

PCT

- 國際調查報告（條約第 21 條(3)）

1 PULSE LASER

〔続葉有〕



簡便な構成で透過光検出と反射光検出とを切り替えることができ、試料の種類に応じて入射させるテラヘルツ光の入射角を変更することで精度良く物性値を測定することができる光測定装置及び光測定方法を提供する。テラヘルツ周波数領域のパルス光を発するテラヘルツ光源 4 と、パルス光を検出する光検出器 8 と、テラヘルツ光源 4 から発したパルス光を測定対象である試料 6 へ誘導し、試料 6 を透過した透過光又は試料 6 で反射した反射光を光検出器 8 へ誘導する、少なくとも二以上のミラーで構成された、試料 6 を挟んで対称な位置に配置してある二対のミラー群 10 a、10 b を備える。二対のミラー群 10 a、10 b の位置及び角度を変更することにより、テラヘルツ光源 4 から発したパルス光の試料 6 への入射角を変更する。

明 細 書

発明の名称：光測定装置及び光測定方法

技術分野

[0001] 本発明は、テラヘルツ周波数領域のパルス光を用いて、誘電体、半導体、磁性体等の誘電率、吸収係数、電気伝導度等の物性値を非接触で測定する光測定装置及び光測定方法に関する。

背景技術

[0002] 従来の光測定装置、特にテラヘルツ周波数領域のパルス光を用いた光測定装置では、 $0.1 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12}$ ヘルツの周波数成分を有するパルス光を試料に照射し、試料を透過した透過光、又は試料表面で反射した反射光の強度及び位相差を検出することにより、試料の物性値を算出する。例えば特許文献1には、透過光の強度及び位相差を検出する装置と反射光の強度及び位相差を検出する装置とを、それぞれ独立した装置として構成してある測定装置が開示されている。

[0003] テラヘルツ光を透過する試料であっても、吸収係数が大きい試料の場合には十分な強度を有する透過光を得ることができない。また、導電性膜上に形成された薄膜が試料である場合等にはテラヘルツ光が透過しないことから、反射光の強度及び位相差を検出する装置へ切り替える必要がある。そこで、特許文献2では、透過光検出部と反射光検出部とを備え、試料に応じてワイヤグリッドを切り替えることにより、1台の測定装置で透過光及び反射光の両方を検出することができるテラヘルツ光測定装置が開示されている。

[0004] 反射測定の場合は、リファレンスの反射面と試料との相対反射率比及び位相差を正確に測定する必要がある。しかし、リファレンスの反射面と試料との位置を切り替える場合に生じる機械的誤差等により、特に位相差を正確に測定することが困難であるという問題点があった。斯かる問題点を解決すべく、例えば特許文献3には、テラヘルツ領域における試料の複素光学定数スペクトルをリファレンス測定することなく導出することが可能な偏光解析

装置が開示されている。特許文献3では、試料の複素誘電率によって s 偏光及び p 偏光の反射率及び位相が異なるという性質を利用し、入射光に対する反射光の偏光変化に基づいて物性値を算出するエリプソメトリ法を採用している。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2002-277393号公報

特許文献2：特開2005-227021号公報

特許文献3：特開2003-014620号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 測定試料に応じて透過測定と反射測定との切り替えを行う場合、特許文献2に開示されているテラヘルツ光測定装置では、透過光検出部と反射光検出部とを別個に備える必要がある。これらの光検出部はいずれも高価であることから、測定装置全体としてコストダウンが困難であるという問題点があった。

[0007] また、特許文献3に開示されている偏光解析装置において、本来はエリプソメトリ法の原理に基づき、試料へ入射させるテラヘルツ光の入射角は、s 偏光と p 偏光との振幅反射係数比が最大となるブリュースター角近傍に設定する必要がある。ブリュースター角は試料の複素誘電率に依存して変化するため、エリプソメトリ法を採用する場合には、試料への入射角を可変とすることが望ましい。しかし、特許文献3の光学系配置では、テラヘルツ光源と光検出部との物理的配置によって入射角が固定されてしまうことから、試料によっては試料へ入射させるテラヘルツ光の入射角がブリュースター角とかけ離れ、測定した物性値の信頼性が低くなるという問題点があった。

[0008] 本発明は斯かる事情に鑑みてなされたものであり、簡便な構成で透過光検出と反射光検出とを切り替えることができ、測定試料の種類に応じて入射さ

せるテラヘルツ光の入射角を変更することで精度良く物性値を測定することができる光測定装置及び光測定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

- [0009] 上記目的を達成するために第1発明に係る光測定装置は、テラヘルツ周波数領域のパルス光を発するテラヘルツ光源と、該パルス光を検出する光検出器と、前記テラヘルツ光源から発したパルス光を測定対象である試料へ誘導し、該試料を透過した透過光又は前記試料で反射した反射光を前記光検出器へ誘導する、少なくとも二以上のミラーで構成された、前記試料を挟んで対称な位置に配置してある二対のミラー群と、二対の該ミラー群の位置及び角度を変更することにより、前記テラヘルツ光源から発したパルス光の前記試料への入射角を変更するよう動作を制御する制御機構とを備えることを特徴とする。
- [0010] また、第2発明に係る光測定装置は、第1発明において、前記制御機構は、前記試料の中央部分を回転中心とした支持アームにより二対の前記ミラー群の位置及び角度を変更するようにしてあることを特徴とする。
- [0011] また、第3発明に係る光測定装置は、第1又は第2発明において、前記制御機構は、二対の前記ミラー群の位置及び角度を変更することにより、前記光検出器が、透過光を検出するか、反射光を検出するかを切り替えるようにしてあることを特徴とする。
- [0012] また、第4発明に係る光測定装置は、第1乃至第3発明のいずれか1つにおいて、前記ミラー群は曲面鏡を少なくとも一含み、前記試料近傍にて前記テラヘルツ光源から発したパルス光をコリメートするようにしてあることを特徴とする。
- [0013] また、第5発明に係る光測定装置は、第3又は第4発明において、前記テラヘルツ光源から発したパルス光が伝播する光路上に偏光子を備えることを特徴とする。
- [0014] また、第6発明に係る光測定装置は、第5発明において、前記制御機構により前記反射光を検出するよう切り替えた場合、前記試料のs偏光及びp偏

光の振幅反射係数比及び位相差に基づいて物性値を算出することを特徴とする。

[0015] また、第 7 発明に係る光測定装置は、第 6 発明において、前記制御機構は、前記テラヘルツ光源から発したパルス光の前記試料への入射角が、前記試料のブリュースター角と略一致するよう動作を制御することを特徴とする。

[0016] また、第 8 発明に係る光測定装置は、第 6 又は第 7 発明において、前記試料に入射される、前記テラヘルツ光源から発したパルス光は、s 偏光及び p 偏光の光強度が同等である 45 度直線偏光であり、前記試料で反射した反射光の s 偏光及び p 偏光の振幅反射係数比及び位相差を、前記偏光子の角度を 0 度又は 90 度に設定した場合に検出される信号に基づいて取得するようにしてあることを特徴とする。

[0017] また、第 9 発明に係る光測定装置は、第 6 乃至第 8 発明のいずれか 1 つにおいて、前記テラヘルツ光源は、光整流法を用いてテラヘルツ周波数領域のパルス光を発生する光導電性アンテナを備え、該光導電性アンテナは、発生するパルス光の偏光が 45 度傾斜するように配置されていることを特徴とする。

[0018] 次に、上記目的を達成するために第 10 発明に係る光測定方法は、テラヘルツ周波数領域のパルス光を発するテラヘルツ光源と、該パルス光を検出する光検出器と、前記テラヘルツ光源から発したパルス光を測定対象である試料へ誘導し、該試料を透過した透過光又は前記試料で反射した反射光を前記光検出器へ誘導する、少なくとも二以上のミラーで構成された、前記試料を挟んで対称な位置に配置してある二対のミラー群とを備え、二対の該ミラー群の位置及び角度を変更することにより、前記テラヘルツ光源から発したパルス光の前記試料への入射角を変更するよう動作を制御することを特徴とする。

[0019] また、第 11 発明に係る光測定方法は、第 10 発明において、前記試料の中央部分を回転中心とした支持アームにより二対の前記ミラー群の位置及び角度を変更することを特徴とする。

- [0020] また、第 1 2 発明に係る光測定方法は、第 1 0 又は第 1 1 発明において、二対の前記ミラー群の位置及び角度を変更することにより、前記光検出器が、透過光を検出するか、反射光を検出するかを切り替えることを特徴とする。
- [0021] 第 1 発明及び第 1 0 発明では、テラヘルツ周波数領域のパルス光を発するテラヘルツ光源と、パルス光を検出する光検出器と、該テラヘルツ光源から発したパルス光を測定対象である試料へ誘導し、試料を透過した透過光又は試料で反射した反射光を光検出器へ誘導する、少なくとも二以上のミラーで構成された、試料を挟んで対称な位置に配置してある二対のミラー群とを備えている。二対のミラー群の位置及び角度を変更することにより、テラヘルツ光源から発したパルス光の試料への入射角を変更することができるので、テラヘルツ光源及び光検出器を固定した状態で透過光／反射光のいずれを検出するかを切り替えること、及び反射光検出時の入射角を調整することができる。したがって、試料に応じてテラヘルツ光源及び光検出器の相対位置を変更する必要がなく、一の光検出器で透過光及び反射光を検出することが可能となる。また、試料への入射角を変更する都度、光軸合わせ等の煩雑な作業を行う必要がない。
- [0022] 第 2 発明及び第 1 1 発明では、試料の中央部分を回転中心とした支持アームにより二対のミラー群の位置及び角度を変更するので、試料に応じてテラヘルツ光源及び光検出器の相対位置を変更する必要がなく、一の光検出器で透過光及び反射光を検出することが可能となる。また、試料への入射角を変更する都度、光軸合わせ等の煩雑な作業を行う必要がなく、光検出器へパルス光を確実に誘導することができる。
- [0023] 第 3 発明及び第 1 2 発明では、二対のミラー群の位置及び角度を変更することにより、光検出器が、透過光を検出するか、反射光を検出するかを切り替えるので、一の光検出器で透過光及び反射光を検出することができ、光測定装置全体の構造の簡素化、コストダウンを図ることが可能となる。
- [0024] 第 4 発明では、ミラー群は曲面鏡を少なくとも一含み、試料近傍にてテラ

ヘルツ光源から発したパルス光をコリメートするので、試料の受光可能面積が小さい場合であっても確実に物性値を測定することが可能となる。

[0025] 第5発明では、テラヘルツ光源から発したパルス光が伝播する光路上に偏光子を備えることにより、偏光測定機能を付与することができ、エリプソメトリ法を用いた偏光測定を行うことが可能となる。また、異方性を有する試料についても測定することが可能となる。

[0026] 第6発明では、反射光を検出するよう切り替えた場合、試料のs偏光及びp偏光の振幅反射係数比及び位相差に基づいて物性値を算出する、いわゆるエリプソメトリ法を用いることにより、リファレンス測定を測定の都度実行する必要がなく、測定精度を高く維持することが可能となる。

