

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4828527号
(P4828527)

(45) 発行日 平成23年11月30日 (2011.11.30)

(24) 登録日 平成23年9月22日 (2011.9.22)

(51) Int. Cl.	F I	
GO3H 3/00 (2006.01)	GO3H 3/00	
GO1N 29/04 (2006.01)	GO1N 29/04	501
GO1N 29/06 (2006.01)	GO1N 29/06	
GO1N 29/24 (2006.01)	GO1N 29/24	
A61B 8/08 (2006.01)	A61B 8/08	

請求項の数 22 (全 15 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2007-515989 (P2007-515989)	(73) 特許権者	500174661
(86) (22) 出願日	平成17年6月10日 (2005.6.10)		サントル・ナショナル・ドゥ・ラ・レシエ
(65) 公表番号	特表2008-502932 (P2008-502932A)		ルシュ・サイエンティフィック・セ・エン
(43) 公表日	平成20年1月31日 (2008.1.31)		・エール・エスー
(86) 国際出願番号	PCT/FR2005/001446		フランス・F-75794・パリ・セデッ
(87) 国際公開番号	W02006/005836		クス・16・リュ・ミシエール・アンジュ・
(87) 国際公開日	平成18年1月19日 (2006.1.19)		3
審査請求日	平成20年4月18日 (2008.4.18)	(73) 特許権者	503220093
(31) 優先権主張番号	0406592		ユニヴェルシテ ピエール エ マリ キ
(32) 優先日	平成16年6月17日 (2004.6.17)		ュリ
(33) 優先権主張国	フランス (FR)		フランス国 75005 パリ プラス
		(74) 代理人	100064908
			弁理士 志賀 正武

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 音響光学イメージングの方法及び装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

(a) 対象(1)の領域(5)の振動を、前記対象に対して所定の音響周波数を示す音響波を加えることにより、発生させる段階と、

(b) 入射波(INC)、及び前記入射波(INC)とコヒーレントなポンプ波(PMP)を発生させる段階であって、

- 光波発生装置を用いて初期光波(INI)を発生させる段階、
- 前記初期光波を第1ビーム(F1)と第2ビーム(F2)とにスプリットさせる段階、

- 第1周波数シフトにより前記第1ビームの周波数をシフトさせて前記入射波(INC)を発生させる段階、及び、

- 第2周波数シフトにより前記第2ビームの周波数をシフトさせて前記ポンプ波(PMP)を発生させる段階を備え、

前記第2周波数シフトは前記第1周波数シフトと前記音響周波数との和に略等しい、段階と、

(c) 前記入射波(INC)を前記対象に加えて、前記音響波により周波数がシフトされた音響光学成分を少なくとも一つ有する信号光波(SIG)を、前記対象を通過させて前記対象の前記領域と作用させることによって発生させる段階であって、前記音響光学成分が前記ポンプ波(PMP)の周波数と同等の周波数を有する、段階と、

(d) ダイナミックホログラフィック材料(9)に前記信号波及び前記ポンプ波を加え

ることにより、複素屈折率格子を前記材料内に形成する段階と、

(e) 前記領域内の光の強度に関連するデジタルパラメータを前記複素屈折率格子から得る段階と、を備える対象用音響光学トモグラフィイメージング方法。

【請求項 2】

前記 (e) 段階において、

(e1) 前記複素屈折率格子に対して前記ポンプ波 (PMP) を加えることにより、回折波を発生させる段階と、

(e2) 前記回折波と前記信号波との間の干渉を光検出器 (12) を用いて検出する段階と、を備える請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

位相の変調が前記音響波と前記ポンプ波 (PMP) と前記入射波 (INC) とから選択された一つの波に加えられる請求項 1 または請求項 2 のいずれかに記載の方法。

【請求項 4】

前記位相の変調は前記音響波に加えられる請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

振幅の変調が前記音響波と前記ポンプ波 (PMP) と前記入射波 (INC) とから選択された一つの波に加えられる請求項 1 または請求項 2 のいずれかに記載の方法。

【請求項 6】

前記振幅の変調は前記音響波に加えられる請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記光波発生装置はレーザーである請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 8】

前記第 1 周波数シフトと前記第 2 周波数シフトとの内の一つはゼロである請求項 1 から請求項 7 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 9】

前記 (d) 段階において、前記信号波は前記ダイナミックホログラフィック材料の第 1 面 (9a) に加えられ、前記ポンプ波は前記材料の前記第 1 面と異なる第 2 面 (9b) に加えられる請求項 1 から請求項 8 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 10】

前記 (d) 段階において、前記信号波及び前記ポンプ波は前記ダイナミックホログラフィック材料の同一の面に加えられる請求項 1 から請求項 8 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 11】

前記ダイナミックホログラフィック材料は“エネルギー伝達”モードで作動するように適合されたフォトリフラクティブ結晶である請求項 1 から請求項 10 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 12】

前記ダイナミックホログラフィック材料は“異方性回折”モードで作動するように適合されたフォトリフラクティブ結晶である請求項 1 から請求項 10 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 13】

(A) 所定の音響周波数を有する音響波を対象 (1) に加えることにより、前記対象の領域 (5) の振動を発生させるように設計された変換器 (2) と、

(B) 前記対象に入射波 (INC) を加えて、前記音響波により周波数がシフトされた音響光学成分を少なくとも一つ有する信号光波 (SIG) を発生させるように設計され、且つ前記音響光学成分の周波数と同等な周波数で前記入射波とコヒーレントな光ポンプ波 (PMP) を発生させるように設計された光波発生装置と、

