

(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2017-207446

(P2017-207446A)

(43) 公開日 平成29年11月24日(2017.11.24)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>GO 1 N 21/3586 (2014.01)</b>	GO 1 N 21/3586	2 G O 5 9
<b>GO 1 N 21/552 (2014.01)</b>	GO 1 N 21/552	

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 (22) 出願日	特願2016-101709 (P2016-101709) 平成28年5月20日 (2016.5.20)	(71) 出願人 000236436 浜松ホトニクス株式会社 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 (74) 代理人 100088155 弁理士 長谷川 芳樹 (74) 代理人 100113435 弁理士 黒木 義樹 (74) 代理人 100140442 弁理士 柴山 健一 (74) 代理人 100148013 弁理士 中山 浩光 (72) 発明者 河田 陽一 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内
-----------------------	--	--

最終頁に続く

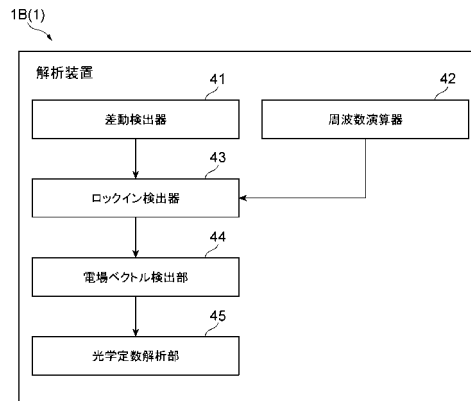
(54) 【発明の名称】 全反射分光計測装置及び全反射分光計測方法

(57) 【要約】

【課題】被測定物がない状態での計測と、被測定物がある状態での計測とで時間間隔が空いた場合であっても、光源のパワーの変動の影響を受けずに光学定数を導出することができる全反射分光計測装置を提供する。

【解決手段】全反射分光計測装置は、テラヘルツ波を発生させるテラヘルツ波発生部と、全反射面に被測定物が配置される内部全反射プリズムと、テラヘルツ波を検出する検出部と、テラヘルツ波の電場ベクトルを計測する電場ベクトル計測部と、電場ベクトルに基づいて被測定物の光学定数に関する情報を取得する解析部と、を備え、テラヘルツ波のS偏光成分及びP偏光成分の互いの比率は一定であり、解析部は、全反射面に被測定物が配置されていないときに計測された電場ベクトルのS偏光成分とP偏光成分との比と、被測定物が配置されているときに計測された電場ベクトルのP偏光成分とS偏光成分との比とに基づいて光学定数に関する情報を取得する。

【選択図】 図3



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

テラヘルツ波を発生させるテラヘルツ波発生部と、

前記テラヘルツ波の入射面及び出射面を有し、前記入射面から入射した前記テラヘルツ波を内部で伝播させるとともに全反射面で全反射させて前記出射面から出射させる内部全反射プリズムと、

前記内部全反射プリズムの前記出射面から出射した前記テラヘルツ波を検出する検出部と、

前記検出部によって検出された前記テラヘルツ波の電場ベクトルを計測する電場ベクトル計測部と、

電場ベクトル計測部によって計測された電場ベクトルに基づいて、前記内部全反射プリズムの前記全反射面に配置された被測定物の光学定数に関する情報を取得する解析部と、を備え、

前記テラヘルツ波発生部によって発生される前記テラヘルツ波は、前記全反射面に対する S 偏光成分及び P 偏光成分を互いの比率が一定となるように含み、

前記解析部は、前記全反射面に前記被測定物が配置されていないときに計測された前記電場ベクトルの S 偏光成分と P 偏光成分との比と、前記全反射面に前記被測定物が配置されているときに計測された前記電場ベクトルの P 偏光成分と S 偏光成分との比とに基づいて前記光学定数に関する情報を取得する、全反射分光計測装置。

**【請求項 2】**

前記テラヘルツ波発生部によって発生される前記テラヘルツ波は、前記 S 偏光成分及び前記 P 偏光成分の割合が等しい直線偏光又は円偏光である、請求項 1 に記載の全反射分光計測装置。

**【請求項 3】**

前記テラヘルツ波発生部によって発生される前記テラヘルツ波は、前記 S 偏光成分及び前記 P 偏光成分の割合が異なる直線偏光又は楕円偏光である、請求項 1 に記載の全反射分光計測装置。

**【請求項 4】**

被測定物が配置される全反射面を有する内部全反射プリズムの内部を通過して前記全反射面で全反射したテラヘルツ波に基づいて、前記被測定物の光学定数に関する情報を取得する全反射分光計測方法であって、

前記全反射面に前記被測定物が配置されていないときに、前記全反射面に対する S 偏光成分及び P 偏光成分を互いの比率が一定となるように含む前記テラヘルツ波を前記内部全反射プリズムに入射し、内部全反射プリズムから出射した前記テラヘルツ波の電場ベクトルを計測する工程と、

前記全反射面に前記被測定物が配置されているときに、前記全反射面に対する S 偏光成分及び P 偏光成分を前記比率で含む前記テラヘルツ波を前記内部全反射プリズムに入射し、内部全反射プリズムから出射した前記テラヘルツ波の電場ベクトルを計測する工程と、

前記被測定物が配置されていないときに計測された前記電場ベクトルの S 偏光成分と P 偏光成分との比と、前記被測定物が配置されているときに計測された前記電場ベクトルの P 偏光成分と S 偏光成分との比とに基づいて前記光学定数に関する情報を取得する工程と、を含む、全反射分光計測方法。