[0027] 第7発明では、テラヘルツ光源から発したパルス光の試料への入射角が、試料のブリュースター角と略一致するよう動作を制御することにより、試料のブリュースター角近傍にパルス光の試料への入射角を調整することができる。したがって、試料のs偏光及びp偏光の振幅反射係数比が最大となる入射角で測定することができ、高い精度で物性値を測定することが可能となる。

[0028] 第8発明では、試料に入射される、テラヘルツ光源から発したパルス光は、s偏光及びp偏光の光強度が同等である45度直線偏光であり、試料で反射した反射光のs偏光及びp偏光の振幅反射係数比及び位相差を、偏光子の角度を0度又は90度に設定した場合に検出される信号に基づいて取得する。これにより、試料の複素誘電率によるわずかな偏光変化を検出することができ、高い精度で物性値を測定することが可能となる。また、測定中は偏光子の回転角は設定角度で固定されているので、偏光子を連続的に回転させる従来の測定方法と比較して機械的誤差の低減を図ることも可能となる。

[0029] 第9発明では、テラヘルツ光源は、光整流法を用いてテラヘルツ周波数領域のパルス光を発生する光導電性アンテナを備えている。光導電性アンテナは、発生するパルス光の偏光が45度傾斜するように配置されていることから、テラヘルツ光源から発したパルス光の利用効率を高めることが可能とな

る。

発明の効果

[0030] 上記構成によれば、二対のミラー群の位置及び角度を変更することにより、テラヘルツ光源から発したパルス光の試料への入射角を変更することができるので、テラヘルツ光源及び光検出器を固定した状態で透過光／反射光のいずれを検出するかを切り替えること、及び反射光検出時の入射角を調整することができる。したがって、試料に応じてテラヘルツ光源及び光検出器の相対位置を変更する必要がなく、一の光検出器で透過光及び反射光を検出することが可能となる。また、試料への入射角を変更する都度、光軸合わせ等の煩雑な作業を行う必要がない。

図面の簡単な説明

[0031] [図1]本発明の実施の形態 1 に係る光測定装置の透過光測定時の構成を示す模式図である。

[図2]本発明の実施の形態 1 に係る光測定装置の反射光測定時の構成を示す模式図である。

[図3]テラヘルツ光源素子 4 が光導電性アンテナを備える場合のアンテナモジュールの構成を示す例示図である。

[図4]平面鏡の横軸方向の位置、傾斜角度及び支持アームの回転位置の関係を算出するための説明図である。

[図5]本発明の実施の形態 2 に係る光測定装置の反射光測定時の構成を示す模式図である。

[図6]本実施の形態 2 に係る光測定装置でのパルス光の偏光変化の様子を示す模式図である。

[図7]本実施の形態 2 に係る光測定装置にて p 型 Si 基板の振幅反射係数比を測定した結果を示すグラフである。

[図8]本実施の形態 2 に係る光測定装置にて p 型 Si 基板の位相差を測定した結果を示すグラフである。

[図9]本実施の形態 2 に係る光測定装置で測定した p 型 Si 基板の振幅反射係

数比及び位相差に基づいて、複素誘電率を算出した結果と理論計算の結果とを比較したグラフである。

[図10]本発明の実施の形態2に係る光測定装置にて複素電気伝導率を算出した例を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0032] 以下、本発明の実施の形態に係る光測定装置について、 $0.1 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12}$ ヘルツの周波数成分を有するパルス光を試料に照射し、試料を透過した透過光、又は試料表面で反射した反射光の強度及び位相差を検出することにより、試料の物性値を算出して測定値として取得する、いわゆるテラヘルツ光測定装置を例に挙げて、図面に基づいて具体的に説明する。

[0033] (実施の形態1)

図1及び図2は、本発明の実施の形態1に係る光測定装置の構成を示す模式図である。図1は光測定装置の透過光測定時の構成を示す模式図を、図2は光測定装置の反射光測定時の構成を示す模式図である。

[0034] 図1及び図2に示すように、本実施の形態1に係る光測定装置は、パルスレーザ1で発光したパルス光L1をビームスプリッタ2で分光し、一方のパルス光L2を集光レンズ3aに誘導する。集光レンズ3aにてテラヘルツ光源素子(テラヘルツ光源)4に集光されたパルス光L2は、テラヘルツ周波数領域のパルス光に変換され、変換されたテラヘルツ光L4は非軸放物面鏡5によりミラー群10aに誘導される。

[0035] パルスレーザ1としては、例えばモードロックされたフェムト秒(fs)単位の超短パルスレーザを用い、パルス幅は10~150フェムト秒が好ましい。また、テラヘルツ光源素子4は、例えば低温成長GaAs薄膜上に形成された光導電性アンテナを備えている。

[0036] 図3は、テラヘルツ光源素子4が光導電性アンテナを備える場合のアンテナモジュールの構成を示す例示図である。図3(a)はアンテナモジュールの模式的な斜視図であり、図3(b)はアンテナギャップ近傍の拡大図である。光導電性アンテナ基板41には、アンテナギャップ42を有するアンテナ

ナパターン43が形成されており、アンテナギャップ42を形成する電極の両端にはバイアス電源44によりバイアス電圧が印加されている。バイアス電圧が印加されている状態でフェムト秒単位のパルス光L2が光導電性アンテナ基板41に入射した場合、瞬間的に過渡電流が流れ、電気双極子放射により $0.1 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12}$ ヘルツ、すなわちテラヘルツ周波数領域のパルス光（テラヘルツ光）L4が発生する。発生したテラヘルツ光L4は、光導電性アンテナ基板41の裏面に密着させてあるシリコン半球レンズ45により自由空間に放射される。

[0037] 図1及び図2に戻って、ミラー群10aは、平面鏡11a、非軸放物面鏡（曲面鏡）12aで構成されている。平面鏡11aは、テラヘルツ光L4が照射される位置を回転中心として回転することが可能な回転ステージ13aに搭載されており、回転ステージ13aは、テラヘルツ光L4と平行な方向に直線移動することが可能な構成、例えばテラヘルツ光L4と平行な方向に図示しない移動レールを設け、移動レール上を直線移動することが可能になっている。

[0038] 非軸放物面鏡12aは、測定対象となる試料6の中央部分を回転中心とする支持アーム14aと連結されている。支持アーム14aは、試料6が搭載されている回転ステージ13c及び後述する支持アーム14bが取り付けられている回転ステージ13dと同一回転中心軸にて回転する回転ステージ13bの回転中心に取り付けられており、非軸放物面鏡12aの有効焦点距離EFを回転半径として回転移動することが可能となっている。すなわち、回転ステージ13b、13c、13dは、図1及び図2の紙面に鉛直な方向の同一の回転中心軸上に備えてあり、別個独立して回転することが可能となっている。

[0039] テラヘルツ光L4は、試料6の中央部分、すなわち非軸放物面鏡12aの回転中心にてコリメートされる。このようにするために、非軸放物面鏡12aにおける入射光と反射光とがなす角度が常に90度となるように平面鏡11aの位置及び傾斜角度が制御される。

[0040] 図1に示す透過光測定時では、試料6はテラヘルツ光L4が入射角0度で入射するよう、試料6が搭載されている回転ステージ13cを回転させ、平面鏡11aの傾斜角度は45度としてある。この場合、試料6の中央部分と、平面鏡11aとの距離は、非軸放物面鏡12aの有効焦点距離EFLと等しくなる。そして、支持アーム14aは、試料6に直交する方向、すなわち平面鏡11aへ入射するテラヘルツ光L4と平行になるよう制御される。なお、支持アーム14aの回転角度、平面鏡11aの横軸方向の位置及び傾斜角度、及び試料6の回転角度は、それぞれの動作を制御する図示しないアクチュエータ、例えばサーボモータ、ステッピングモータ等により制御される（制御機構）。

[0041] 図2に示す反射光測定時では、試料6にテラヘルツ光L4が入射角を有して入射するよう、試料6が搭載されている回転ステージ13cを透過光測定時の位置から90度回転させてある。平面鏡11aの傾斜角度、試料6の中央部分を回転中心とした場合の平面鏡11aの横軸方向の位置、傾斜角度及び支持アーム14aの回転位置は、非軸放物面鏡12aにおける入射光と反射光とのなす角度が90度となり、試料6の中心点と非軸放物面鏡12aでの反射位置との距離が、非軸放物面鏡12aの有効焦点距離EFLと等しくなるよう制御される。図4は、平面鏡11aの横軸方向の位置、傾斜角度及び支持アーム14aの回転位置の関係を算出するための説明図である。

[0042] 図4では、平面鏡11aでのテラヘルツ光L4の反射位置から試料6の中心点までの横軸方向の距離をx、縦軸方向の距離をhとしている。テラヘルツ光L4の試料6への入射角（試料6表面に直交する方向からの傾斜角度）を θ_i とした場合、平面鏡11aの傾斜角度 θ_m は、図4に示す角度A及び角度A'と等しい（対角の関係）。角度Aは $(180 - \theta_i) / 2$ であるので、平面鏡11aの傾斜角度 θ_m は $(180 - \theta_i) / 2$ で表すことができる。

[0043] また、平面鏡11aでのテラヘルツ光L4の反射位置から試料6の中心点までの横軸方向の距離xは、試料6の中心点から試料6の延長方向（平面鏡

1 1 a へのテラヘルツ光 L 4 の入射方向と平行な方向) と平面鏡 1 1 a での反射光の方向との交点までの距離を y とすると、 $(y - h / \tan \theta i)$ で表すことができる。ここで、 y は、E F L を含む直角三角形から、 $E F L / \cos (90 - \theta i)$ と算出することができるので、 x は (式 1) にて算出することができる。

[0044] $x = E F L / \cos (90 - \theta i) - h / \tan \theta i \quad \cdots \quad (\text{式 } 1)$

[0045] 図 1 及び図 2 に戻って、試料 6 を透過した透過光又は試料 6 で反射した反射光は、試料 6 を挟んで対称に配置されているミラー群 1 0 b によって光検出器 8 へ誘導される。ミラー群 1 0 b は、平面鏡 1 1 b、非軸放物面鏡 1 2 b で構成されている。

[0046] 平面鏡 1 1 b は、テラヘルツ光 L 4 が照射される位置を回転中心として回転することが可能な回転ステージ 1 3 e に搭載されており、回転ステージ 1 3 e は、テラヘルツ光 L 4 と平行な方向に直線移動することが可能な構成、例えばテラヘルツ光 L 4 と平行な方向に図示しない移動レールを設け、移動レール上を直線移動することが可能になっている。

[0047] 非軸放物面鏡 1 2 b は、測定対象となる試料 6 の中央部分を回転中心とする支持アーム 1 4 b と連結されている。支持アーム 1 4 b は、回転ステージ 1 3 d に取り付けられており、非軸放物面鏡 1 2 b の有効焦点距離 E F L を回転半径として回転移動することが可能となっている。試料 6 の中央部分、すなわち非軸放物面鏡 1 2 b の回転中心にてコリメートされたテラヘルツ光 L 4 は、試料 6 を透過して非軸放物面鏡 1 2 b へ誘導される。