(C) 前記信号波及び前記ポンプ波を加えることにより複素屈折率格子が形成されるように適合されたダイナミックホログラフィック材料 (9) と、

(D) 前記複素屈折率格子から前記領域の光の強度に関連するデジタルパラメータを得るように設計された検出装置と、を備える対象用音響光学トモグラフィイメージング装置

10

20

30

40

50

であって、

前記光波発生装置は、

初期波を発するように設計されたレーザー(6)と、

前記初期波から第1ビーム及び第2ビームを発生させるように設計されたスプリッター装置(7)と、

前記第1ビームの周波数をシフトさせて前記入射波を発生させるように設計された第1シフト装置と、

前記第2ビームの周波数をシフトさせて前記ポンプ波を発生させるように設計された第2シフト装置と、を備え、

前記第1シフト装置及び前記第2シフト装置は、前記ポンプ波が前記入射波の周波数と前記音響波の周波数の和に略等しい周波数を示すように設計されている、装置。

10

【請求項14】

前記検出装置は、前記複素屈折率格子を通過する前記ポンプ波により発生される回折波と前記信号波との間の干渉を検出するように設計された検出器(12)を備える請求項13に記載の装置。

【請求項15】

前記検出器は単一ピクセルフォトダイオードである請求項14に記載の装置。

【請求項16】

前記ダイナミックホログラフィック材料の第1面に前記信号波を加えるように設計された第1光学装置(10、11)と、

20

前記ダイナミックホログラフィック材料の第2面に前記ポンプ波を加えるように設計された第2光学装置(16)と、

前記ダイナミックホログラフィック材料の前記第1面に対向する第3面(9c)の画像を前記検出器(12)上に形成するように設計された第3光学装置(13、14、15)と、を備える請求項14または請求項15のいずれかに記載の装置。

【請求項17】

前記ダイナミックホログラフィック材料の前記第1面及び前記第2面(9a)は同一の面である請求項16に記載の装置。

【請求項18】

前記ダイナミックホログラフィック材料の前記第2面(9b)は前記第1面(9a)に直交する請求項16に記載の装置。

30

【請求項19】

前記第1シフト装置は一個、ゼロ個または二個の音響光学変調器を備え、前記第2シフト装置はそれぞれ一個、二個またはゼロ個の音響光学変調器を備える請求項13から請求項18のいずれか一項に記載の装置。

【請求項20】

前記ダイナミックホログラフィック材料はフォトリフラクティブ結晶である請求項13から請求項19のいずれか一項に記載の装置。

【請求項21】

前記ダイナミックホログラフィック材料はYAGやチタンサファイアである請求項13から請求項19のいずれか一項に記載の装置。

40

【請求項22】

前記変換器(2)を移すように、及び/又は前記変換器の焦点距離を変化させるように設計された制御装置を更に備える請求項13から請求項21のいずれか一項に記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、音響光学イメージングの方法及び装置に係り、特に音響イメージングの方法に関する。

50

【背景技術】

【0002】

音響光学イメージング型の方法においては、映し出される対象はレーザー型の光源を用いて照らされる。更には、音響波は超音波源により対象中を伝播する。映し出される対象の領域についての情報は、特に関連した領域を振動させる超音波と光波との間の結合状態に関連した信号を検出することにより得られる。実際には、音響周波数 f_a の超音波が散乱媒体（例えば、生体組織等）を通過すると、散乱体の周期的な振動やその媒体の屈折率の周期的な変調が引き起こされる。入射周波数 f_I のレーザー波が媒体により散乱されると、散乱体の運動と媒体の屈折率の変調により、（周波数 f_I の）搬送波成分と（周波数 $f_{AO} = f_a \pm f_I$ の）音響側波帯上で散乱される音響光学成分とを有する信号波が生成される。音響光学イメージングは、拡散媒体内の音響波の焦点に従って、周波数 f_{AO} におけるこの成分の重みを決定することにその本質がある。

10

【0003】

歴史的には、決定は単一ピクセル検出器を用いて最初に実施されていた。しかしながら、この技術は感度がよくない。

【0004】

実際には、周波数 f_I の搬送波成分と周波数 f_{AO} の音響光学成分という信号波の二つの成分の間の干渉を測定することにより、決定は行われる。これら二つの周波数は、略超音波の音響周波数 f_a ほどお互いに値が異なるので、この決定はヘテロダイン式なものである。このような決定は非常に小さな空間に対してしか有効ではなく、信号の大半は失われてしまう。

20

【0005】

また、媒体中には拡散体が存在するため、信号波の搬送波と音響光学成分は二つのランダムなスペックル場であり、意味のある情報は、検出された信号を空間的及び/又は時間的に平均化することによってのみ得られる。

【0006】

主な改善は E S P C I（非特許文献 1 を参照）によって与えられた。この装置では、単一ピクセル検出器は C C D カメラ等の多重ピクセル検出器に取って代わられている。しかしながら、（典型的には数 M H z である）音響波のオーダーの高周波数を有する信号波の搬送波と音響光学成分との間の干渉信号を検出するには、カメラが遅すぎるという問題が存在する。信号を検出するために、E S P C I では音響光学成分の搬送波成分との干渉を検出するのではなくて、（典型的には数 H z 以下である）媒体を通過し音響光学成分の周波数に近い周波数の入射波の振幅の変調によって得られる参照成分との干渉を検出する。従って、カメラの各々のピクセルに対して十分検出可能なほど遅い音響光学成分と参照成分との干渉が得られる。振動している領域に関する情報を得るためには、検出された信号をカメラの全ピクセルに亘って足し上げなければならない。

30

【0007】

しかしながら、この方法は最善というわけではない。何故ならば、測定される信号には、単純に散乱するフォトンによるものであって、振動していない対象が映し出される領域を通過した有意なノイズ成分が含まれており、また、散乱媒体を通過するので参照成分は比較的弱いからである。

