



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110831478 A

(43)申请公布日 2020.02.21

(21)申请号 201880041799.5

(22)申请日 2018.05.04

(30)优先权数据

1707239.8 2017.05.05 GB

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2019.12.20

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2018/051214 2018.05.04

(87)PCT国际申请的公布数据

W02018/203088 EN 2018.11.08

(71)申请人 爱丁堡大学董事会

地址 英国爱丁堡

(72)发明人 罗伯特·R·汤姆森

德巴迪提亚·乔杜里

蒂姆·伯克斯

(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任
公司 11021

代理人 李博

(51)Int.Cl.

A61B 1/00(2006.01)

A61B 1/06(2006.01)

G02B 6/00(2006.01)

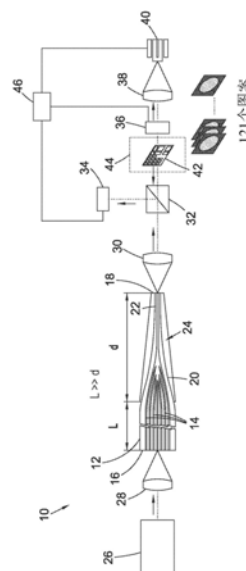
权利要求书3页 说明书17页 附图7页

(54)发明名称

光学系统和方法

(57)摘要

系统包括波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将多个输入波导与多模波导耦合的导波过渡部。系统还包括至少一个光源,所述至少一个光源被配置成依次激发多个输入波导中的每一个或输入波导的多个组合中的每一个,从而在波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案。波导装置被配置成将多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域。系统还包括至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于不同的光图案中的每一个而从目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号。



1. 一种系统,所述系统包括:

波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将所述多个输入波导与所述多模波导耦合的导波过渡部;

至少一个光源,所述至少一个光源被配置成依次激发所述多个输入波导中的每一个或所述输入波导的多个组合中的每一个,从而在所述波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案,

其中所述波导装置被配置成将所述多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域;和

至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于所述不同的光图案中的每一个而从所述目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号。

2. 根据权利要求1所述的系统,所述系统还包括处理资源,所述处理资源被配置成处理来自所述至少一个检测器的所述信号以得到所述目标区域的图像。

3. 根据权利要求1或权利要求2所述的系统,其中所述波导装置包括光纤装置;所述输入波导中的每一个包括所述光纤装置的多芯部分的相应的芯;并且其中所述多模波导包括所述光纤装置的多模部分。

4. 根据权利要求3所述的系统,其中所述导波过渡部包括从所述光纤装置的多芯部分的芯到所述光纤装置的多模部分的基本上连续的过渡部。

5. 根据权利要求3或权利要求4所述的系统,其中所述导波过渡部包括光子灯笼过渡部。

6. 根据权利要求3至5中任一项所述的系统,其中所述多芯部分和多模部分由相同的光纤形成。

7. 根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述系统构成或形成内窥镜成像装置的一部分。

8. 根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述输入波导中的每一个是单模波导。

9. 根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述输入波导中的每一个被配置成支持不多于10种模式,任选不多于6种模式,进一步任选不多于3种模式。

10. 根据权利要求9所述的系统,其中所述至少一个光源被配置成依次激发所述输入波导的单独模式。

11. 根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述输入波导中的每一个是保偏的。

12. 根据任一项前述权利要求所述的系统,所述系统被配置成使得在所述输入波导中的任一个中传播的光基本上不与所述输入波导中的任何其他一个耦合。

13. 根据任一项前述权利要求所述的系统,所述系统还包括支撑体,所述支撑体被配置成消除或减少响应于所述波导装置的弯曲的所述导波过渡部的弯曲。

14. 根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述不同的光图案中的每一个对所述波导装置的弯曲基本上不敏感。

15. 根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述不同的光图案中的至少一些在电磁场中基本上彼此正交。

16. 根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述不同的光图案使得全部所述目标区域被所述光图案照亮。

17. 根据权利要求2或从属于权利要求2的权利要求3至16中任一项所述的系统,其中所

述处理来自所述至少一个检测器的所述信号以得到所述目标区域的图像包括,对于所述不同的光图案中的每一个,将所述光图案的图像与对于所述光图案从所述至少一个检测器得到的所述信号组合。

18.根据权利要求2或从属于权利要求2的权利要求3至16中任一项所述的系统,其中所述处理来自所述至少一个检测器的所述信号以得到所述目标区域的图像包括鬼成像。

19.根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述图像包括全内反射荧光(TIRF)图像。

20.根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述图像包括深度断层摄影图像。

21.根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述波导装置还包括另外的导波过渡部。

22.根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述另外的导波过渡部能够可控地变形。

23.根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述至少一个光源被配置成使用多个不同波长激发所述输入波导中的每一个,从而为所述输入波导中的每一个产生多个光图案。

24.根据任一项前述权利要求所述的系统,其中所述至少一个光源被配置成依次激发所述输入波导的多个组合中的每一个,其中激发每个组合包括使用选择的振幅和/或相位同时激发所述多个输入波导中的至少一些以在所述波导装置的输出部产生所需光图案。

25.根据权利要求24所述的系统,其中所述所需光图案包括位于所述波导装置的远端表面处的光斑。

26.根据权利要求24所述的系统,其中所述所需光图案包括位于所述目标区域内的光斑。

27.根据权利要求24所述的系统,其中所述不同的光图案中的每一个包括在不同的相应位置处的光斑,从而在所述目标区域上扫描所述光斑。

28.根据权利要求24至27中任一项所述的系统,所述系统还被配置成进行校准过程以得到校准数据,其中所述选择的振幅和/或相位基于所述校准数据。

29.根据权利要求24至28中任一项所述的系统,所述系统还包括被配置成部分反射所述光图案的部分反射元件和被配置成接收所述光图案的反射部分并且输出代表所述光图案的反射部分的信号的检测器。

30.根据权利要求29所述的系统,其中所述或一种处理器被配置成基于代表所述光图案的反射部分的所述信号确定所述选择的振幅和/或相位。

31.根据任一项前述权利要求所述的系统,其中依次激发所述输入波导的多个组合中的每一个包括依次激发多对输入波导中的每一个,激发所述多对中的每一个包括用第一频率的光激发该对中的第一输入波导,并且用第二频率的光激发该对中的第二输入波导。

32.根据权利要求31所述的系统,其中所述或一种处理资源被配置成处理来自所述至少一个检测器的所述信号以对于所述多对波导中的每对得到至少一个拍频。

33.根据权利要求32所述的系统,其中所述拍频为1kHz至1THz。

34.根据权利要求31至33中任一项所述的系统,其中用多个不同频率激发所述输入波导,从而得到多个不同拍频。

35.一种系统,所述系统包括:

波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将所述多个输入波导与所述多模波导耦合的导波过渡部;

至少一个光源,所述至少一个光源被配置成依次单独激发所述输入波导中的每一个,从而在所述波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案,

其中所述波导装置被配置成将所述多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域;和

至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于所述不同的光图案中的每一个而从所述目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号。

36.一种系统,所述系统包括:

波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将所述多个输入波导与所述多模波导耦合的导波过渡部;

至少一个光源,所述至少一个光源被配置成用多个不同组的选择的振幅和/或相位依次激发所述输入波导,从而在所述波导装置的输出部依次产生多个不同的所需光图案,

其中所述波导装置被配置成将所述多个不同的所需光图案中的每一个引导至目标区域;和

至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于所述不同的所需光图案中的每一个而从所述目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号。

37.一种系统,所述系统包括:

波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将所述多个输入波导与所述多模波导耦合的导波过渡部;

至少一个光源,所述至少一个光源被配置成依次激发所述输入波导的多个组合中的每一个,其中激发每个组合包括用第一光频率激发所述输入波导中相应的第一个并且用第二光频率激发所述输入波导中相应的第二个,从而在所述波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案,

其中所述波导装置被配置成将所述多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域;

至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于所述不同的光图案中的每一个而从所述目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号;和

处理器,所述处理器被配置成处理来自所述至少一个检测器的所述信号以得到关于所述组合中的每一个的拍频。

38.一种方法,所述方法包括:

通过至少一个光源,依次激发波导装置的多个输入波导或所述输入波导的多个组合中的每一个,从而在所述波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案,其中所述波导装置包括所述多个输入波导、多模波导和将所述多个输入波导与所述多模波导耦合的导波过渡部;

通过所述波导装置将所述多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域;

通过至少一个检测器检测响应于所述不同的光图案中的每一个而从所述目标区域透射、反射或发射的光;和

通过所述检测器输出代表所检测的光的信号。

光学系统和方法

[0001] 领域

[0002] 本发明涉及光学系统和方法,例如其中使用光纤装置进行体内内窥镜成像的系统和方法。

[0003] 背景

[0004] 在体内生物学成像领域中,光纤可以提供用于得到深入解剖结构的难以到达的区域内的组织和微环境的图像的有吸引力的微创工具。

[0005] 然而,与使用光纤的图像传输相关的基本难题可能是,多模光纤起到对将清晰图像从光纤的一端传输至另一端通常可能需要的相位和振幅信息加扰(scramble)的作用。因此,使用多模光纤的成像可能是困难的。

[0006] 尝试绕过该问题的一种方法是使用相干光纤束。相干光纤束可以是含有在光纤长度范围内最小程度耦合并且在期望波长支持仅一种或几种模式的多个单独引导芯的光纤。通过使用这些芯将光传输到关注物体和传输来自关注物体的光,可以实时对物体进行取样,这可以使原位应用可行。

[0007] 当使用相干光纤束时,所得到的图像的分辨率可以直接确定并且受形成束的单独芯的尺寸和间隔的限制。

[0008] 使用相干光纤束的内窥镜成像系统现在是可商购的,并且可以提供仅可商购的手段以实现体内原位单光纤成像。然而,这样的相干光纤束可能难以设计制造并且可能仅对较窄的光谱带宽有效。相干光纤束在芯尺寸、间隔和数量方面是精心设计的,这可能使甚至更短长度的这些相干光纤束变得昂贵。此外,似乎不大可能将已经通过光纤束实现的分辨率极限提高太多。

[0009] 受对增加的信息容量、分辨率提高和微型化的需求激励,使用单芯多模光纤进行成像已经是近年来大量研究的焦点。尤其是,已经研究了多种方法,其依赖于获得光纤的传输矩阵的先验知识,之后可以通过使用空间光调制器撤销光纤加扰进行校正。其他方法依赖于将在作为输入的函数的光纤输出下产生的图案预校准。之后可以使用后处理算法通过针对不同输入图案测量返回至近端的光的量来重建物体。无论什么方法,使用多模光纤的多种当前技术需要某种形式的系统预校准。