[0048] 図 1 に示す透過光測定時では、平面鏡 1 1 b の傾斜角度は平面鏡 1 1 a と対称な 1 3 5 (4 5) 度であり、試料 6 の中央部分と、平面鏡 1 1 b との距離は、非軸放物面鏡 1 2 b の有効焦点距離 E F L と等しくなる。そして、支持アーム 1 4 b は、試料 6 に直交する方向、すなわち平面鏡 1 1 b から出射するテラヘルツ光 L 4 と平行になるよう制御される。なお、支持アーム 1 4 b の回転角度、平面鏡 1 1 b の横軸方向の位置及び傾斜角度は、それぞれの動作を制御する図示しないアクチュエータ、例えばサーボモータ、ステップ

ングモータ等により制御される（制御機構）。

[0049] 図2に示す反射光測定時では、平面鏡11bの傾斜角度、試料6の中央部分を回転中心とした場合の平面鏡11bの横軸方向の位置、傾斜角度及び支持アーム14bの回転位置は、非軸放物面鏡12bにおける入射光と反射光とがなす角度が90度となり、試料6の中心点と非軸放物面鏡12bでの反射位置との距離が、非軸放物面鏡12bの有効焦点距離EFLと等しくなるよう制御される。ミラー群10bはミラー群10aと試料6を挟んで対称に配置されているので、平面鏡11bの傾斜角度は $180 - (180 - \theta_i) / 2$ で表すことができ、平面鏡11bでのテラヘルツ光L4の反射位置までの距離xも、試料6の中央部分を回転中心として、上述した（式1）にて算出することができる。

[0050] すなわち、平面鏡11bの横軸方向の位置及び傾斜角度、支持アーム14bの回転位置を、それぞれの動作を制御する図示しないアクチュエータにより、平面鏡11bの位置は平面鏡11aと試料6を挟んで対称となる位置に、平面鏡11bの傾斜角度は平面鏡11aと対称となる傾斜角度に、支持アーム14bの回転位置は支持アーム14aと対称となる回転位置に、それぞれなるように制御することで、平面鏡11aに入射するテラヘルツ光L4と平行なテラヘルツ光L4を平面鏡11bで反射させることができる。したがって、試料6への入射角を変更する場合であっても、上述した方法に従ってアクチュエータの動作を自動制御することにより、反射光の光軸合わせ等の煩雑な調整作業を都度実行する必要がなく、容易に反射光を光検出器8まで誘導することができる。

[0051] すなわち、試料6で反射した反射光は、ミラー群10bの非軸放物面鏡12bにおける入射光と反射光とがなす角度が90度となるように反射して平面鏡11bに誘導される。平面鏡11bにて非軸放物面鏡5と略対称な位置、少なくともテラヘルツ光L4と平行な位置に配置してある非軸放物面鏡7へ誘導されたテラヘルツ光L4は、光検出器8へ入射される。

[0052] 一方、ビームスプリッタ2にて分光されたパルス光L3は、光学遅延ライ

ン9を經由して集光レンズ3bで集光され、光検出器8へ入射する。このようにすることで、テラヘルツ光L4が光検出器8に到達した時点での電場強度に応じた信号を検出することができる。また、光検出器8に到達するパルス光L3の光検出器8への到達時間を光学遅延ライン9により遅延掃引することにより、テラヘルツ光L4のパルス波形を取得することができる。

[0053] 以上のように本実施の形態1によれば、試料6を挟んで対称な位置に配置されている二対のミラー群10a、10bの位置及び角度を連携させて変更することにより、テラヘルツ光源素子4から発したパルス光（テラヘルツ光）L4の試料6への入射角を変更することができるので、テラヘルツ光源素子4及び光検出器8を固定した状態で透過光／反射光のいずれを検出するかを切り替えること、及び反射光検出時の試料6へのパルス光（テラヘルツ光）L4の入射角を調整することができる。したがって、試料6に応じてテラヘルツ光源素子4及び光検出器8の相対位置を変更する必要がなく、一の光検出器8で透過光及び反射光を検出することが可能となる。また、試料6への入射角を変更する都度、光軸合わせ等の煩雑な調整作業を実行する必要がなく、測定者が容易に試料6の物性値を測定することが可能となる。

[0054] （実施の形態2）

図5は、本発明の実施の形態2に係る光測定装置の構成を示す模式図である。図5は反射光測定時の光測定装置の構成を示しており、実施の形態1と同様の構成については、同一の符号を付することで詳細な説明は省略する。

[0055] 図5に示すように、本実施の形態2に係る光測定装置は、パルスレーザ1で発光したパルス光L1をビームスプリッタ2で分光し、一方のパルス光L2を集光レンズ3aに誘導する。集光レンズ3aにて集光されたパルス光L2は、テラヘルツ光源素子（テラヘルツ光源）4を介して $0.1 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12}$ ヘルツ、すなわちテラヘルツ周波数領域のパルス光に変換され、変換されたテラヘルツ光L4は非軸放物面鏡5によりミラー群10aに誘導される。

[0056] テラヘルツ光L4は、偏光子21に入射され、入射面に対して垂直な面が

ら45度傾いた方向にて振動する直線偏光L5のみが取り出される。なお、ここで「偏光子」とは、例えば金属細線を周期的に配列したワイヤーグリッドである。45度直線偏光L5は、電場振幅強度が同一であるs偏光とp偏光とのベクトル和である。テラヘルツ光源素子4が光導電性アンテナを備える場合、アンテナギャップに電圧が印加される方向に振動する直線偏光のテラヘルツ光が発生するので、図3に示すように光導電性アンテナ基板41を45度傾けることで45度直線偏光を得ることができる。ただし、このとき発生するテラヘルツ光L4はわずかに楕円偏光成分を含むため、角度を45°に設定した偏光子21を挿入することで完全な直線偏光成分のみを取り出すことができる。

[0057] 図6は、本実施の形態2に係る光測定装置でのパルス光の偏光変化の様子を示す模式図である。図6(a)は、偏光子21によって取り出された45度直線偏光L5を示す模式図である。図6(a)では、矢印は電場ベクトルの振動方向を示している。

[0058] 図5に戻って、ミラー群10aは、平面鏡11a、非軸放物面鏡12aで構成されている。平面鏡11aは、テラヘルツ光L4が照射される位置を回転中心として回転することが可能な回転ステージ13aに搭載されており、回転ステージ13aは、テラヘルツ光L4と平行な方向に直線移動することが可能な構成、例えばテラヘルツ光L4と平行な方向に図示しない移動レールを設け、移動レール上を直線移動することが可能になっている。

[0059] 非軸放物面鏡12aは、測定対象となる試料6の中央部分を回転中心とする支持アーム14aと連結されている。支持アーム14aは、回転ステージ13bに取り付けられており、非軸放物面鏡12aの有効焦点距離EFLを回転半径として回転移動することが可能となっている。テラヘルツ光L4は、試料6の中央部分、すなわち非軸放物面鏡12aの回転中心にてコリメートされる。このようにするために、非軸放物面鏡12aにおける入射光と反射光とがなす角度が常に90度となるように平面鏡11aの位置及び傾斜角度が制御される。なお、試料6近傍にてテラヘルツ光L4をコリメートする

ので、試料 6 の受光可能面積が小さい場合であっても確実に物性値を測定することが可能となる。

[0060] 試料 6 が搭載されている回転ステージ 1 3 c の回転位置は反射光測定時の位置、すなわち試料 6 に 4 5 度直線偏光 L 5 が入射角を有して入射するよう、試料 6 が搭載されている回転ステージ 1 3 c を透過光測定時の位置から 9 0 度回転させてある。平面鏡 1 1 a の傾斜角度、試料 6 の中央部分を回転中心とした場合の平面鏡 1 1 a の横軸方向の位置、傾斜角度及び支持アーム 1 4 a の回転位置は、非軸放物面鏡 1 2 a における入射光と反射光とがなす角度が 9 0 度となり、試料 6 の中心点と非軸放物面鏡 1 2 a での反射位置との距離が、非軸放物面鏡 1 2 a の有効焦点距離 E F L と等しくなるよう制御される。具体的には、実施の形態 1 で開示した方法と同様に、平面鏡 1 1 a の傾斜角度は $(180 - \theta_i) / 2$ で表すことができ、平面鏡 1 1 a での 4 5 度直線偏光 L 5 の反射位置から試料 6 の中心点までの距離 x も、上述した（式 1）にて算出することができる。

[0061] 試料 6 で反射した反射光は、試料 6 で反射することにより楕円偏光 L 6 となる。試料 6 の複素誘電率に応じて s 偏光及び p 偏光の振幅反射係数比及び位相が変化するからである。したがって、楕円偏光 L 6 を解析することにより、試料 6 の複素誘電率を導出することができる。図 6（b）は、楕円偏光 L 6 を示す模式図である。

[0062] 図 5 に戻って、楕円偏光 L 6 は、試料 6 を挟んで対称に配置されているミラー群 1 0 b へ誘導される。ミラー群 1 0 b は、平面鏡 1 1 b、非軸放物面鏡 1 2 b で構成されている。

[0063] 平面鏡 1 1 b は、テラヘルツ光が照射される位置を回転中心として回転することが可能な回転ステージ 1 3 e に搭載されており、回転ステージ 1 3 e は、テラヘルツ光 L 4 と平行な方向に直線移動することが可能な構成、例えばテラヘルツ光 L 4 と平行な方向に図示しない移動レールを設け、移動レール上を直線移動することが可能になっている。

[0064] 非軸放物面鏡 1 2 b は、測定対象となる試料 6 の中央部分を回転中心とす

る支持アーム 1 4 b と連結されている。支持アーム 1 4 b は、回転ステージ 1 3 d に取り付けられており、非軸放物面鏡 1 2 b の有効焦点距離 E F L を回転半径として回転移動することが可能となっている。試料 6 の中央部分、すなわち非軸放物面鏡 1 2 b の回転中心にてコリメートされた 4 5 度直線偏光 L 5 は、試料 6 表面で反射して非軸放物面鏡 1 2 b へ誘導される。

[0065] 平面鏡 1 1 b の傾斜角度、試料 6 の中央部分を回転中心とした場合の平面鏡 1 1 b の横軸方向の位置、傾斜角度及び支持アーム 1 4 b の回転位置は、非軸放物面鏡 1 2 b における入射光と反射光とがなす角度が 9 0 度となり、試料 6 の中心点と非軸放物面鏡 1 2 b での反射位置との距離が、非軸放物面鏡 1 2 b の有効焦点距離 E F L と等しくなるよう制御される。ミラー群 1 0 b はミラー群 1 0 a と試料 6 を挟んで対称に配置されているので、平面鏡 1 1 b の傾斜角度は $180 - (180 - \theta_i) / 2$ で表すことができ、平面鏡 1 1 b での楕円偏光 L 6 の反射位置までの距離 x も、試料 6 の中央部分を回転中心として、上述した（式 1）にて算出することができる。

[0066] すなわち、平面鏡 1 1 b の横軸方向の位置及び傾斜角度、支持アーム 1 4 b の回転位置を、それぞれの動作を制御する図示しないアクチュエータにより、平面鏡 1 1 b の位置は平面鏡 1 1 a と試料 6 を挟んで対称となる位置に、平面鏡 1 1 b の傾斜角度は平面鏡 1 1 a と対称となる傾斜角度に、支持アーム 1 4 b の回転位置は支持アーム 1 4 a と対称となる回転位置に、それぞれなるように制御することで、平面鏡 1 1 a に入射するテラヘルツ光 L 4 と平行なテラヘルツ光 L 4 を平面鏡 1 1 b で反射させることができる。したがって、試料 6 への入射角を変更する場合であっても、上述した方法に従ってアクチュエータの動作を自動制御することにより、反射光の光軸合わせ等の煩雑な調整作業を都度実行する必要がなく、容易に反射光を光検出器 8 まで誘導することができる。

