(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106017683 B
(45)授权公告日 2019.12.24

(21)申请号 201510945676.2

(22)申请日 2015.12.16

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106017683 A

(43)申请公布日 2016.10.12

(30)优先权数据
14/576155 2014.12.18 US
14/944446 2015.11.18 US

(73)专利权人 帕洛阿尔托研究中心公司
地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 A·黑格伊 J·马丁尼
P·齐塞尔 D·K·比格尔森

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001
代理人 李湘 张懿

(51)Int.Cl.
G01J 3/447(2006.01)
G01J 3/28(2006.01)

(56)对比文件
US 4905169 A1,1990.02.27,说明书第5栏第4行至第6栏第27行,图1.
Michael W. Kudenov等.Compact snapshot birefringent imaging Fourier transform spectrometer for remote sensing and endoscopy.《SPIE》.2010,
Michael W. Kudenov等.Compact snapshot birefringent imaging Fourier transform spectrometer for remote sensing and endoscopy.《SPIE》.2010,
Andrew Robert Harvey等.Birefringent Fourier-transform imaging.《OPTICS EXPRESS》.2004,第12卷(第22期),5368-5374.

审查员 丁文

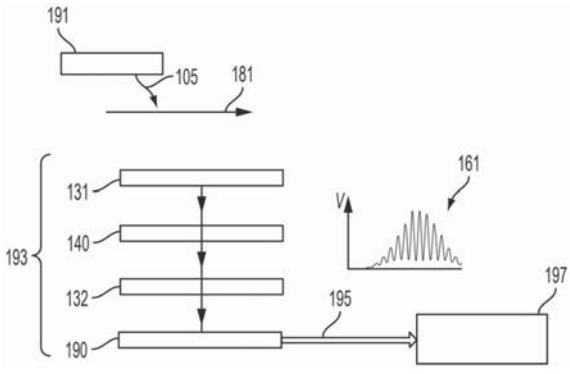
权利要求书2页 说明书15页 附图12页

(54)发明名称

从运动物体获得光谱信息

(57)摘要

一种光学装置包括夹在第一和第二起偏器之间的波片,布置所述波片以接收从相对于光学装置运动的物体或物体图像发射的光。探测器阵列包括一个或多个探测器元件,并经光学耦合以从第二起偏器接收光。探测器阵列的每个探测器元件都提供根据从第二起偏器接收的光强度变化的输出电信号。光强度是物体或物体图像和光学装置的相对运动的函数并包含关于物体物点的光谱信息。



CN 106017683 B

1.一种光学装置,包括:

界定物体轨迹的流动通道;

配置成当所述物体沿所述轨迹相对于所述光学装置运动时接收来自所述物体的光的第一起偏器,所述第一起偏器被布置成使所述光沿第一偏振方向偏振;

经过光学耦合以接收来自所述第一起偏器的光的波片,所述波片具有光学延迟,所述光学延迟作为在所述轨迹方向上的位置的函数而变化,以及所述波片具有与所述第一偏振方向成第一角度的慢轴;以及

经光学耦合以接收来自所述波片的光的第二起偏器,所述第二起偏器被配置成使从所述波片接收的光沿第二偏振方向偏振;以及

包括一个或多个探测器元件的探测器阵列,所述探测器阵列经光学耦合以接收来自所述第二起偏器的光,所述探测器阵列的每个探测器元件被配置成提供输出电信号,所述输出电信号根据从所述第二起偏器接收的光强度而变化,所述光的强度是所述物体沿轨迹的位置和从所述物体发出的光的光谱的函数。

2.根据权利要求1所述的装置,还包括被配置成将来自相对于所述光学装置运动的物体的光成像到所述波片上的至少一个透镜,以及被配置成将来自所述波片的光成像到所述探测器阵列上的透镜。

3.根据权利要求1所述的装置,其中,布置所述探测器阵列和所述波片,使得在每个探测器元件和所述波片的至少一个延迟之间存在固定对应关系。

4.根据权利要求1所述的装置,其中,所述装置包括如下至少一项:

设置于所述物体和所述探测器阵列之间的双折射层,所述双折射层具有基本恒定的厚度和沿所述光学装置的成像轴布置的光轴;

沃拉斯顿棱镜,所述沃拉斯顿棱镜形成所述波片,所述沃拉斯顿棱镜具有第一和第二棱镜半部,所述第一和第二棱镜半部的每个都具有沿楔的最薄部分的第一厚度t1和沿所述楔的最厚部分的第二厚度t2,t1小于t2的75%;以及

沃拉斯顿棱镜,所述沃拉斯顿棱镜形成所述波片,还包括第一层和第二层,所述第一层的双折射相对于所述第一棱镜半部的双折射基本大小相等符号相反,所述第二层的双折射相对于所述第二棱镜半部的双折射基本大小相等符号相反,其中所述第一层和第二层的厚度基本分别等于所述沃拉斯顿棱镜的所述第一棱镜半部和第二棱镜半部的平均厚度。

5.根据权利要求1所述的装置,还包括:

配置成处理所述探测器输出信号并确定关于所述物体的波长信息的处理器电路。

6.根据权利要求5所述的装置,还包括被配置为相对于所述光学装置移动所述物体的移动机构。

7.一种用于光谱成像的方法,包括;

在根据权利要求1所述的光学装置的流动通道内移动物体;以及

对于所述物体的一个或多个物点:

同时探测位置信息;以及

获得针对所述物体的光谱信息,包括:

在所述物体相对于所述波片移动时,从发射的光产生位置相关偏振干涉图;以及

根据从所述物点记录的位置相关偏振干涉图确定对应于给定物点的光谱信息。

8.根据权利要求7所述的方法,其中,确定所述光谱信息包括:将所述位置相关偏振干涉图转换成时变的输出电信号;以及

从所述时变输出电信号确定所述光谱信息。

9.根据权利要求7所述的方法,还包括补偿所述波片的角灵敏度。

从运动物体获得光谱信息

技术领域

[0001] 本公开总体上涉及用于光谱成像的装置、系统和方法。

背景技术

[0002] 光谱成像，包括高光谱成像，可以提供来自物体的一个或多个点的光谱信息。高光谱成像可以组合空间成像及光谱。对于物体的每个坐标位置，高光谱成像器针对大量的，例如超过10个或超过100个光谱带获得光强。高光谱图像中的每个位置于是包含了光在其对应物体位置处的光谱。高光谱图像数据可用于表征具有精确度和细节的物体特征。光谱成像可应用于包括农学、天文学和生物医学成像的很多领域中。

发明内容

[0003] 本文描述的一些实施例涉及一种光学装置，所述光学装置包括布置成接收从沿某轨迹移动的物体发出的光的第一起偏器。第一起偏器使发自物体的光沿第一偏振方向偏振。布置波片以从第一起偏器接收光，波片的光学延迟性作为沿轨迹方向的位置的函数而变化，在与第一偏振方向成第一角度，例如大约45度，具有慢轴。布置第二起偏器以从波片接收光。第二起偏器使从波片接收的光沿第二偏振方向偏振，其中第二偏振方向可以大约平行于或大约垂直于第一偏振方向。布置包括一个或多个探测元件的探测器，以从第二起偏器接收光。响应于从第二起偏器接收的光强度的变化，每个探测元件产生输出电信号。布置所述探测器和所述波片，使得在每个探测器元件和所述波片的至少一个特定延迟之间存在固定对应关系。

[0004] 一些实施例涉及一种包括耦合到光学装置的电输出的光学装置和处理器电路的系统。所述光学装置包括第一起偏器，所述第一起偏器被配置以从相对于光学装置沿轨迹移动的物体或物体图像接收光。第一起偏器使光沿第一偏振方向偏振。对波片进行光学耦合以从第一起偏器接收光。波片的光学延迟作为沿轨迹的位置的函数而变化，波片的慢轴与第一偏振方向成第一角度。对第二起偏器进行光学耦合以从波片接收光。第二起偏器使从波片接收的光沿可以大约平行或大约垂直于第一偏振方向的第二偏振方向偏振。对包括多个探测器元件的探测器阵列进行光学耦合以从第二起偏器接收光。探测器阵列的每个探测器元件都提供根据从第二起偏器接收的光的强度随时间改变的输出电信号。光的强度是物体或物体图像与光学装置的相对运动的函数。处理器电路处理探测器元件的输出电信号，并基于输出电信号确定关于物体的波长信息。

[0005] 一些实施例涉及一种从发光物体获得位置和光谱信息的方法。所述方法包括相对于波片移动物体或物体的图像。对于物体或物体图像的一个或多个点(这里称为物点/物体图像点)，在物体或物体图像相对于波片移动时，从发射光获得位置依从性偏振图的同时，同时探测关于物体的位置信息。从记录自物点/物体图像点的位置依从性偏振干涉图确定对应于给定物点/物体图像点的光谱信息。

附图说明

[0006] 图1A是根据一些实施例的成像系统的方框图；

[0007] 图1B是根据一些实施例，被配置为从物体获得光谱信息的系统的方框图；

[0008] 图2示出了根据一些实施例，探测器输出到频域信号的转换；

[0009] 图3示出了根据一些实施例，包括空间滤波器的光学装置；

[0010] 图4绘示了根据一些实施例，包括偏振分束器和多个探测器的光学装置；

[0011] 图5是流程图，示出了根据一些实施例的方法；

[0012] 图6是包括具有多个探测器的探测器阵列的成像系统的方框图；

[0013] 图7A是包括光谱编码器和导致物体图像跨越光谱编码器移动的光学部件的成像系统的方框图；

[0014] 图7B示出了包括光谱编码器和被配置成导致物体和光谱编码器之间相对移动的移动装置的成像系统的方框图；

[0015] 图8A示出了包括第一和第二半部的沃拉斯顿棱镜；

[0016] 图8B示出了包括粘合到光学各向同性材料基板的第一和第二半部的沃拉斯顿棱镜；

[0017] 图9A示出了包括沿光谱编码器成像轴布置的棱镜半部和双折射材料附加层的沃拉斯顿棱镜；

[0018] 图9B示出了包括具有沿光谱编码器成像轴布置的双折射材料附加层的棱镜半部的沃拉斯顿棱镜；

[0019] 图10A到10C是由第一和第二膜制成的波片的视图，其中每个膜都具有双折射梯度；

[0020] 图10D示出了包括插入于起偏器之间的图10A到10C所示波片的光谱编码器；以及

[0021] 图11示出了具有以某一角度倾斜以补偿沃拉斯顿棱镜条纹局部化的探测器的光谱编码器。

[0022] 附图未必成比例。附图中使用的类似附图标记是指类似部件。不过，将要理解，使用附图标记指代给定图中的部件并不意在限制另一幅图中以相同附图标记标记的部件。

具体实施方式

[0023] 本文描述的实施例涉及用于对从微观到宏观物体的尺寸范围的的物体进行光谱成像的装置、系统和方法。例如，一些实施例涉及针对小物体，例如，活细胞或其他小颗粒获得光谱信息。其他实施例涉及对更大物体进行光谱成像，更大物体例如是地球或地外的地理特征。本文论述的方法涉及一种光学装置(也称为光谱编码器)，所述光学装置被配置成，在一个或多个物体相对于光谱编码器运动的同时，从物体(或从多个物体)获得光谱信息。本文论述的一些方法涉及一种光谱编码器，所述光谱编码器被配置成获得相对于光谱编码器运动的物体或物体的图像的单个或多个空间维度的光谱图像。可以利用物体或物体图像和光学装置之间的相对运动，在高光谱分辨率下获得光谱信息，而不减小光通量或光谱带宽，以产生取决于位置的偏振，如下文更详细所述。

[0024] 在如下所述的实施例中，光谱编码器将来自发自物体或物体图像的光的光信号转换成电信号，其中电信号在电信号中对来自物体或物体图像的超过一个点的光谱信息进行

编码。在一些实施例中，物体本身可以相对于光谱编码器移动。在一些实施例中，物体的图像可以相对于光谱编码器移动。例如，物体自身可以相对于光谱编码器是不动的，而可移动镜片被移动，导致物体图像相对于光谱编码器移动。在一些实施例中，可移动的镜片可以包括可移动镜片的一维或二维阵列。光谱编码器产生的电信号可以由本文称为处理器的电路处理，以提取光谱信息。光谱信息的提取可能涉及，例如，通过在一个或多个预定感兴趣频率处执行电信号的完整傅里叶变换或电信号的部分傅里叶变换，将对应于物点/物体图像点的电信号从时域变换到频域。

[0025] 图1A示出了包括光学装置193(光谱编码器)的系统，所述光学装置被配置成提供电信号195，电信号195包括关于物体191的光谱信息。通常，物体191的尺寸可以从微观或宏观范围。微观物体可以被光谱编码器成像为单个物点/物体图像点。宏观物体可以被成像为多个物点/物体图像点。物体191自身或物体的图像相对于光谱编码器193移动。箭头181指出了物体191和光谱编码器193之间的相对运动。光105从物体191发出。例如，发出的光105可以是或包括散射光、反射光、荧光、磷光、化学发光、生物发光等等。由光谱编码器193接收(直接或例如，由可移动镜片重新指向之后)从物体191发出的至少一些光105。

