(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2006 年8 月17 日 (17.08.2006)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2006/085403 A1

(51) 国際特許分類:
G01N 21/35 (2006.01) *G01B 11/02* (2006.01)
A61B 10/00 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2005/015868

(22) 国際出願日: 2005 年8 月31 日 (31.08.2005)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願2005-034471 2005 年2 月10 日 (10.02.2005) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人大阪大学 (OSAKA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 Osaka (JP). 財団法人新産業創造研究機構 (THE NEW INDUSTRY RESEARCH ORGANIZATION) [JP/JP]; 〒6500047 兵庫県神戸市中央区港島南町１－５－２ 神戸キメックセンタービル６Ｆ Hyogo (JP).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 安井 武史 (YASUI, Takeshi) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 荒木 勉 (ARAKI, Tsutomu) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 安田 敬史 (YASUDA, Takeshi) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP).

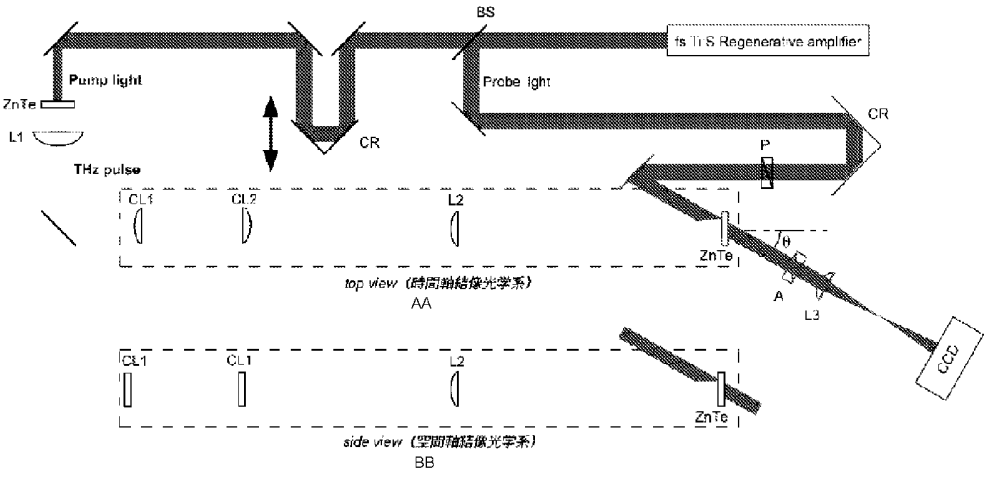
(74) 代理人: 小倉 啓七 (OGURA, Keishichi); 〒5770818 大阪府東大阪市小若江４－２－２５ Osaka (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR,

[続葉有]

(54) **Title:** REAL TIME TERAHERTZ TOMOGRAPHY DEVICE AND SPECTRUM IMAGING DEVICE

(54) 発明の名称: 実時間テラヘルツ・トモグラフィー装置および分光イメージング装置



AA... TIME AXIS IMAGE FORMATION OPTICAL SYSTEM
BB... SPATIAL AXIS IMAGE FORMATION OPTICAL SYSTEM

(57) **Abstract:** It is possible to perform non-destructive inspection and composition analysis type internal transillumination imaging of a moving sample by enabling THz tomography and THz spectral imaging not requiring scan mechanism and improving the measurement time up to the real time measurement. The optical axis of terahertz electromagnetic wave and the optical axis of probe pulse light are arranged separately so that the lights come into the electro-optical crystal with a predetermined angle and the two beams intersect each other in the crystal so that they are overlapped as planes. The THz pulse time sequence waveform information on the time axis is spread into one-dimensional space by using the time-space conversion in the electro-optical crystal and detected by a two-dimensional imaging device, thereby omitting the time axis scan. Moreover, the remaining one axis of the two-dimensional imaging device is used for one-dimensional space imaging so as to omit sample scan. For this, an optical system is arranged for applying THz pulse to the sample by a line beam and forming an image in the electro-optical crystal by the transmitting or reflected light.

[続葉有]

WO 2006/085403 A1

HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

規則4.17に規定する申立て:
— 不利にならない開示又は新規性喪失の例外に関する申立て (規則4.17(v))

添付公開書類:
— 国際調査報告書
— 不利にならない開示又は新規性喪失の例外に関する申立て

２文字コード及び他の略語については、定期発行される各*PCT*ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約: 走査機構が不要なTHzトモグラフィー及びTHz分光イメージングを可能し、また測定時間を実時間測定可能まで高め、動体サンプルの非破壊検査及び成分分析型内部透視イメージングを行う。 テラヘルツ電磁波パルス光とプローブパルス光のそれぞれの光軸を非共軸に配置し、所定の角度で電気光学結晶に入射させて、両ビームを結晶内で交差させ面として重ね、時間軸上のTHzパルス時系列波形情報を、電気光学結晶における時間－空間変換を用いて空間１次元に展開し、２次元イメージングデバイスで検出することによって、時間軸の走査を省略する。また、２次元イメージングデバイスの残りの１軸をサンプルの空間１次元イメージングに利用してサンプル走査を省略するため、サンプルに対してTHzパルスを線集光（ラインビーム）で照射し、その透過光もしくは反射光を電気光学結晶に結像するための光学系を配置する。

明 細 書

実時間テラヘルツ・トモグラフィー装置および分光イメージング装置

技術分野

[0001] 本技術は、実時間(リアルタイム)でテラヘルツ電磁波パルス(以下、「THzパルス」と称する。)を計測できるTHzパルス計測技術に関するものであり、また、非破壊検査、内部透視、特に成分分析型内部透視などに用いることができるTHzパルスを用いた実時間テラヘルツ・トモグラフィー及び実時間テラヘルツ分光イメージング装置に関するものである。

背景技術

[0002] 内部透視法は様々な応用分野における重要計測技術であり、これまでにもX線診断や超音波診断が実用化されている。前者は侵襲性が高いため、後者は接触測定であるため、その応用が制限されている。テラヘルツ・トモグラフィー装置やテラヘルツ時間領域分光イメージング(テラヘルツ分光イメージング)装置は、THzパルスの特徴(自由空間伝搬, 良好な透過特性, コヒーレント・ビーム, 低散乱性, 非侵襲性, 超短パルス, 広帯域スペクトル, 分光測定やイメージングが可能など)を活かした代表的計測手法である。テラヘルツ・トモグラフィーでは、非接触リモート, 非侵襲, 高空間分解能で2次元断層イメージを得ることが可能である。テラヘルツ分光イメージングでは、サンプルがある特定周波数のテラヘルツ吸収を示す場合、内部透視イメージをテラヘルツ周波数毎の色付きカラー(分光)画像として測定することにより非破壊での成分分析イメージングが可能なため、従来の内部透視手段(X線、超音波他)に替わる成分分析型内部透視手段として期待されている。

[0003] 例えば、テラヘルツ・トモグラフィーは超音波エコーに代替する手段として、生体診断や非破壊検査での利用が期待されている。一方、テラヘルツ分光イメージングは、最近のテロ対策や犯罪対策から、空港手荷物検査における爆発物(プラスチック爆弾・引火性液体他)、あるいは郵便封書内の禁止薬物(麻薬・覚醒剤他)、といった従来のX線検査では検出不可能であった測定対象に対して、特徴的なTHz吸収を利用したテラヘルツ分光イメージングの利用が提案されている。

[0004] THzパルス計測に関しては、米国レンセラー工科大学の研究グループにより、イメージングプレートとして電気光学結晶を用い、ポッケルス効果によるテラヘルツ電場検出法とCCDカメラを組み合わせてリアルタイムイメージングが可能となる2次元電気光学サンプリング法が知られている(非特許文献1)。

[0005] また、THzパルス計測の実時間化に関しては、米国レンセラー工科大のグループにより、チャープパルス光とマルチチャンネル分光器を用いた時間-波長変換(非特許文献2)、あるいは、ストリークカメラを用いた時間-空間変換(特許文献1参照)を用いた手法が知られている。

[0006] さらに、THzパルス計測の実時間化に関して、THzパルスとプローブパルス光を非共軸とし、テラヘルツ時間波形をシングルショットで計測する手法が知られている(非特許文献3)。

特許文献1:US patent 6,690,001 B2

非特許文献1:Q. Wu, T. D. Hewitt, and X.-C. Zhang: Appl. Phys. Lett. Vol.69, 1026 (1996)

非特許文献2:"Single-shot spatiotemporal terahertz field imaging・ Opt. Lett., Vol. 23 (No.14), page.1114-1116 (1998)

非特許文献3:"Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling・, Opt. Lett., Vol. 25 (No.6), page.426-428 (2000)

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0007] 従来法のテラヘルツ・トモグラフィーやテラヘルツ分光イメージングは、基本的に走査型イメージングといった点計測であるため、イメージを得るためには複数軸の走査機構が必要となり、計測の実時間性に制限があった。例えば、サンプルの2次元断層イメージ(または1次元分光イメージ)を得るためには時間遅延(周波数軸)及びサンプル位置の2軸の走査が必要となる。走査を行いながらこれら2次元情報のシリアル測定を行うため、1枚のイメージを得るために数分から数時間の測定時間が必要となっていた。

[0008] また、並列処理的手段として、上述したような米国レンセラー工科大学の研究グル

ープが提案する、イメージングプレートとして電気光学結晶を用い、ポッケルス効果によるテラヘルツ電場検出法と2次元イメージングデバイス(CCDカメラ)を組み合わせてリアルタイムイメージングが可能となる2次元電気光学サンプリングを用いた手法があるが、この場合に得られる情報は、ある瞬間の測定対象の面内の2次元透過イメージであり、THzパルスの時間波形をリアルタイムで得ることはできなかった。そのため、例えば、断層イメージを得るためには深さ方向(時間軸)の走査が必要であった。

[0009] また、米国レンセラー工科大のグループが提案する、チャープパルス光とマルチチャンネル分光器を用いた時間-波長変換を用いた手法は、高価な装置が必要な上、時間分解能やイメージング特性に制限があった。すなわち、時間を波長に変換してリアルタイム計測するに、波長を測定するマルチチャンネル分光器といった高価な装置が必要であった。その上、チャープパルス光とマルチチャンネル分光器を用いた手法では、測定原理的に時間分解能を細かくとれないため測定精度が上がらないという問題があった。

[0010] また、ストリークカメラを用いた時間-空間変換を用いた手法も、時間を空間に変換してリアルタイム計測するに、ストリークカメラといった高価な装置が必要な上、ストリークカメラの分解能も、現在のところフェムト秒レーザーのパルス幅には追いついておらず、分解能が十分でなく、時間分解能やイメージング特性に制限があった。

[0011] また、THzパルス計測の実時間化に関して、THzパルスとプローブパルス光を非共軸とし、テラヘルツ時間波形をシングルショットで計測する手法があるが、実時間でテラヘルツ時間波形を計測できるものの、実時間で測定対象サンプルの空間情報を計測できるものではなかった。

[0012] このようにテラヘルツ・トモグラフィー及びテラヘルツ分光イメージングはその有用性にも関わらず、計測の実時間性がボトルネックとなり、これまでに報告されている適用例はいずれも静止物体サンプルである。

また、THzパルス計測の時間分解能は、理想的にはフェムト秒レーザーのパルス幅だけに制限されるものであり、他の要因からくる時間分解能の制限をなくすことが必要である。

[0013] 本発明は、このような従来技術のボトルネックであった計測時間に関する制限を解

決し、走査機構が不要な実時間テラヘルツ・トモグラフィー及びテラヘルツ分光イメージングを可能し、また時間分解能を高め、実時間で動体サンプルの非破壊分析を可能とすることを目的とする。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明は、上記課題を解決するため、すなわち完全な実時間測定を実現するため、THzパルスとプローブパルス光を非共軸とし、テラヘルツ時間波形をシングルショットで計測する手法を導入し、さらに、測定対象物に対してTHzパルスを線集光の状態で照射し、検出器として2次元イメージングデバイスを用いることにより、走査機構が不要な実時間テラヘルツ・トモグラフィー及びテラヘルツ分光イメージングを提供する。

[0015] すなわち、従来のTHzパルス計測において、時間軸上に展開していた奥行き方向の空間情報を、電気光学結晶における時間－空間変換を用いて空間1次元に展開し、2次元イメージングデバイスで検出することによって、奥行き方向の走査を省略する。

そのため、従来のイメージング光学系と異なり、THzパルスとプローブパルス光のそれぞれの光軸を非共軸に配置し、所定の角度で電気光学結晶に入射させて、両ビームを結晶内で交差させ面として重ねるようにする。

[0016] また、同時に、2次元イメージングデバイスの残りの空間1次元を、サンプル面内の空間1次元イメージングに用いるため、線集光(ラインビーム)による透過像もしくは反射像を得る。

