## (19) 日本国特許庁(JP)

# (12) 特許公報(B2)

(11)特許番号

# 特許第6186215号

(P6186215)

10

(45) 発行日 平成29年8月23日(2017.8.23)

- (24) 登録日 平成29年8月4日 (2017.8.4)
- (51) Int.Cl. F I GO 1 N 21/17 (2006.01) GO 1 N 21/17 6 3 O

講求頂の数	11	(全	17	互)
	TT	( <u></u>	Τ4	一只人

(21) 出願番号 (22) 出願日 (65) 公開番号	特願2013-182689 (P2013-182689) 平成25年9月4日 (2013.9.4) 特開2015-49204 (P2015-49204A)	(73)特許権者	
(43) 公開日	平成27年3月16日 (2015.3.16)	(74)代理人	100098660
審査請求日	平成28年2月19日 (2016.2.19)	( )	弁理士 戸田 裕二
		(72)発明者	大澤 賢太郎
			東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株
			式会社日立製作所内
		(72)発明者	冨田 大輔
			神奈川県横浜市戸塚区吉田町501番地
			株式会社日立メディアエレクトロニクス内
		(72)発明者	向尾 将樹
			東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株
			式会社日立製作所内
			最終頁に続く

- (54) 【発明の名称】光計測装置及び光断層観察方法
- (57)【特許請求の範囲】
- 【請求項1】
  - レーザ光を出射する光源と、
  - 前記光源を駆動する駆動電流に高周波電流を重畳する高周波重畳手段と、
  - 前記レーザ光を信号光と参照光とに分岐する光分岐素子と、
  - 前記信号光を測定対象に集光して照射する対物レンズと、
  - 前記信号光の集光位置を走査する集光位置走査手段と、
  - 前記信号光と前記参照光の間の光路長差を調整する光路長差調整手段と、
- 前記測定対象によって反射もしくは散乱された信号光を前記参照光と合波し、互いに位 相関係が異なる複数の干渉光を生成する干渉光学系と、
  - 前記干渉光を検出する光検出器と、
- 前記駆動電流に前記高周波電流を重畳しない状態で、前記光路長調整手段により前記信 号光と前記参照光の前記光路長差の調整を行い、前記調整を行った後、前記高周波重畳手 段により前記駆動電流に前記高周波を重畳して測定を行うように制御する制御部と、
- を有することを特徴とする光計測装置。
- 【請求項2】
- 前記対物レンズは0.4以上の開口数を有することを特徴とする請求項1に記載の光計 測装置。
- 【請求項3】
  - 駆動電流に高周波を重畳しない場合の前記レーザ光のコヒーレンス長は、信号光の集光 20

位置を走査あるいは単に変化させることにより生ずる信号光の光路長変化の最大値以上で あり、

駆動電流に高周波を重畳する場合の前記レーザ光のコヒーレンス長は、駆動電流に高周 波を重畳しない場合のコヒーレンス長よりも短いことを特徴とする請求項1に記載の光計 測装置。

【請求項4】

前記光路長差調整手段は、信号光の集光位置を光軸方向に走査することにより生ずる信 号光と参照光の光路長差を相殺するように駆動されることを特徴とする請求項1に記載の 光計測装置。

