

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5438327号
(P5438327)

(45) 発行日 平成26年3月12日(2014.3.12)

(24) 登録日 平成25年12月20日(2013.12.20)

(51) Int.Cl.

F I

G O 1 N 21/3586 (2014.01)

G O 1 N 21/35 1 O 6

請求項の数 6 (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2009-12454 (P2009-12454)
 (22) 出願日 平成21年1月23日(2009.1.23)
 (65) 公開番号 特開2010-169541 (P2010-169541A)
 (43) 公開日 平成22年8月5日(2010.8.5)
 審査請求日 平成24年1月12日(2012.1.12)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (74) 代理人 100086483
 弁理士 加藤 一男
 (72) 発明者 井辻 健明
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ヤノン株式会社内

審査官 横尾 雅一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 テラヘルツ波を用いる測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

時間領域分光法によってテラヘルツ波パルスの時間波形を取得する測定装置であって、
 周波数 f_s の信号成分を含むテラヘルツ波パルスを検出する検出部と、
 時定数 τ を有し、前記検出部からの信号から周波数 f_s の信号成分を検出する微小信号検出
 部と、
 前記微小信号検出部の出力段に接続される積分部と、
取り込み間隔 t で前記積分部からデータを取り込みテラヘルツ波パルスの時間波形を構
築する処理部と、を有し、
時定数 τ は取り込み間隔 t 以下で、
 前記積分部の時定数は、時定数 τ 以下で、かつ $1/(2f_s)$ より大きい特性である、
 ことを特徴とする測定装置。

【請求項 2】

前記積分部の出力段に接続され、前記時間波形を構成するデータ毎に加算平均を行う加算
 平均回路を更に備えることを特徴とする請求項 1 に記載の測定装置。

【請求項 3】

前記積分部は、部分的に積分領域を有する周波数特性を持つ構成、或いは全体的に積分領
 域を有する周波数特性を持つ構成を有することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の測定
 装置。

【請求項 4】

時間領域分光法によってテラヘルツ波パルスの時間波形を取得する測定方法であって、周波数 f_s の信号成分を含むテラヘルツ波パルスを検出する検出ステップと、時定数 τ を有し、前記検出ステップで検出される信号から周波数 f_s の信号成分を検出する微小信号検出ステップと、前記微小信号検出ステップで検出される信号を積算する積分ステップと、取り込み間隔 t で、前記積分ステップにおいて生成されたデータを取り込みテラヘルツ波パルスの時間波形を構築する処理ステップと、を有し、時定数 τ は取り込み間隔 t 以下で、前記積分ステップの時定数は、時定数 τ 以下で、かつ $1/(2f_s)$ より大きい特性である、ことを特徴とする測定方法。

10

【請求項 5】

前記時間波形を構成するデータ毎に加算平均を行うデータの加算平均ステップを更に備えることを特徴とする請求項 4 に記載の測定方法。

【請求項 6】

前記時間波形を複数取得し、これらの波形の加算平均を行う波形の加算平均ステップを更に備えることを特徴とする請求項 4 に記載の測定方法。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、時間領域でのテラヘルツ波を測定する装置（THz-TDS装置、THz-Time Domain Spectroscopy 装置）の測定システムの技術に関する。

20

【背景技術】**【0002】**

テラヘルツ波は、0.03 THzから30 THzのうち、任意の周波数帯域を有する電磁波である。このような周波数帯域には、生体分子をはじめとして、様々な物質の構造や状態に由来する特徴的な吸収が多く存在する。このような特徴を活かして、非破壊にて物質の分析や同定を行う検査技術が開発されている。また、X線に替わる安全なイメージング技術や、高速な通信技術への応用が期待されている。

【0003】

THz-TDS装置は、超短パルスによって、検出器に到達するテラヘルツ波の瞬間的な電界強度を取得する。そして、この超短パルスが検出器に到達するタイミングを変化させることによって生ずる瞬間的な電界強度の変化を記録し、本装置は、テラヘルツ波の時間波形を取得する。つまり、本装置では、超短パルスによって、検出器に到達するテラヘルツ波をサンプリング計測している。上述した特徴的な吸収を測定する場合は、この時間波形を周波数領域の情報に変換し、周波数スペクトルを取得する。

30

【0004】

多くの場合、この電界強度に相当する信号強度は微弱であるため、ロックインアンプに代表される微小信号測定器（本発明では微小信号検出部とも呼ぶ）によって信号を取得する。THz-TDS装置で、ロックインアンプによる信号検出を行う場合、テラヘルツ波は周波数 f_s で変調され、ロックインアンプはこの周波数 f_s の成分を検出する。この検出された信号をテラヘルツ波の瞬間的な電界強度としている。この時、ロックインアンプは、変調された電界強度の信号に対し、変調周波数 f_s と同じ周波数を有する参照信号によって乗算する。そして、ロックインアンプは、派生した和（ $2f_s$ ）と差（直流成分）の周波数成分のうち、差の周波数成分をフィルタで取り出す。