**【請求項 5】**

前記内部全反射プリズムに入射される前記テラヘルツ波は、S 偏光成分及び P 偏光成分の割合が等しい直線偏光又は円偏光である、請求項 4 に記載の全反射分光計測方法。

**【請求項 6】**

前記内部全反射プリズムに入射される前記テラヘルツ波は、S 偏光成分及び P 偏光成分の割合が異なる直線偏光又は楕円偏光である、請求項 4 に記載の全反射分光計測方法。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】**

10

20

30

40

50

## 【 0 0 0 1 】

本発明は、全反射分光計測装置及び全反射分光計測方法に関する。

## 【 背景技術 】

## 【 0 0 0 2 】

従来、テラヘルツ波を用いてプリズムの全反射面に配置された被測定物を計測する全反射分光計測が知られている。例えば非特許文献 1 に開示されているように、従来の全反射分光計測では、被測定物がプリズムの全反射面に配置されていない状態で計測された信号をリファレンスとして用いている。そして、被測定物を計測した信号とリファレンスとを比較し、2つの信号の変化の度合いから被測定物の光学定数を導出している。

## 【 先行技術文献 】

## 【 非特許文献 】

## 【 0 0 0 3 】

【 非特許文献 1 】 H. Hirori, K. Yamashita, M. Nagai, and K. Tanaka, "Attenuated total reflection spectroscopy in time domain using terahertz coherent pulses," Jpn. J. Appl. Phys. 43, L1287, (2004)

## 【 発明の概要 】

## 【 発明が解決しようとする課題 】

## 【 0 0 0 4 】

上記のような従来の技術では、テラヘルツ波を発生させるために、例えばフェムト秒レーザーのような光源が利用されている。このような光源のパワーは、時間によって大きく変動する場合がある。そのため、リファレンスの測定と被測定物の測定との間に時間間隔が空いた場合には、その間に光源のパワーが変動していることが考えられる。この場合、リファレンスの信号と被測定物を測定した信号とで変化が計測されたとしても、被測定物の有無による変化であるのか、光源のパワーの変動による変化であるのかの区別が困難となることが考えられる。

## 【 0 0 0 5 】

本発明は、テラヘルツ波を発生させる光源のパワーの変動の影響を受けずに光学定数に関する情報を取得することができる全反射分光計測装置及び全反射分光計測方法を提供することを目的とする。

## 【 課題を解決するための手段 】

## 【 0 0 0 6 】

一側面の全反射分光計測装置は、テラヘルツ波を発生させるテラヘルツ波発生部と、テラヘルツ波の入射面及び出射面を有し、入射面から入射したテラヘルツ波を内部で伝播させるとともに全反射面で全反射させて出射面から出射させる内部全反射プリズムと、内部全反射プリズムの出射面から出射したテラヘルツ波を検出する検出部と、検出部によって検出されたテラヘルツ波の電場ベクトルを計測する電場ベクトル計測部と、電場ベクトル計測部によって計測された電場ベクトルに基づいて、内部全反射プリズムの全反射面に配置された被測定物の光学定数に関する情報を取得する解析部と、を備え、テラヘルツ波発生部によって発生されるテラヘルツ波は、全反射面に対する S 偏光成分及び P 偏光成分を互いの比率が一定となるように含み、解析部は、全反射面に被測定物が配置されていないときに計測された電場ベクトルの S 偏光成分と P 偏光成分との比と、全反射面に被測定物が配置されているときに計測された電場ベクトルの P 偏光成分と S 偏光成分との比に基づいて光学定数に関する情報を取得する。

## 【 0 0 0 7 】

また、一側面の全反射分光計測方法は、被測定物が配置される全反射面を有する内部全反射プリズムの内部を通して全反射面で全反射したテラヘルツ波に基づいて、被測定物の光学定数に関する情報を取得する全反射分光計測方法であって、全反射面に被測定物が配置されていないときに、S 偏光成分及び P 偏光成分を互いの比率が一定となるように含むテラヘルツ波を内部全反射プリズムに入射し、内部全反射プリズムから出射したテラヘルツ波の電場ベクトルを計測する工程と、全反射面に被測定物が配置されているときに、当

10

20

30

40

50

該テラヘルツ波を内部全反射プリズムに入射し、内部全反射プリズムから出射したテラヘルツ波の電場ベクトルを計測する工程と、被測定物が配置されていないときに計測された電場ベクトルのS偏光成分とP偏光成分との比と、被測定物が配置されているときに計測された電場ベクトルのP偏光成分とS偏光成分との比とに基づいて光学定数に関する情報を取得する工程と、を含む。

【0008】

このような全反射分光計測装置及び全反射分光計測方法では、被測定物が配置されていないときにリファレンスとして計測された電場ベクトルのS偏光成分とP偏光成分との比と、被測定物が配置されているときに計測された電場ベクトルのP偏光成分とS偏光成分との比とに基づいて、光学定数を導出している。ここで、時間経過に伴ってテラヘルツ波のパワーの変動は起こり得るが、テラヘルツ波のS偏光成分とP偏光成分との比率は互いに一定であり、変動しない。そのため、リファレンスとして計測された電場ベクトルのS偏光成分とP偏光成分との比は、テラヘルツ波のパワーに関わらず一定となる。したがって、リファレンスの計測と被測定物の計測とで時間間隔が空いた場合であっても、光源のパワーの変動の影響を受けずに光学定数を導出することができる。