[0067] すなわち、試料 6 で反射した反射光は、ミラー群 1 0 b の非軸放物面鏡 1 2 b における入射光と反射光とがなす角度が 9 0 度となるように反射して平面鏡 1 1 b に誘導される。平面鏡 1 1 b で反射された楕円偏光 L 6 は、偏光

子 2 2 及び偏光子 2 3 を経由して、非軸放物面鏡 5 と対称な位置に配置してある非軸放物面鏡 7 へ誘導される。

[0068] 楕円偏光 L 6 は、偏光子 2 2 によって s 偏光成分と p 偏光成分とに分離された直線偏光 L 7 として取り出される。すなわち偏光子 2 2 の角度を 0 度又は 90 度に設定することで、s 偏光又は p 偏光のみを取り出す。図 6 (c) は、s 偏光又は p 偏光の直線偏光 L 7 を示す模式図である。図 6 (c) では、矢印は電場ベクトルの振動方向を示しており、s 偏光又は p 偏光を示している。

[0069] 直線偏光 L 7 は、偏光子 2 3 を介して光検出器 8 へ入射される。偏光子 2 3 は入射面に対して垂直な面から -45 度傾いた角度に設定されており、これにより s 偏光成分と p 偏光成分との両方を光検出器 8 で検出することができる。

[0070] 直線偏光 L 7 は、非軸放物面鏡 7 で反射されて光検出器 8 へ入射される。一方で、ビームスプリッタ 2 にて分光されたパルス光 L 3 も、光学遅延ライン 9 を経由して集光レンズ 3 b で集光され、光検出器 8 へ入射される。このようにすることで、直線偏光 L 7 が光検出器 8 に到達した時点での電場強度に応じた信号を検出することができる。また、パルス光 L 3 の光検出器 8 への到達時間を光学遅延ライン 9 により遅延掃引することにより、テラヘルツ光 L 4 のパルス波形を取得することができる。

[0071] s 偏光及び p 偏光の時間波形は、偏光子 2 2 を回転ステージに取り付け、回転角を 0 度又は 90 度になるよう切り替えることにより取得する。すなわち、s 偏光又は p 偏光の時間波形の取得を完了した時点で偏光子 2 2 の回転角を切り替え、s 偏光又は p 偏光の時間波形を取得する。

[0072] 取得した時間波形をフーリエ変換することにより、s 偏光及び p 偏光の複素反射係数 r_s 、 r_p を求めることができるので、エリプソメトリ法で測定することが可能な s 偏光と p 偏光との位相差 Δ 及び s 偏光と p 偏光との振幅反射係数比 $\tan \Psi$ とを用いて、(式 2) に示すように複素平面における複素反射係数 r_s 、 r_p の比 ρ を定義することができる。

[0073] [数1]

$$\rho \equiv \frac{r_p}{r_s} \equiv \tan \Psi \cdot \exp(i\Delta) \quad \dots (式2)$$

[0074] (式2)において、s偏光の位相 δ_s 、p偏光の位相 δ_p 及び振幅反射係数の絶対値 $|r_s|$ 、 $|r_p|$ を用いると、複素反射係数 r_s 、 r_p は(式3)のように表すことができ、s偏光とp偏光との位相差 Δ 及びs偏光とp偏光との振幅反射係数比 $\tan \Psi$ は(式4)のように表すことができる。

[0075] [数2]

$$\begin{aligned} r_s &= |r_s| \cdot \exp(i\delta_s) \\ r_p &= |r_p| \cdot \exp(i\delta_p) \end{aligned} \quad \dots (式3)$$

$$\begin{aligned} \tan \Psi &= |r_p| / |r_s| \\ \Delta &= \delta_p - \delta_s \end{aligned} \quad \dots (式4)$$

[0076] ここで、複素平面における複素反射係数 r_s 、 r_p の比 ρ について、空気と試料6との界面における反射のみを考慮して、いわゆるフレネルの方程式を適用すると、試料6の複素誘電率 ε_{cn} は(式5)で表すことができ、実測値であるs偏光とp偏光との位相差 Δ 及びs偏光とp偏光との振幅反射係数比 $\tan \Psi$ から(式2)にて算出した、複素平面における複素反射係数 r_s 、 r_p の比 ρ に基づいて、試料6の複素誘電率 $\varepsilon_{cn} (= \varepsilon' - i\varepsilon'')$ を算出することができる。

[0077] [数3]

$$\varepsilon_{cn} = \sin^2 \theta_i \left[1 + \tan^2 \theta_i \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \right] \quad \dots (式5)$$

[0078] 図7は、本実施の形態2に係る光測定装置で、試料6として抵抗率が $1.1 \sim 1.4 \Omega \cdot \text{cm}$ であるp型Si基板の振幅反射係数比 $\tan \Psi$ を測定した結果を示すグラフであり、図8は、本実施の形態2に係る光測定装置で、

試料 6 として抵抗率が $1.1 \sim 1.4 \Omega \cdot \text{cm}$ である p 型 Si 基板の位相差 Δ を測定した結果を示すグラフである。Si の複素誘電率 ϵ_{cn} を $(12 - i \cdot 0.5)$ とした場合、ブリュースター角は略 73 度となるので、図 7 及び図 8 の測定時には、テラヘルツ光 4 の試料 6 への入射角が 70 度となるようにミラー群 10a、10b の位置及び回転角度を調整した。

[0079] なお、テラヘルツ光 4 の試料 6 への入射角を、試料 6 のブリュースター角近傍に調整するのは、ブリュースター角近傍では試料 6 の s 偏光及び p 偏光の複素反射係数 r_s 、 r_p の比 ρ が最大となるので、(式 5) に基づいて高い精度で試料 6 の複素誘電率 ϵ_{cn} を求めることができるからである。

[0080] また、本実施の形態 2 では、実施の形態 1 と同様、試料 6 への入射角をミラー群 10a、10b の位置及び回転角度を変更することにより調整することができるので、テラヘルツ光源素子 4 及び光検出器 8 を固定しておくことができ、入射角を変更する場合等に光軸合わせ等の煩雑な調整作業が不要となる。したがって、試料 6 を頻繁に交換する場合であっても、測定者に煩雑な作業が発生することがなく、測定結果を比較的短時間で取得することが可能となる。

[0081] 図 7 及び図 8 から明らかなように、本実施の形態 2 に係る光測定装置を用いることにより、テラヘルツ帯の周波数に応じて、p 型 Si 基板の振幅反射係数比 $\tan \Psi$ 及び位相差 Δ が変化する様子が、明確に測定されていることがわかる。

[0082] 図 9 は、本実施の形態 2 に係る光測定装置で測定した p 型 Si 基板の振幅反射係数比 $\tan \Psi$ 及び位相差 Δ に基づいて、複素誘電率 ϵ_{cn} を算出した結果と後述する理論計算の結果とを比較したグラフである。図 9 では、複素誘電率 ϵ_{cn} を $\epsilon_{\text{cn}} = \epsilon' - i \epsilon''$ として表した場合の実部 ϵ' と虚部 ϵ'' とを周波数の関数として算出している。

[0083] 図 9 において、■印で示す、(式 5) に基づいて算出した結果の実部 91 は、後述するドルーデモデルに基づき理論計算した結果の実部 92 (実線) と略一致している。また、○印で示す、(式 5) に基づいて算出した結果の

虚部 9 3 は、同じく後述するドルーデモデルに基づき理論計算した結果の虚部 9 4（実線）と略一致しており、低周波領域で虚部 ε'' の値が増大する傾向が精度良く測定できていることが明らかである。

[0084] また、S i のようにテラヘルツ周波数領域においてフォノン散乱による吸収を無視することができる試料である場合、フリーキャリア散乱が加わったときの誘電関数は、ドルーデ（D r u d e）モデルにより（式 6）のように表すことができる。なお、 ω は周波数を示している。

[0085] [数 4]

$$\varepsilon_{cn}(\omega) = \varepsilon(\infty) + i \frac{\sigma_{cn}(\omega)}{\omega \varepsilon_0} \quad \dots (式 6)$$

[0086] ここで $\sigma_{cn}(\omega)$ は複素電気伝導率を示しており、実部 $\sigma'(\omega)$ と虚部 $\sigma''(\omega)$ の和で表すことができる。（式 5）で求めた複素誘電率 $\varepsilon_{cn} (= \varepsilon' - i \varepsilon'')$ を用いて実部 $\sigma'(\omega)$ 及び虚部 $\sigma''(\omega)$ をそれぞれ複素誘電率で表すと、（式 7）のようになる。なお、（式 7）において、真空での複素誘電率を ε_0 、高周波極限での複素誘電率を $\varepsilon(\infty)$ とする。

[0087] [数 5]

$$\begin{aligned} \sigma'(\omega) &= \varepsilon_0 \omega \cdot \varepsilon''(\omega) \\ \sigma''(\omega) &= \varepsilon_0 \omega [\varepsilon(\infty) - \varepsilon'(\omega)] \end{aligned} \quad \dots (式 7)$$

[0088] 抵抗率 P は複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ の実部 $\sigma'(\omega)$ の逆数として求めることができる。図 1 0 は、本発明の実施の形態 2 に係る光測定装置にて複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ を算出した例を示すグラフである。試料 6 として、上述した p 型 S i 基板を用いている。

[0089] 図 1 0 において、◆印は複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ の実部 $\sigma'(\omega)$ を、●印は複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ の虚部 $\sigma''(\omega)$ を、それぞれ示しており、テラヘルツ帯の周波数に応じてプロットしている。図 1 0 に示すように、高周波になるほど電場変化の速度に対してキャリアが追従しきれなくなることか

ら、複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ が低下していることがわかる。一方、複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ の実部 $\sigma'(\omega)$ の逆数として算出した抵抗率 P は、低周波側 (ω が 0 の近傍) にて $1.0 \sim 1.1 \Omega \cdot \text{cm}$ となり、用いた p 型 Si 基板の抵抗率 P と略一致している。

[0090] また、(式 5) で算出した複素誘電率 ε_{cn} に基づいて、キャリア濃度 N 、キャリアの散乱時間 τ 、移動度 μ を算出することもできる。複素誘電率 $\varepsilon_{cn} (= \varepsilon' - i\varepsilon'')$ にドルーデ (Drude) の式を適用して、プラズマ周波数 ω_p 、キャリアの散乱時間 τ を用いて複素誘電率 ε_{cn} を (式 8) のように表すことができる。なお、(式 8) においても、真空での複素誘電率を ε_0 、高周波極限での複素誘電率を $\varepsilon(\infty)$ とする。

[0091] [数 6]

$$\varepsilon_{cn} = \varepsilon(\infty) \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\tau^{-1})} \right] \quad \dots (式 8)$$