[0026] 发出的光105通过第一起偏器131，第一起偏器131使光沿第一偏振方向偏振。已经沿第一偏振方向偏振的光被波片140接收，波片140例如是夹在第一起偏器131和第二起偏器132之间的多(高)阶波片。波片140的光学延迟性作为沿物体或物体图像191(本文统称为“物体/物体对象”)和光谱编码器193之间相对运动方向181的位置的函数而变化。在一些配置中，延迟性作为沿物体/物体图像191和光谱编码器193之间相对运动181轨迹的位置的函数而单调或线性变化。

[0027] 图1A中所示的第二起偏器132代表一个或多个第二起偏器。例如，可以在平行或垂直取向中布置第一和第二起偏器131、132的偏振轴。在一些实施方式中，第一和第二起偏器131、132是交叉起偏器，第一起偏器131具有从第二起偏器132的偏振轴大约成90度的偏振轴。波片140的慢轴，相对于第一和第二起偏器131、132的偏振轴，形成第一角度，例如，大约45度。

[0028] 物体/物体图像191相对于波片140的取决于位置的光学延迟性的移动针对物体上的每个点并针对从物点/物体图像点发出的光的每个波长生成偏振的时间依从性变化。光的变化偏振被第二起偏器转换成光的变化强度，对于给定物体/物体图像位置的所有波长处的强度加在一起形成时间依从性干涉图。在一些实施例中，探测器190可以为单个探测元件，所述探测元件被配置成探测从物体/物体图像的单个点发出的光。在一些实施例中，探测器190可以包括多个探测器元件，它们被配置成探测从跨过物体/物体图像的多个物点/物体图像点发出的光。例如，多元件探测器的多个探测元件可以布置成一维或二维探测器阵列。

[0029] 探测器190的位置相对于波片140固定，使得在探测器190的每个探测元件和波片140的一个或多个特定延迟之间具有固定的对应关系。探测器190的每个探测元件都从第二起偏器接收光，并在探测器190的输出195处将光的时变强度变换成时变的输出电信号，例如，时变电压。探测器190的每个探测元件探测到的光强度是物体/物体图像191的点和光学装置193之间相对位置的函数。对于发自物体/物体图像191的窄频带光，光强度的时间变化可能是振荡的，振荡周期取决于窄频带光的中心波长。在这里，振荡表示在光强度中清晰可

见多个振荡N，窄频带光表示光的中心波长除以光谱带宽大约为N或更大。曲线图161示出了与相对于光学装置193沿轨迹181移动，同时在窄频带波长中发光的物体/物体图像的点相关联的，探测器190的一个探测元件的时变输出信号的范例。输出信号195包括关于从物体/物体图像191的每个物点发出的光的光谱的信息。可以由电子线路，例如，处理器197分析输出信号195以提取从物体/物体图像191的每个点发出的光的光谱。

[0030] 可以编程处理器197以利用探测元件和波片位置延迟性之间的预定对应关系，确定来自物体/物体图像每个点的光的光谱。在包括具有多个元件的探测器的实施例中，在探测元件和与特定延迟相关联的波片140上的点之间可能有一一对应关系，例如，如果将成像光学系统置于波片140和探测器190之间。在一些实施例中，探测元件之一对应于波片上的多个延迟(多个位置)。

[0031] 在一些实施例中，可以由波片和探测器阵列的固定位置设置波片的延迟性和探测元件之间的对应关系。在一些实施例中，可以沿光谱编码器的主要光轴在任何位置设置微镜阵列，以提供与从固定位置获得的对应关系不同的探测元件和波片延迟性之间的对应关系。例如，在一个实施例中，首先由第一成像光学部件将发自物点/物体图像点的光成像到波片上，由包括微镜阵列的第二成像光学部件将来自波片的光成像到多元件探测器上，从而由微镜阵列建立探测元件和波片延迟性之间的对应关系。

[0032] 有若干种用于本文所述光谱编码器的应用。特别让人感兴趣的是在流式细胞计量术中使用光谱编码器。图1B到5示出了在诸如流式血细胞计数器的应用中部署的光谱编码器，其中，光谱编码器被配置成观测相对于光谱编码器沿轨迹移动的小或微观物体。这些方法可以采用单元件探测器(也称为单像素探测器)将物体观测为单个物点/物体图像点，或者可以采用多像素探测器，在这种情况下，可以观测到多个小的或微观颗粒。在使用多元件探测器(也称为多像素探测器)的流动血细胞计数器中，光谱编码器可以被配置成解析例如流动血细胞计数器的流动通道中的小型交叠颗粒。结合图1B到5描述的技术适用于采用单像素或多像素探测器的光谱编码器。多像素光谱编码器可以被配置成从宏观物体获得光谱信息，其中物体被光谱编码器观测成多个物点/物体图像点。

[0033] 图1B示出了包括光学装置103(这里也称为光谱编码器)的系统，光学装置103被配置成提供电信号，电信号包括关于运动物体特性的信息。图1B示出了沿流动路径110在轨迹111中移动的一个或多个运动物体101。在一些实施方式中，流动路径可以设置于形成流动通道113的通道壁112之间，流动通道113的通道壁112将物体的运动约束到轨迹111。尽管在图1B中未示出，但在一些实施例中，流体运动装置，例如，包括一个或多个泵和/或一个或多个阀，可以耦合到通道壁112之间流动通道中的流体，其中流体运动装置被配置成导致物体101沿轨迹111移动。光105从每一物体101发出。任选地，光学装置103可以包括配置成提供与物体101相互作用的输入光的光源102。响应于输入光，物体发出光。例如，发出的光105可以是或包括散射光、反射光、荧光、磷光、化学发光、生物发光等等。

[0034] 在包括流动通道壁的实施例中，壁中的至少一个可以对于输入光光学透明，壁中的至少一个可以对于发出的光105光学透明。光学装置103包括一个或多个第一起偏器，在本范例中由起偏器131代表。配置第一起偏器131以接收从物体101发出的光105。任选地，可以在物体和第一起偏器131之间布置透镜120，使得透镜120例如在波片140的表面之间一半距离处聚焦发射光105。或者，物体的轨迹111可以使物体101充分接近波片140，从而不需要

透镜。在包括透镜的实施例中，可以配置透镜以在色彩上被校正，使得所有频率的光基本都聚焦在波片140表面之间的一半处。

[0035] 发出的光105通过第一起偏器131，第一起偏器131使光沿第一偏振方向偏振。已经沿第一偏振方向偏振的光被波片140接收，波片140例如是夹在第一起偏器131和第二起偏器132之间的多(高)阶波片。波片140的光学延迟性作为沿物体101的轨迹方向111的位置的函数而变化。在一些配置中，延迟性作为沿物体101的轨迹方向111的位置的函数而单调或线性变化。在一些配置中，波片可以是沃拉斯顿棱镜或其他光学延迟装置，其定位成，使得在物体大致位于探测器视场中心时，在光通过波片传播之后，光的两种偏振之间的光学延迟大约为零。这样确保了记录的干涉图基本以其零阶条纹为中心。

[0036] 图1B中所示的第二起偏器132代表一个或多个第二起偏器。可以在平行或垂直取向中布置第一和第二起偏器131、132的偏振轴。在一些实施方式中，第一和第二起偏器131、132是交叉起偏器，第一起偏器131具有从第二起偏器132的偏振轴成大约90度的偏振轴。波片140的慢轴相对于第一和第二起偏器131、132的偏振轴，形成第一角度，例如，大约45度。

[0037] 物体相对于波片140取决于位置的光学延迟的移动生成了所发出光偏振的时间依从性变化，所述变化取决于光的光谱。光的变化偏振被第二起偏器132转换成变化的强度。探测器150，例如单像素探测器，在探测器的输出151处将光的时变强度转换成时变输出电信号，例如，时变电压。对于窄频带光而言，光强度的时间变化可能是振荡的，振荡周期取决于频带的中心波长。曲线图160示出了与沿轨迹111移动，同时在窄波长带中发射光的一个物体相关联的探测器的时变输出信号的范例。输出信号包括关于物体101的信息，诸如从物体发出的光的光谱。

[0038] 任选地，光学装置103包括一个或多个光学滤波器145。例如，在各实施例中，可以在物体101和探测器150之间的光路中的任何地方布置光学滤光器，例如，如图1B所示的第二起偏器132和探测器150之间。光学滤波器145能够用于将入射在探测器150上的光的带宽限制到感兴趣的带宽范围，这样简化了信号处理。在一些情况下，限制探测器接收的光带宽允许从物体运动产生的光学干涉图完全恢复光谱信息，即使在低于尼奎斯特极限下对干涉图产生的电信号进行采样也如此(对于最短的探测波长，每个干涉条纹两个样本)。

[0039] 图1B中所示的系统包括处理器180，耦合所述处理器以从探测器150接收输出电信号。处理器180包括诸如执行编程指令的计算处理器的电路，被配置成处理输出信号以提取关于物体101的光谱信息。注意，物体或其图像的尺寸相对于波片140的延迟的位置变化可以很小，使得在由探测器150的单个像素或元件探测时，由物体/物体图像的每个点产生的光干涉条纹基本是同相的。例如，如果在物体/物体图像横越延迟作为沿轨迹方向111的位置的函数而线性增大的波片时要记录N个干涉条纹，物体/物体图像101沿轨迹方向111的尺寸可以大约为波片140沿轨迹方向111的长度的1/2N，或更小，以解析干涉条纹。

[0040] 可以通过例如傅里叶变换或其他时间到频域变换来处理探测器的输出，以确定从物体发出的光的光谱。如图2所示，变换的输出信号170可以包括低频成分170a和高频成分170b。低频成分170a与信号160的包络相关联，高频成分170b对应于所发出光的光谱。

[0041] 在一个范例中，波片是具有楔角α的沃拉斯顿棱镜，其中楔角被定义为棱镜上与光谱编码器的主要光轴正交的前面和棱镜的两半部胶合在一起的内面之间的角度。棱镜的慢轴可以相对于起偏器的偏振轴取向在大约45度。棱镜的楔方向被定义为在平行于棱镜前面

的平面中，棱镜的两半部的厚度折中最快所沿的方向。优选将棱镜的楔方向与物体的轨迹对准，并将慢轴对准在楔方向成45度处。如果在波长λ处期望的光谱分辨率为λ/N，那么在物体横越视场时，必须要记录N个条纹。如果物体或物体图像的行进距离沿具有双折射Δn的沃拉斯顿棱镜的楔方向为L，那么沃拉斯顿棱镜的楔角应当是α≈nλ/2LΔn。最大光谱带宽受到探测器信号采样率的限制，采样率必须足够快以记录观测到的条纹。光谱带宽还受到物体尺寸的限制。如果物体直径为d，那么探测器可以记录的最大条纹数量大约为L/2d，因此最小可探测波长为λ≈4αdΔn。

[0042] 根据本文所述的方法，使用物体的运动对至少一个单像素探测器的时变信号中的光谱信息编码。利用这些方法，可以使用具有单一输出的一个单像素探测器获得发出光的光谱，不存在如像常规光谱技术中发生的那样，随着光谱分辨率提高，光通量明显损失。在一些实施方式中，组合两个或更多单像素探测器的输出以提高组合信号的信噪比。

[0043] 图3示出了在其些方面中类似于图1B的光学装置103的光学装置305。光学装置305包括夹在第一和第二起偏器131、132之间的波片140。沿轨迹111行进的运动物体101发出的光105通过第一起偏器131，第一起偏器使光沿第一偏振方向偏振。第一起偏器起偏的光被光学延迟作为沿轨迹方向111位置的函数而变化的波片140接收。

[0044] 在每个波长处，波片140引入的发射光中两种偏振之间的光学延迟生成了取决于波长的变化偏振。光的变化偏振被第二起偏器132转换成变化的光强。来自第二起偏器的光落到探测器150上。在一些配置中，光被可选的光学滤波器145滤波，该光学滤波器145布置于第二起偏器132和探测器150之间的光路中。

[0045] 光学装置305还包括空间掩模320，空间掩模320包括一定数量，例如3、4、5或更多个对发出的光透明的掩模特征，与3、4、5或更多个光学不透明掩模特征交替。从物体发出的光105的一部分可以被成像在空间掩模320上。空间掩模320与物体101发出的光105交互作用，这种交互生成了入射在探测器150上的时变光。要认识到，物体101沿轨迹移动可以在探测器150的输出152处提供时间复用信号。探测器150的输出152处的时间复用信号包括对应于来自第二起偏器132的变化光强的第一时间复用部分，以及对应于发射光105和空间掩模320之间交互导致的时变光的第二时间复用部分。要认识到，可以任选地布置光学装置305，使得输出信号152的第一部分对应于来自空间掩模320的时变光，第二部分对应于第二起偏器132输出处的变化强度。可以处理对来自第二起偏器的强度变化光做出响应的信号的第一时间部分，以提取关于物体的第一信息，例如，从物体发出的光的光谱。可以处理对发射光与空间掩模的交互导致的时变光做出响应的信号的第二部分，以提取关于物体的第二信息，例如物体的速度和/或尺寸。第二信息可以用于向第一信息施加校正，例如，使用物体的速度信息校准光谱的波长标度。