10

【0009】

また、一側面においては、内部全反射プリズムに入射されるテラヘルツ波は、S偏光成分及びP偏光成分の割合が等しい直線偏光又は円偏光であってもよい。この構成によれば、S偏光成分とP偏光成分とを偏りなく照射することができるので、安定した計測を行うことができる。

20

【0010】

また、一側面においては、内部全反射プリズムに入射されるテラヘルツ波は、S偏光成分及びP偏光成分の割合が異なる直線偏光又は楕円偏光であってもよい。この構成によれば、S偏光成分とP偏光成分との割合が等しくなるような厳密なアライメントをする必要がない。

【発明の効果】

【0011】

一側面の全反射分光計測装置及び全反射分光計測方法によれば、テラヘルツ波を発生させる光源のパワーの変動の影響を受けずに光学定数に関する情報を取得することができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】一実施形態に係る全反射分光計測装置の光学系を示す構成図である。

【図2】テラヘルツ波検出素子におけるテラヘルツ波の電場ベクトルを示す図である。

【図3】図1に示した全反射分光計測装置の光学系に接続される解析装置の構成例を示すブロック図である。

【図4】一実施形態に係る全反射分光計測方法を示すフローチャートである。

【図5】電場ベクトル検出方法を示すフローチャートである。

【図6】テラヘルツ波のP偏光成分とS偏光成分との関係を示す図である。

【発明を実施するための形態】

40

【0013】

以下、本発明に係る実施の形態について図面を参照しながら具体的に説明する。便宜上、実質的に同一の要素には同一の符号を付し、その説明を省略する場合がある。

【0014】

図1は、本実施形態に係る全反射分光計測装置の光学系を示す図である。同図に示すように、全反射分光計測装置1の光学系1Aは、フェムト秒レーザを光源としてテラヘルツ波Tを発生させるテラヘルツ波発生部10と、テラヘルツ波Tを全反射面20bで全反射させて出射させる内部全反射プリズム20と、内部全反射プリズム20から出射したテラヘルツ波Tを検出するテラヘルツ波検出素子(検出部)30とを含んでいる。

【0015】

50

より具体的には、全反射分光計測装置 1 の光学系 1 A は、出射光 L としてフェムト秒レーザを出射する光源 2 と、光源 2 からの出射光 L をプローブ光 L a とポンプ光 L b とに分岐するビームスプリッタ 3 と、ポンプ光 L b を周期的に変調する光変調器 5 と、ポンプ光 L b をプローブ光 L a に対して時間的に遅延させる遅延ステージ 6 と、ポンプ光 L b の入射によってテラヘルツ波を発生させるテラヘルツ波発生部 10 と、テラヘルツ波 T の入射面 20 a、全反射面 20 b 及び出射面 20 c を有する内部全反射プリズム 20 と、テラヘルツ波 T を検出するテラヘルツ波検出素子 30 と、プローブ光 L a の偏光を調整する偏光調整部 32 と、プローブ光 L a を検出する光検出器 34 とを含んで構成されている。

【0016】

光源 2 から出射されるフェムト秒レーザは、例えば波長 800 nm、パルス幅 100 fs、繰り返し周波数 100 MHz、平均出力 500 mW となっている。光変調器 5 は、例えば光チョッパであり、ポンプ光 L b を変調周波数  $f_2$  で時間的に変調する。変調周波数  $f_2$  は、例えば 1 kHz ~ 200 kHz である。遅延ステージ 6 は、例えばビームスプリッタ 3 で分岐したポンプ光 L b の光軸方向に往復動可能なステージ 6 a と、ポンプ光 L b を折り返す一対のミラー 6 b, 6 c とを有している。遅延ステージ 6 を経たポンプ光 L b は、ミラー 8 によってテラヘルツ波発生部 10 に導光される。

【0017】

テラヘルツ波発生部 10 は、テラヘルツ波発生素子 11 と波長板 13 とを含んでいる。テラヘルツ波発生素子 11 は、例えば Z e T e などの非線形光学結晶、G a A s を用いた光スイッチなどのアンテナ素子、I n A s などの半導体、超伝導体などによって構成されている。これらの素子から発生するテラヘルツ波 T のパルスは、一般的には数ピコ秒程度である。テラヘルツ波発生素子 11 として非線形光学結晶を用いた場合、テラヘルツ波発生素子 11 にポンプ光 L b が入射すると、非線形光学効果によってテラヘルツ波 T に変換される。

【0018】

ミラー 8 によってテラヘルツ波発生部 10 に導光されたポンプ光 L b は、波長板 13 によってその偏光が調整され、テラヘルツ波発生素子 11 に入射される。テラヘルツ波発生素子 11 から出射されるテラヘルツ波 T は、内部全反射プリズム 20 の全反射面 20 b において S 偏光成分及び P 偏光成分を含むように、波長板 13 及びテラヘルツ波発生素子 11 によって調整されている。テラヘルツ波発生素子 11 として Z e T e の (111) 面を切り出した非線形光学結晶を用いた場合、波長板 13 によるポンプ光 L b の偏光調整と Z e T e の (111) 面の結晶軸の調整とによって、S 偏光成分及び P 偏光成分を含むテラヘルツ波 T を得ることができる。例えば、斜め 22.5° の直線偏光とすることによって、テラヘルツ波 T は、光軸に対して全反射面 20 b を基準に斜め 45° の直線偏光となる。この場合、テラヘルツ波 T の S 偏光成分及び P 偏光成分の割合を等しくすることができる。発生したテラヘルツ波 T は、内部全反射プリズム 20 に入射する。