これにより、動体サンプルもしくは静体サンプルのサンプル移動の場合に、走査機構無しのシングルショットでの実時間テラヘルツ・トモグラフィー及び分光イメージングを可能とするものである。

[0017] 以下、図1を参照して、本発明に係る実時間テラヘルツ・トモグラフィー及び分光イメージングの原理を説明する。尚、図1に示すのは、THzパルスを測定対象物に照射し透過させるものであるが、測定対象物に照射し反射させるものについても、THzパルスの計測原理は同じである。

[0018] 図1において、左方から入射するTHzパルス1は、円筒レンズ(シリンドリカルレンズ)

8によってX軸方向に線集光(ラインビーム化)されて、測定対象物(サンプル)10に照射される。測定対象物10に照射された線集光のTHzパルスは、測定対象物10の1次元領域(ライン領域)を透過し、円筒レンズ(シリンドリカルレンズ)9を介して、電気光学結晶(EO結晶)3に入射する。

[0019] 一方、プローブパルス光2は偏光子4を経て電気光学結晶3に入射される。この時、プローブパルス光2は、THzパルス1と同一の光路上(共軸配置)に導かれるのではなく、異なる光路上(非共軸配置)に導かれる。図1において、左上方から入射するプローブパルス光2は、THzパルスの光軸とのなす角度(θ)で、電気光学結晶3に入射している。両ビーム(THzパルスとプローブパルス光)を電気光学結晶3内で交差させ、面として重ねるようにする。

[0020] 電気光学結晶3内ではTHzパルス1の電場強度に比例して屈折率の変化が起こり、複屈折を誘起する。偏光子4により直線偏光したプローブパルス光2が電気光学結晶3に入射すると、THzパルス1の電場によって誘起された複屈折のために位相変化が生じ、電気光学結晶3を通過した後は偏光状態が変化して楕円偏光となる。このプローブパルス光2の偏光状態の変化を検光子5により光強度へと変換し、その強度分布をレンズによりCCDカメラなどの2次元イメージングデバイス6上に結像することにより画像化する。ここで、偏光子4と検光子5は、クロスニコル配置(直交配置)になっており、偏光が変化した成分のみを2次元イメージングデバイス6でとらえるようにしている。

[0021] 2次元イメージングデバイスを検出器として用いることで、得られた2次元イメージング画像の1軸をTHzパルスの時系列波形の計測用として用い、他方の1軸を線集光(ラインビーム)の状態で透過したTHzパルスの1次元イメージング(2次元平面内の一次元イメージング)用として用いることにしている。

[0022] 図2は、2次元イメージングデバイス6で得られる画像イメージの模式図を示している。図2のグラフの横軸(h-axis)は、THzパルスの時間波形情報を表している。また、グラフの縦軸(v-axis)は、線集光(ラインビーム)で得たx軸方向1次元イメージング情報を表している。

[0023] 次に、図3の(1)は、測定対象物が厚さの異なる構造を持つ場合における入射光と

透過光の模式図を示している。ここで、図3の(1)に示すように、測定対象物10が厚みの異なる部位を有する場合には、測定対象物10を透過した透過光12は、厚さによってTHzパルスの伝播時間に差が生じるため、時間的に分離された2つのエコーパルスになる。

[0024] また、図3の(2)は、測定対象物が2層の内部構造を持つ場合における入射光と反射光(エコーパルス)の模式図を示している。この場合、各層の境界部分では群屈折率分布が不連続となっているため、THzパルスは境界で透過光(図示せず)と反射光15に分離される。図3の(2)に示すように、測定対象物13にTHzパルスを入射した場合、THzパルスは第1層表面及び第1層－第2層境界で各々反射され、反射光15は時間的に分離された2つのエコーパルスになる。

[0025] 上述した電気光学結晶における時間－空間変換によって、2つのエコーパルスの時間遅延(Δτ)が、横軸方向の変位(Δh)として画像情報として現れてくる。図2の画像イメージの模式図において、実線部分は測定対象物10のx軸方向の上方部分を透過したものであり、厚みが小さく伝播時間が速く、一方、点線部分は測定対象物10のx軸方向の下方部分を透過したものであり、厚みが大きく伝播時間が遅い。

これが、図2において、縦軸方向の位置の違い、横軸方向の変位(Δh)となって現れるのである。

[0026] ここで、電気光学結晶における時間-空間変換について説明する。

図4の(1)～(4)は、THzパルスとプローブパルス光のそれぞれの波面の重なりが空間的(h軸方向)に同じ位置を保ったまま結晶中を伝播していく様子を模式図で示している。図4の(1)～(4)に示すように、THzパルスとプローブパルス光の両者の結晶内での伝播速度が等しい場合、それぞれの波面の重なりは、結晶内で常に同じ場所(h軸方向)で重なることがわかる。この過程を通して、2つのTHzパルスの時間遅延(Δτ)は、h軸方向の空間的変位(Δh)に変換される。

[0027] ここで、時間－空間変換における時間遅延(Δτ)とh軸方向の変位(Δh)の関係式は下記式で表される。ここで、θは、電気光学結晶に入射するTHzパルスとプローブパルス光のそれぞれの光軸のなす角度を示しており、また、cは光速を示している。

[0028] [数1]

$$\Delta\tau = \frac{\Delta h \tan\theta}{c}$$

[0029] また、測定時間窓(ΔT)は、下記式で表される。ここで、dはプローブパルス光のビーム径、cは光速を示している。

[0030] [数2]

$$\Delta T = \frac{d\tan\theta}{c}$$

[0031] 図5に、測定時間窓(ΔT)と電気光学結晶に入射するTHzパルスとプローブパルス光のそれぞれの光軸のなす角度(θ)の相関グラフを示す。図5のグラフは、プローブパルス光のビーム径(d)が、5mm, 10mm, 20mmの3ケースについて、測定時間窓(ΔT)と角度(θ)の相関を示している。ここで、光軸のなす角度(θ)が大きくなれば、測定時間窓(ΔT)が大きくなるのであるが、電気光学結晶内でのTHzパルスとプローブパルス光の伝播速度が等しくなるように位相整合条件を調節する必要があり、また、この調整パラメータが光軸のなす角度(θ)であるため、測定に最適な角度(θ)が存在し、それに対応して測定時間窓(ΔT)が決定される。

[0032] THzパルスとプローブパルス光のそれぞれの電気光学結晶における屈折率をn_{THz}とn_{opt}とすると、それぞれの電気光学結晶内部での速度は、c/n_{THz}, c/n_{opt}となる(cは光速)。

一般に、c/n_{opt}の方がc/n_{THz}よりも大きいため、下記数式3からθを算出する。

例えば電気光学結晶がZnTeの場合、$n_{THz}=3.178$, $n_{opt}=2.853$であり、$\theta=26.1°$となる。

[0033] [数3]

$$n_{THz} \cdot \cos\theta = n_{opt}$$

[0034] 以上、本発明に係る実時間THzパルス計測装置の原理について説明したが、これ

らから、以下に述べる本発明の観点から課題解決の手段が提供されることになる。

[0035] 本発明の第1の観点からは、レーザパルス光を発生するパルス光発生部と、レーザパルス光と光伝導スイッチ(もしくは非線形光学結晶)によって発生させたテラヘルツ電磁波パルス(THzパルス)を測定対象物に照射させるTHzパルス照射用光学系と、測定対象物を透過又は反射したTHzパルスを電気光学結晶に結像させるためのTHzパルス検出用光学系と、THzパルスと同期したプローブパルス光を、前記電気光学結晶に照射するプローブパルス光照射用光学系と、電気光学結晶を通過し、前記THzパルスの誘起複屈折率変化により偏光状態が変化したプローブパルス光の特定偏光成分を抽出する検光部とを備えたTHzパルス計測装置において、

(1)前記電気光学結晶に照射される前記THzパルスと前記プローブパルス光を非共軸配置とし、

(2)前記THzパルス照射用光学系において、円筒レンズ(シリンドリカルレンズ)を用いて、THzパルスを前記測定対象物に線集光(ラインビーム)として照射させ、その透過又は反射したTHzパルスを電気光学結晶に結像させるための光学系の配置とし、

(3)前記検光部の検出器を2次元イメージングデバイスとし、得られた2次元イメージング画像の1軸をTHzパルスの時系列波形の計測用として用い、他方の1軸を線集光(ラインビーム)で照射された測定対象物の1次元空間情報の計測用として用いることを特徴とする実時間THzパルス計測装置が提供される。

[0036] 次に、本発明の第2の観点は、好ましくは、第1の観点の実時間THzパルス計測装置において、THzパルス照射用光学系で用いられる円筒レンズが、測定対象物照射用, 空間軸結像用, 時間軸結像用として、少なくとも3個配設されることである。

[0037] また、本発明の第3の観点は、好ましくは、第1の観点の実時間THzパルス計測装置において、検光部と電気光学結晶の間に、1/4波長板とビーム変位プリズムを配設し、電気光学結晶を通過したプローブパルス光が垂直偏光成分と水平偏光成分に分離されバランス検出されることである。

[0038] また、本発明の第4の観点は、好ましくは、第1の観点の実時間THzパルス計測装置のプローブパルス光照射用光学系において、電気光学結晶内でのTHzパルスとプローブパルス光の伝播速度が等しくなるように位相整合条件を調節する非共軸ビ

ーム交叉角度調節部をさらに設けることである。

これにより、THzパルスとプローブパルス光のそれぞれの波面の重なりが空間的(h軸方向)に同じ位置を保ったまま結晶中を伝播していくため、群速度不整合による時間分解能の低下を防ぐことができ、厚い電気光学結晶の利用が可能といった利点がある。

[0039] 次に、本発明の第5の観点は、本発明の第3の観点の実時間THzパルス計測装置において、検光部の2次元イメージングデバイスで検出されるプローブパルス光の垂直偏光成分と水平偏光成分の差分イメージを算出するTHzイメージ算出処理部がさらに設けられることである。

[0040] 次に、本発明の第6の観点からは、本発明の第1の観点乃至第5の観点において、計測されたTHzパルスの時系列波形をフーリエ変換することにより、振幅スペクトル及び／又は位相スペクトルを演算し表示する分光イメージング部を設けたことを特徴とする実時間テラヘルツ分光イメージング装置が提供される。

[0041] さらに、本発明の第7の観点は、本発明の第6の観点の実時間テラヘルツ分光イメージング装置において、分光イメージング部が所定の周波数毎に表示部を有し、各表示部が測定対象物の内部透過像に重ねて所定の周波数に対応した振幅及び／又は位相を表示することにより、成分分析型内部透視を行うことである。

[0042] また、本発明の第8の観点は、本発明の第1の観点乃至第5の観点において、得られた2次元時空間イメージ画像のTHzパルスの時系列波形の重なりから、測定対象物の断層イメージを演算し表示する断層イメージング部をさらに設けたことを特徴とする実時間テラヘルツ・トモグラフィー装置が提供される。

発明の効果

[0043] 本発明によれば、マルチチャンネル分光器やストリークカメラなどの高価な装置を要することなく、従来のTHzパルス計測装置における光学配置の一部変更(共軸→非共軸、円筒レンズの導入)により実時間化が容易に実現できる。

[0044] 本発明によれば、シングルショットでTHzパルスの時間波形を取得することができるので、時間軸方向の走査(スキャニング)を不要とでき、実時間測定が可能となる。これは、高速単一現象のダイナミクス測定やダメージを受けやすいサンプルの測定の

場合に有効に働くことになる。また、シングルショットでTHzパルスの時間波形を取得できるということで、低繰り返しレーザー増幅器のpulse-to-pulse強度揺らぎの影響を軽減することができ測定SN比を改善できる。

[0045] また、本発明によれば、THzパルスのラインビームにより、測定対象物の空間的ラインのイメージング情報をワンショットで取得できるため、サンプル走査も不要となり、動体サンプルの内部非破壊検査、成分分析型内部透視イメージングがリアルタイムで可能となる。さらに、時間分解能の制限は無く、後述する実施例に示すような結像光学配置の導入による高いイメージング特性が期待できる。

[0046] また、本発明は、光学配置を非共軸とするため、従来にはない以下に述べる効果を有する。電気光学結晶に入射するTHzパルスとプローブパルス光のそれぞれの電気光学結晶内部での速度が異なるため、従来のように光学配置が共軸の場合には、電気光学結晶内での波面のオーバーラッピングしている空間長を長くして(すなわち、電気光学結晶の厚みを大きくして)変換効率を高めることができなかった(群速度の不整合)。しかし、本発明では、光学配置を非共軸としたため、群速度の不整合をキャンセルすることができる。すなわち、電気光学結晶に入射するTHzパルスとプローブパルス光のそれぞれの電気光学結晶光軸のなす角度(θ)を調整することにより、電気光学結晶内部での伝播速度を等しくすることができる。これによって、電気光学結晶の材料、厚みなどの選択枝を拡げることが可能となるのである。