【請求項5】

10

前記光路長調整手段は、レンズと、前記レンズの焦点面に配置されたミラーと、前記レ ンズとミラーの位置を変調するアクチュエイターから成る、

ことを特徴とする請求項1または4に記載の光計測装置。

【請求項6】

前記干渉光学系において生成される干渉光は4つであり、

前記信号光と前記参照光の干渉位相が互いに略90度の整数倍だけ異なり、

前記信号光と前記参照光の干渉位相が互いに略180度異なる干渉光の対が電流差動型 の光検出器によって検出されることを特徴とする請求項1に記載の光計測装置。

【請求項7】

レーザ光を出射する光源と、

前記光源を駆動する駆動電流に高周波電流を重畳する高周波重畳手段と、

前記レーザ光を信号光と参照光とに分岐する光分岐素子と、

前記信号光を測定対象に集光して照射する対物レンズと、

前記信号光の集光位置を走査する集光位置走査手段と、

前記信号光と前記参照光の間の光路長差を調整する光路長差調整手段と、

<u>前記測定対象によって反射もしくは散乱された信号光を前記参照光と合波し、互いに位</u> 相関係が異なる複数の干渉光を生成する干渉光学系と、

前記干渉光を検出する光検出器と、

<u>信号光と参照光の光路長差を前記信号光の集光位置の走査により発生する信号光の光路</u> 長の変化速度よりも高速に変調させる光路長変調部とを有し、

<u>前記干渉光学系において生成される干渉光は2つであり、これらの干渉光は電流差動型</u>の前記光検出器によって検出されることを特徴とする光計測装置。

【請求項8】

前記高周波電流の周波数は、前記光検出器の応答周波数よりも大きいことを特徴とする 請求項1に記載の光計測装置。

#### 【請求項9】

高コヒーレンス光を出射する第一の光源と、

低コヒーレンス光を出射する第二の光源と、

前記高コヒーレンス光あるいは低コヒーレンス光を信号光と参照光とに分岐する光分岐 素子と、

40

50

前記信号光を測定対象に集光して照射する対物レンズと、

前記信号光の集光位置を走査する走査手段と、

前記信号光と参照光の間の光路長差を調整する光路長差調整手段と、

測定対象によって反射もしくは散乱された信号光を前記参照光と合波し、互いに位相関 係が異なる複数の干渉光を生成する干渉光学系と、

前記干渉光を検出する光検出器と、

を有することを特徴とする光計測装置。

【請求項10】

前記高コヒーレンス光のコヒーレンス長は、信号光の集光位置を光軸方向に走査することにより生ずる信号光の光路長変化以上であり、

前記低コヒーレンス光のコヒーレンス長は、前記高コヒーレンス光のコヒーレンス長よ りも短いことを特徴とする請求項9に記載の光計測装置。

【請求項11】

光源から出射するレーザ光を、信号光と参照光とに分岐し、

前記信号光の集光位置を走査して、前記信号光を測定対象に集光して照射し、前記測定 対象までの前記信号光の光路長から、前記信号光と参照光の間の光路長差を調整し、

その後の前記測定対象の測定時に、前記光源を駆動する駆動電流に高周波電流を重畳し

前記測定対象によって反射もしくは散乱された信号光を前記参照光と合波し、互いに位 相関係が異なる複数の干渉光を生成し、前記干渉光を検出する

ことを特徴とする光計測方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

[0001]

本発明は光断層観察装置及び光断層観察方法に関する。

【背景技術】

[0002]

近年、光を用いて測定対象の表面構造や内部構造を反映した画像を取得する光コヒーレ ンストモグラフィー(OCT:Optical Coherence Tomography)が注目を集めている(特 許文献1)。OCTは人体に対する侵襲性を持たないことから、特に医療分野や生物学分 野への応用が期待されており、眼科分野においては眼底や角膜等の画像を形成する装置が 実用化段階に入っている。OCTでは光源からの光を測定対象に照射する信号光と、測定 対象に照射せずに参照光ミラーで反射させる参照光とに2分岐し、測定対象から反射され た信号光を参照光と合波させ干渉させることにより信号を得る。

[0003]

OCTは測定位置の光軸方向への走査方法(以下、zスキャンと称する)により、大き くタイムドメインOCTとフーリエドメインOCTとに分けられる。タイムドメインOC Tにおいては、光源として低コヒーレンス光源を使用し、測定時に参照光ミラーを走査す ることによりzスキャンを行う。これにより信号光に含まれる参照光と光路長が一致する 成分のみが干渉し、得られた干渉信号に対して包絡線検波を行うことにより、所望の信号 が復調される。

[0004]

一方、フーリエドメインOCTはさらに波長走査型OCTとスペクトルドメインOCT とに分けられる。波長走査型OCTでは、出射光の波長を走査することが可能な波長走査 型光源を使用し、測定時に波長を走査することによりzスキャンがなされ、検出された干 渉光強度の波長依存性(干渉スペクトル)をフーリエ変換することにより所望の信号が復 調される。

[0005]

スペクトルドメインOCTにおいては、光源に広帯域光源を用い、生成された干渉光を 分光器により分光し、波長成分ごとの干渉光強度(干渉スペクトル)を検出することがz スキャンを行うことに対応している。得られた干渉スペクトルをフーリエ変換することに より所望の信号が復調される。

[0006]

なお、特許文献2記載のように、最も普及している眼底診断装置向けのOCTにおいて はNA0.02程度が一般的である。

【先行技術文献】 【特許文献】 [0007]【特許文献1】特開2011-218155号公報 【 特 許 文 献 2 】 特 開 2 0 1 0 - 1 6 9 5 0 3 号 公 報

10

30

【特許文献3】特開2008-65961号公報 【非特許文献】 【0008】 【非特許文献1】Optics Express Vol.19, 5536-5550 (2011) 【発明の概要】 【発明が解決しようとする課題】 【0009】

上に述べた従来のOCT装置には以下のような課題がある。タイムドメインOCTでは 、 z スキャンを行うために機械的にミラーを高速に走査する必要があるが、ミラーの走査 に伴い参照光の光軸に角度ずれが生じると信号強度が低下し、結果的にSN比が減少して しまうという問題がある。また、フーリエドメインOCTでは、 z スキャンを行うために 高速で波長を掃引する光源もしくは分光器が必要であり、これらはいずれも高価でかつ大 型であるため、OCT装置自体が高価でかつ大型になるという問題がある。 【 0 0 1 0 】

(4)

そこで本発明者らは、図1に示すように光源としてコヒーレンス長の長いレーザー光源 を適用し、高NAの対物レンズを用いてレーザー光(信号光)を測定対象に集光して照射 し、対物レンズを走査することにより集光位置を走査して測定対象の断層像を取得する構 成を検討した。本構成のOCT装置は、信号光に含まれる対物レンズの焦点以外からの反 射光成分は参照光とは波面の曲率が一致しないため干渉しなくなるという原理を用いて光 軸方向の信号の分離をすることにより3次元計測を可能にしており、広帯域光源(低コヒ ーレンス光源)もしくは波長走査型光源を用いる従来のOCT装置とは根本的に原理が異 なる。本構成においては、大型で高価な波長走査型光源や分光器を必要としないため、小 型で安価なOCT装置を提供することが可能となるが、コヒーレンス長の長いレーザ光を 使用するため、層間クロストークやスペックル等の光学干渉起因の画像劣化が生じやすく 、取得する断層像に悪影響となるという問題があった。

【課題を解決するための手段】

[0011]