[0092] プラズマ周波数 ω_p は、キャリア濃度を N 、有効質量を m^* 、電子の電荷量を e とした場合、(式 9) で表すことができる。

[0093] [数 7]

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N}{\varepsilon_0 \varepsilon(\infty) m^*}} \quad \dots (式 9)$$

[0094] 一方、ドルーデ・ロレンツの方程式により、プラズマ周波数 ω_p 、キャリアの散乱時間 τ 、複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ は、(式 10) の関係にある。

[0095] [数 8]

$$\sigma_{cn}(\omega) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon(\infty) \omega_p^2 \tau}{1 - i\omega\tau} \quad \dots (式 10)$$

[0096] 周波数 ω が限りなく0に近づく、すなわち直流では、複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ の実部 $\sigma'(\omega)$ は(式10)の分母が1になることから(式11)のように表すことができる。

[0097] [数9]

$$\sigma'(0) = \varepsilon_0 \varepsilon(\infty) \cdot \omega_p^2 \cdot \tau \quad \dots (式11)$$

[0098] 抵抗率Pは、複素電気伝導率 $\sigma_{cn}(\omega)$ の実部 $\sigma'(\omega)$ の逆数であるから、(式11)に $\sigma'(0) = 1/P$ を代入してキャリアの散乱時間 τ を算出すると、(式12)のようになる。

[0099] [数10]

$$\tau = 1/(\varepsilon_0 \varepsilon(\infty) \cdot \omega_p^2 \cdot P) \quad \dots (式12)$$

[0100] このように求めた(式12)を(式8)に代入して、複素誘電率 ε_{cn} をプラズマ周波数 ω_p の関数として表すと(式13)のようになる。

[0101] [数11]

$$\therefore \varepsilon_{cn}(\omega) = \varepsilon(\infty) \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\varepsilon_0 \varepsilon(\infty) \cdot \omega_p^2 \cdot P)} \right] \quad \dots (式13)$$

[0102] (式13)で算出した複素誘電率 ε_{cn} と、測定して求めた複素誘電率 ε_{cn} とが一致する場合のプラズマ周波数 ω_p の値をフィッティング処理等を用いて求めることにより、キャリア濃度N、キャリアの散乱時間 τ を求めることが可能となる。例えば図9における複素誘電率 ε_{cn} の実部92及び虚部94(実線)は、上述した方法を用いてフィッティング処理して導出した実部 ε' 及び虚部 ε'' を示している。図9のフィッティング結果を用いた場合、キャリア濃度Nは $1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ と、キャリアの散乱時間 τ は $1 \times 10^{-13} \text{ sec}$ として算出される。

[0103] また、キャリアの散乱時間 τ に基づいて移動度 μ は、（式 14）から算出することができる。

[0104] [数12]

$$\mu = e\tau / m^* \quad \dots (式 14)$$

[0105] 本実施の形態 2 で用いた p 型 Si 基板では、移動度 μ は $436 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s} \text{ e}^{-1}$ という値を得ることができた。上述した p 型 Si 基板の物性値は、ホール測定等による従来の半導体物性値の測定法で求められる一般的な値と概ね整合していることを確認した。

[0106] 以上のように本実施の形態 2 によれば、二対のミラー群 10a、10b の位置及び角度を変更することにより、テラヘルツ光源素子 4 から発したパルス光の試料 6 への入射角を変更することができるので、反射光検出時の入射角を自在に調整することができる。したがって、試料 6 に応じてテラヘルツ光源素子 4 及び光検出器 8 の相対位置を変更する必要がなく、一の光検出器 8 で反射光を検出することができ、試料 6 への入射角を変更する都度、光軸合わせ等の煩雑な調整作業を実行する必要がない。

[0107] また、試料 6 の s 偏光及び p 偏光の振幅反射係数比 $\tan \Psi$ 及び位相差 Δ に基づいて物性値を算出する、いわゆるエリプソメトリ法を用いることにより、リファレンス測定を測定の都度実行する必要がなく、測定精度を高く維持することが可能となる。特に、試料 6 のブリュースター角近傍に入射角を調整することにより、試料 6 の s 偏光及び p 偏光の振幅反射係数比が最大となる入射角で測定することができ、高い精度で物性値の測定を行うことが可能となる。

[0108] さらに、試料 6 に入射される、テラヘルツ光源素子 4 から発したパルス光は、s 偏光及び p 偏光の光強度が同等である 45 度直線偏光であり、試料で反射した反射光の s 偏光及び p 偏光の振幅反射係数比 $\tan \Psi$ 及び位相差 Δ は、偏光子の角度を 0 度又は 90 度に設定した場合に検出される信号に基づいて取得する。これにより、試料 6 の複素誘電率によって変化するわずかな

偏光変化を検出することができ、高い精度で測定することが可能となる。また、測定中は偏光子の回転角が設定角度で固定されていることから、偏光子を連続的に回転させる従来の測定方法と比較して機械的誤差の低減を図ることも可能となる。

[0109] なお、上述した実施の形態 1 及び 2 は、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で変更することができることは言うまでもない。例えばミラー群 10 a、10 b の構成は試料 6 を挟んで対称な位置に配置されていること、少なくとも一の曲面鏡を備えていること、筐体に収容できること等の条件を具備すれば、特に限定されるものではない。

符号の説明

- [0110]
- 1 パルスレーザ
 - 2 ビームスプリッタ
 - 3 a 集光レンズ
 - 4 テラヘルツ光源素子（テラヘルツ光源）
 - 6 試料
 - 5、7 非軸放物面鏡
 - 8 光検出器
 - 9 光学遅延ライン
 - 10 a、10 b ミラー群
 - 11 a、11 b 平面鏡
 - 12 a、12 b 非軸放物面鏡（曲面鏡）
 - 13 a、13 b、13 c、13 d、13 e 回転ステージ
 - 14 a、14 b 支持アーム

請求の範囲

- [請求項1] テラヘルツ周波数領域のパルス光を発するテラヘルツ光源と、
 該パルス光を検出する光検出器と、
 前記テラヘルツ光源から発したパルス光を測定対象である試料へ誘導し、該試料を透過した透過光又は前記試料で反射した反射光を前記光検出器へ誘導する、少なくとも二以上のミラーで構成された、前記試料を挟んで対称な位置に配置してある二対のミラー群と、
 二対の該ミラー群の位置及び角度を変更することにより、前記テラヘルツ光源から発したパルス光の前記試料への入射角を変更するよう動作を制御する制御機構と
 を備えることを特徴とする光測定装置。
- [請求項2] 前記制御機構は、前記試料の中央部分を回転中心とした支持アームにより二対の前記ミラー群の位置及び角度を変更するようにしてあることを特徴とする請求項1記載の光測定装置。
- [請求項3] 前記制御機構は、二対の前記ミラー群の位置及び角度を変更することにより、前記光検出器が、透過光を検出するか、反射光を検出するかを切り替えるようにしてあることを特徴とする請求項1又は2記載の光測定装置。
- [請求項4] 前記ミラー群は曲面鏡を少なくとも一含み、前記試料近傍にて前記テラヘルツ光源から発したパルス光をコリメートするようにしてあることを特徴とする請求項1乃至3のいずれか一項に記載の光測定装置。
- [請求項5] 前記テラヘルツ光源から発したパルス光が伝播する光路上に偏光子を備えることを特徴とする請求項3又は4記載の光測定装置。
- [請求項6] 前記制御機構により前記反射光を検出するよう切り替えた場合、前記試料の s 偏光及び p 偏光の振幅反射係数比及び位相差に基づいて物性値を算出することを特徴とする請求項5記載の光測定装置。
- [請求項7] 前記制御機構は、前記テラヘルツ光源から発したパルス光の前記試

料への入射角が、前記試料のブリュースター角と略一致するよう動作を制御することを特徴とする請求項 6 記載の光測定装置。

[請求項 8] 前記試料に入射される、前記テラヘルツ光源から発したパルス光は、
s 偏光及び p 偏光の光強度が同等である 45 度直線偏光であり、
前記試料で反射した反射光の s 偏光及び p 偏光の振幅反射係数比及び位相差を、前記偏光子の角度を 0 度又は 90 度に設定した場合に検出される信号に基づいて取得するようにしてあることを特徴とする請求項 6 又は 7 記載の光測定装置。

[請求項 9] 前記テラヘルツ光源は、光整流法を用いてテラヘルツ周波数領域のパルス光を発生する光導電性アンテナを備え、
該光導電性アンテナは、発生するパルス光の偏光が 45 度傾斜するように配置されていることを特徴とする請求項 6 乃至 8 のいずれか一項に記載の光測定装置。

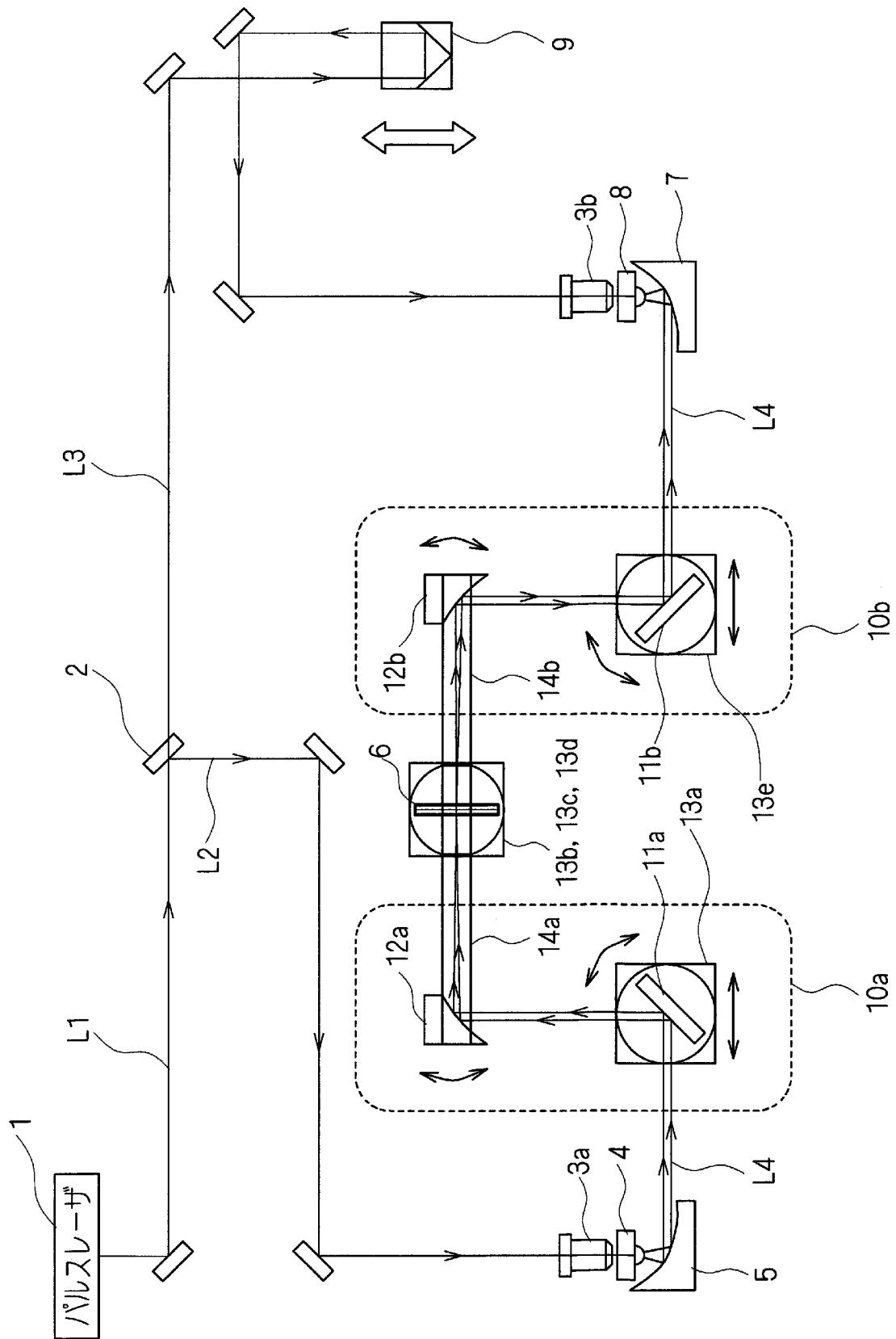
[請求項 10] テラヘルツ周波数領域のパルス光を発するテラヘルツ光源と、
該パルス光を検出する光検出器と、
前記テラヘルツ光源から発したパルス光を測定対象である試料へ誘導し、該試料を透過した透過光又は前記試料で反射した反射光を前記光検出器へ誘導する、少なくとも二以上のミラーで構成された、前記試料を挟んで対称な位置に配置してある二対のミラー群と
を備え、
二対の該ミラー群の位置及び角度を変更することにより、前記テラヘルツ光源から発したパルス光の前記試料への入射角を変更するよう動作を制御することを特徴とする光測定方法。