【0019】

内部全反射プリズム 20 は、テラヘルツ波発生素子 11 から出力されたテラヘルツ波 T を入射面 20 a に入力し、その入力したテラヘルツ波 T を内部で伝播させるとともに全反射面 20 b で全反射させ、その全反射した後のテラヘルツ波 T を出射面 20 c からテラヘルツ波検出素子 30 へ出力する。全反射面 20 b には、屈折率、誘電率、吸収係数といった各種の光学定数を測定する対象となる被測定物 S が載置される。

【0020】

プローブ光 L a は、ミラー 9 を経て偏光調整部 32 に導光される。偏光調整部 32 は、偏光子 36 と、 $\lambda/4$  波長板 37 とによって構成されている。偏光調整部 32 に導光されたプローブ光 L a は、偏光子 36 によって所定方向の直線偏光となり、さらに、 $\lambda/4$  波長板 37 によって円偏光となる。

【0021】

円偏光となったプローブ光 L a は、無偏光ビームスプリッタ 38 により偏光状態を維持したまま二分される。二分されたプローブ光 L a の一方は、テラヘルツ波検出素子 30 に

10

20

30

40

50

導光され、他方は、第2の光検出器34Bに導光される。

【0022】

テラヘルツ波検出素子30は、例えば光学的等方媒質であるZnTeの(111)面を切り出した電気光学結晶によって構成されている。テラヘルツ波検出素子30の一方面30aは、テラヘルツ波Tが入射する入射面となっている。一方面30aには、テラヘルツ波Tを透過し、かつプローブ光Laを反射する反射コーティングが施されている。また、テラヘルツ波検出素子30の他方面30bは、プローブ光Laが入射する入射面となっている。他方面30bには、プローブ光Laの反射を抑制する反射防止コーティングが施されている。

【0023】

図2は、テラヘルツ波検出素子30におけるテラヘルツ波の電場ベクトルを示す図である。同図に示すように、テラヘルツ波Tの電場ベクトル $E_T$ は、振幅 $|E_T|$ と、方位 $\gamma$ とによって表される。方位 $\gamma$ は、ZnTeの(111)面における $\langle -211 \rangle$ 方向を $0^\circ$ とし、これを基準として $\langle 0-11 \rangle$ 方向を正方向としている。 $\langle -211 \rangle$ 方向に対するテラヘルツ波Tの電場の傾きが $2^\circ$ である場合、複屈折は $-$ 方向に誘起される。テラヘルツ波Tの強さに応じて誘起される複屈折の大きさは、方向によらず一定となる。

【0024】

テラヘルツ波検出素子30に入射したプローブ光Laは、入射したタイミングでのテラヘルツ波Tの電場によって変調され、偏光状態が楕円偏光などに变化する。テラヘルツ波Tをプローブした後のプローブ光Laは、テラヘルツ波検出素子30の一方面30aで反射して無偏光ビームスプリッタ38に再び入射する。二分されたプローブ光Laの一方は、回転検光子39に入射し、他方は戻り光となる。

【0025】

回転検光子39は、モータなどにより、検光子が面内で回転する素子である。プローブ光Laが検光子に入射すると、特定の直線偏光のみが出力される。したがって、検光子が回転する場合、プローブ光Laが変調される。回転検光子39で変調されたプローブ光Laは、第1の光検出器34Aに入射する。戻り光は、 $\lambda/4$ 波長板37によって直線偏光に近い楕円偏光となり、大部分が偏光子36でカットされる。

【0026】

第1の光検出器34A及び第2の光検出器34Bは、例えばフォトダイオードである。第1の光検出器34Aは、テラヘルツ波Tをプローブした後のプローブ光Laを検出する光検出器であり、回転検光子39によって変調されたプローブ光Laを検出する。第2の光検出器34Bは、パワー変動のモニタリングに用いられる光検出器であり、テラヘルツ波検出素子30に向かわずに無偏光ビームスプリッタ38を透過したプローブ光Laを検出する。

【0027】

図3は、上述した全反射分光計測装置1の光学系1Aに接続される解析装置1Bの構成例を示すブロック図である。本実施形態では、解析装置1Bによって、電場ベクトル計測部及び解析部が構成されている。同図に示すように、解析装置1Bは、差動検出器41と、周波数演算器42と、ロックイン検出器43と、電場ベクトル検出部44と、光学定数解析部45とを備えている。

【0028】

差動検出器41は、第1の光検出器34Aからの検出信号と第2の光検出器34Bからの検出信号との差分を検出する部分である。差動検出器41は、第1の光検出器34Aからの検出信号と第2の光検出器34Bからの検出信号との差分に基づく検出信号をロックイン検出器43に出力する。差動検出を行うことにより、プローブ光Laにおけるパワー変動成分が除去される。このとき、第1の光検出器34A及び第2の光検出器34Bは、テラヘルツ波Tが入射しない状態で、かつ回転検光子39を配置していないときの差動検出器41の検出信号の強度がゼロとなるように感度調整されていることが好ましい。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 9 】

周波数演算器 4 2 は、回転検光子 3 9 の回転周波数と、ポンプ光 L b の変調周波数とに基づく周波数を生成し、ロックイン検出器 4 3 に参照信号を出力する。より具体的には、周波数演算器 4 2 は、回転検光子 3 9 の回転周波数を  $f_1$  とし、ポンプ光 L b の変調周波数を  $f_2$  とした場合に、 $f_2 \pm 2 f_1$  となる周波数を生成する。