[0010] 在体内系统中,可能不能接近光纤的远端,这可能阻碍使用依赖于接近远端从而进行实时校准的方法。

[0011] 一定长度的多模光纤的传输矩阵是不稳固的,并且容易被甚至轻微的光纤移动改变。当光纤在身体内移动或弯曲时,传输矩阵可能随机变化。当光纤在身体内移动和弯曲时,在不接近远端的情况下,可能不能补偿传输矩阵的随机变化。传输矩阵还可以是波长依赖性的。

[0012] 概述

[0013] 在系统的第一方面,提供了一种系统,所述系统包括:波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将多个输入波导与多模波导耦合的导波过渡部(guided-wave transition);至少一个光源,所述至少一个光源被配置成依次激发输入波导中的每一个或

输入波导的多个组合中的每一个,从而在波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案,其中波导装置被配置成将多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域;和至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于不同的光图案中的每一个而从目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号。

[0014] 所述系统还可以包括处理资源,所述处理资源被配置成处理来自至少一个检测器的信号以得到关于目标区域的信息。

[0015] 所述系统还可以包括处理资源,所述处理资源被配置成处理来自至少一个检测器的信号以得到目标区域的图像。

[0016] 使用导波过渡部将多个输入波导与多模波导耦合可以提供用于在多模波导的输出部得到多个光图案的直接、可重复的方法。所产生的光图案相对于波导装置的移动可以是稳定的。之后可以使用多个光图案进行目标区域的成像。

[0017] 通过将多个光图案引导到目标区域上并且检测响应于光图案中的每一个的来自目标区域的光,可以形成具有高分辨率的目标区域的图像。在一些情况中,图像可以包括超分辨率图像。

[0018] 成像可以具有高填充因数(fill factor)。多模波导可以具有高数值孔径。可以将光引导至全部或大部分目标区域和/或从全部或大部分目标区域检测,而不是从小部分目标区域取样。系统可以提供光从至少一个光源到目标区域的高效递送和/或来自目标区域的光的高效收集。系统能够进行宽带操作。

[0019] 导波过渡部可以是其中将沿输入波导行进的波引导至多模波导中的波导装置的区域。在输入波导中传播的模式可以在导波过渡部中演化(evolve),使得在多模波导中产生多种模式。在操作中,在输入波导中传播的一种或多种模式可以以基本上连续的方式演化为在多模波导中传播的模式。在多模波导中从波导装置的远端传播的模式可以在导波过渡部中演化为在输入波导中传播的模式。在输入波导中以单模传播的光在进入导波过渡部之后可以不再是单模的,并且在离开导波过渡部时可以是多模的。导波过渡部可以提供在多个输入波导(可以各自为单模的或少模的)和多模波导之间的界面。在导波过渡部中,波导可以顺利地由一种类型(单模或少模)变为其他类型(多模)。光可以在输入波导和多模波导之间以低损耗耦合。

[0020] 波导装置可以包括光纤。输入波导中的每一个可以包括光纤的多芯部分的相应的芯。多模波导可以包括光纤的多模部分。

[0021] 导波过渡部可以包括从光纤的多芯部分的芯到光纤的多模部分的基本上连续的过渡部。导波过渡部可以是将光纤的多芯部分的芯与光纤的多模部分耦合的光纤部分。导波过渡部可以顺利地将在多芯部分中传播的模引导至多模部分中(或反之亦然)。导波过渡部可以包括光子灯笼(photonic lantern)过渡部。形成导波过渡部的材料可以包括玻璃(例如,硅酸盐或硫属化物)、晶体材料、多晶材料、陶瓷材料中的至少一种。

[0022] 可以通过使多芯光纤的一端成锥形以形成导波过渡部来形成光纤。

[0023] 光纤可以是柔性的。光纤能够插入人体或动物体中。光纤可以适合在体内使用。光纤可以包含二氧化硅。光纤可以具有2mm以下的直径。光纤可以包含聚合物。

[0024] 所述系统可以用于获得在人体或动物体内的组织的图像。例如,所述系统可以用于对远端肺、胃肠道、尿道或脑成像。所述系统可以用于进行微创成像。

[0025] 至少一个光源可以被配置成用使得在目标区域中引起荧光的激发光激发输入波导。至少一个检测器可以被配置成检测响应于激发光而由目标区域发射的荧光。

[0026] 至少一个检测器可以与波导装置的近端耦合。目标区域可以位于波导装置的远端或其附近。可以通过至少一个检测器经由一些或全部输入波导接收响应于不同的光图案中的每一个而从目标区域反射或发射的光。

[0027] 所述系统可以构成或形成内窥镜装置的一部分。内窥镜装置可以包括内窥镜成像装置。

[0028] 输入波导中的每一个可以是单模波导。输入波导中的每一个在用于激发输入波导的光的频率下可以是单模的。

[0029] 输入波导中的每一个可以是少模波导。输入波导中的每一个可以被配置成支持多种空间模式。输入波导中的每一个可以被配置成在用于激发输入波导的光的频率下支持不多于40种模式,任选不多于10种模式,进一步任选不多于6种模式,进一步任选不多于3种模式。输入波导中的每一个可以被配置成支持10种模式。输入波导中的每一个可以被配置成支持6种模式。输入波导中的每一个可以被配置成支持3种模式。至少一个光源可以被配置成依次激发输入波导的单独模式。

[0030] 输入波导中的每一个可以是保偏的 (polarisation maintaining)。

[0031] 所述系统可以被配置成使得在输入波导中的任一个中传播的光基本上不与输入波导中的任何其他一个耦合。

[0032] 所述系统还可以包括支撑体,所述支撑体被配置成消除或减少响应于波导装置的弯曲的导波过渡部的弯曲。支撑体可以被配置成消除或减少多模波导的弯曲。支撑体可以是基本上刚性的支撑体。支撑体可以由比导波过渡部的材料更刚性的材料形成。支撑体可以由比波导装置的材料更刚性的材料形成。支撑体可以包括,例如玻璃、二氧化硅玻璃、金属、钢、钛、热塑性聚合物、晶体材料、陶瓷材料、多晶材料、复合材料中的至少一种。支撑体的材料可以具有大于20G帕斯卡、任选大于50G帕斯卡的杨氏模量。

[0033] 不同的光图案中的每一个可以对波导装置的弯曲基本上不敏感。光图案可以对波导装置的弯曲基本上不敏感,只要波导装置不是急转弯曲到足以使光能够从波导逸出即可。

[0034] 即使当波导装置(例如,光纤装置)弯曲时,光图案也可以是基本上稳定的。所述系统可以适合在体内使用。波导装置当其在人体或动物体内部时可以弯曲。

[0035] 光图案的稳定性可以减少所需的校准量。在一些情况中,可以在不使用实时校准的情况下进行成像。在一些情况中,可以在不接近波导装置的输出部的情况下进行成像,这可以使得能够在体内进行成像。

[0036] 不同的光图案中的至少一些可以是基本上彼此正交的。不同的光图案中的至少一些可以形成图案的基组。

[0037] 不同的光图案可以具有不同的强度和/或电磁场的分布。

[0038] 不同的光图案可以使得全部目标区域被光图案照亮。

[0039] 不同的光图案可以使得不同的光图案中的每一个照亮全部或大部分目标区域。不同的光图案可以以使得光图案中的不同光图案照亮目标区域的不同部分。

[0040] 处理来自至少一个检测器的信号以得到目标区域的图像可以包括,对于不同的光

图案中的每一个,将该光图案的图像与对于该光图案从至少一个检测器得到的信号组合。

[0041] 处理来自至少一个检测器的信号以得到目标区域的图像可以包括鬼成像(重影成像,ghost imaging)。

[0042] 图像可以包括全内反射荧光(TIRF)图像。目标区域可以与波导装置的远端相邻。TIRF可以用于对直接放置在波导装置的远端小平面上的结构成像。

[0043] 图像可以包括深度断层摄影图像。

[0044] 波导装置还可以包括另外的导波过渡部。另外的导波过渡部可以位于多模波导的远端处。波导装置可以由光纤形成。可以通过使光纤在沿着光纤的第一位置成锥形来形成导波过渡部。可以通过使光纤在沿着光纤的第二位置成锥形来形成另外的导波过渡部。

[0045] 至少一个光源可以被配置成使用多个不同波长激发输入波导中的每一个,从而对于输入波导中的每一个产生多个光图案。另外的导波过渡部可以使光图案变得对波长更敏感。可以通过使用不同的光波长产生不同的光图案,这可以增加可以由系统产生的光图案的数量。增加光图案的数量可以提高系统的分辨率。

[0046] 至少一个光源可以被配置成依次激发输入波导的多个组合中的每一个。激发每个组合可以包括使用选择的振幅和/或相位同时激发多个输入波导中的至少一些以在多模波导的输出部产生所需光图案。

[0047] 激发组合中的不同组合可以包括激发输入波导的不同子组。激发组合中的不同组合可以包括使用不同的选择的振幅和/或相位激发相同的输入波导。

[0048] 可以选择振幅和/或相位,使得形成所需光图案。当用不同的振幅和/或相位激发时,相同的输入波导可以形成不同的光图案。通过一次激发多于一个输入波导,可以形成更多数量的光图案。使用更多数量的光图案可以增加系统的分辨率。

[0049] 每个光图案可以是通过多个输入波导中的至少一些中的每一个的光之间的相长干涉和/或相消干涉的结果。可以在导波过渡部中将来自不同输入波导的光组合以形成每个所需光图案。

[0050] 每个所需光图案可以包括光斑。

[0051] 光斑可以位于波导装置的远端表面处。光斑可以在波导装置的远端表面处提供点光源。使用导波过渡部可以使得这样的光斑能够位于波导装置的远端处,而不是与波导装置有一定距离。光斑可以在波导装置的输出部的近场。

[0052] 光斑可以位于波导装置的远端表面以外。光斑可以位于目标区域内。

[0053] 不同的光图案中的每一个可以包括在不同的相应位置处的光斑,以在目标区域上扫描光斑。

[0054] 所述系统可以进一步被配置成进行校准过程以得到校准数据。所选择的振幅和/或相位可以基于校准数据。

[0055] 所述系统还可以包括被配置成部分反射光图案的部分反射元件。部分反射元件可以位于波导装置的输出部。部分反射元件可以包括部分反射涂层。部分反射涂层可以包覆波导装置的远端小平面。部分反射涂层可以包括二向色涂层。部分反射涂层可以被配置成部分反射用于激发单模芯的波长的光。部分反射涂层可以被配置成透射响应于光图案而从目标区域发射的荧光。