[0047] テラヘルツ・トモグラフィー装置やテラヘルツ分光イメージング装置は、非接触リモート・非侵襲な成分分析型内部透視手段として、従来の超音波測定やX線測定に代替する可能性を有している。唯一の問題点は計測の実時間性に関する制限であり、これが本発明により解消できれば工業計測や生体計測を始めとした様々な実用計測に貢献可能であることは超音波診断やX線診断の例より明白である。

[0048] 特に、実時間計測は測定対象に対する制限を飛躍的に拡張し、従来技術では静止物体の測定しか可能でなかったが、本発明により動体(ライン上の製品、生体他)でさえも容易に測定可能になるところに、本発明の最大の効果がある。

発明を実施するための最良の形態

[0049] 以下に、本発明に係る実時間THzパルス計測装置の一実施形態の装置構成につ

いて図を示しながら説明する。

図6は、本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成図を示している。以下、図6を参照しながら、本発明に係るTHzパルス計測装置の原理について説明する。

[0050] 先ず、増幅フェムト秒パルスレーザ装置20から放射された光パルスはビームスプリッタ(BS)21により、ポンプパルス光22とプローブパルス光23に分割される。その後、ポンプパルス光22は時間軸校正39を受け、THzパルス発生部32へと導かれる。THzパルス発生部32には、電気光学結晶(ZnTe)を用いている。尚、電気光学結晶の代わりにラージギャップ光伝導スイッチを用いてもよい。THzパルス発生部32にフェムト秒光パルスを照射すると、THzパルスが発生する。発生したTHzパルスは、テラヘルツ・レンズL1(30)を通ってコリメートされた後、平凸円筒レンズ(平凸シリンドリカルレンズ)CL1によって線集光(ラインビーム照射)される。図6において、点線で囲まれた光路は、それぞれ光学系を上方から観測したもの(Top View)と真横から観測したもの(Side View)であり、平凸円筒レンズCL1を通過したTHzパルスが線集光(ラインビーム)されている様子が図示されている。ここでは、先ず、THzパルス計測装置全体の光学系を説明するため、測定対象物はないものとする。別の平凸円筒レンズCL2によってコリメートされたTHzパルスは、レンズL2(31)で電気光学結晶(ZnTe)上に結像させることにしている。

[0051] 一方、プローブパルス光は偏光子36を経て電気光学結晶33に入射される。この時、プローブパルス光は、THzパルスと同一の光路上(共軸配置)に導かれるのではなく、異なる光路上(非共軸配置)に導かれる。これにより、両ビームは結晶内で交差させられ面として重ねられる。これにより時間軸上に展開していたTHzパルス時系列波形情報を、電気光学結晶における時間－空間変換を用いて空間1次元に展開することができ、時間軸の走査を省略できるのである。

[0052] 電気光学結晶33内ではTHzパルスの電場強度に比例して屈折率の変化が起こり、複屈折を誘起する。偏光子36により直線偏光したプローブパルス光が電気光学結晶に入射すると、THzパルスの電場によって誘起された複屈折のために位相変化が生じ、結晶を通過した後は偏光状態が変化して楕円偏光となる。このプローブパルス光の偏光状態の変化をCCDカメラ40の前に検光子37を挿入することにより光強度

へと変換して画像化する。ここで、検光子37と偏光子36は、クロスニコル配置(直交配置)になっており、偏光が変化した成分のみがCCDカメラ40に到達するしくみとなっている。

[0053] また、時間軸の校正は、ポンプパルス光側の時間軸校正用ステージ39を既知量動かした場合のTHzパルスのピーク位置のピクセル移動量から行っている。

また、電気光学結晶に入射するTHzパルスとプローブパルス光のそれぞれの電気光学結晶光軸のなす角度(θ)の調整は、平面ミラー34に接続された図示しない共軸ビーム交叉角度調節部で行っており、これにより電気光学結晶内部での伝播速度を等しくなるように位相整合条件を調節している。

[0054] ここで、図6の実時間THzパルス計測装置で用いた各機器の仕様を示す。

1)フェムト秒レーザー:スペクトラフィジックス製, パルスエネルギー1mJ, パルス幅100fs、中心波長800nm、繰り返し周波数1kHz

2)電気光学結晶:<110>ZnTe

3)CCDカメラ:Sony XC-ST50,640*480ピクセル,8ビット, フレームレート30fps, S/N;56dB

[0055] また、その他の実験条件は下記の通りである。

・ポンプパルス光:450mW

・発生側のZnTe(図6中符号32で示す)結晶軸角度:<001>を-145° 回転

・プローブパルス光:1mW

・検出側のZnTe(図6中符号33で示す)結晶軸角度:<001>を145° 回転

[0056] 図7は、図6の実時間THzパルス計測装置において、CCDカメラで取得したTHzパルス波形イメージ(バックグラウンド光除去後)を示している。図7において、横軸スケールは、サンプル厚さ方向に対応し、図6の実時間THzパルス計測装置の条件(プローブパルス光径d=5mm, THzパルスとプローブパルス光のそれぞれの光軸のなす角度θ=20°)から、前述の数式2により測定時間窓T=6psと求めたものである。なお、縦軸スケールは、この場合サンプルを導入していないので、垂直方向に一様な分布となっている。

[0057] 図8は、CCDカメラから得られた2次元イメージング画像情報から、コンピュータ処理

により(図6中、コンピュータの図示は省略してある)、テラヘルツ時間波形分布イメージに変換したものである。

また、図9は、図8においてシングルラインaで、切り出したTHzパルス時間波形分布を示している。図9中、0.5psは、照射したTHzパルス波形の半値全幅に相当する数値であり、本発明に係る実時間THzパルス計測装置により、THzパルス時間波形が再現できていることを示すものである。

[0058] 図10は、図8のTHzパルス時間波形分布をフーリエ変換することにより、得られた振幅スペクトルを示す。また、図11に、図8のTHzパルス時間波形分布イメージ情報をフーリエ変換することにより、得られた位相スペクトルを示す。

振幅スペクトルと位相スペクトルから、吸収スペクトルと屈折率スペクトルをそれぞれ算出し、これを測定対象物の成分を分析するのに使うことができる。従来から光を用いた分光分析法があったが、光の領域は強度(吸収)の情報しか見ることができないが、テラヘルツ分光イメージング装置では、物質に固有の吸収と屈折率の2つのパラメータ(複素屈折率)で識別できるので物質の識別性が向上するのである。

[0059] ここで、THzパルスの時間波形分布イメージをフーリエ変換して、振幅、位相スペクトルによる成分分析のメカニズムを以下に説明する。THzパルスの時間波形E(t)は、THzパルスの振幅と位相情報を含んでいるため、これをフーリエ変換(下記数式4を参照)することにより、振幅スペクトルE(ω)と位相スペクトルθ(ω)を求めることができる。

[0060] [数4]

$$E(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}E(t)\ \exp(i\omega t)\,dt=\left|E(\omega)\right|\exp\left[i\theta(\omega)\right]$$

[0061] 先ず、サンプルが無い場合のTHzパルス時間波形Er(t)を測定し、コンピュータ処理でフーリエ変換して振幅スペクトル|Er(ω)|と位相スペクトルθr(ω)を求める(図12(a)参照)。次に、サンプルが有る場合の時間波形Es(t)をフーリエ変換して振幅スペクトル|Es(ω)|と位相スペクトルθs(ω)を求める(図12(b)参照)。

そして、下記数式5～7を用いて、吸収スペクトルk(ω)及び屈折率スペクトルn(ω)を算出するのである(詳細については、分光研究 第50巻第6号pp.273を参照)。

なお、下記数式6，7の中で、cは光速、dはサンプルの厚さを表している。また、図12では透過の場合を示しているが、下記数式は、反射の場合も同様に用いることができる。

[0062] [数5]

$$\frac{E_s(\omega)}{E_r(\omega)} = \frac{|E_s(\omega)|}{|E_r(\omega)|}\exp\left[i\{\theta_s(\omega) - \theta_r(\omega)\}\right]$$

[0063] [数6]

$$\frac{|E_s(\omega)|}{|E_r(\omega)|} = \frac{4n}{(1+n)^2}\exp\left(-\frac{k\omega}{c}d\right)$$

[0064] [数7]

$$\theta_s(\omega) - \theta_r(\omega) = \frac{(n-1)\omega}{c}d$$

[0065] スペクトル幅の狭い波長可変THz光源を用いる方法の場合には、THz波長を連続的に可変しながら吸収スペクトルを取得し、サンプルの吸収スペクトルを取得するのであるが、本発明ではテラヘルツ電磁波パルス(THzパルス)を用いる方法であるため、THzパルスそのものが広帯域なスペクトルを有しているので波長可変は不要で、フーリエ変換赤外分光と同様に、フーリエ変換して得た吸収または屈折率の周波数スペクトルから物質を同定できるのである。

[0066] 試薬・禁止薬物・農薬・ビタミン類・糖類などの物質では、THz領域で物質識別可能な特徴的な吸収スペクトル(指紋スペクトル)を各々示す。したがって、サンプルの吸収スペクトルと各物質成分の指紋スペクトル(既知)を比較することにより、サンプル含有成分を特定することができるのである。また、サンプルが複数成分を含有しているときには、指紋スペクトルと主成分分析法を利用することにより、各成分の分析が可能となる。

実施例 1

[0067] 図13に本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成A(反射1次元結像の基

本配置)を示す。

電気光学結晶に照射されるTHzパルスとプローブパルス光を非共軸に配置した図6の構成を反射配置に変更し、平凸円筒レンズ(平凸シリンドリカルレンズ)CL1を用いてTHzパルスを線集光(ラインビーム)で測定対象物に照射し、その反射光を結像光学系(結像レンズL2)で電気光学結晶(ZnTe)上に結像させることにしている。図13において、点線で囲まれた光路は、それぞれ光学系を上方から観測したもの(Top View)と真横から観測したもの(Side View)であり、平凸円筒レンズCL1を通過したTHzパルスが線集光(ラインビーム)で測定対象物に照射されている様子が図示されている。

[0068] 2次元イメージングデバイス(CCDカメラ)の画像の1軸を、シングルショットでのTHzパルスの時系列波形の計測用として用い、他方の1軸を、測定対象物を線集光(ラインビーム)で反射したTHzパルスの1次元イメージング用として用いることで、シングルショットのテラヘルツ・トモグラフィー装置を実現している。

[0069] 実際に、本実施例のテラヘルツ・トモグラフィー装置で塗装膜を測定してみた。測定対象物として、図14に示すようにアルミ素地に白エナメル塗装膜を施し、THzパルスを照射した。実時間で測定できることを示すため、測定対象物を移動させながら測定を行った。測定対象物を移動する速さは、5mm/secである。

[0070] 図15に、CCDカメラで取得したTHzパルス波形イメージ(塗装膜測定結果)を示す。図15の(a)は、白エナメル塗装膜を施していないアルミ素地の部分にTHzパルスを照射した際、得られたTHzパルス波形イメージである。また、図15の(b)は、白エナメル塗装膜を施していないアルミ素地の部分と白エナメル塗装膜を施したアルミ素地の部分の境界部分にTHzパルスを照射した際、得られたTHzパルス波形イメージである。また、図15の(c)は、白エナメル塗装膜を施したアルミ素地の部分にTHzパルスを照射した際、得られたTHzパルス波形イメージである。

[0071] 図15の(a)では、素地表面からの1つのTHzエコーパルス波形イメージしか確認できないのに対し、図15の(c)では、塗膜表面及び塗膜－素地境界の2つのTHzエコーパルス波形イメージが確認できている。また、図15の(b)では、1つのTHzパルスエコー波形イメージから2つのTHzパルスエコー波形イメージへの遷移過程が確認できる

。これらから、動体サンプルに対しても、実時間でTHzパルス測定が行われていることが理解できる。

実施例 2

[0072] 一方、本発明の非接触リモート特性を利用すると、従来は測定困難とされた未乾燥状態の塗装膜(ウェット膜)の測定も可能となる。そこで、ウェット膜の乾燥に伴う膜厚変化を図18に示す実時間THzパルス計測装置の構成A(反射1次元結像の基本配置)を用いて実時間測定した。

[0073] サンプルは速乾性黒アクリル塗装をアルミ板に施したもので、塗装前後の2次元断層イメージを測定した。図16は、1分毎の2次元断層THzイメージを示している。塗装前は剥き出しのアルミ板上からのTHzエコー信号のみが観測されているが、塗装後は塗膜表面及び塗膜-アルミ板境界からの2つのTHzエコー信号が時間的に分離されている。乾燥の進行に伴い、2つのTHzエコー信号の時間的位置が変化している様子が確認できる。

