のように、光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、前記誘電体基板の前記光ビームの入射側とは反対側の表面上に形成されている第1金属膜と、前記第1金属膜上に形成されている誘電体膜と、前記誘電体膜上に形成されている第2金属膜とを備えた表面プラズモンセンサーにおいて、前記光源から出射される光ビームのうち前記誘電体基板を透過した光ビームが、所定範囲の入射角で、前記誘電体基板及び前記第1金属膜間、前記第1金属膜及び前記誘電体膜間、前記誘電体膜及び前記第2金属膜間、並びに、前記第2金属膜と検出対象を含む液体又は気体との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じた反射光を検出する検出手段とを備えており、前記検出手段が検出した前記反射光の、前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3つ以上の極小値が存在しているものである。

20

【0089】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、以上のように、光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、前記誘電体基板の前記光ビームの入射側とは反対側の表面上に形成されている第1金属膜と、前記第1金属膜上に形成されている誘電体膜と、前記誘電体膜上に形成されている第2金属膜とを備えた表面プラズモンセンサーにおいて、前記光源から出射される光ビームのうち前記誘電体基板を透過した光ビームが、所定範囲の入射角で、前記誘電体基板及び前記第1金属膜間、前記第1金属膜及び前記誘電体膜間、前記誘電体膜及び前記第2金属膜間、並びに、前記第2金属膜と検出対象を含む液体又は気体との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じた反射光を検出する検出手段とを備えており、前記誘電体膜の屈折率は、前記誘電体基板の屈折率より小さく、かつ前記第2金属膜に接触させる前記検出対象を含む液体又は気体の屈折率より大きいものである。

30

【0090】

それゆえ、簡易な構成で、センサーチップ交換時のセンサーチップの傾き及び高さの変化による測定誤差を補正することができる表面プラズモンセンサーを提供するという効果を奏する。

【発明を実施するための最良の形態】

40

【0091】

本発明における表面プラズモンセンサーシステム（表面プラズモンセンサー）1の一実施形態について図1～図12に基づいて説明すれば、以下の通りである。

【0092】

〔1. 表面プラズモンセンサーシステム〕

まず、本実施形態の表面プラズモンセンサーシステム1の全体構成について図1を参照して説明する。図1は、本発明における表面プラズモンセンサーシステム1の一実施形態の全体構成の概略を示す図である。

【0093】

表面プラズモンセンサーシステム1は、図1に示すように、光源2、コリメートレンズ

50

3、集光レンズ4、プリズム（誘電体基板）5、センサー膜6（以下、第1金属膜6a、誘電体膜6b、及び第2金属膜6cの総称として用いることがある）、検出レンズ7、光検出器（検出手段）8、光源駆動回路9、算出回路（入射角算出装置）10、及びモニター付き端末（入射角算出装置）11を備えている。

【0094】

なお、前記構成の他、本来、A/D変換回路（アナログ/デジタル変換回路）、D/A変換回路（デジタル/アナログ変換回路）など（不図示）が必要であるが、本発明の目的とはあまり関係がないので、以下では、このような回路などに関する説明は省略する。

【0095】

本実施形態の表面プラズモンセンサーシステム1は、プリズム（誘電体基板）5上に形成されており、かつ、試料（検出対象を含む液体又は気体）13（以下、簡単のため「試料」と言い、検出対象を含まない液体又は気体は「試料」とは呼ばないことにする）を接触させたセンサー膜6に対し、光源2から出射された光ビーム12をセンサー膜6の試料13が接触している面とは反対側の面（第1金属膜6aの入射側）に照射することにより、試料13の屈折率を検出するものである。

【0096】

また、図1に示すように、センシングを行うためのセンサー膜6は、プリズム5に近い側から、第1金属膜6a、誘電体膜6b及び第2金属膜6cが、この順に積層された構成である。この積層構造は、簡易な構成であり、各種成膜技術によって簡単に作成することができる。よって、従来の表面プラズモンセンサーと比較して、装置の大型化やコストアップはほとんど招かない。

【0097】

以下、表面プラズモンセンサーシステム1のその他の構成の詳細について説明する。

【0098】

光源2は、光ビーム12を出射するものであり、半導体レーザや発光ダイオード等が好適に用いられる。光源2から出射された光ビーム12は、センサー膜6に照射されることにより、センサー膜6において以下で説明する表面プラズモンや導波光を励起する。

【0099】

ここで、光ビーム12が複数の波長を含んでいる場合、各波長によって、表面プラズモンや導波光の励起条件が異なる。よって、光ビーム12が複数の波長を含んでいると、光ビーム12がセンサー膜6によって反射された反射光の入射角依存性が異なってしまうため、分析が複雑になってしまう。

【0100】

したがって、光源2の波長領域は、できるだけ狭いことが望ましく、単一波長であることがより好ましい。なお、発光ダイオードなどの波長範囲が広い光源を使用する場合は、分光するなどの工夫が必要となる。

【0101】

また、光源2から出射された光ビーム12の偏光方向は、プリズム5とセンサー膜6との間に形成された界面の法線と、光ビーム12の光軸を含む面とを入射面としたとき、該入射面に対して平行な偏光方向、すなわちp偏光が望ましい。

【0102】

光ビーム12は、偏光方向をp偏光とすることにより、センサー膜6において表面プラズモンを励起することができる。なお、光ビーム12の偏光方向が前記入射面に対して垂直な偏光方向、すなわちs偏光の場合は、光ビーム12はセンサー膜6において表面プラズモンを励起することができない。

【0103】

コリメートレンズ3は、光源2から出射された光ビーム12を平行光に変換するものである。コリメートレンズ3の焦点距離は、短ければ短いほど、光源2から出射された光ビーム12の利用効率が上がる。

【0104】

集光レンズ 4 は、光源 2 から出射された光ビーム 1 2 を、一度に所定の角度範囲の入射角で、センサー膜 6 上の微小領域に集光するものである。コリメートレンズ 3 によって光源 2 から出射された光ビーム 1 2 を平行光に変換しておくことにより、集光レンズ 4 は効率よく光ビーム 1 2 をセンサー膜 6 上に集光することができる。

【0105】

また、コリメートレンズ 3 を通った光が発散若しくは集束光であれば、集光レンズ 4 の位置を調整することにより、様々な入射角で光ビーム 1 2 をセンサー膜 6 へ入射させることができる。

【0106】

集光レンズ 4 としては、全方位を集光する平凸レンズ等のレンズを用いてもよいし、一方向のみ集光するシリンドリカルレンズ等のレンズを用いてもよい。集光レンズ 4 として全方位を集光するレンズを用いた場合は、センサー膜 6 への入射角が複雑となるが、照射面積を小さくすることができる。そのため、全方位を集光するレンズを用いた表面プラズモンセンサーシステム 1 は、試料 1 3 の局所的な情報を得ることが可能となる。

【0107】

また、集光レンズ 4 として一方向のみ集光するレンズを用いた場合は、集光しない方向は元のビームサイズのままであるため、センサー膜 6 への入射角は集光した方向にのみ依存する。そのため、一方向のみを集光するレンズを用いた表面プラズモンセンサーシステム 1 は、試料 1 3 の解析が容易となるが、光ビーム 1 2 の照射面積が大きくなる。

【0108】

センサー膜 6 への入射角の角度範囲は、集光レンズ 4 の開口数で決まるが、暗線（極小値）が 3 箇所以上存在する範囲にする。なお、コリメートレンズ 3 及び集光レンズ 4 は、それぞれ一度平行光にしてから集光する構成にしているが、有限系のレンズ 1 つで代用してもよい。

【0109】

プリズム 5 は、誘電体基板であり、光源 2 から出射された光ビーム 1 2 を通過させることにより、任意の入射角で光ビーム 1 2 をセンサー膜 6 に照射し、センサー膜 6 に表面プラズモンを励起するものである。

【0110】

また、プリズム 5 を構成する材料としては、光源 2 から出射される光ビーム 1 2 の波長に応じて、光ビーム 1 2 を透過させることができる材料とすれば良く、センサー膜 6 に表面プラズモンを励起できる材料であれば特に限定されないが、石英やガラスやポリメチルメタクリレートなどの樹脂等の紫外、可視、赤外領域の光に対して透明で、しかも試料 1 3 より大きな屈折率を有する材質より成る光学部品が好適に用いられる。

【0111】

なお、光源 2 から出射される光ビーム 1 2 の波長が、赤外であれば、プリズム 5 を構成する材料としては、シリコンを選択しても良い。

【0112】

センサー膜 6 に表面プラズモンを効率よく励起するためには、光ビーム 1 2 を斜めにセンサー膜 6 に照射することが望ましい。しかしながら、光ビーム 1 2 をプリズム 5 ではなく平行基板を介して、斜めにセンサー膜 6 に入射させると、入射角が大きくなるほど、センサー膜 6 に到達する光量が非常に小さくなる。そのため、本実施形態の表面プラズモンセンサーシステム 1 では、プリズム 5 を用いることにより、センサー膜 6 に斜めに光ビーム 1 2 を照射している。

【0113】

プリズム 5 としては、図 1 においては三角プリズムが用いられているが、三角型（三角柱）、台形型（台形柱）、楔形、半円柱型、及び半球型プリズム等も好適に用いられる。

【0114】

例えば、プリズム 5 として半円柱型や半球型プリズムを用いた場合は、半円柱及び半球の中心に向かって光ビーム 1 2 を入射すると、プリズムの入射面への入射角がほぼ直角と