[請求項 11] 前記試料の中央部分を回転中心とした支持アームにより二対の前記ミラー群の位置及び角度を変更することを特徴とする請求項 10 記載の光測定方法。

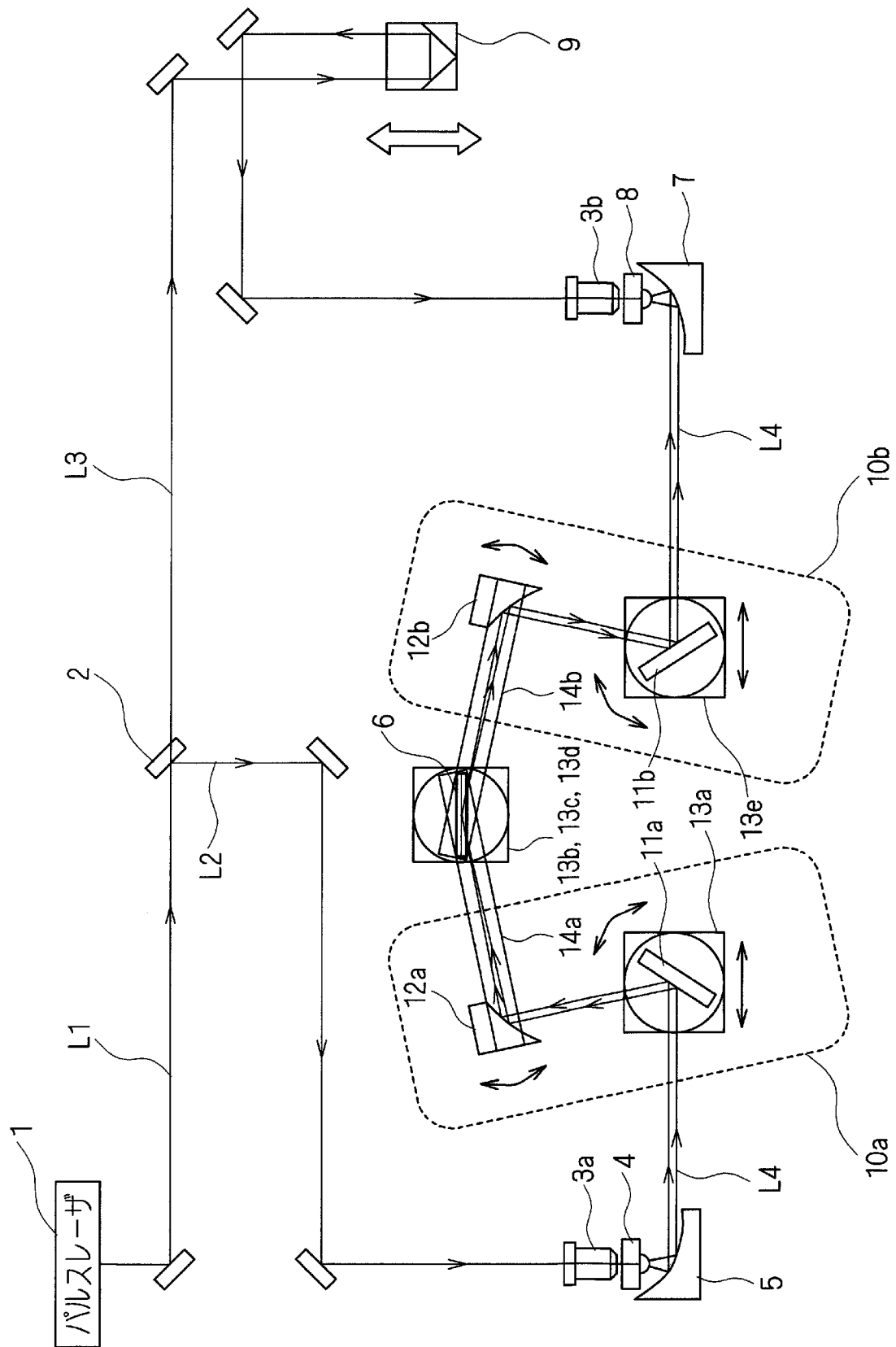
[請求項 12] 二対の前記ミラー群の位置及び角度を変更することにより、前記光検出器が、透過光を検出するか、反射光を検出するかを切り替えるこ

とを特徴とする請求項 10 又は 11 記載の光測定方法。

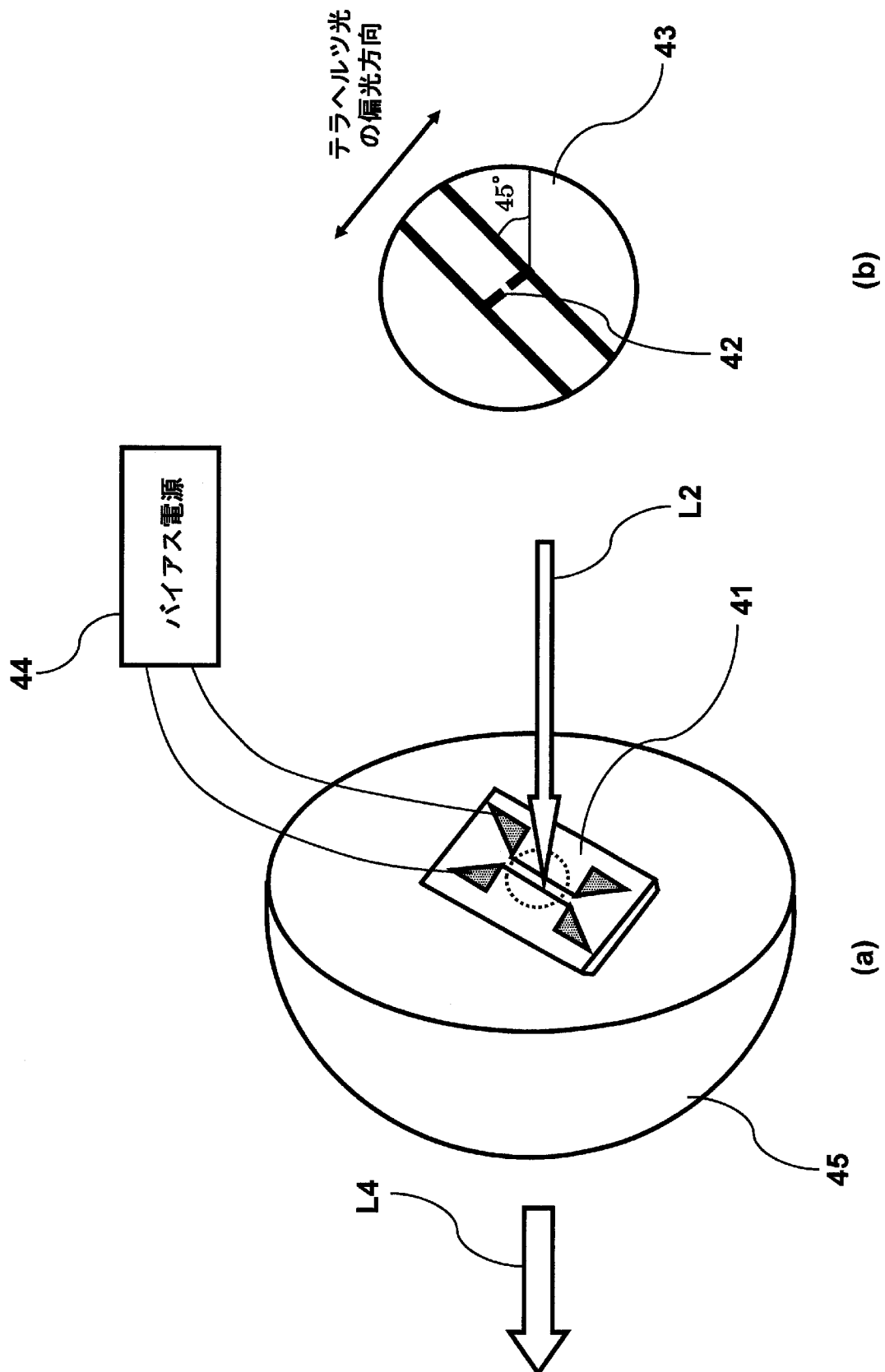
[図1]