[0074] ここで、左側のTHzエコー信号は塗装膜の幾何学的膜厚に対応しているのに対し、2つのTHzエコー信号の時間間隔が光学的膜厚に対応している。これらの時間的変化から、乾燥に伴う収縮により塗装膜の幾何学的膜厚が減少し、それに伴い光学的膜厚も減少することが分かる。また、塗装膜の収縮が面内で均一に進行している様子も確認できる。

実施例 3

[0075] 図17に本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成B(イメージの時間軸歪みを補正した光学系配置)を示す。本実施例の光学系配置は、測定対象物の空間軸イメージ(深さ分布)を歪みなく電気光学結晶に結像するための光学系配置である。

3個の平凸円筒レンズCL1, CL3, CL4を、それぞれ測定対象物照射用, 空間軸結像用, 時間軸結像用として用いている。また、CL3とCL4の長手方向が直交するように配設している。

[0076] ここで、図17のTop Viewは時間軸方向(図7の水平軸方向)の結像状態を、Side Viewは空間軸方向(図7の垂直軸方向)の結像状態を示していることになる。したがって、平凸円筒レンズCL3は空間軸方向に対してのみ結像レンズとして機能する。

[0077] 一方、平凸円筒レンズCL4は時間軸方向に対してのみレンズとして機能し、この場合は平凸円筒レンズCL1によってサンプル上に線集光されたラインイメージを再び結像する。この位置では、THzパルスの波面は平面波と見なせるため、ここに電気光学結晶を配置してプローブパルスと共に非共軸入射すると、平面波同士(THzパルスとプローブパルス)の時間−空間変換が行われることになり、時間軸イメージの歪みが発生しない。

[0078] 一方、図13の光学系では、空間軸イメージを電気光学結晶上に結像するためには、ラインイメージ結像位置(Top View)から離れた位置に電気光学結晶を配置せざるを得ない。この位置ではTHzパルスの波面はもはや平面波ではなく球面波となる。その結果、THzパルス球面波とプローブパルス平面波による時間−空間変換が行われ、時間軸イメージが歪むのは図1の測定原理から自明である。

実施例 4

[0079] 次に、図18に本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成C(高空間分解能イメージング用の配置)を示す。本実施例の光学系配置は、測定対象物の2次元時空間THzイメージ(図7)を高い空間分解能で検出するための光学系配置である。平凸円筒レンズCL1によってサンプルに線集光され反射したTHzパルスはCL1によってコリメートされ、平面波の状態で空間を伝搬する。ここでこれまで用いてきたTHz結像光学系を省略して、THzパルスは直接プローブパルス光と共に電気光学結晶に非共軸入射される。その結果、平面波として空間伝搬していたTHzパルスの空間分布が電気光学効果を介してプローブパルス光に転写される。

このプローブパルス光を結像レンズL3で結像すると、CCDカメラ上に2次元時空間THzイメージを再現できる。

[0080] 一方、図13及び図17の配置では、まずTHzパルスをTHz結像レンズによって電気光学結晶上に結像する。その結像イメージを電気光学効果によってプローブパルス光に転写した後、結像レンズL3によってプローブパルス光をCCDカメラ上に結像する。このように、2回の結像プロセスを経て2次元時空間THzイメージ信号が取得される。

[0081] 一般に、電磁波の波長が長ければ長いほど回折の効果は大きくなりそれに伴い空間分解能が低下する。図13及び図17の配置では、電気光学結晶上のTHzイメージ結

像時にTHz波回折による空間分解能の低下が起こる可能性がある。一方、図18の配置では、THzイメージ結像プロセスを省略し直接プローブパルス光によって結像しているため、THz波回折による空間分解能低下の影響を受けず、高い空間分解能が期待できる。また、THzパルスが平面波として伝搬している状態で電気光学結晶による時間-空間変換が行われるため、図17と同様、時間軸の歪みも発生しない。

実施例 5

[0082] 図19に本発明に係る高感度バランス検出をおこなう検光部の構成を示す。図19に示すように、電気光学結晶(図示せず)とCCDカメラの間に、1／4波長板(λ/4)とビーム変位プリズム(BD)を配設する。偏光子Pによって直線偏光にされたプローブパルス光は、電気光学結晶を通過後、1／4波長板によって円偏光に変換される。円偏光の垂直偏光成分と水平偏光成分は、ビーム変位プリズムによって空間的横ずらしを受け、2つの平行ビームとして出射される。これらを結像レンズL3によって同一CCDカメラの異なる部位に結像する。THzパルスが電気光学結晶に入射されていない場合には、垂直偏光ビーム及び水平偏光ビームは全く同じイメージを結像することになるので、コンピュータで両イメージを空間的に重ね合わせて差分イメージを取ると(バランス検出イメージング)、垂直偏光ビーム及び水平偏光ビームの各バックグラウンド・ノイズ光が相殺され、信号は検出されない。

[0083] また、図20に示されるような検光部の構成を取ることも可能である。図20に示されるように、電気光学結晶(図示せず)とCCDカメラの間に、1／4波長板(λ/4)と偏光ビームスプリッター(PBS)を配設する。偏光子Pによって直線偏光にされたプローブパルス光は、電気光学結晶を通過後、1／4波長板によって円偏光に変換される。円偏光の垂直偏光成分はPBSで反射され、水平偏光成分はPBSを透過する。透過および反射の両ビーム光は、2組の結像レンズ(L3、L4)とCCDカメラ(CCD1,CCD2)のペアを用いて、垂直偏光イメージ及び水平偏光イメージとして検出される。THzパルスが電気光学結晶に入射されていない場合には、垂直偏光イメージ及び水平偏光イメージは全く同じイメージを結像することになるので、コンピュータで両イメージを空間的に重ね合わせて差分イメージを取ると(バランス検出イメージング)、垂直偏光イメージ及び水平偏光イメージの各バックグラウンド・ノイズ光が相殺され、信号は検出され

ない。

[0084] 一方、THzパルスを電気光学結晶に入射すると、電気光学効果による複屈折のため、円偏光が楕円偏光化され、差分イメージ信号がバックグラウンド・ノイズ光フリーの状態で高感度に検出可能となる。このようなバランス検出イメージングにより、光バイアス印加による電気光学効果効率の増大、電気光学結晶内多重散乱によるバックグラウンド・ノイズ光の除去、レーザーパルス強度揺らぎ影響の除去といったことが可能となり、THzイメージング検出の大幅な高感度化が可能となる。

上述の実施例2～4の実時間THzパルス計測装置の構成の検光部を、この高感度バランス検出をおこなう検光部に置き換えることにより、大幅な高感度化が可能である。これは、以下の実施例6～8についても同様である。

実施例 6

[0085] 図21に本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成D(透過1次元結像の基本配置)を示す。

電気光学結晶に照射されるTHzパルスとプローブパルス光を非共軸に配置した図6の構成で、測定対象物の前後に平凸円筒レンズ(平凸シリンドリカルレンズ)CL1, CL2を設け、これを用いてTHzパルスを線集光(ラインビーム)で測定対象物に照射し、その透過光を結像光学系(結像レンズL2)で電気光学結晶(ZnTe)上に結像させることにしている。2次元イメージングデバイス(CCDカメラ)の画像の1軸を、シングルショットでのTHzパルスの時系列波形の計測用として用い、他方の1軸を、測定対象物を線集光(ラインビーム)で透過したTHzパルスの1次元イメージング用として用いる。THzパルスの時系列波形を図示しない分光イメージング部で高速フーリエ変換することにより、シングルショットのテラヘルツ分光イメージング装置を実現できる。

実施例 7

[0086] 図22に本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成E(イメージの時間軸歪みを補正した光学系配置)を示す。本実施例の光学系配置は、測定対象物の空間軸情報及び時間情報(深さ分布)を歪みなく電気光学結晶に結像するための光学系配置である。

4個の平凸円筒レンズCL1, CL2, CL3, CL4を、それぞれ測定対象物照射用, 透

過光コリメート用、空間軸結像用，時間軸結像用として用い、平凸円筒レンズCL3とCL4のレンズの長手方向が直交するように配設されている。

[0087] ここで、図22のTop Viewは時間軸方向（図7の水平軸方向）の結像状態を、Side Viewは空間軸方向（図7の垂直軸方向）の結像状態を示していることになる。したがって、平凸円筒レンズCL3は空間軸方向に対してのみ結像レンズとして機能する。一方、平凸円筒レンズCL4は時間軸方向に対してのみレンズとして機能し、この場合は平凸円筒レンズCL1によってサンプル上に線集光されたラインイメージを再び結像する。この位置では、THzパルスの波面は平面波と見なせるため、ここに電気光学結晶を配置してプローブパルスと共に非共軸入射すると、平面波同士（THzパルスとプローブパルス）の時間−空間変換が行われることになり、時間軸イメージの歪みが発生しない。

[0088] 一方、図21の光学系では、空間軸イメージを電気光学結晶上に結像するためには、ラインイメージ結像位置（Top View）から離れた位置に電気光学結晶を配置せざるを得ない。この位置ではTHzパルスの波面はもはや平面波ではなく球面波となる。その結果、THzパルス球面波とプローブパルス平面波による時間−空間変換が行われ、時間軸イメージが歪むのは図1の測定原理から自明である。

実施例 8

[0089] 図23に本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成F（高空間分解能イメージング用の配置）を示す。本実施例の光学系配置は、測定対象物の2次元時空間THzイメージ（図7）を高い空間分解能で検出するための光学系配置である。平凸円筒レンズCL1によってサンプルに線集光され透過したTHzパルスはCL2によってコリメートされ、平面波の状態で空間を伝搬する。ここでこれまで用いてきたTHz結像光学系を省略して、THzパルスは直接プローブパルス光と共に電気光学結晶に非共軸入射される。その結果、平面波として空間伝搬していたTHzパルスの空間分布が電気光学効果を介してプローブパルス光に転写される。このプローブパルス光をレンズL3で結像すると、CCDカメラ上に2次元時空間THzイメージを再現できる。

[0090] 一方、図21及び図22の配置では、まずTHzパルスをTHz結像レンズによって電気光学結晶上に結像する。その結像イメージを電気光学効果によってプローブパルス光

に転写した後、結像レンズL3によってプローブパルス光をCCDカメラ上に結像する。このように、2回の結像プロセスを経て2次元時空間THzイメージ信号が取得される。

[0091] 一般に、電磁波の波長が長ければ長いほど回折の効果は大きくなりそれに伴い空間分解能が低下する。図21及び図22の配置では、電気光学結晶上のTHzイメージ結像時にTHz波回折による空間分解能の低下が起こる可能性がある。

[0092] 一方、本実施例(図23)の配置では、THzイメージ結像プロセスを省略し直接プローブパルス光によって結像しているため、THz波回折による空間分解能低下の影響を受けず、高い空間分解能が期待できる。また、THzパルスが平面波として伝搬している状態で電気光学結晶による時間−空間変換が行われるため、図24と同様、時間軸の歪みも発生しない。

産業上の利用可能性

[0093] 本発明に係る実時間テラヘルツ・トモグラフィーは、動体サンプルの非破壊検査や生体診断に利用可能である。また、橋梁を始めとした屋外構造物の高所箇所など検査に危険を伴う部位の内部構造欠陥や剥離を、遠隔から非接触モニターできるセンサーシステムとしても利用可能である。一方、テラヘルツ分光イメージング装置は、従来の内部透視手段(X線、超音波他)に替わる成分分析型内部透視手段として、リアルタイム性を必要とされる非破壊検査, 空港手荷物検査における爆発物(プラスチック爆弾・引火性液体他)、郵便封書内の禁止薬物(麻薬・覚醒剤他)の検出などに利用できる。

図面の簡単な説明

[0094] [図1]本発明に係る実時間THzパルス計測装置の原理図を示す。

[図2]2次元イメージングデバイス(CCDなど)で得られる画像イメージの模式図を示す。

[図3](1)測定対象物が厚さの異なる構造を持つ場合における入射光と透過光の模式図を示す。(2)測定対象物が2層の内部構造を持つ場合における入射光と反射光(エコーパルス)の模式図を示す。

[図4]THzパルスとプローブパルス光のそれぞれの波面の重なりが空間的(h−axis方向)に同じ位置を保ったまま結晶中を伝播していく様子を模式図(1)～(4)に示す。

[図5]測定時間窓(ΔT)と電気光学結晶に入射するTHzパルスとプローブパルス光のそれぞれの光軸のなす角度(θ)の相関グラフを示す。

[図6]本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成図を示す。但し、測定対象物にTHzパルスを線集光する円筒レンズは除いている。

