

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5367298号
(P5367298)

(45) 発行日 平成25年12月11日(2013.12.11)

(24) 登録日 平成25年9月20日(2013.9.20)

(51) Int.Cl. F I
GO 1 N 21/35 (2006.01) GO 1 N 21/35 1 0 5

請求項の数 21 外国語出願 (全 36 頁)

(21) 出願番号	特願2008-103800 (P2008-103800)	(73) 特許権者	593185670
(22) 出願日	平成20年4月11日 (2008.4.11)		イムラ アメリカ インコーポレイテッド
(65) 公開番号	特開2009-8658 (P2009-8658A)		アメリカ合衆国 ミシガン州48105
(43) 公開日	平成21年1月15日 (2009.1.15)		アンアーバー ウッドリッジ・アベニュー
審査請求日	平成23年1月11日 (2011.1.11)		1044
(31) 優先権主張番号	60/907,639	(74) 代理人	100083806
(32) 優先日	平成19年4月12日 (2007.4.12)		弁理士 三好 秀和
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100095500
			弁理士 伊藤 正和
		(74) 代理人	100111235
			弁理士 原 裕子
		(72) 発明者	ジンゾウ シュー
			アメリカ合衆国 48105 ミシガン州
			アン アーバー ナタリー レーン 1
			411 ナンバー201
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ビーム走査式画像生成装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

連続波出力若しくはパルス出力として、コヒーレント若しくはインコヒーレントの電磁波を発生する電磁波発生源と、

前記電磁波の方向変換用光学系と、

入射ビームの角度変化を水平方向変化に角度変換する角度変換器と、

撮像対象の画像生成に用いるために、前記撮像対象の表面又は前記撮像対象の内部に前記電磁波を集束させ、且つ前記撮像対象から出射ビームとして出射する前記電磁波を集光する集束光学系と、

集光された前記電磁波を検出する電磁波検出器と、

を備え、前記電磁波の周波数範囲が1GHz~100THzの範囲に含まれ、

前記方向変換用光学系は3つの方向変換鏡を備え、前記集束光学系に向かう平行ビームとしての前記入射ビームと前記集束光学系から出射した平行ビームである前記出射ビームとの間の平行ビーム移動を補償するように、前記電磁波のビームの角度変化を前記集束光学系にもたらし、

前記角度変換はレンズ又は曲面鏡の焦点面で生じ、

前記撮像対象が前記集束光学系の焦点面の範囲内に配置され、

前記画像生成に用いられる前記電磁波は反射のスペクトル情報、又は反射方向における散乱、屈折若しくは回折のスペクトル情報を搬送する

ことを特徴とする画像生成装置。

【請求項 2】

前記撮像対象は前記電磁波を、前記電磁波の反射、散乱、屈折若しくは回折により放出し、かつ、該電磁波の放出により前記撮像対象が前記電磁波の発生源として機能することを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 3】

前記電磁波発生源が点源であり、前記電磁波検出器が点検出器であることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 4】

前記方向変換用光学系が、入射波ビームの角度変化をもたらし、かつ、単一又は多数の反射鏡を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

10

【請求項 5】

前記角度変換器が、一若しくは複数のレンズ又は一若しくは複数の曲面鏡を含むか、又は一若しくは複数のレンズと一若しくは複数の曲面鏡との組み合わせであることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 6】

前記集束光学系が、一若しくは複数のレンズ又は一若しくは複数の曲面鏡を含むか、又は一若しくは複数のレンズと一若しくは複数の曲面鏡との組み合わせであることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 7】

前記集束、前記集光及び前記角度変換が、同一のデバイスによって行われることを特徴とする請求項 6 に記載の画像生成装置。

20

【請求項 8】

前記集束光学系の光軸の方向の前記撮像対象の像を得るために、前記集束光学系が前記光軸に沿って前記撮像対象に対して相対運動することを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 9】

大形撮像対象のエリア毎の像を得るため、前記方向変換用光学系、前記角度変換器、前記集束光学系が動くことを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 10】

ビームスプリッタを使用して前記撮像対象からの前記電磁波がピックアップされることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

30

【請求項 11】

前記電磁波検出器前方の光学系又は光学システムが前記集束光学系であり、該集束光学系が平行化されたビームを点検出器に集束させるために使用されることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 12】

前記撮像対象内に位置する箇所が、前記電磁波を反射、散乱、屈折若しくは回折をすることにより電磁波を放出し、該電磁波の放出により前記撮像対象内に位置する箇所が、前記電磁波の点源として機能し、該点源の放射の角度分布が画像生成のために記録されることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

40

【請求項 13】

前記方向変換用光学系が、前記 3 つの方向変換鏡をそれぞれ駆動する 3 個の検流計を更に備えることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 14】

前記方向変換用光学系が、前記 3 つの方向変換鏡をそれぞれ駆動する 3 個の検流計を含む検流計機構を更に備え、

該検流計機構は、前記 3 つの方向変換鏡の内の第 1 と第 2 の方向変換鏡を、前記電磁波ビームの照射位置が前記 3 つの方向変換鏡の内の第 3 の方向変換鏡上の単一スポットに維持させるように駆動し、

前記第 3 の方向変換鏡を、前記単一スポットから出発する前記電磁波ビームを別の方向

50

に走査させるように駆動することを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 15】

前記方向変換用光学系が、前記集束光学系の焦点に対してわずかに変位していることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 16】

前記方向変換鏡が互いに同期されるため、前記方向変換用光学系後方の前記電磁波ビームは固定された方向を保っていることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 17】

前記電磁波の位相敏感コヒーレント検波がタイムドメインで使用されることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

10

【請求項 18】

スペクトル像が、前記タイムドメインでの測定によって生成されることを特徴とする請求項 17 に記載の画像生成装置。

【請求項 19】

前記電磁波が、レーザ光源の使用によって発生させられることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 20】

集光された画像生成のための情報が、前記画像生成装置のすべての活性デバイスの制御によって処理されることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【請求項 21】

20

前記周波数範囲は約 20 THz までであることを特徴とする請求項 1 に記載の画像生成装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本出願は 2007 年 4 月 12 日出願の米国仮出願第 60 / 907, 639 号を基礎とする優先権を主張すると共に、この米国仮出願を引用して本願の一部として含むものとする。

【0002】

本発明は画像生成技術しかも特に、テラヘルツ電磁波を使用した画像生成処理に関する。本発明は画像生成情報を走査・集光するために設計された装置である。

30

【背景技術】

【0003】

赤外線とマイクロ波との間に位置する周波数範囲の電磁波は最も最近開発されたスペクトル領域の 1 つである。この帯域はしばしばテラヘルツ (THz) 帯と称される。これらの電磁波はほとんどの無極性誘電体例えばプラスチック、紙、石、木材、油、煙等に対して透過性を有している。これによって THz 波画像生成は安全検査及び品質管理分野における X 線 / 超音波撮像を補完するものとして理想的なツールである。加えて、THz 波画像生成は撮像対象に関する分光情報をもたらし、これは撮像対象を識別するために使用することができる。THz 波画像生成は、THz 光子のエネルギーが非常に低く (meV)

40

【0004】

例えば M. ナス (Nuss) の米国特許第 5, 623, 145 号及び米国特許第 5, 710, 430 号に開示されたような THz 波画像生成技術はプラスチックを透視してその下にある金属電極をマッピングし得ることを実証した。それ以後に開発されたほとんどの THz 波画像生成装置は撮像対象を画像化するのにラスタ走査方式を使用している。電磁波源から放出された THz 放射は撮像対象の表面に集束されて、透過若しくは反射による撮像対象との相互作用の後、点検出器を使用して記録される。撮像対象は X - Y 面内の THz 波焦点をクロスして撮像対象を走査するか又はそれに代えて逆方向に撮像装置を走査することによって画像生成される。ラスタ走査は電磁波源から発生した THz 波をフルに利用し

50

、高い測定ダイナミックレンジをもたらすが、これは高輝度電磁波源及び高感度検出器の欠如が問題をもたらすTHzフィールドにおいて特に重要である。

【0005】

画像のラスタ走査には撮像対象又は撮像装置を全画像領域内で線形走査することが必要であるが、これは時間がかかるだけでなく面倒である。イメージ面でのTHzフィールドの分布を記録するのに、点検出器に代えて、2D拡張された検出器(例えば電気光学(EO)結晶)又は検出器アレイ(例えばマイクロボロメータアレイ)を使用する2D焦点面画像生成が、画像生成速度を改善するために開発された。一例が「THzビームの2次元電気光学イメージング(Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams)」, アプライド・フィジックス・レターズ(Appl. Phys. Lett.), 第69巻, p 1026 - 1028 (1996年)、Q. ウ等(Wu et. al.) 著、に報告されており、この場合、単一結晶EOセンサが広帯域THz波センサとして採用された。撮像対象全体を照らす高強度の広帯域THzビームはフェムト秒(fs)レーザ増幅器を使用し、光整流又は光スイッチング処理によって発生させられた。撮像対象のTHz波画像は画像生成レンズを使用して作成され、EO結晶はイメージ面に配された。拡張プロービングビームが、EO結晶上の撮像対象のTHz波画像であるTHzフィールド分布を読み出すのに使用された。

【0006】

検出器アレイ及び2D焦点面画像生成法も一定条件下でのcw THz放射用に開発された。一例が「マイクロボロメータ焦点面アレイを用いたリアルタイム連続波テラヘルツイメージング(Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array)」, オプティクス・レターズ(Opt. Lett.), 第30巻, p 2563 - 2565 (2005年)、A. W. リー等(Lee et. al.) 著、に報告されたが、この場合、中赤外線放射用に設計されたマイクロボロメータアレイが高THz周波数(2.52 THz)での2Dイメージを記録する性能を有することが実証された。その他の例はA. ルーカネン等(Luukanen et. al.)の米国特許第6, 242, 740号及びS. ホリー(Holly)の米国特許第6, 943, 742号である。

【0007】

ただし、従来の技術である2D焦点面THz波画像生成システムは限定された条件下でしか使用できない。とりわけ、これらの検出器アレイは限定された周波数範囲で感度を有するにすぎない。これらは又、検出器アレイの感度が低くかつ一度に多数のピクセルのTHz放射の希釈のせいで、点検出器よりも相対的にもっと高強度のTHz電磁波源を必要とする。そのため、拡張検出器又は検出器アレイを使用せずに画像生成速度を向上させるため、代替の方法が開発された。従来の技術であるP. トラン等(Tran et. al.)の米国特許第6, 909, 094号及び米国特許第6, 909, 095号は、イメージ面でのTHz波画像の受信に分布導波路技法を使用し、すべてのピクセルからの信号の連続的受信に点検出器を使用している。「テラヘルツ波可逆イメージング(Terahertz wave reciprocal imaging)」, アプライド・フィジックス・レターズ(Appl. Phys. Lett.), 第88巻, p 151107 (2006年)、J. スー等(Xu et. al.) 著は、相互的に焦点面イメージを供するために検出器アレイよりもむしろ電磁波源アレイを使用することを報告した。これらの技術はTHz波にとって使用できないか又は理想的ではない2D検出器アレイの使用を回避するが、導波路アレイ又は電磁波源アレイを使用する場合にもなおその他の難題がある。

【0008】

J. フェデリッチ(Federici)の米国特許第6, 815, 683号は、干渉画像生成技法をマイクロ波領域からTHz領域まで適合させた。この技法は、若干の検出器のみを使用するだけで、画像生成レンズを使用せず、撮像装置又は撮像対象を動かさずに大形のTHz波画像生成を供する見込みがある。他方、この技法は、集光光学系がこの技術では許容されないことから、非効率な形でTHz放射を使用する。