## 【 0 0 3 0 】

ロックイン検出器 4 3 は、第 1 の光検出器 3 4 A からの検出信号（ここでは差動検出器 4 1 からの検出信号）をロックイン検出する部分である。本実施形態のロックイン検出器 4 3 は、2 位相ロックイン検出器であり、参照信号の周波数に同期して変化する検出信号の振幅と位相とを同時に検出する。ロックイン検出器 4 3 は、参照信号の周波数を  $f_2 \pm 2 f_1$  として、差動検出器 4 1 から出力される検出信号のロックイン検出を行う。ロックイン検出器 4 3 からの検出信号は、電場ベクトル検出部 4 4 に出力される。回転周波数  $f_1$  は、例えば 2 0 H z ~ 1 0 0 H z である。

10

## 【 0 0 3 1 】

電場ベクトル検出部 4 4 は、ロックイン検出器 4 3 からの検出信号に基づいて、テラヘルツ波 T の電場ベクトルを検出する部分である。電場ベクトル検出部 4 4 は、物理的には、CPU、メモリ、通信インタフェース等を備えたコンピュータシステムによって構成されている。

## 【 0 0 3 2 】

ロックイン検出器 4 3 からの検出信号に含まれる振幅  $A_L$  及び位相  $\phi_L$  と、テラヘルツ波 T の電場ベクトルの振幅  $|E_T|$  及び方位  $\theta_T$  との間には、下記の関係が成り立つ。下記式における  $A_C$  は、テラヘルツ波検出素子 3 0 として用いる電気光学結晶の非線形光学定数及び厚さ、プローブ光 L a の波長などに基づいて決定される定数である。下記式により、ロックイン検出器 4 3 からの検出結果に基づいて、テラヘルツ波 T の電場ベクトルを一意に決定できる。

20

## 【 数 1 】

$$A_L = \frac{1}{2} \sin A_C |E_T|$$

## 【 数 2 】

$$\phi_L = \frac{\pi}{2} - \theta_T$$

30

## 【 0 0 3 3 】

なお、テラヘルツ波 T の電場ベクトルの振幅が十分に小さい場合には、下記式が成立する。この場合には、ロックイン検出器 4 3 の検出信号に含まれる振幅  $A_L$  を、そのままテラヘルツ波 T の電場ベクトルの振幅  $|E_T|$  としてもよい。

## 【 数 3 】

$$\sin A_C |E_T| \approx A_C |E_T|$$

## 【 0 0 3 4 】

また、2 位相ロックイン検出器は、参照信号の位相に従って  $A_L \cos \phi_L$  と  $A_L \sin \phi_L$  とをそれぞれ出力することができる。テラヘルツ波 T の電場ベクトルの振幅が十分に小さい場合、これらの出力とテラヘルツ波 T の電場ベクトルにおける互いに直交する 2 つの軸方向の成分との間には、下記式が成立する。したがって、ロックイン検出器 4 3 から出力される 2 つの出力に基づいて、テラヘルツ波 T の電場ベクトルにおける互いに直交する 2 つの軸方向の成分に比例する値  $E_{Tx}$ 、 $E_{Ty}$  が得られることとなる。本実施形態では、テラヘルツ波 T の電場ベクトルにおける互いに直交する 2 つの軸方向の成分を、内部全反射プリズムの全反射面に対する S 偏光成分及び P 偏光成分に一致させている。これにより、電場ベクトルの S 偏光成分及び P 偏光成分が得られる。

40

【数 4】

$$E_{Tx} \propto A_L \sin \phi_L$$

【数 5】

$$E_{Ty} \propto A_L \cos \phi_L$$

【0035】

光学定数解析部 45 は、電場ベクトル検出部 44 によって計測された電場ベクトルに基づいて、被測定物の光学定数に関する情報を取得する部分である。光学定数解析部 45 は、物理的には、CPU、メモリ、通信インタフェース等を備えたコンピュータシステムによって構成されている。光学定数解析部 45 と電場ベクトル検出部 44 とは、同一のコンピュータシステムによって構成されてもよい。例えば、光学定数解析部 45 は、計測された電場ベクトルの S 偏光成分及び P 偏光成分のデータをメモリ等に保存しておき、必要に応じて呼び出すことができる。

【0036】

本実施形態の光学定数解析部 45 では、全反射面 20b に被測定物 S が配置されていない状態と配置されている状態とにおける、S 偏光成分の反射率の比  $R_s$  と P 偏光成分の反射率の比  $R_p$  との比  $\rho$  を利用して被測定物 S の光学定数に関する情報を取得する。この場合に、比  $\rho$  は、以下の式で示される。

【数 6】

$$\rho = \frac{R_p}{R_s}$$

【0037】

ここで、全反射面 20b に被測定物 S が配置されていないときに計測された電場ベクトルの S 偏光成分と P 偏光成分とをそれぞれ  $E_{s0}$  と  $E_{p0}$  とし、全反射面 20b に被測定物 S が配置されているときに計測された電場ベクトルの S 偏光成分と P 偏光成分とをそれぞれ  $E_s$  と  $E_p$  とすると、 $\rho$  は以下のように決定される。

【数 7】

$$\rho = \frac{E_p E_{s0}}{E_{p0} E_s}$$

【数 8】

$$\rho = \frac{E_p E_{s0}}{E_s E_{p0}}$$

【0038】

すなわち、 $\rho$  は、全反射面 20b に被測定物 S が配置されていないときに計測された電場ベクトルの S 偏光成分  $E_{s0}$  と P 偏光成分  $E_{p0}$  との比と、全反射面 20b に被測定物 S が配置されているときに計測された電場ベクトルの P 偏光成分  $E_p$  と S 偏光成分  $E_s$  との比とによって表すことができる。光学定数解析部 45 では、S 偏光成分  $E_{s0}$ 、P 偏光成分  $E_{p0}$ 、P 偏光成分  $E_p$  及び S 偏光成分  $E_s$  から求められる  $\rho$  を利用して、屈折率、誘電率、吸収係数といった光学定数に関する情報を取得する。