40

【0008】

更には、各々の信号は“スペックル非相関 (speckle decorrelation)”ノイズを搬送する。媒体により散乱された光は、粒 (grain) からなるスペックル波の形で放出される。スペックルの粒ごとに、信号波の振幅と位相はランダムに異なる。一定時間後に（特に生体組織の場合において）散乱媒体が変形されると、散乱体は位置を変える。この変形により、スペックルの粒の位置、強度、位相は変化してしまう（この状態をスペックルを非相関関係にするという）。

【0009】

音響光学イメージングにおいては、信号波の音響光学成分の全体の強度を測定しなけれ

50

ばならない。この強度は、検出器によって同様に検出される音響学的にマーキングされていない成分（用いる方法により、搬送波成分または参照成分）に対応する強度に比べるとかなり弱い。音響学的にマーキングされていない成分に関連した連続的な部分が測定時に簡単に消去可能なものであるならば、信号波の振幅と位相の変化は、“スペックル非相関ノイズ”と呼ばれる誤った信号につながってしまう。

【0010】

例えば乳がんの撮影や他の目的等の音響光学イメージング方法を用いる必要のあるような活動中の生体組織が、主にスペックル非相関ノイズにつながる。従って、迅速な測定が行えることが好ましく、比較的遅い多重ピクセル検出器を用いることは適切ではない。つまり、生体組織の感度の良い測定を保証してくれる方法は存在しない。

10

【非特許文献1】Leveque等、「Ultrasonic tagging of photon paths in scattering media: parallel speckle modulation」、Optic Letters 1999年 第24巻 p.181

【特許文献1】米国特許第5131748号明細書

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0011】

この目的に対して、本発明は下記の段階を備えた対象用音響光学イメージング方法を提供する。

20

(a) 対象に対して所定の音響周波数を示す音響波を加えることにより、対象の領域の振動を発生させる段階。

(b) 入射光波を対象に加えて、音響波により周波数がシフトされた音響光学成分を少なくとも一つ有する信号光波を発生させる段階。

(c) 音響光学成分の周波数と同等な周波数で入射波とコヒーレントな光ポンプ波を発生させる段階。

(d) ダイナミックホログラフィック材料に信号波及びポンプ波を加えることにより、複素屈折率格子を前記材料内に形成する段階。

(e) 領域内の光の強度に関連するデジタルパラメータを複素屈折率格子から得る段階。

30

【0012】

これにより、信号波のマーキングされていない成分により生じるノイズを無視することが可能になる。何故ならば、屈折率格子は、ポンプ波と信号波の音響光学成分の間の周波数がゼロではないインターフェログラムに対してのみ形成されるからである。更には、ダイナミックホログラフィック材料を読み出す際にフォトダイオード等の高速検出器を用いることが可能になる。

【0013】

本発明の好適な実施例においては、必要であれば、下記のようにすることもできる。

【0014】

前記(e)段階は、

40

(e1) 複素屈折率格子に対してポンプ波を加えることにより、回折波を発生させる段階と、

(e2) 回折波と信号波との間の干渉を光検出器を用いて検出する段階と、を備える。

【0015】

位相の変調が音響波とポンプ波と入射波とから選択された一つの波に加えられる。

【0016】

位相の変調が音響波に加えられる。

【0017】

振幅の変調が音響波とポンプ波と入射波とから選択された一つの波に加えられる。

【0018】

50

振幅の変調が前記音響波に加えられる。

【0019】

- レーザーを用いて初期光波を発生させる段階と、
- 初期波を第1ビームと第2ビームとにスプリットさせる段階と、
- 第1周波数シフトにより第1ビームの周波数をシフトさせて入射波を発生させる段階と、
- 第2周波数シフトにより第2ビームの周波数をシフトさせてポンプ波を発生させる段階と、により入射波とポンプ波は発生される。ここで、第2周波数シフトは第1周波数シフトと音響周波数との和に略等しい。

【0020】

第1周波数シフトと第2周波数シフトとの内の一つはゼロである。

【0021】

前記(d)段階において、信号波はダイナミックホログラフィック材料の第1面に加えられ、ポンプ波は材料の第1面と異なる第2面に加えられる。

【0022】

前記(d)段階において、信号波及びポンプ波はダイナミックホログラフィック材料の同一の面に加えられる。

【0023】

ダイナミックホログラフィック材料は“エネルギー伝達”モードで作動するように適合されたフォトリフラクティブ結晶である。

【0024】

ダイナミックホログラフィック材料は“異方性回折”モードで作動するように適合されたフォトリフラクティブ結晶である。

【0025】

対象の第2領域に関連するデジタル情報は、
第2領域における対象に所定の音響周波数の音響波を加えることにより、第2領域の振動を発生させる段階と

前記(b)から(e)段階を第2領域に繰り返して行う段階と、を実施することにより得られる。

【0026】

他の側面によると、本発明は、

(A) 所定の音響周波数を有する音響波を対象に加えることにより、対象の領域の振動を発生させるように設計された変換器と、

(B) 対象に入射波を加えて、音響波により周波数がシフトされた音響光学成分を少なくとも一つ有する信号光波を発生させるように設計され、且つ音響光学成分の周波数と同等な周波数で入射波とコヒーレントな光ポンプ波を発生させるように設計された光波発生装置と、