【0009】

分布検出又は放出素子を使用する技術に比較して、ラスタ走査法はなおTHz放射に主

10

20

30

40

50

として使用されている画像生成法であるが、それはこれがより高い測定ダイナミックレンジをもたらすと共により優れた画質を与え、しかもあらゆる種類のTHz波電磁波源と検出器にとって利用可能だからである。

【0010】

THz波ラスタ走査イメージの速度を向上させるためにも努力が傾注されてきた。一例はB. コール等(Cole et al.)の国際公開第02/057750号パンフレットに開示されており、この場合、THz波は限定された数の光学系(及びTHz光学系)のみを含んだ画像生成ヘッドに案内される。爾後の画像生成プロセスで走査されるのは撮像装置全体というよりもむしろ画像生成ヘッドであった。画像生成速度は改善されたが、それは走査量が減少したからである。

10

【0011】

目下利用可能なTHz波の検出能は、他の十分に開発された波長範囲分野と同等な形でこれらの電磁波を画像生成デバイスに使用するには十分ではない。さらに、検出能問題を克服する強力な電磁波源の欠如も厳しい局面を呈している。又、未成熟な電磁波源技術もこの電磁波を他の技法に適合するように処理する点で難点をもたらす。結果として、撮像対象からの散乱光の検出は、強力な電磁波源の欠如からして、実際的な方法ではない。同じく、弱い電磁波源の検出能を高めるための変調技術の実現も電磁波源を取り巻く技術が未成熟な点からして可能性がない。効果的な画像生成システムの考察に当たって画像生成速度はもう一つの要因である。

【発明の開示】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

目下、実用的な感度と速度を実現するための技術的思想を開示した、広帯域THz周波数例えば1GHz~100THzの周波数範囲における画像生成装置のための従来技術は知られていない。本発明はこれら2つの主要点に、10GHz~3THzの周波数範囲の電磁波を使用して撮像対象の各々のスポットを通して横向きにTHzビームを走査することによるイメージの二次元ラスタ走査を主眼とした代表的な一実施形態によって対処する。

【課題を解決するための手段】

【0013】

30

本発明は走査式画像生成システム、特にTHz波画像生成システムに向けられている。~1THzを中心としたパルスTHz波による撮像対象のラスタリングが代表的な一実施形態として開示されるが、周波数範囲はおおよそGHz~100THzの範囲にあってよい。実施形態によっては1GHz~約10THzの周波数範囲を使用することができる。その他の実施形態は約1GHz~約20THzの周波数範囲を使用することができる。対応する波長は少なくとも数十ミクロン例えば約20ミクロンまでであってよい。本THz波撮像装置のTHz電磁波源はコヒーレント若しくはインコヒーレントに生成されてよいであろう。

【0014】

電磁波源は超高速光整流を利用したTHzパルス又は超短パルスレーザと組み合わせられた光スイッチであってよい。さらに、本発明には連続THz電子トランスミッタ、THz波レーザ又はインコヒーレント熱エミッタも含まれる。

40

【0015】

他方、検出方式において、光伝導スイッチ、電気光学サンプル、ボロメータ検出又はその他のデバイスを本発明に含めることができる。しばしばコヒーレント検波と称される位相敏感検波につき、パルス波と連続波の双方を、検出技法に熱雑音の抑止を使用するため、本発明に組み込むことができる。高速画像生成のため、比較的応答速度の高いタイムドメイン点検出器が代表的な一実施形態として開示される。

【0016】

撮像対象又は撮像装置を線形走査する代わりに、ミラー/レンズ・セットが撮像対象の

50

各々のスポットを横切ってTHzビームを方向変換するために使用される。この方向変換鏡セットは、300Hzまで（ジグザグ走査モードにて1秒当たり600ラインまで）のライン走査速度を保持する検流計（又は2D走査のための一对の検流計）を使用して駆動可能である。この速度は実時間画像生成用途にとって十分である。特に、入射ビームは平行化され、方向変換鏡は集束レンズの焦点に交点が位置する2本の軸を中心にして回転可能である。撮像対象は画像生成レンズの反対側の焦点面に位置し、レンズの光軸に対して垂直をなしている。この条件下で、THzビームは撮像対象によって逆反射され、THz放射のすべてが画像生成プロセスに使用されることになる。

【0017】

画像生成波は主として反射又は透過によって得られる。ただし、反射方向に対して生じた散乱又は屈折を用いることが可能である。別法として、本発明は受動画像生成方式に使用することが可能であり、その場合、入射THz放射は必要とされず、ミラー/レンズ・セットは画像生成システムに含まれていない外部電磁波源から放出又は反射されたTHz放射を撮像対象の各々のスポットから点検出器に方向変換するために使用される。

【0018】

反射、透過、放出、屈折及び散乱によって搬送されるスペクトル情報はタイムドメイン測定によって解析される。

【発明を実施するための最良の形態】

【0019】

図1は本発明の代表的な実施形態を表している。THz入射ビーム10は方向変換鏡20によって案内されて集束レンズ30に入射し、レンズ30によって撮像対象40に集束される。方向変換鏡20は回転して撮像対象の表面のさまざまな位置（101、102及び103等々）に焦点を走査する。撮像対象と相互作用（透過又は反射）したTHzビームは集光されて、点検出器に供給される。撮像対象の像は方向変換鏡20を回転させることによって生成される。集束レンズ30はポリエチレン、シリコン等を使用して作製できる。

【0020】

さらに、撮像対象位置を適切に調整して、曲面鏡例えば放物面鏡を前記レンズに代えて組み込むことも可能である。

【0021】

図2aは本発明の重要な一実施形態を示しており、この場合、平行化されたTHzビーム10はミラー・レンズ系に入射し、このミラー・レンズ系はレンズ30の1焦点で方向変換鏡20の回転軸と交差している。平行化されたTHzビーム10は前記焦点から到来するので、レンズ30は前記ビームを通常、反対側の焦点面に集束させる。撮像対象40は前記焦点面に位置している。それゆえ、撮像対象の表面の各々のスポットは入射角の関数である。THzビームが撮像対象によって正反射される（これは、THz波が例えば少なくとも数十マイクロメートルの長い波長を有しているため、ほとんどの場合に当てはまる）場合には、反射ビームカウンタは入力ビームと共に伝搬する。結果として、電磁波源から送出される放射全体が撮像対象を画像化するために利用可能である。図3はTHz波電磁波源と検出器とを有したこの実施形態の使用を示す概略図である。THz波トランシーバ60がTHz波の送受信に使用できる。THz波集束光学系例えば放物面鏡50は送出THz波を平行化するために使用されると共に、同じこの光学系を反射THz波を集光するために使用することができる。

【0022】

図2aに示した実施形態は図2bに示したような透過方式でも動作することができる。図2bにおいて、受信ミラー・レンズ系（20a及び30a）は撮像対象40の反対側に配置されており、入射系（20及び30）に対応している。受信側の方向変換鏡20aは入射側方向変換鏡20のスレーブとして機能する。その回転は入射方向変換鏡20に同期されている。結果として、方向変換鏡20aを経て受信されるTHzビームは平行化され、あらゆる回転角度において同一の伝搬方向を維持し、固定された検出器で撮像対象の表

10

20

30

40

50

面のどのスポットを透過したTHzビームも受信することができる。

【0023】

もう一つの興味深い技術的思想は、入射光が撮像対象自体からの放射に替えられる場合の、点源からの放射の放射角度分布の測定である。

【0024】

さらに、集光光学系と同一の集束レンズが光軸に沿って可動するため、画像化される情報は撮像対象の表面又は、撮像対象が十分な透過性を有していれば、撮像対象の内部で獲得することができる。

【0025】

画像化される電磁波の特性はこの代表的な実施形態に示した反射以上に拡張されることができる。集束光学系及び集光光学系のジオメトリが方向変換用光学系と共に前述したようにして実現される限り、撮像対象からの電磁波の発生はミラー方向に散乱させられるか又は、試料内又は試料上の構造によってミラー方向に回折又は屈折させることができる。撮像対象の表面及び撮像対象内部にランダムに分布しているナノ構造はこれが可能なシステムの一例である。

10

【0026】

上記及び爾後のあらゆる実施形態は受動画像生成方式で使用するために容易に修正可能である旨指摘しておかなければならない。最も単純な修正は単にトランスミッタをポイントレーザに置き換えることである。方向変換鏡20を回転させて、撮像対象40の各々のスポットから放出(反射)されたTHz放射は連続的にレーザに誘導されることになる。

20

【0027】

図2a及び図2bに示した実施形態における画像生成エリアの直径は以下の通りである。

【0028】

$$D_1 = 2 F \tan(\theta) \quad \dots \dots (1)$$

上記式中、Fは集束レンズ30の焦点距離であり、 θ は方向変換鏡20によって駆動される最大ビーム張り角を意味している。ほとんどの場合に、THzビーム張り角は方向変換鏡の回転角の2倍である。

【0029】

30

他方、最大イメージサイズも集束レンズのサイズとTHzビームのサイズによって制限される。図4において、実線で示した大きい方の円は集束レンズ30の境界を示しており、小さい方の空の円302は前記レンズ上のTHzビームである。図4には、集束レンズ上におけるTHzビームの最大オフセットが表されている。張り角がもっと大きければ、THzビームの一部は画像生成レンズの外側に位置することになる。破線で示した円301は画像生成レンズとTHzビームによって決定される最大画像生成エリアを示している。直径は以下の通りである。

【0030】

$$D_1 = D_L - D_B \quad \dots \dots (2)$$

上記式中、 D_L と D_B はそれぞれ集束レンズ30とTHzビーム302の直径である。

40

【0031】

この種のイメージの空間分解能はTHzビームの回折制限によって制限される。

【0032】

$$\lambda = F / D_B \quad \dots \dots (3)$$

上記式中、 λ は画像生成波の波長である。同一空間分解能と走査角を維持すると共に、より大きな画像生成エリアを得るには、レンズのサイズ、その焦点距離及び、レンズ上のTHzビームの直径を拡張することが必要である。

【0033】

図5a、5bは方向変換鏡走査機構20の2つの例を示している。図5aにおいて、1個の検流計202は反射器(方向変換鏡)201を駆動するために使用される。これはT

50

H z ビームの張りを一次元方向変換し、機構全体 (2 0 1、2 0 2 及び 2 0 3) は第 1 軸に対して垂直をなす第 2 軸 2 0 4 を中心にして回転させられる。これら 2 本の軸の交点は図 2 に示した集束レンズ 3 0 の焦点に位置している。2 D 走査も図 5 b に示した機構を使用して行うことができ、この場合、第 1 の検流計 2 0 2 a は T H z ビームを一次元に沿って走査し、第 2 の検流計 2 0 2 b は T H z ビームを直角方向に沿って走査する。

【 0 0 3 4 】

図 5 b に示した構成はよりコンパクトであり、いずれの走査次元でも自由に制御可能である。ただし、2 検流計編成はビーム走査装置に平行ビーム移動をもたらすことに注意しなければならない。図 6 a に示したように、それぞれ第 1 の方向変換鏡 2 0 1 a (実際にはそれは第 2 の方向変換鏡 2 0 1 b における第 1 の方向変換鏡 2 0 1 a の写像である) と第 2 の方向変換鏡 2 0 1 b とを供する 2 本の回転軸が存在する。第 1 のミラー (方向変換鏡) と第 2 のミラー (方向変換鏡) との間の真ん中に焦点を設定すると、T H z ビームは集束レンズの焦点から変位し、レンズ 3 0 上のその走査範囲は第 1 のミラーと第 2 のミラーを同一角度だけ走査する際に相異している。

