



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109863424 B

(45)授权公告日 2020.05.12

(21)申请号 201880003957.8

W·吕腾

(22)申请日 2018.08.13

(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109863424 A

72002

(43)申请公布日 2019.06.07

代理人 孟杰雄 王英

(30)优先权数据

(51)Int.CI.

17187475.3 2017.08.23 EP

G01T 1/20(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2019.04.17

(56)对比文件

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/EP2018/071847 2018.08.13

CN 102590913 A, 2012.07.18,

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02019/038113 EN 2019.02.28

CN 102740775 A, 2012.10.17,

(73)专利权人 皇家飞利浦有限公司  
地址 荷兰艾恩德霍芬

CN 104869905 A, 2015.08.26,

(72)发明人 R·斯特德曼布克 E·勒斯尔

CN 105874323 A, 2016.08.17,

CN 106404809 A, 2017.02.15,

CN 106535769 A, 2017.03.22,

CN 107076682 A, 2017.08.18,

WO 2017013153 A1, 2017.01.26,

审查员 黄伟

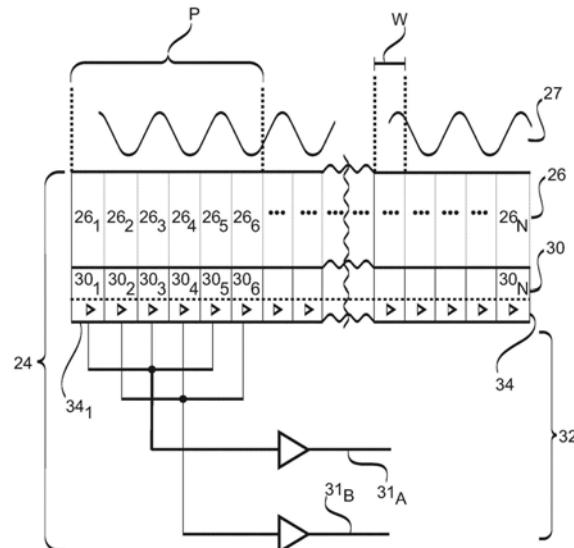
权利要求书3页 说明书18页 附图10页

## (54)发明名称

对相衬X射线成像和/或暗场X射线成像中的  
X射线入射条纹图样的X射线探测

## (57)摘要

在常规的相衬X射线成像系统中，源光栅G0生成照射对象的部分相干线源的阵列以及在该阵列之后的相位光栅G1。该相位光栅的周期性在更远离X射线源的某些情况下自成像，并且在由常规的X射线探测器探测到解调的条纹强度之前由能机械移动的第三吸收分析器光栅G2进行采样。本申请提出使用结构化闪烁体并结合电子信号读出方法直接解调条纹强度，该结构化闪烁体具有与光学探测器层的子像素对齐的多个平板。因此，能够从相衬X射线成像系统中省略能机械移动的第三吸收分析器光栅G2。



1. 一种用于对相衬X射线成像和/或暗场X射线成像中的入射X射线条纹图样进行采样的X射线探测器(24)，包括：

结构化闪烁体层(26)，其包括多个平板(26<sub>1</sub>、……、26<sub>N</sub>)，所述多个平板被布置为对所述入射条纹图样进行采样并将所述入射条纹图样转换成多个光学平板信号；

光学探测器层(30)，其与所述结构化闪烁体层光学通信，所述光学探测器层包括多个子像素(30<sub>1</sub>、……、30<sub>N</sub>)，其中，每个子像素与所述结构化闪烁体层的相应平板对齐，以探测从所述结构化闪烁体层的所述相应平板发射的相应光学平板信号；以及

信号组合装置(32)，其被布置为以电子方式从所述多个子像素读出表示所述条纹图样的信号；

其中，所述子像素还包括多个光学探测单元(34)，所述多个光学探测单元被配置为基于相关光学平板信号的存在来提供多个探测信号；并且

其中，所述信号组合装置(32)被配置为使得能够通过生成至少第一输出信号和第二输出信号作为所述光学探测器层(30)的所述光学探测单元的所述探测信号的组合来在第一探测方向和第二探测方向上采集相衬X射线图像和/或暗场X射线图像，而无需调整所述X射线探测器(24)的位置，其中，所述至少第一输出信号和第二输出信号均与因在所述结构化闪烁体层的相应平板上接收到所述入射X射线条纹图样而引起的空间信号幅度成比例，并且其中，所述X射线探测器的像素信号包括以由所述平板的宽度定义的条纹采样分辨率从至少两个相邻子像素采集的至少第一输出信号(31A)和第二输出信号(31B)。