[0056] 所述系统还可以包括被配置成接收光图案的反射部分并且输出代表光图案的反

射部分的信号的检测器。

[0057] 所述或一种(the or a)处理器可以被配置成基于代表光图案的反射部分的信号确定选择的振幅和/或相位。校准过程可以包括基于代表光图案的反射部分的信号确定选择的振幅和/或相位。

[0058] 依次激发输入波导的多个组合中的每一个可以包括依次激发多对输入波导中的每一个。激发多对中的每一个可以包括用第一光频率或波长的光激发该对中的第一输入波导,并且用第二光频率或波长的光激发该对中的第二输入波导。

[0059] 所述或一种处理资源可以被配置成处理来自至少一个检测器的信号以得到至少一个拍频。拍频可以在射频范围内。拍频可以为1kHz至1THz。至少一个检测器可以被配置成检测在拍频的信号。至少一个检测器的带宽可以为使得检测在拍频的信号。

[0060] 可以用多个不同频率激发输入波导,从而得到多个不同拍频。

[0061] 通过使用不同的光频率激发输入波导并且由信号得到一个或多个拍频,可以增加系统的自由度的数量,这可以使得能够得到较高分辨率的图像。

[0062] 拍频可以是稳定的。拍频可以对波导装置的移动基本上不敏感。

[0063] 输入波导中的每一个的直径可以小于100 μm ,任选小于20 μm ,进一步任选小于10 μm ,进一步任选小于5 μm 。输入波导中的每一个的直径可以大于0.5 μm ,任选大于2 μm ,进一步任选大于5 μm 。

[0064] 输入波导可以各自为光纤的多芯部分的单模芯或少模芯。多芯部分的直径可以大到足以将芯分离,使得它们不沿着光纤的长度明显耦合。光纤之间的分离可以取决于在每个芯中的导模(guided mode)有多大。

[0065] 输入波导之间的间隔可以小于100 μm ,任选小于20 μm ,进一步任选小于10 μm ,进一步任选小于5 μm 。

[0066] 多模波导的直径可以小于500 μm ,任选小于200 μm ,进一步任选小于100 μm ,进一步任选小于50 μm 。多模波导的直径可以大于10 μm ,任选大于20 μm ,进一步任选大于50 μm 。

[0067] 可以根据待测量的视场选择多模波导的直径。

[0068] 多模波导可以包括光纤的多模芯。可以根据多模波导的芯和多模波导的包层之间的折射率对比度选择多模波导的直径。

[0069] 多模波导的直径可以为输入波导中的每一个的直径的至少5倍,任选至少10倍。

[0070] 波导装置的输出部可以是多模波导的输出部。

[0071] 波导装置的长度可以为至少10cm,任选至少1m。导波过渡部的长度可以小于50mm,任选小于20mm,进一步任选小于10mm。

[0072] 至少一个光源可以被配置成用波长为300nm至1100nm的光激发输入波导。至少一个光源可以被配置成用波长为10nm至50 μm 、任选200nm至15 μm 的光激发输入波导。至少一个光源可以被配置成用可见光、近红外光、中红外光、红外光、紫外光中的至少一种激发输入波导。至少一个光源可以包括至少一个相干光源。至少一个光源可以包括至少一个激光光源。

[0073] 在可以独立提供的本发明的另一个方面,提供了一种系统,所述系统包括:波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将多个输入波导与多模波导耦合的导波过渡部;至少一个光源,所述至少一个光源被配置成依次单独激发输入波导中的每一个,从

而在波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案,其中波导装置被配置成将多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域;和至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于不同的光图案中的每一个而从目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号。

[0074] 在可以独立提供的本发明的另一个方面,提供了一种系统,所述系统包括:波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将多个输入波导与多模波导耦合的导波过渡部;至少一个光源,所述至少一个光源被配置成用多个不同组的选择的振幅和/或相位依次激发输入波导,从而在波导装置的输出部依次产生多个不同的所需光图案,其中波导装置被配置成将多个不同的所需光图案中的每一个引导至目标区域;和至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于不同的所需光图案中的每一个而从目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号。

[0075] 在可以独立提供的本发明的另一个方面,提供了一种系统,所述系统包括:波导装置,所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将多个输入波导与多模波导耦合的导波过渡部;至少一个光源,所述至少一个光源被配置成依次激发输入波导的多个组合中的每一个,其中激发每个组合包括用第一光频率或波长激发输入波导中相应的第一个并且用第二光频率或波长激发输入波导中相应的第二个,从而在波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案,其中波导装置被配置成将多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域;至少一个检测器,所述至少一个检测器被配置成检测响应于不同的光图案中的每一个而从目标区域透射、反射或发射的光,并且输出代表所检测的光的信号;和处理器,所述处理器被配置成处理来自至少一个检测器的信号以得到关于组合中的每一个的拍频。

[0076] 在可以独立提供的本发明的另一个方面,提供了一种方法,所述方法包括通过至少一个光源,依次激发波导装置的多个输入波导或输入波导的多个组合中的每一个,从而在波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案,其中波导装置包括多个输入波导、多模波导和将多个输入波导与多模波导耦合的导波过渡部;通过波导装置将多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域;通过至少一个检测器检测响应于不同的光图案中的每一个而从目标区域透射、反射或发射的光;和通过检测器输出代表所检测的光的信号。

[0077] 可以提供基本上如在本文中参照附图描述的方法或系统。

[0078] 在一个方面中的特征可以适当地提供为在任何其他方面中的特征。例如,方法的特征可以提供为装置的特征,反之亦然。在一个方面中的任何一个或多个特征可以与在任何其他方面中的任何一个或多个适合的特征组合提供。

[0079] 实施方案详述

[0080] 现在通过非限制性实例的方式描述本发明的实施方案,并且其在以下附图中示出,其中:

[0081] 图1是根据一个实施方案的系统的示意图;

[0082] 图2a是图1的光纤的近端视图;

[0083] 图2b是图1的光纤的远端视图;

[0084] 图3a是图1的光纤的近端的图像;

[0085] 图3b是图1的光纤的远端的图像;

[0086] 图4是概括说明一个实施方案的方法的流程图;

[0087] 图5示出了使用由光子灯笼产生的强度图案的一组相机图像和一组重建图像；

[0088] 图6是概括说明另一个实施方案的方法的流程图；

[0089] 图7是根据一个实施方案的系统的示意图；

[0090] 图8示出了a) 进行成像的物体的多个显微照片和b) 与显微照片对应的鬼像 (ghost image) 输出；和

[0091] 图9示出了a) 另一个进行成像的物体的多个显微照片和b) 与图8a的显微照片对应的鬼像输出。

[0092] 图1是根据一个实施方案的成像系统10的示意图。

[0093] 成像系统10包括通过使多芯光纤成锥形而形成的光纤12。在本实施方案中，光纤12是如在Harikumar K.Chandrasekharan,Frauke Izdebski,Itandehui Gris-Sánchez, Nikola Krstajić, Richard Walker, Helen L.Bridle, Paul A.Dalgarno, William N.MacPherson, Robert K.Henderson, Tim A.Birks & Robert R.Thomson, Multiplexed single-mode wavelength-to-time mapping of multimode light (多模光的多路复用单模波长与时间映射), Nature Communications 8, 14080 (2017) 中描述的。

[0094] 多芯光纤包括单模芯14的11x 11正方形阵列。对于约470nm至610nm的波长来说，单模芯14是单模的。在其他实施方案中，对于大于大约400nm、500nm或600nm的波长来说，单模芯14可以是单模的。单模芯14以间隔为10.53 μ m的正方形网格排列。单模芯14中的每一个的直径为1.63 μ m。单模芯14由锗掺杂的二氧化硅形成。用于多芯光纤的包层材料为纯二氧化硅。芯的数值孔径为0.22并且光纤的外径为200 μ m。

[0095] 在另外的实施方案中，芯之间的间隔可以是在沿光纤的长度传播之后使单模芯之间的光的明显耦合停止的任何适合的间隔。在一些实施方案中，通过减小波长、增加芯-包层折射率(指数, index)对比度和/或降低芯尺寸，将单模芯更紧密地布置在一起。

[0096] 尽管在本实施方案中，多芯光纤的多个芯14是单模的，但是在其他实施方案中，来自多芯光纤的每个芯可以支持少量的模式，例如3或6种空间模式。

[0097] 图2a是光纤12的近端16的端视图的示意图，示出了多个单模芯14。

[0098] 光纤12在远端18成锥形以形成光子灯笼过渡部20。在本实施方案中，通过在低折射率(指数, index)毛细管内部放置多芯光纤、使多芯光纤成锥形并且在锥形中间附近切割锥形多芯光纤，形成光子灯笼过渡部22。可以认为切割的端部形成了常规的阶跃折射率芯-包层多模波导22，其中多模波导22的芯由锥形多芯光纤形成，包层由锥形的低折射率毛细管形成，并且多芯光纤的单独芯现在过小而不能适当地引导光。

[0099] 图2b是光纤的远端的端视图的示意图，其示出了多模芯22。多模芯22大于单模芯16中的每一个。

[0100] 光纤12包括单模芯14的部分具有长度L。包括多模芯22部分的光子灯笼过渡部20具有比L小得多的长度d。例如，L可以是一米以上，而d可以是数毫米或数十毫米。在图1中的尺寸并非按比例示出。

[0101] 光子灯笼是在其理想情况下将在一个端部的N个单模芯的阵列与在另一端部的支持N个导模的多模芯耦合的导波设备，其中所述端部通过绝热的过渡部连接。在这样的过渡部中，可以认为注入在单模端的一个芯中的光在多模端缓慢地演化为相干模式。相干模式在灯笼过渡部的输出部具有特定的振幅和相位特征。在Birks, T.A., Gris-Sánchez, I.,

Yerolatsitis, S., Leon-Saval, S.G. & Thomson, R.R., The photonic lantern (光子灯笼). Adv. Opt. Photon. 7, 107 (2015) 中描述了光子灯笼和形成光子灯笼的方法的实例。

[0102] 在光子灯笼过渡部20中,波导顺利且连续地由单模芯14变为多模芯22。输入至单模芯14中任一个中的光可以分布在多模芯22中的大部分或全部模式上以形成特定光图案。

[0103] 已经发现,在通过使多芯光纤在一端成锥形而形成的光子灯笼中,当将光单独耦合到在光子灯笼的近端的每个单模芯中时,可以在光子灯笼的远端处的输出部产生光的非常特殊的多模图案,只要单模芯14在所使用的光纤长度上不明显耦合即可。可以通过激发单模芯14中的不同单模芯来形成不同的光图案。由具有相同设计的不同光纤形成的光图案可以是相似的,但是所形成的精确光图案对于给定的多芯光纤和导波过渡部来说可以是独特的。例如,可以通过使多芯光纤成锥形并且切割一定长度的多芯光纤将两个光子灯笼制造为相同设计。然而,对于两个灯笼过渡部来说,切割锥形部分的位置可以不完全相同,使光图案至少稍微不同。

