



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111094940 B

(45) 授权公告日 2022. 08. 16

(21) 申请号 201880048396.3

(22) 申请日 2018.07.18

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111094940 A

(43) 申请公布日 2020.05.01

(30) 优先权数据
PCT/JP2017/026091 2017.07.19 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2020.01.20

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2018/026936 2018.07.18

(87) PCT国际申请的公布数据
W02019/017392 JA 2019.01.24

(73) 专利权人 小川宏
地址 日本国神奈川县

(72) 发明人 小川宏

(74) 专利代理机构 北京旭知行专利代理事务所
(普通合伙) 11432

专利代理师 王轶 李伟

(51) Int.Cl.
G01N 21/17 (2006.01)
A61B 1/00 (2006.01)
A61B 3/10 (2006.01)
A61B 10/00 (2006.01)
G01B 11/24 (2006.01)

(56) 对比文件
US 2006146338 A1, 2006.07.06
CN 102846306 A, 2013.01.02
CN 102085093 A, 2011.06.08
WO 2014081158 A1, 2014.05.30
US 2011116045 A1, 2011.05.19
US 3788726 A, 1974.01.29
US 2014327916 A1, 2014.11.06
JP 2013154189 A, 2013.08.15 (续)

审查员 黄晓

权利要求书2页 说明书14页 附图14页

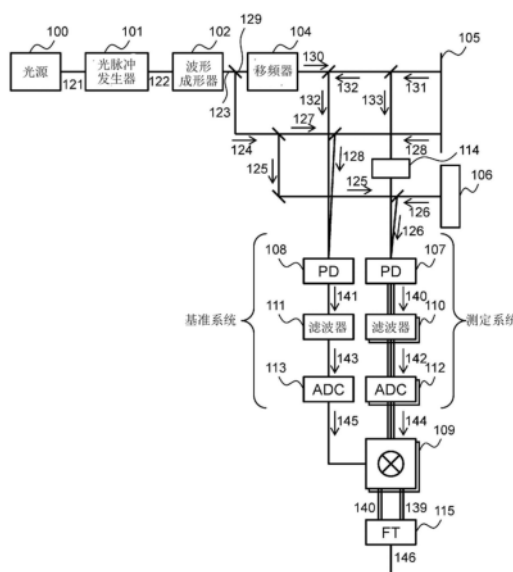
(54) 发明名称

断层图像拍摄装置

(57) 摘要

本发明是断层图像拍摄装置,其具有:光源;生成器,将连续光变换成相邻而形成的波形间的干涉低的周期性的光脉冲列;光脉冲成形器,对光脉冲列进行调制,并对分光所得到的2个光脉冲列中的一方的频率进行变换,其中,光脉冲列的脉冲宽度的空间长度比测定对象物的观察目标区域的深度范围还要小;光路长度变更部,对变换了频率后的光脉冲列的光路长度进行变更;光检测部,被输入有从光路长度变更部输出的光脉冲列以及来自测定对象物的背向散射波;滤波器,提取出从光检测部输出的具有移频器的移位频率的差信号;解调器,将由滤波器提取出来的差信号和与移频器的移位频率同步的基准信号进行合成;以及解析部,对由解调器输出的信号

进行解析。



CN 111094940 B

[接上页]

(56) 对比文件

US 2007014464 A1, 2007.01.18

CN 106166058 A, 2016.11.30

CN 105919550 A, 2016.09.07

1. 一种断层图像拍摄装置,其特征在于,
所述断层图像拍摄装置具有:
光源,其产生相干性的连续光;
生成器,其将所述连续光变换成相邻而形成的波形间的干涉低的周期性的光脉冲列;
光脉冲成形器,其利用具有自相关特性的PN编码,对光脉冲列进行2相相位调制,并对分光所得到的2个光脉冲列中的一方的频率进行变换,其中,所述光脉冲列的脉冲宽度的空间长度比测定对象物的观察目标区域的深度范围还要小;
光路长度变更部,其对变换了所述频率后的光脉冲列的光路长度进行变更;
光检测部,其被输入有从光路长度变更部输出的光脉冲列、以及在将从所述生成器输出的光脉冲列照射至测定对象物后再从所述测定对象物出去的背向散射波;
滤波器,其提取出从所述光检测部输出的且具有移频器的移位频率的差信号;
解调器,其将由所述滤波器提取出来的差信号、和与所述移频器的移位频率同步的基准信号进行合成;以及
解析部,其对由所述解调器输出出来的信号进行解析,
所述解析部对由所述解调器输出出来的信号进行解析,来计算测定对象物的反射点的位置。
2. 根据权利要求1所述的断层图像拍摄装置,其特征在于,
所述生成器由光脉冲生成器以及波形成形器来构成,
所述光脉冲生成器根据由所述光源产生的连续光,通过以固定时间间隔进行反复且具有规定时间宽度来生成相干性的脉冲光,
所述波形成形器对由所述光脉冲生成器生成的脉冲光进行频谱分解,在对各频谱成分的相位和振幅进行调整之后再行频谱合成,由此整形·复制脉冲光来生成所述光脉冲列。
3. 根据权利要求2所述的断层图像拍摄装置,其特征在于,
所述波形成形器生成各脉冲独立地存在的光脉冲列,所述光脉冲列的各脉冲相互不干涉。
4. 根据权利要求3所述的断层图像拍摄装置,其特征在于,
所述波形成形器将脉冲成形为切比雪夫形,来生成光脉冲列。
5. 根据权利要求2所述的断层图像拍摄装置,其特征在于,
所述波形成形器由空间相位调制器来构成。
6. 根据权利要求1所述的断层图像拍摄装置,其特征在于,
所述生成器由光脉冲生成器以及光调制器来构成,
所述光脉冲生成器根据由所述光源产生的连续光,通过以固定时间间隔进行反复且具有规定时间宽度来生成相干性的脉冲光。
7. 根据权利要求1所述的断层图像拍摄装置,其特征在于,
所述光源以根据所观测的反射波的相位信息以及振幅信息而能够分离计算出反射点的位置以及反射强度的步长,使得所输出的光的波长呈数字化地发生变化,
所述光路长度变更部以如下步长生成出使光路长度发生变化的光,即:在将经由所述移频器而由参照用反射器反射后的光的脉冲光在时间轴上排列的情况下相邻的脉冲光未

隔开间隔的步长，

所述光检测部包含：多个第1光检测器和多个第1AD变换器，

在所述第1光检测器的各检测元件，分别被输入：变更成所述光路长度的多个光。

8. 根据权利要求1所述的断层图像拍摄装置，其特征在于，

所述光源使所输出的光的波长在所述脉冲光的时间宽度T和所述脉冲光的间隔之间发生变化，

所述光路长度变更部在将C设定为测定对象物处的光速的情况下，以小于或等于 $C \times T/2$ 的步长生成：使光路长度发生了变化的光，

所述光检测部包含：多个第1光检测器和多个第1AD变换器，

在所述第1光检测器的各检测元件，分别被输入：变更成所述光路长度的多个光。

断层图像拍摄装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种拍摄对象物的断层图像的断层图像拍摄装置,特别涉及一种使用了M序列编码等具有以规定周期进行反复的特性的编码(例如,反复的伪噪声,具有自相关特性的编码)的断层图像拍摄装置。

背景技术

[0002] 作为本技术领域的背景技术,存在以下的在先技术。在专利文献1(日本特开2011-117789号公报)中,记载了一种光学相干断层摄影装置,其具有:宽带光脉冲生成单元,其生成具有规定的波长带的宽带光脉冲;光脉冲分波延迟合波单元,其将所述宽带光脉冲进行分波,并产生波长带比所述规定的波长带还要狭窄的多个窄带光脉冲,使各个所述窄带光脉冲延迟不同的时间后再进行合波,来生成由中心波长不同的多个光脉冲构成的光脉冲列;光分支器,其将所述光脉冲列分支为测定光脉冲列和参照光脉冲列;光脉冲照射/补足单元,其将所述测定光脉冲列向测定对象进行照射,且对所述测定光脉冲列被所述测定对象进行背向散射而产生的背向散射光脉冲列进行补足;光耦合器,其使所述参照光脉冲列和所述背向散射光脉冲列进行耦合,来形成耦合光脉冲列;光脉冲强度测定单元,其对所述耦合光脉冲列的各光脉冲的光强度进行测定;以及断层像导出单元,其利用所述耦合光脉冲列的各光脉冲的波数,对与所述光强度对应的测定数据进行傅立叶变换,基于傅立叶变换后的所述测定数据,来导出所述测定对象的断层像。

[0003] 另外,在专利文献2(日本特开2006-184284号公报)中,记载了:具有能够呈阶梯状地对波数进行切换的单元的光干涉断层摄影装置的光源。

[0004] 另外,在专利文献3(日本特开2007-267761号公报)中记载的光干涉断层仪器中,光出射部从光源向光干涉部射出具有不同的特定波长的近红外线可干涉光。光干涉部的分光器使所射入的光穿透眼底,并且将一部分朝向光波长移位器反射。移位器根据振荡信号S对光的频率而进行调制,对由可动镜反射的光的频率进行再次调制。而且,分光器使在眼底反射的测量光和由镜子反射的参照光发生干涉,并将干涉光向光检测部射出。如果光检测部接受到干涉光,就会使用振荡信号S来表示该干涉光的光强度的检测信号进行解调,并且对高频成分进行滤波处理。而且,光检测部使用该检测信号来计算眼底的截面形状和氧饱和度S_{O2}。

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1:日本特开2011-117789号公报

[0007] 专利文献2:日本特开2006-184284号公报

[0008] 专利文献3:日本特开2007-267761号公报

发明内容

[0009] 在所述的以往的光干涉断层图像拍摄装置中,将脉冲光朝向测定对象进行照射,捕捉测定对象内的散射光。由此,在脉冲宽度内的衰减量的差别较大,即,光的入射侧的散

射光的信号较强,但里侧的散射光的信号较弱。由此,难以拍摄出涉及到规定深度上的清晰的断层图像。特别地,当照射的光的脉冲宽度较大,深度范围又较宽时,关于具有图像信息的直进光的强度,深度浅的部分与深度深的部分之比会较大,深的部分的反射直进光就会被浅的部分的反射直进光屏蔽。

[0010] 另外,希望能够提高深度方向的分辨率(切片宽度),取得高分辨率·高信噪比的断层图像。因此,需要减小脉冲光的宽度。活体组织的光特性呈现为虽然衰减少但散射特性强,直进性的光的强度会由于散射特性而呈指数函数性地急剧衰减。散射特性会根据组织种类而有所不同,直进光的衰减为每1mm对应20dB至50dB。如后面所述,脉冲宽度决定目标的深度范围。但是,在专利文献3所记载的方法中,由于利用扩频调制后的驱动信号(调制驱动信号)而使激光光源14进行驱动(发光),因此,难以利用在电路中使用的晶体管的动作极限速度来减小光脉冲的宽度。例如,如果设想在电路中生成10p秒的脉冲,则周期10p秒相当于100GHz,为了形成脉冲状的波形而不得不包含很多高次谐波,因此,使晶体管更高速地进行动作,这种利用电路生成脉冲是不可能的。