(C) 信号波及びポンプ波を加えることにより複素屈折率格子が形成されるように適合されたダイナミックホログラフィック材料と、

(D) 複素屈折率格子から領域の光の強度に関連するデジタルパラメータを得るように設計された検出装置と、を備える対象用音響光学イメージング装置に関する。

【0027】

本発明の他の実施例によると、下記のようにすることもできる。

【0028】

検出装置は、複素屈折率格子を通過する前記ポンプ波により発生される回折波と前記信号波との間の干渉を検出するように設計された検出器を備える。

【0029】

検出器は単一ピクセルフォトダイオードである。

【0030】

装置は、

10

20

30

40

50

ダイナミックホログラフィック材料の第 1 面に信号波を加えるように設計された第 1 光学装置と、

ダイナミックホログラフィック材料の第 2 面にポンプ波を加えるように設計された第 2 光学装置と、

ダイナミックホログラフィック材料の前記第 1 面に対向する第 3 面の画像を検出器上に形成するように設計された第 3 光学装置と、を備える。

【 0 0 3 1 】

ダイナミックホログラフィック材料の第 1 面及び第 2 面は同一の面である。

【 0 0 3 2 】

ダイナミックホログラフィック材料の第 2 面は第 1 面に直交する。

10

【 0 0 3 3 】

発生装置は、

初期波を発するように設計されたレーザーと、

初期波から第 1 ビーム及び第 2 ビームを発生させるように設計されたスプリッター装置と、

第 1 ビームの周波数をシフトさせて入射波を発生させるように設計された第 1 シフト装置と、

第 2 ビームの周波数をシフトさせてポンプ波を発生させるように設計された第 2 シフト装置と、を備える。ここで、第 1 シフト装置及び第 2 シフト装置は、ポンプ波が入射波の周波数と音響波の周波数の和に略等しい周波数を示すように設計されている。

20

【 0 0 3 4 】

第 1 シフト装置は一個、ゼロ個または二個の音響光学変調器を備え、第 2 シフト装置はそれぞれ一個、二個またはゼロ個の音響光学変調器を備える。

【 0 0 3 5 】

ダイナミックホログラフィック材料はフォトリフラクティブ結晶である。

【 0 0 3 6 】

ダイナミックホログラフィック材料はゲイン格子の形の複素屈折率格子で形成されるように設計された分布の反転を生じさせる材料であり、

装置は、材料内の分布の反転を維持するように設計されたエネルギー源を更に備える。

【 0 0 3 7 】

装置は、変換器を移すように、及び/又は変換器の焦点距離を変化させるように設計された制御装置を更に備える。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 3 8 】

本発明の他の特徴と利点は下記の本実施例の一つについての記載により明らかになる。本実施例は非限定的なものであり、添付した図面により明らかになる。

【 0 0 3 9 】

図 1 は本発明による音響光学イメージング装置を概略的に示す。

【 0 0 4 0 】

前記装置を用いて映し出される対象 1 が存在する。この対象は散乱媒体であり、典型的にはその厚さは数センチメートルであり、例えば、人間や動物の体の一部分やその他の生体組織である。

40

【 0 0 4 1 】

圧電型変換器 2 は対象 1 と音響的に接触しており、直接接触しているか、または例えば、水 4 で満たされたタンク 3 に浸漬させて対象 1 に音響的に結合させている。例えば、半径 7.5 mm の球形の出力面を備えた直径 3.7 mm のパナメトリックス (Panametrics) 圧電型変換器が用いられる。変換器はその直線上にある対象の領域を振動させ、特に領域 5 を例えば 2 MHz の超音波音響周波数 f_0 で振動させる。圧電型変換器 2 は、対象の表面の任意の位置に向けて配置される。圧電型変換器 2 はまた、光学的な情報が求められる映し出される対象の任意の領域 5 に焦点を合わせられるように設計されている。

50

【 0 0 4 2 】

圧電型変換器 2 の焦点距離を変更するように、及び映し出される対象 1 の表面を向く圧電型変換器の移動を制御するように設計されたマイクロコンピュータ等の制御手段（図示せず）も存在しており、映し出される対象 1 を一次元、二次元または三次元的に走査できる。

【 0 0 4 3 】

映し出される対象 1 の領域 5 に対して圧電型変換器 2 により与えられる略音響周波数 f_a の値分だけ周波数をシフトさせた二つのコヒーレントな光波を発生させるように設計された光波発生装置 G E N も存在している。下記で説明する装置以外の他の装置もこの目的のために用いることが可能である。

10

【 0 0 4 4 】

例えば波長 $1.06 \mu\text{m}$ で出力 100mW の単一周波数 Y A G レーザー等のレーザー 6 が存在する。レーザー 6 は本実施例においては垂直偏光を示す初期光学波 I N I を発する。初期波 I N I は、例えば各々のビームの得られる出力が略 50mW となるような 50% スプリットングプリズム等のスプリットングプリズム 7 により、第 1 ビーム F 1 と第 2 ビーム F 2 にスプリットされる。

【 0 0 4 5 】

入力としてそれぞれビーム F 1 と F 2 を受光する第 1 音響光学変調器 8 a と第 2 音響光学変調器 8 b も用いられる。これらの音響光学変調器 8 a 及び 8 b は、例えばクリスタルテクノロジー (C r i s t a l T e c h n o l o g y) 社製の変調器であり、周波数 $d f$ のシヌソイダルな無線周波数クロックにより駆動される二酸化テルル (T e O ₂) の音響光学セルを有しており、セルに対して加えられる波に対して $d f$ の値分だけ周波数をシフトさせた回折ビームと非回折ビームの両方を伝播させる。例えば、第 1 音響光学変調器 8 a は $d f = 73 \text{MHz}$ のクロックにより駆動され、初期波 I N I に対して 73MHz だけ周波数をシフトさせた入射波 I N C と呼ぶことにする波を出力として伝達する。第 2 音響光学変調器 8 b も同様に設計されており、 75MHz の周波数で駆動され、初期波 I N I に対して 75MHz だけ周波数をシフトさせたポンプ波 P M P と呼ぶことにする波を出力として伝達する。本実施例においては、効率が略 50% である音響光学変調器 8 a 、 8 b を用いることにより、入射波 I N C とポンプ波 P M P の各々に対して略 25mW の出力が得られる。