【 0 0 3 5 】

図 6 b はある入射角での T H z ビームのビームトレースを示している。入射 T H z ビーム (1 0 a) が集束レンズ 3 0 の焦点を通過すれば、ビームはレンズ 3 0 によって正常に曲げられて、撮像対象 4 0 に入射する。この場合、撮像対象は入射ビームを逆反射する。入射ビーム (1 0 b) が焦点から H だけ変位して離間していれば、反射ビームは逆伝搬方向において焦点の反対側にあり、焦点に対して同じだけ変位して離間している。したがって、反射ビームは同じ集束光学系 (例えば図 3 の 5 0) によって集光され、たとえ平行ビーム移動があろうとも、同一スポットの検出器に集束される。結果として、平行ビーム移動が反射ビームを攪乱させることはない。画像生成エリアの直径が 3 0 m m で、画像生成レンズの焦点距離が 5 0 m m であれば、最大走査角は $+ / - 1 6 . 7 ^{\circ}$ である。この場合、第 1 のミラーと第 2 のミラーとの間の距離が 2 5 m m であれば、最大ビーム移動は 8 m m となる。

【 0 0 3 6 】

平行ビーム移動が反射ビームを攪乱させることはないにせよ、それはやはり反射ビームと入力ビームとの間のオーバーラップを減少させる。図 6 c はこれら 2 つのビームのオーバーラップを示している。実線で示した円は入力ビームを表しており、これは方向変換鏡のミラー径と見なすことができる。破線で示した円は反射ビームであり、これは図中に黒点として示された焦点に対して入力ビームと対称をなしている。入力ビームの中心が焦点からずれているため、反射ビームの一部は方向変換鏡の外側にある。結果として、反射ビームの集光効率は低下する。

【 0 0 3 7 】

3 個の検流計を備えた検流計機構を使用して、2 D ビーム走査をつくり出すと共に装置中の平行ビーム移動を補償することができる。代表的な実施形態は図 7 に表されている。入力ビーム 1 0 a は第 1 の方向変換鏡 2 0 1 a によって水平方向 (1 0 b) に走査される。第 1 の方向変換鏡 2 0 1 a に応じて回転する第 2 の方向変換鏡 2 0 1 b は、方向変換鏡 2 0 1 a が走査している間、第 3 の方向変換鏡 2 0 1 c 上のビームスポットを同じ位置に維持するために使用される。方向変換鏡 2 0 1 a と 2 0 1 b との回転は、方向変換鏡 2 0 1 c 上の単一スポットから出発する T H z ビーム水平方向走査をもたらすことになる。方向変換鏡 2 0 1 c は垂直方向に回転する。したがって、3 個の方向変換鏡 (2 0 1 a、2 0 1 b 及び 2 0 1 c) を使用して、T H z ビームは単一点から曲げられて 2 D 走査される。

【 0 0 3 8 】

図 8 a は第 1 の方向変換鏡と第 2 の方向変換鏡との回転角間の関係を示している。入力ビームは第 1 のミラーの回転中心である点 A で方向変換鏡システムに案内される。第 2 のミラーの回転中心は O である。第 1 のミラーがその原ポジションにあれば、入力ビームは A O に従って方向変換され、第 2 のミラーにより第 3 のミラーに向かって O B に従って反

10

20

30

40

50

射される。ここでBは第3のミラーの回転軸に位置している。入射ビームが第1のミラーによって方向変換されるその原方向から変化する任意の角度 θ に対して、角度 θ が存在する。第2のミラーが θ だけ回転すれば、入射ビームはA O' Bの経路に従い、第3のミラー上の同一点Bに達する。第1のミラーと第2のミラーの同時回転は出力ビームの走査角 θ をもたらず。以下の式(4a)及び(4b)には、 θ と θ_0 を θ の関数として表す。

【0039】

$$\sin \theta / \sin \theta_0 = A O / B O \quad \dots\dots (4a)$$

$$= (\theta_0 + \theta) / 2 \quad \dots\dots (4b)$$

この構成のもう一つの重要な特徴は第2のミラー上におけるビーム移動距離であり、これが第2のミラーのサイズを決定する。

10

【0040】

$$O O' = \sin \theta / \sin \theta_0 \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 $\theta_1 = \theta_0 + \theta$ である。

【0041】

平行ビーム移動は3検流計機構を使用して補償することができる。ただし、特に画像生成プロセスが例えばパルスTHz波画像生成におけるように精細な時間分解能を有する場合に考慮されなければならない、ビーム経路変化によって生み出されるもう一つの問題がある。この問題は、ビーム走査による時間分解画像生成において時間的変化を招来する光路変化である。図8bは、方向変換鏡の回転中心が集束レンズの焦点に対してhだけ変位している場合の、装置内の光路を示している。THzビーム走査角の関数としての光路変化は次の通りである。

20

【0042】

$$O P = 2 h (1 - \cos \theta) \quad \dots\dots (6)$$

これは回転軸がレンズにより近づけば正であり、さもなければ負である。

【0043】

3検流計機構における回転角の関数としての光路は図8cに基づき以下のように導出することができる。

【0044】

$$O P = (A O \sin(\theta_0 + \theta) + B O \sin(\theta_0 - \theta)) / \sin \theta_1 \quad \dots\dots (7a)$$

$O A = O B = L$ が満足されれば、式(7a)は以下のように単純化することができる。

30

【0045】

$$O P = 2 L \cos(\theta) \quad \dots\dots (7b)$$

式(6)に示した時間的変化とは異なり、この場合の時間的変化は3検流計機構の構造によって決定され、しかもそれは最適化整合によって最小化されない。第1のミラーと第2のミラーとの間の距離が(第2のミラーと第3のミラーとの間と同じく)40mmであれば、20度ビームスパンに対する最大の時間的変化は5mmである(33ピコ秒の時間的変化)。

【0046】

時間的変化は、時間分解能がなくとも、あるいは時間的変化よりも遥かに長い時間分解能があっても、画像生成プロセスに何の効果も生じない。ただし、例えばパルスTHz波画像生成のような、精細な時間分解能を有する一定の画像生成プロセスには、走査中の時間的変化を補償するために、すべての時間位置でイメージを記録した後に画像生成を修復することが必要である。図9は、2検流計機構での走査において、平行ビーム移動と時間的変化との双方を最小化するために使用される本発明の一実施形態の概略図である。この実施形態において、単一の集束レンズに代えて、2つのシリンダカルレンズ301と302が使用される。焦点距離が異なる、したがって2つの異なった軸を有する1つの光ないし光学セットもこのために使用することができる。

40

【0047】

総じて、特大の撮像対象が画像化される必要があれば、上述した代表的な実施形態は、所要のすべての光学系が一緒に横に平行移動し得るようにして、拡張することができる。

50

こうして、エリアごとの画像生成が可能である。平行移動の時間は、平行移動に先立って画像化されたエリアのデータ処理に活用することができる。

【 0 0 4 8 】

M 1 及び M 2 は一対の検流計によって駆動される 2 つの走査鏡である (X 方向変換鏡 2 0 1 a 及び Y 方向変換鏡 2 0 1 b) 。 M 1 ' は原方向における M 2 による M 1 の写像である。 C L 1 及び C L 2 は 2 つのシリンドリカルレンズである。各々のレンズ (3 0 1 及び 3 0 2) の焦点距離は、対応するミラー (3 0 1 に対する 2 0 1 a 、 3 0 2 に対する 2 0 1 b) と撮像対象 4 0 間の距離の二分の一に等しい。撮像対象 4 0 と各々のシリンドリカルレンズ (3 0 1 又は 3 0 2) 間の距離はレンズの焦点距離である。 C L 1 及び C L 2 は平行化されたビームを撮像対象に集束させ、焦点の横方向位置は入射ビームの方向によ

10

【 0 0 4 9 】

図 9 に示したように、 M 1 が走査し、 M 2 が固定されているか又はその逆の場合、焦点は x 又は y 軸に沿って撮像対象の表面を走査する。ビームは逆反射され、時間的ずれは生じないであろう。ただし、 M 1 と M 2 の双方が走査する場合には、 M 1 の写像は M 2 ' の走査と共に運動する。これによってビーム曲がり位置は C L 1 の焦線 (図 9 の F L 1) を離れる。ビーム移動と時間的变化の詳細な計算は複雑である。以下の式 (8 a) 及び式 (8 b) はビーム走査角の関数として平行ビーム移動及び光路変化の近似的評価を与えるものである。

【 0 0 5 0 】

$$= 2 D \sin (1 - \cos) \dots\dots (8 a)$$

$$O P = 2 (1 - \cos) = 2 D (1 - \cos) (1 - \cos) \dots\dots (8 b)$$

M 1 と M 2 間の距離が 2 5 m m で、最大走査角が + / - 2 0 ° であれば、最大ビーム移動は 1 m m 、最大光路変化は 1 8 5 μ m である。

20

【 0 0 5 1 】

図 1 0 は、本発明の技術的思想を実証するために使用された、パルス T H z 波装置の概略図である。このシステムにおいて、 T H z パルスを発生させかつそれらを検知するため、フェムト秒 (f s) レーザ (Femtolite F - 1 0 0) が使用される。まず、 f s レーザビームは 2 つのアームつまりそれぞれポンピングアームとプロービングアームに分割される。 T H z パルスはポンピングパルスによって作動される光伝導スイッチ 6 0 a によって発生させられる。送出された T H z ビームは放物面鏡 5 0 を用いて平行化されて、複軸検流計セット 2 0 に案内される。検流計セットから出力された T H z ビームは 2 つのシリンドリカルレンズ 3 0 を用いて撮像対象 4 0 に集束される。 1 つのテストにおいて、検流計の開口は直径 1 5 m m である。検流計セットの 2 つのミラー間の変位は 2 5 m m である。 2 つのシリンドリカルレンズの焦点距離はそれぞれ 5 7 m m 及び 4 4 m m である。反射された T H z ビームは T H z ビーム中のシリコンビームスプリッタによってピックアップされ、反射された T H z ビームの一部は、 T H z パルスのセンサとして使用される (1 1 0) Z n T e 結晶 6 0 b に集束された。 T H z ビームとプロービングビームは Z n T e 結晶を通して共線的に伝搬し、同所でプロービングビームの偏りは E O 処理を通じて修正される。 T H z フィールドは後に偏光敏感平衡検出ジオメトリによって記録される。

30

40

【 0 0 5 2 】

図 1 1 は技術的思想システムを証明する制御ジオメトリの技術的思想を示すものである。高速画像生成を実現すべく、データ獲得と走査系制御のために 6 0 0 K S / s データ獲得速度による高速デジタル / アナログ多能カード処理が使用される。図 1 2 はパルス T H z 波画像生成プロセスの論理フローチャートを示している。図 1 3 はこのシステムの写真である。

【 0 0 5 3 】

図 1 4 a は、ポンピングパルスとプロービングパルスとの間の遅延時間を固定しての画像領域内の T H z フィールドの分布を示している。結果は撮像対象としての金属平面ミラーの使用によって測定された。走査中の時間的变化に起因して、固定タイミングでの T H