(1)本発明は上記の課題を解決するために、レーザ光を出射する光源と、前記レーザ 光から干渉光を生成する光学系と、前記干渉光を検出する検出器と、に加えて高周波重畳 手段を設けることとした。本発明では、光源から出射されたレーザ光を信号光と参照光に 分岐し、対物レンズによって信号光を測定対象に集光して照射し、測定対象によって反射 もしくは散乱された信号光を参照光と合波させて互いに位相関係が異なる複数の干渉光を 生成し、それらを検出する。信号光の集光位置は集光位置走査手段により走査する。実際 には、駆動電流に高周波を重畳しない状態、すなわちレーザ光のコヒーレンス長が長い状 態で光路長調整手段により信号光と参照光の光路長差の調整を行った後、高周波重畳手段 により駆動電流に高周波を重畳し、コヒーレンス長が短い状態で測定を行う。

【0012】

これにより、波長走査型光源や分光器等の大型で高価な部材を用いる必要がないため、 小型で安価なOCT装置を提供することができる。また、従来のタイムドメインOCTと は異なり参照光ミラーを走査する必要がないため、参照光の光軸ずれによるSN比の減少 を防ぐことができる。さらに、高周波重畳手段によってコヒーレンス長を短くした状態で 測定を行うことにより、層間クロストークやスペックル等の光学干渉起因の画像劣化を抑 制することができる。

[0013]

(2) 一例として、第1の光束を測定対象に集光する対物レンズの開口数を0.4以上 とした。

[0014]

これにより、広帯域光源あるいは波長走査型光源を用いることなく、従来のOCT装置 と同等かそれ以上の光軸方向の空間分解能を達成可能である。

[0015]

30

40

(3) 一例として、駆動電流に高周波を重畳しない場合のレーザ光のコヒーレンス長は 、信号光の集光位置を走査あるいは単に変化させることにより生ずる信号光の光路長変化 の最大値以上であり、駆動電流に高周波を重畳する場合の前記レーザ光のコヒーレンス長 は、駆動電流に高周波を重畳しない場合のコヒーレンス長よりも短いこととした。ここで 、集光位置の走査とは像を取得するために集光位置を測定領域内でくまなく移動させるこ とを意味するのに対し、集光位置の変化とは、光軸に対して垂直な平面の像を測定深さを 変えて繰り返し取得する際の、測定深さを変える操作を意味する。

[0016]

これにより、駆動電流に高周波を重畳しない状態、すなわちレーザ光のコヒーレンス長 が長い状態において測定対象からの反射光の検出が容易になるため、測定対象までの信号 光の光路長を測定することにより、信号光と参照光の間の光路長差の調整を容易に行うこ とができる。さらに、駆動電流に高周波を重畳する状態、すなわちレーザ光のコヒーレン ス長が短い状態で測定対象の断層像を取得することにより、コヒーレンス長が長い状態に 比べて層間クロストークやスペックルを低減することができる。

[0017]

(4)一例として、光路長差調整手段は、信号光の集光位置を光軸方向に走査すること により生ずる信号光と参照光の光路長差を相殺するように駆動することとした。 【0018】

これにより、レーザー光のコヒーレンス長が、信号光の集光位置を走査することにより 生ずる信号光の光路長変化の最大値以下であっても、信号光と参照光の干渉効率が低下し <sup>20</sup> ないため、断層像を取得することができる。さらに対物レンズの移動量と光路長調整量か ら、測定対象の物理サイズと屈折率を算出することも可能となる。

[0019]

(5)一例として、光路長調整手段として、レンズと前記レンズの焦点面に配置された ミラーと、前記レンズとミラーの位置を変調するアクチュエイターを用い、参照光の光路 長を調整することとした。

【 0 0 2 0 】

これにより、ミラーの位置を変調する際にミラーに傾きが生じてもミラーを反射した参 照光の角度は変化しないため、信号光と参照光の干渉効率の低下を防ぐことができる。 【0021】

(6)一例として、干渉光学系において干渉光を4つ生成し、これら4つの干渉光は信 号光と参照光の干渉位相が互いに略90度の整数倍だけ異なり、信号光と参照光の干渉位 相が互いに略180度異なる干渉光の対を電流差動型の光検出器によって検出し、得られ た2つの検出信号に対して例えば二乗和の演算を施すこととした。

【0022】

これにより、信号光と参照光の位相差に依存しない、信号光の強度に比例した安定した 信号を得ることができる。また、得られた2つの検出信号の比をとり逆正接の演算を施す ことにより、信号光の位相情報を取得することも可能となる。さらに、電流作動型の検出 器を用いているため、参照光の強度を大きくしても検出器が飽和しにくくなり、電流作動 型の検出器を用いない場合よりも信号のSN比を大きくすることができる。 【0023】

(7)一例として、光路長変調部によって信号光と参照光の光路長差を、信号光の集光 位置の走査により発生する信号光の光路長の変化速度よりも高速に変調させ、干渉光学系 において干渉光を2つ生成し、これらの干渉光を電流差動型の光検出器によって検出し、 検出信号に対して包絡線検波を行うこととした。

【0024】

これにより、少ない検出器で所望の信号を取得することが可能となる。

[0025]

(8)一例として、高コヒーレンス光を出射する第一の光源、あるいは低コヒーレンス 光を出射する第二の光源から出射された高コヒーレンス光あるいは低コヒーレンス光を信 <sup>50</sup>