[図7]CCDカメラで取得したTHzパルス波形イメージ(バックグラウンド光除去後)を示す。

[図8]CCDカメラから得られた2次元イメージング画像情報から変換したTHzパルス時間波形分布を示す。

[図9]シングルラインaで切り出したTHzパルス時間波形分布を示している。

[図10]THzパルス時間波形分布をフーリエ変換することにより、得られた振幅スペクトルを示す。

[図11]THzパルス時間波形分布をフーリエ変換することにより、得られた位相スペクトルを示す。

[図12]THzパルスの時間波形分布イメージをフーリエ変換して、振幅、位相スペクトルによる成分分析を行うメカニズムを説明する模式図である。

[図13]本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成A(基本配置)を示す。

[図14]移動する測定対象物にTHzパルスを照射する様子を表した模式図を示す。

[図15]テラヘルツ・トモグラフィー装置の構成Aで、測定対象物を移動させながら、CCDカメラで取得したTHzパルス波形イメージ(塗装膜測定結果)を示す。

[図16]速乾性黒アクリル塗装をアルミ板に施したサンプルを用いて、塗装前後の2次元断層イメージを測定した結果を示す。(a)～(i)は1分毎の2次元断層THzイメージを示している。

[図17]本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成B(イメージの時間軸歪みを補正した光学系配置)を示す。

[図18]本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成C(高空間分解能イメージング用の配置)を示す。

[図19]高感度バランス検出イメージングをおこなう検光部の構成を示す。

[図20]高感度バランス検出イメージングをおこなう検光部の他の構成を示す。

[図21]本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成D(基本配置)を示す。

[図22]本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成E(イメージの時間軸歪みを補正した光学系配置)を示す。

[図23]本発明に係る実時間THzパルス計測装置の構成F(高空間分解能イメージング用の配置)を示す。

符号の説明

[0095] 1 THzパルス

2 プローブパルス光

3 電気光学結晶(EO結晶)

4 偏光子

5 検光子

6 2次元イメージングデバイス

8, 9 円筒レンズ(シリンドリカルレンズ)

10, 13 測定対象物(サンプル)

11, 14 入射光(THzパルス)

12 透過光(THzパルス)

15 反射光(エコーパルス)

20 フェムト秒パルスレーザ装置

21 ビームスプリッター

22 ポンプパルス光

23 プローブパルス光

24 交差ミラー

25, 26, 27, 28, 29 平面ミラー

30, 31 放物面ミラー

32 THzパルス発生部

33 電気光学結晶(EO結晶)

34, 35 平面ミラー

36 偏光子

37　検光子

38　結像レンズ

39　時間軸校正用ステージ

40　CCDカメラ

BS　:ビームスプリッター

CR　:コーナーリフレクター

P　:偏光子

A　:検光子

λ／4:1／4波長板

BD　:ビーム変位プリズム

CCD:CCDカメラ

ZnTe:テルル化亜鉛結晶(電気光学結晶)

CL1, CL2, CL3, CL4　:平凸円筒レンズ

L1, L2　:平凸レンズ

L3　:結像レンズ(CCDカメラ集光用レンズ)

請求の範囲

[1] レーザパルス光を発生するパルス光発生部と、

前記レーザパルス光と光伝導スイッチ(もしくは非線形光学結晶)によって発生させたテラヘルツ電磁波パルス(THzパルス)を測定対象物に照射させるTHzパルス照射用光学系と、

前記測定対象物を透過又は反射したTHzパルスを電気光学結晶に結像させるためのTHzパルス検出用光学系と、

前記THzパルスと同期したプローブパルス光を、前記電気光学結晶に照射するプローブパルス光照射用光学系と、

前記電気光学結晶を通過し、前記THzパルスの誘起複屈折率変化により偏光状態が変化した前記プローブパルス光の特定偏光成分を抽出する検光部とを備えたTHzパルス計測装置であって、

(1)前記電気光学結晶に照射される前記THzパルスと前記プローブパルス光を非共軸配置とし、

(2)前記THzパルス照射用光学系において、円筒レンズ(シリンドリカルレンズ)を用いて、THzパルスを前記測定対象物に線集光(ラインビーム)として照射させ、その透過又は反射したTHzパルスを電気光学結晶に結像させるための光学系の配置とし、

(3)前記検光部の検出器を2次元イメージングデバイスとし、得られた2次元イメージング画像の1軸をTHzパルスの時系列波形の計測用として用い、他方の1軸を線集光(ラインビーム)で照射された測定対象物の1次元空間情報の計測用として用いる、

ことを特徴とする実時間THzパルス計測装置。

[2] 請求項1において、前記THzパルス照射用光学系で用いられる円筒レンズが、測定対象物照射用, 空間軸結像用, 時間軸結像用として、少なくとも3個配設されることを特徴とする実時間THzパルス計測装置。

[3] 請求項1において、前記検光部と前記電気光学結晶の間に、1／4波長板とビーム変位プリズムもしくは偏光ビームスプリッターを配設し、該電気光学結晶を通過したプローブパルス光が垂直偏光成分と水平偏光成分に分離されバランス検出されること

を特徴とする実時間THzパルス計測装置。

[4] 請求項3において、前記検光部の2次元イメージングデバイスで検出されるプローブパルス光の垂直偏光成分と水平偏光成分の差分イメージを算出するTHzイメージ算出処理部がさらに設けられることを特徴とする実時間THzパルス計測装置。

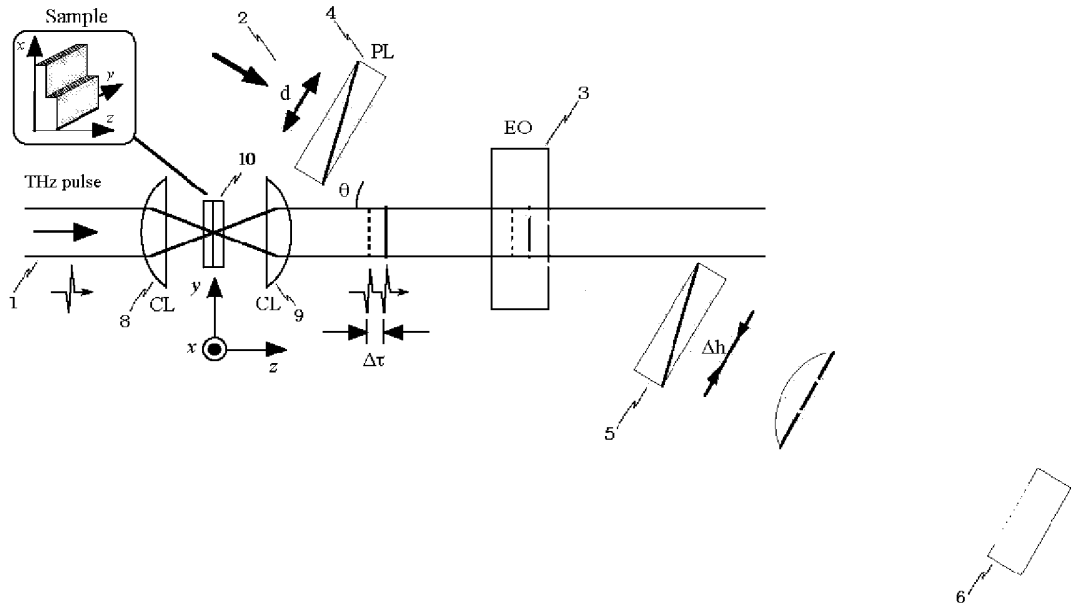
[5] 請求項1乃至4のいずれかにおいて、前記プローブパルス光照射用光学系に、前記電気光学結晶内での前記THzパルスと前記プローブパルス光の伝播速度が等しくなるように位相整合条件を調節する非共軸ビーム交叉角度調節部が設けられることを特徴とする実時間THzパルス計測装置。

[6] 請求項1乃至5に記載のいずれかの実時間THzパルス計測装置において、計測されたTHzパルスの時系列波形をフーリエ変換することにより、振幅スペクトル及び／又は位相スペクトルを演算し表示する分光イメージング部を設けたことを特徴とする実時間テラヘルツ分光イメージング装置。

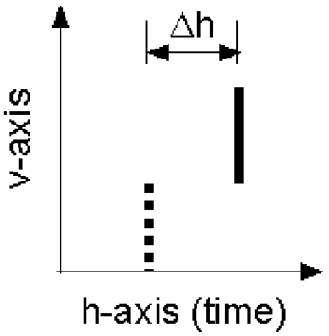
[7] 請求項6において、前記分光イメージング部が所定の周波数毎に表示部を有し、各表示部が測定対象物の内部透過像に重ねて所定の周波数に対応した振幅及び／又は位相を表示することにより、成分分析型内部透視を行うことを特徴とする実時間テラヘルツ分光イメージング装置。

[8] 請求項1乃至5に記載のいずれかの実時間THzパルス計測装置において、得られた2次元時空間イメージ画像のTHzパルスの時系列波形の重なりから、測定対象物の断層イメージを演算し表示する断層イメージング部を設けたことを特徴とする実時間テラヘルツ・トモグラフィー装置。

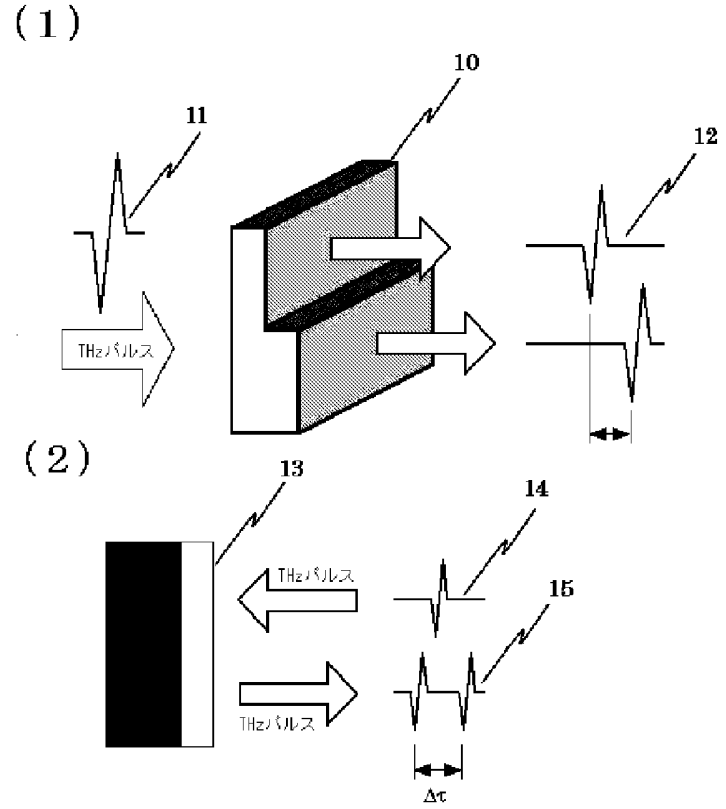
[図1]


Sample
x
y
z
2
4
PL
d
3
EO
10
θ
THz pulse
1
8
CL
y
x
z
CL
9
Δτ
Δh
5
6

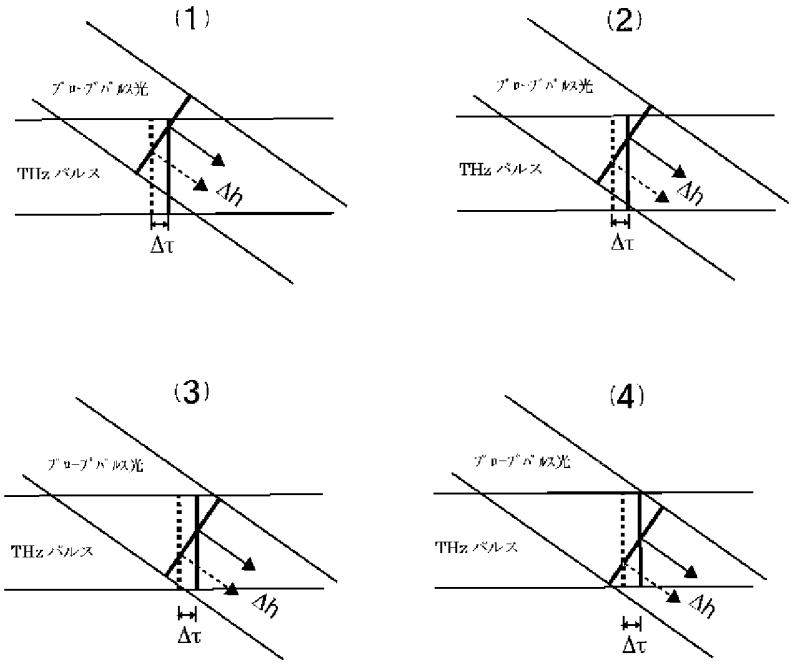
[図2]