50

z フィールドの分布は干渉パターンに似たリング構造を示している。図 1 4 b は画像領域内の THz 振幅 (THz 波形のピーク振幅) の分布を示している。この図は、 A_0 が中心ピクセルの THz 振幅であり、 A_i がインデックス i のピクセルの THz 振幅を指している場合に、 A_0 / A_i として表される各々のピクセルの比率を与える。図 1 4 c は中心ピクセルと比較した画像領域内の時間的ずれ分布を与える。縁に非常に近いこれらのピクセルを別にして、全範囲における時間的変化は約 1 THz 波長である。THz フィールドの分布は全遅延時間における画像で修復可能である。修復された THz フィールド分布は図 1 4 d に示されており、これは縁に非常に近いこれらのピクセルを別にして一様な分布を与えている。

【 0 0 5 4 】

10

図 1 5 はミラー表面に取り付けられた金属かみそり刃の THz 波画像を示している。すべての画像は 1 秒当たり 1 フレームの速度で記録される。図 1 5 a は、かみそり刃阻止 THz 放射に起因して生じた背景に対するコントラストに基づいて記録された画像である。図 1 5 b はかみそり刃から反射された THz パルスの画像である。図 1 5 c はかみそり刃のトポグラフィ像であり、同図はかみそり刃の厚さを与える。

【 0 0 5 5 】

THz 波撮像装置は誘電性撮像対象の画像生成にも使用された。図 1 6 a は、金属ミラー面にポリエチレンペレットが配されていた場合 (破線カーブ) 又は配されていなかった場合 (実線カーブ) の THz 波形を示している。撮像対象を透過した THz パルスは遅延軸に沿った変位を示している。図 1 6 b は背景に対するコントラストに基づくペレットの THz 波画像を示しており、図 1 6 c はペレットを透過した THz パルスの時間遅延に基づいて記録されたトポグラフィ像である。

20

【 0 0 5 6 】

上記は画像生成波として THz 波を使用しているが、本発明の実施形態は 1 GHz ~ 1 0 0 THz の周波数範囲を使用することができる。さらに、この技術は、方向変換、集束及び本方法を用いた撮像対象の画像生成に使用し得る、その他の周波数の電磁波、音波、電子ビーム等に適用することが可能である。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 5 7 】