2. 根据权利要求1所述的X射线探测器(24)，

其中，所述光学探测单元包括一个或多个硅光光电倍增管，所述一个或多个硅光光电倍增管被配置为探测从所述结构化闪烁体层的所述相应平板发射的所述相应光学平板信号。

3. 根据权利要求1或2所述的X射线探测器(24)，

其中，所述信号组合装置(32)能被配置成第一模式，在所述第一模式中，从相邻子像素的第一集合采集所述第一输出信号和所述第二输出信号，并且所述信号组合装置能被配置成第二模式，在所述第二模式中，从相邻子像素的第二集合采集所述第一输出信号和所述第二输出信号，其中，相邻子像素的所述第一集合和所述第二集合相对于彼此以一定角度对齐，由此使得能够在不同方向上进行子像素累积而无需调整所述X射线探测器的所述位置。

4. 根据权利要求1或2所述的X射线探测器(24)，

其中，一个子像素中的所述多个光学探测单元(34)并联电连接，以在操作中生成与由来自所述结构化闪烁体层的平板的光发射而触发的光学探测单元的数量成比例的信号。

5. 根据权利要求1所述的X射线探测器(24)，

其中，所述结构化闪烁体层(26)还包括第一闪烁体元件和第二闪烁体元件，所述第一闪烁体元件和所述第二闪烁体元件中的每个闪烁体元件均由不同的闪烁体材料形成，所述不同的闪烁体材料具有彼此不同的衰减时间常数，并且

其中，所述信号组合装置还包括与所述第一闪烁体元件和所述第二闪烁体元件的所述不同的衰减时间常数匹配的第一事件验证滤波器和第二事件验证滤波器，以鉴别第一光学探测器信号和第二光学探测器信号是否由光学串扰产生。

6. 根据权利要求5所述的X射线探测器(24)，

其中,所述信号组合装置(32)还包括与每个子像素相关联的互补事件验证滤波器,所述互补事件验证滤波器被配置为提供与从一相邻子像素到其它相邻子像素的光发射相关的信号。

7.根据权利要求5或6所述的X射线探测器(24),还包括:

结构化的滤色器层(72),其被设置在所述结构化闪烁体层与所述光学探测器层之间;

其中,所述第一闪烁体元件被配置为发射具有第一波长的可见光,并且所述第二闪烁体元件被配置为发射具有第二波长的可见光,并且所述结构化滤色器层被配置为在所述光学探测器层中的探测之前对具有相应波长的第一可见光和第二可见光进行滤波,以提高所述光学探测器层的串扰性能。

8.根据权利要求1或2所述的X射线探测器(24),还包括:

闪烁体隔离装置,其在所述结构化闪烁体层中被形成为围绕每个平板的光学隔离基质,以提高所述光学探测器层的串扰性能。

9.根据权利要求1或2所述的X射线探测器(24),

其中,所述平板的宽度(W)在0.5至50微米的范围内。

10.根据权利要求5或6所述的X射线探测器(24),

其中,所述结构化闪烁体层(26)包括第三闪烁体元件或第四闪烁体元件,并且所述光学探测器层包括第三子像素或第四子像素,所述第三子像素或所述第四子像素中的每个子像素均与所述第三闪烁体元件或所述第四闪烁体元件光学对齐,以提高条纹采样分辨率。

11.一种用于相衬X射线成像或暗场X射线成像的干涉仪(110),包括:

相位光栅结构(112),以及

根据权利要求1至10中的任一项所述的X射线探测器(114a、114b、116),

其中,所述相位光栅结构和所述X射线探测器被布置在光路中,使得所述相位光栅结构和所述X射线探测器的所述闪烁体层形成用于关联X射线辐射的干涉仪装置。

12.一种X射线成像系统(118),包括:

X射线源(120);

根据权利要求11所述的干涉仪(110);以及

控制器(122);

其中,所述控制器被配置为激活所述X射线源,从而将X射线辐射应用于能被定位在所述光路中的感兴趣对象;

其中,所述干涉仪的所述X射线探测器被配置为对X射线波前进行采样和探测,并且

其中,所述控制器被配置为以电子方式从所述干涉仪的所述X射线探测器的所述多个子像素读出表示所述条纹图样的信号。

13.一种用于相衬X射线成像和/或暗场X射线成像的方法(130),包括以下步骤:

a)生成(132)X射线辐射以检查感兴趣对象并将所述X射线辐射导向感兴趣对象;

b)在X射线探测器处接收(134)已经被所述感兴趣对象相位调制的所述X射线辐射;

c)使用包括多个平板的结构化闪烁体层将经调制的X射线辐射转换(136)成多个光学平板信号,所述多个平板被布置为对入射条纹图样进行采样;