10

20

30

40

50

なるため、この面での反射率が小さくなり、光の利用効率が高くなる。

【0115】

また、プリズム5として三角プリズムを用いた場合は、入射面での屈折により、プリズムへの入射角とセンサー膜6への入射角とが異なる角度となってしまうが、半円柱型プリズムに比べ安価であるため、一般的に利用されている。プリズム5は、上述した構成に限られず、センサー膜6に適切な角度で光ビーム12を入射させることができればよいため、他の形状でもよいし、導波路でもよい。

【0116】

センサー膜6は、プリズム5の光ビーム12の入射側とは反対側の表面上に形成されている第1金属膜6aと、第1金属膜6a上に形成されている誘電体膜6bと、誘電体膜6b上に形成されている第2金属膜6cとを備えているものである。

10

【0117】

また、センサー膜6は、光源2から照射された光ビーム12の反射光に、以下で説明する表面プラズモンや導波光に起因する暗線（反射率の極小値）を発生させるものであり、スパッタや蒸着で形成することができる。センサー膜6は、プリズム5の所定の一面上に直接形成されていても良い。プリズム5の所定の一面上とは、プリズム5が図1に示す三角プリズムの場合は三角形の底辺を含む面であり、プリズム5が半円柱型又は半球型プリズムの場合は半円柱又は半球の中心を含む面であり、プリズム5によって光ビーム12を斜めにセンサー膜6に入射させることが可能な面である。

20

【0118】

また、センサー膜6をプリズム5と同程度の屈折率を有した誘電体基板上に形成し、該誘電体基板のセンサー膜6が形成されている側とは反対側の面を、プリズム5の所定の一面上にインデックスマッチング剤を挟んで載せてもよい。

【0119】

該インデックスマッチング剤としては、市販されている液体やジェル等を用いてもよいし、UV硬化樹脂を用いてもよい。また、前記誘電体基板又はプリズム5との密着性や親和性向上のために、前記誘電体基板又はプリズム5とセンサー膜6との間に下地層を設けてもよい。

【0120】

また、センサー膜6の表面（第2金属膜6cにおける検出対象を含む液体又は気体を接触させる接触面）上にさらに特定の分子（物質）を吸着できる吸着層を設け、試料13中の特定の分子を検出する構成としてもよい。

30

【0121】

これにより、第2金属膜6cの表面の屈折率変化は、ほぼ吸着対象の物質に由来すると考えられることから、第2金属膜6cの表面の屈折率変化から、吸着対象の物質の濃度変化を検出することができる。

【0122】

なお、試料13には、検出対象以外の物質が混入している場合、表面プラズモンセンサーシステム1によって試料13の屈折率を検出すると、前記検出対象及び検出対象以外の物質が含まれた屈折率が検出されてしまう。そこで、センサー膜6に前記吸着層を設けることにより、検出対象のみを吸着させることができ、該検出対象のみの屈折率を検出することが可能となる。

40

【0123】

また、センサー膜6が形成された前記誘電体基板をプリズム5に対して着脱可能にしておくことにより、検出対象に応じてセンサー膜6やセンサー膜6表面の吸着層を誘電体基板ごと取り替えることが可能となる。これにより、1つの装置を用いて、多種の試料13の検出を行うことが可能となる。すなわち、他の材料から構成されており、かつ、他の組み合わせの材料・膜厚・吸着層を有するセンサー膜6が形成された誘電体基板と取り替えることにより、表面プラズモンセンサーシステム1の感度や測定範囲、測定対象等を変えることができる。センサー膜6が、プリズム5の所定の一面上に直接形成されている場合

50

には、プリズム 5 ごと、センサー膜 6 を交換すれば、同様に、表面プラズモンセンサーシステム 1 の感度や測定範囲、測定対象等を変えることができる。

【0124】

センサー膜 6 は、第 1 金属膜 6 a、誘電体膜 6 b、及び第 2 金属膜 6 c の積層構造からなるが、これらのうち、第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c を構成する材料としては、表面プラズモンを励起可能な金属又は合金であればよく、例えば、銀、銅、アルミニウム、白金、及び金、並びにクロム、チタン等が好適に用いられる。第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c は、酸化などの経時変化の起こらない、安定した金属から構成されていることが望ましい。

【0125】

また、第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c の厚みは、紫外、可視、赤外領域の光線を透過できる程度であり、一般的には、約 100 nm 以下であれば、これらの光線を透過させることが可能である。第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c は厚さが均一でかつ表面が平坦であり、なおかつ下層との密着性が良いことが望ましい。このような第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c は真空蒸着法、スパッタリング法などで形成されることが多いが、本実施形態では特定の成膜方法に限定されるものではない。

【0126】

上述した金属のうち、金は、非常に安定した金属であり、錆びないために耐久性が高く、さらに、表面プラズモンを効率よく励起する。そのため、表面プラズモンセンサーシステム 1 の金属膜として、金 (Au) は最も好適に用いられる。第 1 金属膜 6 a 及び／又は第 2 金属膜 6 c として金を用いることにより、試料 13 によって化学反応を起こさず、高い分解能で屈折率を検出することができるとともに、金属膜の酸化による経時劣化を防ぐことができる。

【0127】

なお、金には不純物が含まれていてもよいが、一般に不純物濃度が高くなると、前記極小値の半値幅が広くなり、検出分解能を下げることになるため、金の純度は高い方が好ましい。

【0128】

また、第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c の材料は異なる材料で構成されていても良い。前記構成によれば、以下で説明する低角側極小値、中間極小値、及び高角側極小値（暗線）の半値幅が狭くなり、検出分解能及び補正精度を高くすることができる。

【0129】

また、第 1 金属膜 6 a 及び／又は第 2 金属膜 6 c が金から構成されている場合、第 1 金属膜 6 a 及び／又は第 2 金属膜 6 c 上に表面プラズモンを励起するためには、光源 2 から出射される光ビーム 12 の波長が重要である。

【0130】

金から構成された第 1 金属膜 6 a 及び／又は第 2 金属膜 6 c 上に表面プラズモンを励起するためには、約 600 nm 以上の波長の光ビーム 12 を第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c に照射することが望ましい。

【0131】

光源 2 から約 600 nm 以上の波長の光ビーム 12 を金から構成された第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c に照射することにより、表面プラズモンの励起効率が高まり、高い分解能で試料 13 の屈折率を検出することができる。なお、第 1 金属膜 6 a、及び／又は第 2 金属膜 6 c が金以外の酸化しやすい材料から構成されている場合、上に誘電体による保護膜を設けることで、酸化を防いでもよい。第 1 金属膜 6 a、及び第 2 金属膜 6 c の膜厚は、通常、10 nm～90 nm 程度である。

【0132】

誘電体膜 6 b の材料は、屈折率が、プリズム 5 より小さく、試料 13 より大きければよい。具体的には、SiO₂ や MgF₂ などの紫外、可視、赤外領域の光線に対して透明な材質より成る無機物質の薄膜が挙げられる。この膜厚は、紫外、可視、赤外領域の光線の

波長の半分から数倍程度であり、通常は約100nmから数1000nmであるが、本実施形態の表面プラズモンセンサーシステム1では、100nm～900nm程度が好ましい。

【0133】

誘電体薄膜6bは厚さが均一でかつ表面が平坦であり、なおかつ下層との密着性が良いことが望ましい。このような誘電体薄膜6bは真空蒸着法、スパッタリング法、化学蒸着法、ゾルゲル法などで形成できる。なお、本実施形態では特定の成膜方法に限定されるものではない。

【0134】

前記構成によれば、光源2から出射される光ビーム12を、センサー膜6に入射させることによって、生じる反射光は、光源2から出射される光ビームのうちプリズム5を透過した光ビーム12が、所定範囲の入射角で、プリズム5及び第1金属膜6a間、第1金属膜6a及び誘電体膜6b間、誘電体膜6b及び第2金属膜6c間、並びに、第2金属膜6cと試料13との間に形成されるすべての界面による多重反射で生じる。

【0135】

なお、多重反射が生じているか否かは、以下で説明するように、反射光に3つ以上の極小値が存在するか否かによって調べることが可能である。

【0136】

ここで、図8(a)及び図8(b)に基づき、従来の表面プラズモンセンサーと、本実施形態の表面プラズモンセンサーシステム1とに生じる素励起の違いについて説明する。

【0137】

図8(a)は、前記従来の表面プラズモンセンサーに生じる素励起を示す図であり、図8(b)は、表面プラズモンセンサーシステム1に生じる素励起を示す図である。

【0138】

図8(a)に示すように、特許文献2に記載された従来の表面プラズモンセンサーは、基板(プリズム)、金属膜、及び誘電体膜からなる構成である。このとき、金属膜に光ビームが照射されると、特定の入射角で表面プラズモンが励起されると共に、別の特定の入射角で誘電体膜を導波路とする導波モードが励起される。

【0139】

ここで、表面プラズモンの励起について説明する。表面プラズモンは、金属膜が1つの場合、その上面・下面の2つの界面で励起され、それらが互いに結合した状態となっている。

【0140】

一方、金属膜が複数の場合、複数の金属膜の上面・下面の各界面で励起され、それらが互いに結合した状態になっている。

【0141】

ここで、試料に近い導波モードは、試料の屈折率変化の影響を受けて対応する暗線(極小値)の位置(入射角)が変動する。また、試料から離れた金属膜に生じる表面プラズモンは、試料の屈折率変化の影響を受けても、対応する暗線の位置が、ほとんど変動しない。