[0104] 图3a是当将光输入至光纤的远端18中时光纤12的输入(近)端16的图像。图3a示出了121芯多芯光纤的单模的正方形阵列。图3a证实,可以将输入至多模芯22中的光耦合到大部分(如果不是全部的话)单模芯14中。在附图3a和3b中的比例尺表示10 μ m。

[0105] 图3b示出了在相反端的光子灯笼20的锥形输出部。图3b是当将光输入至单模芯14中的一个时光纤12的输出(远)端18的图像。图3b示出了,当将光输入至单模芯14中的具体的一个中时,在远端18产生特殊的光图案。当激发单模芯14中的不同单模芯时,可以产生不同的图案。以下参照图4的成像方法进一步讨论图3b。

[0106] 刚性支撑体24包围光子灯笼过渡部20和多模芯22。在本实施方案中,刚性支撑体是玻璃毛细管。在其他实施方案中,刚性支撑体24可以由比波导装置更刚性的任何适合的材料形成。例如,刚性支撑体24可以由二氧化硅玻璃、金属或热塑性聚合物形成。刚性支撑体可以是3D打印的钢或钛套管,或者是可以使用激光处理技术制造的晶体、陶瓷或多晶套管。

[0107] 以确保光子灯笼过渡部20和多模芯22高度稳定的方式将光子灯笼过渡部20和多模芯22用刚性支撑体24包装。例如,如果将光纤12弯曲,则光子灯笼过渡部20和多模芯22可以由刚性支撑体24的存在而不弯曲。

[0108] 图1的系统还包括相干光源26。在本实施方案中,相干光源26是被配置成提供波长为514nm的激光的激光光源。在其他实施方案中,可以使用任何适当的相干光源。激光可以是例如可见光、红外光或紫外光。

[0109] 图1的系统还包括两个检测器34、36和相机40。在另外的实施方案中,可以使用不同的成像设备代替相机40,例如具有单一像素的扫描检流计系统。检测器34、36是低噪音检测器。在一些实施方案中,检测器34、36可以是单光子灵敏的。

[0110] 图1的系统还包括:位于相干光源26和光纤12的近端16之间的输入透镜28;位于光纤12的远端18和目标区域44之间的输出透镜30;和位于目标区域44和相机40之间的成像透镜38。在其他实施方案中,透镜28、30、38中的每一个可以包括透镜或其他光学部件的组合。可以使用光学部件的任何适合的组合代替透镜28、30、38。

[0111] 图1的系统还包括分束器32,其被配置成将来自光纤12的远端18的光分开,以使得一部分光入射到第一检测器34上并且另一部分光入射到目标区域44上。

[0112] 图1的系统还包括处理器46。在本实施方案中,处理器46形成个人计算机(PC)或笔记本电脑的一部分。在其他实施方案中,处理器46可以形成任何计算系统的一部分。

[0113] 图4是概括说明操作图1的系统以对位于目标区域44内的物体42成像的方法的流程图。

[0114] 在图4的阶段50,将来自相干光源26的波长为514nm的激光经由输入透镜28单独注入到在光纤12的近端的每个单模芯14中。依次激发单模芯14中的每一个。

[0115] 当将光注入到单模芯14中的一个中时,光在该芯14中传播,而不与任何其他单模芯14明显耦合。到其他单模芯14中的任何耦合对于应用来说可以是可忽略的或者足够低的。光分布在多模芯22中的多种模式上并且形成光图案,例如如在图3b中示出的光图案。

[0116] 已经观察到,通过在光纤12的非锥形端激发一个单模芯,可以在光纤12的多模输出部20产生特殊的光图案,并且图案对光纤12的移动不敏感。对于单模芯16中的给定单模芯的激发,可以认为响应于该单模芯的激发而在光纤12的远端产生的图案对多芯光纤的弯曲不敏感,只要光子灯笼过渡部20本身不弯曲即可。在本实施方案中,通过刚性支撑体24防止光子灯笼20和多模波导22弯曲。

[0117] 使用输出透镜30收集从光纤12的远端发射的光,并且将其成像至目标区域44中要放置物体42的位置。在阶段50期间不存在物体42和第二检测器36。

[0118] 成像透镜38用于将第一图像平面再次成像至相机40。当将光单独耦合到光纤12的每个单模芯14中时,相机40拍摄从光纤12发射的输出图案中的每一个。

[0119] 如在图4b中所示,通过以足够的放大倍数将光子灯笼20的输出部成像到相机40上,可以获取作为强度图案的光分布。使用本实施方案的光纤12,可以通过一次一个地将光耦合至在光纤12的非锥形端的每个单模芯16中而在锥形端产生121个独特的强度图案。对于理想的光子灯笼20来说,121个不同的强度图案在其电磁场分布中正交,但是在其强度分布中不是独特的。通过相机记录强度图案。

[0120] 使用相机40的成像为使得已知强度图案具有足以实现系统的准确重建的分辨率和精确度。

[0121] 阶段50得到一组121个强度图案图像,每个单模芯一个。通过处理器46储存121个强度图案图像。

[0122] 在阶段52,在目标区域44和成像透镜38之间放置第二检测器36。在目标区域44中仍然没有物体42。

[0123] 将来自相干光源26的波长为514nm的激光经由输入透镜28单独注入到在光纤12的近端的每个单模芯14中。使用输出透镜30收集从光纤12的远端发射的光,并且将其成像至目标区域44中要放置物体42的位置。从光纤12的远端发射的光的一部分被放置在输出透镜30和目标区域44之间的分束器反射,并且入射到第一检测器34上。

[0124] 第一检测器34检测被分束器32反射的光并且根据所检测的光的量输出第一检测器电压D1。第二检测器检测透射通过目标区域44的光并且根据所检测的透射光的量输出第二检测器电压D2。检测器34、36具有足够低的噪音以提供光功率的高准确性测量。在一些实施方案中,检测器34、36可以对单光子灵敏,或者至少极灵敏并且低噪音。

[0125] 处理器46使用第一检测器电压D1和第二检测器电压D2得到检测器34、36的检测器电压D1/D2的比。处理器46针对每个多芯光纤输入(即由单模芯14中的每一个的激发得到的

不同的光图案中的每一个) 获得并且储存相应的检测器电压D1/D2的比。

[0126] 如以上所述的检测器34、36的自参考设置可以使得能够得到比率测量,这从而可以避免检测器读数的时变波动。

[0127] 可以将阶段50和52描述为校准步骤。在阶段54,在校准步骤完成之后,将物体42放置在位于光纤12的输出部的第一图像平面处的目标区域44中。

[0128] 在阶段56,将514nm激光再次单独注入到单模光纤14中的每一个中,并且再次测量每个多芯光纤输入的D1/D2比。可以预期的是,在目标区域中存在物体42的情况下通过检测器34、36检测的光的比率D1/D2可以与在不存在物体时检测的比率D1/D2不同。

[0129] 当在目标区域中存在物体42时,处理器46针对由单模芯14中的每一个的激发得到的不同的光图案中的每一个储存相应的检测器电压D1/D2的比。

[0130] 在存在或不存在物体42的情况下测量的D1/D2比受投影图案的重叠和物体的空间透射性质影响。这些差异可以提供重建物体的能力。

[0131] 在阶段58,处理器46使用来自阶段50的不同图案的图像、来自阶段52的在不存在物体的情况下的D1/D2比和来自阶段56的在存在物体的情况下的D1/D2比来重建物体的图像,例如通过使用鬼成像法。鬼成像法可以类似于在例如Baoqing Sun,Stephen S.Welsh,Matthew P.Edgar,Jeffrey H.Shapiro和Miles J.Padgett,“Normalized ghost imaging (标准化鬼成像)”,*Optics Express* 20,16892-16901 (2012) 中描述的方法。在一些实施方案中,成像方法可以类似于在Reza Nasiri Mahalati,Ruo Yu Gu和Joseph M.Kahn,“Resolution limits for imaging through multi-mode fiber(通过多模光纤成像的分辨率极限)”,*Opt.Express* 21,1656-1668 (2013) 中使用的方法,其中使用多模光纤将准随机图案投影到物体上,之后将从物体反射的一部分光透射回到光纤,并且可以根据对图案和功率的了解重建物体。

[0132] 鬼成像可以包括其中使用多个不同的光图案照亮未知物体并且使用检测器例如单元件检测器测量透射(或反射)光的方法。对于光图案中的每一个,可以认为当通过给定的光图案照亮物体时由检测器产生的信号代表有多少光图案被透射(或反射)。通过收集大量光图案的信号,可以确定物体的形状。之前已知使用例如一系列激光散斑图案进行鬼成像。

[0133] 在图4的实施方案中,用于进行鬼成像的光图案是通过激发不同单模芯14产生的图案。将由光子灯笼产生的模式用于图像重建。

[0134] 在原理论证的证明中,使用图1的系统对剃须刀刀片和镀铬USAF分辨率标板各自成像。

[0135] 图5示出了使用图1的系统和图4的方法重建的物体的图像。对于三个物体(a)、(b)、(c)中的每一个,上行图像示出了使用图1中的相机40得到的物体,并且下行图像示出了使用由包括光子灯笼20的光纤12产生的121个强度图案重建的物体的图像。在(a)中使用的物体是来自USAF标板的正方形特征件。在(b)中使用的物体是水平朝向的刀刃。在(c)中使用的物体是垂直朝向的刀刃。

[0136] 仅使用121个强度图案得到在图5中所示的原理论证结果。可以认为结果强调了使用光子灯笼的模式用于成像应用的潜力。通过增加多芯光纤中芯的数量,可以大幅提高重建图像的分辨率。例如,多芯光纤可以包括数千或数万个单模芯。将光注入到单独的单模芯

中可以使得能够形成数千或数万个强度图案。通过增加多芯光纤中芯的数量,与图5中所示的那些相比,可以大幅提高重建图像的分辨率。

[0137] 在图1中所示的系统中,远端进行光检测。在其他实施方案中,可以使用与参照图1的系统描述的基本概念相同的基本概念近端进行光检测(例如,用于体内应用)。

[0138] 在一些实施方案中,将以上参照图1描述的概念扩展至显微内窥镜检查。光纤12形成内窥镜的一部分或插入内窥镜中,所述内窥镜可以被引入至患者体内,例如引入至患者的肺中。