d)使用与包括多个子像素的所述结构化闪烁体层光学通信的光学探测器层来探测(138)所述多个光学平板信号,其中,每个子像素与所述结构化闪烁体层的相应平板对齐以

探测从所述结构化闪烁体层的所述相应平板发射的相应光学平板信号,其中,所述光学探测器层还包括多个光学探测单元,所述多个光学探测单元被配置为基于相关光学平板信号的存在来提供多个探测信号;

e) 使用信号组合装置以电子方式从所述多个子像素读出(140)表示所述条纹图样的信号,其中,所述信号组合装置被配置为使得能够通过生成至少第一输出信号和第二输出信号作为所述光学探测器层的所述光学探测单元的所述探测信号的组合来在第一探测方向和第二探测方向上采集相衬X射线图像和/或暗场X射线图像,而无需调整所述X射线探测器的位置,其中,所述至少第一输出信号和第二输出信号均与因在所述结构化闪烁体层的相应平板上接收到所述入射X射线条纹图样而引起的空间信号幅度成比例,并且其中,所述X射线探测器的像素信号包括以由所述平板的宽度定义的条纹采样分辨率从至少两个相邻子像素采集的至少第一输出信号和第二输出信号。

14. 一种存储有计算机程序的计算机可读介质,所述计算机程序用于控制根据权利要求12所述的X射线成像系统,所述计算机程序当由处理单元运行时适于执行根据权利要求13所述的方法的步骤。

## 对相衬X射线成像和/或暗场X射线成像中的X射线入射条纹图样的X射线探测

### 技术领域

[0001] 本发明涉及X射线探测。具体地，讨论了用于对相衬X射线成像和/或暗场X射线成像中的入射X射线条纹图样进行采样的X射线探测器，以及相关联的方法、干涉仪、X射线成像系统、计算机程序单元以及计算机可读介质。

### 背景技术

[0002] 鉴于最近发现相衬成像在复杂的X射线光学领域适用而无需改变常规的源或探测器硬件，在过去十年中相衬成像在医学成像中获得了相当大的关注。相衬成像应用Talbot-Lau干涉测量法，并且通常以三个衍射或吸收X射线光学元件为特征。能够探查以微米或数十微米的尺度形成的干涉条纹，并且能够探查感兴趣对象的相位和小角度散射效应。这使得能够从X射线图像中提取新的和医学上有用的信息。

[0003] 美国专利公开物US 2014/0177795 A1讨论了Talbot-Lau干涉仪在X射线成像系统中的应用。然而，这种方法能够得到进一步改进。

### 发明内容

[0004] 因此，需要改进适用于相衬和X射线成像的X射线探测器。通过独立权利要求的主题解决了本发明的目的，其中，在从属权利要求中包含了进一步的实施例。

[0005] 根据第一方面，提供了一种用于对相衬X射线成像和/或暗场X射线成像中的入射X射线条纹图样进行采样的X射线探测器。所述X射线探测器包括：

[0006] 结构化闪烁体层，其包括多个平板，所述多个平板被布置为对所述入射条纹图样进行采样并将所述入射条纹图样转换成多个光学平板信号；

[0007] 光学探测器层，其与所述结构化闪烁体层光学通信，所述光学探测器层包括多个子像素，其中，每个子像素与所述结构化闪烁体层的相应平板对齐，以探测从所述结构化闪烁体层的所述相应平板发射的相应光学平板信号；以及

[0008] 信号组合装置，其被布置为以电子方式从所述多个子像素读出表示所述条纹图样的信号。

[0009] 所述子像素还包括多个光学探测单元，所述多个光学探测单元被配置为基于相关光学平板信号的存在来提供多个探测信号。

[0010] 所述信号组合装置被配置为使得能够通过生成至少第一输出信号和第二输出信号作为所述光学探测器层的所述光学探测单元的所述探测信号的组合来在第一探测方向和第二探测方向上采集相衬X射线图像和/或暗场X射线图像，而无需调整所述X射线探测器的位置。所述至少第一输出信号和第二输出信号均与因在所述结构化闪烁体层的相应平板上接收到所述入射X射线条纹图样而引起的空间信号幅度成比例，并且所述X射线探测器的像素信号包括以由所述平板的宽度定义的条纹采样分辨率从至少两个相邻子像素采集的至少第一输出信号和第二输出信号。

[0011] 该X射线探测器的效果是：能够从X射线干涉仪设置中省略通常被表示为G2并被放置在常规的X射线探测器前面的分析器光栅，从而允许直接探测条纹相位和条纹可见性信息。直接条纹测量方法意味着分辨率提高，这会引起X射线探测器的子像素的显著缩小。探测器噪声的限制是物理限制，其不会随着子像素的尺寸减小而减小。因此，子像素的缩小与探测器噪声的增加成比例地增加，本方法能够改进这个问题。X射线探测器分辨率的提高也意味着X射线探测器信息输出的相应增加。本文详述的读出概念能够改进对输出信号的处理。