【0142】

ここで、「暗線の位置」としているのは、例えば、入射した光ビームの位置を検出することが可能なエリアセンサ(例えば、光検出器)などの「受光面上における位置」が、光ビームの基板と金属膜との界面への入射角に対応するものであり、受光面上における位置を検出することは、界面への入射角度を検出することと等しいからである。

【0143】

一方、表面プラズモンセンサーシステム1は、プリズム5、第1金属膜6a(図では、金属膜6aと省略)、誘電体膜6b及び第2金属膜6c(図では、金属膜6cと省略)を備えており、図8(b)に示すように、誘電体膜6b内には、導波モードが励起され、第1金属膜6a及び第2金属膜6cの上面・下面の各界面にそれぞれ、表面プラズモンが生

10

20

30

40

50

じる。これらの表面プラズモンは互いに結合し、結合の仕方でも互いに異なるモードとなる。

【0144】

そうすると、各モードの強度分布は異なり、第2金属膜6cのいずれかの界面で強度分布が強くなる表面プラズモンモードは、試料（試料13）の屈折率変化の影響を受けやすいと考えられるが、導波モード及び第1金属膜6aのいずれかの界面で強度分布が強くなる表面プラズモンモードは、試料の屈折率変化の影響を受けにくいものと考えられる。

【0145】

但し、本発明の表面プラズモンセンサーでは、このような状況の下で、さらに、導波モード及び第1金属膜6aのいずれかの界面で強度分布が強くなる表面プラズモンモードによる暗線を検出する検出器8とを備えており、この結果、検出器8が検出した前記反射光の、前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3つ以上の極小値が存在するように構成されている。

【0146】

前記3つ以上の極小値を識別可能に生じさせるためには、まず、その前提として第1金属膜6a及び第2金属膜6cの両方に表面プラズモンを生じさせる必要がある。また、この2つの表面プラズモンを生じさせるためには、「誘電体膜6bの屈折率は、プリズム5の屈折率より小さく、かつ第2金属膜6cに接触させる試料13の屈折率より大きい」ことが必要である。

【0147】

また、前記2つの表面プラズモンは、誘電体膜6bの膜厚がある程度小さくなると、互いに影響を及ぼし合い、結合し、いくつかの表面プラズモンモード（結合モード）となる。この結合モードのそれぞれは、一般的には、エネルギーが低い状態とエネルギーが高い状態とに分離する。

【0148】

そこで、前記3つ以上の極小値を識別可能に生じさせるには、第1金属膜6a及び第2金属膜6cのそれぞれに生じる表面プラズモンを結合させて前記結合モードを生じさせる必要がある。また、この結合モードを生じさせるためには、「誘電体膜6bの膜厚は、光ビーム12の波長より短い」ことが好ましい。

【0149】

すなわち、「前記所定範囲の入射角に対応する反射率に、3つ以上の極小値が存在している」という条件は、「誘電体膜6bの屈折率は、プリズム5の屈折率より小さく、かつ第2金属膜6cに接触させる試料13の屈折率より大きい」及び「誘電体膜6bの膜厚は、光ビーム12の波長より短い」という2つの条件に置き換えることができる。

【0150】

ただし、「誘電体膜6bの膜厚は、光ビーム12の波長より短い」については、好ましいという意義での条件であり、誘電体膜6bの膜厚が光ビーム12の波長よりも多少大きくても、充分近ければ良い。

【0151】

一方、表面プラズモンの結合モードのうち、試料13の屈折率変化の影響を受けやすいモードは、試料13の屈折率変化の影響を受けて対応する暗線の位置が変動する。

【0152】

前記構成によれば、表面プラズモンセンサーシステム1では、前記3つ以上の極小値のうち、屈折率変化によって位置が変動する少なくとも1つの極小値を屈折率測定に用い、残りの変動しない2つの極小値をセンサーチップ交換による測定誤差の補正に用いることができる。

【0153】

例えば、センサーチップが交換前の規定位置にある場合に、変動しない2つの暗線が発生する位置を予め記録しておき、センサーチップ交換時に、変動しない2つの暗線が、予め記録されている前記規定位置で発生するように、センサーチップの傾き及び高さを調節

10

20

30

40

50

することにより、測定誤差を補正することができる。

【0154】

このとき、2つの暗線の間隔が異なる場合は傾きを、間隔は等しいが位置が異なる場合は、高さを調節すればよい。また、2つの暗線の間隔及び位置が異なる場合には、傾き及び高さの両方を調整することになる。

【0155】

なお、ここでの補正は、センサーチップの傾き及び高さ自体を調整するものであるが、以下で説明するように、センサーチップの傾き及び高さの変化に応じて測定値（又は入射角の値）自体を算出する方法も考えられる。なお、この測定値（又は入射角の値）自体を算出する方法については、以下で、詳細に説明する。

10

【0156】

また、表面プラズモンの結合モードのうち、試料13の屈折率変化の影響を受けやすいモードに対応する暗線は、導波光を励起することにより現れる暗線（導波モード）より幅が狭いので、検出に用いる場合には検出分解能を高くすることができ、測定誤差の補正に用いる場合には補正精度を高くすることができる。

【0157】

検出レンズ7は、センサー膜6から反射した光ビーム12を、光検出器8へ平行化して入射させるためのものである。検出レンズ7は、第1金属膜6a及び第2金属膜6cからの反射光を平行光にしてから光検出器8に入射する構成であるが、本実施形態の表面プラズモンセンサーシステム1ではこれに限られず、さらにこれを集光して光検出器8に入射してもかまわない。

20

【0158】

光検出器8は、センサー膜6から反射した反射光の強度を検出するものである。光検出器8としては、CCD（charge-coupled device）若しくはCMOS（complementary metal-oxide semiconductor）イメージや、又はアレイ状検出器を用いることにより、反射光を一度に取り込むことが好ましい。特に、光検出器8としてCCD又はCMOSを用いれば、光ビーム12を撮像した画像領域のうち、どの領域を測定に用いるかを選択することができる。

【0159】

光源駆動回路9は、光源2を駆動するものであり、図示しない電源から電圧の供給を受けて光源2に電流を流すことにより、光源2を駆動する。なお、光源2の破壊を防ぐために、光源駆動回路9には光源2に流す電流値に上限値を設けておくことが好ましい。

30

【0160】

算出回路10は、3箇所以上の暗線から、センサーチップの位置（高さ）や傾きの誤差を補正するとともに、試料13の屈折率や濃度を算出するための回路であり、LSI（large-scale integration）やIC（integrated circuit）などの半導体チップ、又は、これらを複合化したコンピュータなどを用いればよい。具体的な算出方法は、後で述べる。

【0161】

モニター付き端末11は、測定された反射率等の種々の結果を表示するものである。モニター付き端末11のモニターとしては、例えば、CRT（cathode-ray tube）や液晶ディスプレイ等が好適に用いられる。

40

【0162】

表面プラズモンセンサーシステム1のセンサー膜6に対する試料13の接触方法を、図2及び図3を用いて説明する。本実施形態の表面プラズモンセンサーシステム1は、試料13の屈折率の検出を行うために、試料13をセンサー膜6の表面に接触させる。例えば、試料13として液体を用いた場合には、図2に示すように、センサー膜6のプリズム5が設けられている側とは反対側の面に液滴として接触させる。

【0163】

また、例えば、試料13として液体又は気体を用いた場合には、図3に示すように、センサー膜6表面に設けられたマイクロ流路14に液体又は気体を流して接触させる。試料

50

1 3 をセンサー膜 6 表面に接触させる方法としては、上述した方法に限られず、試料 1 3 がセンサー膜 6 表面に接触可能な構成であれば構わない。

【0164】

以上より、簡易な構成で、センサーチップ交換時のセンサーチップの傾き及び高さの変化による測定誤差を補正することができる表面プラズモンセンサーシステム 1 などを提供することができる。

【0165】

〔2. 表面プラズモンセンサーシステムの測定誤差を補正する原理〕

次に、図 1、図 4 から図 6 までに基づき、3 箇所以上の暗線を発生する表面プラズモンセンサーシステム 1 において、センサーチップ交換による測定誤差を補正する原理について、2 つの実施例を用いて説明する。

10

【0166】

なお、〔2. 表面プラズモンセンサーシステムの測定誤差を補正する原理〕において説明すること以外の構成は、〔1. 表面プラズモンセンサーシステム〕と同じである。また、説明の便宜上、〔1. 表面プラズモンセンサーシステム〕の図面に示した部材と同一の機能を有する部材については、同一の符号を付し、その説明を省略する。

【0167】

（第 1 実施例）

まず、第 1 実施例として、第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c の材料が同じである場合について、図 4 を参照して説明する。

20

【0168】

図 4 は、表面プラズモンセンサーシステム 1 で、いくつかの試料 1 3 の屈折率に対する、（プリズム 5 からセンサー膜 6 への）入射角と反射率との関係を示す図（グラフ）である。ここで、光源 2 の波長として 780 nm を、プリズム 5 の屈折率として 2.0 を、第 1 金属膜 6 a、第 2 金属膜 6 c の材料を Au、誘電体膜 6 b の材料を SiO_2 としている。