【0039】

図 4 は、本実施形態における全反射分光計測方法を示すフローチャートである。全反射分光計測方法は、上述の全反射分光計測装置 1 を用いて実行され得る。

【0040】

図 4 に示されるように、全反射分光計測方法は、リファレンス計測工程 S1、サンプル計測工程 S2 及び解析工程 S3 を有している。リファレンス計測工程 S1 では、全反射面 20b に被測定物 S が配置されていない状態で、内部全反射プリズム 20 から出射したテラヘルツ波 T の電場ベクトルを計測し、S 偏光成分  $E_{s0}$  と P 偏光成分  $E_{p0}$  とを取得す

る。また、サンプル計測工程 S 2 では、全反射面 2 0 b に被測定物 S が配置されている状態で、内部全反射プリズム 2 0 から出射したテラヘルツ波 T の電場ベクトルを計測し、S 偏光成分  $E_s$  と P 偏光成分  $E_p$  とを取得する。リファレンス計測工程 S 1 とサンプル計測工程 S 2 とは、同様の環境条件の下で実施される。

【 0 0 4 1 】

図 4 のフローチャートでは、リファレンス計測工程 S 1 をサンプル計測工程 S 2 よりも先に行っているが、この順番は反対でもよい。また、サンプル計測工程 S 2 を行うたびに、リファレンス計測工程 S 1 が行われる必要はなく、一度計測した S 偏光成分  $E_{s_0}$  及び P 偏光成分  $E_{p_0}$  をメモリから呼び出して利用してもよい。

【 0 0 4 2 】

図 5 は、リファレンス計測工程 S 1 及びサンプル計測工程 S 2 に共通する電場ベクトルの計測方法を示すフローチャートである。図 5 に示すように、この電場ベクトルの計測方法では、まず、光源 2 によって超短パルス光である出射光 L が出射される（ステップ S 1 1 : レーザ出射ステップ）。光源 2 から出射した出射光 L は、ビームスプリッタ 3 によってプローブ光 L a とポンプ光 L b とに二分される。ポンプ光 L b は、光変調器 5 によって時間的に変調され（ステップ S 1 2 : ポンプ光変調ステップ）、遅延ステージ 6 を通過することによって時間的に遅延させられる（ステップ S 1 3 : 遅延ステップ）。

【 0 0 4 3 】

遅延ステージ 6 を通過したポンプ光 L b は、テラヘルツ波発生部に入射し、テラヘルツ波 T を発生させる（ステップ S 1 4 : テラヘルツ波発生ステップ）。テラヘルツ波発生素子 1 1 で発生したテラヘルツ波 T は、内部全反射プリズム 2 0 に入射し、全反射面 2 0 b で反射されて、テラヘルツ波検出素子 3 0 に入射する（ステップ S 1 5 : テラヘルツ波検出ステップ）。

【 0 0 4 4 】

一方、プローブ光 L a は、偏光調整部 3 2 に導光され、偏光状態が円偏光となる（ステップ S 1 6 : 偏光状態調整ステップ）。偏光状態が円偏光となったプローブ光 L a は、テラヘルツ波検出素子 3 0 に入射し、テラヘルツ波 T のプローブがなされる（ステップ S 1 7 : テラヘルツ波プローブステップ）。このとき、テラヘルツ波 T の偏光状態は、テラヘルツ波 T の電場ベクトルによって変化する。

【 0 0 4 5 】

プローブ後のプローブ光 L a は、回転検光子 3 9 によって変調され（ステップ S 1 8 : プローブ光変調ステップ）、第 1 の光検出器 3 4 A によって検出される（ステップ S 1 9 : プローブ光検出ステップ）。また、プローブに用いられなかったプローブ光 L a は、第 2 の光検出器 3 4 B によって検出される。

【 0 0 4 6 】

次に、第 1 の光検出器 3 4 A 及び第 2 の光検出器 3 4 B からの検出信号がそれぞれ差動検出器 4 1 に入力され、差動検出が行われる。また、周波数演算器 4 2 によって、回転検光子 3 9 の回転周波数と、ポンプ光 L b の変調周波数とに基づく周波数が生成され、ロックイン検出器 4 3 に入力される（ステップ S 2 0 : 差動検出ステップ及び周波数演算ステップ）。

【 0 0 4 7 】

差動検出器 4 1 からの検出信号がロックイン検出器 4 3 に入力されると、周波数演算器 4 2 によって生成された周波数を参照信号としてロックイン検出が行われる（ステップ S 2 1 : ロックイン検出ステップ）。ロックイン検出器 4 3 からの検出信号は、電場ベクトル検出部 4 4 に入力され、ロックイン検出器 4 3 からの検出信号に含まれる振幅及び位相に基づいて、テラヘルツ波 T の電場ベクトルの振幅及び方向が検出される（ステップ S 2 2 : 電場ベクトル検出ステップ）。

【 0 0 4 8 】

再び図 4 に戻り、解析工程 S 3 では、リファレンス計測工程 S 1 で取得された電場ベクトルの S 偏光成分  $E_{s_0}$  と P 偏光成分  $E_{p_0}$  との比と、サンプル計測工程 S 2 で計測され