40

【0005】

このような微小信号測定器によって測定される信号には、上述した電界強度に関する信号について、超短パルスの強度変動の影響や、測定システムが発する信号（熱雑音やシステム固有のノイズなど）が重畳されている。この結果、テラヘルツ波の時間波形を構築する際、図9のように、取得したい信号に対して各測定データがばらついてしまうことがある。このような信号ばらつきは、例えば、テラヘルツ波の時間波形を周波数領域の情報に変

50

換する際、ノイズフロアを上昇させる一因となる。このノイズフロアの上昇は、測定帯域を制限するため、不要な信号成分の抑制が求められている。

【0006】

この対策の一つとして、複数のテラヘルツ波の時間波形に対して加算平均処理を行う手法がある。例えば、上記超短パルスが検出器に到達するタイミングを細かくし、1回の時間波形から複数の時間波形を構築し、これを加算平均処理する手法が提案されている（特許文献1）。

【特許文献1】特開2006-266908号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0007】

上述したように、複数のテラヘルツ波の時間波形を加算平均する手法は、テラヘルツ波の測定回数分だけ測定時間が長くなる。上記特許文献1はこれを改善するための一手法を開示している。

【0008】

上記特許文献1は、超短パルスが検出器に到達するタイミングを機械ステージによって制御している。具体的には、機械ステージ上に折り返し光学系を配置し、超短パルスが伝搬する光路長を調整している（遅延光学系とも呼ばれる）。テラヘルツ波の時間波形を構成する測定点間の間隔は、周波数領域の最高周波数に相当する。例えば、数10THzの領域のスペクトルを得たい場合、機械ステージは数 μm の精度で制御する。そして、テラヘルツ波の時間波形を取得する際、この位置決め精度で、機械ステージを数mmの範囲で動かして測定を行う。テラヘルツ波の測定時間は、主に、この遅延光学系を動かす速度に依存する。

20

【0009】

特許文献1は、この測定点間の間隔を更に短くした状態で機械ステージを動かすものである。しかし、機械ステージは、より細かい位置決め精度を要求されるので、テラヘルツ波の時間波形を高速に取得するために、この細かい位置決め精度を維持しながら機械ステージを高速に長距離動かすことは容易ではない。

【0010】

また、ロックインアンプは、この機械ステージを高速に動かしたことに伴う信号変化に対応できるだけの時定数を有する必要がある。具体的には、時定数は小さくする方向に調整する。ところが、変調周波数 f_s と機械ステージの速度によっては、時定数を小さくすることによって、時定数が和（ $2f_s$ ）の周波数成分に近づくことがある。その結果、この周波数成分付近の信号を十分減衰することができずに周波数領域のノイズフロアが上がってしまうことが懸念される。例えば、図6(b)において、微小信号検出部の周波数特性は上述した時定数に依るが、この周波数特性が $2f_s$ の成分に近づくとき、この成分を十分減衰させることは難しくなる。この結果、例えば図5(b)のように、微小信号検出部から出力される信号は、ばらつきが大きくなり、ノイズフロアが上がることによって周波数スペクトルの測定帯域を制限する。これは、元来、直流成分を取得する用途のロックインアンプを用いてテラヘルツ波の時間波形を高速に取得する際、周波数スペクトルを取得するため、高速測定と共に信号の安定性の両立が求められるという、テラヘルツ波測定における特有の課題ともいえる。

30

40

【0011】

このように、テラヘルツ波の測定においては、ノイズフロアを下げつつ測定時間を短縮することが潜在的に求められている。

【課題を解決するための手段】

【0012】

上記課題に鑑み、本発明の測定装置は、時間領域分光法によってテラヘルツ波パルスの時間波形を取得する測定装置であって、検出部と、微小信号検出部と、積分部と、処理部を有する。前記検出部は、周波数 f_s の信号成分を含むテラヘルツ波パルスを検出する。微小

50

信号検出部は、時定数 τ を有し、前記検出部からの信号から周波数 f_s の信号成分を検出する。前記積分部は、前記微小信号検出部の出力段に接続され、その時定数は、時定数 τ 以下で、かつ $1/(2f_s)$ より大きい特性である。処理部は、取り込み間隔 t で積分部からデータを取り込みテラヘルツ波パルスの時間波形を構築する。時定数 τ は取り込み間隔 t 以下である。

【0013】

また、本発明における測定方法は、時間領域分光法によってテラヘルツ波パルスの時間波形を取得する測定方法であって、検出ステップと、微小信号検出ステップと、積分ステップと、処理ステップとを有する。検出ステップは、周波数 f_s の信号成分を含むテラヘルツ波パルスを検出する。微小信号検出ステップは、時定数 τ を有し、前記検出ステップで検出される信号から周波数 f_s の信号成分を検出する。積分ステップは、前記微小信号検出ステップで検出される信号を積算し、その時定数は、時定数 τ 以下で、かつ $1/(2f_s)$ より大きい特性である。処理ステップは、取り込み間隔 t で、積分ステップにおいて生成されたデータを取り込みテラヘルツ波パルスの時間波形を構築する。時定数 τ は取り込み間隔 t 以下である。