20

30

【 0 0 4 6 】

従って、映し出される対象 1 に対して圧電型変換器 2 により加えられる音響周波数に略等しい値だけ周波数をシフトさせた二つの相互干渉光波が生成される。

【 0 0 4 7 】

図 5 a に示す光波発生装置 G E N の第 1 変形体によると、入射波 I N C は音響光学変調器を通過しない。一方、ポンプ波は、第 1 音響光学変調器 8 a により第 1 周波数 $d f_1 = -73 \text{MHz}$ だけ入射波に対して周波数をシフトされて、その後、第 2 音響光学変調器 8 b により第 2 周波数 $d f_2 = +75 \text{MHz}$ だけシフトされる。従って、 $d f_1 + d f_2$ f_a となる。

【 0 0 4 8 】

図 5 b に示す光波発生装置 G E N の第 2 変形体によると、入射波 I N C は、第 1 音響光学変調器 8 a により第 1 周波数 $d f_1 = +73 \text{MHz}$ だけ初期波に対して周波数をシフトされて、その後、第 2 音響光学変調器 8 b により第 2 周波数 $d f_2 = -75 \text{MHz}$ だけシフトされる。ポンプ波 P M P は初期波 I N I に対して周波数はシフトされない。従って、 $f_{I N I} + d f_1 + d f_2 + f_a = f_{P M P}$ となる。ここで、 $f_{I N I}$ は初期波の周波数であり、 $f_{P M P}$ はポンプ波の周波数である。

40

【 0 0 4 9 】

従って、発生装置 G E N の実施例の図 1 と 5 a と 5 b により示される変形体においては、第 1 シフト装置がレーザー 6 と映し出される対象 1 との間に挿入されており、1 個、0 個または 2 個の音響光学変調器を備えている。また、第 2 シフト装置がレーザー 6 とホ口

50

グラフィック材料 9 との間に挿入されており、1 個、2 個または 0 個の音響光学変調器を備えている。つまり、“シフト装置”は必要ではないならば、別にいらぬ。

【0050】

残りの記載は、図 1 の発生装置の実施例についてである。

【0051】

第 1 音響光学変調器 8 a により得られる入射波 INC は、映し出される対象 1 の任意の地点に加えられ、映し出される対象 1 の領域 5 に関連した箇所である必要はない。光は対象 1 で散乱され、入射波 INC が加えられる方向と比較すると広範な立体角で、映し出された対象 1 の後方に拡がる信号波 SIG を生成する。入射波の光子のいくらかは、振動する領域を通過せずに映し出される対象 1 により散乱される。一方、振動する領域を通過する他の光子は、音響光学効果の対象となる。従って、信号波 SIG は主に、振動する領域を通過しない光子に対応する入射波 INC の周波数 f_I の“搬送波”成分と、映し出される対象 1 の領域 5 を通過する光子に対応する周波数 $f_{AO} = f_I \pm f_a$ の音響光学成分との二つの成分を有する。測定中の映し出される対象 1 の領域 5 に関連する情報を運ぶのは、この音響光学成分なのである。

【0052】

本発明によると、フォトリフラクティブ結晶等のダイナミックホログラフィック材料 9 を利用することが可能であり、例として寸法 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ のヒ化ガリウム (AsGa) から作られる。例えば特許文献 1 に記載されているフォトリフラクティブ結晶とは、信号波の及びポンプ波の干渉により屈折率格子が形成されるホログラフィック材料である。この屈折率格子はポンプ及び信号波の特徴による静的な成分を有しており、このような静的な屈折率格子は、フォトリフラクティブ結晶に加えられるポンプ波を回折させて、回折波 DIF を形成する。フォトリフラクティブ結晶 9 としては、例えば BSO、BGO、BTO 等の方蒼鉛石 (Silicite) 型の材料や、鉄をドーブしたリン化インジウム (InP)、バナジウムをドーブしたテルル化カドミウム (CdTe)、スズハイポチオニリン酸 (tin hypothyodiphosphate) 結晶 (SPS) や他の適切な材料を用いることも可能である。

【0053】

フォトリフラクティブ結晶の代わりに、ダイナミックホログラフィック材料として、YAG やチタンサファイア等のインバーテッドレーザー媒体を用いることも可能である。適切なレーザーによりポンピングされる対象であるこのような材料においては、ゲイン格子の形で複素屈折率格子を形成することが可能な分布の反転が生じる。これらの材料は、生物学上有益な波長である 770 nm から $1\text{ }\mu\text{m}$ の間の波長に対して感度が高いため、特に有益である。

【0054】

本実施例においては、信号波 SIG はフォトリフラクティブ結晶 9 の第 1 面 9 a に加えられ。例えば、2 つの大口径レンズ 10、11 により形成された第 1 光学装置を用いて、映し出される対象 1 の“背”面 1 a の画像がフォトリフラクティブ結晶 9 の面 9 a 上に形成される。レンズ 10、11 は、広範な立体角で散乱された信号波 SIG の可能な限り大部分を、フォトリフラクティブ結晶の面 9 a に復元させるように配置される。

【0055】

発生装置 GEN により発生させたポンプ波 PMP (例えば、第 2 音響光学変調器 8 b から得られた波) は、例えば、反射板 16 等の第 2 光学装置を用いて、フォトリフラクティブ結晶 9 の面 9 a に直交する面 9 b に加えられる。

【0056】

信号波 SIG とポンプ波 PMP との間の干渉により、フォトリフラクティブ結晶 9 内部に体積インターフェログラムが生成される。このインターフェログラムは、信号波の搬送波成分に関連した成分と、信号波の音響光学成分に関連した成分とを有する。音響波の周波数 f_a に等しいポンプ波 PMP と入射波 INC との間の周波数のシフトに対しては、(周波数 $f_I \pm f_a$) の信号波の音響光学成分に関連したインターフェログラムの成分は静