10

20

30

40

50

た電場ベクトルの P 偏光成分  $E_p$  と S 偏光成分  $E_s$  との比とに基づいて  $\theta$  を求め、光学定数に関する情報を取得する。この工程は、光学定数解析部 45 によって実行される。

【0049】

次に、本実施形態の作用効果について説明する。図6は、テラヘルツ波発生部10によって発生したテラヘルツ波の P 偏光成分と S 偏光成分との関係を模式的に示す図である。図6の(a)は、あるタイミングで発生したテラヘルツ波の電場ベクトル  $E_1$  を示している。また、図6の(b)は、図6の(a)とは異なるタイミングで発生したテラヘルツ波の電場ベクトル  $E_2$  を示している。図示例では、図6の(a)の場合のテラヘルツ波に比べて、(b)の場合のテラヘルツ波のパワーが小さくなっている。このように、異なる時間にテラヘルツ波発生部10で発生した2つのテラヘルツ波のパワーは、変動している場合がある。そのため、従来の技術では、リファレンスの信号と被測定物を測定した信号とで変化が計測されたとしても、被測定物の有無による変化であるのか、光源のパワーの変動による変化であるのかの区別が困難となることが考えられる。

10

【0050】

本実施形態の全反射分光計測装置1では、リファレンス計測工程S1で計測された電場ベクトルの S 偏光成分  $E_{s0}$  と P 偏光成分  $E_{p0}$  との比  $E_{s0}/E_{p0}$  と、サンプル計測工程S2で計測された電場ベクトルの P 偏光成分  $E_p$  と S 偏光成分  $E_s$  との比  $E_p/E_s$  とに基づいて、光学定数を導出している。ここで、テラヘルツ波発生部10では、入力されるフェムト秒レーザであるポンプ光  $L_b$  の偏光調整が行われている。これにより、図6に示されるように、時間によって異なるパワーのテラヘルツ波が発生した場合であっても、ある時間の電場ベクトル  $E_1$  の S 偏光成分  $E_{sT1}$  と P 偏光成分  $E_{pT1}$  との比率と、別の時間の電場ベクトル  $E_2$  の S 偏光成分  $E_{sT2}$  と P 偏光成分  $E_{pT2}$  との比率とは同一となっている。そのため、リファレンス工程S1で計測される電場ベクトルの S 偏光成分  $E_{s0}$  と P 偏光成分  $E_{p0}$  との比  $E_{s0}/E_{p0}$  は、フェムト秒レーザのパワー変動の影響を受けない。したがって、リファレンス計測工程S1とサンプル計測工程S2との間の時間経過に伴って、フェムト秒レーザのパワーが変動した場合であっても、フェムト秒レーザのパワー変動の影響を受けずに光学定数を導出することができる。

20

【0051】

また、内部全反射プリズム20に入射されるテラヘルツ波Tが、S偏光成分及びP偏光成分の割合が等しい直線偏光であるため、S偏光成分とP偏光成分とを偏りなく照射することができ、安定した計測を行うことができる。なお、内部全反射プリズム20に入射されるテラヘルツ波Tは、S偏光成分及びP偏光成分の割合が等しい円偏光であってもよい。

30

【0052】

以上、本発明の実施の形態について図面を参照して詳述したが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではない。内部全反射プリズム20の出射面20cから出射したテラヘルツ波の電場ベクトルの計測は、上記計測方法以外の他の計測方法によって実行され得る。例えば、テラヘルツ波検出素子30として光学的等方媒質であるZnTeの(111)面を切り出した電気光学結晶を例示したが、電気光学結晶はGaPなどの他の光学的等方媒質の(111)面を切り出した結晶であってもよい。

40

【0053】

また、内部全反射プリズムに入射されるテラヘルツ波は、S偏光成分とP偏光成分との割合が異なる直線偏光又は楕円偏光であってもよい。この構成によれば、S偏光成分とP偏光成分との割合が等しくなるような厳密なアライメントをする必要がない。