[0139] 将由光子灯笼产生的单独图案投影到物体42上,并且针对每个图案对透射回到光纤12的光(反射光或荧光)的量进行测量。之后可以使用算法如用于鬼成像的那些算法重建物体42。

[0140] 使用上述光纤技术,可以利用压缩传感(compressive sensing)理论提供压缩显微内窥镜成像模式。

[0141] 使多芯光纤成锥形直到狭窄的腰部以形成灯笼可以使得能够实现真正的体内显微内窥镜检查。例如,其可以对细菌成像,而不仅是检测它们。在一些实施方案中,可以存在实现对具有细胞内详细信息的荧光生物标记物成像的潜力。可以存在进行超分辨率显微内窥镜检查的可能性。

[0142] 光子灯笼结构可以实现对光纤移动和弯曲基本上不敏感的不同的稳定强度图案的投影,条件是将光子灯笼过渡部长度刚性包装。因为可以将过渡部设计并且制造为短至数mm,所以可以以确保其高度稳定的方式将其包装。

[0143] 在实施方案中,光图案可以保持稳定,只要光纤不是急转弯曲到足以使光能够从芯逸出即可。如果将光纤过度急转弯曲,则光可能从芯逸出并且可能不知道从远端发射的光的功率(尽管在一些情况中,该信息可以由从远端反射的光的量得到)。

[0144] 一旦将在光纤12的输出部产生的图案和单模激发之间的关系校准,则无论如何操纵多芯光纤本身都可以认为该关系是已知的,只要单模芯14在所使用的多芯光纤的长度L上表现出可忽略的耦合即可。

[0145] 因此可以在不接近光纤12的远端的情况下进行成像。例如,可以在将光纤12插入患者中之前得到通过依次将光注入到单模芯14中的每一个中产生的光图案,并且可以认为,即使光纤12在其处于原位时弯曲,那些图案也是稳定的。这与其中如果光纤移动就需要重新校准图案的一些已知方法形成对比。

[0146] 上述方法可以实现体内和原位的高填充因数、高分辨率的显微内窥镜检查,而不需要大体积的光纤束或脆弱的远端扫描末端。在使用相干光纤束成像的已知方法中,在根据光纤芯的间隔而隔开的取样点对要成像的物体或区域取样,因此所得到的填充因数可能较低。使用光子灯笼或类似的过渡部可以使得能够得到较高的填充因数和较高的分辨率。

[0147] 可以通过在远端在尽可能小的面积中使用尽可能多的不同图案进行高分辨率成像。在一些实施方案中,可以通过使芯和包层之间的折射率对比度最大化来实现高分辨率(例如,通过使用作为空气或真空的包层)。在一些实施方案中,可以通过使远端成锥形直到达到在模式开始成为非导波的之前的最小可能尺寸来实现高分辨率。

[0148] 将单模或具有少量模式的低数值孔径芯与具有高数值孔径的多模芯耦合。

[0149] 图1的系统可以在宽光谱带宽内工作。在一些情况中,带宽可能受在其范围内可以

实现在多芯光纤长度上的可忽略的芯之间的耦合的带宽和/或受在其范围内可以实现单独芯的单模或少模操作的带宽限制。

[0150] 适当设计的设备可以实现非常高效的操作,例如非常高效的泵浦光递送以及非常高效的信号到检测器的收集。

[0151] 当与其中使用具有散射远端末端的单模或多模光纤以使用特征化散斑图案提供压缩传感的方法相比时,由于在远端使用多模信号收集,一些实施方案可以提供高得多的在返回路径中的通量。

[0152] 在光子灯笼的情况中,可以将通过多模芯收集的来自物体的光高效地耦合到大部分(或全部)单模芯中并且传输至近端以进行处理。在与单模光纤(或具有单模芯的多芯光纤)连接的散射远端末端的情况中,与光子灯笼的情况相比,来自散射末端的光与单模芯的耦合效率可能低得多。

[0153] 多模光纤支持多种空间模式,因此与单模光纤相比从更多的角度接收光。这可以使多模光纤在捕获信号的类型方面高效得多,所述信号例如是多模反射和非相干荧光信号,其可以由如以上所述的系统产生。

[0154] 在以上一些实施方案中,使反射光或荧光经由光子灯笼和单模芯返回至光纤的近端。在其他实施方案中,可以通过另一个芯或光纤从光纤的远端收集光。

[0155] 在一些实施方案中,具有如以上所述的光子灯笼过渡部的光纤可以有被配置用于全内反射(TIRF)模式的潜力。在TIRF模式中,处理远端18以使得所产生的图案从放置样品的表面(可以是光纤的远端小平面)内反射。使用TIRF模式可以提供样品的极度断面(extreme sectioning)。

[0156] 在另外的实施方案中,光纤12可以用于进行深度断层摄影。为了进行深度断层摄影,系统可以被配置成以脉冲方式发出光的图案,并且测量脉冲返回至远端的时间。这可以以与在Ming-Jie Sun,Matthew P.Edgar,Graham M.Gibson,Baoqing Sun,Neal Radwell,Robert Lamb&Miles J.Padgett,Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution(具有基于时间的深度分辨率的单像素三维成像),Nature Communications 7,12010(2016)中描述的方式类似的方式提供信息。

[0157] 所得到的深度信息可以高度依赖于检测器的时间分辨率。检测器可以是具有数ps的分辨率的单光子检测器。

[0158] 其他方法可以一次沿一个芯传送宽带光(脉冲的或连续的波),并且对于每个输入芯对单模芯的返回的输出信息进行光学相干断层摄影测量。这可以在微米尺度上提供大幅提高的分辨率。

[0159] 在一些实施方案中,可以存在利用较高自由度如波长、相位和/或偏振以增加可以产生的图案的数量的可能性。

[0160] 在以上参照图4描述的实施方案中,在光纤12的近端处的多个芯14是单模的。在其他实施方案中,能够以少量模式激发芯中的每个。如果使用模式的精确和纯激发,则可以使用由少模芯形成的灯笼增加可以产生的图案的数量。可以依次激发每个芯的每种模式。使用少模激发的系统可以是比使用单模激发的系统更复杂的系统,因为其可以利用精确的模式选择性激发。

[0161] 在另外的实施方案中,在远端18形成多锥形过渡部。在多锥形过渡部的实例中,光

纤如在图1中所示在远端18成锥形,但是之后再次变宽,之后再次变窄,以使得变宽的部分是基本上非耦合的芯的阵列并且变窄的部分是有效的多模芯。使用多锥形过渡部可能使在远端产生的图案是高度波长敏感的。使用多锥形过渡部可以通过调节输入波长来提供增加可能的图案的数量的方式。在图1的系统中,所产生的光图案可以对波长较不敏感。相比之下,多锥形过渡部可以产生对波长敏感得多的图案。因此,波长的变化可以用于产生额外的图案,这可以提高所得到的图像的分辨率。双锥形或多锥形可以允许调节波长以提供额外的自由度,从而增加图案的数量。

[0162] 在一些实施方案中,包括多于一个锥形的远端结构的受控机械形变可以用于产生更多图案。

[0163] 在一些实施方案中,光纤的输出部包括非锥形多芯光纤。例如,多芯光纤可以是窄的以形成光子灯笼,之后再次变宽为多芯光纤。

[0164] 在如以上关于图1和图4描述的实施方案中,导波过渡部(如光子灯笼)用于将不同的光图案投影到物体上。将光耦合到设备的每个芯14中,一次一个芯。将系统校准。当将光耦合到每个芯中时在输出部产生的光图案是已知的。将这些图案投影到物体上并且通过测量光(所产生的荧光、反射光或透射光)的振幅,可以使用多种算法构建物体的图像。

[0165] 在这样的实施方案中,一次仅与一个芯耦合。因此,只要芯不在所使用的光纤的长度上明显耦合,在输出部的光图案就是稳定的。

[0166] 在另外的实施方案中,同时将相干光耦合到导波过渡部的多个芯中。对每种模式的相位和振幅控制用于在过渡部的输出部产生所需强度特征。

[0167] 以上已经描述了将光注入到单模芯14中的每一个中对于单模芯中的每一个得到相应的强度图案。如果使用受控的相位和振幅将光注入到单模芯中的多于一个中,则可以在光纤12的远端18处形成所需强度图案。例如,可以形成斑点。

[0168] 在一些实施方案中,同时将光耦合到多芯光纤的多个芯中。控制在每个芯中的光的相位和振幅以在输出部产生所需光分布。芯可以是保偏的。

[0169] 在一些实施方案中,所需光分布包括在光纤12的远端18处的斑点。可以认为斑点提供点光源。可以通过改变单模芯14的相位和/或振幅来扫描斑点。与在一些已知方法中不同,可以在远端18本身上而不是在远场中提供斑点。

[0170] 在一些实施方案中,所需光分布可以包括与光纤12的端部小平面有一定距离的斑点。例如,可以在目标区域44中产生斑点。可以通过适当的相位和振幅控制来扫描与小平面有一定距离的斑点。

[0171] 在RAVicencio等,Observation of Localized States in Lieb Photonic Lattices (Lieb光子晶格中局部状态的观察),Phys Rev Lett 114(24),2455032015年6月15日中描述了可以产生具有所需相位和振幅的斑点的任意阵列的一种方法,其中使用空间光调制器产生具有 $0-\pi-0-\pi$ 相位特征的4光斑图案。还可以将在Vicencio等中概述的基本技术扩展以针对向光纤的输入产生复杂得多的振幅和相位特征。

[0172] 在其中同时激发多个单模芯14的实施方案中,预期在每个芯中的光的相对相位随着调节光纤(如果使用光纤的话)而变化。因此,实时监测并且调节光的相对相位以校正光纤的移动。

[0173] 在如Kim,Y.,Knight,J.,Warren,S.,Neil,M.,Paterson,C.,Stone,J.,Dunsby,C.