10

20

30

40

50

的である。何故ならば、ポンプ波 P M P の周波数がこの信号波の音響光学成分に等しいからである。しかしながら、入射波とポンプ波との間に形成されたインターフェログラムの成分は、音響周波数において時間的な変調を与える。この変化は非常に高速であり、屈折率格子がダイナミックホログラフィック媒体内に刻まれる。従って、フォトリフラクティブ効果により、音響光学成分に関連した静的なインターフェログラムは、主に領域 5 内の音響周波数 f_0 の試料の振動により生成されるものであり従ってこの領域の試料の光学的性質を特徴付けるものである前記音響光学成分に関連したスペックル像を復元する屈折率格子を、結晶内に生成する。

【 0 0 5 7 】

同時にまたはその後で、フォトリフラクティブ結晶 9 に加えられたポンプ波は、結晶内に形成された屈折率格子により、信号波 S I G と同じ方向に回折される。屈折率格子は信号波 S I G の音響光学成分の空間的構造を記録するので、結晶により回折された波 D I F は同じ空間的構造を有する。従って、信号波 S I G と回折波 D I F との間の干渉は、結晶の表面全体に亘って、空間的にコヒーレントなままである。従って、例えばシリコンフォトダイオード等の単一ピクセル検出器を用いてこの干渉を観測することが可能である。大口径レンズ 1 3 , 1 4 により形成された第 3 光学装置を用いて、遠方のフォトダイオード 1 2 上に面 9 c の画像を形成することが可能である。結晶 9 の面 9 c の表面領域よりもはるかにフォトダイオードが小さい場合には、フォトダイオード 1 2 上に光を集中させるレンズ 1 5 を用いることができる。

【 0 0 5 8 】

ダイナミックホログラフィック材料の二つの直交する面に対して信号波とポンプ波を加えることにより、検出される信号が検出器に向かって散乱されずにポンプ波の方向に散乱されてしまうような結晶の及び装置の組み立て上の欠陥の影響が制限される。

【 0 0 5 9 】

信号波とポンプ波との間の角度をゼロ度にはならない角度で小さくすることにより、結晶内にフォトリフラクティブ効果が生じる速度を上げることができる。従って、結晶の同じ面に両方の波を加えることが可能である。しかしながら、組み立て上の欠陥と結晶の欠陥の影響が検出器上で更に大きくなってしまふ。中間の角度を選択して、上記二つの例を適切に交換することも可能である。

【 0 0 6 0 】

従って、フォトダイオード 1 2 上の検出される光の強度により、映し出される対象 1 の領域 5 に関連する情報を得ることが可能になる。また、圧電型変換器 2 の焦点距離または変換器自体を対象 1 の表面に向けて動かすことにより、1 次元、2 次元または 3 次元的な対象の画像を形成することが可能である。この画像は、対象 1 に同時に形成される超音波（超音波検査法）により画像と結合させることも可能である。何故ならば、用いられる圧電型変換器はこのような超音波画像を形成可能なタイプのものであってもよいからである。

【 0 0 6 1 】

本発明においては、下記のように検出器 1 2 上における検出精度を改善することが可能である。

【 0 0 6 2 】

フォトリフラクティブ結晶 9 を用いることにより、信号波のマーキングされていない成分によるノイズを消去することが可能である。何故ならば、結晶内で生じるフォトリフラクティブ効果は選択的なものであり、信号波 S I G の音響光学成分に対してのみ生じるからである。実際、ポンプ波は音響光学成分と同じ周波数である。こうした条件の下では、ポンプ波 P M P と信号波 S I G の音響光学成分との間の干渉のみが全時間に亘り安定なままであり、結晶 9 内に屈折率格子を生成することが可能となる。この静的な干渉信号は、例えば、フォトダイオードの暗電流やフォトリフラクティブ結晶の不完全性等による連続的なバックグラウンドノイズと区別することが困難である。この干渉を連続的なバックグラウンドノイズに対して明確にするためには、フォトダイオード 1 2 上で得られる信号の

10

20

30

40

50

時間的な変調につながる時間的に変化するインターフェログラムを有することが好ましい。そのために、インターフェログラムを生成する波の一つの振幅または位相を変調させることができる。

【 0 0 6 3 】

例えば、映し出される対象 1 上の入射波 I N C、フォトリフラクティブ結晶 9 の面 9 b 上に生成させるポンプ波 P M P、または圧電型変換器 2 により生成される音響波の位相を変調させることが可能である。これら三つは全て可能であるが、以下においては、音響波の位相を変調させた場合について例示する。

【 0 0 6 4 】

フォトダイオード上の信号の時間的な変調を得るためには、音響波の変調は以下の三つの条件を満たす必要がある。

- フォトリフラクティブ結晶 9 内の屈折率格子を形成するのに必要な時間よりも、変調は短時間でなされなければならない（平均化を行う屈折率格子が変調により影響を受けないために）。

- 変調は、（検出感度をよくするような）適切な振幅を有するものでなければならない。

- 屈折率格子を形成するのに必要な時間の間は、変調波の平均値がゼロになってはならない（信号波 S I G の平均値に依存する屈折率格子が存在可能となるために）。

【 0 0 6 5 】

この条件を満たすような変調は多数存在する。例えば、図 2 はこの基準を満たす変調を示す。音響位相 ϕ は、 $\phi = 0$ から $\phi = \pi$ の矩形パルスへと変調される。矩形パルスのデューティサイクルは $1/2$ とはならないように取られ、例えば、 302 Hz のパルス周波数に対しては、 $1/8$ となるように取られる。

【 0 0 6 6 】

信号波 S I G の音響光学成分は、変換器 2 に加えられる音響波に関連している。従って、信号波の音響光学成分の位相は、音響波と同じ位相の変調を示す。そうして、信号波の音響光学成分は、位相シフト $\phi = 0$ の信号波の音響光学成分値の $6/8$ に等しい平均値を示す。フォトリフラクティブ結晶 9 に形成される屈折率格子は 0 ではなく、信号波 S I G の音響光学成分の平均値 $\langle E_{A O} \rangle$ に対応する。