【発明の効果】

【0014】

本発明のテラヘルツ波測定装置及び方法によれば、少なくとも微小信号検出部ないしステップが有する時定数 τ よりも小さな時定数を有する積分部ないしステップによって、時間波形の信号ばらつきに寄与していた成分の信号を減衰させる。また、微小信号検出部ないしステップが有する時定数 τ よりも小さな時定数を有する積分部ないしステップを用いることで、測定システム全体の時定数に与える影響を小さくする。このことから、測定時間を増やすことなくノイズフロアの低減ができ、測定帯域が広が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】

【0015】

本発明の実施の形態について説明する。

本発明の装置及び方法において重要なことは、次の点である。時定数 τ を有し、周波数 f_s の信号成分を検出する微小信号検出部ないしステップの出力段に接続される積分部ないしステップの時定数が、時定数 τ 以下で、かつ $1/(2f_s)$ より大きい特性であることである。このことより、時間波形の信号ばらつきに寄与していた成分の信号を減衰させると共に、測定システム全体の時定数に与える影響を小さくできる。更に、周波数成分 $2f_s$ 以降の周波数成分を減衰させることもできる。

【0016】

上記考え方に基づき、本発明の装置及び方法の基本的な実施形態は、次の様な構成を有する。時間領域分光法によってテラヘルツ波パルスの時間波形を取得する測定装置ないし方法において、時定数 τ を有し、周波数 f_s の信号成分を検出する微小信号検出部ないしステップの出力段に接続される積分部ないしステップを有する。そして、積分部ないしステップの時定数は、時定数 τ 以下で、かつ $1/(2f_s)$ より大きい。

【0017】

前記基本的な実施形態において、以下に述べる様なより具体的な実施形態が可能である。前記積分部ないしステップの出力段に接続され、前記時間波形を構成するデータ毎に加算平均を行う加算平均回路ないしステップを更に備えることができる（図4の構成例を参照）。この構成によれば、積分部ないしステップの出力について回路的に複数分岐させ、各分岐させた信号の加算平均を求める。この結果、ランダムに発生する熱的な雑音を抑制することができるので、ノイズフロアの低減ができるという効果を奏する。

【0018】

また、前記時間波形を複数取得し、これらの波形の加算平均を行う波形の加算平均ステップを更に備えることができる（ラピッドスキャンの適用）。これによれば、ノイズフロアを低減した状態で、テラヘルツ波の波形の加算平均を求めている。そのため、従来の測定方法に比べ、同程度のSN比を得るために必要な時間波形の測定回数を減らすことができ

、測定時間の高速化を容易にするという効果を奏する。

【0019】

以下、本発明の思想を実施し得る実施形態について、図面を参照して説明する。

図1は、本発明のテラヘルツ波測定装置及び方法の一実施形態に関する概略構成図である。図1によると、テラヘルツ波測定装置は、テラヘルツ波の瞬間的な電界強度を測定する測定部101、測定部101の出力よりテラヘルツ波パルスの時間波形を構築する部分に大別される。

【0020】

測定部101は、発生部108、検出部109、遅延光学部110を含む。そして、テラヘルツ波パルスの時間波形を構築する部分は、電流検出部102、微小信号検出部103、積分部104、処理部106によって構成される。

10

【0021】

測定部101の説明をする。発生部108は、テラヘルツ波パルスを発生する部分である。発生部108でのテラヘルツ波発生方法には、瞬時電流を利用する手法や、キャリアのバンド間遷移を利用する手法がある。瞬時電流を利用する手法としては、鏡面研磨した半導体や有機結晶の表面にレーザ光を照射してテラヘルツ波を発生する手法や、半導体薄膜上に金属電極でアンテナパターンを形成した光伝導素子に電界を印加して印加部にレーザ光を照射する方法が適用できる。また、PINダイオードが適用できる。利得構造を利用する手法としては、半導体量子井戸構造を用いる手法が適用できる。

20

【0022】

検出部109は、テラヘルツ波パルスの電界強度を検出する部分である。検出部109での検出方法には、光伝導による電界強度に対応した電流を検出する手法、電気光学効果を用いて電場を検出する手法、磁気光学効果を用いて磁場を検出する手法などがある。光伝導による電流を検出する手法としては、光伝導素子が適用できる。電気光学効果を用いて電場を検出する手法としては、直交偏光子と電気光学結晶を使った手法が適用できる。磁気光学効果を用いて磁場を検出する手法としては、直交偏光子と磁気光学結晶を使った手法が適用できる。

【0023】

発生部108と検出部109は、レーザ源107から出力される超短パルスレーザによってキャリアが励起されることで動作する。図1のように、超短パルスレーザは、ビームスプリッタ111によってL1とL2の二つの光路に分岐される。光路L1を通る超短パルスレーザは、遅延光学部110を介して発生部108に入力する。光路L2を通る超短パルスレーザは、検出部109に入力する。