[0011] 并且,直进光具有相对于行进方向而呈稳定的相位波面,包含着有效的图像信息。另一方面,由于散射波通过各种光路而到达至受光部,因此相干长度被切断,不一定成为噪声。由此,如果深度范围变窄,则由散射波引起的噪声能量就会变小。

[0012] 基于上述理由,根据直进光的衰减量而决定深度范围,例如,如果假设将深度浅的部分与深度深的部分的衰减量之比设为30dB,将观察组织的衰减量设为20dB/mm,则深度范围为1.5mm。与深度范围1.5mm相当的脉冲宽度为 $1.5\text{mm} \times 2/3 \times 10^{-11} = 10\text{p秒}$ 。该值越短则信噪比越高。

[0013] 此外,虽然探讨了使用符号长度较长的编码来提高分辨率,但是为了收集微弱的反射光,测定时间变长。特别地,由于活体会因为搏动等而活动,因此如果测定时间长,就会产生图像不清晰的问题。

[0014] 本发明的目的在于提供一种断层图像拍摄装置,其通过向测定对象物照射:将由光源生成的光直接利用扩频码调制出来的光脉冲信号,由此即便在短的测定时间内且在测定对象物的深部也能够获得高分辨率且高信噪比的断层图像。

[0015] 在本申请中公开的发明的代表性的一个例子如下所示。即,一种断层图像拍摄装置,其特征在于,具有:光源,其产生相干性的连续光;生成器,其将所述连续光变换成相邻而形成的波形间的干涉低的周期性的光脉冲列;光脉冲成形器,其利用具有自相关特性的PN编码,对光脉冲列进行2相相位调制,并对分光所得到的2个光脉冲列中的一方的频率进行变换,其中,所述光脉冲列的脉冲宽度的空间长度比测定对象物的观察目标区域的深度范围还要小;光路长度变更部,其对变换了所述频率后的光脉冲列的光路长度进行变更;光检测部,其被输入有从光路长度变更部输出的光脉冲列、以及在将从所述生成器输出出来的光脉冲列照射至测定对象物后再从所述测定对象物出去的背向散射波;滤波器,其提取出从所述光检测部输出的且具有移频器的移位频率的差信号;解调器,其将由所述滤波器提取出来的差信号和与所述移频器的移位频率同步的基准信号进行合成;以及解析部,其对由所述解调器输出出来的信号进行解析,所述解析部对由所述解调器输出出来的信号进行解析,来计算测定对象物的反射点的位置。

[0016] 发明效果

[0017] 根据本发明的一个方式,即便在测定对象物的深部也能够高速地拍摄高分辨率且高信噪比(SNR)的断层图像。

附图说明

[0018] 图1是表示第1实施例的断层图像拍摄装置的结构图。

[0019] 图2是表示第1实施例的调制器的输出光的例子的图。

[0020] 图3是表示光检测器及光路长度变更部的概念的图。

[0021] 图4是表示光路长度变更部的结构例的图。

[0022] 图5是表示光路长度变更部的结构例的图。

[0023] 图6是表示根据从光检测器输出的信号来求取测定对象物的内部的反射位置和反射率的方法的图。

[0024] 图7是表示与自相关性有关的反射点的观测范围的图。

[0025] 图8是表示从光检测器输出的信号的图。

[0026] 图9是表示由本实施例的断层图像拍摄装置实现的测定范围的图。

[0027] 图10是表示第2实施例的断层图像拍摄装置的结构图。

[0028] 图11是表示第2实施例的调制器的输出光的例子的图。

[0029] 图12是表示第3实施例的断层图像拍摄装置的结构图。

[0030] 图13是表示第3实施例的调制器的输出光的例子的图。

[0031] 图14是表示第1实施例的断层图像拍摄装置的结构图的变形例的图。

[0032] 图15是表示第1实施例的断层图像拍摄装置的结构图的变形例的图。

[0033] 图16是表示第1实施例的断层图像拍摄装置的结构图的变形例的图。

具体实施方式

[0034] 下面,对本发明的实施例进行说明。

[0035] <第1实施例>

[0036] 图1是表示本发明的第1实施例的断层图像拍摄装置的结构图。

[0037] 第1实施例的断层图像拍摄装置具有:光源100、光脉冲发生器101、波形成形器102、移频器104、光路长度变更部114、光检测器107、108、滤波器110、111、AD变换器112、113、解调器109、以及傅立叶变换器115。

[0038] 光源100是产生相干性的连续光121的光源,例如,能够使用激光光源。另外,从光源100射出的光被控制为:在规定的波长范围内以规定的频率步长来变化波长。从光源100射出的光的频率的带宽(频率变化的范围)与测定对象物106的图像的分辨率对应,在由所输出的光生成的光脉冲的时间宽度T与光脉冲的间隔T1之间,以如下步长使所输出的光的波长发生变化,即,能够以该步长对由所输出的光生成的脉冲光中所包含的观测点进行分离观测,即,根据所观测的反射波的相位信息以及振幅信息,能够分离计算出反射点的位置以及反射强度。

[0039] 光脉冲发生器101将光源100产生的光(连续光)变换为规定宽度且规定形状的脉冲光122。具体地说,光脉冲发生器101由光梳发生器构成,通过利用规定的微波或毫米波高频信号来激励光梳发生器,就能够获得固定间隔的飞秒脉冲光。例如,如果利用25GHz的信

号进行控制,则如图2所示,能够生成40皮秒间隔(25Gbps)的飞秒脉冲光。优选是,脉冲光122的宽度小于或等于10皮秒即可。此外,脉冲光的宽度优选利用振幅成为0的时间宽度来决定,而不是振幅的半值宽度。

[0040] 由于光脉冲发生器101所产生的飞秒光脉冲信号122的占空比非常小,因此脉冲光相互不干涉,生成:各脉冲光独立地存在的光脉冲列。因此,由一个脉冲光实现的测定对象范围变窄,能够减小来自光轴方向以外的散射光的影响。另外,能够减小测定对象范围内的衰减量的变化量,能够获得优质的图像。由此,提高测定对象物106处的反射光的信噪比。

[0041] 另一方面,当光脉冲信号122的占空比过小时,如果从安全角度出发对光的峰值有所限制,则光的平均能量会变小,在照射到测定对象物106的情况下,可检测的深度变浅,或者反射脉冲的累计次数增大,对测定对象点的测定时间就会变长。

[0042] 波形成形器102将从光脉冲发生器101输出的、且以固定时间间隔进行反复的光脉冲信号122成形为具有规定时间宽度的脉冲波形,此外,输出将所需脉冲数复制到了所需时间轴上的点的信号。另外,利用与所述脉冲波形相同的包络线波形,来生成将相位反转的 π 相的光脉冲,同样地输出在所需位置复制了所需数量的信号。利用这些功能,波形成形器102生成符号长度为 2^n-1 的M序列编码,输出信号123。

[0043] 在本实施例中,波形成形器102利用分光器而对输入信号122进行频谱分解,使用相位空间调制器而对每个频谱来调整相位和振幅,再次进行频谱合成,由此生成规定的M序列编码,并输出。由此反复生成并输出:已固定的M序列编码信号。通过使用空间相位调制器,能够高速地进行调制,能够将与M序列编码的1比特对应的脉冲设定为规定的宽度,因此能够将测定对象范围设定在规定的范围内。规定的测定范围根据所测定的对象的光的衰减特性、散射特性而有所不同,优选在规定的全部范围内获得充分的信噪比。在实际的活体观测中,由1比特的脉冲决定的测定范围要求小于或等于0.5mm的程度。

[0044] 在本实施例中例示的空间相位调制器如图2所示,输出:将波形成形器102所复制的光脉冲信号整形为切比雪夫形等规定波形的信号123。通过使用切比雪夫形的波形,能够减少频域中的旁瓣,从而能够减少相邻波形间的干涉,因此能够提高测定对象物106处的分辨率。此外,空间相位调制器的输出信号的波形即便不是切比雪夫形,只要是旁瓣足够小的波形即可。

[0045] 利用图示的波形成形器102,在40皮秒中生成127个脉冲(127比特的编码),生成出:以3.2THz调制出的光信号123。此外,空间相位调制器从一个光脉冲生成的脉冲、亦即M序列编码的符号长度也可以不是127比特,也可以是更长的255比特以上,也可以是更短的63比特以下。

[0046] 即便使用Arrayed-Waveguide Grating(AWG)来构成波形成形器102,也能够与使用空间相位调制器时相同地,高速地进行调制。此外,能够在频域中针对频谱而静态地控制相位和振幅,制作已固定的M序列2相相位调制信号。

[0047] 另外,如图2所示,相邻的脉冲既可以相分离,脉冲间的电平成为零,也可以旁瓣相连,脉冲间的电平不成为零。

[0048] 从波形成形器102输出出来的信号123分支为信号124和信号129,信号129被输入至移频器104。另一方面,信号124进一步分支为信号125和信号127,信号127被参照用反射镜105反射而成为信号128,改变行进方向而被引导至光检测器108。另外,信号125朝向测定对

象物106进行照射,在测定对象物106处进行反射散射(例如,背向散射波),作为信号126而被引导至光检测器107。在来自测定对象物106的反射光126中包含有:测定对象物106内的有限区间的反射点的信息。此外,有限区间以外的反射点的信息是作为非常高的频率的噪声而被散射。参照用反射镜不一定非是反射镜不可,只要是具有:一边使信号130和信号127同步地保持相同的光路长度一边折返为信号131和信号128的功能即可。例如,构成为:在有效长度因为外部电场而发生变化的光纤内进行折返,通过改变外部电场,能够高速地改变有效长度。

[0049] 移频器104将所输入的信号128的频率进行变换而输出信号130。利用该移频器104而变换频率后的信号是在光检测器107、108中进行合成,作为频移量的差拍而检测出差频信号140、141(参照图8(A))。因此,移频量优选是在光检测器107、108以后作为电信号容易进行处理的频率(例如,100MHz)。从移频器104输出出来的信号130被参照用反射镜105反射而成为信号131,其一部分分支,而成为被引导至光检测器107的信号133。信号133经由光路长度变更部114而成为光路长度不同(即,波面不同)的光并行行进的光信号,并被引导至光检测器107。另外,反射后的信号131的一部分分支出来的信号132被引导至光检测器108。