【0169】

なお、プリズム 5 は、図 1 に示す三角柱プリズムを使用しており、三角形の断面の頂角は、90 度である。

【0170】

第 1 金属膜 6 a は 30 nm、誘電体膜 6 b は 250 nm、第 2 金属膜 6 c は 40 nm の膜厚とした。

30

【0171】

図 4 より明らかなように、本実施例の場合、暗線が 3 箇所発生しており、これらの暗線のうち、試料 1 3 の屈折率変化に反応しているのは、中央の暗線（中間極小値）のみであり、最低角（26.2°）の暗線（最小角極小値）と最高角（56°）の暗線（最大角極小値）は、ほとんどシフトしていない。つまり、これらの試料 1 3 の屈折率に影響を受けない暗線から、測定している光の正確な角度を知ることができる。したがって、センサーチップ交換によるセンサーチップの傾きやプリズムとの距離が変わっても、屈折率に影響を受けない暗線の位置（角度）を基に、中央の暗線が発生している角度がわかり、これより試料 1 3 の屈折率や濃度がわかる。

40

【0172】

（第 2 実施例）

次に、第 2 実施例として、第 1 金属膜 6 a 及び第 2 金属膜 6 c の材料が異なる場合について、図 5 を参照して説明する。

【0173】

図 5 は、別の表面プラズモンセンサーシステム 1 で、いくつかの試料 1 3 の屈折率に対する、（プリズム 5 からセンサー膜 6 への）入射角と反射率との関係を示す図（グラフ）である。ここで、光源 2 の波長として 780 nm を、プリズム 5 の屈折率として 2.0 を、第 1 金属膜 6 a の材料を Ag、第 2 金属膜 6 c の材料を Au、誘電体膜 6 b の材料を S

50

i O₂としている。第1金属膜6aは30nm、誘電体膜6bは250nm、第2金属膜6cは40nmの膜厚とした。なお、プリズム5は、第1実施例と同じのものである。

【0174】

図5より明らかなように、本実施例の場合、暗線が3箇所発生しており、これらの暗線のうち、試料13の屈折率変化に反応しているのは、中央の暗線（中間極小値）のみであり、最低角（25.8°）の暗線（最小角極小値）と最高角（55.8°）の暗線（最大角極小値）は、ほとんどシフトしていない。つまり、これらの試料13の屈折率に影響を受けない暗線から、測定している光の正確な角度を知ることができる。したがって、センサーチップ交換によるセンサーチップの傾きやプリズムとの距離が変わっても、屈折率に影響を受けない暗線の位置（角度）を基に、中央の暗線が発生している角度がわかり、これより試料13の屈折率や濃度がわかる。

10

【0175】

図5の結果より、第1金属膜6a及び第2金属膜6cの金属材料は、異なる材料からなってもよく、表面プラズモンを励起すれば、他の組み合わせでもよい。第1金属膜6a及び第2金属膜6cの金属材料を異なる材料にすることにより、暗線の幅を狭くすることができていることがわかる。

【0176】

図4及び図5では、試料13の屈折率変化を気体である1.0から液体である1.4と広い範囲での結果を示している。実際には、1つのセンサーチップでは、気体又は液体のいずれかを測定するため、試料13の屈折率変化が1.0～1.2、もしくは1.3～1.4のみに適切な動作をすればよい。

20

【0177】

試料13が液体であれば、図4及び図5いずれの場合でも、誘電体膜6bの膜厚を300nmにすることにより、最高角にあらわれている暗線の試料13の屈折率変化による影響を、より小さくすることができる。

【0178】

また、図4及び図5では、センサー膜6の表面にさらに特定の分子を吸着できる吸着層を設けた構成とはしていないが、通常、吸着層は数オングストロームと非常に薄いため、これらの計算結果に影響は与えない。

【0179】

30

図6は、従来の表面プラズモンセンサーで、いくつかの試料13の屈折率に対する、入射角と反射率との関係を示す図（グラフ）である。ここで、光源2の波長として780nmを、プリズム5の屈折率として2.0を、金属膜の材料をAu（50nm）とした。これより、本実施形態の表面プラズモンセンサーシステム1は、感度（屈折率変化に対する θ_{min} の変化率）や、分解能（暗線の半値幅）は、従来の表面プラズモンセンサーと同等であることがわかる。

【0180】

次に、3箇所以上の暗線を適切に発生させるためのセンサー膜6の構成について説明する。

【0181】

40

センサー膜6の誘電体膜6bの屈折率が、プリズム5より小さく、かつ試料より大きければ、第1金属膜6aと第2金属膜6cに表面プラズモンが励起される。誘電体膜6bは、これらを結合する層となっている。すなわち、誘電体膜6bの膜厚が波長より十分長ければ、第1金属膜6aの表面プラズモンと第2金属膜6cの表面プラズモンは独立に存在するが、誘電体膜6bの膜厚が波長に近くなると、両者は互いに影響を及ぼし合い、結合した表面プラズモンとなる。この結合した表面プラズモンにはいくつかのモードが存在するため、複数の暗線が現れる。

【0182】

ただし、プリズム5と試料13との屈折率差による臨界角は、真ん中の暗線より低角側に、存在している。つまり、最も低角側の暗線（最小角極小値）は、全反射領域ではない

50

角度に現れている。よって、これは表面プラズモンに起因する暗線ではなく、導波光に起因する暗線である。

【0183】

これらの3箇所の暗線に起因するモードは、それぞれセンサー膜6及び試料13内部における強度分布が異なるため、試料13の屈折率の影響が異なるのである。

【0184】

これらの3箇所の暗線は、それぞれが十分細くかつ反射率ができるだけ0に近い方が、表面プラズモンセンサーシステム1の分解能が高くなる。

【0185】

また、発生する角度が互いに重ならないことも重要である。これらは、第1金属膜6a、誘電体膜6b、第2金属膜6cの膜厚により調整することができ、第1金属膜6a、第2金属膜6cは10nm～90nm、誘電体膜6bは100nm～900nmにするのが好ましい。

〔3. 入射角算出装置〕

次に、図1、図9から図12までに基づき、本発明の入射角算出装置の一実施形態について説明する。

【0186】

なお、〔3. 入射角算出装置〕において説明すること以外の構成は、〔1. 表面プラズモンセンサーシステム〕及び〔2. 表面プラズモンセンサーシステムの測定誤差を補正する原理〕と同じである。また、説明の便宜上、〔1. 表面プラズモンセンサーシステム〕及び〔2. 表面プラズモンセンサーシステムの測定誤差を補正する原理〕の図面に示した部材と同一の機能を有する部材については、同一の符号を付し、その説明を省略する。

【0187】

本実施形態の入射角算出装置は、検出レンズ（入射角算出装置）7、光検出器（入射角算出装置）8、算出回路（入射角算出装置）10及びモニター付き端末（入射角算出装置）11からなる構成である。なお、検出レンズ7及び／又は光検出器8は、表面プラズモンセンサーの一部品であっても良い。

【0188】

検出レンズ7は、センサー膜6から反射した光ビーム12を、光検出器8へ平行化して入射させるためのものである。検出レンズ7は、第1金属膜6a及び第2金属膜6cからの反射光を平行光にしてから光検出器8に入射する構成であるが、本実施形態ではこれに限られず、さらにこれを集光して光検出器8に入射してもかまわない。

【0189】

光検出器8は、センサー膜6から反射した反射光の強度を検出するものである。光検出器8としては、CCD（charge-coupled device）若しくはCMOS（complementary metal-oxide semiconductor）イメージャ、又はアレイ状検出器を用いることにより、反射光を一度に取り込むことが好ましい。特に、光検出器8としてCCD又はCMOSを用いれば、光ビーム12を撮像した画像領域のうち、どの領域を測定に用いるかを選択することができる。

【0190】

次に、図9に基づき、算出回路10の各構成の詳細について説明する。

【0191】

図9に示すように、算出回路10は、インターフェイス部15、検出位置特定部16、入射角算出部17、及び入射角補正部18からなる構成である。

【0192】

また、モニター付き端末11は、入力装置11A及び記録部11B、並びに、図示しないCPU（central processing unit）を備えている。

【0193】

なお、図1では、算出回路10及びモニター付き端末11は、別の装置としているが、これらを単一の装置としても良い。

10

20

30

40

50

【0194】

なお、以下では、簡単のため、算出回路10、モニター付き端末11、及び入力装置11Aは、単一の装置であるとして説明する（すなわち、算出回路10の処理は、モニター付き端末11の内部処理であるとして説明する）。また、厳密には、モニター付き端末11の制御部が、算出回路10の各構成の動作を制御しているが、煩雑となるので、算出回路10の各構成と、モニター付き端末11の制御部のやり取りについては、説明を省略する。

【0195】

入力装置11Aは、インターフェイス部15を介して、ユーザが、集光レンズ4の開口数等に基づいて設定した入射角（最小入射角） $\theta 1$ 、入射角（最大入射角） $\theta 3$ 、検出レンズ7の焦点距離 f 、並びにプリズム5のタイプ（形状）及び屈折率等の各種データを記録部11Bに一時記録させるためのものである。

10

【0196】

なお、本実施形態では、ユーザが、入射角 $\theta 1$ 、入射角 $\theta 3$ などの設定データを予め入力する形態について説明しているが、このような形態に限られず、光源2、コリメートレンズ3、集光レンズ4、プリズム（誘電体基板）5、検出レンズ7、光検出器（検出手段）8等の状態を検出する検出装置を別に設け、この検出装置の検出結果に基づいて、入射角 $\theta 1$ 、入射角 $\theta 3$ などの設定データが自動的に記録部11Bに一時記録される構成としても良い。

【0197】

記録部11Bは、ユーザが設定した入射角（最小入射角） $\theta 1$ 、入射角（最大入射角） $\theta 3$ 、や検出位置特定部16が算出した、位置 $x 0$ 、位置 $x 1$ 、位置 $x 2$ 、位置 $x 3$ 、並びに、プリズム5のタイプ（形状）及び屈折率が一時記録されたり、あらかじめ「プリズム5のタイプ及び屈折率と補正率との関係を示す対応関係情報」が記録されたりするメモリである。なお、記録部11Bは、ROM（read only memory）及び／又はRAM（random access memory）で構成することができる。