Δh
v-axis
h-axis (time)

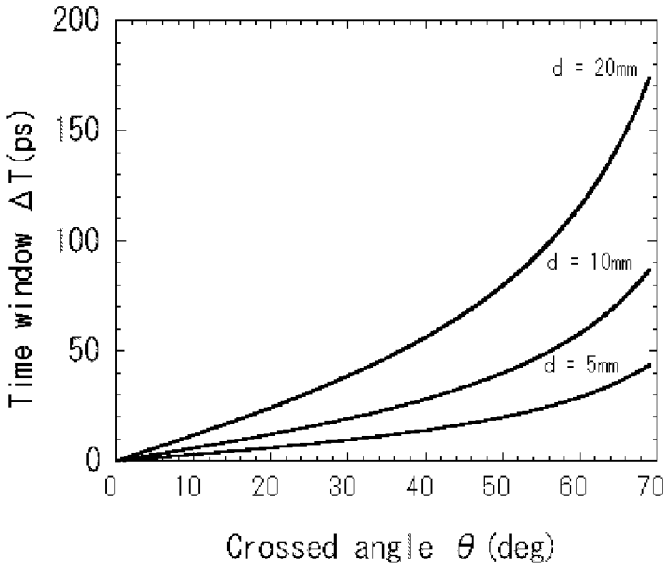
[図3]


(1)
10
11
12
THzパルス
(2)
13
14
15
THzパルス
THzパルス
Δτ

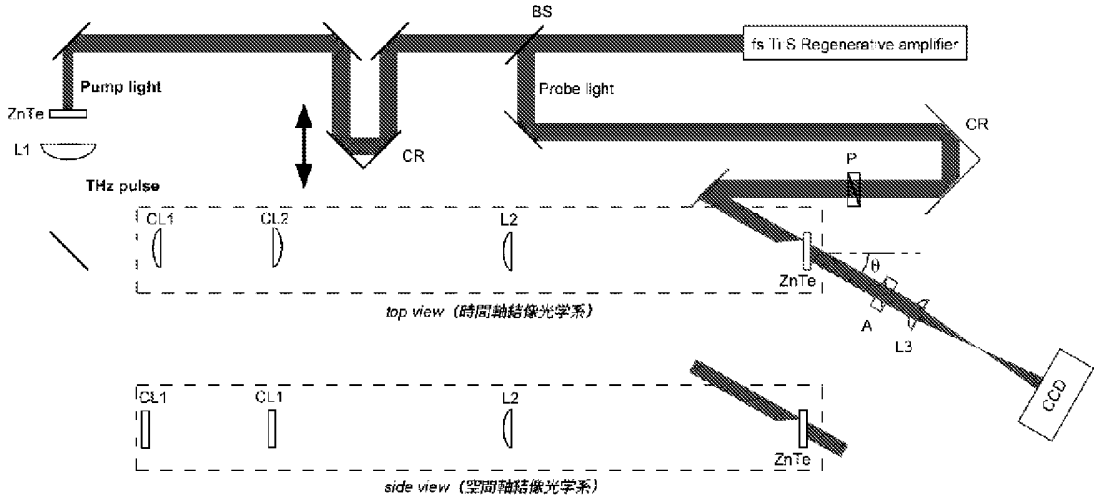
[図4]


(1)
プローブパルス光
THz パルス
Δh
Δτ
(2)
プローブパルス光
THz パルス
Δh
Δτ
(3)
プローブパルス光
THz パルス
Δh
Δτ
(4)
プローブパルス光
THz パルス
Δh
Δτ

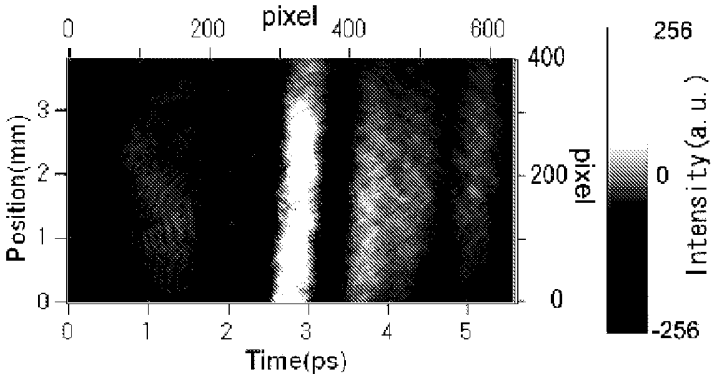
[図5]


Time window ΔT(ps)
Crossed angle θ (deg)
d = 20mm
d = 10mm
d = 5mm
0
50
100
150
200
0
10
20
30
40
50
60
70

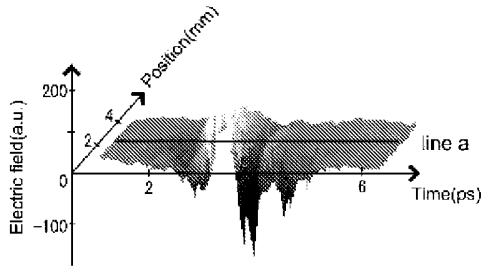
[図6]


BS
fs Ti:S Regenerative amplifier
Pump light
Probe light
ZnTe
L1
THz pulse
CR
CR
P
CL1
CL2
L2
ZnTe
θ
A
L3
CCD
top view (時間軸結像光学系)
CL1
CL1
L2
ZnTe
side view (空間軸結像光学系)

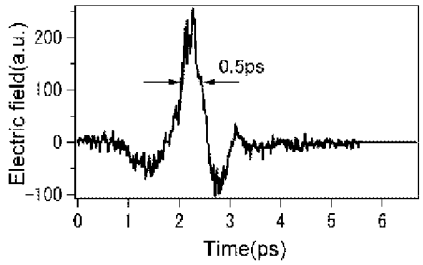
[図7]


pixel
0
200
400
600
Position(mm)
Time(ps)
pixel
Intensity(a.u.)
256
0
-256

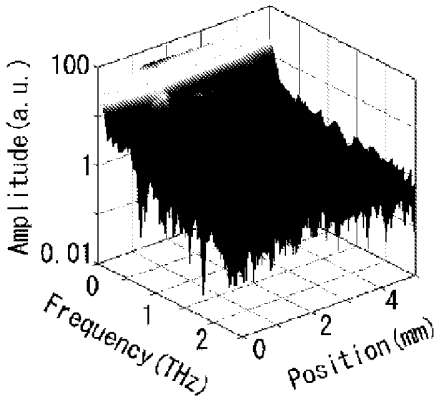
[図8]


Position(mm)
200
4
2
0
−100
Electric field(a.u.)
2
6
line a
Time(ps)

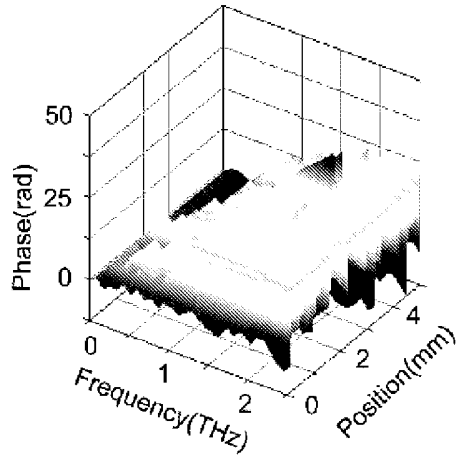
[図9]


Electric field(a.u.)
200
100
0
−100
0.5ps
0
1
2
3
4
5
6
Time(ps)

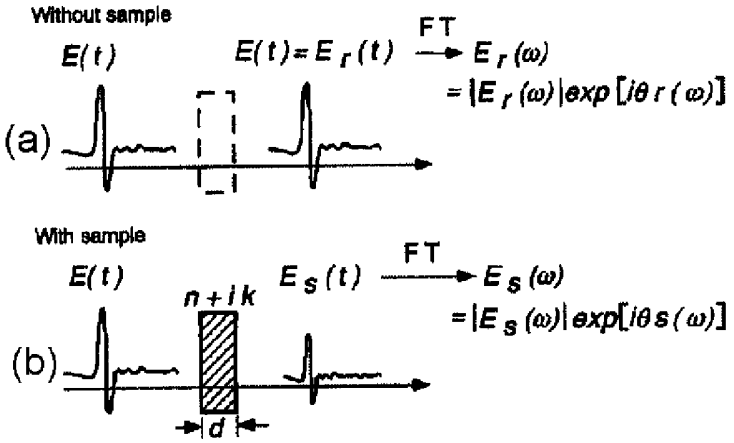
[図10]


Amplitude(a.u.)
100
1
0.01
0
1
2
Frequency(THz)
0
2
4
Position(mm)

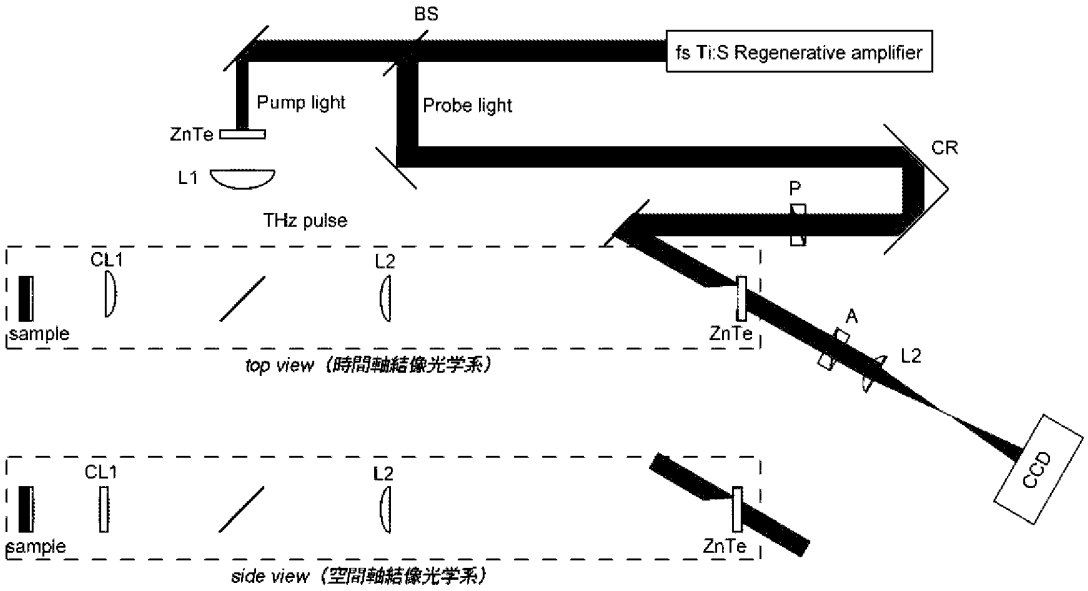
[図11]


Phase(rad)
50
25
0
0
1
2
Frequency(THz)
0
2
4
Position(mm)

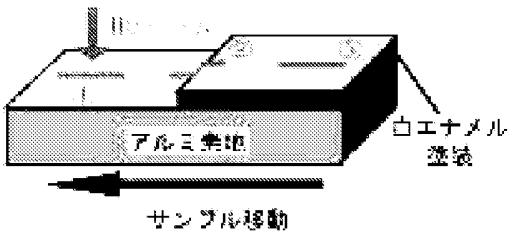
[図12]


Without sample
E(t)
E(t)=E r(t)
FT
E r(ω)
=|E r(ω)|exp[iθ r(ω)]
(a)
With sample
E(t)
n+ik
E s(t)
FT
E s(ω)
=|E s(ω)|exp[iθ s(ω)]
(b)
d