30

【0024】

遅延光学部110は、テラヘルツ波の時間波形のうちの検出部109でサンプリングされる時間軸上の位置を調整する部分である。具体的には、発生部108に入力される超短パルスレーザに対し、検出部109に入力される超短パルスレーザのタイミングを遅延ないし変化させる。この遅延時間の調整方法には、光学長を直接調整する手法と実効的な光学長を調整する手法がある。直接調整する手法としては、図1に示したように、折り返し光学系と可動部を用いる方法がある。実効的な光学長を調整する手法としては、トリガ信号が伝搬する経路中の時定数ないし屈折率を変化させる方法がある。

40

【0025】

次に、テラヘルツ波パルスの時間波形を構築する部分の説明をする。

電流検出部102は、検出部109から出力される微小電流を、測定可能なレベルまで増幅する部分である。また、検出部109が微小電圧を出力する場合、電圧を増幅する部分に置き換えてもよい。

【0026】

微小信号検出部103は、ロックインアンプに代表されるように雑音に埋もれた信号から、所望の信号を検出する部分である。微小信号検出部103として、ロックインアンプを

50

適用する場合、変調部 105 より変調周波数 f_s を有する参照信号が入力される。この時、変調部 105 は、発生部 108 から発生するテラヘルツ波を変調周波数 f_s で変調する。そして、検出部 109 は、変調周波数 f_s の成分を含む信号を微小信号検出部 103 に入力させる。微小信号検出部 103 は、時定数 τ のローパスフィルタ (LPF) を備え、電流検出部 102 の信号と参照信号の差の周波数成分を出力する。

【0027】

処理部 106 は、遅延光学部 110 によって調整される遅延時間を調整する部分である。そして、処理部 106 はこの遅延光学部 110 の調整量と、その調整部分におけるテラヘルツ波の瞬間的な電界強度に相当する信号を参照し、テラヘルツ波の時間波形を構築する部分である。図 9 は、この時間波形の構築の様子を示した図である。発生部 108 と検出部 109 に入射される超短パルスレーザの遅延時間が、遅延光学部 110 によって処理部 106 で設定した値に達すると、処理部 106 は、テラヘルツ波の電界強度に相当する信号を記録する。図 9 では、この遅延時間を t としている。この動作を t 毎に行うことで、処理部 106 は時間波形を構築する。このテラヘルツ波の電界強度に相当する信号は、主として、微小信号検出部 103 から得られる。上述したように、微小信号検出部 103 は固有の時定数 τ を有している。 t の間隔で得られる測定データは、それぞれ孤立していることが望ましいので、時定数 τ は t 以下に調整する。

【0028】

テラヘルツ波領域のスペクトルを取得したい場合、処理部 106 は、この時間波形をフーリエ変換し、スペクトル情報を提供する。取り込まれる時間間隔を t とする場合、再現されるスペクトルの最高周波数は $1/(2t)$ で表現される。

【0029】

以上の構成は、THz-TDS 装置における典型的な構成である。本発明は、これらの構成に加え、微小信号検出部 103 と処理部 106 の間に積分部 104 を更に有することを特徴としている。

【0030】

積分部 104 は、微小信号検出部 103 から出力される信号を積分する部分である。積分部 104 は、周波数特性の少なくとも一部に、所定の減衰傾度を有している。積分部 104 は、この減衰傾度に含まれる周波数 (積分領域ともいう) の信号を積分する。このように、積分部 104 は所定の減衰傾度を有するため、積分部 104 にも時定数 τ が存在する。この積分部 104 の時定数によって、上述した THz-TDS 装置の動作に影響を与えることは好ましくないので、積分部 104 の時定数は τ 以下の値である。積分部 104 は、図 9 のように、微小信号検出部 103 の信号のばらつきを抑制する。そして、テラヘルツ波の時間波形を周波数領域の情報に変換する際、ノイズフロアの低減を行い、周波数スペクトルの測定帯域を広げる。

【0031】

このような積分部 104 として、部分的に積分領域を有する構成と、全体的に積分領域を有する構成がある。部分的に積分領域を有する構成として、ローパスフィルタを用いる構成がある。この構成を図 2 に示す。図 2 (a) は、積分部 104 の構成を示している。図 2 (b) は、積分部 104 の周波数特性を示している。ここでは、積分部 104 としてローパスフィルタ 213 を用いている。図 2 (b) は、周波数軸を積分領域が始まる周波数 f_1 で正規化したものである。上述したように、THz-TDS 装置の動作への影響を抑制するために、積分部 104 の時定数 $1/f_1$ は、微小信号検出部 103 の時定数 τ 以下にする。尚、ここでのローパスフィルタ 213 は、微小信号検出部 103 のローパスフィルタとは周波数特性が截然と異なるもので、両者は明瞭に区別される。