30

号光と参照光に分岐し、対物レンズによって信号光を測定対象に集光して照射し、測定対 象によって反射もしくは散乱された信号光を参照光と合波させて互いに位相関係が異なる 複数の干渉光を生成し、それらを検出する。信号光の集光位置は集光位置走査手段により 走査する。実際には、高コヒーレンス光を用いて光路長調整手段により信号光と参照光の 光路長差の調整を行った後、低コヒーレンス光を用いて測定を行うこととした。また、さ らに高コヒーレンス光のコヒーレンス長は、信号光の集光位置を走査あるいは単に変化さ せることにより生ずる信号光の光路長変化の最大値以上であり、低コヒーレンス光のコヒ ーレンス長は、レーザ光源の駆動電流に対して高周波電流を重畳した場合のレーザ光のコ ヒーレンス長よりも短いこととした。

【0026】

10

これにより、光源に供給する駆動電流に高周波電流を重畳するか否かによってレーザ光 のコヒーレンスを変化させる構成に比べ、層間クロストークやスペックル等の光学干渉起 因の画像劣化をより一層抑制することができる。

【0027】

なお、高コヒーレンス光源と高NAの対物レンズを用いた装置として、例えば特許文献 3のような光ディスクの再生装置が挙げられる。光ディスクの再生装置は記録面に光を集 光し、光ディスクを回転させることにより信号を取得しており、集光位置を測定対象の内 部で走査する本発明のOCT装置とは信号の取得方法が異なる。また、光ディスクの再生 装置においては媒体側(光ディスク)の設計によって層間クロストークを抑えることが可 能であるのに対して、OCTは構造が未知の測定対象を非侵襲・非接触で3次元計測する 技術であるから、測定対象を操作することにより層間クロストークを抑制することはでき ない。すなわち、光ディスク装置における層間クロストーク抑制方法をOCT装置に適用 することは困難である。

20

【発明の効果】 【0028】

本発明によれば、波長走査型光源もしくは分光器を用いずに測定対象の断層画像を取得 し、層間クロストークやスペックル等の光学干渉起因の画像劣化を抑制することが可能な 光計測装置を提供することができる。

【0029】

上記した以外の、課題、構成及び効果は、以下の実施形態の説明により明らかにされる <sup>30</sup>

## 【図面の簡単な説明】

 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix}$ 

【図1】本発明者らが検討したOCT装置の構成を表す模式図。

【図2】本発明の光計測装置の構成例を示す摸式図。

【図3】本発明の光計測装置において対物レンズを光軸方向に走査した際に得られる信号の模式図。

【図4】本発明の光計測装置を用いて測定したタマネギの細胞の断層像。

- 【図5】本発明の光計測装置の構成例を示す摸式図。
- 【図6】集光位置の実際の走査経路の例を示す摸式図。
- 【図7】本発明の光計測装置の構成例を示す摸式図。

【図8】本発明の光計測装置における対物レンズを光軸方向に走査した際に得られる信号の模式図。

- 【図9】本発明の光計測装置の構成例を示す摸式図。
- 【図10】OCT装置の動作動作手順を説明する図。

【発明を実施するための形態】

[0031]

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。

【実施例1】

[0032]

図2は、本発明による光計測装置の基本的な実施形態を示す模式図である。 【0033】

ドライバー回路201や高周波重畳回路202から電流を供給されることにより、光源203からレーザ光が出射される。レーザ光はコリメートレンズ204によって平行光に変換され、光学軸方向を調整可能な /2板205によって偏光を回転させられた後、偏光ビームスプリッタ206によって信号光と参照光に2分岐される。信号光は光学軸方向が水平方向に対して約22.5に設定された /4板207を透過して偏光状態をs偏光から円偏光に変換された後、開口数が0.4以上の対物レンズ208によって測定対象210に集光して照射される。ここで、対物レンズ208は制御部227による制御のもとで対物レンズアクチュエータ209によって走査され、これにより対物レンズ208によって平行光に変換され、 /4板207によって偏光状態を円偏光からp偏光に変換され、偏光ビームスプリッタ206へ入射する。

【0034】

一方、参照光は / 4 板 2 1 1 を透過し、偏光状態を p 偏光から円偏光に変換され、光路長調整手段である移動ステージ 2 1 2 の上に配置されたミラー 2 1 3 に入射し反射された後、 / 4 板 2 1 1 によって偏光状態を円偏光から s 偏光へ変換されて偏光ビームスプリッタ 2 0 6 へ入射する。

[0035]

信号光と参照光は偏光ビームスプリッタ206によって合波され、合成光が生成される 。合成光はハーフビームスプリッタ215、 / 2板216、 / 4板217、集光レン ズ218,219、ウォラストンプリズム220,221から成る干渉光学系214へ導 かれる。

[0036]

干渉光学系214へ入射した合成光は、ハーフビームスプリッタ215によって透過光 と反射光に2分岐される。透過光は光学軸が水平方向に対して約22.5度に設定された /2板216を透過した後、集光レンズ218によって集光され、ウォラストンプリズ ム220によって偏光分離されることにより互いに位相関係が180度異なる第一の干渉 光と第二の干渉光が生成される。第一の干渉光と第二の干渉光は電流差動型の光検出器2 22によって検出され、それらの強度の差に比例した信号224が出力される。 【0037】

30

40

10

20

一方、反射光は光学軸が水平方向に対して約45度に設定された /4板217を透過した後、集光レンズ219によって集光され、ウォラストンプリズム221によって偏光分離されることにより互いに位相関係が180度異なる第三の干渉光と第四の干渉光は第一の干渉光に対して位相が90度異なる。第三の干渉光と第四の干渉光は電流差動型の光検出器223によって検出され、それらの強度の差に比例した信号225が出力される。このようにして生成された信号224,223は信号処理部226に入力され、演算されることにより信号光の振幅に比例した信号が得られる。この信号を元に形成された測定対象の断層画像が画像表示部228に表示される。 【0038】