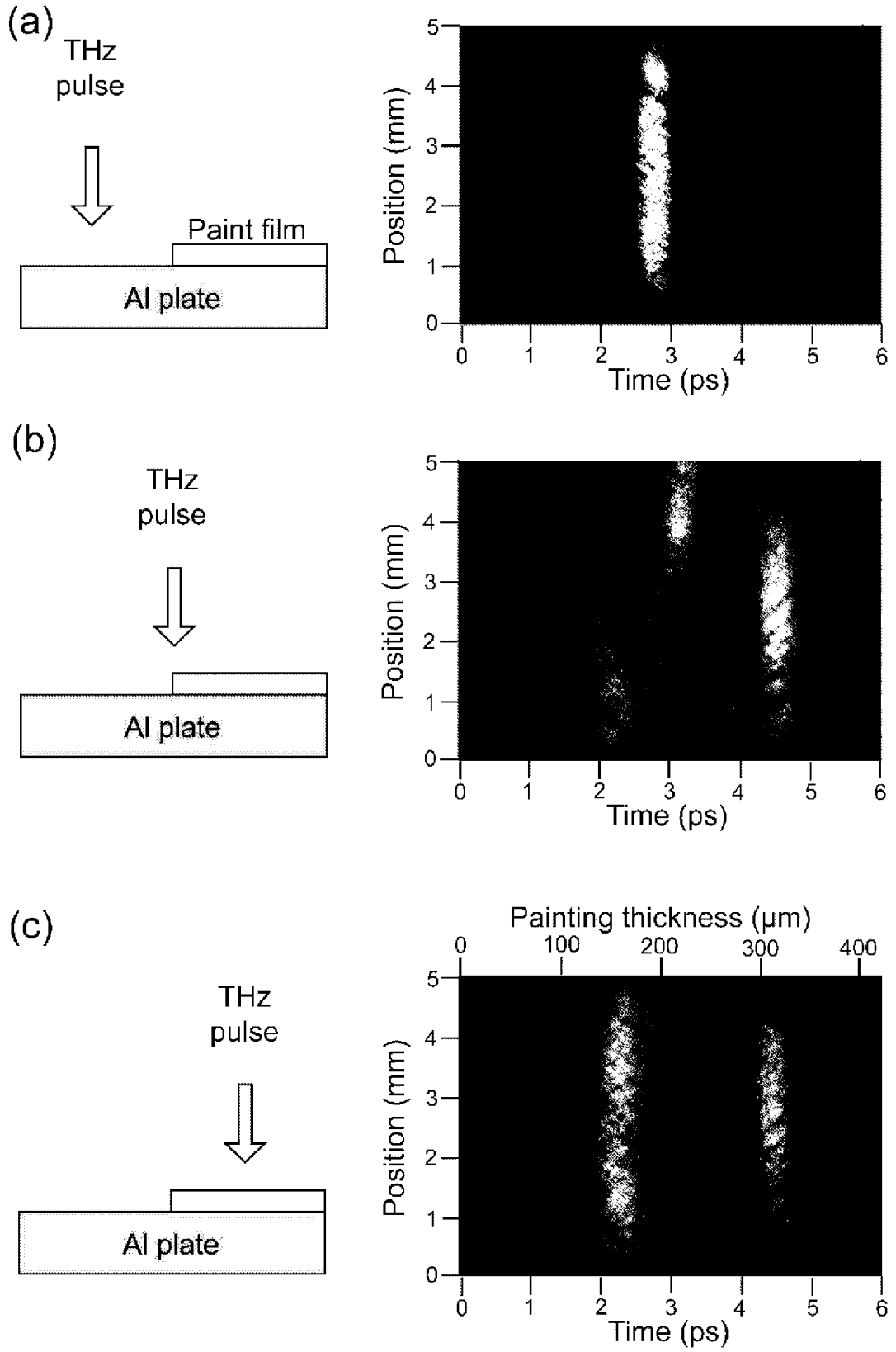
[図13]


BS
fs Ti:S Regenerative amplifier
Pump light
Probe light
ZnTe
L1
CR
P
THz pulse
CL1
L2
sample
ZnTe
A
L2
CCD
top view（時間軸結像光学系）
CL1
L2
sample
ZnTe
side view（空間軸結像光学系）

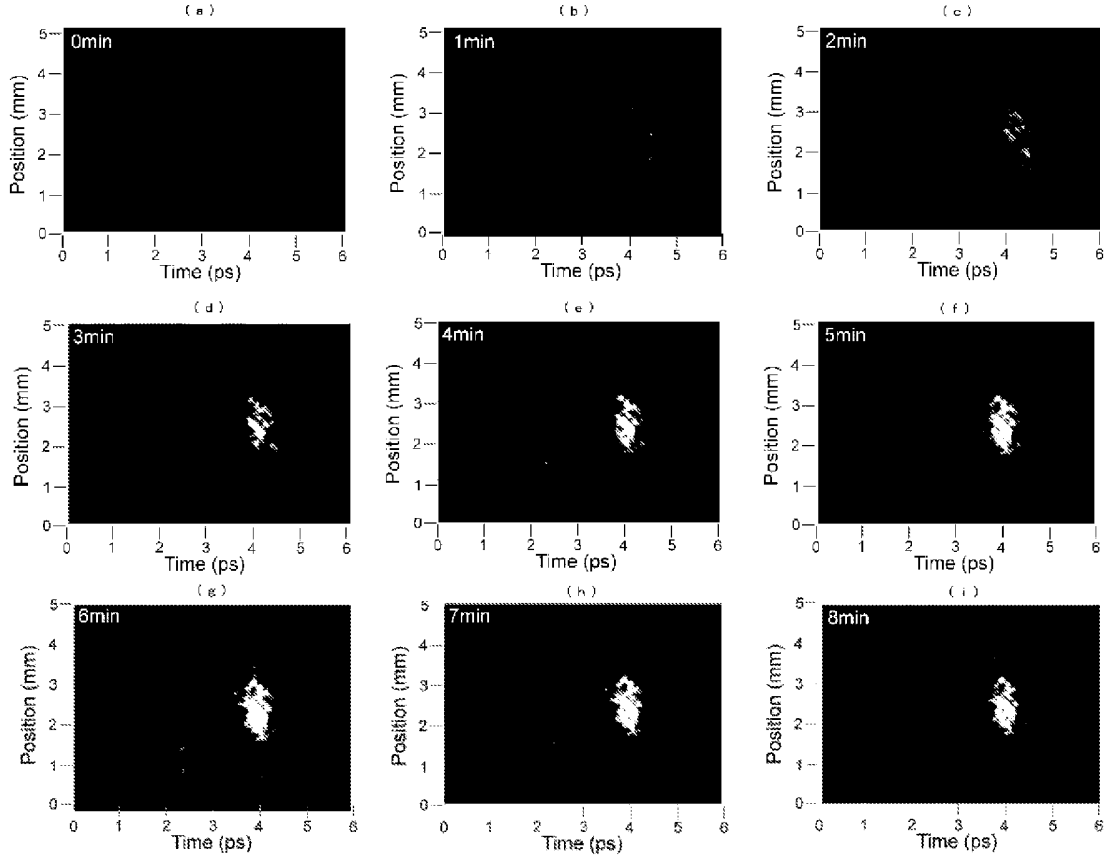
[図14]


アルミ基板
白エナメル
塗装
サンプル移動

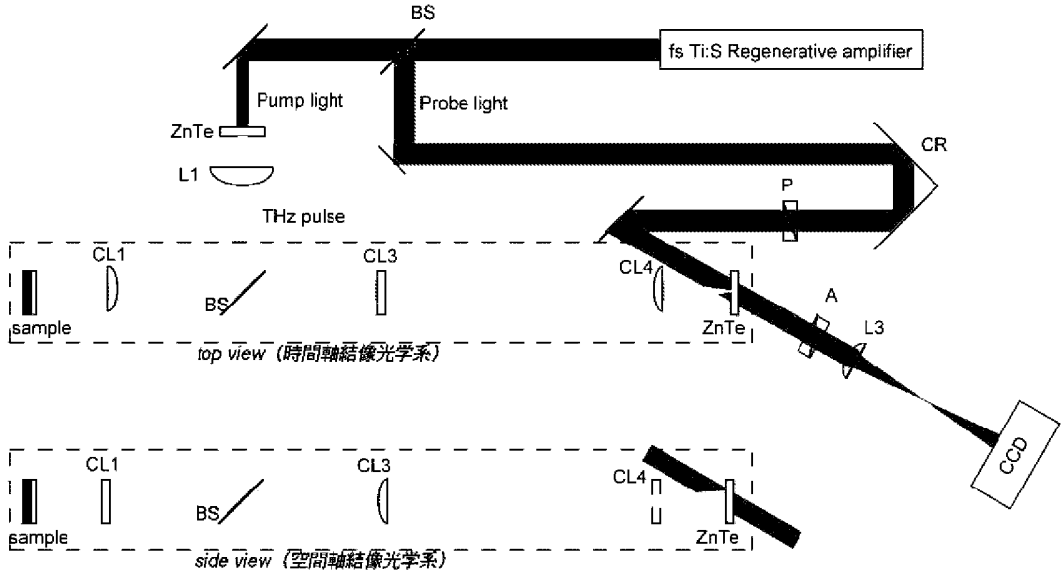
[図15]


(a)
THz
pulse
Paint film
Al plate
Position (mm)
Time (ps)
(b)
THz
pulse
Al plate
Position (mm)
Time (ps)
(c)
THz
pulse
Al plate
Painting thickness (μm)
0
100
200
300
400
Position (mm)
Time (ps)

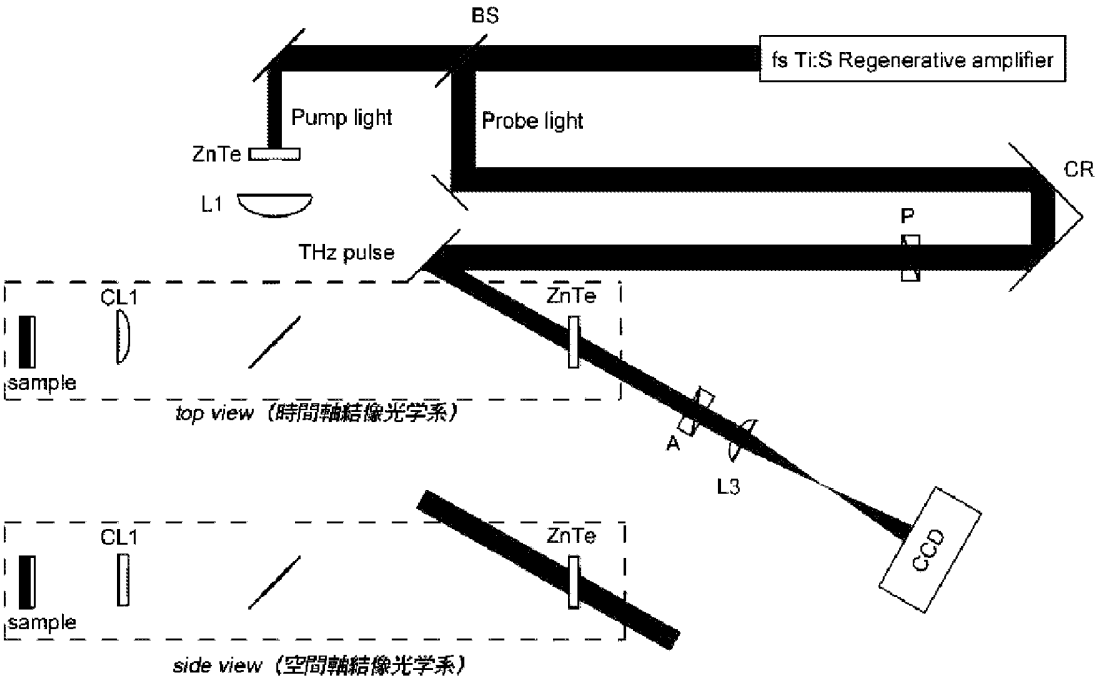
[図16]


(a)
0min
(b)
1min
(c)
2min
(d)
3min
(e)
4min
(f)
5min
(g)
6min
(h)
7min
(i)
8min
Position (mm)
Time (ps)

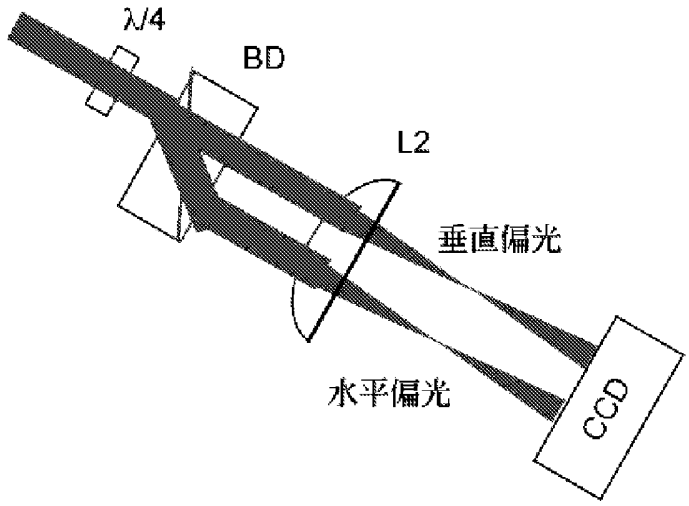
[図17]


BS
fs Ti:S Regenerative amplifier
Pump light
Probe light
ZnTe
L1
THz pulse
CR
P
CL1
CL3
CL4
BS
sample
ZnTe
A
L3
CCD
top view (時間軸結像光学系)
side view (空間軸結像光学系)