[0012] 任选地，所述光学探测单元包括一个或多个硅光电倍增管，所述一个或多个硅光电倍增管被配置为探测从所述结构化闪烁体层的所述相应平板发射的所述相应光学平板信号。

[0013] 硅光电倍增管(SiPM)单元具有快速瞬态时间，其通常低于1ns，并且淬灭时间为几十纳秒的量级。正因如此，有利地，在相衬X射线探测器中使用硅光电倍增管意味着不需要分辨入射光子的能量，而仅需要以精细间距间隔分辨信号幅度。因此，少量硅光电倍增管单元(在极限情况下，单个硅光电倍增管单元)在功能上足以实现相衬成像。

[0014] 任选地，所述信号组合装置能被配置成第一模式，在所述第一模式中，从相邻子像素的第一集合采集所述第一输出信号和所述第二输出信号，并且所述信号组合装置能被配置成第二模式，在所述第二模式中，从相邻子像素的第二集合采集所述第一输出信号和所述第二输出信号，其中，相邻子像素的所述第一集合和所述第二集合相对于彼此以一定角度对齐，由此使得能够在不同方向上进行子像素累积而无需调整所述X射线探测器的所述位置。

[0015] 任选地，子像素的第一集合与第二集合以90°的校对对齐(换句话说，子像素的第一集合与第二集合的子像素形成矩形网格)。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至90°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至80°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至60°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合以0°至30°之间的内角对齐。因此，可以在许多不同方向上对条纹图样进行采样。

[0016] 以这种方式，可以为直接条纹探测器提供选择性布置子像素分箱的能力，使得在采集之前定义用于分辨精细结构的优选方向。这允许例如在第一方向和第二方向上(例如在垂直的两个方向上)采集相衬图像或暗场图像，而不需要移动患者和/或探测器硬件。正因如此，可以生成更准确的X射线图像，因为通过移动患者或探测器阵列不会丢失分辨率和患者-探测器对齐。

[0017] 任选地，一个子像素中的所述多个光学探测单元并联电连接，以在操作中生成与由来自所述结构化闪烁体层的平板的光发射而触发的光学探测单元的数量成比例的信号。

[0018] 每个平板可以具有大量的下层光学探测元件。本实施例的效果是能够减少来自需要处理的子像素的大量信息。

[0019] 任选地，所述结构化闪烁体层还包括第一闪烁体元件和第二闪烁体元件，所述第一闪烁体元件和所述第二闪烁体元件中的每个闪烁体元件均由不同的闪烁体材料形成，所述不同的闪烁体材料具有彼此不同的衰减时间常数。所述信号组合装置还包括与所述第一闪烁体元件和所述第二闪烁体元件的衰减时间常数匹配的第一事件验证滤波器和第二事

件验证滤波器,以鉴别第一光学探测器信号和第二光学探测器信号是否由光学串扰产生。

[0020] 当来自第一闪烁体平板的信号引起相邻闪烁体平板下面的光学探测器元件激活时,所采集的X射线条纹图样在时间或空间上可能模糊不清(模糊)。使用被布置在交替平板中的不同闪烁体材料(其中,不同闪烁体材料具有不同衰减时间常数)使得源自第一闪烁体平板的信号具有与源自紧邻的闪烁体平板的第二闪烁体信号显著不同的时间尺度覆盖范围。因此,通过监测接收到的信号的衰减时间常数,可以鉴别来自相邻闪烁体平板的信号。这使得能够更好地分离串扰引起的信号与条纹信号。

[0021] 任选地,所述信号组合装置还包括与每个子像素相关联的互补事件验证滤波器,所述互补事件验证滤波器被配置为提供与从相邻子像素到所述相邻子像素的光发射相关的信号。该实施例的效果是信噪比提高,因为确定源自相邻平板的信号被发送到两个邻居,这两个邻居可以使用重合逻辑来验证该信号并将该信号添加到它们各自的信号中。

[0022] 任选地,所述信号组合装置被提供为模拟电路。备选地,第一输出信号和第二输出信号被数字化,并且信号组合装置被提供为具有数字信号处理功能。备选地,信号组合装置是模拟电路与数字信号处理功能的组合。

[0023] 任选地,所述X射线探测器还包括:结构化的滤色器层,其被设置在所述结构化闪烁体层与所述光学探测器层之间。

[0024] 所述第一闪烁体元件被配置为发射具有第一波长的可见光,并且所述第二闪烁体元件被配置为发射具有第二波长的可见光,并且所述结构化滤色器层被配置为在所述光学探测器层中的探测之前对具有相应波长的第一可见光和第二可见光进行滤波,以提高所述光学探测器层的串扰性能。