ここで、干渉光学系214の動作原理について数式を用いて詳細に説明する。干渉光学系214へ入射する時点での合成光のジョーンズベクトルを

【0039】

【数1】

 $\left( \begin{array}{c} E_{sig} \\ E \end{array} \right)$ 数1 (1)

[0040]

と表すこととすると、ハーフビームスプリッタ215を透過し、さらに /2板216を 透過した後の合成光のジョーンズベクトルは次のようになる。 【0041】

【数2】

数2 
$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{sig}/\sqrt{2} \\ E_{ref}/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} E_{sig} - E_{ref} \\ E_{sig} + E_{ref} \end{pmatrix}$$
 (2)

[0042]

ウォランストンプリズム220によって式(2)で示される合成光はp偏光成分とs偏 光成分に偏光分離された後、電流差動型の光検出器222によって差動検出されるので、 検出信号224は以下の様に表される。

【0043】

【数3】

数3  
$$I = \frac{1}{4} |E_{sig} + E_{ref}|^2 - \frac{1}{4} |E_{sig} - E_{ref}|^2$$
$$= |E_{sig}||E_{ref}|\cos(\theta_{sig} - \theta_{ref})$$
(3)

[0044]

ここで、 <sub>sig</sub>, <sub>ref</sub>はそれぞれ複素数 E<sub>sig</sub>, E<sub>ref</sub>を極座標表示で表した際の位相であ る。簡単のため検出器の変換効率は 1 とした。

【0045】

一方、ハーフビームスプリッタ215で反射され、さらに /4板217を透過した後 の合成光のジョーンズベクトルは次のようになる。

【0046】 【数4】

**数4** 
$$\begin{pmatrix} i/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{sig}/\sqrt{2} \\ E_{ref}/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} i(E_{sig} - iE_{ref}) \\ E_{sig} + iE_{ref} \end{pmatrix}$$
(4)

[0047]

ウォランストンプリズム221によって、式(4)で示される合成光はp偏光成分とs 偏光成分に偏光分離された後、電流差動型の光検出器223によって差動検出されるので 、検出信号223は以下の様に表される。

- [0048]
- 【数5】

$$Q = \frac{1}{4} \left| E_{sig} + i E_{ref} \right|^2 - \frac{1}{4} \left| E_{sig} - i E_{ref} \right|^2$$
$$= \left| E_{sig} \right| \left| E_{ref} \right| \sin\left(\theta_{sig} - \theta_{ref}\right)$$
(5)

【0049】

数5

これらの出力に対して、信号処理部226にて以下の演算を行うことにより、位相に依存しない、信号光の強度に比例した信号が得られる。

50

40

20

$$\left|E_{sig}\right|^{2}\left|E_{ref}\right|^{2} = I^{2} + Q^{2}$$
 (6)

【0051】

上記の様に干渉光学系214では位相が互いに90度づつ異なる4つの干渉光を生成して 検出することにより位相に依存しない信号を得るが、原理的には生成される干渉光が3つ 以上であれば干渉光がいくつであっても同様の信号を得ることができる。例えば、位相が 10 互いに60度づつ異なる3つの干渉光を生成して検出することにより、数6に示されるの と同一の信号を得ることができる。

(9)

【0052】

続いて、本発明のOCT装置の動作について説明する。動作手順を図10に示した。ま ず始めに、測定対象物210を対物レンズ208の近傍に配置する。次に制御部227は ドライバー回路201により光源に電流を供給しコヒーレンス長の長いレーザ光を出射さ せ、対物レンズ208を光軸方向に走査する。本実施例では、出射されるレーザ光のコヒ ーレンス長が対物レンズの走査により発生する信号光の光路長変化よりも長い光源を利用 しているため、集光位置の走査範囲内に測定対象が配置されていれば、例えば図3Aに示 すような測定対象からの信号が得ることができる。図3Aに示した様なデータを取得する ことにより、測定対象からの信号が検出される時の対物レンズ208の位置情報を取得す ることができるため、測定対象物までの信号光の光路長を算出することができる。制御部 227は信号処理部226にて算出された測定対象までの信号光の光路長に基づいて移動 ステージ213を駆動し、測定対象までの信号光の光路長と参照光の光路長の差がほぼ0 になるように調整する。光路長の調整が完了した後に、制御部227は高周波重畳回路2 02を駆動して光源の駆動電流に高周波電流を重畳する。これにより、レーザ光のコヒー レンス長は高周波電流を重畳しない場合よりも短くなる。その後、制御部227は対物レ ンズアクチュエータを走査することにより集光位置を測定対象の被測定領域内で走査させ 、信号処理部226は検出信号224,225を元に画像データを生成し、画像表示部に 表示させる。ここでは、高周波電流の周波数は、検出器の応答周波数よりも大きいものと した。これにより、高周波電流により変調された光強度信号は検出されないため、測定対 象の情報を反映した信号のみを検出することができる。

30

20

【0053】

なお、ここでは、対物レンズ自体を走査する例を示したが、集光位置を走査すれば良い ので、必ずしも対物レンズ自体を走査する必要はなく、電気式の焦点可変レンズとガルバ ノミラーなどを用いても構わない。