【0032】

次に、全体的に積分領域を有する構成として、コンデンサを用いた完全積分回路がある。この構成を図 3 に示す。図 3 (a) は、積分部 104 の構成例を示している。図 3 (b) は、積分部 104 の周波数特性を示している。積分部 104 は、積分回路 314、スイッチ回路 315、タイミング回路 316、グランド 317、調整回路 318 で構成される。積分回

10

20

30

40

50

路 3 1 4 は、コンデンサで構成する完全積分回路である。この回路は、図 3 (b)のように、直流付近より積分領域が開始される。すなわち、積分回路 3 1 4 は、全ての周波数成分を積分する。スイッチ回路 3 1 5 は、積分回路 3 1 4 の接続先を調整回路 3 1 8 かグラウンド 3 1 7 に選択する部分である。スイッチ回路 3 1 5 が調整回路 3 1 8 を選択すると、積分回路 3 1 4 に電荷が蓄積され積分を開始する。そして、積分結果は調整回路 3 1 8 に入力される。スイッチ回路 3 1 5 がグラウンド 3 1 7 を選択すると、積分回路 3 1 4 の電荷はグラウンド 3 1 7 に放電され、積分を中止する。タイミング回路 3 1 6 は、選択の切替え間隔を調整する。

【 0 0 3 3 】

この間隔は、処理部 1 0 6 の信号取り込み間隔に同期する。具体的には、処理部 1 0 6 が信号を取得すると積分を中止し、積分回路 3 1 4 の電荷が放電した後に積分を開始する。調整回路 3 1 8 は、増幅率を調整する部分である。積分回路 3 1 4 は完全積分回路であるので、図 3 (b)のように、直流に近い周波数成分程、増幅してしまう。図 3 (b)のように、増幅率が、1 以上の特性を示す領域（調整領域ともいう）の信号が処理部 1 0 6 の測定範囲を超え、飽和することを防止するため、積分回路 3 1 4 の出力を調整する。このように、この積分回路 1 0 4 は、単位時間あたりの積分を行う部分ともいえる。図 3 (b)は、周波数軸を、調整領域が終わる周波数 f_2 で正規化したものである。上述したように、THz-TDS装置の動作に対する影響を抑制するために、積分部 1 0 4 の時定数 $1/f_2$ は微小信号検出部 1 0 3 の時定数 以下にする。図 3 (a)に示す積分部 1 0 4 は、積分範囲を柔軟に設定できるという特徴を有する。

【 0 0 3 4 】

また、別の実施形態として、図 4 のように、積分部 1 0 4 と処理部 1 0 6 の間に N 段加算平均回路 4 1 9 があってもよい。N 段加算平均回路 4 1 9 は、N 個の加算回路と、加算回路の出力を N で平均化する回路で構成される。回路によって、積分部 1 0 4 の出力を N 段に分岐し、それぞれの信号を加算した後に平均化することで、ランダムに発生する回路の熱的な雑音が $1/N$ 倍改善されることが知られている。このような回路を挿入することで、ノイズフロアの改善が期待できる。

【 0 0 3 5 】

次に、主に図 1 を参照して本実施形態のテラヘルツ波測定装置の動作を説明する。尚、ここでは、発生部 1 0 8 と検出部 1 0 9 として、比較的良好に利用される光伝導素子を用いることとする。

【 0 0 3 6 】

レーザ源 1 0 7 は超短パルスレーザを出力し、超短パルスレーザは、ビームスプリッタ 1 1 1 によって L1 と L2 に分岐される。超短パルスレーザ L1 は、遅延光学部 1 1 0 を介して発生部 1 0 8 に入射される。また、超短パルスレーザ L2 は検出部 1 0 9 に入射される。

【 0 0 3 7 】

処理部 1 0 6 は、最初の測定点（例えば、図 9 の 1 番目の測定点）を測定するため、遅延光学部 1 1 0 によって、超短パルスレーザ L1 と L2 の遅延時間を調整する。超短パルスレーザ L1 が発生部 1 0 8 に到達すると、発生部 1 0 8 はテラヘルツ波 T1 を発生する。尚、このテラヘルツ波 T1 は、変調部 1 0 5 によって強度変調されている。ここでは、仮に変調周波数 f_s として 1 0 KHz で変調しているものとして説明する。

【 0 0 3 8 】

テラヘルツ波 T1 はサンプル 1 1 2 上に集光され、サンプル 1 1 2 からテラヘルツ波 T2 が伝搬する。図 1 では、テラヘルツ波がサンプル 1 1 2 を透過する形態を示しているが、反射する形態でもよい。また、テラヘルツ波 T1 は、サンプル 1 1 2 に集光している形態を示しているが、平行光を入射してもよい。

【 0 0 3 9 】

サンプル 1 1 2 から伝搬するテラヘルツ波 T2 は、サンプル 1 1 2 の物性により、散乱、吸収されるため、サンプル 1 1 2 の物性情報を含んだ信号となっている。この後、テラヘ