[0046] 根据一些实施方式，可以分析输出信号而不将信号152时间解复用成第一和第二部分。在已知物体101发出的光105的光学带宽不超过特定范围，从而在探测器处探测的干涉图条纹也位于特定带宽之内时，可能发生这种情形。如果是这种情况，那么可以向空间掩模上对发出光的一部分成像，可以与波片相邻放置空间掩模，如图所示，例如，发出光的一半落在空间掩模上，而同时发出光的另一半如图所示落在第一起偏器上。空间掩模导致的强度变化落在起偏器/波片/起偏器结构产生的干涉图条纹的频率范围之外。于是，可以向同一探测器150上组合落在起偏器/波片/起偏器结构上的光和落在空间掩模上的光。可以

在软件中分离输出信号152中对起偏器/波片/起偏器结构做出响应的输出电信号成分以及对空间掩模调制的光做出响应的信号分量。这种分离是可能的，因为来自起偏器/波片/起偏器结构的光落在基本与来自空间掩模的空间调制光基本正交的频率范围中。

[0047] 在一些实施例中，可以可选地由偏振分束器替代第一和第二起偏器的每个。在一些实施例中，可以使用两个(或更多)单像素探测器探测具有不同偏振的光。图4示出了一种光学装置405，所述光学装置包括偏振分束器406，取代了图3中所示的第二起偏器。第一起偏器131使发自物体101的光105沿第一偏振方向偏振。偏振分束器406将来自波片140的光分成沿第二偏振方向偏振的光411和沿第三偏振方向偏振的光412。例如，可以选择偏振分束器406的偏振轴之一以平行于第一起偏器131的偏振方向。布置探测器150以探测沿这个第二方向偏振的光411。布置探测器420以探测沿第三偏振方向偏振的光412，第三偏振方向垂直于第二偏振方向。可以分别在偏振分束器406和探测器150之间的光路中和/或在偏振分束器406和探测器420之间的光路中设置可选部件145、410。在一些实施例中，可选部件145、410包括对光411和412进行光学滤波的光学滤波器。在一些实施例中，部件145和/或部件410可以是或包括空间掩模。部件145、410可以额外包括将物体或物体图像发出的光向空间滤波器上成像的光学系统。探测器150、420的输出153、421都被耦合到处理器400。处理器400可以被配置成分析输出以提高光学装置的光学处理量和信噪比。

[0048] 在部件145和/或410包括空间掩模的实施例中，处理器400能够基于空间掩模导致的电信号的时间变化，提取关于物体的额外信息，例如物体速度和/或尺寸。发射光与空间掩模的交互作用在探测器150、420的输出电信号153、421中产生频率分量，可以将其与偏振中的时间依从性变化导致的变化光强带来的频率分量区分开。

[0049] 图5是操作本文所述的光探测器和处理器的方法的流程图。光发源510自一个或多个沿轨迹移动的物体。使发射的光沿第一偏振方向偏振520。由具有沿物体轨迹可变的延迟性的波片生成530光的变化偏振。将变化的偏振变换540成时变的光强。响应于时变的光强产生550时变电信号。时变电信号包括关于物体一个或多个特性的信息。例如，可以在物体发出的光的荧光光谱中编码信息。分析560时变电信号以提取关于物体发射的光的光谱的信息。

[0050] 在一些实施方式中，例如在流式细胞计量术中，能够在较宽光学带宽范围内，在各个通道中探测光的能力是有用的。传统上，这是利用光学带通滤波器以定义由硬件固定的各个荧光通道来实现的。另一种技术使用棱镜对光进行散射，使用光电倍增管阵列探测散射光。其他技术依赖于利用被线性可变滤波器解析成通道的发射光的空间调制，沿滤波器的每个位置发射不同的光波段。这些技术的障碍包括由于硬件限制、昂贵的探测器阵列和/或损失光谱分辨率和/或光处理量导致的不灵活性。可以采用本文描述的方法缓解这些因素。

[0051] 本文描述的方法实现了以高光谱分辨率探测发自一个或多个运动物体的光。这些方法与具有少到一个像素且在光学处理量和光谱分辨率之间没有折中的探测器一起工作，所述折中会影响光谱的常规形式。这些方法涉及使用物体的运动产生干涉图，以及利用具有少到一个像素的探测器将干涉图转换成电信号。在一些实施方式中，仅使用一个探测器，在一些情况下，使用多像素探测器。例如，在电信号的频域中，在电信号中编码发出光的光谱信息。如果在频域中编码，可以利用诸如傅里叶变换的时域到频域变换，从探测器的输出

信号提取光谱信息。像在其他形式的傅里叶光谱学中那样，同时记录所有波长的光，从而在光谱分辨率和光学处理量之间没有折中。

[0052] 在各实施例中，例如，图1B-5中所示和所述的光学装置和/或处理器可以实现于流动血细胞计数器中，可以配置这种流动血细胞计数器以分析物体和/或结合到样本中存在的物体的被分析物。在这些实施例中，处理器可以具有利用一个或多个处理通道处理电信号的能力，其中每个处理通道对应于流动血细胞计数器的特定荧光通道。处理通道可以是电气硬件通道和/或可以是可重配置软件通道。例如，在一些实施方式中，对从在流动血细胞计数器的流动通道中运动的物体发出的光进行探测，转换成电信号，并采样和存储。可以通过使电信号通过一个或多个模拟和/或数字电子滤波器来从每个处理通道提取信息。例如，每个处理通道可以对应于电信号的频谱切片(频率范围)。在一些实施方式中，可以编程处理器以基于电信号的预期和/或观测光谱成分，自动确定要使用的处理通道，例如，对于光信号最优的通道编号和/或频率范围。在一些实施例中，处理器可以为通道滤波器确定最优滤波器系数和/或配置。可以在操作流动血细胞计数器之前和/或期间，例如，人工或自动地修改通道滤波器。

[0053] 在一些实施例中，可以配置处理器以利用群集算法确定最优数量的处理通道和/或处理通道的最优频率范围。根据一些实施方式，为了确定最优通道，处理器分析电信号并识别基于光谱信息分成群集的不同物体群体的组。然后使用这些分群的组确定处理器通道的最优数量和/或频率范围。在一些实施方式中，可以在操作期间人工或自动修改电子滤波器。在一些实施方式中，处理器通道可以由其他处理器通道的组合构成。

[0054] 如前所述，在一些实施方式中，可以使用超过一个探测器，其中每个探测器探测发射光的不同偏振。可以存储、组合和/或使用来自每个探测器的电信号和/或这些信号的时域到频域变换，以分析从一个或多个物体发射的光的光谱。例如，如果同一探测器探测到正交偏振的光信号，相反偏振的光信号往往会相互抵消，因为在一种偏振测量的干涉图与在正交偏振测量的干涉图具有相反相位。利用两个探测器，可以在组合之前处理来自每个探测器的信号，使得信号同相，从而是相加而非相消的。例如，可以在组合之前，反转来自探测器之一的时变信号的相位，或者可以将来自两个探测器的信号都从时域变换到频域。两个信号组合能够相对于单个信号提高光学装置的光学处理量，对应地，增大了组合信号的信噪比。在一些情形下，使用偏振分束器替代第一和第二起偏器的每一个。在这些情形下，在第一偏振分束器之后必须要放置两个波片或沃拉斯顿棱镜，因此对于离开第一偏振分束器的每种偏振都有一个波片。应当对每个波片或沃拉斯顿棱镜进行取向，使得慢轴相对于分束器的偏振轴大约成45度。波片或沃拉斯特棱镜的楔轴，即，与光学延迟性变化所沿的波片或沃拉斯特棱镜的厚度方向相交的方向，应当大致与物体轨迹平行。然后在每个波片之后放置偏振分束器和一对探测器，偏振方向平行于第一偏振分束器的偏振方向之一。于是，总共有三个偏振分束器和四个探测器，每个探测器被布置成探测由第二或第三偏振分束器产生的两个偏振光束之一。通过探测光的所有偏振组合，这种具有四个探测器的配置的光学处理量是单像素探测器配置的四倍。在一些实施例中，向一个探测器上组合一种相位的两个干涉图，在另一个探测器上组合相反相位的两个干涉图，因此总共仅需要两个探测器。

[0055] 在一些实施例中，处理器可以首先基于电信号的特性探测并触发流动路径中物体的存在，所述电信号的特性例如是，电信号的幅度是否在阈值以上。可以选择信号的被触发

部分，可能包括触发前和触发后的样本，进一步进行处理，例如变换到频域。在电信号的频率分量中编码与每个被探测物体相关联的光谱信息。在与不同类型的物体发出的光的光谱相关联的频率分量不同时，处理器能够基于电信号的变换区分不同类型的物体。

[0056] 在一些实施例中，分析可以仅包括变换电信号的特定频率范围或部分，而不是在宽的频率范围内进行完整变换。在这些实施例中，可以将光学滤波器放在探测器前方，或者处理器可以使用软件和/或硬件数字和/或模拟滤波器，以在进行时域到频域变换之前消除或减少信号中不是感兴趣的频率分量。或者，处理器可以使用软件和/或硬件数字和/或模拟滤波器作为直接挑选电信号中的感兴趣频率分量的手段，在一些情况下避免了进一步变换。

[0057] 本文描述的方法允许灵活处理电信号的整个频率范围或仅处理电信号中对应于感兴趣颜色(光谱范围)的指定频率范围部分(频率切片)，而无需处理其他不感兴趣的频率范围。在一些实施例中，该处理利用了自适应滤波器，所述自适应滤波器的参数可以基于来自用户的一些输入由处理器自动调节和/或半自动调节。例如，在一种情形下，处理器可以判断电信号中存在哪些频率分量，并确定所使用的滤波器数量和频率范围。在另一种情形下，用户可以输入与电信号的预期频率范围(或感兴趣频率范围)相关的信息，处理器一开始可以使用那些频率范围以设置滤波器，并可以自动进行调节。

[0058] 处理器可以利用群集算法确定电信号中对应于感兴趣光谱的频率范围以对物体群的频率或频率范围分组，并基于这些频率范围的变化确定样本中存在的物体类型之间的高保真度分离。在一些实施例中，群集算法可以是或包括电信号的主成分分析。例如，考虑群集算法识别M个对应于M个光谱和电信号的M个主分量的M个不同物体类型。处理器然后能够通过在时域中进行M个主分量的每个与电信号的点积，来探测具有那些M个感兴趣光谱的任一个的物体类型。点积的结果包括细分的M维空间中的矢量，由此在该空间的一个区域中存在所述矢量可以表示已经探测到特定类型的物体。在利用这种技术时，电信号的傅里叶变换可能不是必需的。

[0059] 在一些实施例中，处理器能够校正由于波片和/或光学装置的其他光学部件的物理性质导致的误差。例如，考虑条纹的数量取决于波长和双折射Δn。不过，由于光色散的原因，双折射也取决于波长，于是需要校正因子以将电信号的频率准确相关到物体的光谱。否则，在电信号的一个频率处的校准(傅里叶分量)不会适用于其他频率/傅里叶分量。例如，可以使用已知的双折射对波长依从性，在处理器中确定并应用这一校正因子。

[0060] 通常，波片上入射的来自物体/物体图像点的光将被基本准直。不过，也可能需要软件校正来抵消作为发自物体/物体图像点的主光线角度函数的光学延迟性中的差异。角度改变是由物体或其图像横向跨越波片表面移动时移动物体的位置中的变化所导致的。

[0061] 图6示出了一种系统，所述系统包括可用于对诸如地理景色的宏观物体光谱成像的光谱编码器603。光谱编码器还可以用于对多个小型或微观物体，例如，多个通过血细胞计数器流动通道移动的颗粒，进行光谱成像。

[0062] 图6示出了相对于光谱编码器603移动的宏观物体或物体图像，例如，地理景色601。可以将宏观物体/物体图像601分成多个区域601a，这里称为物点/物体图像点。物体/物体图像601和波片640之间的相对移动产生了每个物点/物体图像点601a和波片上光学延迟之间的时间依从关系。从每个物点/物体图像点601a发出光605，例如反射光、荧光、磷光、

化学发光、生物发光等。光学装置603包括至少一个第一起偏器，在本范例中由第一起偏器631代表。第一起偏器631被配置成接收从物体/物体图像601发射的光605。任选地，可以在物体/物体图像601和第一起偏器631之间或第一起偏器和波片之间布置透镜611或其他光学部件，使得透镜611将发射的光605聚焦到波片640上，例如，波片640的表面640a-1、640b-1之间的中点，如虚线605a和605b所示。在包括透镜的实施例中，透镜可以配置成在色彩上校正，使得所有频率的光基本都聚焦在波片表面之间的一半。在一些实施方式中，透镜可以是远心物镜。

[0063] 光学设置(例如，调节这第一透镜611的焦点)可能涉及确保对于物体/物体图像沿物体/物体图像和光谱编码器之间相对运动路径的每个位置，对应于给定物点/物体图像点601a的光线全部成像在波片640的同一位置，从而看到相同延迟，否则干涉图可能会失去对比度。在这种情况下，“相同位置”表示，对于给定波长，横贯被认为对应于“相同位置”的位置区域的光线的相变相差不超过大约π/2弧度。