【0054】

続いて、高周波重畳の実験例について説明する。高周波電流重畳時のコヒーレンス長は 、光源の特性や重畳する高周波電流の周波数や振幅等の条件によって異なる。一例として 、図3Bに発振波長785nmの光源に対して異なる周波数の高周波電流を重畳した場合の レーザ光のコヒーレンスを示した。一般的に高周波電流の周波数を大きくするとコヒーレ ンス長は短くなり、ある周波数以上ではほとんど変化しなくなる傾向にある。測定時のレ ーザ光のコヒーレンス長は測定対象の構造のスケールよりも小さいことが好ましく、図3 Bに示す特性をもつ光源で100um程度の構造を持つ測定対象を測定する場合には周波数 をおよそ200MHz以上(コヒーレンス100um程度以下)で測定を行う。ここではコ ヒーレンス長は干渉度が50%となる光路長差として定義した。

【0055】

本実施例では、従来のOCT装置のように分光器や波長走査型光源を用いていないため、小型で安価なOCT装置を提供することができる。さらに、レーザ光のコヒーレンスを 制御可能であるため、上述のようにコヒーレンス長の長い状態で光路長調整を行い、コヒ

ーレンス長の短い状態で測定を行うことが出来る。これにより、光路長調整を容易に行う ことができ、かつ層間クロストークやスペックルを低減することができる。仮に、本実施 例で従来のOCTで用いられている高帯域光源(低コヒーレンス光源)を用いた場合には 、集光位置の走査範囲内に測定対象が配置されており、かつ測定対象までの信号光の光路 長と参照光の光路長が測定対象配置時点で合っていなければ測定対象からの信号は得られ ないため、光路長調整が困難となる。図4はタマネギの細胞を本実施例のOCCT装置を用 いて、高周波電流を重畳しない場合とする場合の2通りの条件で測定した結果である。図 4 A の画像の測定領域は100m×100mで、光軸に対して垂直な平面内(光軸方向をz方向と したときのxy面)の断層像である。画像中の白い筋はタマネギの細胞壁であるが、高周波 電流を重畳しない場合に見えている細胞壁の像が、高周波電流を重畳する場合には消えて いることが分かる。図4 B は図4 A の矢印の位置におけるそれぞれの画像の×方向の輝度 分布である。高周波重畳なしの場合に×位置0.6~0.7 にあるピークが、高周波重畳 ありの場合には消滅することがはっきりと確認できる。これは、高周波重畳により異なる 深さ位置からの信号の漏れこみ(層間クロストーク)が抑制されていることを意味する。

次に本発明のOCT装置の空間分解能について述べる。ここで、光軸方向の空間分解能 は対物レンズを光軸方向に走査した際に得られる単一反射面に対応するピークの半値全幅 として定義する。焦点位置が反射面からzだけずれた際の数6に対応する信号は以下の式 により表わされる。

【 0 0 5 7 】 【 数 7 】

数7 
$$sig(z) = |E_s|^2 |E_r|^2 \operatorname{sinc}^2\left(\pi \cdot \frac{z}{\lambda} NA^2\right)$$
 (7)

【0058】

上記の式より、単一反射面からの信号の半値全幅、すなわち光軸方向の空間分解能は近似 的に以下の様に表わされる。

【0059】 【数8】

数8 
$$0.886 \frac{\lambda}{NA^2}$$
 (8)

【 0 0 6 0 】

ここで、 はレーザ光の波長、NAは対物レンズ208の開口数である。一般的にOCT 装置で利用される光の波長はヘモグロビンにも水にも吸収されにくい600nmから130 0nm程度である。例えば対物レンズの開口数を0.4以上とすると、波長600nm~13 00nmでの光軸方向の空間分解能は約3.3um~約7.2umとなり、従来のOCT装置と 同等かそれ以上の高い光軸方向の分解能を達成できる。 【0061】

また、本実施例においては以下の演算を行うことにより信号光の位相情報を取得することも可能である。

( )

【0062】

【数9】

数9 
$$\theta_{sig} - \theta_{ref} = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right)$$
 (9)

20

10

30

(11)

[0063]

信号光の位相情報の活用方法としては、非特許文献1に挙げられているような細胞の活性 度のイメージングなどが挙げられる。

【実施例2】

【0064】

図5は、本発明による光計測装置の別の実施形態を示す模式図である。なお、図2に示した部品と同じものには同一の符号を付し、その説明を省略する。本実施例は測定時に参照光の光路長を信号光の光路長変化に同期させて調整するための光路長調整ユニット50 1を備えている点で第一の実施例と異なる。光路長調整ユニット501は、集光レンズ5 02と、集光レンズ502の焦点面に反射面が位置するように配置されたミラー503と 、集光レンズ503とミラー503を一体に動かすための光路長調整用アクチュエイタ5 04によって構成される。