【 図 1 】 本発明の第 1 の実施形態を示す概略図である。

30

【 図 2 a 】 反射方式による本発明の一実施形態を示す概略図である。

【 図 2 b 】 透過方式による本発明の一実施形態を示す概略図である。

【 図 3 】 画像生成波として THz 波を使用する本発明の一実施形態を示す概略図である。

【 図 4 】 図 3 に示した実施形態における画像生成エリアを示す図である。

【 図 5 a 】 本発明の一実施形態における方向変換鏡の構成を示す概略図である。

【 図 5 b 】 本発明の一実施形態における方向変換鏡の別途構成を示す概略図である。

【 図 6 a 】 図 5 b に示した焦点の異なった側における 2 つの異なったミラーに対する平行ビーム移動を示す図である。

【 図 6 b 】 入射ビームが焦点に対して変位している場合のビームトレースを示す図である。

40

【 図 6 c 】 方向変換鏡上における入射ビームスポットからの反射ビームスポットを示す図である。

【 図 7 】 3 個の方向変換鏡を使用する本発明の一実施形態を示す概略図である。

【 図 8 a 】 3 ミラー方式のビームトレースを示す図である。

【 図 8 b 】 方向変換鏡が集束レンズの焦点に対して変位している場合の時間的変化を示す図である。

【 図 9 】 本発明の一実施形態における 2 個のシリンダリカルレンズを示す概略図である。

【 図 1 0 】 パルス THz システムに使用される本発明の一実施形態を示す概略図である。

【 図 1 1 】 図 1 0 に示した実施形態の制御システムを示す概略図である。

【 図 1 2 】 図 1 0 に示した実施形態における画像生成プロセスの論理フローチャートを示

50

す図である。

【図13】パルスTHzシステムに使用される本発明の一実施形態を示す写真である。

【図14a】固定遅延時間での画像領域内のTHzフィールド分布を示す図である。

【図14b】画像領域内のTHz振幅分布を示す図である。

【図14c】画像領域内のTHzパルスピークタイミングの分布を示す図である。

【図14d】画像領域内の補正済みTHz振幅分布を示す図である。