[0050] 此外,在图1中,移频器104虽然配置在朝向参照用反射镜105射入的光130的路径上,但是,如图14和图16所示,也可以在测定系统中配置在向测定对象物106照射的光的路径124(与其对应的基准系统中朝向参照用反射镜105射入的光7的路径)上。即,只要是分别输入至光检测器107、108的两个光具有规定的频率差,光检测器107、108能够检测出差频(由移频器107实现的移位频率)的信号即可。

[0051] 另外,在图1中,光路长度变更部114虽然配置在来自参照用反射镜105的反射光133的路径上,但是,如图15和图16所示,也可以配置在由测定对象物106反射出的光的路径126上。光路长度变更部114如后面所述,将朝向光检测器107输入的光变更为多个光路长度,由于只要能够利用光检测器107检测出差频的信号即可,因此将所输入的两个光的某者的光路长度进行变更即可。

[0052] 在基准系统的光检测器108,被输入:经由移频器104并由参照用反射镜105反射后的信号132、和由参照用反射镜105反射后的信号128,即,被输入:将信号132的振幅·相位和信号128的振幅·相位相加后的光信号。如果取得输入至光检测器108的两个信号的相关性,则输出两个信号的差频信号141。由于输入至光检测器108的两个信号是通过相同的参照用反射镜105而被反射,并引导至光检测器108的,因此光路长度相同,由于始终取得M序列编码的相关性,可以从光检测器108输出两个信号的差频信号141。

[0053] 在测定系统的光检测器107,被输入:由参照用反射镜105反射并经由移频器104的信号131、和由测定对象物106反射散射后的信号126,即,被输入:将信号132的振幅和信号126的振幅相加后的光信号。在光检测器107,也与光检测器108相同地,如果取得所输入的两个信号的相关性,则输出两个信号的差频信号140。另一方面,如果未取得输入至光检测器107的两个信号的相关性,则只能检测以超高速的M序列信号进行频谱扩散的噪声和直流信号(参照图8(C))。

[0054] 从两个光检测器107、108输出出来的信号140、141在通过滤波器110、111而被提取出所需频带的信号(直流成分和与由移频器107实现的移位频率相等的频差信号=100MHz的n倍波,除去其他噪声)后,再通过AD变换器112、113而向数字信号变换。解调器109将AD变换

后的基准系统的差频信号145作为基准信号,对从测定对象物106的反射光生成的测定系统的差频信号144进行复(IQ)解调。此外,在图1中,虽然设置了一个解调器109,但也可以针对测定系统的信号144和基准系统的信号145而设置不同的复(IQ)解调器,再将解调后的IQ信号进行合成,提取出由测定对象物106反射后的信号。该详细情况使用图6进行说明。此外,由于差频信号145与由移频器107变换后的频率信号(例如,100MHz)相等,因此,也可以直接采用移频器107的激励信号。此时,也可以直接采用移频器107的激励信号。此时,移频器107的激励信号优选作为信号143而被输入至AD变换器113。在这种情况下,不需要光检测器108及滤波器111。

[0055] 在这里,IQ解调器109由数码型构成,但也可以使用模拟型的IQ解调器。在这种情况下,由于大幅地降低了AD变换器的采样频率,因此在采用多个光检测器的情况下是有利的。

[0056] 傅立叶变换器115是作为对反射点的位置和反射强度进行解析的解析部而发挥功能的,对由解调器109得到的反射点的信息、亦即频域谱进行傅立叶逆变换,来取得反射点的位置和反射强度。具体地说,能够通过进行离散傅立叶变换(DFT)或傅立叶级数展开,来获知反射点的位置以及该位置处的反射光的强度。在进行离散傅立叶变换的情况下,优选进一步进行插补。

[0057] 下面,对光路长度变更部114的结构进行说明。作为光路长度变更部114,能够采用将镜面形成为阶梯状的镜子、包含有效长度不同的光纤在内的光路、具有移动功能的镜子等。下面,对各机构进行说明。

[0058] 图3是表示光检测器107及光路长度变更部114的概念的图。

[0059] 在光检测器107的各检测元件(例如,光电二极管)1071,被导入:由测定对象物106反射后的光126、和由参照用反射镜105反射后的光133。在图3中,为了便于说明,虽然图示为:朝向各检测元件1071的反射光126的光路长度有所不同,但是,实际上从测定对象物106至各检测元件1071为止的光路长度相同。

[0060] 另外,虽然对光检测器107进行说明,但是,光检测器108也具有与光检测器107相同的结构,不过,是被导入未经由光路长度变更部114的光。

[0061] 如上所述,由参照用反射镜105反射后的光133包含光路长度不同的光成分,朝向各检测元件1071射入的光的光路长度有所不同。在图3中,朝向左侧的检测元件1071的光路长度较短,朝向右侧的检测元件1071的光路长度较长。

[0062] 朝向各检测元件1071的光路长度的差设定为小于或等于M序列编码的1比特,利用特定的检测元件1071来取得M序列编码的自相关性,其他检测元件1071则不能取得M序列编码的自相关性。这样,能够从测定对象物106的深度方向的特定范围提取(光路长度为特定范围的)反射光。

[0063] 朝向各检测元件1071的光路长度的差优选根据M序列编码的波形而改变。即,在时间轴上排列脉冲光的情况下,优选使用:在相邻脉冲光之间未隔开间隔的光路长度差(即,延迟时间)。更具体地说,如后述的算式(12)所示,相关性 $S(\omega)$ 的加法范围为: r 处于从 $-CT/2$ 至 $CT/2$ 的范围,其中最少也需要取得1处观测点。即,光路长度变更部114的光路长度差小于或等于 $C \times T/2$ 。例如,即便在偏移了M序列编码的脉冲波形的半周期的状态下脉冲波形仍重叠的情况下,也会取得编码间的自相关性,可以得到与重叠程度对应的大小的差频信号

(参照图8(B))。另一方面,在偏移了M序列编码的脉冲波形的半周期的状态下脉冲波形不重叠的情况下,不取得编码间的自相关性,也就不能得到差频信号(参照图8(C))。因此,优选在脉冲波形的重叠小的情况下增大光路长度的差,在脉冲波形的重叠大的情况下减小光路长度的差。

[0064] 在光检测器107,将由测定对象物106反射后的光126和由参照用反射镜105反射后的光133相加,则得到反射光126和反射光133之间的差频的信号,对该差频的信号叠加M序列编码。即,如果反射光126中包含的M序列编码、和反射光133中包含的M序列编码的比特位置相同,则取得两个M序列编码的自相关性,从而得到与所述差频的信号的相位对应的信号140。另一方面,如果反射光126中包含的M序列编码和反射光133中包含的M序列编码的比特位置不同,则不能取得两个M序列编码的相关性,从光检测器107输出噪声电平的信号140。

[0065] 因此,在光检测器107的各检测元件1071处,能够检测出由测定对象物106反射后的光路长度不同的光,即,光检测器107能够检测出:具有由测定对象物106的不同深度的部位反射后的光的振幅·相位的差信号。

[0066] 从光检测器107输出的信号140通过滤波器110而被除去不需要的频率成分,作为信号142而被输入至AD变换器112。AD变换器112将所输入的模拟信号142变换为数字信号144,并输入至IQ解调器109。

[0067] 另外,如果利用光检测器108而将由参照用反射镜105反射后的光128和光132相加,就会得到反射光128和反射光132之间的差频的信号,对该差频的信号叠加M序列编码。在光检测器108的情况下,由于反射光128和反射光132的光路长度是相同的,因此,反射光128中包含的M序列编码和反射光132中包含的M序列编码的比特位置相同,能够取得两个M序列编码的自相关性,从而得到与所述差频的信号的振幅·相位对应的信号140。

[0068] 从光检测器108输出的信号141通过滤波器110而被除去不需要的频率成分,作为信号143而被输入至AD变换器113。AD变换器113将所输入的模拟信号143变换为数字信号145,并输入至IQ解调器109。

[0069] IQ解调器109将仅包含来自参照用反射镜105的反射光的成分在内的信号145作为局部振荡信号,对包含来自测定对象物106的反射光的成分在内的信号144进行解调。而且,从IQ解调器109得到:与来自测定对象物106的深度(与光路长度对应的位置)的反射光的振幅·相位对应的信号。

[0070] 图4是表示光路长度变更部114的具体结构例的图。

[0071] 光路长度变更部114为了改变由参照用反射镜105反射后的光的光路长度,如图4所示,具有:镜面形成为阶梯状的镜子1143。

[0072] 导入至光路长度变更部114的光通过凹透镜1141而被扩散,利用凸透镜1142而成为平行光,通过镜子1143反射。由于镜子1143的镜面形成为阶梯状,因此由各阶梯反射后的光是以不同的光路长度而被输出。

[0073] 1个阶梯的镜面的光路长度的差由在图4所示的镜面的阶梯的横向台阶差的大小所决定。

[0074] 从光路长度变更部114射出的光以与光检测器107的检测元件1071的间距相等的方式进行输出。

[0075] 图5是表示光路长度变更部114的另一个结构的图。

[0076] 在图5所示的光路长度变更部114中,使用长度不同的光纤1147,对光路长度进行变更。具体地说,输入至光路长度变更部114的光通过平板波导1145而被扩散,朝向长度不同的多个光纤1147导出。而且,在各光纤1147中传播的光又通过平板波导1146而被汇集为与光检测器107的检测元件1071的间距相等,并从光路长度变更部114进行输出。

[0077] 在图5所示的光路长度变更部114中,虽然使各光纤1147的长度不同,但也可以使一部分或全部的光纤1147的长度相等,对各光纤1147施加电场来控制光的传播速度。

[0078] 并且,光路长度变更部114也可以移动镜子来变更光路长度。

[0079] 图6是表示根据从光检测器107输出的信号140来求取测定对象物106的内部的反射位置和反射率的方法的图。在图6中,在时间轴上示出:在由参照用反射镜105反射后的参照光133和由测定对象物106反射后的反射光126中包含的M序列编码。此外,在反射光126中包含有:由测定对象物106的内部的多个位置反射后的光,为了便于说明,使用来自1处的反射光进行说明。

[0080] 在测定系统的光检测器107中,参照光133和反射光126原本是相同的信号,但由于反射点的位置相差 r (即光路长度为 $2r$),因此信号的相位偏移了:与光路长度的差对应的量。在光检测器107中,参照光133和反射光126相加,则输出:叠加有M序列编码的载波亦即光的差频的信号(在本实施例中为100MHz)。

[0081] 另一方面,在基准系统的光检测器108中,参照光132和参照光128本身就是相同的信号,反射点的位置(光路长度)相同。因此,在光检测器107中,参照光132和反射光128相加,则输出:叠加有M序列编码的载波亦即光的差频的信号(在本实施例中为100MHz)。

[0082] 该基准系统的差频信号和测定系统的差频信号的相位偏移了 Φ 。如果将光路长度的差 $2r$ 作为参数,则能够表达为 $\phi = 2r\omega/c$ (ω 是从光源100输出的光的频率)。