和French,P.,2016.Adaptive multiphoton endomicroscope incorporating a polarization-maintaining multicore optical fiber(包括保偏多芯光纤的适应性多光子显微内窥镜).IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,22(3), 6800708的文章中,已经使用空间光调制器(SLM)证实了在多芯光纤系统中的动态相位校正。在Kim等的文章中描述的实施方式能够接近输出端。使用参考光束的全息摄影(holography)用于测量在输出部的相位并且校正任何相位扰动。

[0174] 在一些实施方案中,将光耦合到其中不直接接近内窥镜的远端的内窥镜应用中的多个芯。用部分反射涂层涂布光子灯笼的远端18。使用从部分反射涂层反射的光实时校准系统。使用从部分反射涂层反射的光提供在激发多个单模芯中要使用的振幅和/或相位以得到所需图案。

[0175] 如果将光注入到多芯光纤的一个单模芯14中,则其将会沿多芯光纤行进而不与其他单模芯14明显耦合,直到其到达光子灯笼20。其之后将会在光子灯笼过渡部的输出部18处产生特殊光图案。因为用部分反射涂层涂布光子灯笼过渡部的远端18,所以光图案被部分反射并且将会在沿光纤返回的途中与一组(在本实施方案中为全部)单模芯耦合。通过在输入部与一个芯耦合,来自该芯的反射光在沿光纤返回的途中与一些或全部芯耦合。

[0176] 在其中同时激发多个芯的实施方案中,来自多个芯的反射光在灯笼过渡部中干涉并且改变在整个芯上的光分布。在远端处的光的相对相位直接决定在近端处测量的反射光的分布。

[0177] 在一个实施方案中,将在近端处测量的光图案校准并且与在输出部产生的图案相关联。可以使用该信息实时校正相位。

[0178] 在一个实施方案中,部分反射涂层是二向色涂层。在要成像的组织上使用荧光染料。二向色涂层反射95%的在激发波长的光。二向色涂层仅反射微量的在荧光染料的荧光波长的光。

[0179] 仅5%的激发光离开光纤的多模端,并且仅最多5%的离开多模端的光将能够再次进入多模端。

[0180] 使用位于光纤的近端处的相机检测从二向色涂层反射的在激发波长的光的图案。因为仅少量的在激发波长的光被二向色涂层透射,所以在近端处检测的光图案对从物体反射的激发光的量非常不敏感。所述系统还包括位于在光纤的近端处的相机前方的二向色涂层,使得相机仅观察在激发波长的光的图案。

[0181] 因为大量激发光是可用的,所以在多模端反射其95%可能几乎没有区别。因为涂层是二向色性的并且被配置成使几乎全部在荧光波长的光通过,所以来自样品的荧光被高效地接收至设备的多模端中。

[0182] 图6是概括描述其中将不同波长耦合到两个以上单模芯13中的每一个中的实施方案的方法的流程图。使用拍频得到图像。

[0183] 在图6的阶段70,相干光源26产生具有第一频率F1的光束。使用声-光调制器产生从第一频率多普勒频移所需量的衍射光束。衍射光束具有第二频率F2。使用声-光调制器提供具有所需频率差(F1-F2)的两个光束。

[0184] 将第一光频率F1耦合到单模芯中的第一个C1中。在C1中的光沿多芯光纤传播。多芯光纤被设计为在所使用的光纤的长度L上不耦合,因此到任何其他单模芯中的耦合都是

可忽略的。来自C1的光传播至灯笼过渡部20中并且在输出部18形成第一光图案。

[0185] 将第二光频率F2耦合到单模芯中的第二个C2中。来自C2的光沿多芯光纤传播,到任何其他单模芯中的耦合都是可忽略的。来自C2的光传播至灯笼过渡部20中并且在输出部18形成第二光图案。两个光图案在一些区域中重叠。

[0186] 重叠区域的强度以拍频(F1-F2)变化。在本实施方案中,拍频(F1-F2)选择为在射频区域中。

[0187] 来自两个光图案的光入射到目标区域中的物体上,并且一部分光被反射。在阶段72,在光纤12的近端的检测器检测从目标区域44沿光纤返回的信号。检测器具有足以观察在拍频下的信号的带宽。检测器可以是高速光检测器。预期拍音(beat note)的频率将会对光纤的弯曲非常不敏感。弯曲通常可能仅引起模之间的至多kHz水平的相位变化,这与可以为例如MHz或GHz的RF拍频相比是可忽略的。

[0188] 在阶段74,针对不同对的芯重复阶段70和72。使用本方法,可以研究通过将光耦合到每对芯中(一次一个)而产生的信号的强度,由此产生 $((n^2)-n)/2$ 个单独的信息块,而不是如在图4的实施方案中的情况的n位信息。

[0189] 在阶段76,处理器46处理来自每对芯的信号以重建物体的图像。使用与在图4的阶段56中使用的算法类似的算法构建物体。

[0190] 图6的实施方案使用用于使用多于一种频率以通过形成额外图案(在图6的情况中为通过用不同频率同时激发两个芯而形成的拍频图案)来得到额外信息的基本构思。

[0191] 还可以设想在图6中使用的基本构思的更先进的实施方式。

[0192] 在一个实施方案中,使用两个锁模激光器提供光。两个锁模激光器具有稍微不同的空腔长度。锁模激光器可以是例如载波-包络-相位稳定的激光器(carrier-envelope-phase stabilised laser)。

[0193] 可以将第一锁模激光器的单独模式耦合到光纤的每个芯中。之后可以将故意具有稍微不同的空腔长度以及因此稍微不同的模频率的另一个锁模激光器的单独模式耦合到光纤的每个芯中。

[0194] 锁模激光器的模式是纵向模式。第二锁模激光器具有与第一锁模激光器不同的空腔长度,因此第二锁模激光器的纵向模间隔和纵向模频率与第一锁模激光器的那些不同。

[0195] 在输出部,每对芯可以产生具有不同拍频的调制图案。通过记录返回光的RF波谱,之后可以立即记录这些音符(note)的功率。该构思从双梳状光谱(dual comb spectroscopy)借用了一些概念。

[0196] 在一个实施方案中,使用两个锁模激光器作为光源。将来自第一锁模激光器的第一模式耦合到第一芯中。将来自第一锁模激光器的第二模式耦合到第二芯中。将来自第一锁模激光器的第三模式耦合到第三芯中,等等,直到耦合到第N芯中的来自第一锁模激光器的第N模式。

[0197] 之后将来自第二锁模激光器的第一模式耦合到第一芯中。将来自第二锁模激光器的第二模式耦合到第二芯中。将来自第二锁模激光器的第三模式耦合到第三芯中,等等,直到耦合到第N芯中的来自第二锁模激光器的第N模式。

[0198] 在这个实施方案中,芯的每个成对组合由独特的拍频表示。

[0199] 在另外的实施方案中,该概念可以用于多组模。可以将多组模耦合到每个芯中,然

后每对芯可以由一组拍频表示。

[0200] 当与其中一次仅激发一个芯的实施方案相比时,使用多个频率以及使用拍频可以使得能够由给定数量的芯得到增加的信息。

[0201] 在上述实施方案中,使用光子灯笼将单模芯的阵列与多模芯耦合。在其他实施方案中,可以使用任何适合的导波过渡部,例如任何适合的单模到多模或少模到多模的导波过渡部。

[0202] 在一些实施方案中,可以使用模选择性光子灯笼产生可以与单独芯的空间模式良好匹配的光图案。模选择性光子灯笼可以是,例如,如在S Yerolatsitis,K Harrington,R R Thomson,T ABirks,Mode-selective Photonic Lanterns from Multicore Fibres(来自多芯光纤的模选择性光子灯笼),Optical Fiber Communication Conference OSA Technical Digest(在线)(Optical Society of America,2017),paper Tu3J.6中描述的。

[0203] 可以认为光子灯笼包括从单模芯光纤的阵列到单个多模芯的绝热过渡部。已经使用光纤光子灯笼进行实验,所述光纤光子灯笼通过用萤石为121个芯光纤加套并且之后将其拉伸为所有芯合并形成灯笼的多模端时的直径而形成。绝热过渡部意指,当通过激光激发多芯阵列的单个芯时,灯笼的多模端的输出部包括由一体芯(unified core)引导的最低阶空间模式的相干叠加。

[0204] 鬼成像是由双重摄影开发的技术,其中依次改变用于照亮场景的光场以增加由相机记录的信息的量(参见,例如,Sen.P等,Dual photography in ACM Transactions on Graphics(在对图形的ACM处理中的双重摄影)24,745-755(ACM Press,2005))。鬼成像通过将照明光分为两部分而使双重摄影技术更进一步。照明光的两部分通常称为参考光束和信号光束。仅由参考光束记录空间信息(参见,例如,Fourier Optics and Computational Imaging(傅里叶光学器件和计算成像)52,293-299(John Wiley&Sons Ltd,2015))。将要成像的物体放置在信号光束中。可以通过空间原始桶检测器(spatiallynaïve bucket detector)测量由物体反射(或透射)的光的强度。

[0205] 图7是根据一个实施方案的装置的示意图。激发多芯光纤112的选择的芯114。光通过被激发的芯进入光子灯笼120中,通过透镜128,并且进入分束器132中。光从分束器被分为参考光束和信号光束。将物体142放置在信号光束的路径中,之后通过第一检测器136检测所述信号光束。通过第二检测器134检测参考光束。通过照亮光子灯笼的每个芯,提供用于鬼成像的照明。

[0206] 为了获得物体的图像,将从光检测器134、136收集的数据与根据以下算法的超模(supermode)的图像组合:

$$[0207] \quad O_i(x, y) = \left(\frac{S_i}{R_i} - \frac{\langle S \rangle}{\langle R \rangle} \right) (I_i(x, y) - \langle I(x, y) \rangle)$$

[0208] 其中x和y是空间坐标, S_i 是在激发芯i时的第一检测器的输出, R_i 是第二检测器134的输出,并且 $I_i(x, y)$ 是超模图像。尖括号表示总体平均值。 $O_i(x, y)$ 可以描述为鬼像输出。

[0209] 附图8和9示出了以上关于图7的装置描述的成像过程的结果。

[0210] 图8中的第一行图像a)包括物体在不同位置的一组显微照片。图8中的第二行图像

b) 包括关于与第一行图像的显微照片的那些相对应的物体位置的一组鬼像。

[0211] 图9中的第一行图像a) 包括另一个正方形物体在不同位置的一组显微照片。图9中的第二行图像b) 包括关于与图9中的第一行图像的显微照片的那些相对应的另一个物体的位置的一组鬼像。

[0212] 尽管以上描述了使用光纤的实施方案,但是在其他实施方案中可以使用任何波导。在一个实施方案中,将波导过渡部写为芯片(chip)。波导过渡部将多个单模或少模波导耦合到多模波导中。

[0213] 以上使用的方法可以用于引导任何适合频率、例如引导波长为200nm至15 μ m的光的波导。

[0214] 在以上实施方案中,使用光纤装置进行内窥镜成像。可以使用任何其他实施方案、任何适合的波导装置进行任何适当类型的成像,例如深度断层摄影或TIRF。在另外的实施方案中,可以如以上所述使用波导装置以由多个光图案得到信息,其中信息可以不包括图像。

[0215] 可以使用波导装置的实施方案进行任何适合的解剖学区域的成像或分析,例如能够通过内窥镜接近的任何解剖学区域。例如,可以使用实施方案进行支气管、胃肠道、尿道或脑的成像。可以对任何适合的人或动物受试者进行成像。可以进行成像以用于任何适合的医疗或兽医应用。