【0065】

本実施例のOCT装置の動作手順は、測定対象物210を対物レンズ208の近傍に配 置後に図3に示した様なデータを取得し、駆動電流に高周波電流を重畳するところまでは 第一の実施例と同様であり、第一の実施例では移動ステージ212とミラー213によっ て光路長調整を行ったのに対して本実施例では光路長調整ユニット501を用いていると いう点でのみ異なる。以下では、測定対象の×z方向の断層像を取得する場合について説 明する。(z方向は光軸方向、 x 方向は光軸方向に垂直な方向を意味する。)制御部22 7 は対物レンズアクチュエータを走査することにより集光位置を測定対象の被測定領域内 で走査させると同時に、集光位置の走査によって生じる信号光と参照光の光路長差を相殺 するように光路長調整用アクチュエイタ504を駆動する。具体的には、測定対象の平均 的な屈折率をnとした場合、対物レンズ208の位置を zだけ光軸方向に移動させるこ とにより集光位置はおよそn× z 変化するため、信号光の光路長は往復でおよそ2×n <sup>2</sup> × zだけ変化する。従って、対物レンズ208の動きと同期して光路長調整ユニット 501により参照光の光路長をおよそ2×n<sup>2</sup>× zだけ変化させることで信号光と参照 光の光路長差の増大を抑制することができる。仮に測定対象の屈折率が全くの未知の場合 や測定領域内で空間的に大きく変化している場合であっても、n=1と設定しておけば光 路長差増大の抑制効果は得られる。

【0066】

本実施例においては、測定時の信号光と参照光の間の光路長差の増大を抑制するので、 信号光の光路長が測定時のレーザ光のコヒーレンス長以上に変化しても信号光と参照光の 干渉効率の低下を抑えることができる。従って、光軸方向に対してレーザ光のコヒーレン ス長よりも広い範囲が測定可能となる。さらに、ミラー503に傾きが生じてもミラー5 03を反射した参照光の角度は変化しないため、信号光と参照光の干渉効率の低下を防ぐ ことができる。

【 0 0 6 7 】

以下では、本発明の別の機能である測定対象の屈折率及び物理長の測定方法について述べる。例として、図6Aに示してあるような、反射面が3つ存在し、第一の反射面と第二の反射面の間の物理長と屈折率がそれぞれL」、n」、第二の反射面と第三の反射面の間の物理長と屈折率がそれぞれL」、n」、第二の反射面と第三の反射面の間の物理長と屈折率がそれぞれL」、n」である測定対象について説明する。始めに、コヒーレンス長の長い状態で対物レンズ208を光軸方向に走査し、図6Bに示した様な信号を取得する。この信号を元に測定対象の表面(第一の反射面)までの信号光の光路長を算出して光路長調整ユニット501を駆動し、測定対象の表面までの信号光の光路長と参照光の光路長の差がほぼ0になるように調整した後、このときのミラー503の位置×<sub>A</sub>を記録する。同様にして、再び光路長差調整ユニット501を駆動して、図6 Dのように第二の反射面からの信号振幅が最大となるように参照光の光路長を調整し、このときのミラー503の位置×<sub>B</sub>を記録する。同じように、図6Eのように第三の反射面

10

20



からの信号振幅が最大となるように参照光の光路長を調整し、このときのミラー503の 位置 X <sub>C</sub> を記録する。得られた X <sub>A</sub> , X <sub>B</sub> , X <sub>C</sub> 及びそれぞれの反射面からの信号振幅が 最大となる瞬間の対物レンズ208の位置A,B,Cに対して以下の演算を行うことによ り、L<sub>1</sub>, n<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, n<sub>2</sub>を求めることができる。

[0068]

【数10】

数10 
$$L_{1} = \sqrt{(B-A)(X_{B} - X_{A})}$$
  
 $L_{2} = \sqrt{(C-B)(X_{C} - X_{B})}$   
 $n_{1} = \sqrt{(X_{B} - X_{A})/(B-A)}$   
 $n_{2} = \sqrt{(X_{C} - X_{B})/(C-B)}$ 
(10)

10

[0069]

本機能は、高周波電流重畳時のレーザ光のコヒーレンス長が反射面の間の光路長よりも短 い場合に利用可能である。

【実施例3】

[0070]

20 図7は本発明の別の実施形態を示す模式図である。なお、図2に示した部品と同じもの には同一の符号を付し、その説明を省略する。光源203からレーザ光が出射され、信号 光と参照光が合波されることにより合成光が生成されるまでの構成は第一の実施例とほぼ 同様である。ただし、ミラー213が参照光の位相を高速に変調するためのピエゾアクチ ュエイタ701に搭載されているという点で異なる。合成光は / 2板216、集光レン ズ218、ウォラストンプリズム220から成る干渉光学系702へ導かれる。干渉光学 系602へ入射した合成光は、光学軸が水平方向に対して約22.5度に設定された / 2 板 2 1 6 を透過した後、集光レンズ 2 1 8 によって集光され、ウォラストンプリズム 2 20によって偏光分離されることにより互いに位相関係が180度異なる第一の干渉光と 第二の干渉光が生成される。第一の干渉光と第二の干渉光は電流差動型の光検出器222 によって検出され、それらの強度の差に比例した信号224が出力される。信号224は 以下の式で表される。

30

[0071]【数11】

数11 
$$I = 4 \left| E_{sig} \right| \left| E_{ref} \right| \cos \left( \theta_{sig} - \theta_{ref} \right)$$
 (11)

[0072]