10

20

30

40

50

ヘルツ波T2は検出部109に到達する。検出部109は、検出部109に入射するテラヘルツ波T2について、超短パルスレーザL2が到達した時の瞬間的な電界強度に相当する信号を出力する。検出部109として光伝導素子を用いる場合、検出部109は電流信号を出力する。

【0040】

検出部109から出力された電流信号は、電流検出部102によって電圧信号に変換され、測定可能な範囲まで増幅される。ここで、遅延光学部110によって調整される遅延時間が同じである限り、超短パルスレーザL2によってサンプリングされるテラヘルツ波T2の瞬間的な電界強度の位置は同じである。そのため、電流検出部102から出力される信号は、ほぼ直流に近い信号である。しかし、本実施形態では、テラヘルツ波T1は、変調部105によって強度が変調されている。そのため、図5(a)のように、この直流信号に対して強度変調した信号が電流検出部102より出力される。図6(a)は、この電流検出部102の信号の周波数情報を示している。図示するように、電流検出部102から出力される信号は、変調周波数 f_s に強い信号成分を有している。

10

【0041】

電流検出部102の信号は、図5(a)で示すように、周波数 f_s 以外の信号成分を含んでいるためS/N比が低下している。そのため、電流検出部102の信号は、微小信号検出部103によって変調周波数 f_s の成分を抽出する。

【0042】

図6(b)は、微小信号検出部103の周波数特性を示している。微小信号検出部103としてロックインアンプを適用する時、微小信号検出部103は、電流検出部102と変調部105の信号を乗算する乗算部と、この乗算部の出力をフィルタリングし不要な信号を減衰させるフィルタ部で構成する。図6(b)に、この乗算部の出力を示しているが、図示するように、この出力には変調周波数 f_s の2倍の周波数成分と直流成分、そしてノイズの成分が存在している。乗算部の出力は、変調周波数 f_s に近い周波数成分程直流側に現れ、変調周波数 f_s から離れた成分(主にノイズ成分)は高周波側に現れる。

20

【0043】

微小信号検出部103のフィルタリング部は、この乗算部の出力から直流成分付近の信号を抽出する。このフィルタリング部は、時定数 τ を有するローパスフィルタで構成する。尚、時定数 τ は、ローパスフィルタのカットオフ周波数に対応する。この時定数 τ が、微小信号検出部103の周波数特性を制限する。図6(b)には、この微小信号検出部103の周波数特性を示している。図6(b)のように、乗算部の出力は、この周波数特性に従って高周波側の信号が減衰する。この様子を同じ図の斜線部に示している。

30

【0044】

図5(b)には、この微小信号検出部103の時間波形の出力を示している。図5(b)をみると、直流成分が抽出されている。この直流成分がテラヘルツ波の瞬間的な電界に相当している。例えば、遅延光学部110の調整量を変化させると、この直流成分の値が変動する。この変動の速度をどの程度追従させるかは、図6(b)で示した微小信号検出部103の周波数特性に依る。例えば、追従の速度を速くしたい場合、微小信号検出部103の時定数 τ を小さくする(周波数領域に換算すると、カットオフ周波数を大きくする)。追従の速度を速くすると、テラヘルツ波の時間波形を速く取得できる。ところが、時定数 τ を小さくしていくと、図6(b)のように、和の周波数成分 $2f_s$ 以降の周波数成分を十分減衰できなくなるので、図5(b)で示した時間波形のS/N比は低下する。

40

【0045】

本発明では、テラヘルツ波の高速取得に伴うS/N比の低下を、積分部ないし積算部104で補償することが特徴である。図1のように、微小信号検出部103の出力は、積分部104に入力される。図6(c)は、積分部104の周波数特性を示している。ここでは、積分部104としてローパスフィルタを適用した例を示している。この積分部104の周波数特性は、測定システムの動作への影響を小さくするために、積分部104の時定数 τ は、微小信号検出部103の時定数 τ よりも小さくする。そして、上述したように、積分部1

50

04では、微小信号検出部103で減衰しきれなかった和の周波数成分2fs以降の周波数成分を減衰させる必要があるため、積分部104の時定数は $1/(2fs)$ より大きくする。ここでは、積分部104の時定数は、微小信号検出部103の時定数と同じ値を選択して説明する。

【0046】

図6(c)のように、微小信号検出部102の出力は、積算部104の周波数特性に従って、周波数成分2fs以降の周波数成分が減衰する。この結果を、斜線部で示している。この結果、図5(c)のように、積分部104の出力は、微小信号検出部102の出力に比べ、SN比が改善され、より直流に近い形となる。