[0025] 其效果是对应的光学探测器元件位于具有不同闪烁波长的不同类型的闪烁体下面。因此,被配置为对第二波长的光进行滤波的滤光器不会对源自正上方平板的第一波长的信号光进行显著滤波。然而,被配置为对第二波长的光进行滤波的滤光器将会对源自相邻平板的第二波长的噪声光进行显著滤波。以这种方式,进一步减小了平板之间的光学串扰的影响。

[0026] 任选地,所述X射线探测器还包括:闪烁体隔离装置,其在所述结构化闪烁体层中被形成为围绕每个平板的光学隔离基质,以提高所述光学探测器层的串扰性能。

[0027] 其效果是减少了具有不同类型的闪烁体材料的平板之间的光学串扰,因为来自相邻闪烁体平板的噪声光的泄漏减少了。

[0028] 任选地,所述平板的宽度为以下范围之一:0.5μm至50μm,0.5μm至40μm,0.5μm至30μm,0.5μm至20μm,5μm至20μm,10μm至30μm,20μm至50μm。

[0029] 任选地,所述结构化闪烁体层包括第三闪烁体元件或第四闪烁体元件,并且所述光学探测器层包括第三子像素或第四子像素,所述第三子像素或所述第四子像素中的每个子像素均与所述第三闪烁体元件或所述第四闪烁体元件光学对齐,以提高条纹采样分辨率。

[0030] 尽管可以利用两个独立的过采样通道来充分分辨相衬条纹图样,但是当条纹图样的空间过采样率提高时,能够提高采样分辨率并且/或者能够提高采集速度。

[0031] 根据示例,提供了一种用于对相衬X射线成像和/或暗场X射线成像中的入射X射线条纹图样进行采样的X射线探测器。所述X射线探测器包括:

[0032] 结构化闪烁体层，其包括多个平板，所述多个平板被布置为对所述入射条纹图样进行采样并将所述入射条纹图样转换成多个光学平板信号；

[0033] 光学探测器层，其与所述结构化闪烁体层光学通信，所述光学探测器层包括多个子像素，其中，每个子像素与所述结构化闪烁体层的相应平板对齐，以探测从所述结构化闪烁体层的所述相应平板发射的相应光学平板信号；以及

[0034] 信号组合装置，其被布置为以电子方式从所述多个子像素读出表示所述条纹图样的信号。

[0035] 所述子像素还包括多个光学探测单元，所述多个光学探测单元被配置为基于相关光学平板信号的存在来提供多个探测信号。

[0036] 所述信号组合装置被配置为生成至少第一输出信号和第二输出信号作为所述光学探测器层的所述光学探测单元的所述探测信号的组合。所述至少第一输出信号和第二输出信号均与因在所述结构化闪烁体层的相应平板上接收到所述入射X射线条纹图样而引起的空间信号幅度成比例，并且所述X射线探测器的像素信号包括以由所述平板的宽度定义的条纹采样分辨率从至少两个相邻子像素采集的至少第一输出信号和第二输出信号。

[0037] 根据第二方面，提供了一种用于相衬X射线成像或暗场X射线成像的干涉仪。所述干涉仪包括：

[0038] 相位光栅结构；以及

[0039] 根据第一方面或其任选实施例的X射线探测器。

[0040] 所述相位光栅结构和所述X射线探测器被布置在光路中，使得所述相位光栅结构和所述X射线探测器的所述闪烁体层形成用于关联X射线辐射的干涉仪装置。

[0041] 根据第三方面，提供了一种X射线成像系统。所述X射线成像系统包括：

[0042] X射线源；

[0043] 根据第二方面的干涉仪；以及

[0044] 控制器。

[0045] 所述控制器被配置为激活所述X射线源，从而将X射线辐射应用于能被定位在所述光路中的感兴趣对象。

[0046] 所述干涉仪的所述X射线探测器被配置为对X射线波前进行采样并对采样的X射线波前进行探测。

[0047] 所述控制器被配置为以电子方式从所述干涉仪的所述X射线探测器的所述多个子像素读出表示所述条纹图样的信号。

[0048] 任选地，X射线成像系统是逆向X射线相衬成像系统，其中，源光栅G0与相位光栅G1之间的距离小于相位光栅G1与X射线探测器之间的距离。

[0049] 任选地，X射线成像系统是X射线相衬成像系统，其中，源光栅G0与相位光栅G1之间的距离大于相位光栅G1与X射线探测器之间的距离。

[0050] 根据第四方面，提供了一种用于相衬X射线成像和/或暗场X射线成像的方法，包括以下步骤：

[0051] a) 生成X射线辐射以检查感兴趣对象并将所述X射线辐射导向感兴趣对象；

[0052] b) 在X射线探测器处接收已经被所述感兴趣对象相位调制的所述X射线辐射；

[0053] c) 使用包括多个平板的结构化闪烁体层将经调制的X射线辐射转换成多个光学平

板信号,所述多个平板被布置为对入射条纹图样进行采样;