[0064] 在一些实施例中，例如，可以在透镜611或透镜612的位置中使用编码掩模。处理器通过向探测器阵列获得的信号变换中并入关于编码掩模的编码图案的知识，以计算方式重建物体的光谱图像，包括频谱和位置信息两者。

[0065] 发出的光605通过第一起偏器631，第一起偏器631使光沿第一偏振方向偏振。已经沿第一偏振方向偏振的光被波片640接收，波片640例如是夹在第一起偏器631和第二起偏器632之间的多阶波片。波片640的光学延迟作为沿物体/物体图像601和光谱编码器603之间相对运动轨迹的位置的函数而变化。在一些配置中，波片640的延迟作为沿相对运动轨迹位置的函数而单调或线性变化。图6中所示的第二起偏器632代表一个或多个第二起偏器。可以将第一和第二起偏器631、632的偏振轴布置成彼此相对平行或垂直的取向。在一些实施方式中，第一和第二起偏器631、632是交叉起偏器，第一起偏器631的偏振轴与第二起偏器632的偏振轴大约成90度。在一些实施例中，波片640的慢轴相对于第一和第二起偏器631、632的偏振轴形成第一角度，例如，大约45度的角度。

[0066] 如图6中所示，波片640可以包括具有第一半部640a和第二半部640b的沃拉斯顿棱镜，第一半部640a具有第一光轴或慢轴，第二半部具有第二光轴或慢轴，其中沃拉斯顿棱镜的第一和第二光轴相互正交并平行于沃拉斯顿棱镜的进出面。诸如沃拉斯顿棱镜半部的单轴双折射层的光轴或慢轴是不论其偏振如何，光都以相同速度行进的轴。在光沿着除光轴之外的方向通过单轴双折射层行进时，光被折射成两个光线，每个都以彼此成直角取向的振动方向偏振，并以不同速度行进。例如，在一些实施例中，可以将沃拉斯顿棱镜第一半部640a的光轴取向成平行于棱镜半部640a的楔方向，可以将沃拉斯顿棱镜的第二半部640b的光轴取向成垂直于第一半部640a的光轴。在一些实施例中，第一和第二起偏器的偏振方向可以相互正交，且第一起偏器的偏振方向相对于沃拉斯顿棱镜的第一半部640a的光轴以45度角取向，第二起偏器的偏振方向相对于沃拉斯顿棱镜的第一半部640a的光轴以135度的角度取向，如图6中所示。在一些实施例中，沃拉斯顿棱镜的光轴可以相对于棱镜的楔方向成±45°设置。

[0067] 物体/物体图像的每个物点/物体图像点601a相对于波片640的位置依从性光学延迟的移动生成从物点/物体图像点发出的光的偏振的时间依从性变化。偏振的时间依从性变化取决于所发射光的光谱。由第二起偏器632将变化的偏振转换成变化的强度。探测器

650，例如空间解析或包括多个探测器元件650a的成像探测器，将来自每个物点/物体图像点601a的光的时变强度在探测器650的输出651处转换成随位置和时间变化的输出电信号，例如，随位置和时间变化的电压。本文描述的光谱编码器被配置成同时获得针对多个物点/物体图像点的光谱和空间信息。相对于波片扫描物体/物体图像产生针对每个物点/物体图像点的取决于位置的偏振干涉图，所述干涉图包括针对每个物点/物体图像点的光谱信息。从记录自物点/物体图像点的位置依从性偏振干涉图确定对应于给定物点/物体图像点的光谱信息。

[0068] 在一些实施例中，通过在每个时间点对对应于物点/物体图像点位置的探测器阵列的位置采样，将位置依从性偏振干涉图转换成时变电信号。亦即，探测器650的随位置和时间变化的输出电信号651为每个探测器元件位置提供了时变的电输出。由一个物点/物体图像点产生的位置依从性偏振干涉图在不同时间横贯不同的探测器元件。在光从物点/物体图像点发射并通过光谱编码器入射到这些相继的探测器元件上时，通过将从一个物点/物体图像点产生的时间上相继的探测器元件信号缝合在一起，可以将一个物点/物体图像点产生的随位置和时间变化的电信号变换成时变电信号。下文通过数学方式解释这一过程。例如，可以通过时域到频域变换，处理时变的电信号，以提取针对物点/物体图像点的光谱信息。

[0069] 假设已知光谱编码器和物体/物体图像之间的相对运动，这种相对运动导致位置x(t)处的给定物点/物体图像点601a横越多元件空间解析探测器。探测器在像空间X的给定点和时间上的给定点t处的响应为I(X,t)。如果f是将物体成像到探测器上的函数，那么X＝f(X(t))。如果给定物点/物体图像点在时间t∈(0,T)中横越探测器，那么该物点/物体图像点的干涉图S可以由S(t)＝I(f(x(t)),t)，t∈(0,T)给出。像空间X中的每个点，因此时间上的每个点t都对应于已知的延迟Γ＝g(X)＝g(f(x(t)))。利用这一信息，可以通过例如由处理器或光谱编码器附接到的其他主机系统计算，获得作为延迟函数的干涉图S(Γ)＝I(g^{-1}(Γ),x^{-1}(f^{-1}(g^{-1}(Γ))))。相对于延迟执行傅里叶变换获得从给定物点/物体图像点记录的光的光谱。

[0070] 从物体/物体图像的多个物点/物体图像点获得的空间和光谱信息可以由处理器布置成数据集，所述数据集例如包括具有轴x(一个空间维度，沿着轨迹方向)和λ(波长)的高光谱数据正方形，或者具有轴x、y(两个空间维度，一个沿轨迹方向，一个横穿轨迹方向)和λ(波长)的高光谱数据立方体。曲线图660示出了在窄波长频带之内发光的同时，与相对于光谱编码器603运动的物体/物体图像601的一个物点/物体图像点601a相关联的探测器650的时变输出信号的范例。输出电信号651包括从物点/物体图像点601a发出的光的光谱。探测器沿轨迹方向必须包括与物点/物体图像点至少一样多的元件650a，以分辨探测器650沿轨迹方向的瞬时视场。例如，对于流式细胞光度术而言，如果预计有N个颗粒发射将同时到达探测器的光，探测器应当沿颗粒被成像在探测器上的轨迹方向具有至少N个分辨元件，从而可以消除颗粒信号的歧义。

[0071] 可选地，光谱编码器603可以包括第二透镜612，例如，布置于第二起偏器632和探测器650之间或波片和第二起偏器之间。透镜612被配置成将来自波片的光605b成像到探测器650上，如虚线605b所示。

[0072] 可选地，光谱编码器603包括图6中未示出的一个或多个光学滤波器。例如，在各实

施例中，可以在物体/物体图像601和探测器650之间，例如第二起偏器632和探测器650之间的光路中的任何地方布置光学滤波器。光学滤波器可以用于将入射在探测器650上的光带宽限制到感兴趣的带宽范围，这简化了信号处理。在一些情况下，即使在尼奎斯特极限(每个干涉条纹两个样本)以下对干涉图产生的电信号进行采样，限制由探测器接收的光带宽也允许从物体运动产生的光学干涉图完全恢复光谱信息。

[0073] 如前所述，在一个范例中，波片是包括两个棱镜半部的沃拉斯顿棱镜。沃拉斯顿棱镜的每半部都具有楔角α，其中楔角被定义为通常布置成垂直于光谱编码器主要光轴的棱镜半部的正面和棱镜的两半结合在一起处的内面之间的角度。沃拉斯顿棱镜的慢轴可以相对于起偏器的轴成大约45度取向。棱镜的楔方向被定义为在平行于棱镜正面的平面中，棱镜的两半部的厚度最快折衷所沿的方向。优选将棱镜的楔方向与物体/物体图像601和光谱编码器603之间的相对运动轨迹方向对准，并在与楔方向成±45°处对准棱镜的慢轴。如果在波长λ处期望的光谱分辨率为λ/N，那么在物点/物体图像点601a横越光谱编码器的视场时，必须要记录N个条纹。如果物点/物体图像点沿沃拉斯顿棱镜的楔方向的行进距离为L，并且如果棱镜材料具有双折射Δn，那么沃拉斯顿棱镜的楔角应当是α≈nλ/2LΔn。最大光谱带宽受到探测器信号采样率的限制，采样率必须足够快以记录观测到的条纹。光谱带宽还受到探测器像素沿轨迹方向尺寸的限制。如果探测器像素沿轨迹方向的尺寸为d，那么沿轨迹方向尺寸为D的探测器可以记录的最大条纹数量大约为D/2d。因此，重要的是，对应于要记录的最大可能条纹数量的这个数字D/2d大于在要探测的最小波长处预计的最大数量。本文描述的光谱编码器包括生成位置依从性偏振干涉仪的起偏器-波片-起偏器夹层结构。第一起偏器对入射光进行偏振；波片在两个正交偏振部件之间诱发取决于物体沿轨迹的位置的延迟(因此，诱发波长依从性相移)；第二起偏器将所得的波长依从性偏振态变成波长依从性强度。由于光在沿轨迹的不同点处从物体/物体图像的物点/物体图像点发出，所以光会经受不同的延迟，从而产生可以经傅里叶变换以提供光谱的干涉图。

[0074] 可以耦合处理器(图6中未示出，但图1A中示出)以从探测器650的每个探测器元件650a接收输出电信号651。在一些实施例中，可以耦合探测器650的每个探测器元件650a以向处理器提供独立的并行输出信号。或者，来自多个探测器元件650a的输出信号651可以被复用。处理器处理探测器输出信号以提取关于物体/物体图像601的信息。可以由处理器解析由物体601运动产生并由探测器650探测的光干涉条纹。可以组合探测器元件的输出以形成对应于单个物点/物体图像点的时变干涉图。例如，可以通过傅里叶变换或其他变换，处理这种时变的干涉图，以确定从物点/物体图像点发出的光的光谱。

[0075] 如前所述，本文公开的方法依赖于物体/物体图像和光谱编码器之间的相对运动。图7A示出了一种包括光谱编码器703和光学部件721的系统，光学部件例如是可移动镜片或导致物体701的图像702跨过光谱编码器703移动的其他装置。在这种情形下，物体701自身可以相对于光谱编码器703是不动的。光谱编码器703被配置成确定从物体/物体图像701发出并被光学部件721重定向到光谱编码器703的光705的光谱信息。

[0076] 图7B示出了另一种包括光谱编码器703和底盘、交通工具(例如汽车或飞机)或配置成导致物体701和光谱编码器703之间相对移动的其他运动机构722的系统。图7B的实施例将移动装置722表示为飞机。光谱编码器703被配置成基于如本文所述的物体/物体图像701和光谱编码器703之间的相对运动，确定从物体/物体图像701发出的光705的光谱信息。

[0077] 在一些实施方式中，可以利用高数值孔径透镜增强本文所述的包括光谱编码器的成像系统的紧凑性，以将从物体/物体图像发出的光成像到波片上。波片的每个点的延迟取决于入射光在该点处在波片上的角度。在由高数值孔径成像系统中的一个探测器元件探测的光线中，入射光的角度会变化；因此，在被该探测器元件探测的光线上，延迟也会变化，从而导致所记录的时变干涉图中调制深度或对比度损失。在一些实施方式中，可能希望减小波片延迟对聚焦到一个探测器元件上的光线角度变化的灵敏度。有几种方式可以降低这种角度灵敏度。考虑沃拉斯顿棱镜的情况，在将沃拉斯顿棱镜用作波片时，沃拉斯顿棱镜的延迟作为沿其楔构件的位置的函数而变化。图8A示出了包括第一和第二半部801a、801b的沃拉斯顿棱镜801。第一半部801a的光轴沿x方向取向；第二半部801b的光轴沿y方向取向；光谱编码器801的成像轴890沿z轴取向。由于棱镜半部801a、801b的楔形形状，以及基于输入光相对于z轴的角度θ的固有依从性，棱镜801沿x轴具有位置依从性延迟。仅有棱镜半部801a、801b的楔形部分对位置依从性延迟有贡献。如虚线898、899所示，棱镜801的每一半部801a、801b都由长方体801a-1、801b-1和三角形楔801a-2、801b-2构成。棱镜801的位置依从性仅仅是由于每半部801a、801b中的三角形楔801a-2、801b-2，而角相关可以是由于包括矩形部分801a-1、801b-1的整个棱镜801。

[0078] 在一些实施方式中，可以通过减薄棱镜半部，例如，通过去除或减小图8A和8B中所示的矩形部分801a-1、801b-1，来减小光谱编码器中使用的沃拉斯顿棱镜的角相关。在一些实施例中，减薄棱镜半部，使得仅保留制造楔需要的那么多材料。图8B示出了包括第一和第二半部802a、802b的沃拉斯顿棱镜802，所述第一和第二半部不包括基本矩形部分。在各实施例中，棱镜半部最薄部分的厚度t_1(参见图8A)可以小于该棱镜半部最厚部分厚度t_2的90％，小于其75％，小于其50％或小于其25％。在一些实施方式中，t_1和t_2的差异可以在微米量级，例如，1μm和500μm之间。为了便于处理这样的薄棱镜，可能需要将两半部802a、802b之一或两者都粘合到光学各向同性材料的衬底803，如图8B所示。