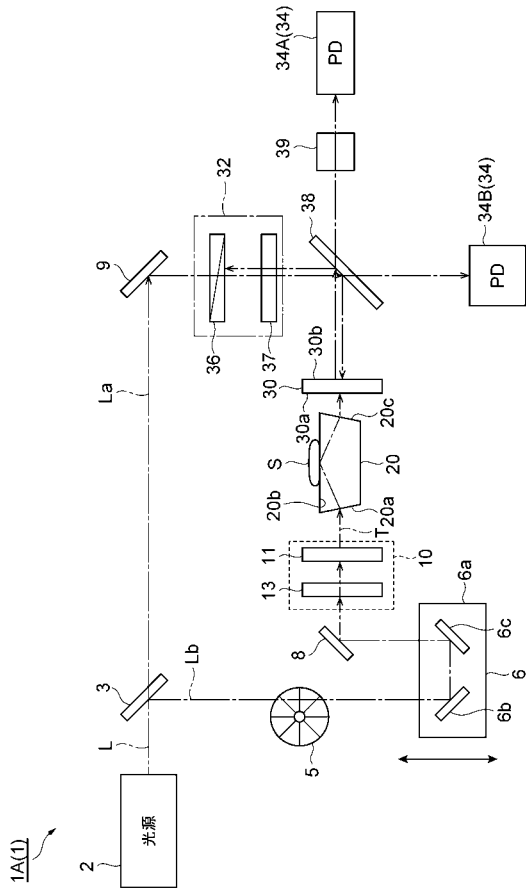
【符号の説明】

【0054】

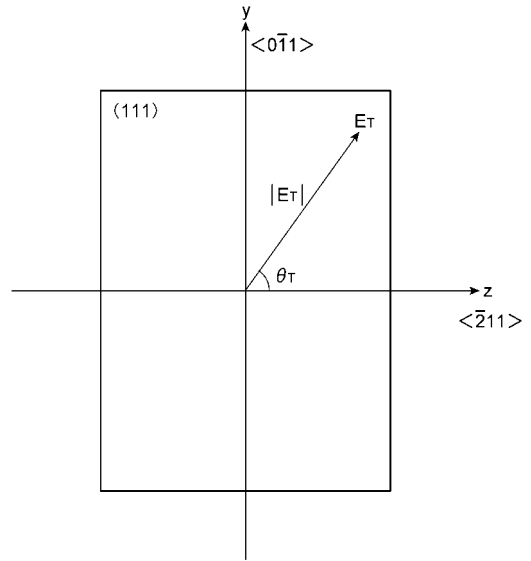
1...全反射分光計測装置、1A...光学系、1B...解析装置、10...テラヘルツ波発生部、20...内部全反射プリズム、20a...入射面、20b...全反射面、20c...出射面、30...テラヘルツ波検出素子(検出部)、44...電場ベクトル検出部、45...光学定数解析部(解析部)、T...テラヘルツ波。

50

【 図 1 】

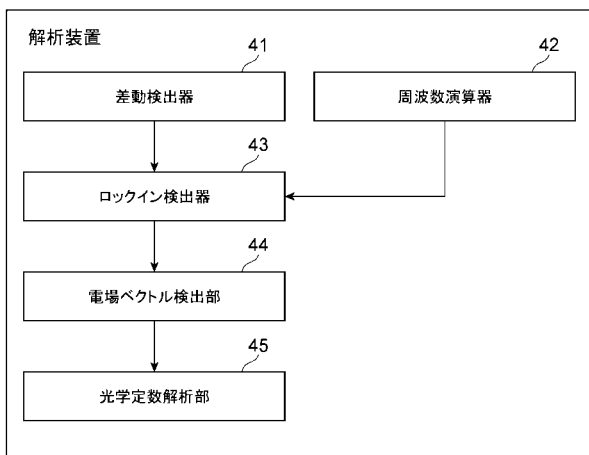


【 図 2 】

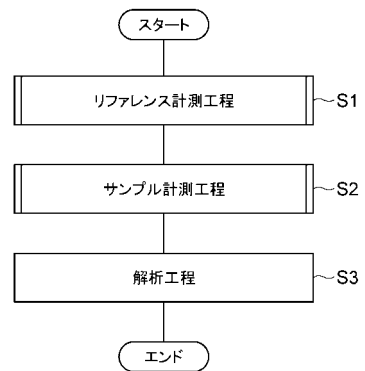


【 図 3 】

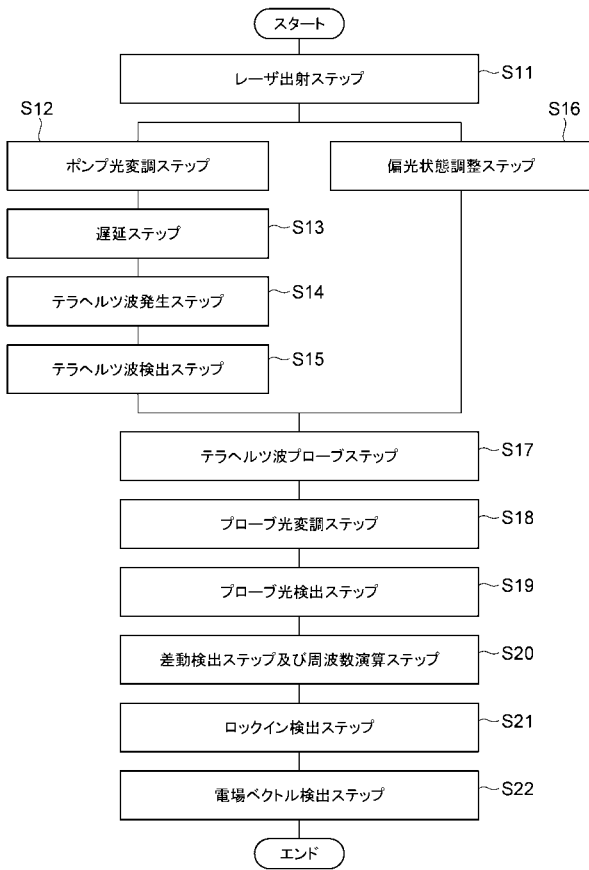
1B(1)



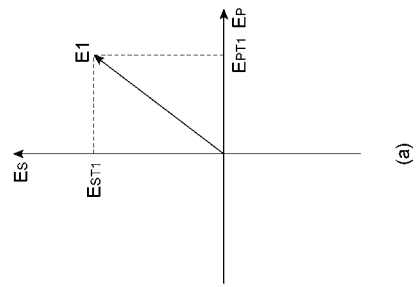
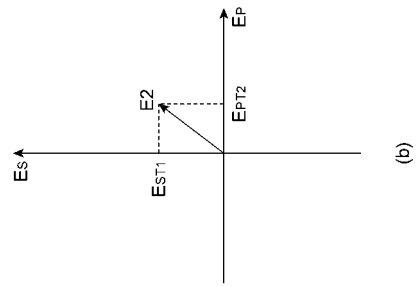
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2G059 AA01 EE01 EE02 FF04 GG01 GG04 GG08 HH01 JJ19 JJ20  
JJ22 KK01 MM01