[0054] d) 使用与包括多个子像素的所述结构化闪烁体层光学通信的光学探测器层来探测所述多个光学平板信号,其中,每个子像素与所述结构化闪烁体层的相应平板对齐以探测从所述结构化闪烁体层的所述相应平板发射的相应光学平板信号,其中,所述光学探测器层还包括多个光学探测单元,所述多个光学探测单元被配置为基于相关光学平板信号的存在来提供多个探测信号;

[0055] e) 使用信号组合装置以电子方式从所述多个子像素读出表示所述条纹图样的信号,其中,所述信号组合装置被配置为使得能够通过生成至少第一输出信号和第二输出信号作为所述光学探测器层的所述光学探测单元的所述探测信号的组合来在第一探测方向和第二探测方向上采集相衬X射线图像和/或暗场X射线图像,而无需调整所述X射线探测器的位置,其中,所述至少第一输出信号和第二输出信号均与因在所述结构化闪烁体层的相应平板上接收到所述入射X射线条纹图样而引起的空间信号幅度成比例,并且其中,所述X射线探测器的像素信号包括以由所述平板的宽度定义的条纹采样分辨率从至少两个相邻子像素采集的至少第一输出信号和第二输出信号。

[0056] 根据第五方面,一种用于控制根据第三方面的X射线成像系统的计算机程序单元,所述计算机程序单元当由处理单元运行时适于执行根据第四方面的方法的步骤。

[0057] 根据第六方面,提供了一种存储有根据第五方面的计算机程序单元的计算机可读介质。

[0058] 在本说明书中,术语“X射线相衬成像”是指这样的X射线成像技术,其中,X射线源指向感兴趣对象,并且相位光栅用于生成以规则距离远离相位光栅的条纹图样。常规的X射线相衬成像系统通常包括直接在光源前面的源光栅G0、位于X射线束发生器条纹图样中的相位光栅G1,以及提供用于对直接在X射线探测器前面的条纹图样进行采样的分析器光栅G2。

[0059] 在常规的X射线相衬系统中,相位光栅G1与分析器光栅G2之间的距离小于源光栅G0与相位光栅G1之间的距离。在该方法中,与相位光栅G1和源光栅G0相比,分析器光栅G2通常必须具有非常精细的间距。

[0060] 在“逆向”X射线相衬系统中,源光栅G0与相位光栅G1之间的距离小于相位光栅G1与分析器光栅G2之间的距离。这使得G2具有更大的面积和更粗糙的结构,从而使得制造所面临的挑战较小。在Donath等人的文章“Inverse geometry for grating-based X-ray phase-contrast imaging”(应用物理学期刊,第106卷,第054703页,2009年)中进一步讨论了这些方面。

[0061] 本文讨论的探测器技术既适用于常规的X射线相衬系统和逆向X射线相衬系统,也适用于技术人员知识范围内的X射线相衬系统的光学器件的许多其他变型。然而,本申请的想法是利用形成X射线探测器的部分的结构化闪烁体代替分析器光栅,而不是使用分析器光栅。在本申请中应当相应地查看“逆向”或“常规”X射线相衬系统。

[0062] 在本说明书中,术语“X射线条纹图样”是指基于X射线光栅的成像中的概念。标准方法涉及利用X射线的相干平面波前来照射样品。样品的另一侧被提供有相位光栅,该相位光栅在被称为Talbot长度的传播距离之后建立周期性波前。在一种方法中,通过在分析器方向上移动分析器光栅穿过Talbot图样(被称为“相位步进”)来对周期性波前进行采样。术

语“X射线条纹图样”是指Talbot图样。

[0063] 在本说明书中,术语“结构化闪烁体层”意指包括周期性布置的闪烁体通道的阵列的平面或基本上为平面的层。结构化闪烁体的每个独立的闪烁体通道被称为“平板”。平板被布置有宽度或间距以形成分析器光栅结构的类似物。换句话说,能够认为结构化闪烁体取代了传统分析器光栅结构的功能。备选地,闪烁体层被称为微结构化闪烁体层。任选地,平板是结构化闪烁体材料中的微柱。微柱是平行的针状结构,其任选地具有250nm至10μm的直径。结构化闪烁体材料可以例如通过真空蒸发来制备。备选地,将闪烁体材料蚀刻到硅中以制造填充有闪烁体材料(例如,掺杂铊的碘化铯、硫氧化钆( $Gd_2O_2S$ ,被称为GOS)、氧化硅钆( $Gd_2SiO_5$ ,被称为GSO)、硅酸钇( $Lu_{2(1-x)}Y_{2x}SiO_5$ ,被称为LYSO)、 $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ (被称为GAGG)或 $Bi_4Ge_3O_{12}$ (被称为BGO)。可以使用本领域技术人员想到的许多其他闪烁体材料。