[0079] 在一些实施方式中，可以利用靠近沃拉斯顿棱镜一侧或两侧设置的双折射材料的一个或多个附加层补偿一些角相关性，来减小沃拉斯顿棱镜的角灵敏度，如图9A和9B所示。可以在图8A和8B所述方法之外作为补充或替代，采用结合图9A和9B所示和所述的技术。

[0080] 图9A示出了一种沃拉斯顿棱镜900，所述沃拉斯顿棱镜包括半棱镜901、902以及沿光谱编码器的成像轴999布置的双折射材料附加层903。在本范例中，沃拉斯顿棱镜900的第一半部901的光轴沿x轴取向；沃拉斯顿棱镜900的第二半部902的光轴沿y轴取向；第三层903的光轴沿光谱编码器的成像轴999(图9A中的z轴)取向。双折射材料附加层903可以与沃拉斯顿半棱镜901、902由相同材料制成。在一些实施例中，第三层903可以具有基本恒定的厚度，所述厚度在由虚线998表示的其中点处基本等于沃拉斯顿棱镜半部901、902中的一个。第三层903的厚度可以基本等于沃拉斯顿棱镜半部901、902之一的平均厚度。

[0081] 第三层903补偿沃拉斯顿棱镜900的一些角依从性。可以通过针对相对于z轴形成角度θ的xz-平面中，在光轴沿x轴的情况下通过单轴双折射介质行进的光线，考虑非常光线(在x方向上偏振)的折射率的角相关来看出这一点。非常光线的折射率由$n'_e(\theta)=\left(\frac{\cos^2\theta}{n_e^2}+\frac{\sin^2\theta}{n_o^2}\right)$给出，其中$n_s$和$n_o$是双折射介质的非常和正常折射率。如果光线然后在光轴沿同一厚度的z轴的情况下通过介质行进，非常光线的折射率由

$n_e''(\theta)=\left(\frac{\cos^2\theta}{n_o^2}+\frac{\sin^2\theta}{n_e^2}\right)$给出，那么非常光线看到的平均折射率是$\frac{n_e'(\theta)+n_e''(\theta)}{2}$而非仅仅n′θ(θ)。在θ＝0附近，从而将角依从性减小到原始角依从性的$\frac{\left(n_e+n_o-\frac{n_e^3}{n_o^2}-\frac{n_o^3}{n_e^2}\right)}{n_e-\frac{n_e^3}{n_o^2}}$倍，在使用双折射介质方解石时，其效果是大约原始角依从性的28％。

[0082] 图9B示出了用于减小沃拉斯顿棱镜角灵敏度的另一种技术。图9B示出沃拉斯顿棱镜，其包括棱镜半部901、902，沿着光谱编码器的成像轴999设置双折射材料的附加层911、912。布置附加层911、912以补偿沃拉斯顿棱镜900的一些角依从性。每层911、912都具有基本恒定且基本等于一个棱镜半部901、902平均厚度的厚度。在沃拉斯顿棱镜半部的中点处(这是光谱编码器的中点)，每个棱镜半部901、902的厚度和每个附加层911、912的厚度可以基本相等。在本范例中，光谱编码器的成像轴999沿z轴取向，沃拉斯顿棱镜900的第一半部901的光轴沿x轴取向；沃拉斯顿棱镜900的第二半部902的光轴沿y轴取向。层911的双折射与沃拉斯顿半棱镜901大小相等，符号相反，其光轴沿x轴取向。层912的双折射与沃拉斯顿棱镜半部902大小相等，符号相反，其光轴沿y轴取向。在这种布置中，由层911补偿沃拉斯顿棱镜的第一半部901带来的角灵敏度，由层912补偿由沃拉斯顿棱镜的第二半部902带来的角灵敏度。仅在所有层厚度相等的棱镜中点处完美消除了角灵敏度。

[0083] 一些配置可能受益于考虑沃拉斯顿半棱镜的光轴相对于楔方向的取向。在一些情况下，可能有利的是，让沃拉斯顿棱镜的一半的晶体方向平行于楔方向，而让沃拉斯特棱镜的另一半方向垂直于楔方向，如图6中所示。在其他实施方式中，可能有利的是，让两个沃拉斯顿棱镜半部的晶体方向都与楔方向成45度(不过彼此是垂直的)。

[0084] 在一些实施方式中，波片可以由一个或多个轴向取向的双折射层制成，例如，由诸如双轴取向的聚对苯二甲酸乙二醇酯(boPET)的聚合物或聚酯膜或可以制造成具有双折射梯度的其他轴向取向膜制成。在这些实施方式中，相对于对延迟的位置依从性有贡献的双折射材料量，减少了对延迟的角依从性有贡献的多余双折射材料的量。例如，如图10A到10C所示，波片可以包括两个膜，每个膜都具有双折射梯度。可以通过例如拉伸膜来获得膜中的指定双折射梯度。图10A示出了由第一和第二膜1001、1002制成的波片1000的截面图，其中每个膜1001、1002都具有双折射梯度。图10B是沿轴1099的正面视图，示出了第一层1001的很多点处的双折射，图10C是沿轴1099的正面视图，示出了在第二层1002的很多点处的双折射，其中箭头1091和1092指出了双折射的大小，慢轴与更长箭头对准代表更大的双折射。将两个层1001、1002粘合在一起，层1001、1002之一的慢轴基本垂直于1002、1001中另一层的慢轴取向，如图10B和10C中所示。因此，两个层1001、1002生成了波片，其中可以将零延迟点调节到波片的中间。零延迟点是指沿相同几何路径行进的两个偏振正交光线在它们通过波片时经过相同光程长度的点。

[0085] 图10D示出了光谱编码器，所述光谱编码器包括由两个层1001、1002制成的波片1000，波片1000夹在相对于物体/物体图像1011设置的起偏器131、132之间。在与基于方解石或其他晶体的波片比较时，图10D中所示的光谱编码器可以不太昂贵与/和更容易制造。在一些实施例中，波片可以是或者包括单层双折射材料，被形成为沿物体/物体图像的轨迹方向具有恒定双折射梯度，具有零延迟点。

[0086] 另一个要考虑的事项是通过干涉光的两种偏振导致的条纹平面的局域化。参考图11，条纹平面局限于沃拉斯顿棱镜内部(例如)两个半部1141、1142之间的界面1149附近，并成角度$\beta=\alpha*(n_e+n_o)/2n_en_o$。因此，在探测器的光接收表面基本垂直于光谱编码器的主光轴1199时，在探测器和条纹平面之间可能有稍微的倾斜，等于上文计算的β。可以通过(例如)倾斜探测器来适应轻微倾斜，使得沃拉斯顿棱镜半部的界面基本平行于探测器的光接收表面。或者，可以通过现有技术中已知的其他方式补偿，例如，利用改变条纹局域化平面的沃拉斯顿棱镜组合。图11示出了起偏器131、132之间的沃拉斯顿棱镜1140。探测1190倾斜角度β，使得探测器1190的光接收表面1191基本平行于沃拉斯顿棱镜1140的条纹局域化平面。或者，将探测器取向成基本垂直于光谱编码器的主光轴1199，沃拉斯顿棱镜可以倾斜，例如，使得条纹局域化平面基本平行于探测器的接收表面。

[0087] 关于包括根据本文所述实施例的光谱编码器的成像设置和/或用于高光谱成像系统，可能有一些考虑事项。首先，必须针对色差校正成像设置和/或透镜。如果要成像的物体，例如地理景色，对于光谱编码器而言显得平坦，则是理想状况。如果从光谱编码器到景色的距离相对于景色的高度变化充分大，可以实现这个目的。可以使用远心透镜作为将地理景色(或其他物体)成像到波片上的初始成像元件来实现这个目的。如果物体不够平坦，那么相对于光谱编码器以相同线速度运动的物点/物体图像点具有不同的放大率，从而以不同速度跨过波片移动。为了校正这种现象，可以例如利用辅助摄像机或LiDAR系统推断物点/物体图像点的高度，并可以进行正射投影纠正。可以利用从给定物点/物体图像点获得的部分干涉图数据计算光谱信息。注意，可能不能获得给定物点/物体图像点的完整干涉图；因为更远的物点/物体图像点可能被更近的物点/物体图像点弄模糊，可能必须要在傅里叶变换之前修剪对应于更远物点/物体图像点的干涉图，使得来自更近物点/物体图像点的遮蔽不会在计算的光谱中导致伪影。

[0088] 如果不包括将波片成像到空间解析探测器上的第二透镜，而是(例如)直接在波片后方放置探测器，可能有利的是在针对光谱分辨率(例如，聚焦于沃拉斯特透镜的楔界面处)和空间分辨率(聚焦于探测器上)优化的状态之间抖动第一透镜。

[0089] 如前所述，用于流式细胞光度应用中的空间解析探测器允许成像系统分离交叠的颗粒。在本文所公开的光谱编码器实施例中，可以利用分束器替换起偏器以保持光的全部正交偏振。这些分束器可以是萨伐特片(并行路径分束器)，以保持系统紧凑。或者，它们可以包括棱镜或其他偏振分束器。

[0090] 在各实施例中，可以在光学和/或电子硬件中实现光学装置和/或处理器的全部或部分。在一些示范性实施例中，处理器的功能可以实现于固件、运行于微控制器或其他装置上的软件或硬件、软件和固件的任何组合中。

[0091] 已提供了对各种实施例的上述描述，用于举例说明和描述性目的，并非限制。所公开的实施例并不是穷举性的，也不是要将可能的实施方式限制为所公开的实施例。根据以上教导，很多修改和变化都是可能的。