20

【0198】

検出位置特定部16は、光検出器8からの受光信号を受け取り、以下で説明する位置 $x 0$ 、位置 $x 1$ 、位置 $x 2$ 、位置 $x 3$ を特定し、デジタルデータに変換して、記録部11Bに一時記録させるものである。

30

【0199】

入射角算出部17は、検出位置特定部16が特定した位置 $x 0$ 、位置 $x 1$ 、位置 $x 2$ 、位置 $x 3$ を読み出すと共に、記録部11Bに予め記録されている焦点距離 f を読み出し、以下で説明するように、所定の計算式に従って、入射角 $\theta 1$ 及び入射角 $\theta 3$ から入射角（中間入射角） $\theta 2$ を算出するようになっている。

【0200】

入射角補正部18は、記録部11Bに一時記録されたプリズム5のタイプ（形状）及び屈折率を読み出し、「プリズム5のタイプ及び屈折率と補正率との対応関係情報（以下、単に、「テーブル情報」という）」を参照して、補正率を決定し、入射角算出部17が算出した入射角 $\theta 2$ を補正して入射角 $\theta 2'$ を算出するものである。

40

【0201】

なお、検出対象の屈折率・濃度は、この入射角 $\theta 2$ 又は入射角 $\theta 2'$ の値から求める。

【0202】

算出回路10は、表面プラズモンセンサーから取得した3つ以上の極小値のうち、低角側極小値に対応する最小入射角（入射角 $\theta 1$ ）と、高角側極小値に対応する最大入射角（入射角 $\theta 3$ ）とを参照して、前記低角側極小値及び前記高角側極小値間に存在する少なくとも1つの中間極小値に対応する中間入射角（入射角 $\theta 2$ ）を算出するものである。

【0203】

なお、ここでは、センサーチップの交換による測定誤差の補正を、センサーチップ自体の高さ・傾きを調整するのではなく、算出回路10によって、センサーチップの高さ・傾

50

きの変化に応じて、数値計算で、測定誤差の補正を実行する場合を想定している。

【0204】

以上によれば、光検出器8によって、センサーチップの高さ・傾きが変わっても、試料13の屈折率の影響を受けにくい表面プラズモンの結合モードに対応する低角側極小値における最も入射角が小さい最小入射角（入射角 θ_1 ）と、試料13の屈折率の影響を受けにくい導波モードに対応する高角側極小値における最も入射角の大きい最大入射角（入射角 θ_3 ）を特定する（又は検出する）ことができる。

【0205】

なお、最も屈折率差が大きい、プリズム5と試料13との屈折率差に基づく臨界角は、入射角 θ_1 より高角側に、存在する。つまり、低角側極小値は、第1界面に対する全反射領域ではない角度に現れている。よって、これは表面プラズモンの結合モードに起因する暗線ではなく、導波光（導波モード）に起因する暗線であると考えられる。

【0206】

また、これにより、高角側極小値及び中間極小値は、表面プラズモンの結合モードに起因する暗線であることが導かれる。

【0207】

さらに、高角側極小値は、試料の屈折率変化の影響を受けにくく、中間極小値は、屈折率変化の影響を受けやすい傾向を示す。

【0208】

よって、この特定された入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 とを参照して、前記低角側極小値及び前記高角側極小値間に存在する少なくとも1つの中間極小値に対応する入射角 θ_2 を算出することができる。なお、この入射角 θ_2 自体を算出する具体的方法については、以下で、詳細に説明する。

【0209】

また、上述したセンサーチップの傾き及び高さ自体を調整する例では、センサーチップが交換前の規定の位置にある場合に、入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 に対応する変動しない2つの低角側極小値及び高角側極小値が発生する位置を予め記録しておき、センサーチップ交換時に、変動しない2つの低角側極小値及び高角側極小値が、予め記録されている前記規定の位置で発生するように、センサーチップの傾き及び高さを調節するようにすることにより、測定誤差を補正することができる。

【0210】

このとき、2つの低角側極小値及び高角側極小値の間隔が異なる場合は傾きを、間隔は等しいが位置が異なる場合は、高さを調節すればよい。また、2つの低角側極小値及び高角側極小値暗線の間隔及び位置が異なる場合には、傾き及び高さの両方を調整することになる。

【0211】

以上により、センサーチップ交換による、センサーチップの高さ及び傾きの変化による誤差を補正して、試料13の屈折率や濃度を検出することができる。

【0212】

次に、図10から図12までのフローチャートに基づき、算出回路10による、補正方法及び試料13の屈折率や濃度の具体的な算出方法について説明する。

【0213】

（第1計算例）

最も簡単な計算の例としては、最低角の暗線（低角側極小値）と最高角の暗線（高角側極小値）が発生している間の光検出器8の受光面上の位置を、均等に角度に換算すればよい。

【0214】

これは、位置x1、位置x2、及び位置x3のそれぞれの間隔の変化は、センサーチップの高さの変化に対応し、位置x1、位置x2、及び位置x3のそれぞれの間隔が変化しない場合、位置の変化は、センサーチップの傾きの変化に対応することに基づいている。

【0215】

すなわち、位置 x 1 及び位置 x 3 を結ぶ線分の内分点を位置 x 2 と考えたときの内分比自体は、センサーチップの高さ及び傾きが変化してもほとんど変化しないと考えることができる点を利用する算出方法である。

【0216】

第 1 計算例では、算出回路 10 は、最小入射角を $\theta 1$ 、中間入射角を $\theta 2$ 、及び最大入射角を $\theta 3$ とし、これらに対応する反射光が検出される光検出器 8 の受光面上の位置をそれぞれ位置 x 1、位置 x 2、及び位置 x 3 とするとき、

$$(x 2 - x 1) / (x 3 - x 1) = (\theta 2 - \theta 1) / (\theta 3 - \theta 1) \cdots \text{数式 (1)}$$

の関係を用いて、入射角 $\theta 1$ 及び入射角 $\theta 3$ から入射角 $\theta 2$ を算出する。

10

【0217】

具体的には、図 10 のステップ S 1（以下、単に「S 1」などと記載する）で、ユーザーが入力装置 11 A を使用して入射角 $\theta 1$ 及び入射角 $\theta 3$ を入力すると、インターフェイス部 15 が入射角 $\theta 1$ 及び入射角 $\theta 3$ をデジタルデータに変換して記録部 11 B に一時記録させる。また、インターフェイス部 15 は、前記一時記録が終了すると、検出位置特定部 16 に「動作命令」を発して S 2 に進む。

【0218】

S 2 では、検出位置特定部 16 が、インターフェイス部 15 から「動作命令」を受けて、光検出器 8 の検出結果（すべての暗線の位置）を取得して S 3 に進む。

【0219】

20

S 3 では、検出位置特定部 16 が、入射角 $\theta 1$ に対応する暗線（低角側極小値）、屈折率測定用の暗線（中間極小値）、入射角 $\theta 3$ に対応する暗線（高角側極小値）を特定して、位置 x 1、位置 x 2、及び位置 x 3 を得ると共に、取得した、位置 x 1、位置 x 2、及び位置 x 3 をデジタルデータに変換し、記録部 11 B に一時記録させる。

【0220】

また、検出位置特定部 16 は、記録部 11 B に一時記録が終了すると、入射角算出部 17 に「動作命令」を発して S 4 に進む。

【0221】

S 4 では、入射角算出部 17 が、検出位置特定部 16 からの「動作命令」を受けると、記録部 11 B から、入射角 $\theta 1$ 及び入射角 $\theta 3$ 、並びに、位置 x 1、位置 x 2、及び位置 x 3 を読み出して、数式 (1) に基づき、入射角 $\theta 2$ を算出し、S 5 に進む。

30

【0222】

S 5 では、図示しない屈折率・濃度換算部が、予め記録部 11 B に記録した「入射角と屈折率・濃度との対応関係を示す換算テーブル（又は換算式、換算表など）」を参照して、入射角 $\theta 2$ から、試料 13 の屈折率・濃度を算出して「END」となる。

【0223】

よって、上記の単純な算出式により、センサーチップ交換による、センサーチップの高さ・傾きの変化による誤差を補正して、入射角 $\theta 2$ を算出できるので、より正確な試料 13 の屈折率や濃度を検出することができる。

【0224】

40

（第 2 計算例）

次に、図 11 のフローチャートに基づき、より正確な計算例について説明する。

【0225】

第 2 計算例では、算出回路 10 は、最小入射角を $\theta 1$ 、中間入射角を $\theta 2$ 、及び最大入射角を $\theta 3$ とし、これらに対応する反射光が検出される光検出器 8 の受光面上の位置をそれぞれ位置 x 1、位置 x 2、及び位置 x 3 とし、第 1 界面及び前記第 2 界面から生じた反射光のうち、光検出器 8 の受光面へ垂直に入射する光ビームの受光面上での位置を x 0 とし、受光面とプリズム 5 との間に配置される検出レンズ 7 の焦点距離を f とし、並びに添え字を $i = 1, 2, 3$ とするとき、

$$\tan(\theta i) = (x i - x 0) / f \cdots \text{数式 (2)}$$

50

の関係を用いて、入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 から入射角 θ_2 を算出する。

【0226】

具体的には、図11のステップS11（以下、単に「S11」などと記載する）で、ユーザーが入力装置11Aを使用して、光検出器8の受光面へ垂直に入射する光ビームの受光面上での位置を x_0 、検出レンズ7の焦点距離を f を入力すると、インターフェイス部15がこれらをデジタルデータに変換して記録部11Bに一時記録させて、S12に進む。