[0064] 在本说明书中,术语“光学平板信号”是指当X射线光子撞击在闪烁体平板上时从结构化闪烁体层或其平板发射的可见光的突发。

[0065] 在以下描述中,术语“像素”是指具有常规像素尺寸(例如, $200\mu m \times 200\mu m$ )的光探测单元,但是也可以考虑具有最大1mm的方形尺寸的像素尺寸的光探测单元。像素被构造成子像素,使得结构化闪烁体可以对条纹图样进行过采样。在操作期间,相邻子像素接收具有相互移位的相位的信号。

[0066] 在以下描述中,术语“光学探测器层”是指能够将来自结构化闪烁体的光学平板信号转换成电信号以供信号组合装置处理的半导体结构。例如,光学探测器层通常被形成为包括探测部件和总线连接的CMOS层,其中,结构化闪烁体层被沉积在CMOS层的顶部。在沉积结构化闪烁体层之前,在CMOS层中提供诸如多个硅光电倍增管或多个光电二极管的光学探测器元件以及相关联的信号组合电路。

[0067] 在以下描述中,术语“信号组合装置”是指用于读出探测信号的模拟电路或数字电路。例如,模拟电路可以包括沿着光学探测器层中的水平探测方向或垂直探测方向的光电倍增管或光电二极管的简单并联连接。替代地或额外地,这种模拟电路可以扩展到模拟元件,例如,电流镜、电流放大器或电流求和放大器。备选地,信号组合装置使用模数转换器将靠近光探测器层的探测信号进行数字化。例如,能够使用数字处理来组合相邻信号,数字处理可以更准确且不易受噪声干扰。

[0068] 因此,基本思想是通过提供能够对X射线条纹图样进行空间采样和/或过采样的结构化闪烁体并结合与结构化闪烁体的平板对齐的子像素来对X射线条纹图样进行空间采样和/或过采样。这使得能够将条纹图样与相邻的闪烁体平板分离。

[0069] 参考下文描述的实施例,本发明的这些方面和其他方面将变得明显并且得到阐明。

## 附图说明

[0070] 将在以下附图中描述本发明的示例性实施例。提供附图中的电路原理图以用于呈现其拓扑结构信息,而不是呈现最终的电子设计。然而,技术人员将能够参考示意图来完成最终的设计。

[0071] 图1图示了常规的相衬成像系统的示意性侧视图。

[0072] 图2图示了来自四通道的常规的相衬成像系统的示例性采样强度图样。

- [0073] 图3示意性地图示了根据第二方面的X射线相衬干涉仪和根据第三方面的包括干涉仪的X射线相衬成像系统的侧视图。
- [0074] 图4图示了根据第一方面的X射线探测器的示意图。
- [0075] 图5图示了根据第一方面的实际实施例的示意图。
- [0076] 图6a) 示意性地图示了常规的一维条纹探测器的平板。
- [0077] 图6b) 示意性地图示了当旋转90度时常规的一维条纹探测器的平板。
- [0078] 图7a) 图示了根据实施例的处于第一(垂直)模式中的2D可选择直接条纹探测器中的子像素的选择。
- [0079] 图7b) 图示了根据实施例的处于第二(水平)模式中的2D可选择直接条纹探测器中的子像素的选择。
- [0080] 图8图示了用于2D可选择直接条纹探测器电路的电子电路示意图。
- [0081] 图9示意性地图示了具有事件滤波的X射线探测器的另外的实际实施例。
- [0082] 图10示意性地图示了X射线探测器的另外的实施例。
- [0083] 图11示意性地图示了具有多个探测通道的单个像素。
- [0084] 图12图示了根据第四方面的方法。

## 具体实施方式

[0085] 传统的X射线方法使用X射线源照射感兴趣对象的前部。诸如数字探测器等X射线探测器位于感兴趣对象的后部。感兴趣对象中具有不同密度的材料将引起对X射线波前的不均匀吸收。数字探测器基于X射线波前的变化的吸收来提供感兴趣对象的内部结构的吸收图像。

[0086] 现在重点关注相衬X射线成像。感兴趣对象中的材料影响X射线波前的吸收，但通常它们也影响X射线波前的相移。特别是在软组织成像的情况下，探测相位差能够提供比通过传统的吸收成像所获得的图像质量更好的图像。备选地，能够减少患者剂量。