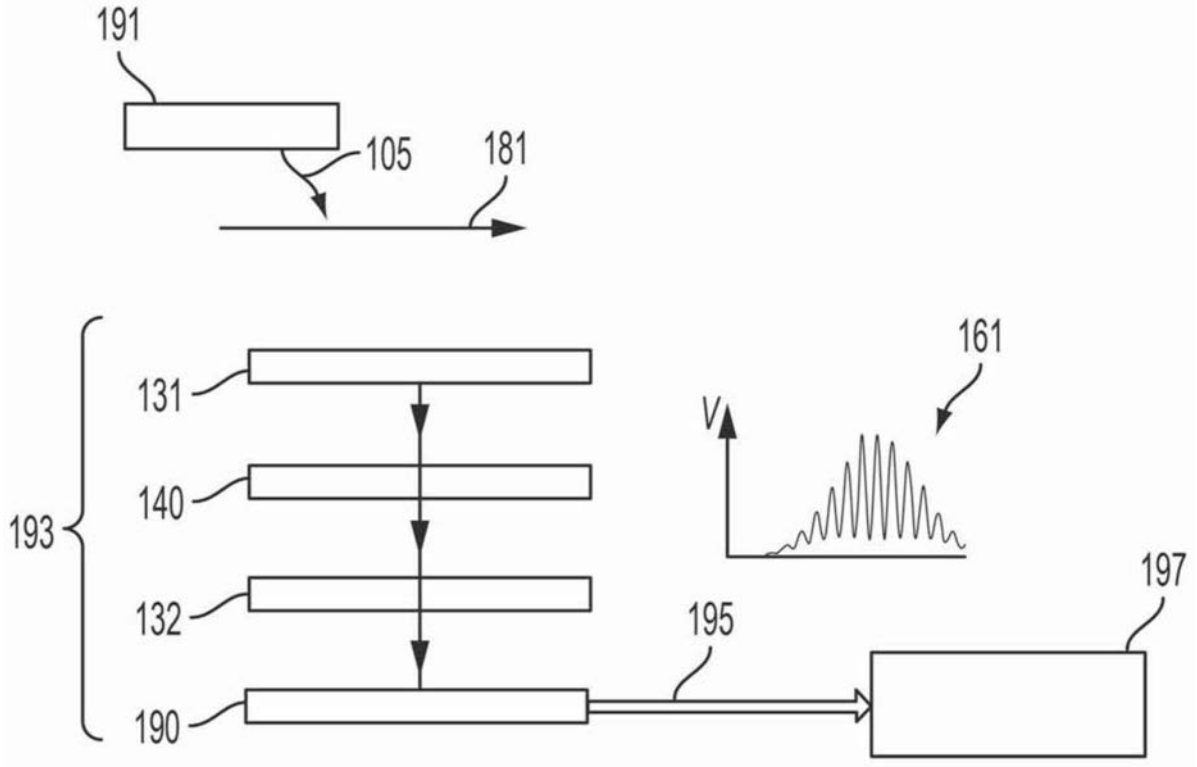


图1A

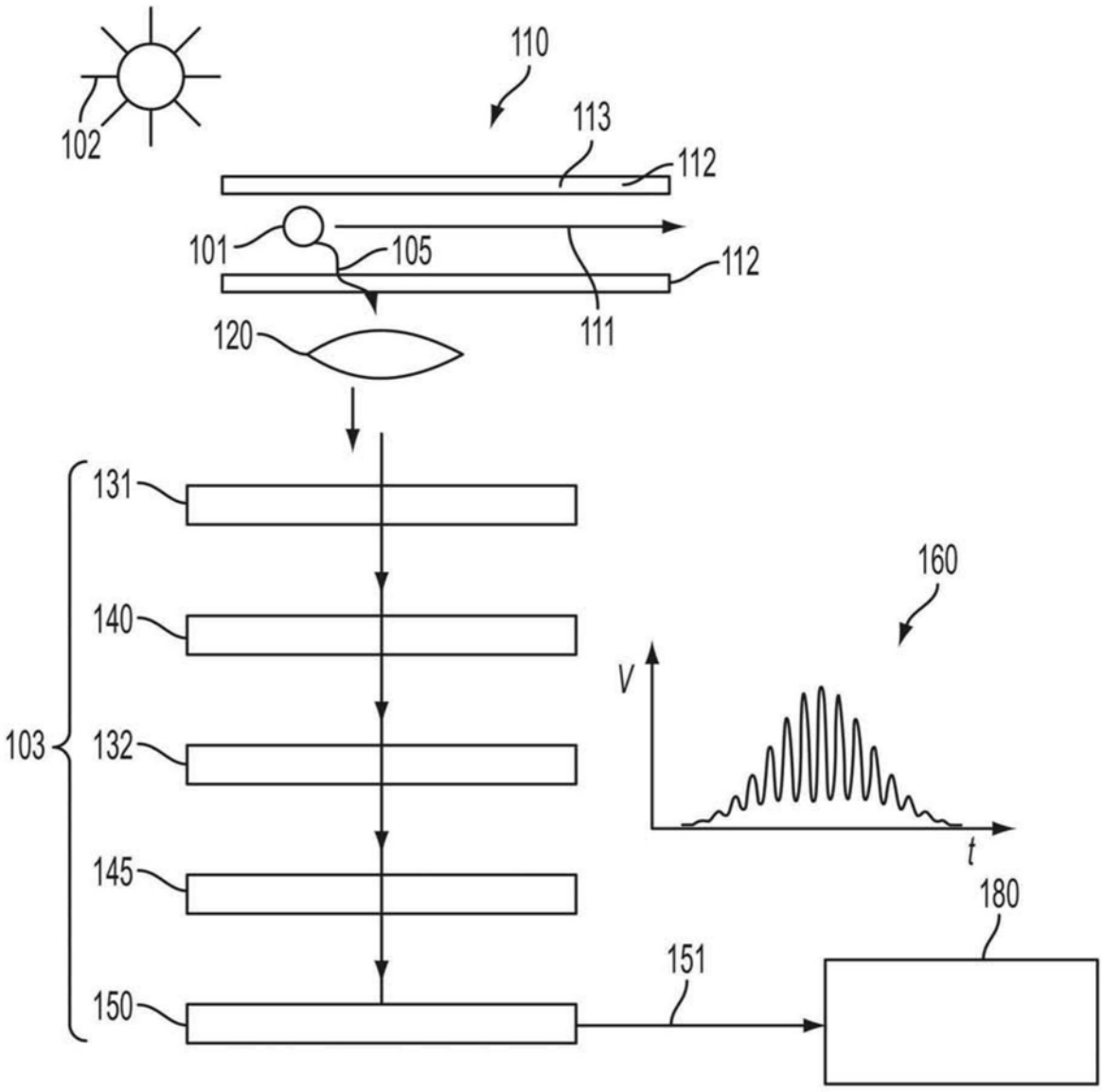

110
102
113
112
101
105
112
111
120
131
140
103
132
145
150
151
160
V
t
180

图1B

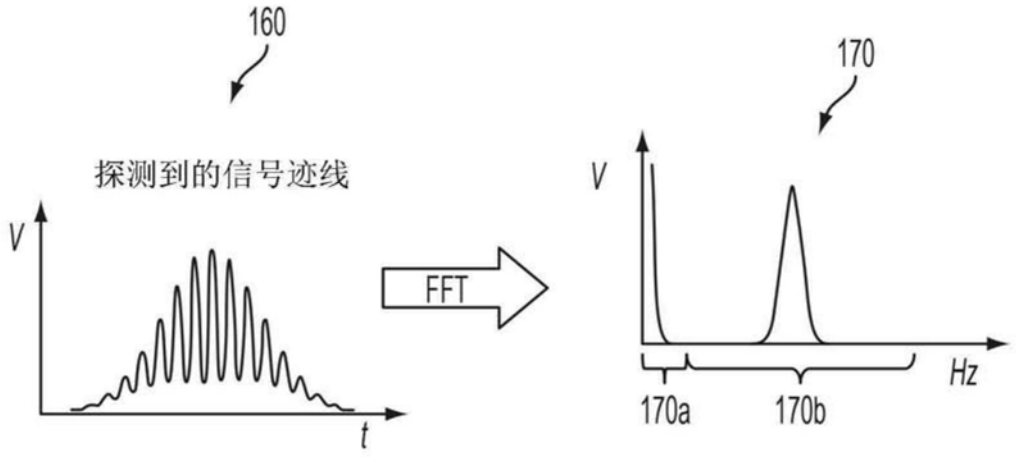

160
探测到的信号迹线
V
t
FFT
170
V
Hz
170a
170b

图2

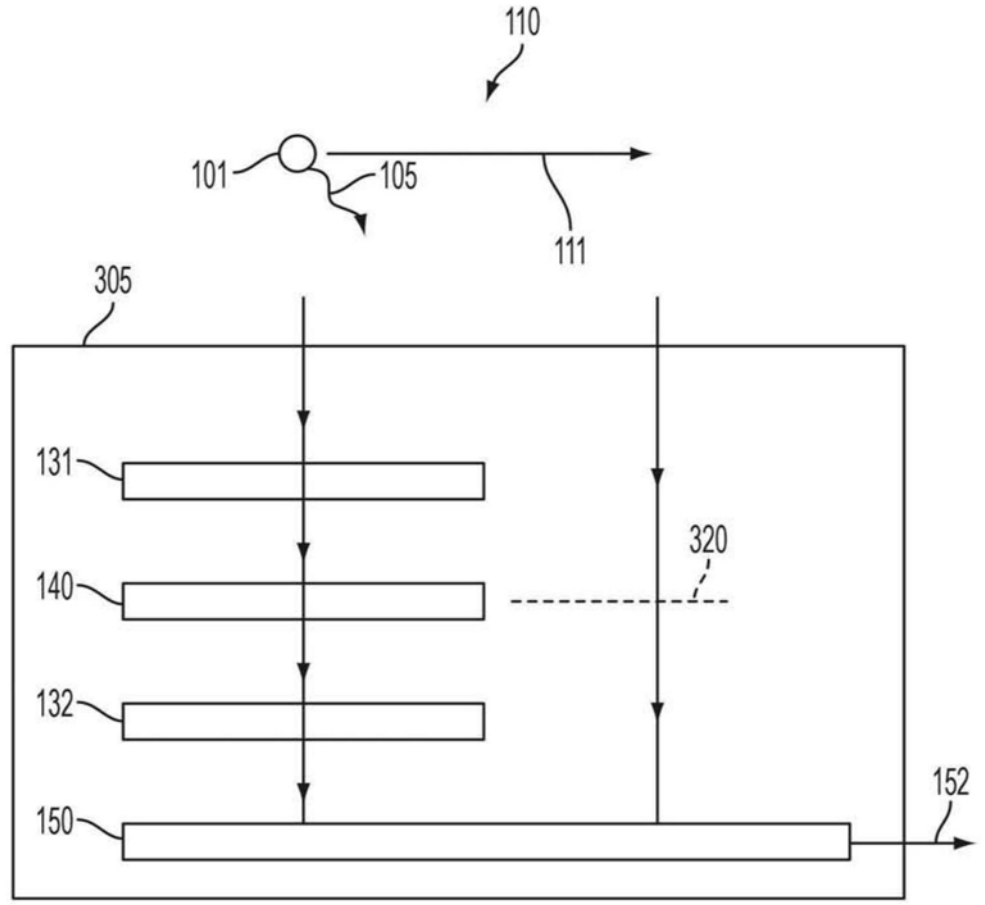

110
101
105
111
305
131
320
140
132
150
152

图3

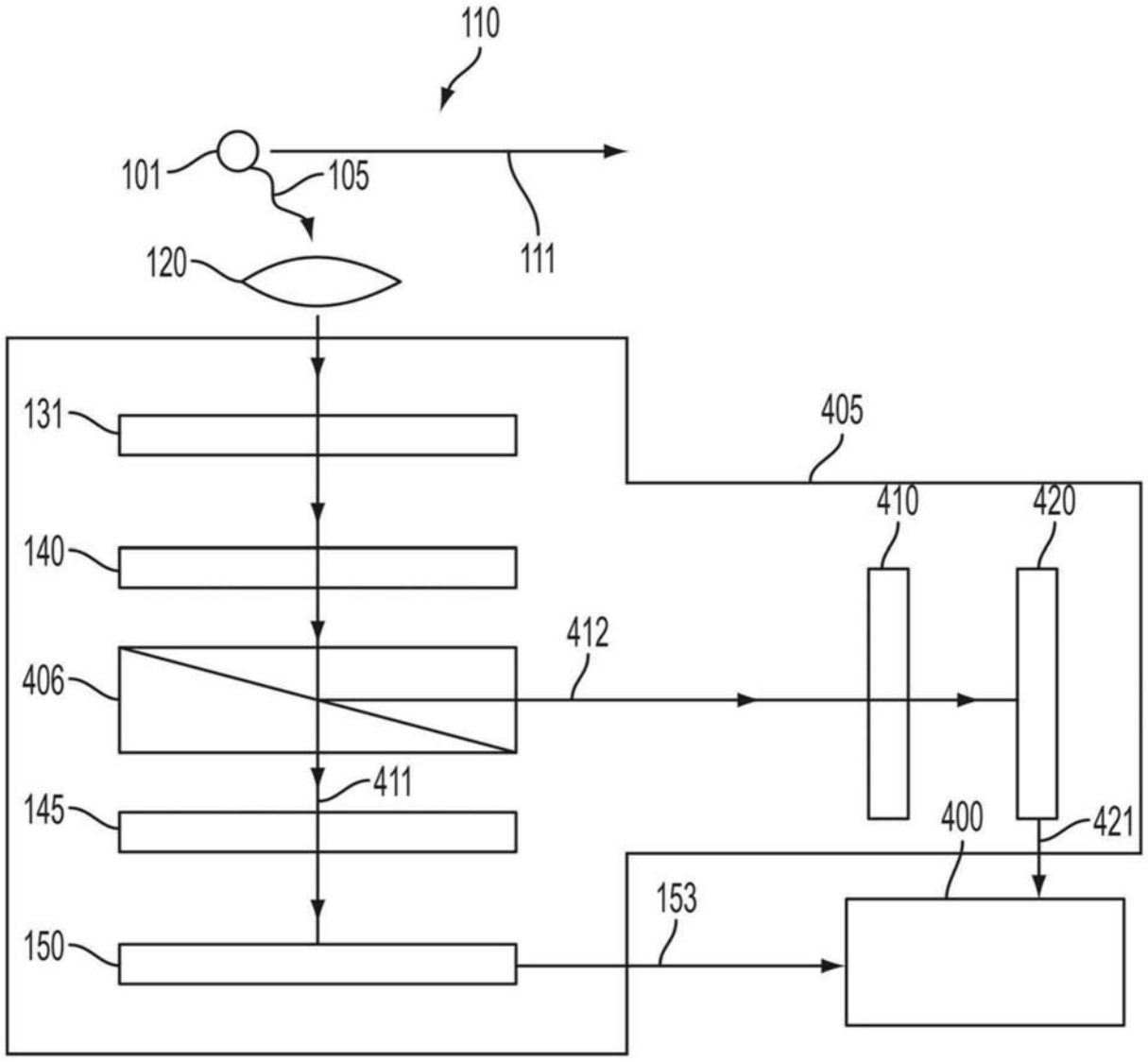

110
101
105
111
120
131
405
140