[0083] 在光检测器107的一个检测元件1071处,根据M序列编码的自相关特性,在特定的时刻来提取:射入至光检测器107的光。由于光源100使波长发生变化地输出光,因此可以在多个频率得到:振幅和相位均不同的多个信号。振幅由测定对象物106的内部的反射点处的反射率所决定,相位由光路差所决定,因此通过收集多个振幅和相位的组合的数据进行分析,能够计算出各反射点处的反射率。

[0084] 使用算式来对以上说明的计算方法进行说明。

[0085] 将朝向测定对象物106照射的照射光设为发送信号 $x(\omega, t)$,将由测定对象物106反射·散射的反射光设为接收信号 $y(\omega, t)$,来求出照射光和反射光的相关性 $S(t)$ 。在以下的计算中,并非是脉冲列而是一般性地来计算自相关性。

[0086] 发送信号 $x(\omega, t)$ 利用算式(1)来表达。

[0087] [式1]

$$[0088] \quad x(\omega, t) = \sum_{k=0}^{l-1} M(k) \cdot m(t - kT) \cdot \exp(j\omega t) \cdot f(t - kT) \cdots (1)$$

[0089] 在这里,作为表达M序列编码的脉冲波形的函数,将利用算式(2)表达的函数定义为 $f(t)$ 。

[0090] [式2]

[0091] $f(t) \neq 0: -T < t < T$

[0092] $f(t) = 0: t < -T \text{ or } T < t \dots (2)$

[0093] 并且,如果仅聚焦于M序列编码的1比特,则发送信号脉冲利用算式(3)来表达。

[0094] [式3]

[0095] $x(\omega, t) = \exp(j\omega t) \cdot f(t) \dots (3)$

[0096] 并且,接收信号脉冲利用算式(4)来表达。

[0097] [式4]

$$[0098] \quad y(\omega, t) = \int A(r) \cdot x\left(\omega, t - t_d - \frac{2r}{C}\right) dr \dots (4)$$

[0099] 测定对象物106的反射点与参照用反射镜105的反射点相比,相距离开距离r。参照用反射镜105的反射点位置利用 $(C \cdot t_d)/2$ 来表达,测定对象物106的反射点的位置利用 $r + (C \cdot t_d)/2$ 来表达。如果利用A(r)表达测定对象物106内的位置为 $(C \cdot t_d)/2$ 的附近的反射系数,则相关性S(T)利用算式(5)、(6)来表达。

[0100] [式5]

$$[0101] \quad S(\omega) = \int y(t) \cdot \bar{x}(t - t_d) dt \dots (5)$$

[0102] [式6]

$$\begin{aligned} & \int S(\omega) \\ &= \int \left\{ \int A(r) \cdot \exp\left[j\omega \cdot \left(t - t_d - \frac{2r}{C}\right)\right] \cdot f\left(t - t_d - \frac{2r}{C}\right) dr \right\} \\ [0103] & \quad \cdot \exp[-j\omega \cdot (t - t_d)] \cdot \bar{f}(t - t_d) dt \\ &= \int A(r) \cdot \exp\left[j\omega \cdot \left(-\frac{2r}{C}\right)\right] \\ & \quad \cdot \left[\int f\left(t - t_d - \frac{2r}{C}\right) \cdot \bar{f}(t - t_d) dt \right] dr \dots (6) \end{aligned}$$

[0104] 在这里,根据算式(7)的条件来决定r的范围,算式(6)的积分范围被决定为有限。首先,对t进行积分。

[0105] [式7]

$$[0106] \quad \int f\left(t - t_d - \frac{2r}{C}\right) \cdot \bar{f}(t - t_d) dt \neq 0 \dots (7)$$

[0107] [式8]

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\infty}^{\infty} f\left(t - t_d - \frac{2r}{C}\right) \cdot \bar{f}(t - t_d) dt \\
 [0108] \quad & = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f\left(t - \frac{2r}{C}\right) \cdot \bar{f}(t) dt \cdots (8)
 \end{aligned}$$

[0109] 因此, r 的范围需要满足算式 (9) 的条件, 算式 (9) 能够改写为算式 (10)、(11)。并且, 相关性 $S(t)$ 利用算式 (12) 来表达。此外, 在以后的算式中, T 为 M 序列编码的比特长度。

[0110] [式9]

$$\begin{aligned}
 & -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} \\
 [0111] \quad & -\frac{T}{2} < t - \frac{2r}{C} < \frac{T}{2} \\
 & -T < -\frac{2r}{C} < T \quad \cdots (9)
 \end{aligned}$$

[0112] [式10]

$$[0113] \quad -T < -\frac{2r}{C} < T \cdots (10)$$

[0114] [式11]

$$[0115] \quad -\frac{CT}{2} < r < \frac{CT}{2} \cdots (11)$$

[0116] [式12]

$$\begin{aligned}
 S(\omega) & = \int_{-\frac{CT}{2}}^{\frac{CT}{2}} A(r) \cdot \exp\left[j\omega \cdot \left(-\frac{2r}{C}\right)\right] \\
 [0117] \quad & \cdot \left[\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f\left(t - \frac{2r}{C}\right) \cdot \bar{f}(t) dt \right] dr \cdots (12)
 \end{aligned}$$

[0118] 由于相关性 $S(\omega)$ 的积分范围是有限的, 因此 $A(r)$ 能够利用傅立叶级数来表达。在这里, 如果利用算式 (13) 来定义 ω , 利用算式 (14) 来定义 $a(r)$, 则相关性 $S(n, \omega)$ 能够利用算式 (15) 来表达。

[0119] [式13]

[0120] $\omega = \omega_0 + n \cdot \omega_s \cdots (13)$

[0121] [式14]

[0122] $a(r) \equiv A(r) \cdot \exp\left(j\omega_0 \cdot \frac{2r}{C}\right) \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f\left(t - \frac{2r}{C}\right) \cdot \bar{f}(t) dt \cdots (14)$

[0123] [式15]

[0124] $S(n \cdot \omega_s) = \int_{-\frac{CT}{2}}^{\frac{CT}{2}} a(r) \cdot \exp\left[-j \cdot n \cdot \omega_s \cdot \left(-\frac{2r}{C}\right)\right] dr \cdots (15)$

[0125] 因此, 如果将 $\exp[-j \cdot \omega_s \cdot (-2r/C)]$ 的周期设为 CT , 则求出 $a(r)$ 的 FS 系数。因此, ω_s 利用算式 (16) (17) 来表达, $\exp[-j \cdot \omega_s \cdot (-2r/C)]$ 利用算式 (18) 来表达。

[0126] [式16]

[0127] $\omega_s \cdot \left(-\frac{2CT}{C}\right) = 2\pi \cdots (16)$

[0128] [式17]

[0129] $\omega_s = \frac{\pi}{T} \cdots (17)$

[0130] [式18]

[0131] $\exp\left[-j \cdot \omega_s \cdot \left(-\frac{2r}{C}\right)\right] = \exp\left[j \cdot \frac{2\pi r}{CT}\right] \cdots (18)$

[0132] 如果对以上进行使用, 则光源 101 所产生的每个光的波长 (频率) 的相关性利用算式 (19) 来表达, 得到 $a(r)$ 的 FS 系数。并且, $a(r)$ 利用算式 (20) 来表达。

[0133] [式19]

[0134] $S_n = S(n \cdot \omega_s) = \int_{-\frac{CT}{2}}^{\frac{CT}{2}} a(r) \cdot \exp\left[j \cdot \left(\frac{2r}{C}\right)\right] dr \cdots (19)$

[0135] [式20]

[0136] $a(r) = \frac{1}{CT} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n \exp\left[j \cdot n \cdot \frac{2\pi r}{CT}\right] \cdots (20)$

[0137] 在这里, 如果使用所述的算式 (14), 则作为距离的函数, 能够利用算式 (21) 来求出反射率 $A(r)$ 。

[0138] [式21]

$$[0139] \quad |A(r)| = \frac{1}{\int_{-T/2}^{T/2} f\left(t - \frac{2r}{C}\right) \cdot \bar{f}(t) dt} \cdot |a(r)| \cdots (21)$$

[0140] 图7是表示与自相关性有关的反射点的观测范围CT的图,图8是表示从光检测器输出的信号的图。

[0141] 由处于图中B位置的反射用反射镜105反射后的光通过光路长度ABC而被输入至光检测器107。另一方面,由测定对象物106反射后的光通过光路长度ADE而被输入至光检测器107。如前面所述,如果光路长度完全相等,则如图7(A)所示,在M序列编码的符号长度的全部范围内取得相关性,如图8(A)所示,得到电平较高的差频信号140。

[0142] 另一方面,如图7(B)所示,如果光路长度的差不满足M序列编码的1比特的宽度(CT),则以较弱的电平取得自相关性。在M序列编码的符号长度的全部范围内取得相关性,如图8(B)所示,得到电平较低的差频信号140。

[0143] 另一方面,如图7(C)所示,如果光路长度的差超过M序列编码的1比特的宽度(CT),则由反射用反射镜105反射后的光和由测定对象物106反射后的光会完全无法取得相关性,如图8(C)所示,得到噪声电平的信号。

[0144] 在第1实施例中,虽然使用了:一维(线状)地排列配置有检测元件1071的光检测器107,来说明对1个点的深度方向进行测定的断层图像拍摄装置,但是,通过将多个光源100排列设置呈线状,并且使用:二维(面状)地排列配置有检测元件1071的光检测器107,能够得到包含深度方向在内的二维断层图像。另外,通过将光源100排列设置呈面状,并且使用:三维(立体状)或二维(面状)地排列配置有检测元件1071的光检测器107,能够得到包含深度方向在内的3维断层图像。

[0145] 下面,对第1实施例的断层图像拍摄装置的效果进行说明。图9是表示测定范围的模拟结果的图。在图9中,作为深度的函数而示出了测定对象物106的反射率900。此外,在模拟中使用的反射率900已经考虑到了由测定对象物106的光的传播造成的衰减,降低了深处侧的反射率。另外,线901表示:由第1实施例的断层图像拍摄装置得到的拍摄结果的模拟,线902表示:由以往的断层图像拍摄装置得到的拍摄结果的模拟。

[0146] 在图9中,虚线所示的范围903是通过M序列编码而能够取得自相关性的范围,第1实施例的断层图像拍摄装置在该范围内作为深度的函数而得到测定对象物106的反射率。此外,由于在由虚线所示的范围的中央处得到较强的相关性,因此得到反射率较大的值,随着向两侧推移,反射率成为较小的值。为了获知准确的反射率,需要根据相关性的强度进行修正。

[0147] 在第1实施例的断层图像拍摄装置中,使用图3所示的方法,依次切换光路长度的差,由此在可以取得自相关性的范围903内进行移动,能够在深度方向上拍摄宽广范围的断层图像。