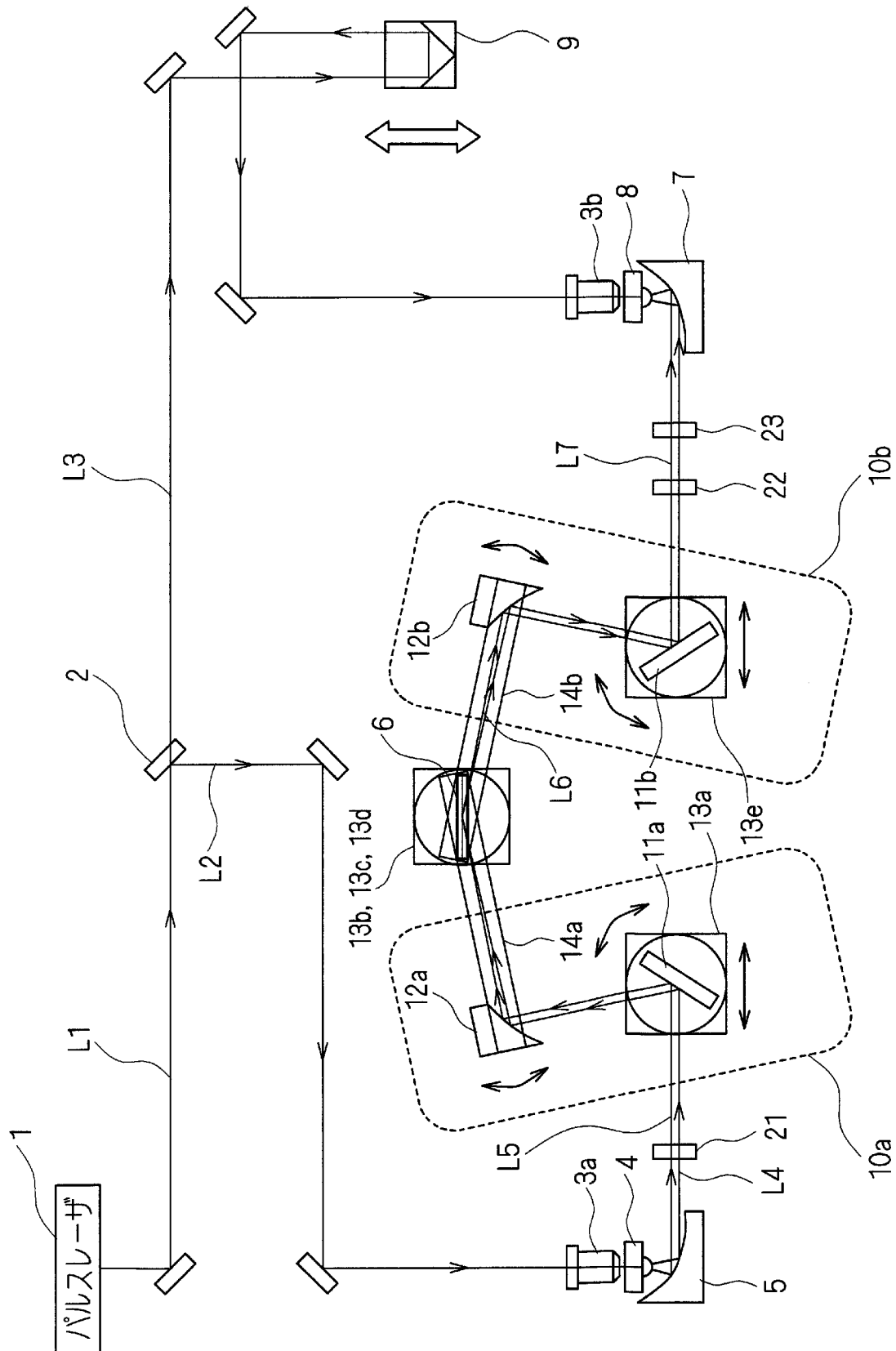
[図2]



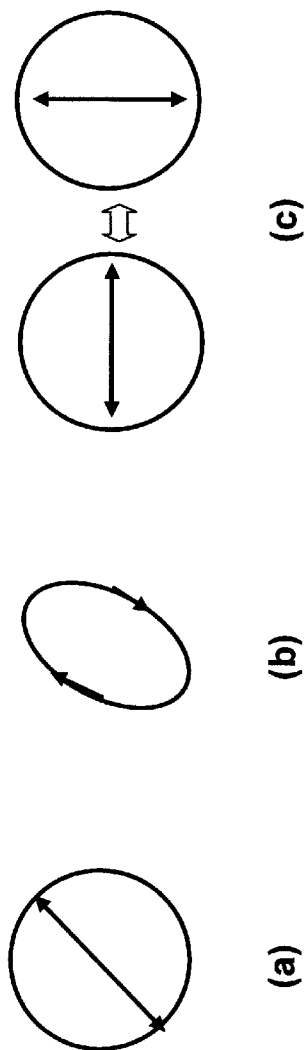
[図3]



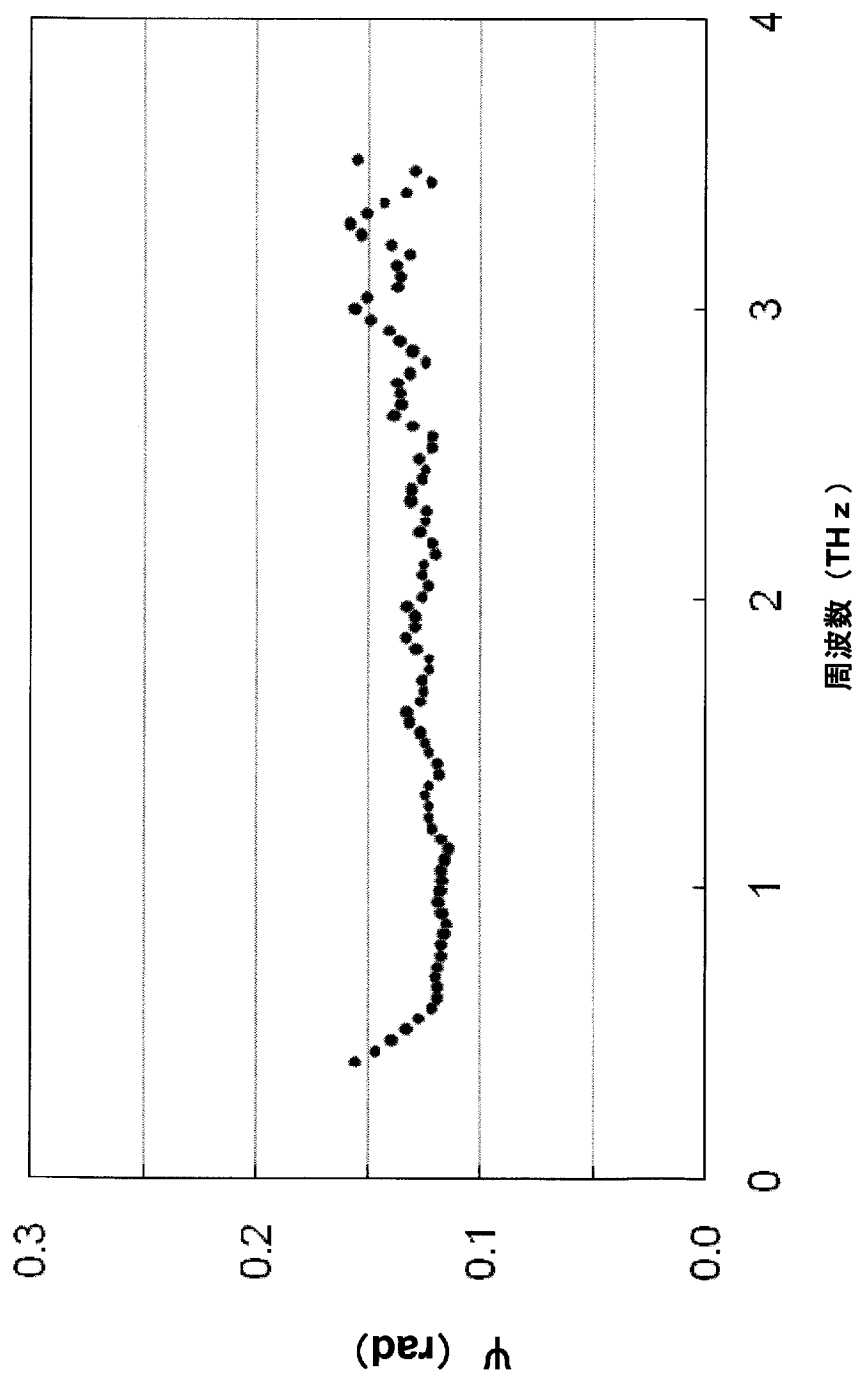
[図5]



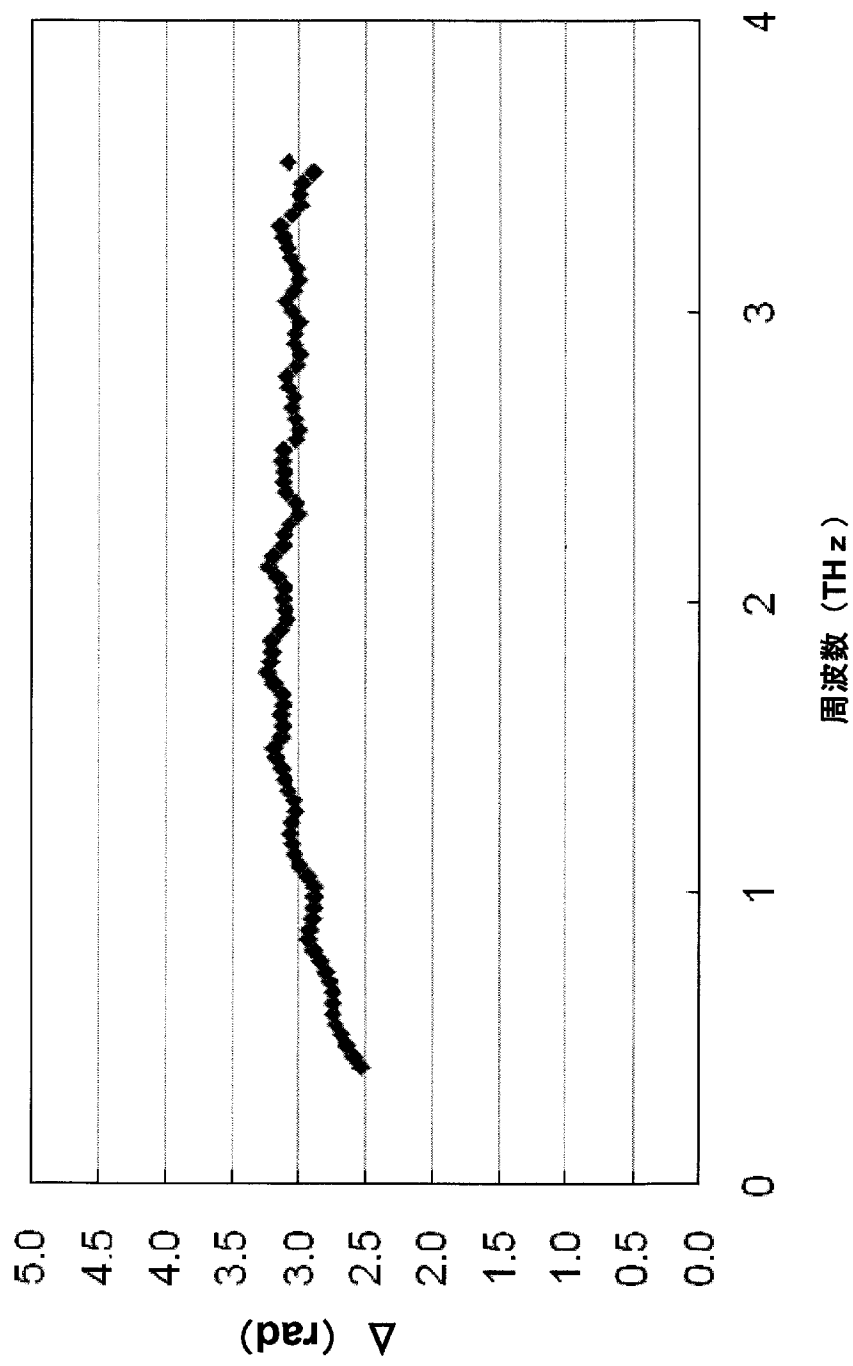
[図6]