410
420
412
406
411
145
400
421
153
150

图4

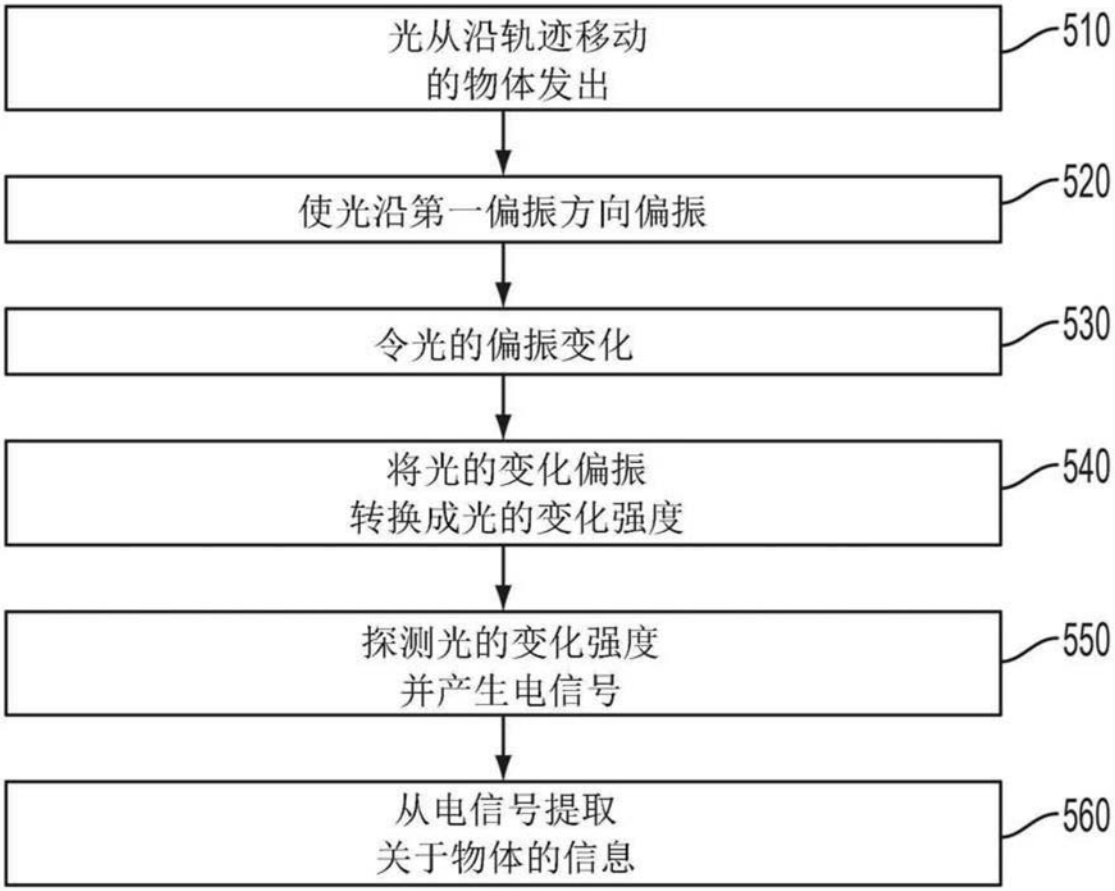

光从沿轨迹移动
的物体发出
510
使光沿第一偏振方向偏振
520
令光的偏振变化
530
将光的变化偏振
转换成光的变化强度
540
探测光的变化强度
并产生电信号
550
从电信号提取
关于物体的信息
560

图5

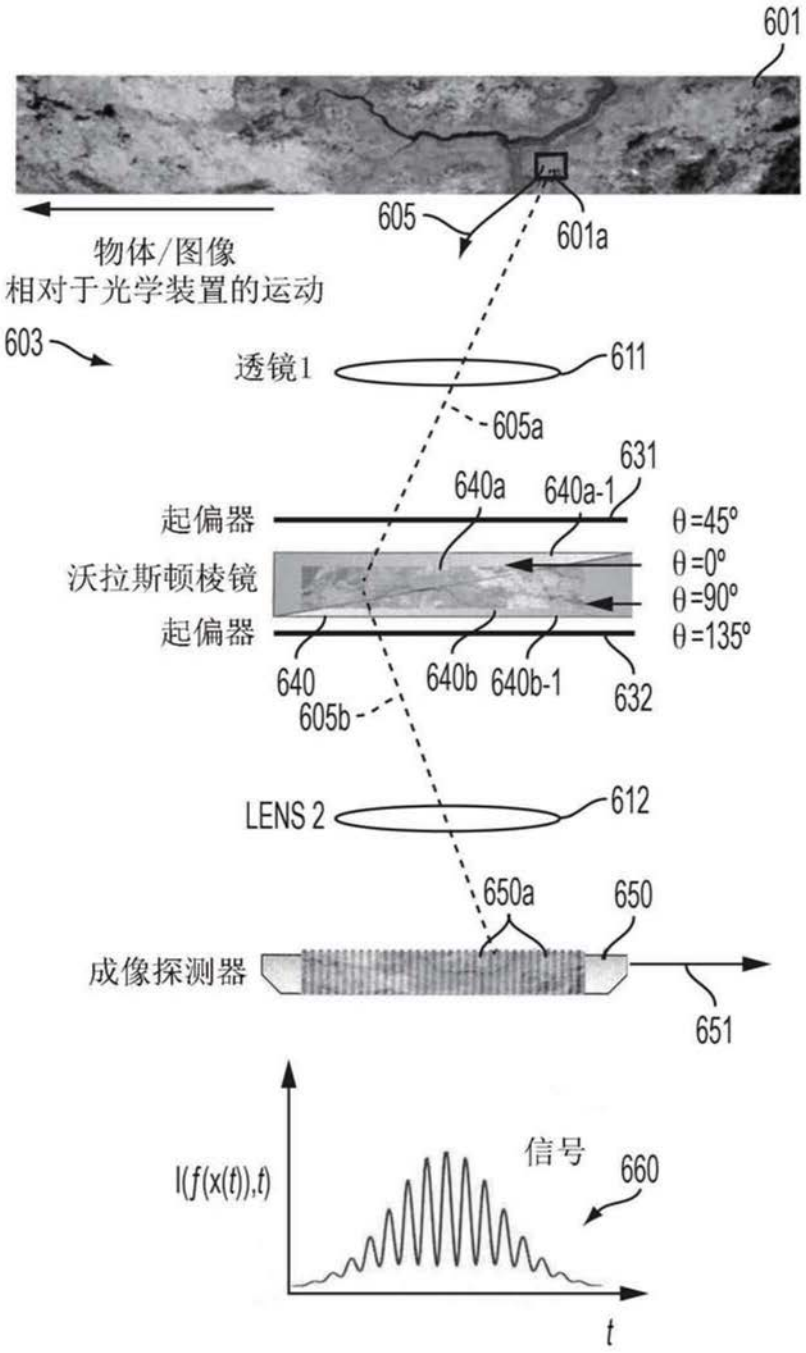

601
605
601a
物体/图像
相对于光学装置的运动
603
透镜1
611
605a
631
640a
640a-1
起偏器
θ=45°
沃拉斯顿棱镜
θ=0°
θ=90°
起偏器
θ=135°
640
640b
640b-1
632
605b
LENS 2
612
650a
650
成像探测器
651
I(f(x(t)),t)
信号
660
t