[0148] 在以往的断层图像拍摄装置中,如线902所示,来自测定对象物106的深处的反射变弱,在某个地点被噪声埋没,无法对来自比它更深的部位的反射光进行测定。另一方面,在本实施例的断层图像拍摄装置中,通过使用M序列编码的自相关特性,能够在狭窄的测定范围内得到详细的图像。另外,通过使用光路长度不同的参照光,能够改变:可取得M序列编

码的自相关特性的范围,从而能够拍摄宽范围的断层图像。

[0149] <第2实施例>

[0150] 图10是表示本发明的第2实施例的断层图像拍摄装置的结构图。

[0151] 第2实施例的断层图像拍摄装置具有:光源100、光脉冲发生器101、调制器103、移频器104、光路长度变更部114、光检测器107、108、滤波器110、111、AD变换器112、113、解调器109、以及傅立叶变换器115。

[0152] 在第2实施例中,未设置有波形成形器102,调制器103的结构不同于第1实施例。此外,在第2实施例中,仅说明与前面所述的实施例的不同点,对与前面所述的实施例相同的结构标记相同标号,省略其说明。

[0153] 第2实施例的调制器103使用M序列编码来对从光脉冲发生器101输出的信号122进行相位调制,并输出信号123。在本实施例中,由LN调制器来构成调制器103。LN调制器利用由LiNbO3晶体的泡克尔斯效应引起的折射率变化,而具有:在不施加电压的状态下不输出光的特性。

[0154] 图11是表示:在第2实施例的断层图像拍摄装置中从调制器103输出的光的例子的图。

[0155] 在第2实施例中,光脉冲发生器101针对于由光源100发出的光(连续光),例如,利用25GHz的信号来控制光的振幅,从而生成40微秒间隔的脉冲状的光信号122。

[0156] 调制器103使用M序列编码而对从光脉冲发生器101输出来的信号122进行相位调制,并输出信号123。在本实施例中,由LN调制器来构成调制器103。

[0157] 在第2实施例中,朝向调制器103输入的信号的频率较低,以相对低速来对M序列编码进行调制。因此,能够利用廉价的LN调制器来构成调制器103,从而能够降低装置的成本。

[0158] <第3实施例>

[0159] 图12是表示:本发明的第3实施例的断层图像拍摄装置的结构图。

[0160] 第3实施例的断层图像拍摄装置具有:光源100、调制器103、移频器104、光路长度变更部114、光检测器107、108、滤波器110、111、AD变换器112、113、解调器109、以及傅立叶变换器115。

[0161] 在第3实施例中,未设置有光脉冲发生器101以及波形成形器102,调制器103的结构不同于第1实施例。此外,在第3实施例中,仅说明与前面所述的实施例的不同点,对与前面所述的实施例相同的结构标记相同标号,省略其说明。

[0162] 在第3实施例中,未设置光脉冲发生器101以及波形成形器102。第3实施例的调制器103使用M序列编码而对从光源100输入来的连续光进行相位调制,并输出信号123。在第3实施例中,与第2实施例相同地,由LN调制器来构成调制器103。

[0163] 图13是表示:在第3实施例的断层图像拍摄装置中从调制器103输出的光的例子的图。

[0164] 在第3实施例中,光脉冲发生器101使用例如25GHz的M序列编码而对由光源100发出的光(连续光)进行相位调制。因此,调制器103的输出是连续的信号(在持续相同值的情况下电平不降低为0的信号),而非脉冲状。

[0165] 在第3实施例中,朝向调制器103输入的信号的频率较低,以相对低速来对M序列编码进行调制。因此,能够利用廉价的LN调制器来构成调制器103,从而能够降低装置的成本。

[0166] 以上,对通过使用多个频率的测定而提取来自特定深度的反射光的断层图像拍摄装置进行了说明,但也可以使用共聚焦光学系统而提取来自特定深度的反射光。

[0167] 以上,参照添加的附图详细地说明了本发明,但本发明并不限于这种具体的结构,还包含:所添加的权利要求的主旨内的各种变更以及同等的结构。

[0168] 本申请通过参照在日本平成28年(2016年)1月15日申请的日本申请即日本特愿2016-6210以及在2017年7月19日申请的国际申请即PCT/JP2017/26091的内容,并加入于本申请中。