【図15a】背景に対するコントラストに基づいて記録された金属かみそり刃のTHz波画像を示す図である。

【図15b】表面から反射されたTHzパルスを使用した同じ刃のTHz波画像を示す図である。

【図15c】前記刃のトポグラフ像を示す図である。

【図16a】撮像対象（ポリエチレンペレット）の有る場合（破線カーブ）及び無い場合（実線カーブ）のTHz波形の比較を示す図である。

【図16b】背景に対するコントラストに基づいて記録された前記ペレットのTHz波画像を示す図である。

【図16c】透過THzパルスの時間遅延を使用する前記ペレットのトポグラフ像を示す図である。

【図12】

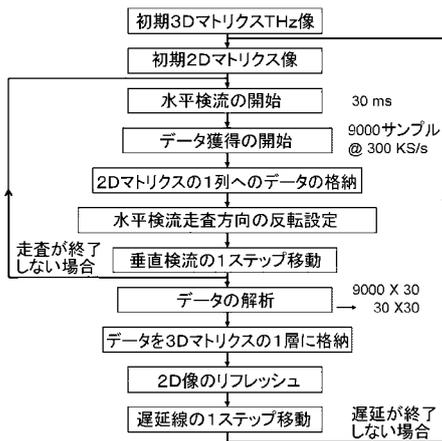


Fig. 12

【図14b】

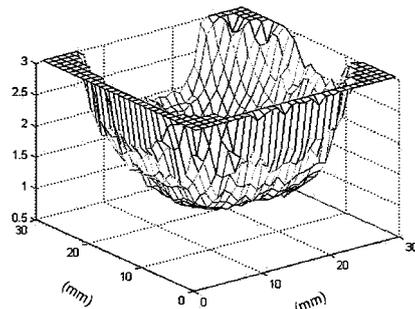


Fig. 14b

【 図 1 4 c 】

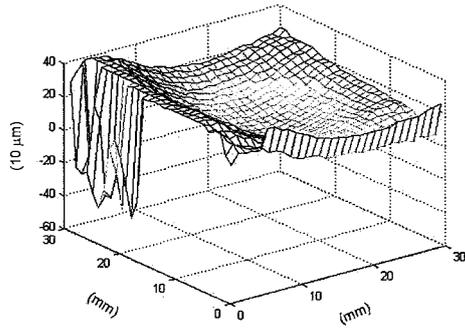


Fig. 14c

【 図 1 5 c 】

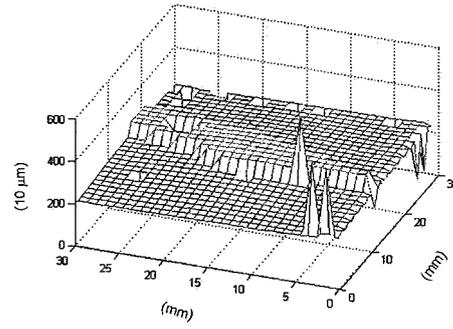


Fig. 15c

【 図 1 6 a 】

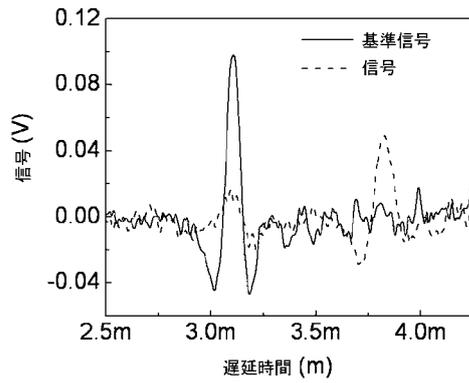


Fig. 16a

【 図 1 6 c 】

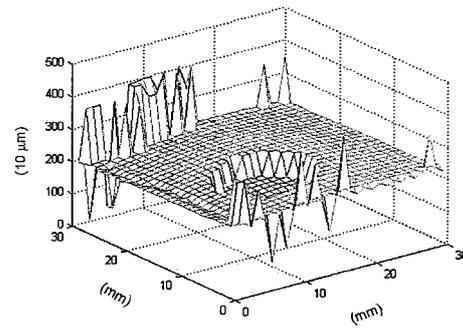


Fig. 16c

【図1】

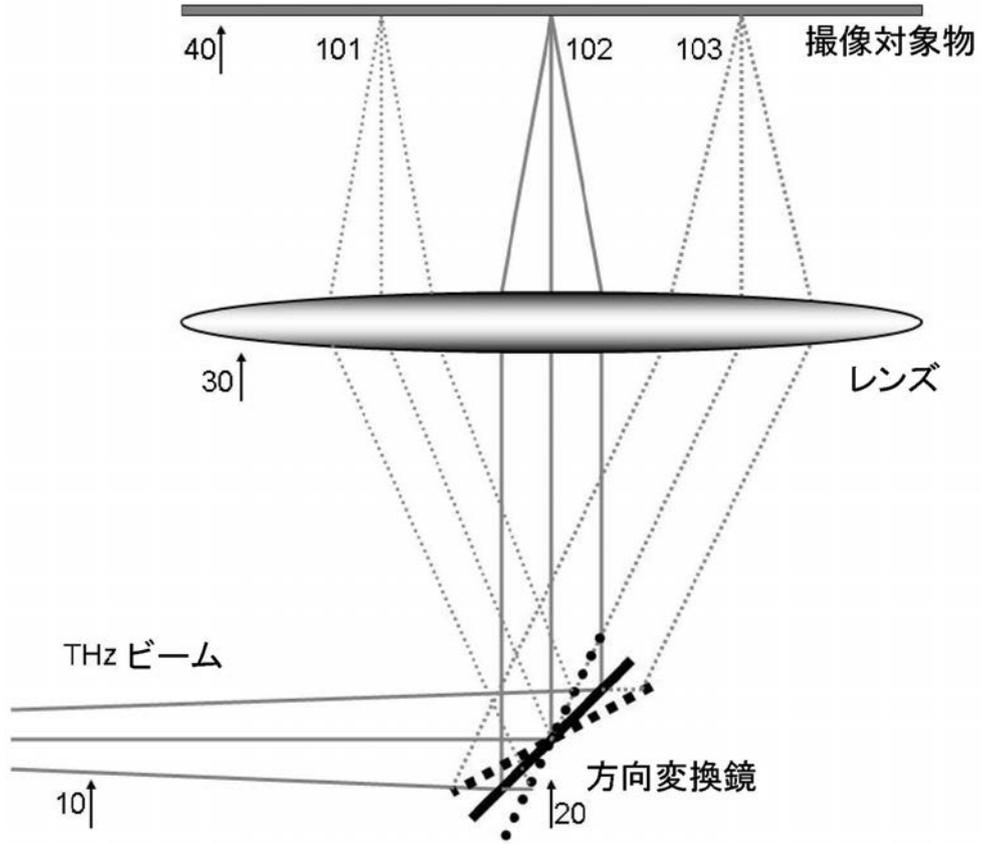


Fig. 1

【図 2 a】

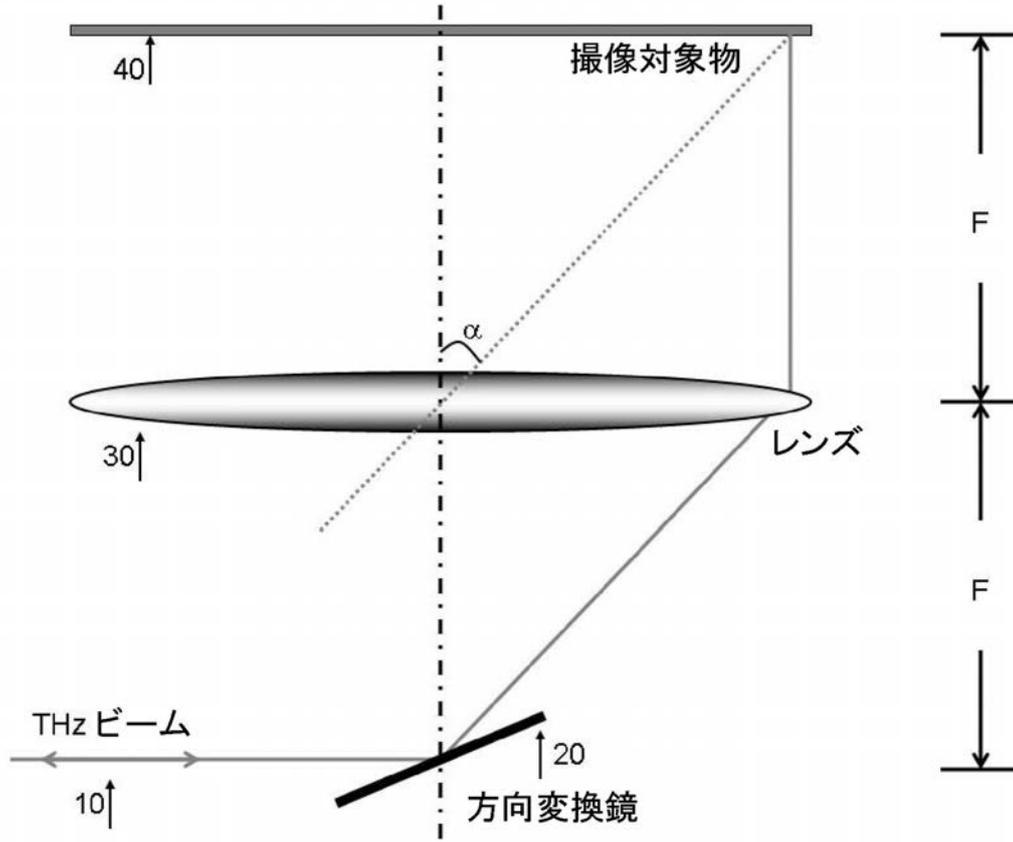


Fig. 2a

【図 2 b】

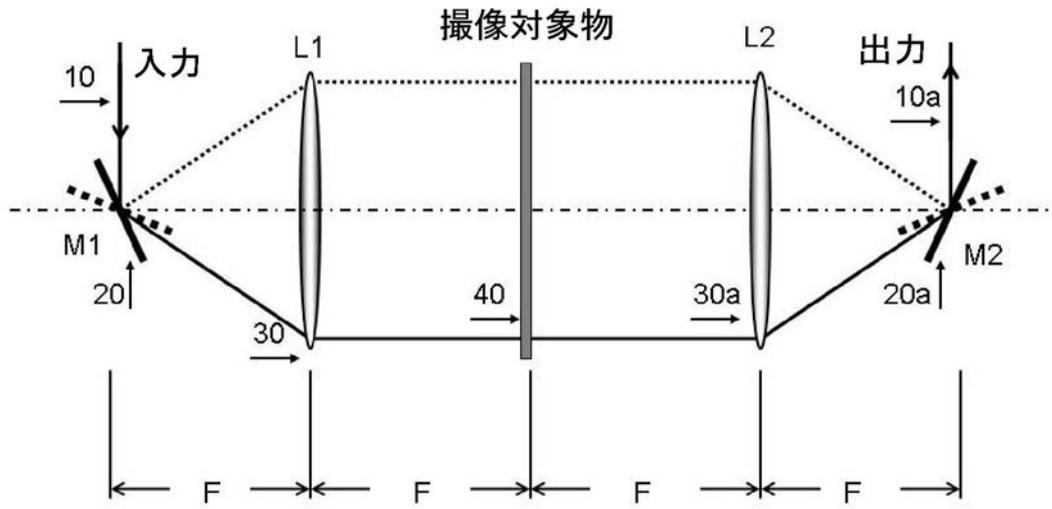


Fig. 2b

【図3】

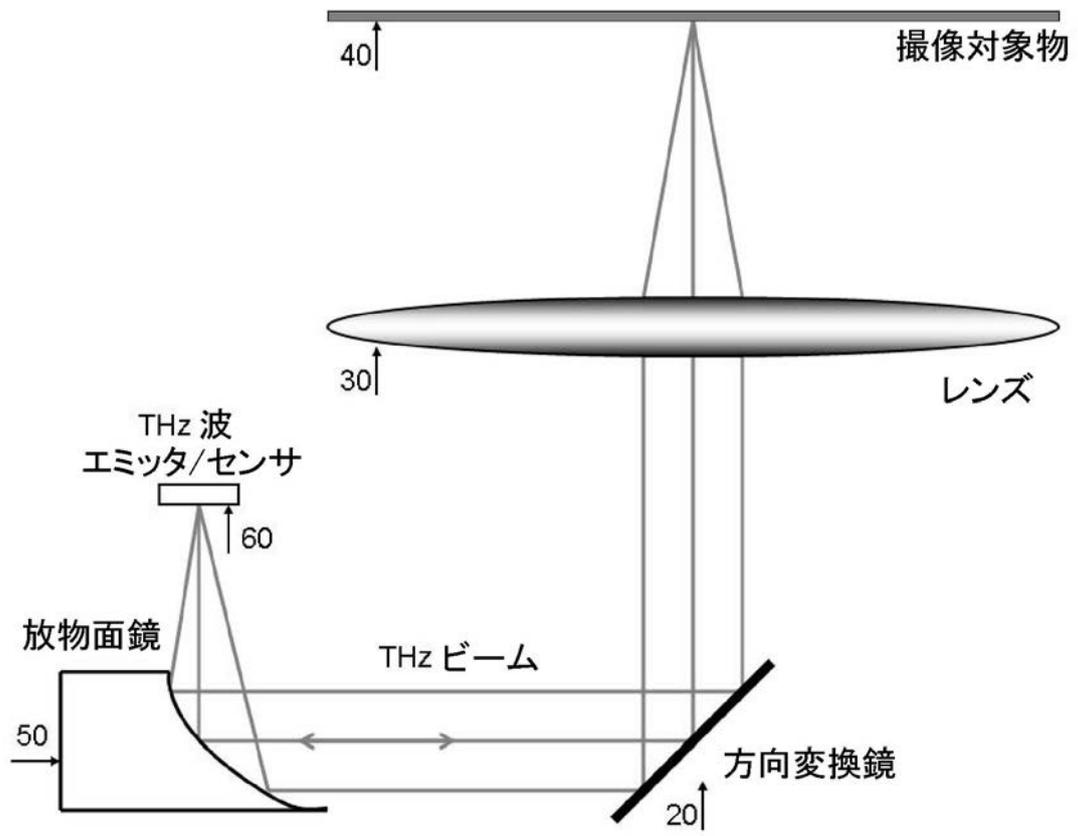


Fig. 3

【 図 4 】

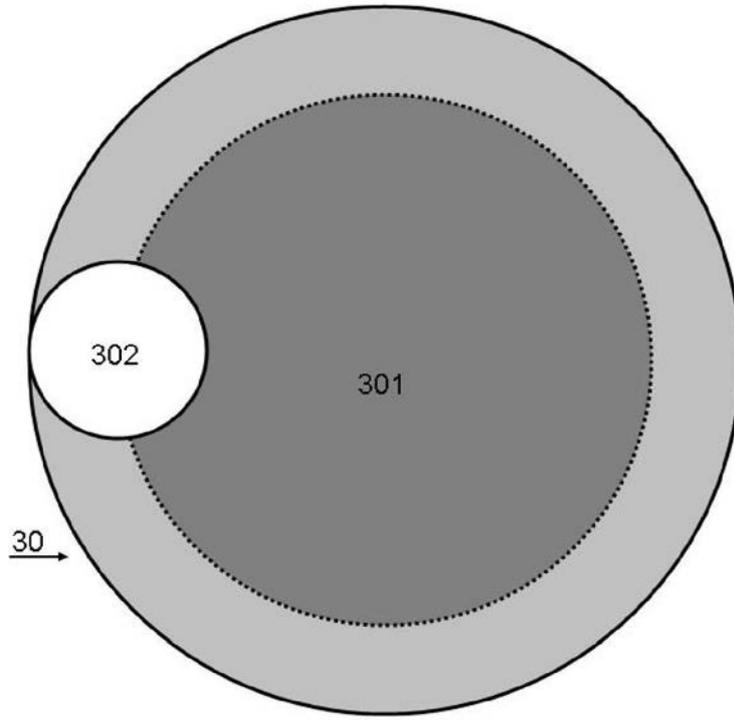


Fig. 4