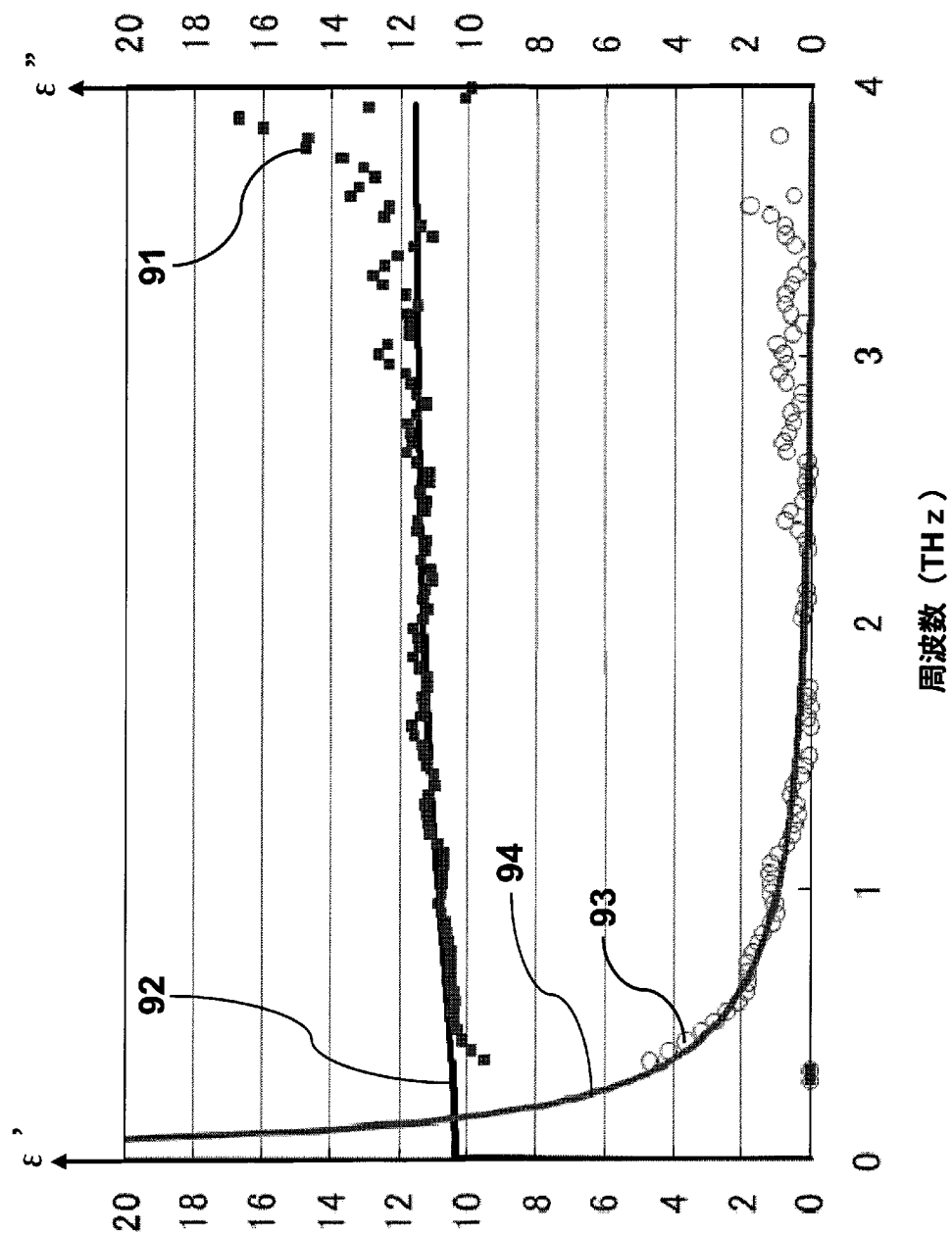
[図7]



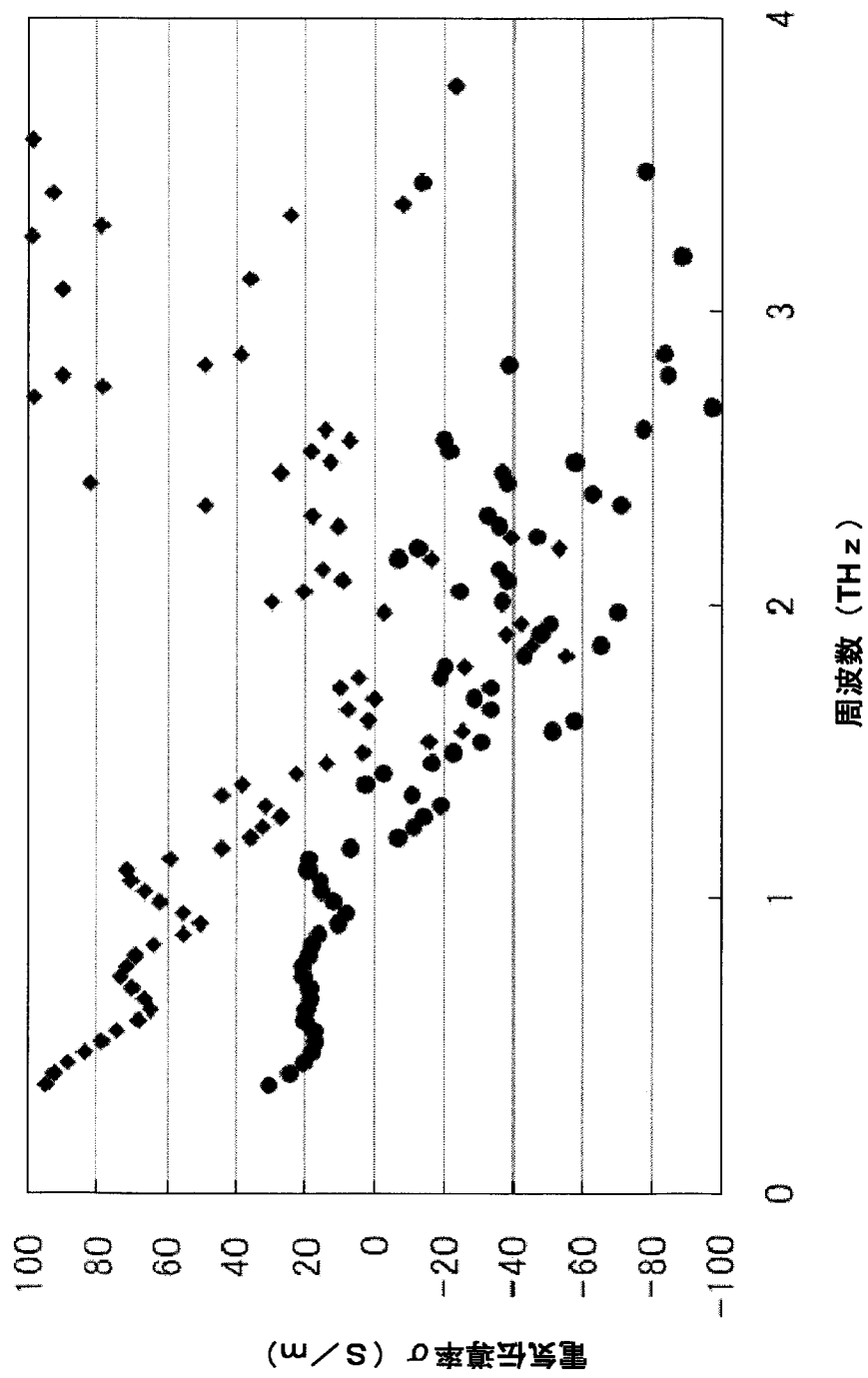
[図8]



[図9]



[図10]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/005142

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N21/35 (2006.01) i, G01N21/21 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N21/00-21/61, G01J4/04

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2009

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2009 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2009

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Takeshi NAGASHIMA, Masanori HANGYO, "Terahertz Ellipsometry ni Okeru Sokutei Seido no Nyushakaku Izonsei", 2002 Nen Shunki Dai 49 Kai Extended Abstracts, Japan Society of Applied Physics and Related Societies, 27 March 2002 (27.03.2002), Dai 49 Kai, separate vol. 3, page 1099, 29a-P8-16	1-12
Y	JP 62-220834 A (Toshiba Corp.), 29 September 1987 (29.09.1987), page 2, lower right column, line 4 to page 3, upper left column, line 18; fig. 1, 2 (Family: none)	1-12



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

21 December, 2009 (21.12.09)

Date of mailing of the international search report

12 January, 2010 (12.01.10)

Name and mailing address of the ISA/

Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/005142

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 63-215923 A (Copal Co., Ltd.), 08 September 1988 (08.09.1988), page 2, lower right column, line 15 to page 4, upper left column, line 9; fig. 1 (Family: none)	1-12
Y	JP 2003-014620 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 15 January 2003 (15.01.2003), paragraphs [0023] to [0031]; fig. 1 & US 2003/0016358 A1 & EP 1271115 A3 & EP 1271115 A2 & DE 60220213 D & DE 60220213 T & TW 557359 B	1-12
Y	JP 8-015130 A (JEOL Ltd.), 19 January 1996 (19.01.1996), paragraphs [0045] to [0047]; fig. 3 (Family: none)	4-9
A	JP 2008-151618 A (Canon Inc.), 03 July 2008 (03.07.2008), paragraphs [0044] to [0046]; fig. 4 & EP 2069760 A & WO 2008/075696 A1	1-12
A	JP 2004-279352 A (Tochigi Nikon Corp.), 07 October 2004 (07.10.2004), entire text; all drawings (Family: none)	1-12

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01N21/35(2006.01)i, G01N21/21(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01N21/00-21/61, G01J4/04

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 0 9 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 0 9 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 0 9 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	長島健、萩行正憲、テラヘルツ・エリプソメトリーにおける測定精度の入射角依存性、2002年春季第49回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、2002.03.27、第49回、第3分冊、第1099頁、29a-P8-16	1-12
Y	JP 62-220834 A（株式会社東芝）1987.09.29、第2頁右下欄第4行ー第3頁左上欄第18行、第1図、第2図（ファミリーなし）	1-12

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 1 . 1 2 . 2 0 0 9

国際調査報告の発送日

1 2 . 0 1 . 2 0 1 0

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

横尾 雅一

2W

3716

電話番号 03-3581-1101 内線 3292

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 63-215923 A (株式会社コパル) 1988.09.08, 第2頁右下欄第15行ー第4頁左上欄第9行、第1図 (ファミリーなし)	1-12
Y	JP 2003-014620 A (松下電器産業株式会社) 2003.01.15, 段落0023ー段落0031、図1 & US 2003/0016358 A1 & EP 1271115 A3 & EP 1271115 A2 & DE 60220213 D & DE 60220213 T & TW 557359 B	1-12
Y	JP 8-015130 A (日本電子株式会社) 1996.01.19, 段落0045ー段落0047、図3 (ファミリーなし)	4-9
A	JP 2008-151618 A (キヤノン株式会社) 2008.07.03, 段落0044ー段落0046、図4 & EP 2069760 A & WO 2008/075696 A1	1-12
A	JP 2004-279352 A (株式会社栃木ニコン) 2004.10.07, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-12