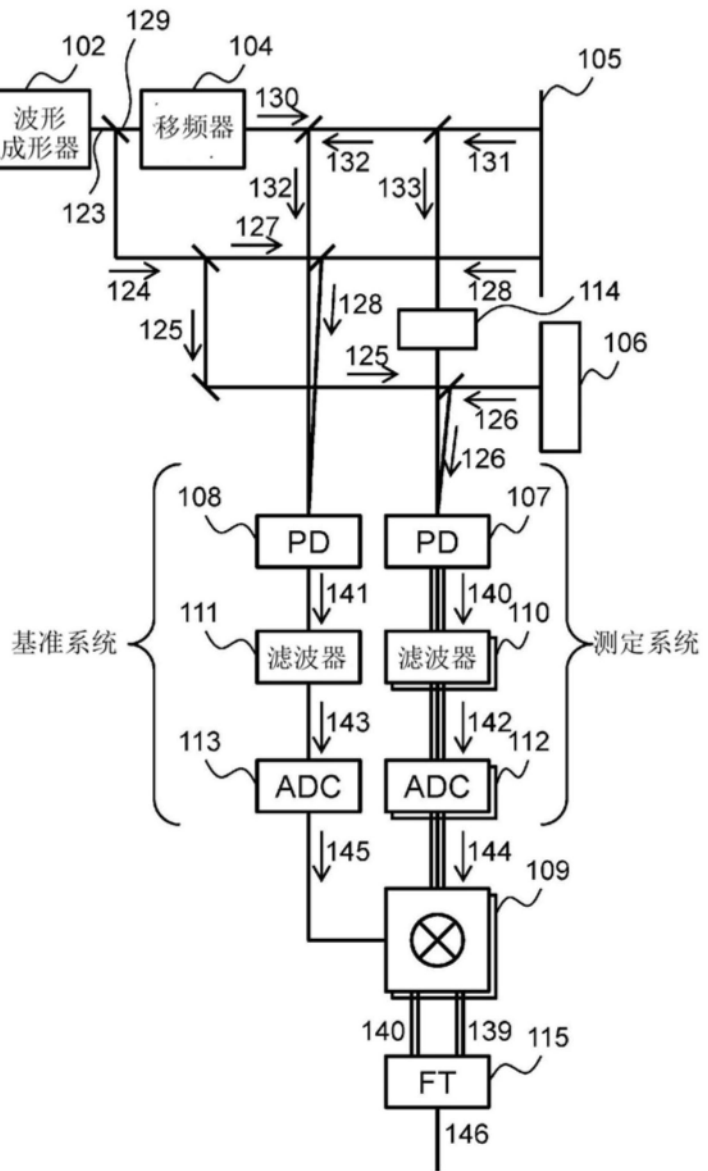


图1

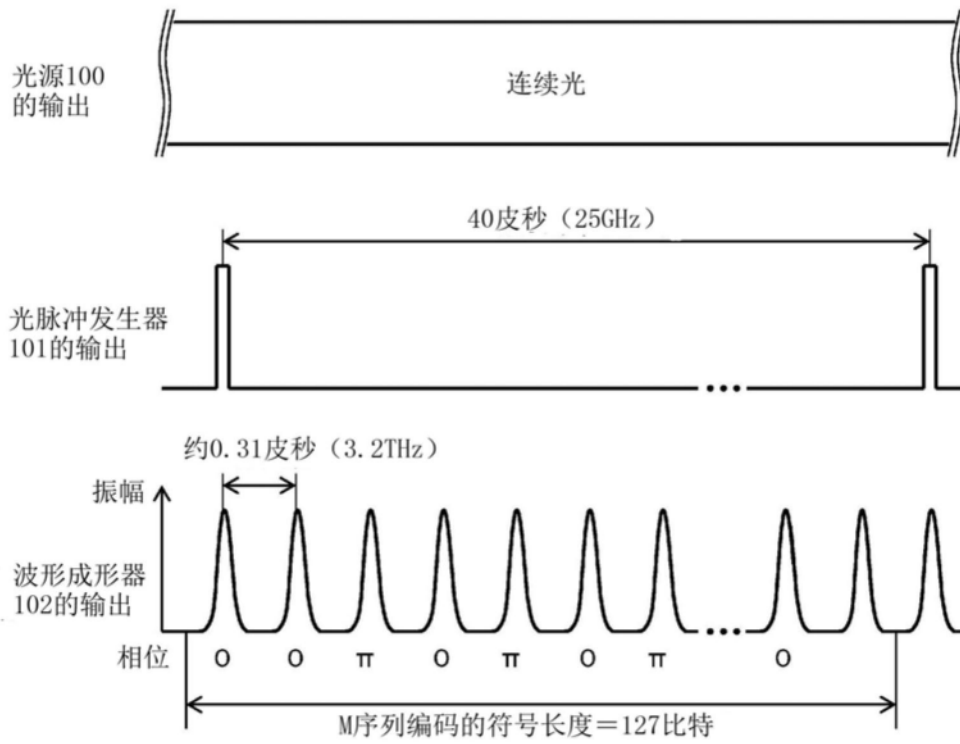


图2

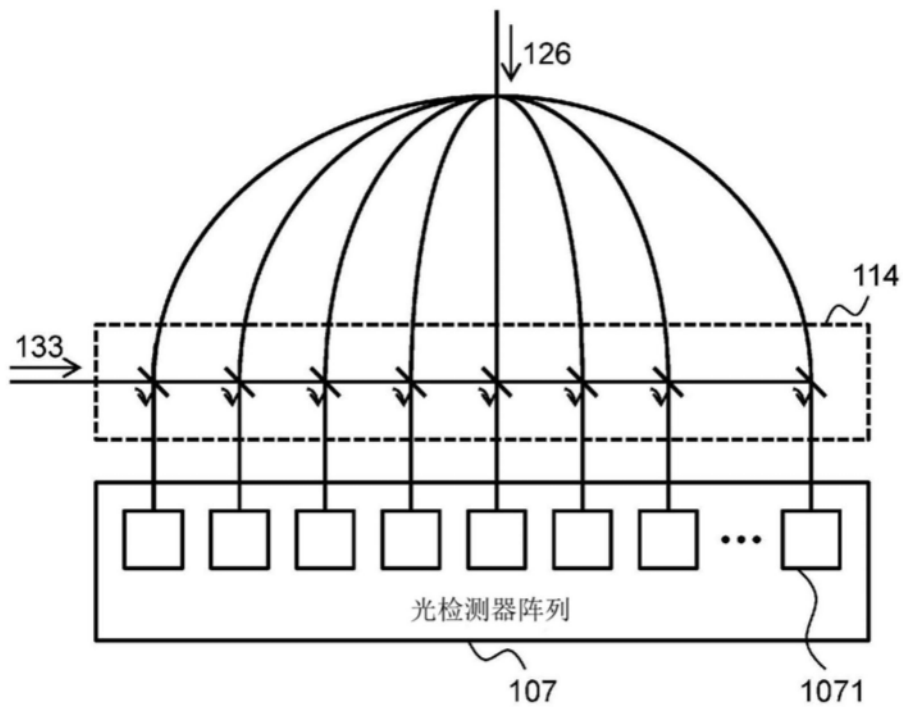


图3

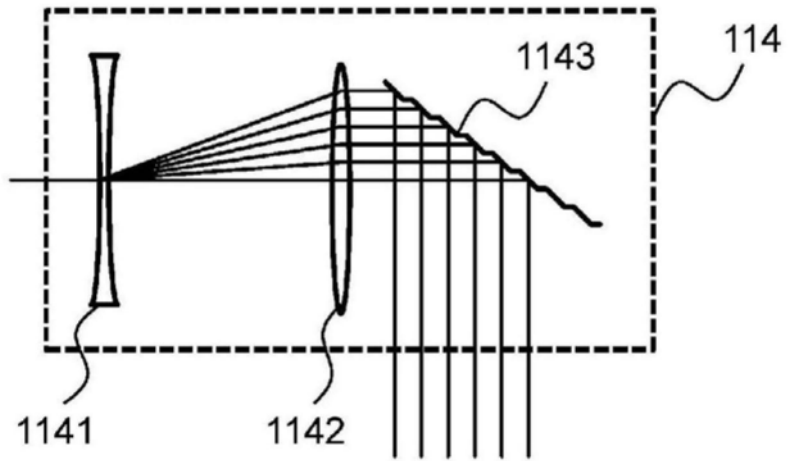


图4

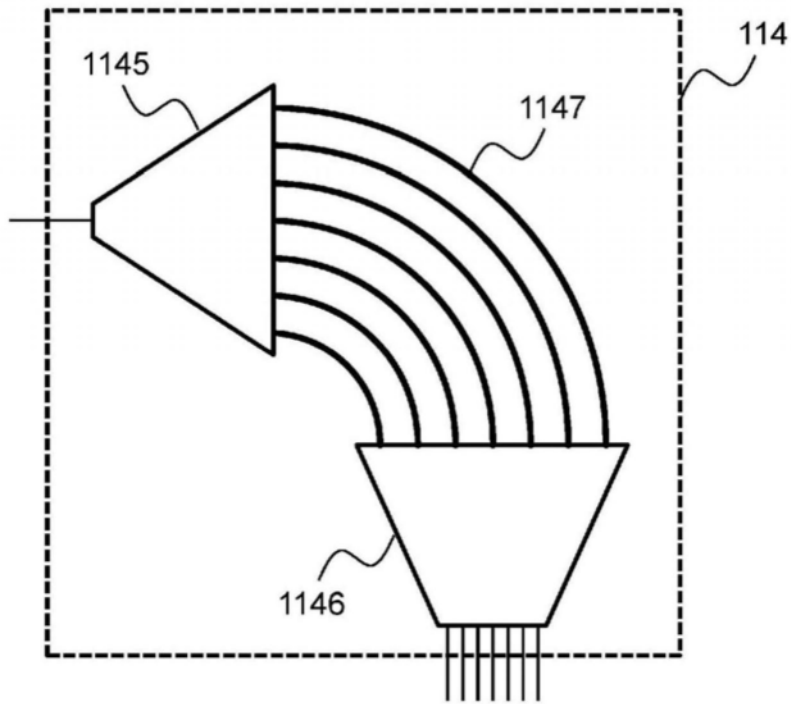
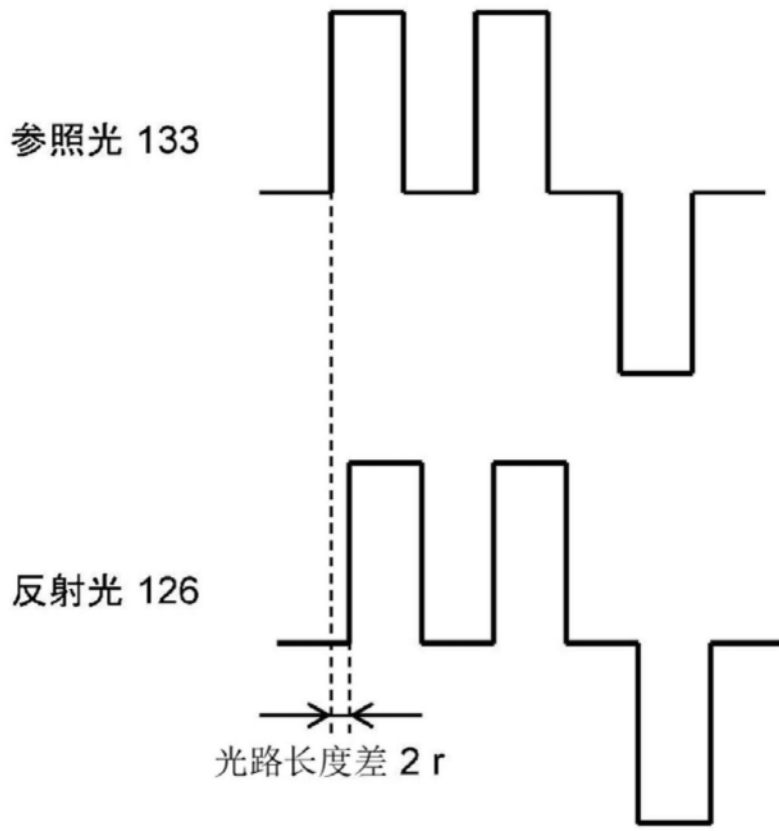


图5



$$\phi = \frac{2r\omega}{c}$$

图6

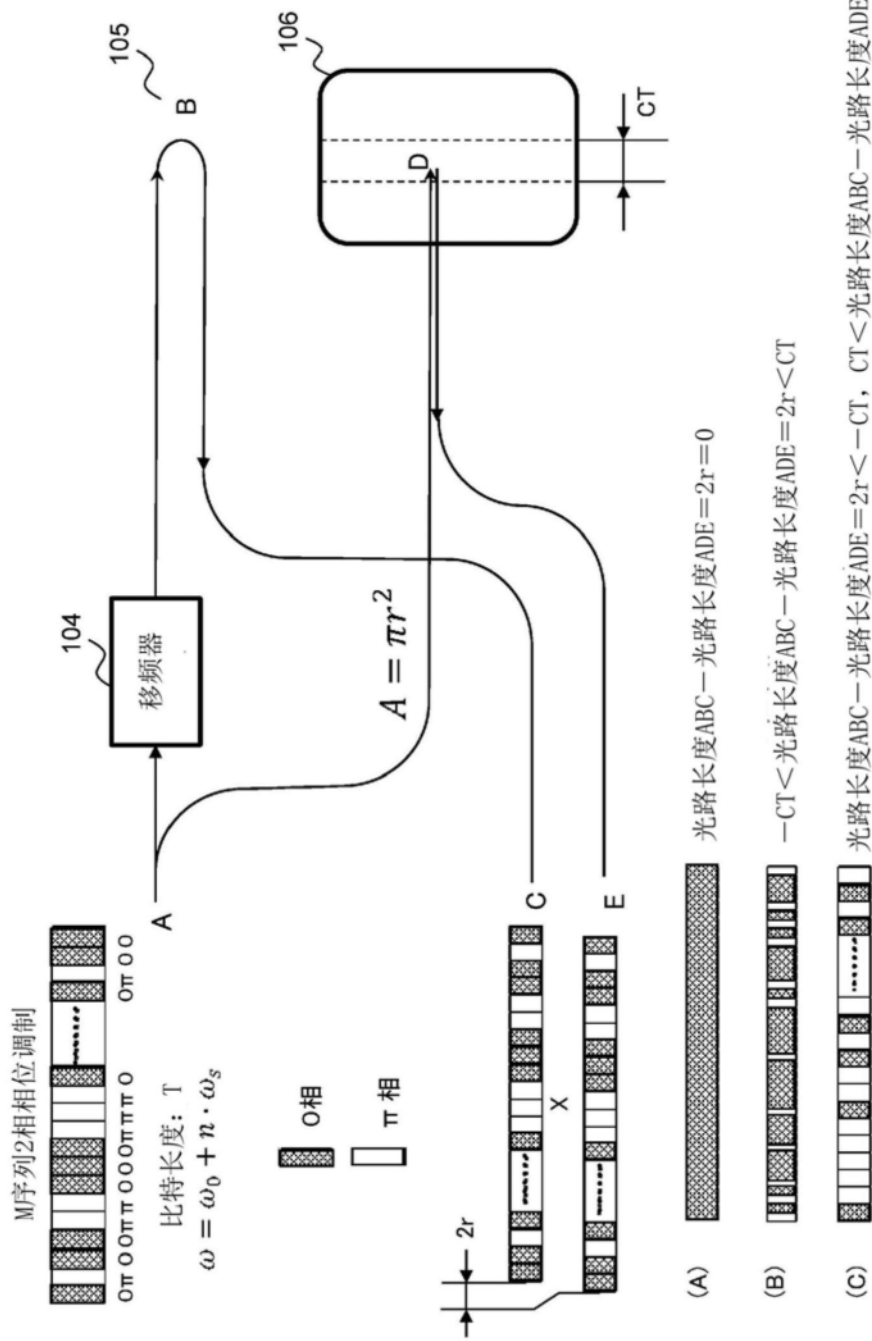
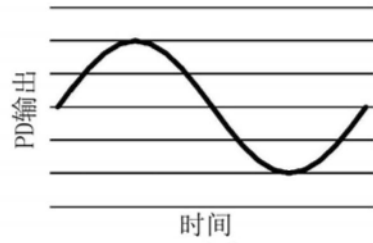


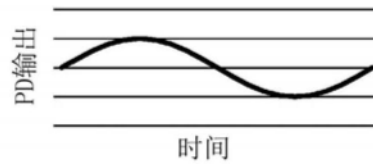
图7

(A) 光路长度ABC-光路长度ADE=2r=0



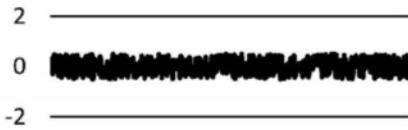
频率：移位频率

(B) $-CT < \text{光路长度ABC} - \text{光路长度ADE} = 2r < CT$



$$S_n = S(n \cdot \omega_s)$$

(C) $\text{光路长度ABC} - \text{光路长度ADE} = 2r < -CT$, $CT < \text{光路长度ABC} - \text{光路长度ADE} = 2r$