【図 5 a】

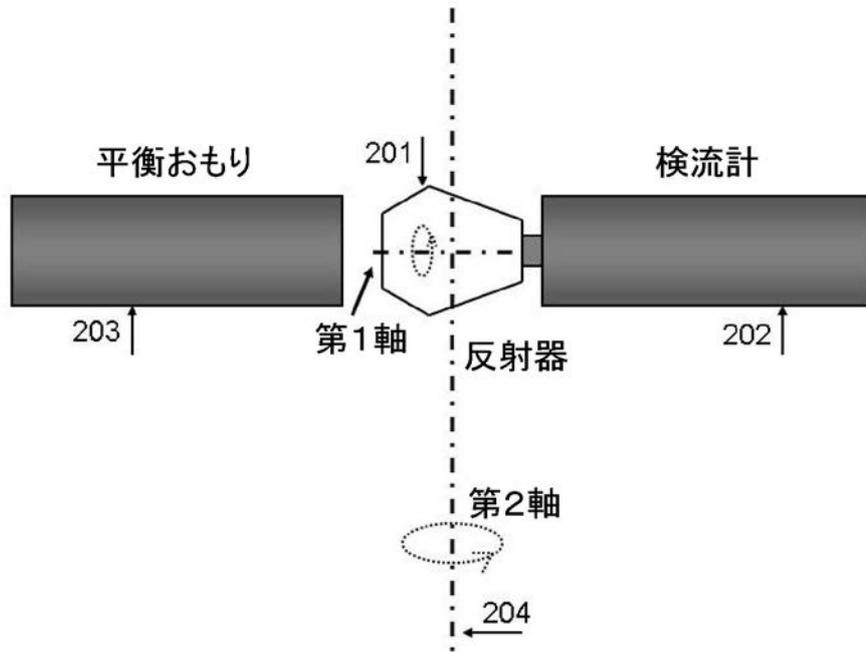


Fig. 5a

【図5b】

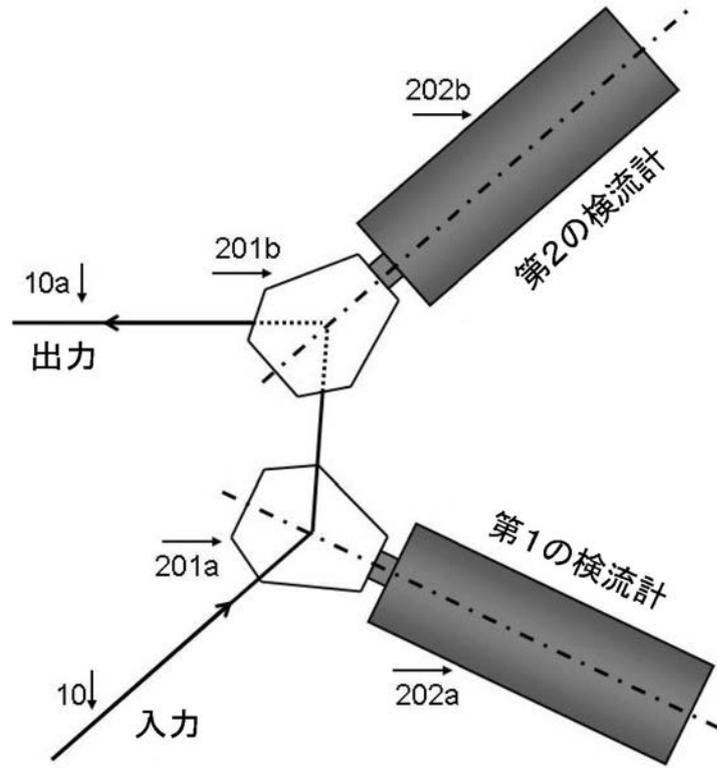


Fig. 5b

【図 6 a】

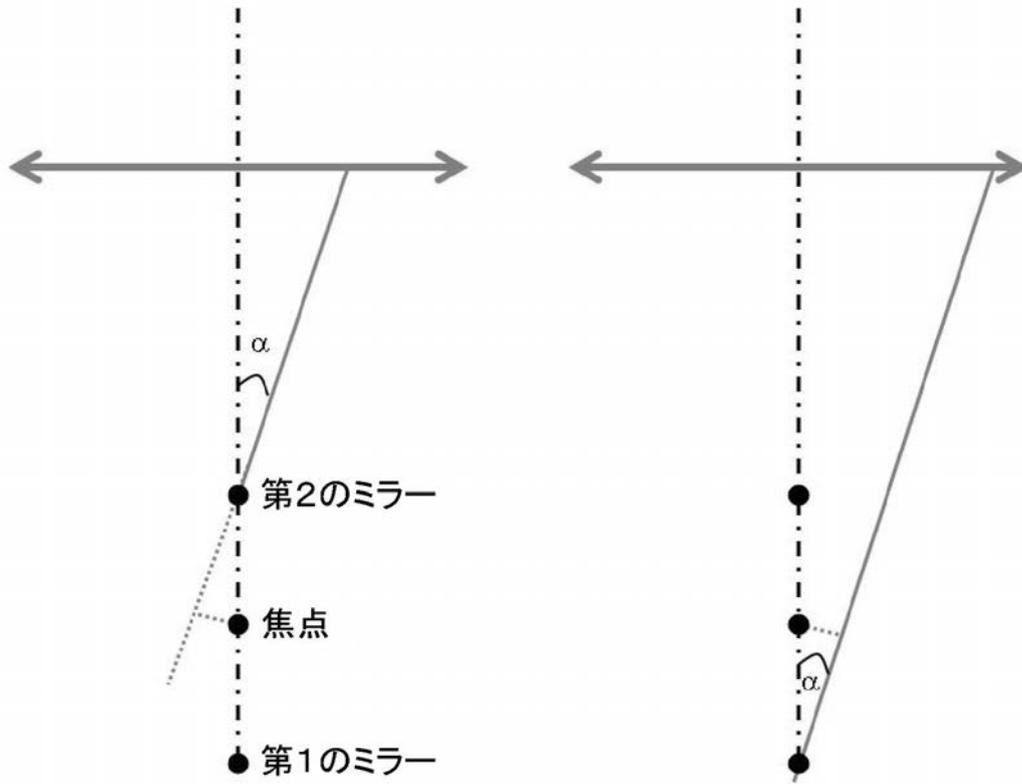


Fig. 6a

【図6b】

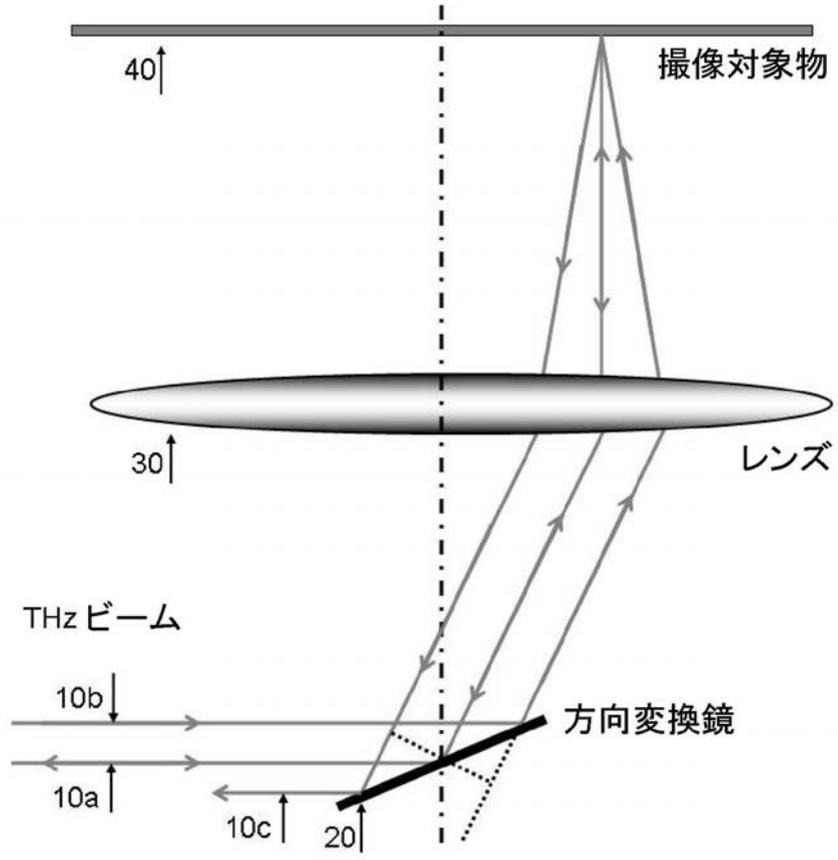


Fig. 6b

【 6 c】

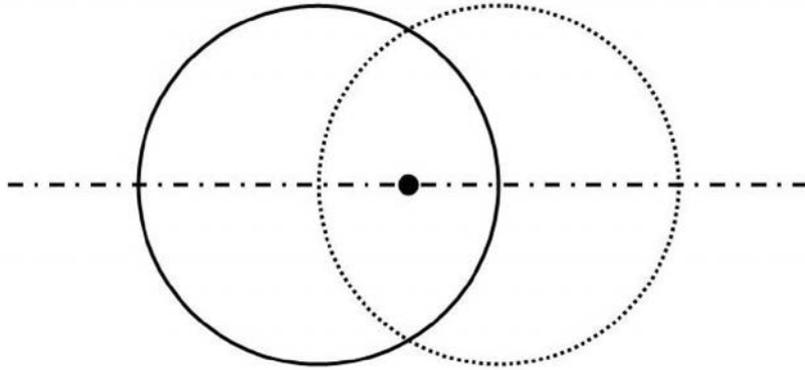


Fig. 6c

【 図 7 】

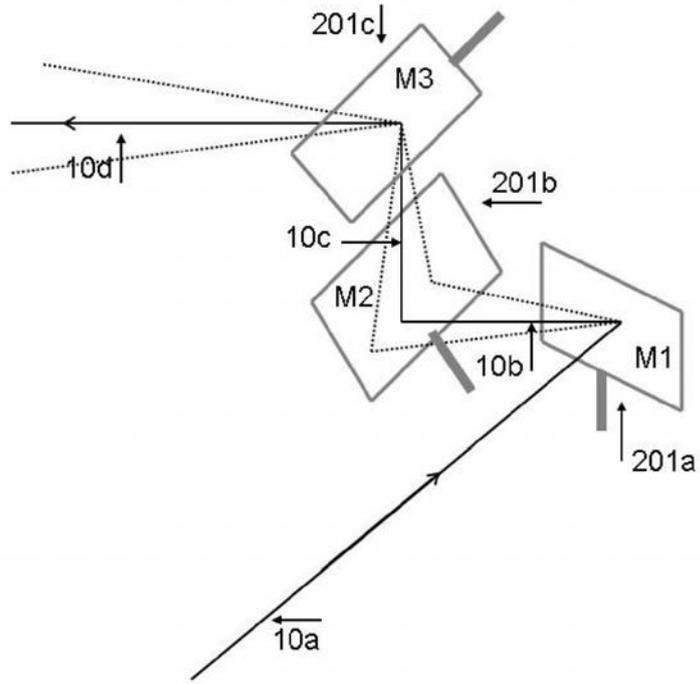


Fig. 7

【 8 a 】

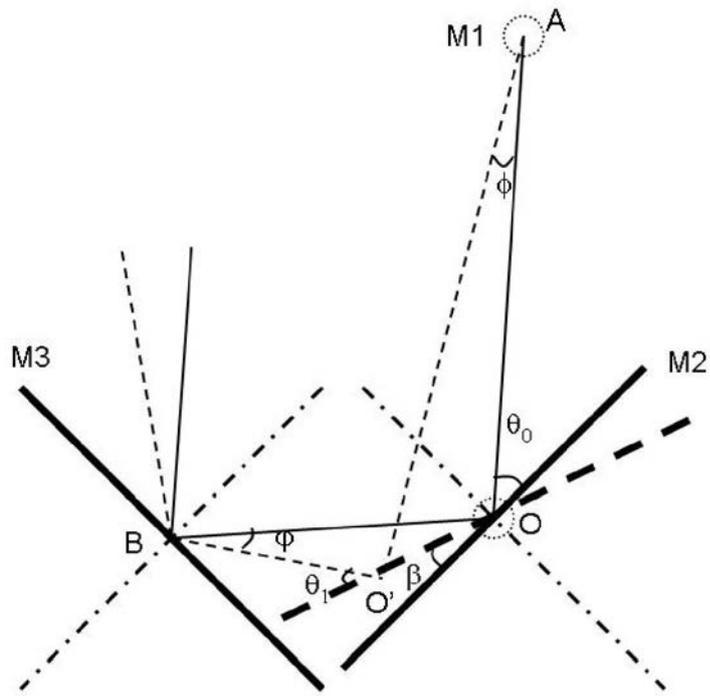


Fig. 8a

【図 8 b】

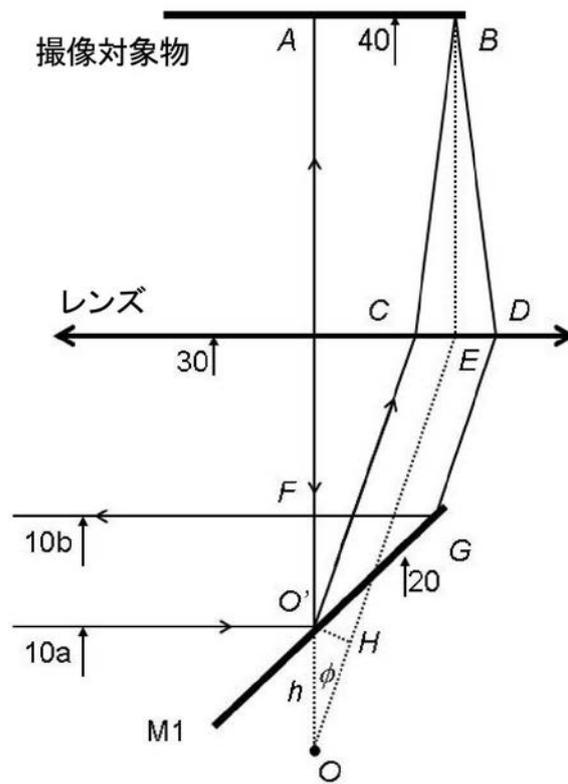


Fig. 8b

【図9】

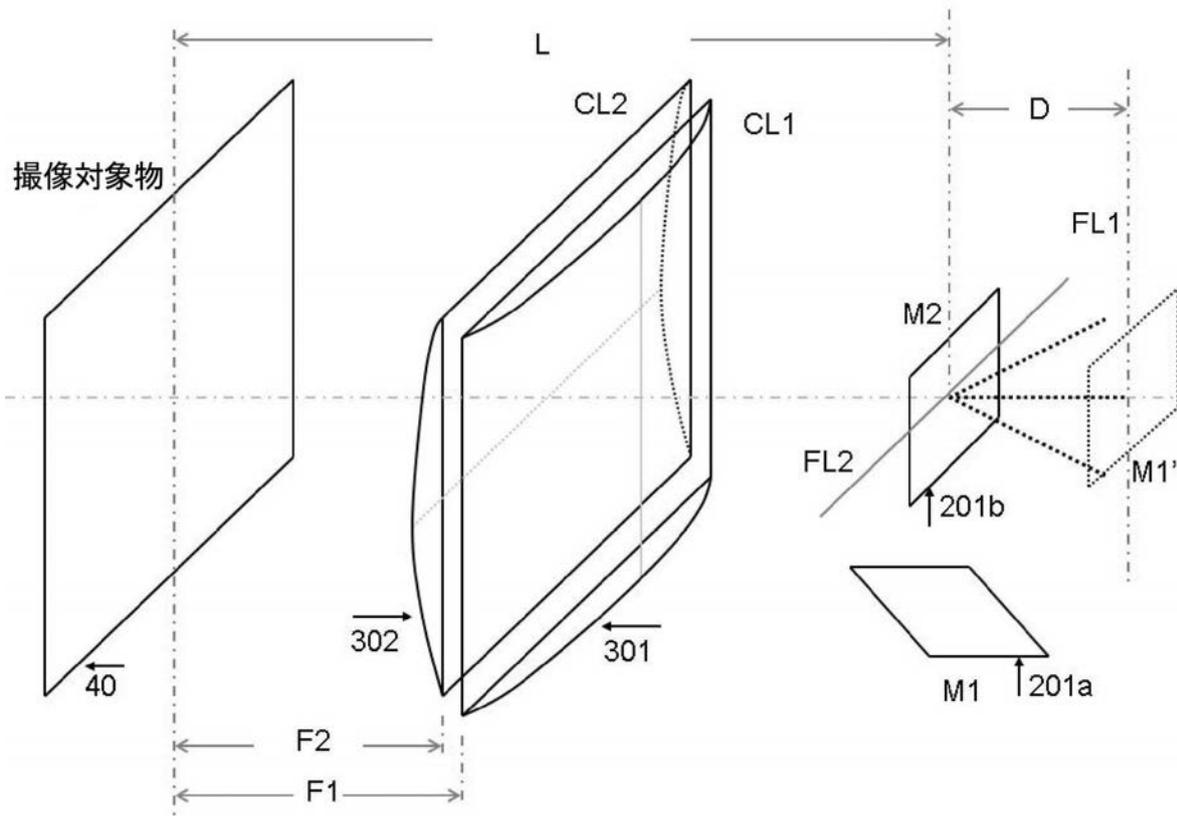


Fig. 9

【図10】

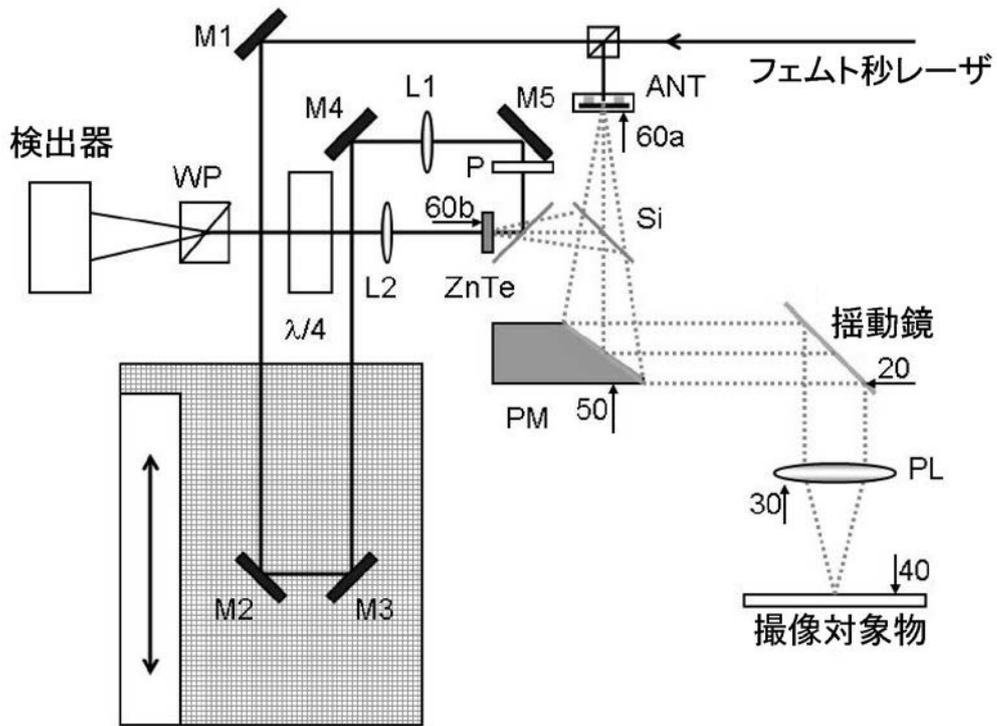


Fig. 10

【 図 1 1 】

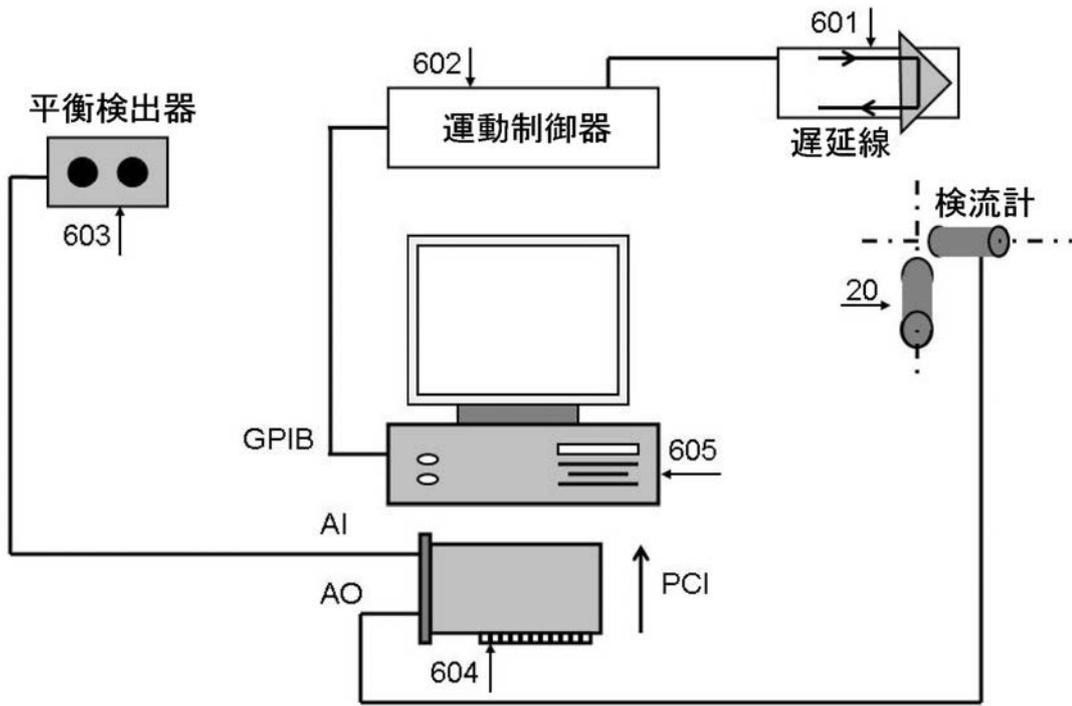


Fig. 11

【 図 13 】

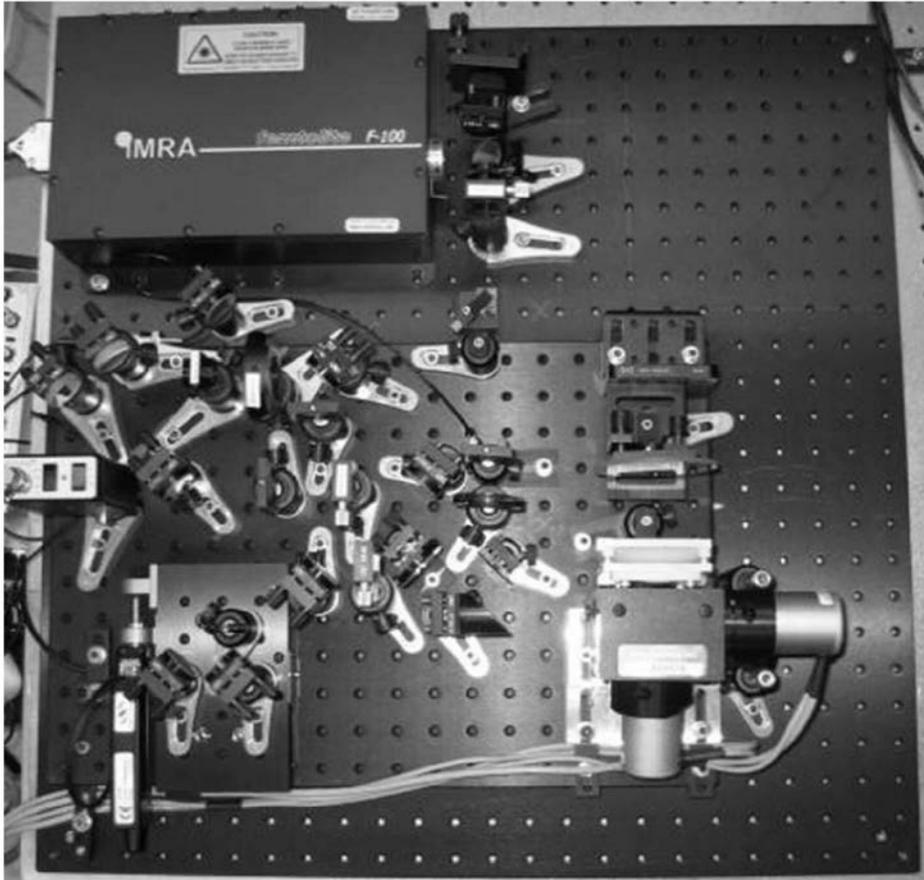


Fig. 13

【 図 14 a 】

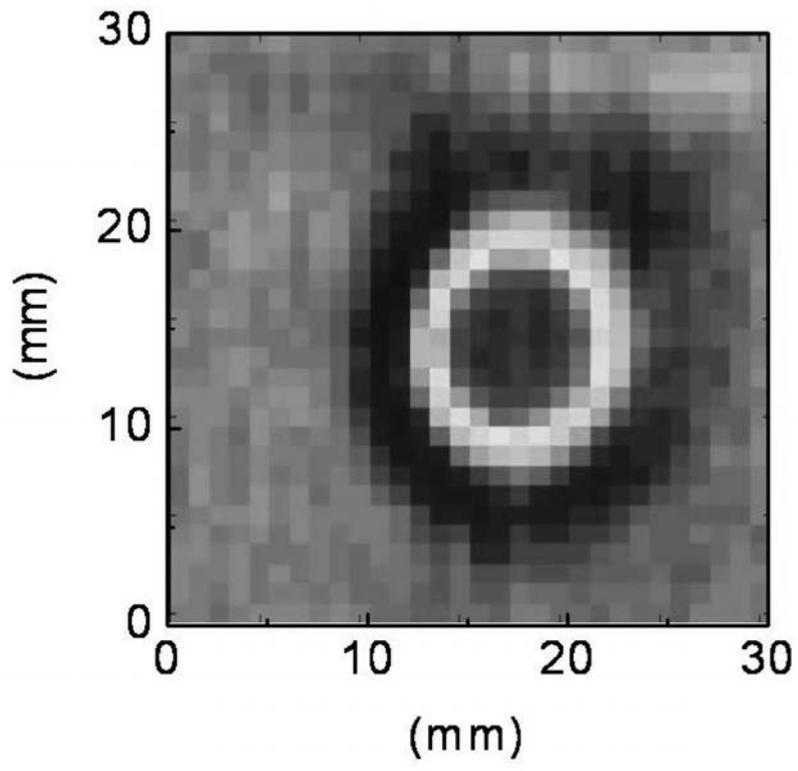


Fig. 14a

【 図 14 d 】

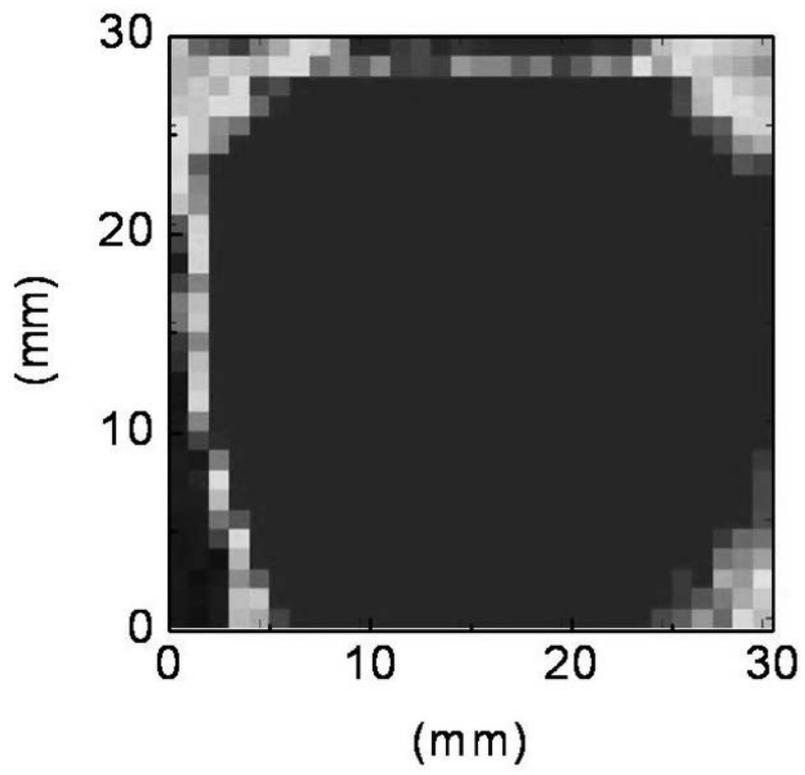


Fig. 14d

【 1 5 a】

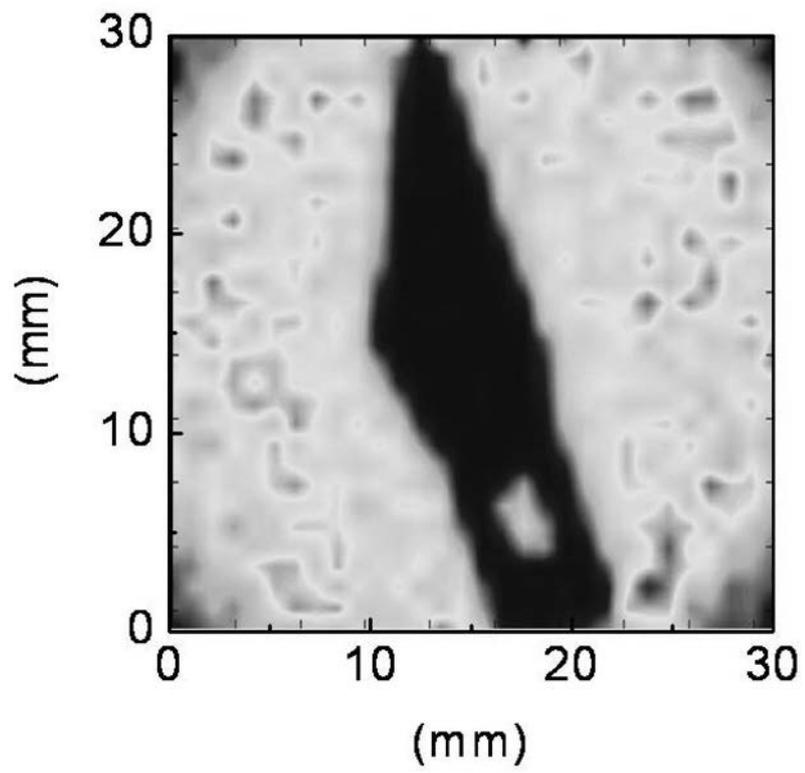


Fig. 15a

【 1 5 b】

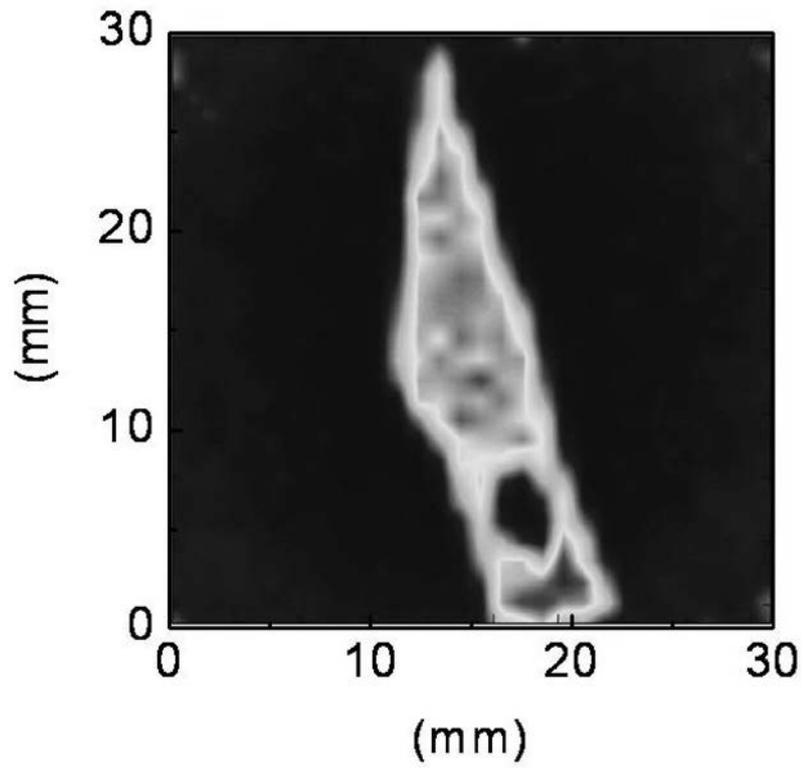