【0227】

S12では、引き続きユーザーが入力装置11Aを使用して、入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 を入力すると、インターフェイス部15が入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 をデジタルデータに変換して記録部11Bに一時記録させる。また、インターフェイス部15は、前記一時記録が終了すると、検出位置特定部16に「動作命令」を発してS13に進む。

【0228】

S13では、検出位置特定部16が、インターフェイス部15から「動作命令」を受けて、光検出器8の検出結果（すべての暗線の位置）を取得してS14に進む。

【0229】

S14では、検出位置特定部16が、入射角 θ_1 に対応する暗線（低角側極小値）、屈折率測定用の暗線（中間極小値）、入射角 θ_3 に対応する暗線（高角側極小値）を特定して、位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 を得ると共に、取得した、位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 をデジタルデータに変換し、記録部11Bに一時記録させる。

【0230】

また、検出位置特定部16は、記録部11Bに一時記録が終了すると、入射角算出部17に「動作命令」を発してS15に進む。

【0231】

S15では、入射角算出部17が、検出位置特定部16からの「動作命令」を受けると、記録部11Bから、入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 、位置 x_0 、位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 並びに焦点距離 f を読み出して、数式（2）に基づき、入射角 θ_2 を算出し、S16に進む。

【0232】

S16では、図示しない屈折率・濃度換算部が、予め記録部11Bに記録した「入射角と屈折率・濃度との対応関係を示す換算テーブル（又は換算式、換算表など）」を参照して、入射角 θ_2 から、試料13の屈折率・濃度を算出して「END」となる。

【0233】

前記構成によれば、センサーチップ交換による、センサーチップの高さ・傾きの変化による誤差を補正して、より正確な試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0234】

（第3計算例）

次に、図12の基づき、プリズム5のタイプ（形状）及び屈折率の違いによる「誘電体基板の出射面での屈折」の違いを考慮した、さらに正確な計算例について説明する。

【0235】

すなわち第2計算例では、算出回路10は、図9に示すように、プリズム5のタイプ及び屈折率を考慮して入射角 θ_2 の値を補正する入射角補正部18を備えている。

【0236】

例えば、「プリズム5のタイプ（形状）及び屈折率と入射角 θ_2 の補正率との対応関係を示すテーブル情報」などをあらかじめ計算して記録部11Bに記憶させておき、このテーブル情報を参照して、「入射角 $\theta_2 \times$ 補正率」を計算することで、プリズム5の出射面での屈折の違い（プリズム5の形状や屈折率の変化）の影響を考慮して入射角 θ_2 の値を補正することができる。

【0237】

ただし、ここでは、「補正後の入射角 $\theta_2' =$ 入射角 $\theta_2 \times$ 補正率」であるとしている

10

20

30

40

50

。

【0238】

なお、プリズム5のタイプ（形状）としては、三角型（三角柱）、台形型（台形柱）、楔形、半円柱型、及び半球型等が例示できる。

【0239】

具体的には、図12のステップS21（以下、単に「S21」などと記載する）で、ユーザーが入力装置11Aを使用して、光検出器8の受光面へ垂直に入射する光ビームの受光面上での位置を x_0 、検出レンズ7の焦点距離を f 、及びプリズム5のタイプ及び屈折率を入力すると、インターフェイス部15がこれらをデジタルデータに変換して記録部11Bに一時記録させて、S22に進む。

10

【0240】

S22では、引き続きユーザーが入力装置11Aを使用して、入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 を入力すると、インターフェイス部15が入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 をデジタルデータに変換して記録部11Bに一時記録させる。また、インターフェイス部15は、前記一時記録が終了すると、検出位置特定部16に「動作命令」を発してS23に進む。

【0241】

S23では、検出位置特定部16が、インターフェイス部15から「動作命令」を受けて、光検出器8の検出結果（すべての暗線の位置）を取得してS24に進む。

【0242】

S24では、検出位置特定部16が、入射角 θ_1 に対応する暗線（低角側極小値）、屈折率測定用の暗線（中間極小値）、入射角 θ_3 に対応する暗線（高角側極小値）を特定して、位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 を得ると共に、取得した、位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 をデジタルデータに変換し、記録部11Bに一時記録させる。

20

【0243】

また、検出位置特定部16は、記録部11Bに一時記録が終了すると、入射角算出部17に「動作命令」を発してS25に進む。

【0244】

S25では、入射角算出部17が、検出位置特定部16からの「動作命令」を受けると、記録部11Bから、入射角 θ_1 及び入射角 θ_3 、位置 x_0 、位置 x_1 、位置 x_2 、及び位置 x_3 並びに焦点距離 f を読み出して、数式（2）に基づき、入射角 θ_2 を算出し、S26に進む。

30

【0245】

なお、ここでは、図11に基づく数式（2）を利用するフローに基づいて説明したが、図10に基づく数式（1）を利用するフローを用いても良い。

【0246】

S26では、入射角補正部18が、入射角算出部17から入射角 θ_2 を受けて、記録部11Bに予め記録されている「プリズム5のタイプ及び屈折率と入射角 θ_2 の補正率との対応関係を示すテーブル情報」を参照して、「入射角 $\theta_2 \times$ 補正率」を計算して、補正後の入射角 θ_2' を算出し、S27に進む。

【0247】

S27では、図示しない屈折率・濃度換算部が、予め記録部11Bに記録した「入射角と屈折率・濃度との対応関係を示す換算テーブル（又は換算式、換算表など）」を参照して、入射角 θ_2' から、試料13の屈折率・濃度を算出して「END」となる。

40

【0248】

前記構成によれば、センサーチップ交換による、センサーチップの高さ・傾きの誤差、並びにプリズム5のタイプや屈折率の違いによる誤差を補正して、さらに正確に、試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0249】

以上より、簡易な構成で、センサーチップ交換時のセンサーチップの傾き及び高さの変化による測定誤差を補正することができる表面プラズモンセンサーシステム（表面プラズ

50

モンセンサー) 1、入射角算出装置などを提供することができる。

【0250】

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

【0251】

最後に、表面プラズモンセンサーシステム(表面プラズモンセンサー) 1及び入射角算出装置の各ブロック、特に算出回路10及びその制御部は、ハードウェアロジックによって構成してもよいし、次のようにCPUを用いてソフトウェアによって実現してもよい。

【0252】

すなわち、表面プラズモンセンサーシステム1及び入射角算出装置は、各機能を実現する制御プログラムの命令を実行するCPU(central processing unit)、前記プログラムを格納したROM(read only memory)、前記プログラムを展開するRAM(random access memory)、前記プログラム及び各種データを格納するメモリ等の記憶装置(記録媒体)などを備えている。そして、本発明の目的は、上述した機能を実現するソフトウェアである表面プラズモンセンサーシステム1及び入射角算出装置の制御プログラム、並びに、入射角計算プログラムのプログラムコード(実行形式プログラム、中間コードプログラム、ソースプログラム)をコンピュータで読み取り可能に記録した記録媒体を、表面プラズモンセンサーシステム1及び入射角算出装置に供給し、そのコンピュータ(又はCPUやMPU)が記録媒体に記録されているプログラムコードを読み出し実行することによっても、達成可能である。

【0253】

前記記録媒体としては、例えば、磁気テープやカセットテープ等のテープ系、フロッピー(登録商標)ディスク/ハードディスク等の磁気ディスクやコンパクトディスク-ROM/MO/MD/デジタルビデオディスク/コンパクトディスク-R等の光ディスクを含むディスク系、ICカード(メモリカードを含む)/光カード等のカード系、あるいはマスクROM/EPROM/EEPROM/フラッシュROM等の半導体メモリ系などを用いることができる。

【0254】

また、表面プラズモンセンサーシステム1及び入射角算出装置を通信ネットワークと接続可能に構成し、前記プログラムコードを通信ネットワークを介して供給してもよい。この通信ネットワークとしては、特に限定されず、例えば、インターネット、イントラネット、エキストラネット、LAN、ISDN、VAN、CATV通信網、仮想専用網(virtual private network)、電話回線網、移動体通信網、衛星通信網等が利用可能である。また、通信ネットワークを構成する伝送媒体としては、特に限定されず、例えば、IEEE1394、USB、電力線搬送、ケーブルTV回線、電話線、ADSL回線等の有線でも、IrDAやリモコンのような赤外線、Bluetooth(登録商標)、802.11無線、HDD、携帯電話網、衛星回線、地上波デジタル網等の無線でも利用可能である。なお、本発明は、前記プログラムコードが電子的な伝送で具現化された、搬送波に埋め込まれたコンピュータデータ信号の形態でも実現され得る。

【0255】

なお、本発明の表面プラズモンセンサーは、光源と、前記光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、前記誘電体基板上に形成される第1金属膜と、前記第1金属膜上に形成される誘電体膜と、前記誘電体膜上に形成される第2金属膜と、前記光源から出射された光ビームを、前記誘電体基板を通して前記第1金属膜及び第2金属膜及び誘電体膜に照射し、前記光ビームの各入射角に対する前記第1金属膜及び第2金属膜及び誘電体膜からの反射光を検出する検出手段とを備える表面プラズモンセンサーにおいて、前記反射光に3箇所以上の反射率の極小値が存在しても良い。