图6

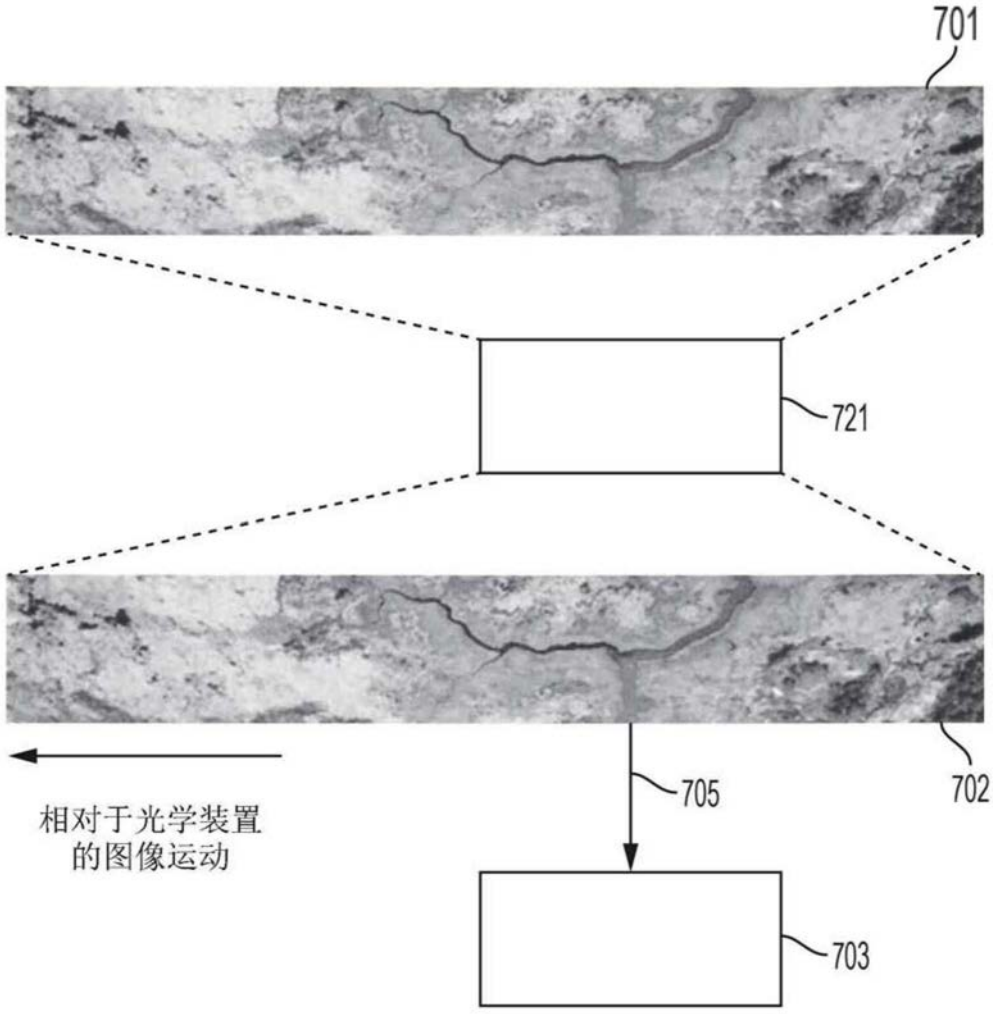


图7A

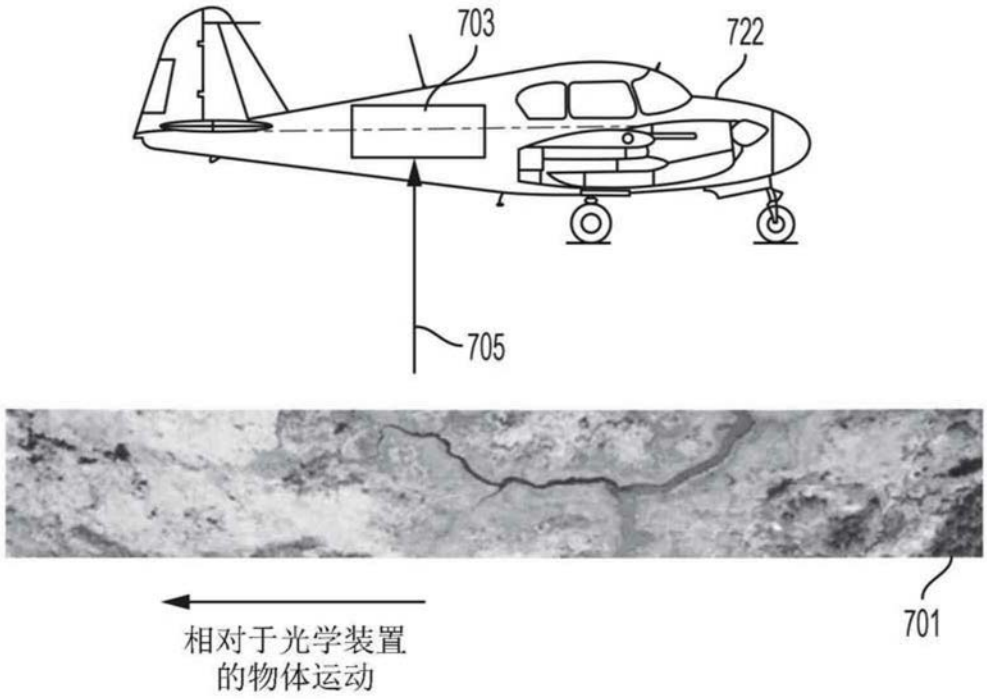

703
722
705
701
相对于光学装置
的物体运动

图7B

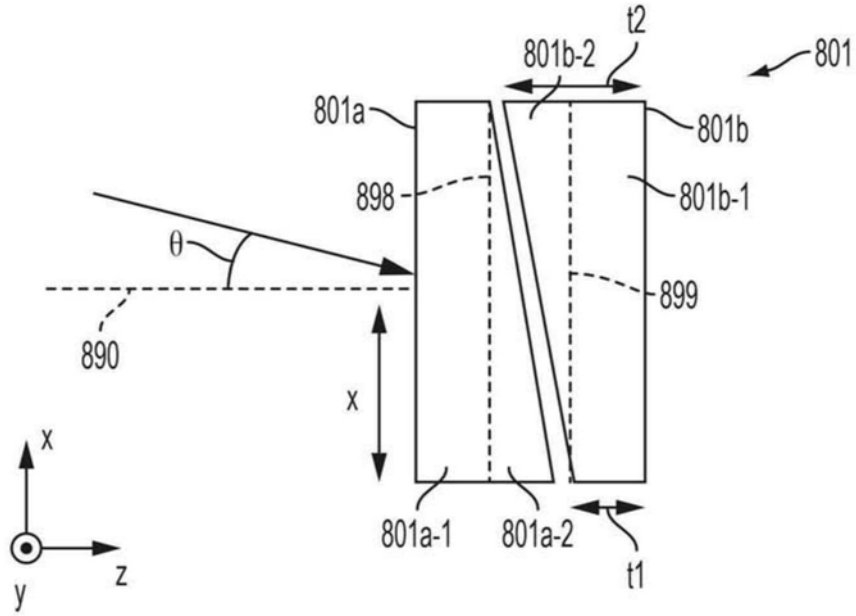

t2
801b-2
801
801a
801b
898
801b-1
θ
899
890
x
x
y
z
801a-1
801a-2
t1

图8A

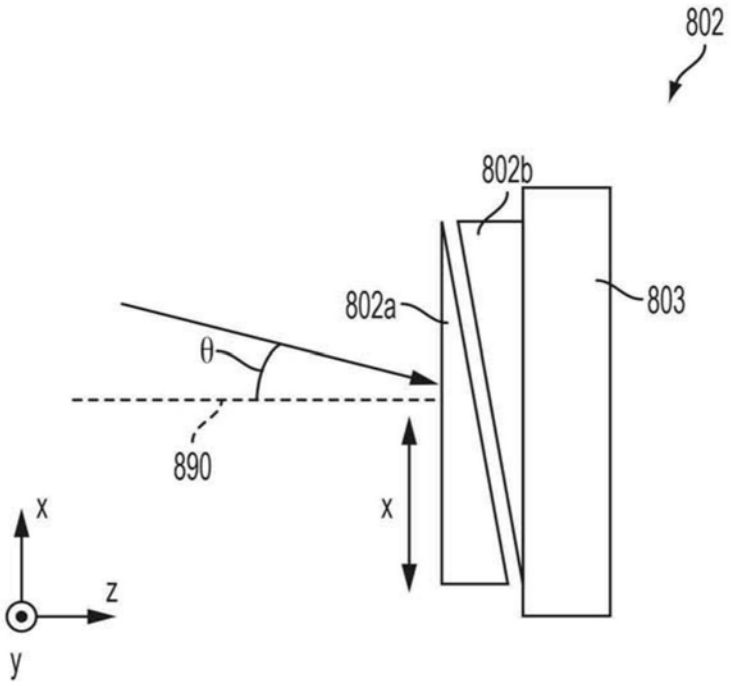


图8B

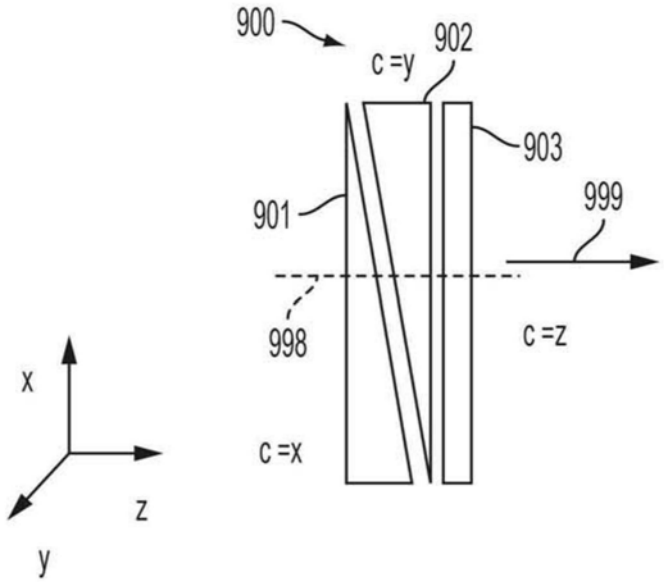


图9A

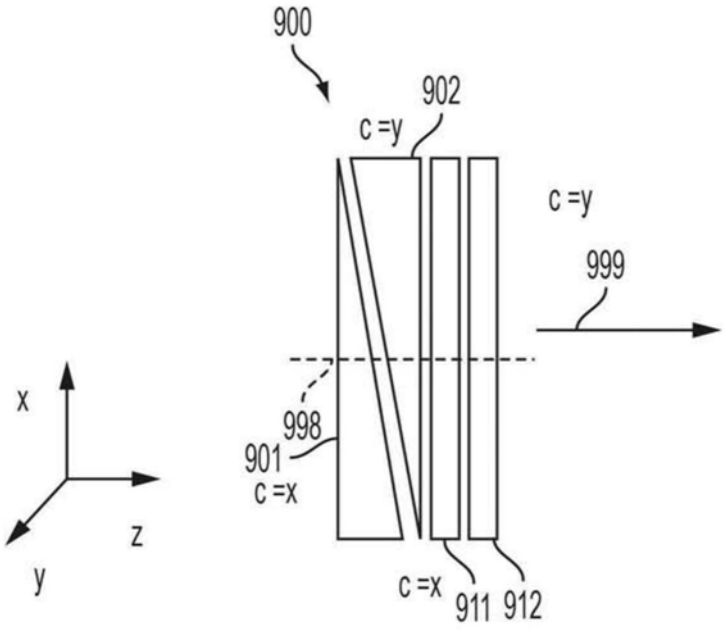


图9B

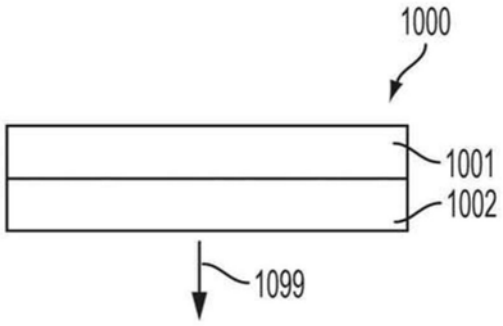


图10A

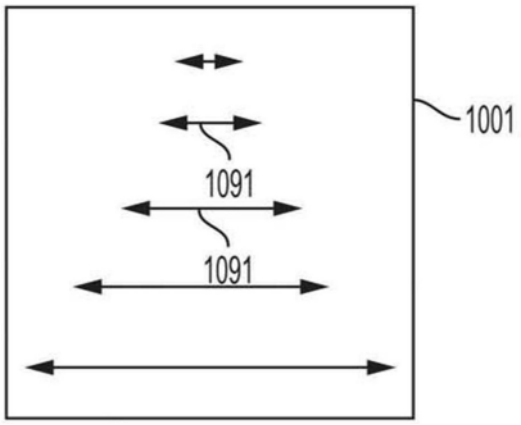


图10B

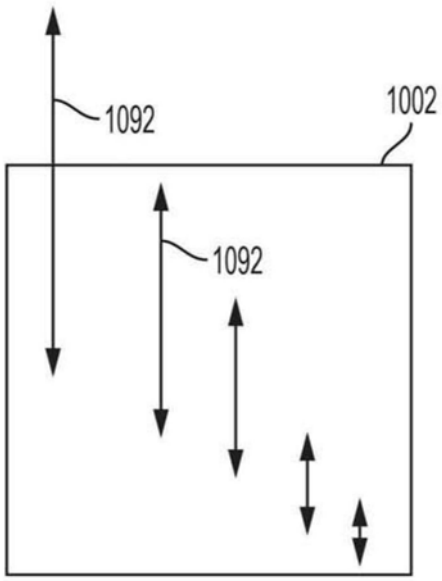


图10C

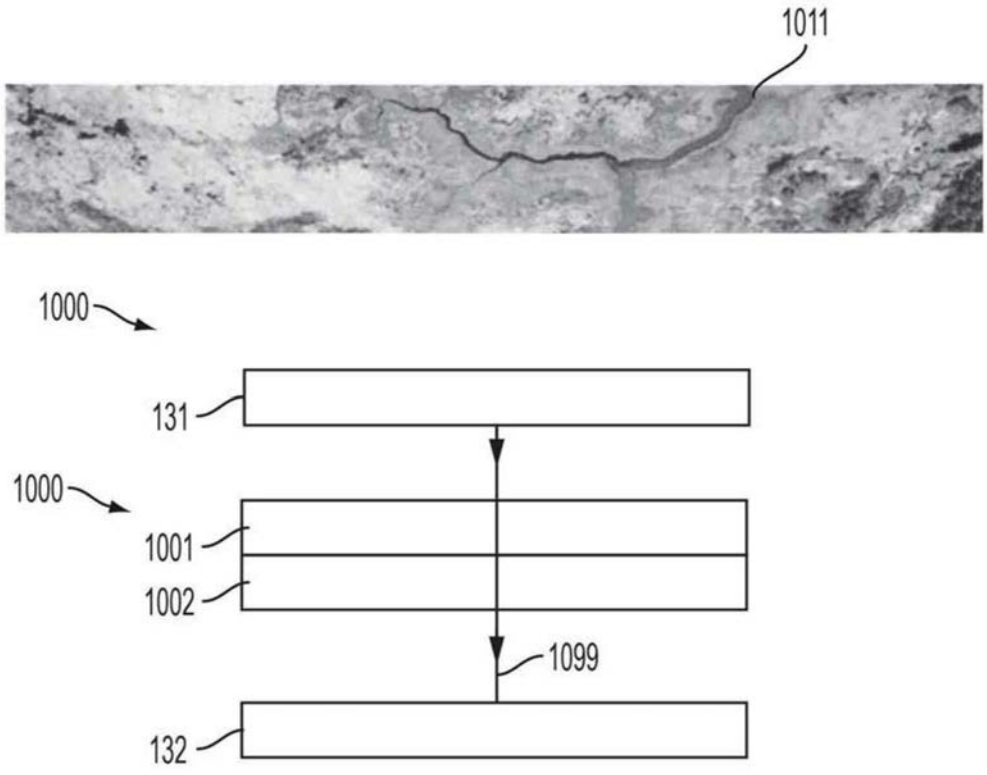


图10D

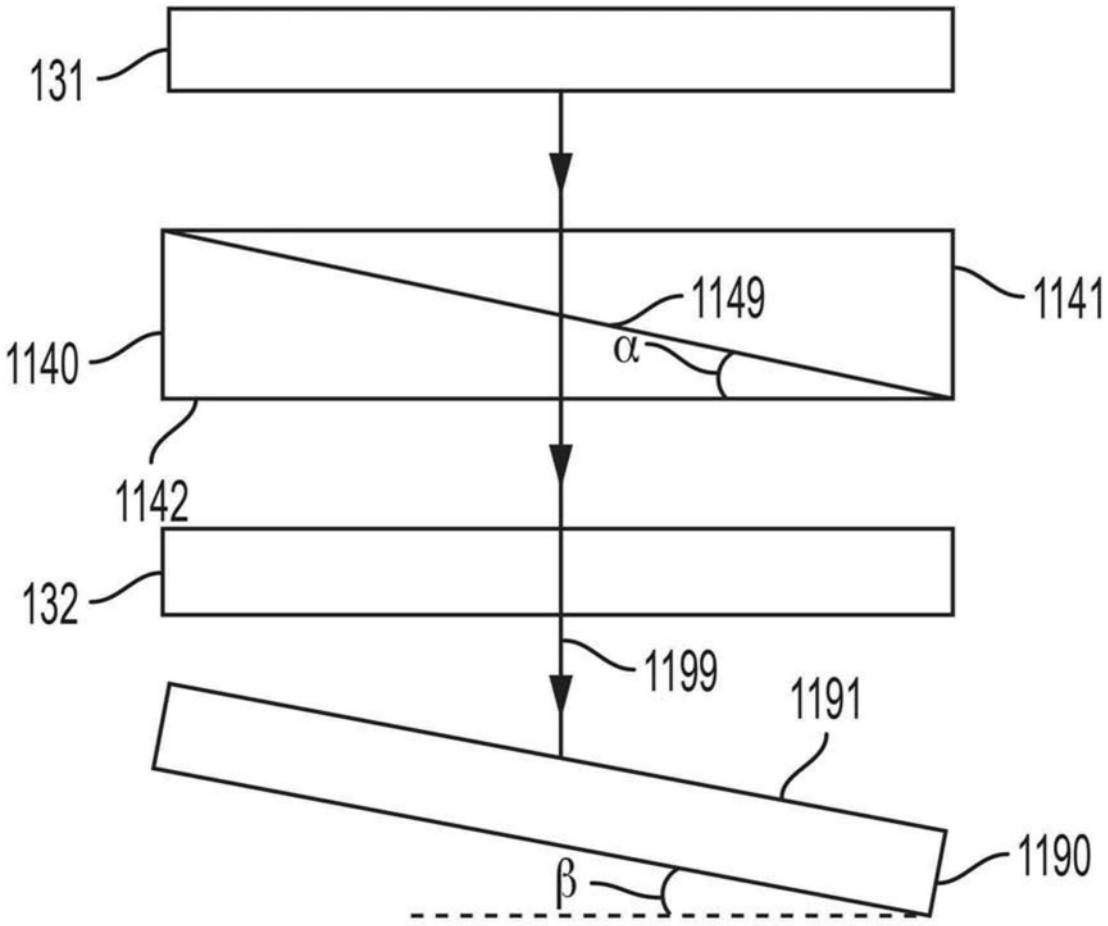


图11