滤波器输出：零

图8

深度信息重构比较

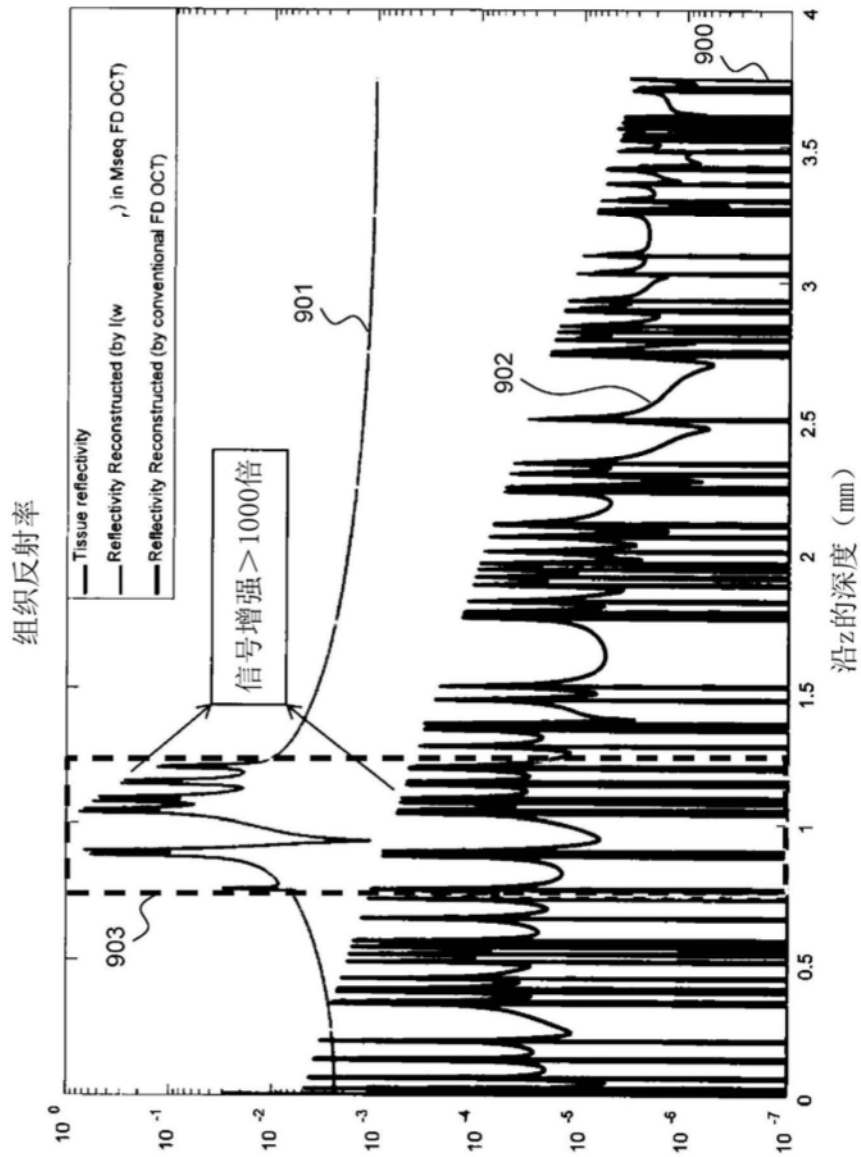


图9

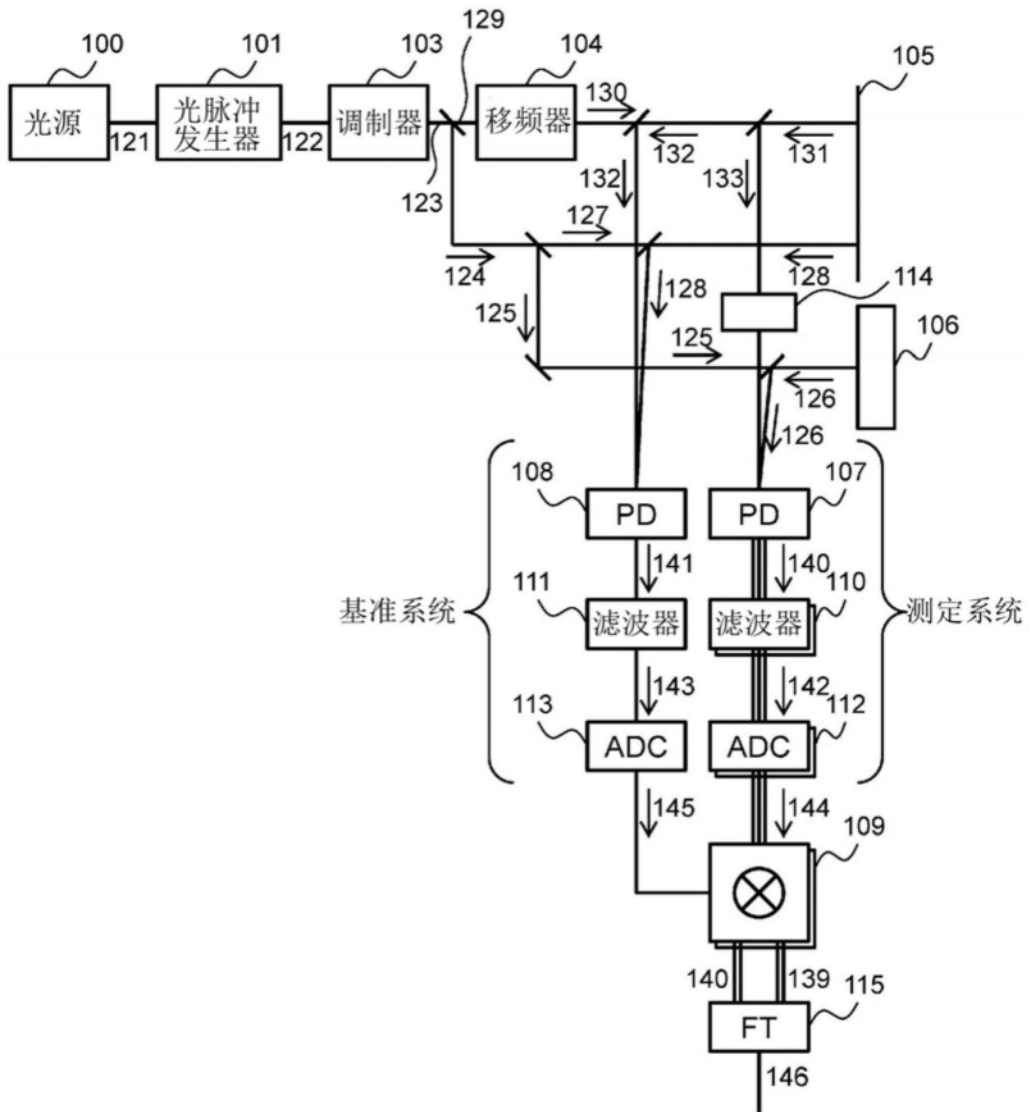


图10

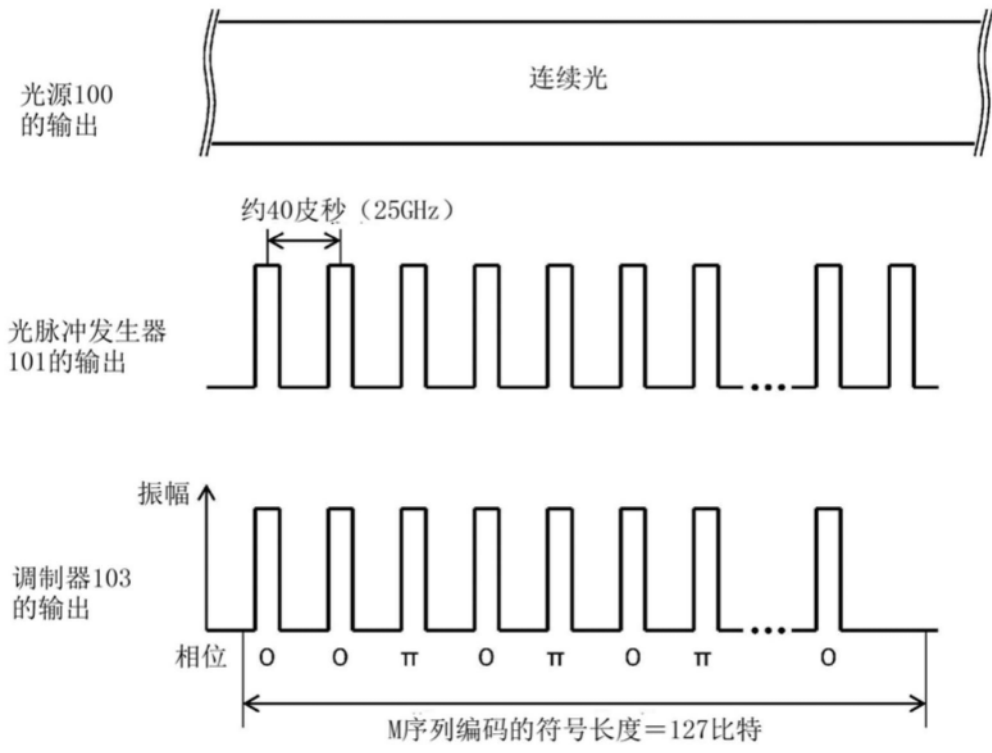


图11