【0256】

前記構成によれば、本発明の表面プラズモンセンサーは、第1金属膜、誘電体膜、第2

金属膜が、誘電体基板上に順に積層された構成であることにより、前記反射光に3箇所以上の反射率の極小値が存在し、前記反射光に3箇所以上の極小値は、1箇所を従来の屈折率測定に用い、残りの2箇所をセンサーチップ交換による測定誤差の補正に用いることができる。

【0257】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、光源と、前記光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、前記誘電体基板上に形成される第1金属膜と、前記第1金属膜上に形成される誘電体膜と、前記誘電体膜上に形成される第2金属膜と、前記光源から出射された光ビームを、前記誘電体基板を通して前記第1金属膜及び第2金属膜及び誘電体膜に照射し、前記光ビームの各入射角に対する前記第1金属膜及び第2金属膜及び誘電体膜からの反射光を検出する検出手段とを備える表面プラズモンセンサーにおいて、前記誘電体膜は、屈折率が誘電体基板より小さく、かつ検出対象を含む液体又は検出対象を含む気体より大きくても良い。

10

【0258】

前記構成によれば、第1金属膜、誘電体膜、第2金属膜が、誘電体基板上に順に積層された構成であることにより、前記反射光に3箇所以上の反射率の極小値が存在し、前記反射光に3箇所以上の極小値は、1箇所を従来の屈折率測定に用い、残りの2箇所をセンサーチップ交換による測定誤差の補正に用いることができる。

【0259】

また、金属膜で表面プラズモンを励起することによる、反射光の極小値（暗線）が現れ、導波光を励起することにより現れる暗線より幅が狭い分、検出に用いる場合は検出分解能が、補正に用いる場合は測定誤差の補正精度が高くなる。

20

【0260】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、光源と、前記光源から出射される光ビームの波長において透光性を有する誘電体基板と、前記誘電体基板上に形成される第1金属膜と、前記第1金属膜上に形成される誘電体膜と、前記誘電体膜上に形成される第2金属膜と、前記光源から出射された光ビームを、前記誘電体基板を通して前記第1金属膜及び第2金属膜及び誘電体膜に照射し、前記光ビームの各入射角に対する前記第1金属膜及び第2金属膜及び誘電体膜からの反射光を検出する検出手段とを備える表面プラズモンセンサーにおいて、前記誘電体膜の膜厚は、光源の波長より短くても良い。

30

【0261】

前記構成によれば、第1金属膜、誘電体膜、第2金属膜が、誘電体基板上に順に積層された構成であることにより、前記反射光に3箇所以上の反射率の極小値が存在し、前記反射光に3箇所以上の極小値は、1箇所を従来の屈折率測定に用い、残りの2箇所をセンサーチップ交換による測定誤差の補正に用いることができる。

【0262】

前記誘電体膜に接する2つの金属膜に励起される表面プラズモンが、互いに影響を及ぼし合い、結合し、いくつかの表面プラズモンモードとなる。これらのモードを励起することによる、反射光の極小値（暗線）は、導波光を励起することにより現れる暗線より幅が狭い分、検出に用いる場合は検出分解能が、補正に用いる場合は測定誤差の補正精度が高くなる。

40

【0263】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記3箇所以上の反射率の極小値のうち、最も入射角の小さい極小値と、最も入射角の大きい極小値を参照して、他の極小値のうち、少なくとも1つの極小値が発生している角度を決定する算出手段を備えても良い。

【0264】

前記構成によれば、センサーチップの位置・傾きが変わっても、発生する入射角が試料の屈折率の影響を受けにくい、最も入射角の小さい極小値と、最も入射角の大きい極小値から、角度がわかるため、これを基に、他の極小値のうち、少なくとも1つの極小値が発生している角度を決定することができる。すなわち、センサーチップ交換による、センサ

50

ーチップの位置・高さ誤差を補正して、試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0265】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記第1金属膜及び第2金属膜の材料は異なる材料からなっても良い。

【0266】

前記構成によれば、反射率極小値（暗線）の幅が狭くなり、検出分解能を高くすることができる。

【0267】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、少なくとも前記第2金属膜の材料は、金を主成分としても良い。

【0268】

検出対象を含む液体又は検出対象を含む気体は、第2金属膜に直接接触させる。そのため、第2金属膜は前記液体又は前記気体によって化学反応を起こさない安定した金属から構成されていることが望ましい。

【0269】

この点、金は、非常に安定した金属であり、錆びないために耐久性が高く、さらに、表面プラズモンを効率よく励起する。

【0270】

このため、前記構成によれば、本発明の表面プラズモンセンサーの少なくとも第2金属膜の材料として金を用いることにより、前記検出対象を含む液体又は前記検出対象を含む気体によって化学反応を起こさず、該液体又は該気体の屈折率を高い分解能で検出するとともに、第2金属膜の酸化による経時劣化を防ぐことができる。

【0271】

なお、金には不純物が含まれていてもよいが、一般に不純物濃度が高くなると、反射率の極小値が広くなり、検出分解能を下げることになるため、金の純度は高い方が好ましい。

【0272】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記光源の波長は、600nm以上、1550nm以下であっても良い。

【0273】

ここで、金属膜上に表面プラズモンを励起させるためには、光源から出射される光ビームの波長が重要である。上述したように、少なくとも第2金属膜は金から構成されていることがもっとも望ましいが、金から構成された第2金属膜上に表面プラズモンを励起するためには、600nm～1550nmの波長の光ビームを該第2金属膜照射することが望ましい。

【0274】

前記光源から約600nm～約1550nmの波長の光ビームを金から構成された前記第2金属膜に照射することにより、表面プラズモンの励起効率が高まり、高い分解能で前記検出対象を含む液体又は前記検出対象を含む気体の屈折率を検出することができる。

【0275】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記第2金属膜表面に、特定の物質を吸着する吸着層が設けられていても良い。

【0276】

前記構成によれば、第2金属膜表面の屈折率変化は、ほぼ吸着対象の物質であると考えられることから、第2金属膜表面の屈折率変化から、吸着対象の物質の濃度変化を検出することができる。

【0277】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記誘電体基板は、前記表面プラズモンセンサーから着脱可能であっても良い。

【0278】

10

20

30

40

50

前記構成によれば、検出対象に応じて第1金属膜、誘電体膜、第2金属膜及び吸着層を誘電体基板ごとに取り替えることが可能となる。これにより、1つの装置を用いて、多種の検出対象の検出や、感度や測定範囲・測定対象等を適宜変更することができる。すなわち、異なる吸着層を用いることにより、異なる吸着対象を検出することになる。また、第1金属膜、誘電体膜、第2金属膜が、他の材料や膜厚から構成されており、誘電体基板ごとに取り替えることにより、前記表面プラズモンセンサーの感度や測定範囲・測定対象等を適宜変更することができる。

【0279】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記算出手段は、極小値が発生する（プリズム5からセンサー膜6への）入射角のうち、最も小さい角度を $\theta 1$ 、最も大きい角度を $\theta 3$ 、他の極小値のうち、少なくとも1つの極小値が発生している角度を $\theta 2$ とし、これらの光検出器8上の位置を、 $x 1$ 、 $x 2$ 、 $x 3$ としたとき、

$$(x 2 - x 1) / (x 3 - x 1) = (\theta 2 - \theta 1) / (\theta 3 - \theta 1)$$

の関係を用いて、 $\theta 1$ 、 $\theta 3$ から $\theta 2$ を算出しても良い。

【0280】

前記構成によれば、単純な算出式により、センサーチップ交換による、センサーチップの位置・高さ誤差を補正して、試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0281】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記算出手段は、反射光のうち、光検出器8へ垂直に入射する光線の、光検出器8上での位置を $x 0$ 、検出レンズ7の焦点距離を f としたとき、

$$\tan(\theta i) = (x i - x 0) / f \quad i = 1, 2, 3$$

の関係を用いて、 $\theta 1$ 、 $\theta 3$ から $\theta 2$ を算出しても良い。

【0282】

前記構成によれば、より正確に、センサーチップ交換による、センサーチップの位置・高さ誤差を補正して、試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【0283】

また、本発明の表面プラズモンセンサーは、前記算出手段は、誘電体基板の出射面での屈折を考慮して補正しても良い。

【0284】

前記構成によれば、さらに正確に、センサーチップ交換による、センサーチップの位置・高さ誤差を補正して、試料の屈折率や濃度を検出することができる。

【産業上の利用可能性】

【0285】

本発明は、検出対象を含む液体又は気体の屈折率を検出するものであり、前記液体又は前記気体の濃度測定、蛋白質や高分子等の検出等に好適に用いられる。

【図面の簡単な説明】

【0286】

【図1】本発明における表面プラズモンセンサーの一実施形態の全体構成の概略を示す概略図である。

【図2】前記表面プラズモンセンサーにおける金属膜に対する試料の接触方法の一例を示す概略図である。

【図3】前記表面プラズモンセンサーにおける金属膜に対する試料の接触方法の他の例を示す概略図である。

【図4】前記表面プラズモンセンサーに関し、複数の試料の屈折率に対する、入射角と反射率との関係を示す図（グラフ）である。

【図5】前記表面プラズモンセンサーに関し、複数の試料の屈折率に対する、入射角と反射率との関係を示す図（グラフ）である。

【図6】従来の表面プラズモンセンサーに関し、複数の試料の屈折率に対する、入射角と反射率との関係を示す図（グラフ）である。

【図 7】前記従来の表面プラズモンセンサーにおける、入射角と反射率との関係を示す図である。

【図 8】(a)は、前記従来の表面プラズモンセンサーに生じる素励起を示す図であり、(b)は、本発明における一実施形態の表面プラズモンセンサーに生じる素励起を示す図である。