【0047】

処理部106は、この積分部104の出力を記録する。処理部106は、再び遅延光学部110によって超短パルスレーザL1とL2の遅延時間を調整し、次の測定点を測定する。この一連の動作を繰り返すことで、処理部106は、サンプル112を透過したテラヘルツ波の時間波形を構築する。このテラヘルツ波の時間波形をフーリエ変換することで、周波数スペクトルを得ることもできる。そして、サンプル112がない時の周波数スペクトルと比較することで、透過率を算出することができる。また、更なるSN比の改善のため、テラヘルツ波の時間波形を複数回取得し、これらの加算平均を取得する場合もある（ラビッドスキャン方式ともいう）。

【0048】

このように、本実施形態では、テラヘルツ波の波形取得に要する時間を短くすることに伴うSN比の悪化（ノイズフロアの上昇）を補償し、テラヘルツ波の高速取得とノイズフロアの改善を両立することが可能となる。

【実施例】

【0049】

更に具体的な実施例を説明する。

（実施例1）

実施例1では、測定例を示す。尚、これまでの説明と共通する部分の説明は省略する。本実施例では、発生部108と検出部109として、低温成長させたガリウムヒ素（LT-GaAs）膜にアンテナを形成した光伝導素子を用いる。アンテナは中心に間隙5 μm を有するダイポールアンテナ（アンテナ長30 μm ）を用いる。レーザ源107は、パルス幅50フェムト秒、中心波長800nm、繰り返し周波数76MHzのチタンサファイアレーザを用いる。遅延光学部110は、折り返し光学系を用い、3 μm 単位で超短パルスレーザL1の光路長を調整する。超短パルスレーザL1とL2の強度は5mWである。

【0050】

本実施例では、サンプル112は用いず、自由空間である。変調部105は、発生部108に20Vpp、1kHzの矩形波を出力する。また、変調部105は、同じ周波数のTTL信号を微小信号検出部103に出力する。尚、測定部101の雰囲気は窒素で置換している。測定中の温度は24度、湿度は3%以下である。

【0051】

電流検出部102は、電流電圧変換回路であり 10^{-7}V/A の変換効率を有する。微小信号検出部103はロックインアンプであり、感度は100mV、時定数は30m秒である。積分部104はローパスフィルタを用い、時定数は3m秒である。

【0052】

ここでは、処理部106は、測定点4000点で時間波形を構築しており、測定回数は1回であるとする。この時のテラヘルツ波の周波数スペクトルを図7に示す。図7は、積算部104がない従来の測定系の測定結果と、本実施例の測定結果を示している。図7のように積分部104を用いることでノイズフロアの位置が低下し、周波数スペクトル幅が広がっている様子が分かる。ノイズフロアの低下の割合は、波形の加算平均処理による手法の効果に換算すると、時間波形を10回測定し加算平均した量に相当する。この結果、測定帯域が0.5THz程広がっている。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 3 】

このように、積分部 1 0 4 を用いることでノイズフロアの改善が実現できる。そのため、従来の測定方法に比べ、同程度の S N 比を得るために必要な時間波形の測定回数を減らすことができ、測定時間の高速化を容易にする。

【 0 0 5 4 】

(実施例 2)

実施例 2 では、別の測定例を示す。尚、これまでの説明と共通する部分の説明は省略する。本実施例では、積分部 1 0 4 としてローパスフィルタを用い、時定数は 1 0 m 秒である。

【 0 0 5 5 】

10

図 8 は、この積分部 1 0 4 を用いた時のテラヘルツ波の周波数スペクトルである。図 8 は、積算部 1 0 4 が無い従来の測定系の測定結果と、本実施例の測定結果を示している。本実施例においても、積分部 1 0 4 を用いることでノイズフロアの位置が低下し、周波数スペクトル幅が広がっている様子が分かる。ノイズフロアの低下の割合は、波形の加算平均処理による手法の効果に換算すると、時間波形を 1 0 回測定し加算平均した量に相当する。この結果、測定帯域が 0 . 5 THz 程広がっている。

【 0 0 5 6 】

このように、本実施例でも、積分部 1 0 4 を用いることでノイズフロアの改善が実現できる。そのため、従来の測定方法に比べ、同程度の S N 比を得るために必要な時間波形の測定回数を減らすことができ、測定時間の高速化を容易にする。