【 0 0 6 7 】

本実施例においては、フォトリフラクティブ結晶 9 は、結晶 9 がいわゆる“エネルギー伝達”構成を示すように方向付けられた面 9 a、9 b、9 c を有する。この配置においては、回折波 D I F は信号波の音響光学成分と同じ偏光を有する。更には、回折波 D I F は、 $\langle E_{A O} \rangle$ の位相、つまり $E_{A O}$ ($\phi = 0$) の位相にある。

【 0 0 6 8 】

図 3 a 及び 3 b に示すように、音響波の位相の変調 ϕ は、フォトダイオード 1 2 で見られる $|E|^2$ の信号の変調で反射される。

【 0 0 6 9 】

図 3 a においては、位相の変調 ϕ は 0 (“書き出し”ステップ) に等しく、回折波 D I F は信号波の音響光学成分の位相にある。結晶 9 内の振幅 E は最大であり、信号波の音響光学成分および回折波のそれぞれの振幅 $E_{A O}$ および $E_{d i f}$ の和に対応する。フォトダイオードで見られる信号は、強度 $I = |E|^2$ に比例して、最大である。

【 0 0 7 0 】

図 3 b は、位相の変調 ϕ が π (“読み出し”ステップ) に等しい場合であり、回折波 D I F は信号波の音響光学成分の逆位相にある。全体の振幅 E は、信号波の音響光学成分の振幅 $E_{A O}$ と、回折波の振幅 $E_{d i f}$ の差に対応し、フォトダイオードで見られる信号としては最小である。

【 0 0 7 1 】

図 4 はオシロスコープのスクリーンを示し、信号 (C) は、映し出される対象に加えられる音響波の位相の変調を表しており、 $1/8$ のデューティサイクルと 305 Hz の周波

10

20

30

40

50

数を示している。信号(A)は、鳥のフィレ肉の厚さ2cmの薄片である映し出される対象に対して検出された信号を表す。信号(B)は、鳥のフィレ肉の厚さ4cmの薄片に対して50倍に拡大された平均の検出された信号を表す。

【0072】

例えばポンプレーザー媒体等の他の構成に対しては、役割が逆になる。つまり、 $\theta = 0$ に対して逆位相となり、 $\theta = \pi$ に対して信号の位相となる。

【0073】

映し出される対象1の領域5に関連する情報は、フォトダイオード12により検出される信号の同期検出により抽出することが可能である。

【0074】

“エネルギー伝達”構成においては、フトリフラクティブ結晶9は必ずしも用いられるものではない。異なって方向付けられた面9a、9bを有する結晶を用いて、“異方性”構成を用いることも可能である。屈折率格子により回折された波及び信号波の音響光学成分は、直交偏光を有するようになる。二つの波を干渉させるために、例えば、周知の方法で1/4波長板や偏光キューブが用いられる。例えば、この構成で用いられる位相の変調により、50%のデューティサイクルで0から $\pi/2$ へのパルスの位相の変調が行われる。従って、直線的な検出が可能である。

【0075】

本実施例の装置により、従来技術の装置の場合とは異なり、フォトダイオードを用いて広範な光学的空間に亘って検出することが可能であるので、質の良い画像を得ることができる。

【0076】

フトリフラクティブ効果の周波数選択性は、屈折率格子を形成するのに必要な時間 T_p と、ポンプ波PMPと信号波の搬送波成分との間の周波数の差 $f_a = 2\text{MHz}$ とにより特徴付けられる。 $T_p \times f_a \gg 1$ の時には、信号波の成分に関連したフォトン屈折率格子を生成しない。

【0077】

この選択性の条件は非常に幅広く実施される。本実施例においては、例えば、 $T_p = 1 \sim 10\text{ms}$ とする。これは、 $T_p \times f_a = 10^3 \sim 10^4$ に相当する。

【0078】

このような装置により、従来技術の装置と比較して測定速度を上昇させることが可能となる。測定速度を上昇させることは、測定時間を減少させることを意味し、従って形成時間 T_p を減少させる。ポンプ波PMPの出力を本実施例の場合と比べて増加させることにより、この形成時間は簡単に減少可能である。例えば、初期波INIの出力を増加させることにより、入射波INCの出力とポンプ波PMPの出力の両方を増加させることが可能である。ポンプ波PMPの出力の増加は、形成時間を減少させる。他方、入射波INCの出力の増加は、信号を増大させる。本実施例の場合と比べて初期波の出力を増加させることが可能であり、従って、入射波の出力が増加されるが、人体組織を取り扱うのに安全な範囲内に保持されている。ポンプ波は試料を通過しないので、ポンプ波の出力は安全性に関する問題を有さない。

【0079】

本実施例に対して、実施例の変形体を用いて下記の構成を実施することが可能である。

- 更に強力なレーザーを用いる。
- 大きなダイオード領域を有し同じ角度の開口を保持するように更に大口径のレンズ10、11、12、13を用いる。
- 例えばペルチエ冷却フォトダイオード等の更に低ノイズなフォトダイオード12を用いる。
- 更に広範な領域を有するフォトダイオードを用いる。