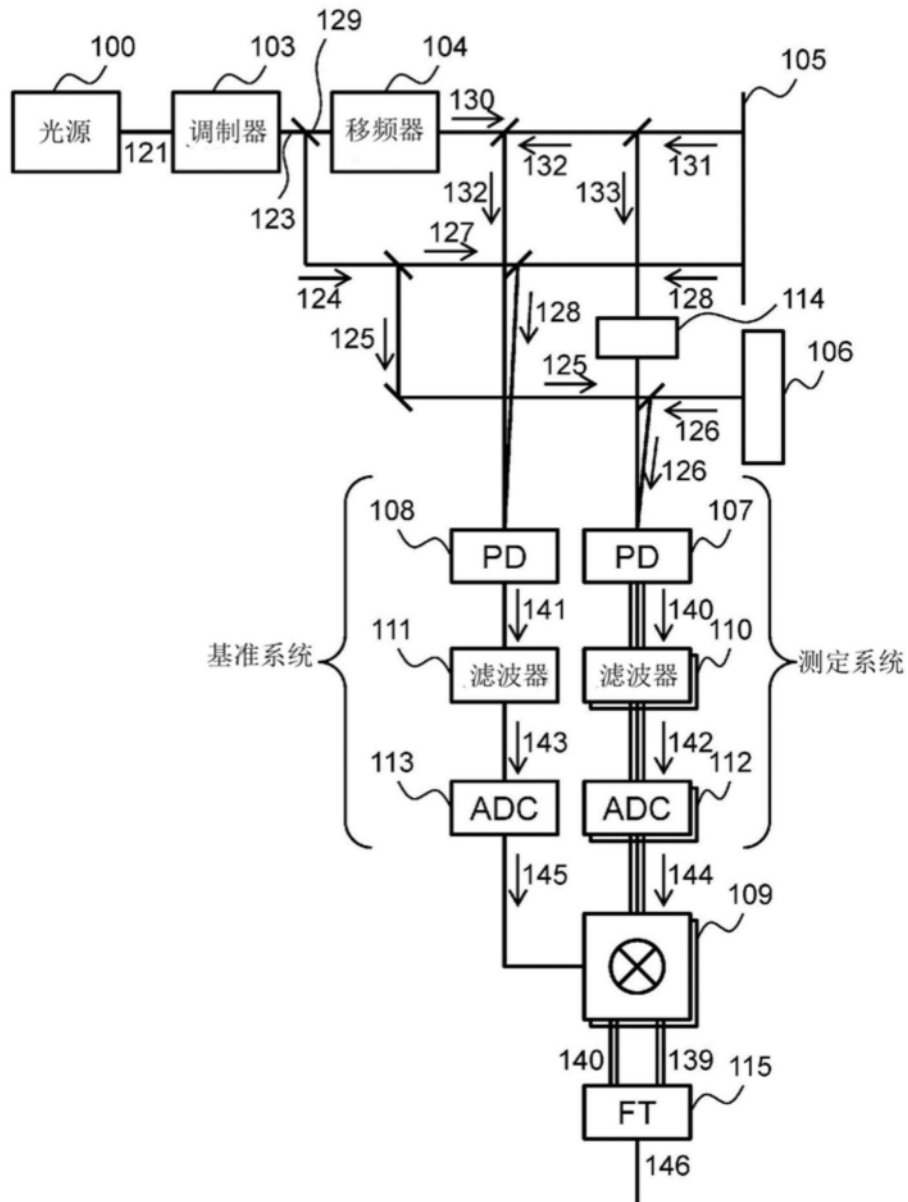


图12

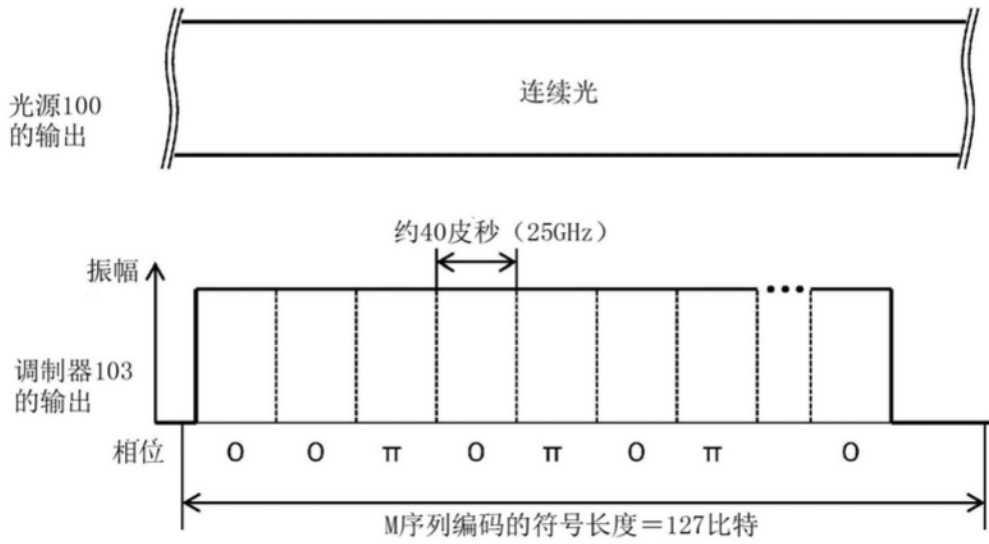


图13

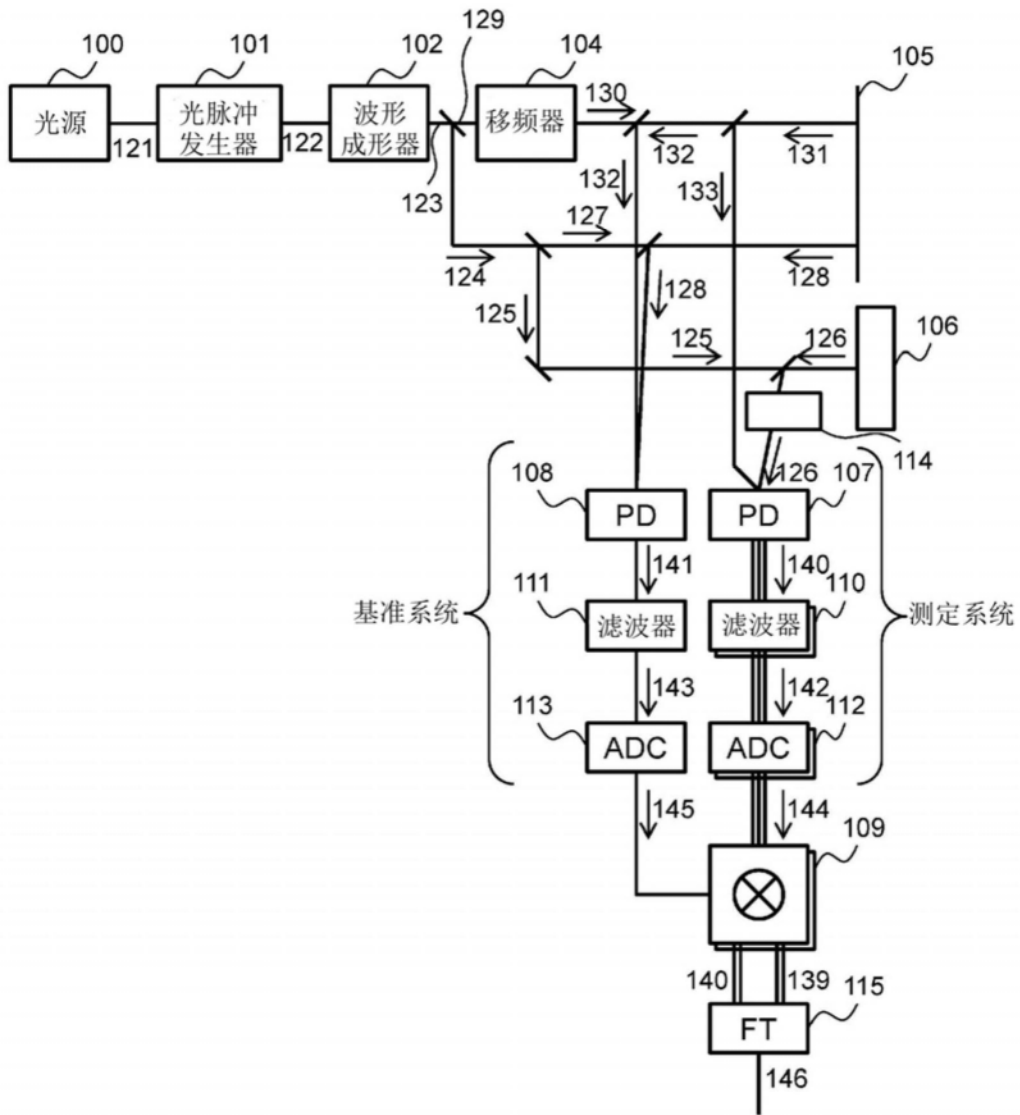


图15

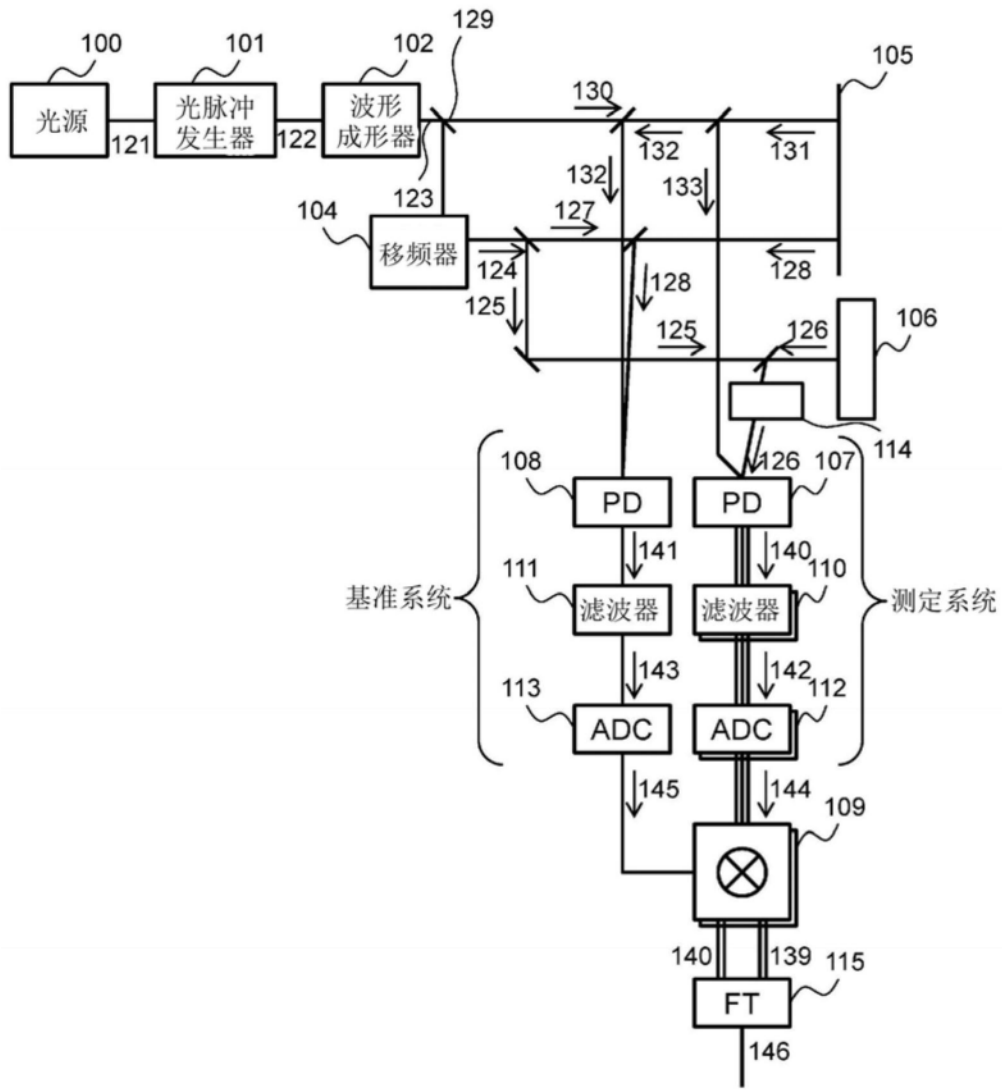


图16