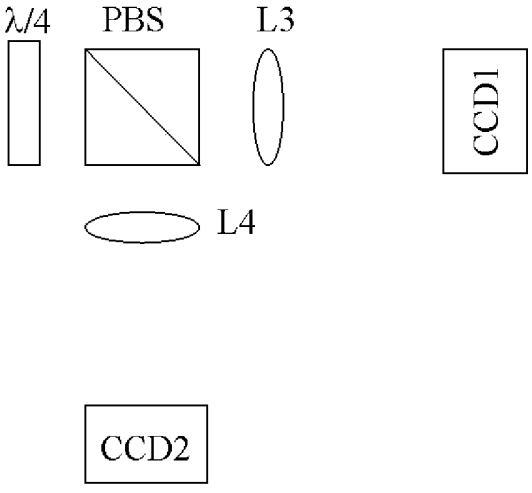
[図18]


BS
fs Ti:S Regenerative amplifier
Pump light
Probe light
ZnTe
CR
L1
P
THz pulse
CL1
ZnTe
sample
top view（時間軸結像光学系）
A
L3
CCD
CL1
ZnTe
sample
side view（空間軸結像光学系）

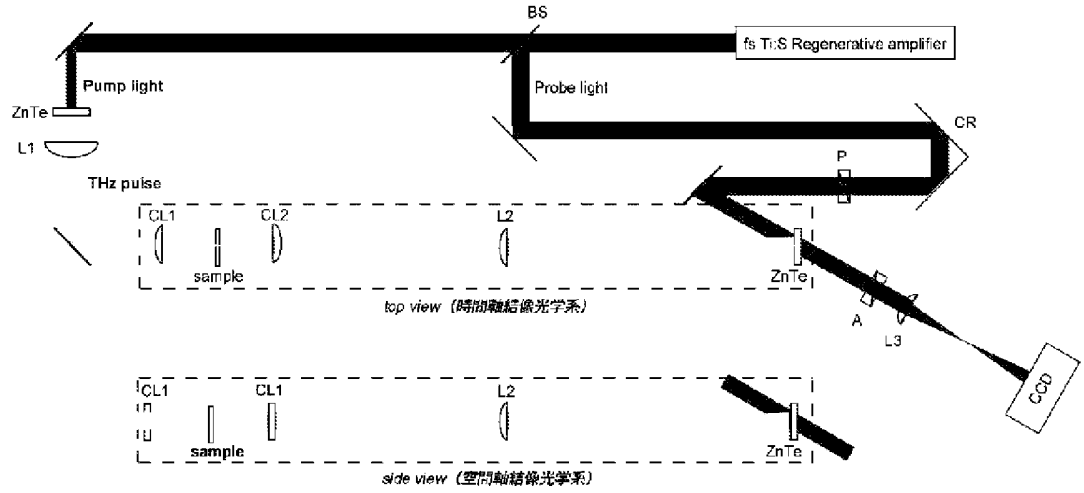
[図19]


λ/4
BD
L2
垂直偏光
水平偏光
CCD

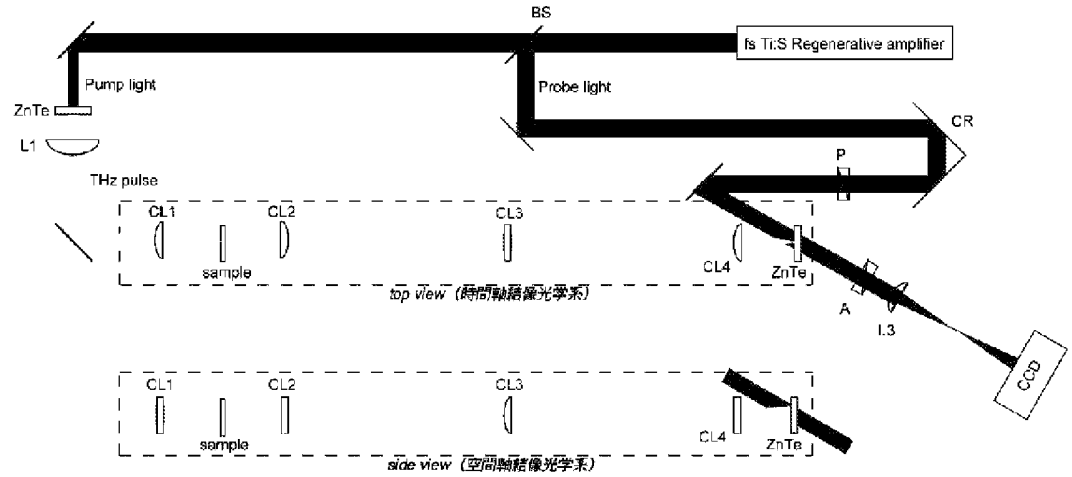
[図20]


λ/4
PBS
L3
CCD1
L4
CCD2

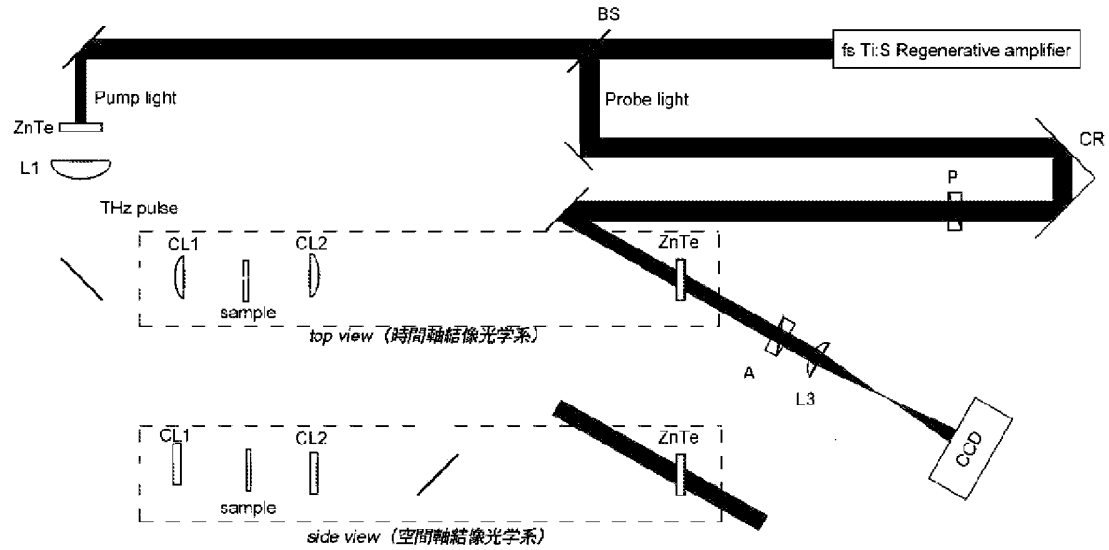
[図21]


BS
fs Ti:S Regenerative amplifier
Pump light
Probe light
ZnTe
L1
CR
P
THz pulse
CL1
CL2
L2
sample
ZnTe
top view (時間軸結像光学系)
A
L3
CCD
CL1
CL1
L2
sample
ZnTe
side view (空間軸結像光学系)

[図22]


BS
fs Ti:S Regenerative amplifier
Pump light
Probe light
ZnTe
L1
CR
P
THz pulse
CL1
CL2
CL3
sample
CL4
ZnTe
top view (時間軸結像光学系)
A
L3
CCD
CL1
CL2
CL3
sample
CL4
ZnTe
side view (空間軸結像光学系)

[図23]


BS
fs Ti:S Regenerative amplifier
Pump light
Probe light
ZnTe
L1
CR
P
THz pulse
CL1
CL2
ZnTe
sample
top view（時間軸結像光学系）
A
L3
CCD
CL1
CL2
ZnTe
sample
side view（空間軸結像光学系）

VIII-5-1	不利にならない開示又は新規性喪失の例外に関する申立て 不利にならない開示又は新規性喪失の例外に関する申立て(規則4.17(v)及び51の2.1(a)(v)) 氏名(姓名)	本国際出願 に関し、 国立大学法人大阪大学 は、本国際出願の請求項に記載された対象が以下のように開示されたことを申し立てる。
VIII-5-1(i)	開示の種類:	刊行物
VIII-5-1(ii)	開示の日付:	2004年 09月 01日 (01.09.2004)
VIII-5-1(iii)	開示の名称:	第６５回応用物理学会学術講演会　講演予稿集
VIII-5-1(iv)	開示の場所:	発行　社団法人応用物理学会
VIII-5-1(i)	開示の種類:	刊行物
VIII-5-1(ii)	開示の日付:	2004年 11月 04日 (04.11.2004)
VIII-5-1(iii)	開示の名称:	日本光学会年次学術講演会ＯｐｔｉｃｓＪａｐａｎ２００４講演予稿集
VIII-5-1(iv)	開示の場所:	発行　日本光学会
VIII-5-1(i)	開示の種類:	刊行物
VIII-5-1(ii)	開示の日付:	2004年 12月 01日 (01.12.2004)
VIII-5-1(iii)	開示の名称:	平成１６年度研究助成事業成果報告会予稿集
VIII-5-1(iv)	開示の場所:	発行　独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
VIII-5-1(v)	本申立ては、次の指定国のためになされたものである。:	すべての指定国

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2005/015868

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01N21/35(2006.01), ***A61B10/00***(2006.01), ***G01B11/02***(2006.01)

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)
G01N21/00-21/35(2006.01)

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 1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
WPI, IEEE, ScienceDirect, JSTPlus(JOIS),
Science Citation Index Expanded (Web of Science)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	Takeshi YASUI et al., "Terahertz Denjiha Pulse o Mochiita Kokino In-Process Toso Maku Monitoring-ho no Kaihatsu", Heisei 16 Nendo Kenkyu Josei Jigyo Seika Hokokukai Yokoshu Sangyo Gijutsu Kenkyu Josei Jigyo Heisei 14 Nendo Saitaku (Shuryo Bun nomi), Heisei 15 Nendo Keizoku Kenkyu, separate Vol.2, 2004 Nen 12 Gatsu, pages 80 to 85 (F-06)	1,8 2-7
Y	JP 2002-538423 A (Terapuroubu Ltd.), 12 November, 2002 (12.11.02), Par. Nos. [0016] to [0019], [0103] to [0106], [0130] to [0132]; Figs. 19, 24 & GB 2347835 A & WO 00/50859 A1	1-8

☒ 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	Date of mailing of the international search report
04 October, 2005 (04.10.05)	25 October, 2005 (25.10.05)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (January 2004)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2005/015868

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	J. Shan et al. "Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling", OPTICS LETTERS, Vol.25, No.6, 15 May, 2000 (15.05.00), pages 426 to 428	1-8
A	JP 2004-85359 A (Tochigi Nikon Corp.), 18 March, 2004 (18.03.04), Par. Nos. [0029] to [0052]; Figs. 1 to 7 (Family: none)	1

国際調査報告

国際出願番号 ＰＣＴ／ＪＰ２００５／０１５８６８

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.[7] ***G01N 21/35*** (2006.01), ***A61B 10/00*** (2006.01), ***G01B 11/02*** (2006.01)

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（ＩＰＣ））

Int.Cl.[7] ***G01N 21/00 - 21/35*** (2006.01)

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	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２００５年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２００５年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２００５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）

WPI, IEEE, ScienceDirect, JSTPlus(JOIS), Science Citation Index Expanded (Web of Science)

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	関連する請求の範囲の番号
X	**安井 武史 他, “テラヘルツ電磁波パルスを用いた高機能インプロセス塗装膜モニタリング法の開発”, 平成16年度研究助成事業成果報告会 予稿集 産業技術研究助成事業 平成14年度採択（終了分のみ）平成15年度継続研究, 第２分冊, 2004年12月, pp. 80-85 (F-06)**	1,8
Y		2-7

☑ 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 ０４．１０．２００５	国際調査報告の発送日 25.10.2005
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 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） 髙場　正光 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２９２

2W | 2910

様式ＰＣＴ／ＩＳＡ／２１０（第２ページ）（２００４年１月）

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	関連する請求の範囲の番号
Ｙ	JP 2002-538423 A (テラプロウブ　リミテッド) 2002.11.12 【0016】-【0019】, 【0103】-【0106】, 【0130】-【0132】, 図19, 24 & GB 2347835 A & WO 00/50859 A1	１－８
Ｙ	J. Shan, *et al.*, "Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling" OPTICS LETTERS, Vol.25, No.6, 2000.05.15, pp.426-428	１－８
Ａ	JP 2004-85359 A (株式会社栃木ニコン) 2004.03.18 【0029】-【0052】, 図1-7 (ファミリーなし)	１