[0216] 以上实施方案的特征可以与其他实施方案的特征组合。例如,相位控制可以与拍频结合使用。

[0217] 可以理解的是,以上仅通过举例方式描述了本发明,并且可以在本发明的范围内做出细节的修改。

[0218] 在说明书和(在适当时)权利要求书和附图中公开的每个特征可以独立地或以任何适当组合提供。

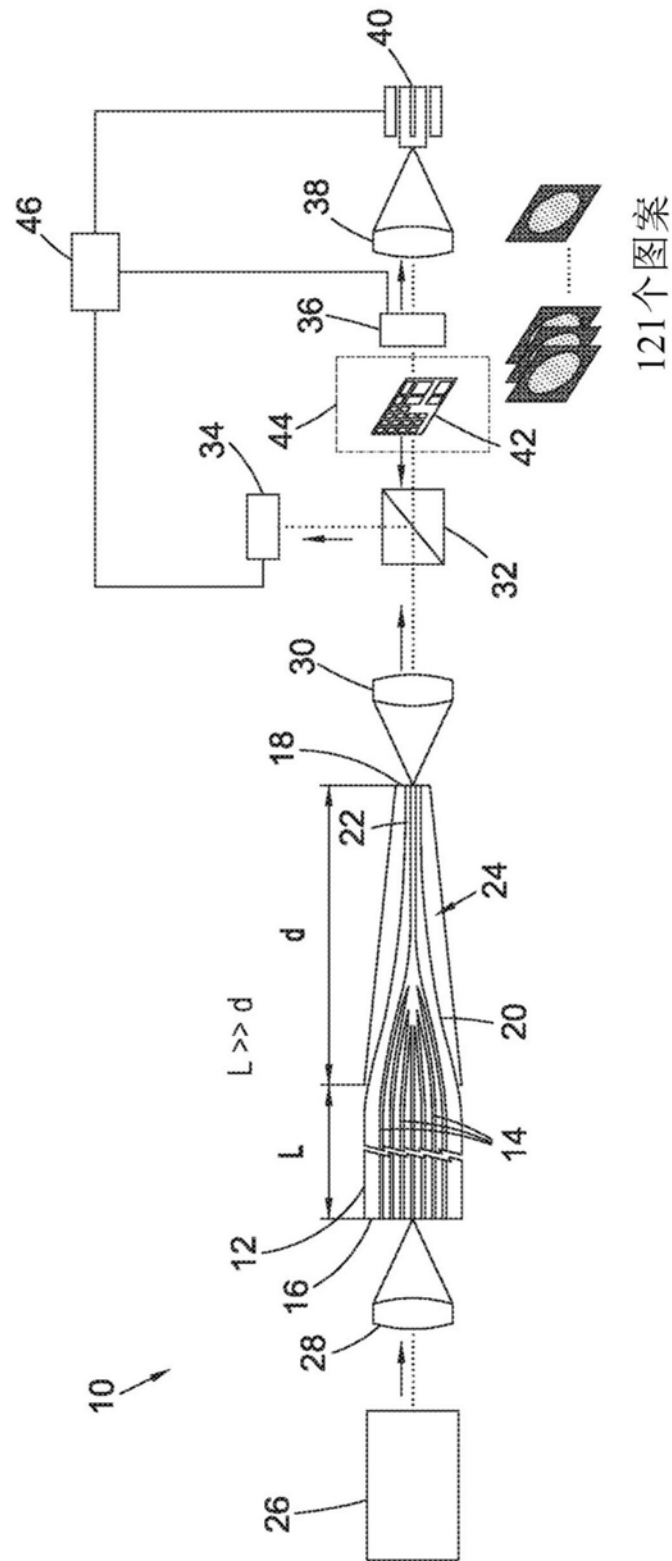


图1

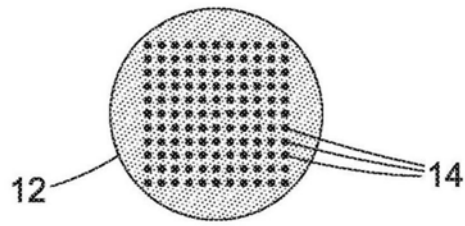


图2a

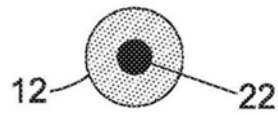


图2b

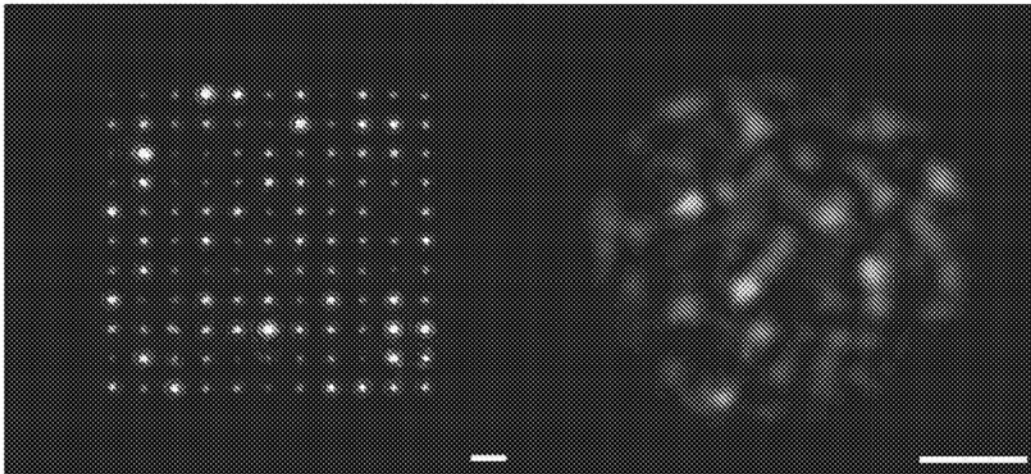


图 3a

图 3b

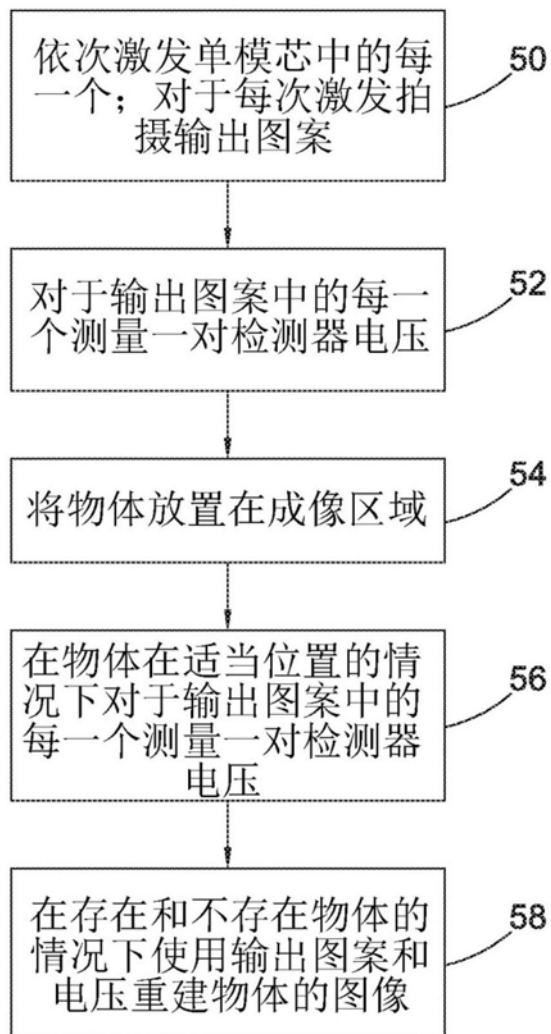


图4

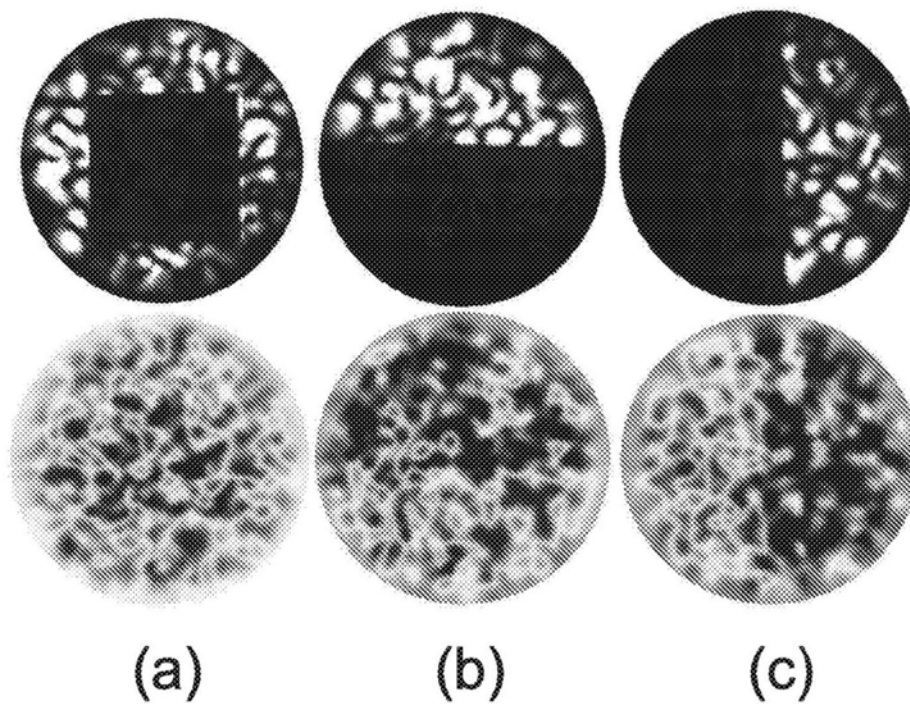


图5

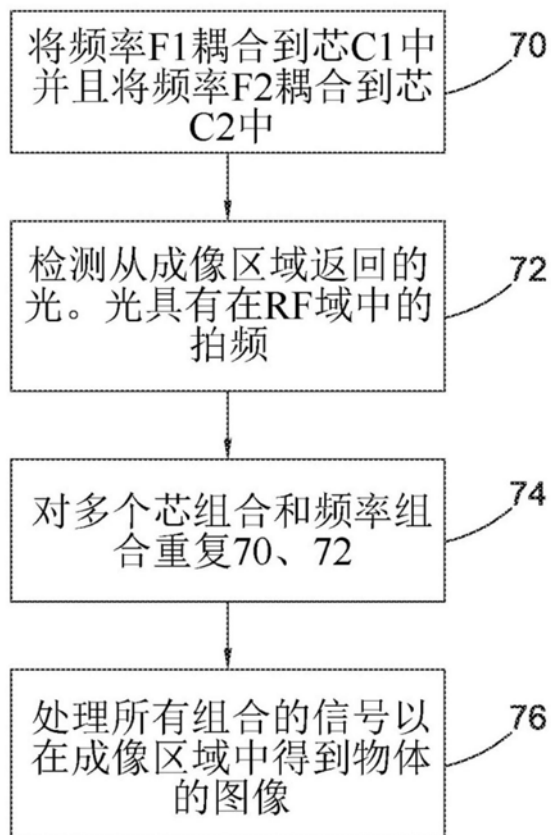


图6

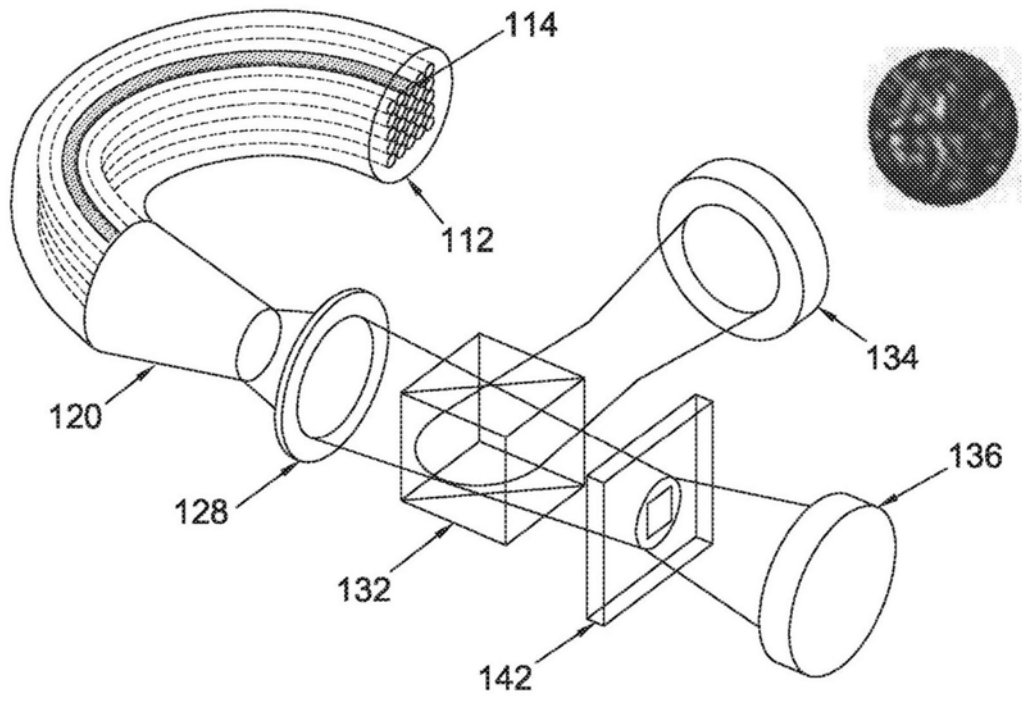


图7

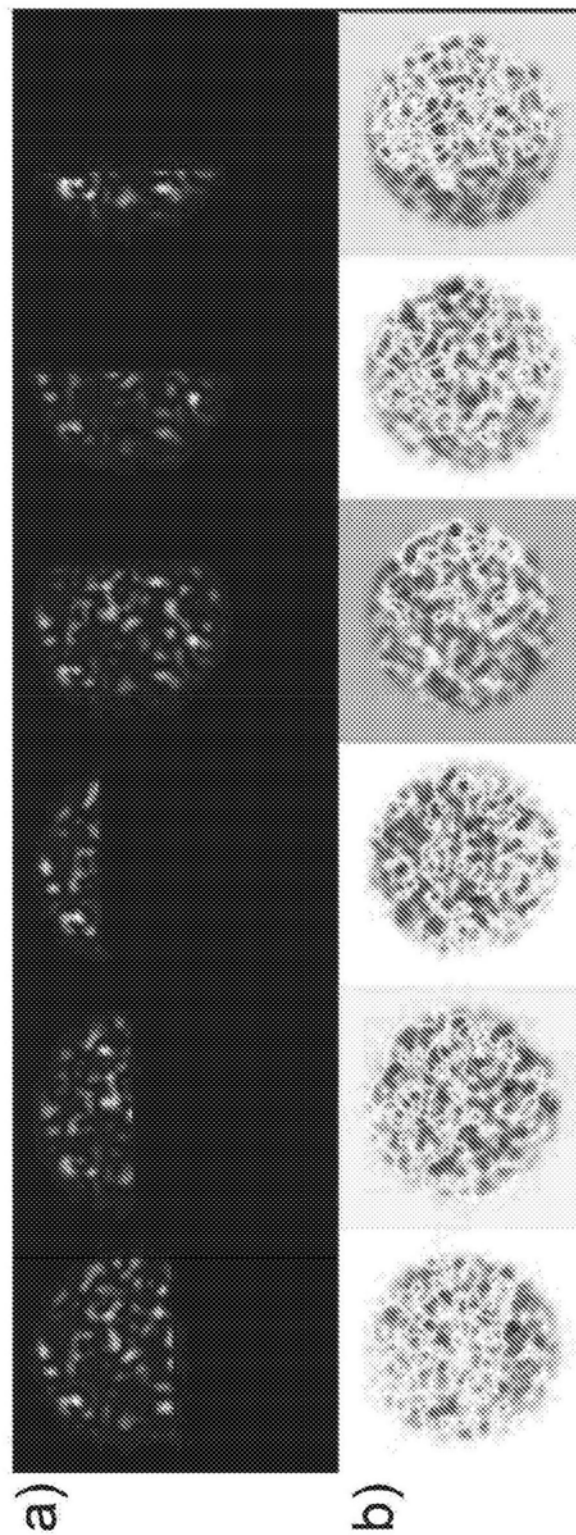


图8

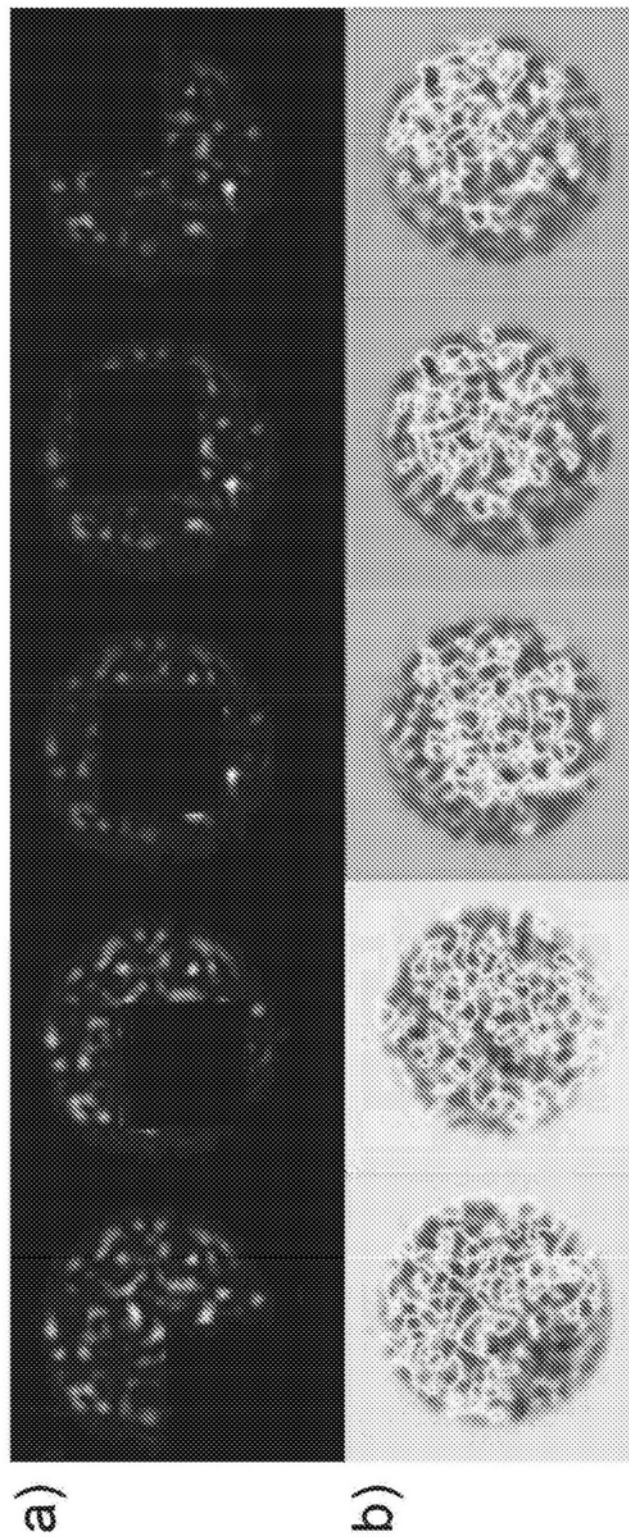


图9

专利名称(译)	光学系统和方法		
公开(公告)号	CN110831478A	公开(公告)日	2020-02-21