Fig. 15b

【 1 6 b】

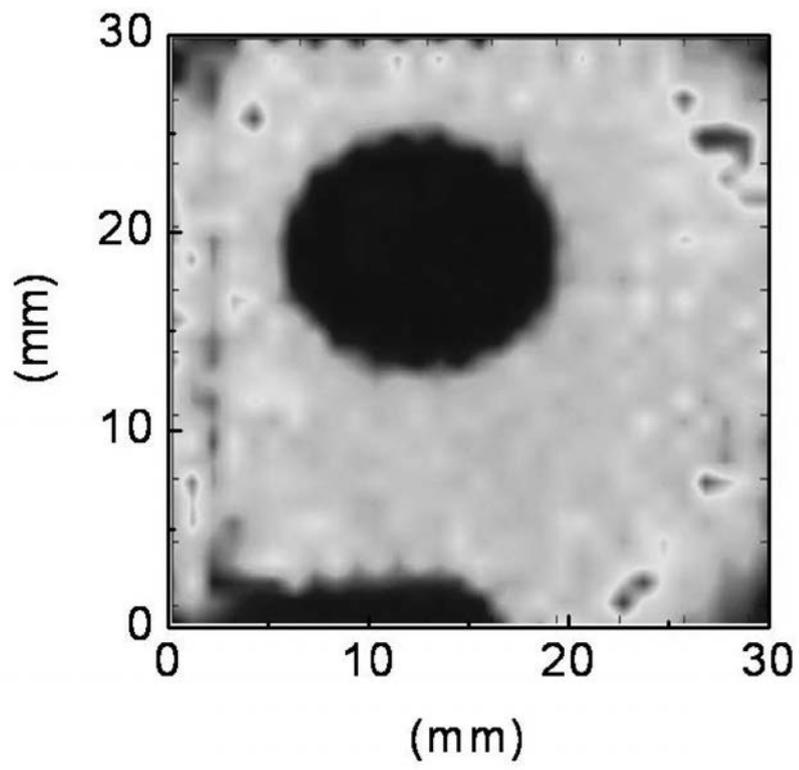


Fig. 16b

フロントページの続き

(72)発明者 ギュ チェオン チョウ

アメリカ合衆国 48103 ミシガン州 アン アーバー ハーバー ウェイ 365

審査官 高 場 正光

(56)参考文献 特開昭55-099049(JP,A)

特開2006-308426(JP,A)

特開2007-054251(JP,A)

特開平01-167718(JP,A)

特開2001-091848(JP,A)

特開2005-101401(JP,A)

DICKINSON,J.C. , "Terahertz imaging of subjects with concealed weapons" , Proceedings of SPIE , 2006年 8月 , Vol.6212 , Art.62120Q , 12p

NUSS,M.C. , "Chemistry is right for T-ray imaging" , IEEE Circuits and Devices Magazine , 1996年 3月 , Vol.12 , No.2 , pp.25-30

Goyette,T.M. , "1.56 Terahertz 2-frames per second standoff imaging" , Proceedings of SPIE , 2008年 , Vol.6893 , Art.68930J , 11p

KARPOWICZ,N. , "Comparison between pulsed terahertz time-domain imaging and continuous wave terahertz imaging" , Semiconductor Science Technology , 2005年 6月 8日 , Vol.20 , No.7 , pp.S293-S299

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

G01N21/00-21/61

G02B26/10-26/12