【0080】

これらの構成の全てにより、検出の信号対ノイズの比を増加可能である。

10

20

30

40

50

【図面の簡単な説明】

【0081】

【図1】本発明による音響光学イメージング装置の概略図である。

【図2】音響波の位相の変調を表す時間のダイアグラムである。

【図3a】結晶の書き出しのフォトリフラクティブ結晶内の様々な成分の振幅を表す位相のダイアグラムである。

【図3b】結晶の読み出しのフォトリフラクティブ結晶内の様々な成分の振幅を表す位相のダイアグラムである。

【図4】映し出される二つの対象についてオシロスコープのスクリーン上に得られた信号である。

10

【図5a】光波発生装置の実施例の変形体の概略図である。

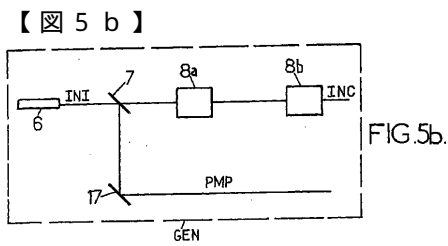
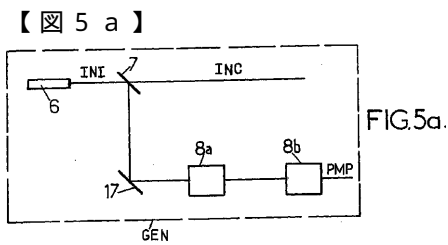
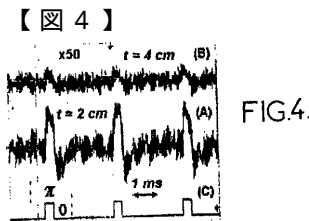
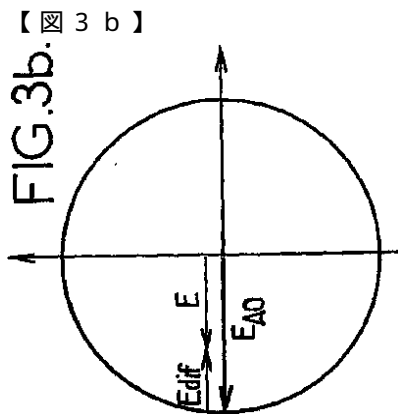
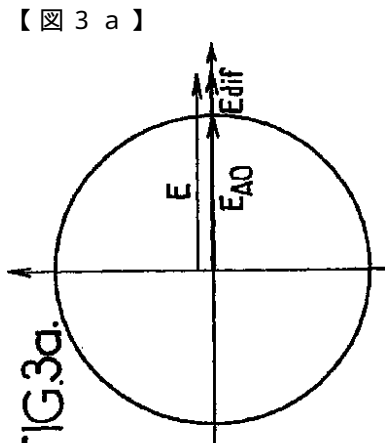
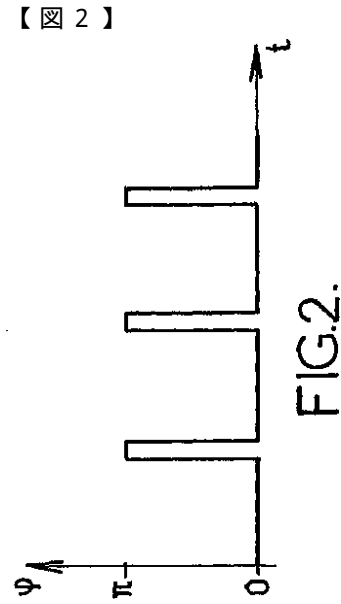
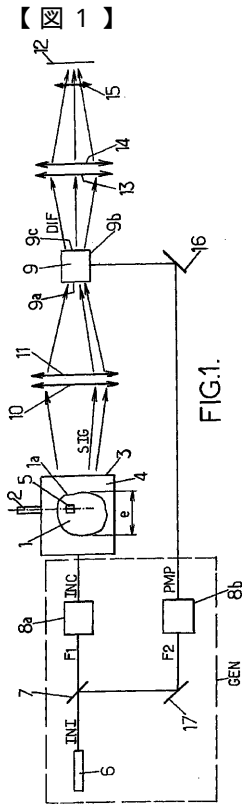
【図5b】光波発生装置の実施例の変形体の概略図である。

【符号の説明】

【0082】

- 1 対象
- 2 圧電型変換器
- 3 タンク
- 4 水
- 5 領域
- 6 レーザー
- 7 スプリットングプリズム
- 8 a、8 b 音響光学変調器
- 9 ダイナミックホログラフィック材料
- 10、11、13、14 大口径レンズ
- 12 フォトダイオード
- 15 レンズ
- 16 反射板

20



フロントページの続き

(51) Int.Cl. F I
G 0 2 F 1/11 (2006.01) G 0 2 F 1/11

(74)代理人 100089037

弁理士 渡邊 隆

(74)代理人 100108453

弁理士 村山 靖彦

(74)代理人 100110364

弁理士 実広 信哉

(72)発明者 ミシェル・グロス

フランス・9 3 4 2 0・ヴィレピント・リュ・オシュ・6

(72)発明者 フランソワ・ジョルジェ・ジェラル・ラマス

フランス・9 4 2 7 0・ル・クルムリン - ビセントル・アヴェニュー・ドゥ・フォンテヌブリュー・
8 8 ビス

(72)発明者 ベノア・クロード・フォルジェ

フランス・7 5 0 0 5・パリ・リュ・ドゥ・フェル・ア・ムーラン・2 6

(72)発明者 ジェラル・ローセン

フランス・7 8 7 2 0・ラ・セル・レ・ポルデ・リュ・ドゥ・ラ・ギロワール・3

(72)発明者 フィリップ・ドゥライエ

フランス・7 5 0 1 0・パリ・リュ・シヨドゥロン・3

(72)発明者 アルベル・クロード・ポッカラ

フランス・7 5 0 0 4・パリ・リュ・ドゥ・ラ・ヴェレーリ・5 4

審査官 後藤 慎平

(56)参考文献 米国特許第 0 6 1 7 5 4 1 1 (U S , B 1)

特開 2 0 0 0 - 0 8 9 6 4 8 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G01N 29/00

G03H 1/00~5/00