申请号	CN201880041799.5	申请日	2018-05-04
[标]申请(专利权)人(译)	爱丁堡大学		
申请(专利权)人(译)	爱丁堡大学董事会		
当前申请(专利权)人(译)	爱丁堡大学董事会		
发明人	罗伯特·R·汤姆森 德巴迪提亚·乔杜里 蒂姆·伯克斯		
IPC分类号	A61B1/00 A61B1/06 G02B6/00		
CPC分类号	A61B1/00009 A61B1/00165 A61B1/0017 A61B1/06 G02B6/02042 G02B6/14 G02B6/2804 G02B6/2808 A61B1/00057 A61B1/00126 A61B1/04 A61B1/063 A61B1/0638 A61B1/07 G02B6/0008 G02B6/024		
代理人(译)	李博		
优先权	2017007239 2017-05-05 GB		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

系统包括波导装置，所述波导装置包括多个输入波导、多模波导和将多个输入波导与多模波导耦合的导波过渡部。系统还包括至少一个光源，所述至少一个光源被配置成依次激发多个输入波导中的每一个或输入波导的多个组合中的每一个，从而在波导装置的输出部依次产生多个不同的光图案。波导装置被配置成将多个不同的光图案中的每一个引导至目标区域。系统还包括至少一个检测器，所述至少一个检测器被配置成检测响应于不同的光图案中的每一个而从目标区域透射、反射或发射的光，并且输出代表所检测的光的信号。