【図 9】本発明における一実施形態の表面プラズモンセンサーに関し、算出回路の具体的構成を示す図である。

【図 10】前記算出回路の動作の一例を説明するためのフローチャートである。

【図 11】前記算出部の動作の他の例を説明するためのフローチャートである。

【図 12】前記算出回路の動作のさらに他の例を説明するためのフローチャートである。

10

【符号の説明】

【0287】

1 表面プラズモンシステム（表面プラズモンセンサー）

2 光源

3 コリメートレンズ

4 集光レンズ

5 プリズム（誘電体基板）

6 センサー膜

6 a 第 1 金属膜

6 b 誘電体膜

6 c 第 2 金属膜

7 検出レンズ（入射角算出装置）

8 光検出器（検出手段、入射角算出装置）

9 光源駆動回路

10 算出回路（入射角算出装置）

11 モニター付き端末（入射角算出装置）

11 A 入力装置（入射角算出装置）

11 B 記録部

12 光ビーム

13 試料（検出対象を含む液体又は気体）

14 マイクロ流路

15 インターフェイス部

16 検出位置特定部（検出位置特定手段）

17 入射角算出部（算出手段）

18 入射角補正部（補正手段）

$\theta 1$ 入射角（最小入射角）

$\theta 2$ 入射角（中間入射角）

$\theta 2'$ 入射角（補正後の中間入射角）

$\theta 3$ 入射角（最大入射角）

f 焦点距離

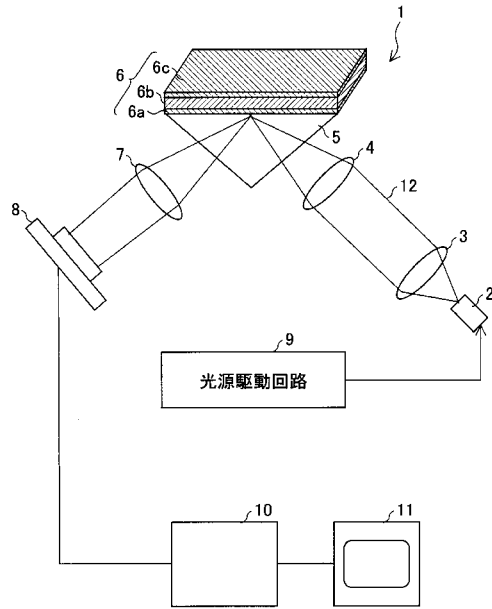
$x 0 \sim x 3$ 位置

20

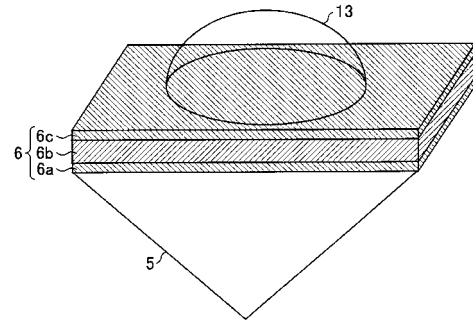
30

40

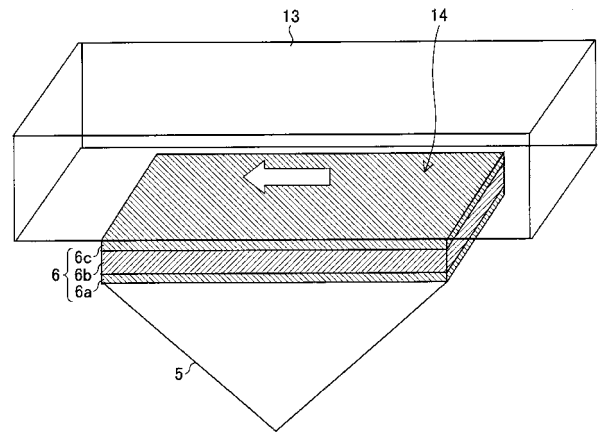
【図 1】



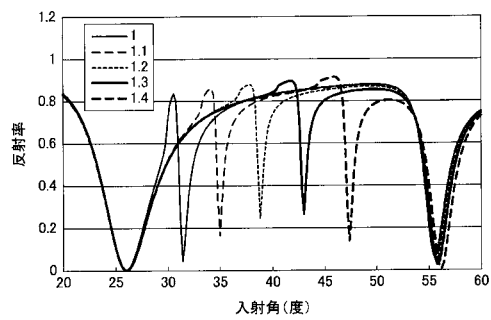
【図 2】



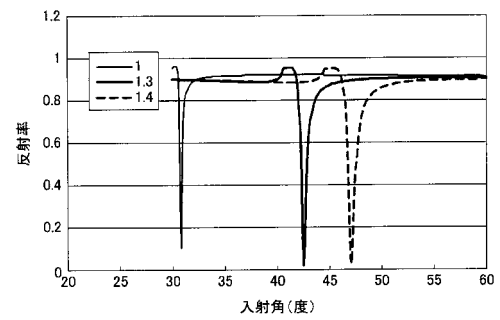
【図 3】



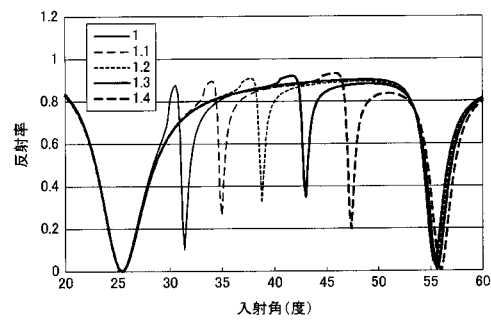
【図 4】



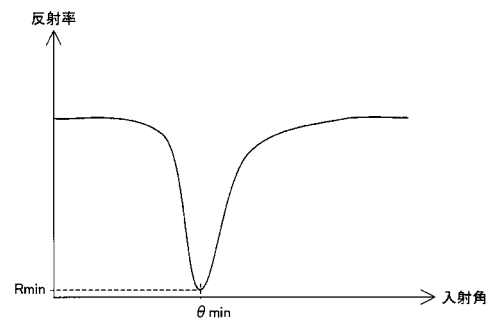
【図 6】



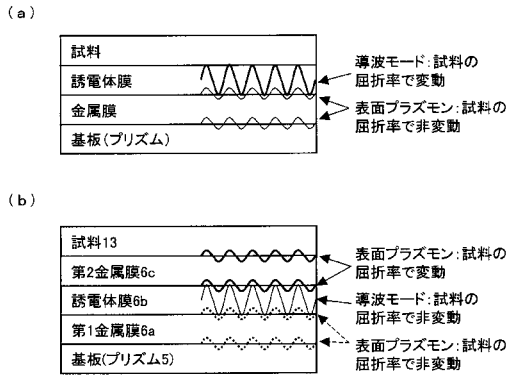
【図 5】



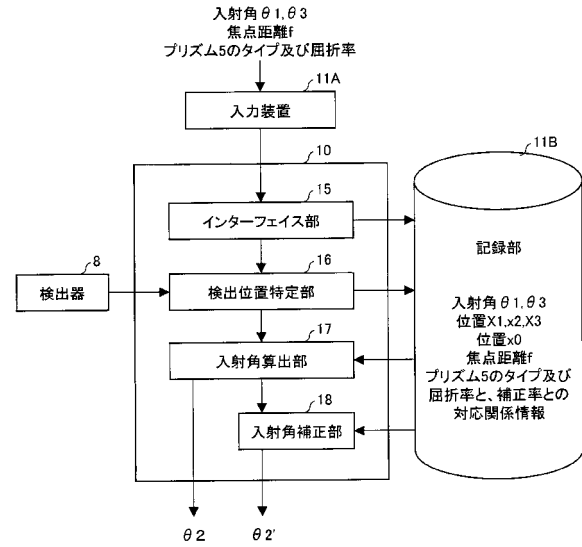
【図 7】



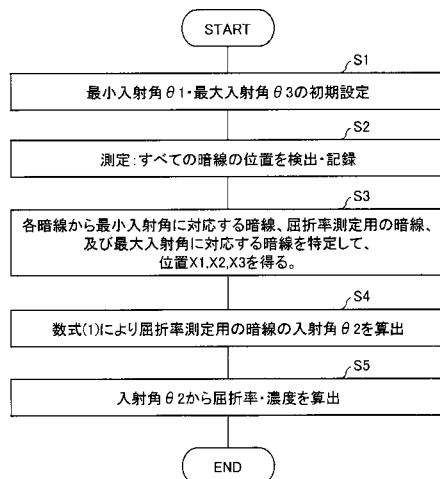
【図 8】



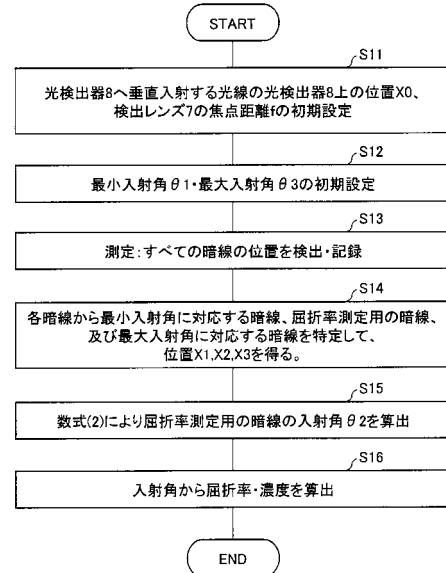
【図 9】



【図 10】



【図 11】



【図 12】