本実施例では、信号取得時にピエゾ素子701を駆動して対物レンズ208の走査によ 40 り発生する信号光の位相変化よりも高速に参照光の位相を高速変調する。図8は本実施例 のOCT装置を用いて、対物レンズ208をz方向に走査した際に検出される信号につい て説明する図である。ここでは、図8Aの様に測定対象に反射面が3つ存在する場合の検 出信号を図8B,Cに示している。図8Bはピエゾアクチュエータ701を駆動しない場 合の信号の模式図である。この場合には、ある反射面からの信号の包絡線に含まれる波の 数は近似的に(信号のピーク幅)÷(波長)により与えられる。信号のピーク幅はレーザ 光の波長を、対物レンズのNAとしたときに /NA<sup>2</sup>と表わされるから、(信号のピ ーク幅)÷(波長)=1/NA<sup>2</sup>となる。例えばNA=0.6の場合、この値は約2.8 である。従って、包絡線の周波数と、それに含まれる波の周波数が2.8倍程度しか異な らないため包絡線検波の適用が困難であり、検出信号を元に画像データを生成することが できない。一方で、ピエゾアクチュエータ701を駆動する場合には、図8Cに示した様 50 な信号が得られる。この場合には、信号光の焦点位置が反射面を通過する間に参照光の位 相が高速変調されているので、ある反射面からの信号の包絡線に含まれる波の数が位相変 調のスピードに応じて増加する。これにより、包絡線の周波数とそれに含まれる波の周波 数が大きく異なるため、包絡線検波の適用が可能となり検出信号を元に画像データを生成 することができる。すなわち、本実施例においては、第一の実施例とは異なり検出信号か ら包絡線検波により所望の信号を取得することができるため、実施例1よりも少ない検出 器で同様の機能を実現することが出来る。

【実施例4】

[0073]

図9は本発明の別の実施形態を示す模式図である。なお、図2に示した部品と同じ部品 10 には同一の符号を付し、その説明を省略する。本実施例は高コヒーレンス光源901と低 コヒーレンス光源902の2種類の光源を有しているという点で第一の実施例と異なる。 高コヒーレンス光源から出射されるーザ光はコリメートレンズ903によって平行光に変 換され、偏光ビームスプリッタ906を透過した後、 /2板205に入射する。一方、 低コヒーレンス光源902から出射されるレーザ光は、コリメートレンズ905によって 平行光に変換された後、 /2板905によって偏光状態をs偏光状態に調整され、偏光 ビームスプリッタ906を反射して /2板205に入射する。その後のレーザ光の経路 は第一の実施例と全く同様であるからここでは説明を省略する。

【0074】

20 以下では、本発明のOCT装置の動作について説明する。まず始めに、測定対象物21 0を対物レンズ208の近傍に配置する。次に制御部227はドライバー回路201によ り高コヒーレンス光源901に電流を供給しコヒーレンス長の長いレーザ光を出射させ、 対物レンズ208を光軸方向に走査する。本実施例では、出射されるレーザ光のコヒーレ ンス長が対物レンズの走査により発生する信号光の光路長変化よりも長い高コヒーレンス 光源901を利用しているため、集光位置の走査範囲内に測定対象が配置されていれば、 例えば図3に示すような測定対象からの信号が得ることができる。図3に示した様なデー タを取得することにより、測定対象からの信号が検出される時の対物レンズ208の位置 情報を取得することができるため、測定対象物までの信号光の光路長を算出することがで きる。制御部227は信号処理部226にて算出された測定対象までの信号光の光路長に 基づいて移動ステージ213を駆動し、測定対象までの信号光の光路長と参照光の光路長 30 の差がほぼ0になるように調整する。光路長の調整が完了した後に、制御部227はドラ イバー回路201を制御して高コヒーレンス光源901への電流の供給を止め、低コヒー レンス光源に電流を供給し、コヒーレンス長の短いレーザ光を出射させる。その後、制御 部227は対物レンズアクチュエータを走査することにより集光位置を測定対象の被測定 領域内で走査させる。信号処理部226は検出信号224,225を元に画像データを生 成し、画像表示部に表示させる。

【0075】

本実施例においては高コヒーレンス光と低コヒーレンス光を利用可能であるため、上述 のようにコヒーレンス長の長い状態で光路長調整を行い、コヒーレンス長の短い状態で測 定を行うことが出来る。また、1つの光源を利用して高周波電流重畳の有無によりレーザ 光のコヒーレンス長を変化させる第一の実施例の場合に比べて、適用する光源次第で測定 時のレーザ光のコヒーレンス長はより短くすることが可能となる。これにより、層間クロ ストークやスペックルをより一層低減することができる。

40

【符号の説明】 【0076】 201:ドライバー回路 202:高周波重畳回路 203:光源

204:コリメートレンズ

205,216: /2板

【図1】

図1









【図4】





В





図5



【図6】















【図10】

А

図10

В

対物レンズの位置

С



フロントページの続き

審查官 横井 亜矢子

```
(56)参考文献 特開平09-133509(JP,A)
米国特許出願公開第2008/024767(US,A1)
特開2000-206449(JP,A)
特開2005-055538(JP,A)
米国特許第05847827(US,A)
特開2001-004538(JP,A)
米国特許出願公開第2010/0181462(US,A1)
特開2009-055538(JP,A)
国際公開第2012/127880(WO,A1)
特表2009-505073(JP,A)
米国特許出願公開第2007/0035743(US,A1)
特規2008-281484(JP,A)
Yimin Wang et al., Ultrahigh-resolution optical coherence tomography by broadband con
tinuum generation from a photonic crystal fiber, OPTICS LETTERS, 2003年 2月 1
日, Vol.28,NO.3, Page.182-184
```

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

 G 0 1 N
 2 1 / 0 0 - 2 1 / 0 1
 1

 G 0 1 N
 2 1 / 1 7 - 2 1 / 6 1
 1

 G 0 1 B
 9 / 0 0 - 9 / 1 0
 1

 G 0 1 B
 1 1 / 0 0 - 1 1 / 3 0