20

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 5 7 】

【 図 1 】 本発明による測定システムの一実施形態の概略構成を説明する図。

【 図 2 】 積分部の構成を説明する図。

【 図 3 】 積分部の別の構成を説明する図。

【 図 4 】 測定システムにおける加算平均回路の配置を説明する図。

【 図 5 】 時間領域の積算部の効果を説明する図。

【 図 6 】 周波数領域の積算部の効果を説明する図。

【 図 7 】 実施例 1 における積算部を用いた時の測定例を説明する図。

【 図 8 】 実施例 2 における積算部を用いた時の測定例を説明する図。

30

【 図 9 】 従来の測定手法の課題を説明する図。

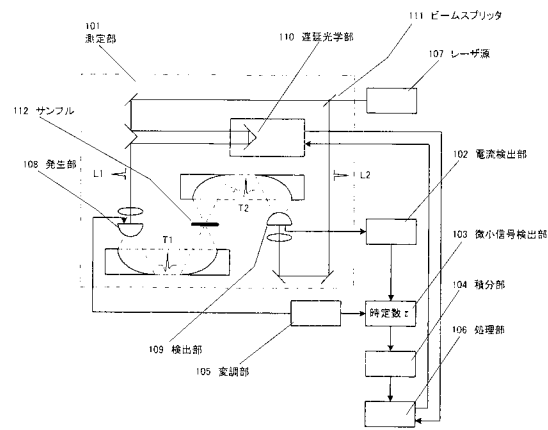
【 符号の説明 】

【 0 0 5 8 】

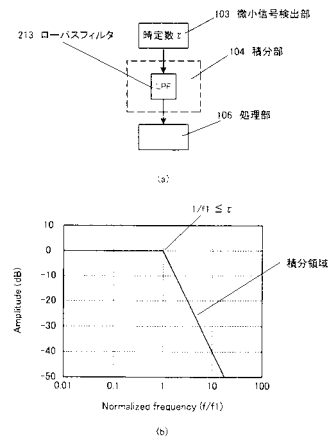
1 0 1 測定部
1 0 2 電流検出部
1 0 3 微小信号検出部
1 0 4 積分部 (積算部)
1 0 5 変調部
1 0 6 処理部
1 0 8 発生部
1 0 9 検出部
1 1 0 遅延光学部
4 1 9 N 段加算平均回路
T 1、T 2 テラヘルツ波

40

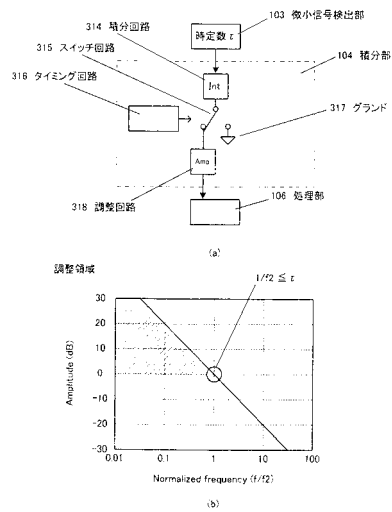
【図 1】



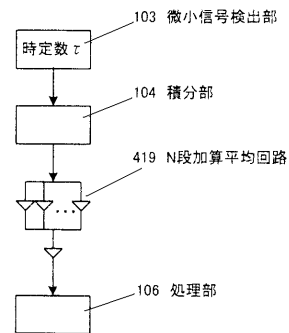
【図 2】



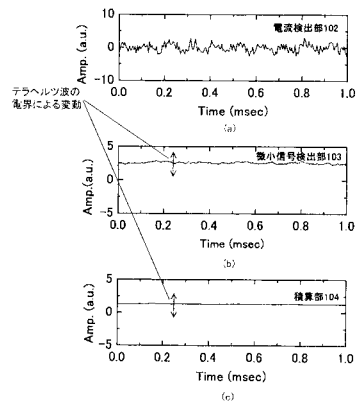
【図 3】



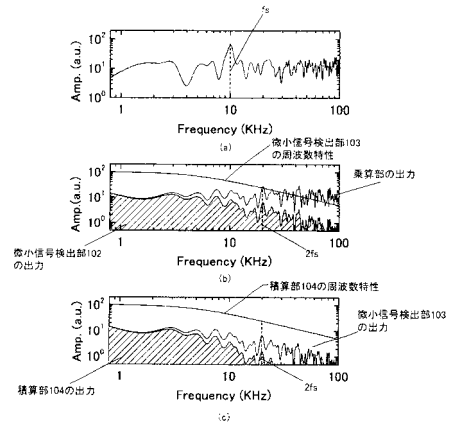
【図 4】



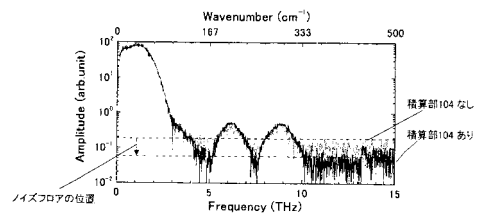
【図 5】



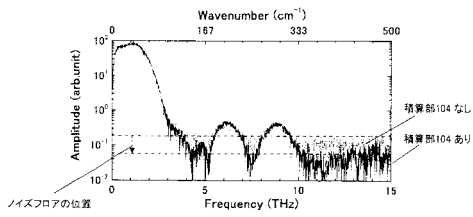
【図 6】



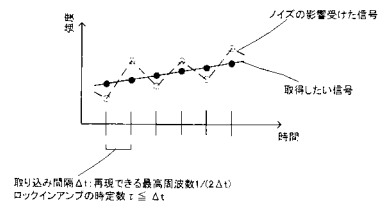
【図 7】



【図 8】



【図 9】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2006-145372(JP,A)

特表2008-539422(JP,A)

特開2008-020268(JP,A)

特開2006-266908(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 21/00-21/958

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)