[0087] 图1图示了常规的X射线相衬成像方法。特别地，示出了基于光栅的基本X射线干涉仪10。所示装置的备选名称是X射线Talbot干涉仪。这包括高度相干的X射线源12，该高度相干的X射线源12在感兴趣对象16的方向上发射X射线束14。在感兴趣对象的后部，相位光栅18(G1)和分析器光栅20(G2)被提供为彼此对齐。分析器光栅20(G2)能使用机构(未示出)进行移动。数字X射线探测器22被定位为对已经穿过感兴趣对象16、相位光栅18和分析器光栅20的X射线条纹图样的幅度或变化进行接收和采样。

[0088] 任选地，高度相干的X射线源12被提供为与源光栅G0组合的常规的多色X射线源(例如，旋转阳极X射线管)，其在被放置在更宽的系统中时形成Talbot-Lau干涉仪。

[0089] X射线Talbot干涉仪利用X射线Talbot效应(其也被称为自成像效应)。相位光栅18是周期性结构，并且当处于被X射线源12高度相干的照射的条件下时在远离相位光栅18的特定距离处创建相位光栅18的自身图像。这种现象是菲涅耳衍射的结果。在部分相干的X射线照射的条件下，自身图像的可见性可能降低，但是仍然可能是有用的。

[0090] 由于位于相位光栅18前方的感兴趣对象16引起的相移，入射X射线波会变形。这也导致自身图像根据感兴趣对象16中的相位不均匀性而变形。自身图像中的变形量与远离相位光栅18的距离z成比例，在该相位光栅18处对自身图像进行采样。常规地，数字X射线探

测器22没有足够的分辨率来直接对自身图像进行采样。因此,在常规的装置中,还提供了分析器光栅20。如果分析器光栅20的周期与自身图像的周期相当,则(因感兴趣对象16变形的)自身图像与分析器光栅20的图样(通常被称为莫尔条纹图样)发生叠加。由感兴趣对象16中的相位不均匀性引起的自身图像的变形会导致莫尔条纹图样的进一步变形。

[0091] 常规地,条纹间隔足够大以使得普通数字X射线图像探测器能够探测到由分析器光栅20采样的条纹图样的部分。

[0092] 该方法要求分析器光栅20能在多个步进内物理地移动穿过条纹图样,对变形的自身图像的幅度进行采样以使得能够完全捕获感兴趣对象16的相位轮廓。这种能机械移动的分析器光栅20是不期望的,因为它会导致额外的机器设计复杂性并且会导致X射线检查持续更长时间。当对身体中快速移动的区域进行成像时(例如在心脏成像期间),这会是个问题。

[0093] 此外,分析器光栅20是吸收光栅,它会引起已经通过感兴趣对象的X射线辐射的损失。这是不期望的,因为这会导致对患者施加更高的辐射剂量。

[0094] 图2图示了与图1中所示的常规相位步进方法相关联的示例性采样图样。在图2的曲线图中,纵坐标表示数字X射线探测器的部分上的任意距离单位,并且横坐标表示在数字X射线探测器的对应部分处接收到的任意X射线强度。曲线图的左侧列示出了分析器光栅结构20之前的入射X射线强度。图2的右侧列中的四幅曲线图a)至d)图示了由分析器光栅20在四个不同的分析器光栅偏移距离处滤波的相应左侧列中的X射线信号。换句话说,图2的右侧列图示了在X射线探测器22处出现的四个不同相位组的信号。

[0095] 为了介绍本发明的背景,图3图示了在根据第三方面的X射线成像系统118中包括的根据第二方面的干涉仪110。当然,干涉仪110可以作为单独项被提供给X射线成像系统118,并且所示的两个元件的组合是为了方便而非限制。随后将更全面地解释干涉仪110和X射线成像系统118。

[0096] 相位光栅结构112G1被布置为跨穿过感兴趣对象126的X射线束。X射线探测器114a、114b被布置为使得其结构化闪烁体114a面对相位光栅结构112G1。例如,X射线探测器114A、114B任选地与相位光栅结构112 G1分开Talbot距离 $Z_T$ 或Talbot距离的分数。结构化闪烁体114a对因X射线与相位光栅结构112和感兴趣对象126的相互作用生成的X射线条纹图样的幅度进行采样(或过采样)。通过对X射线条纹图样的幅度进行采样,结构化闪烁体114a使得能够探测由感兴趣对象126引起的X射线束128的相位变化。信号组合电路116生成来自X射线探测器114a、114b的第一输出信号和第二输出信号。

[0097] 图4图示了根据第一方面的用于对相衬X射线成像和/或暗场X射线成像中的入射X射线条纹图样27进行采样的X射线探测器24。任选地,X射线探测器旨在被包括在根据第二方面的干涉仪110内,干涉仪110被包括在根据第三方面的X射线成像系统118内。X射线探测器24包括结构化闪烁体层26,结构化闪烁体层26包括多个平板 $26_1, \dots, 26_N$ ,多个平板 $26_1, \dots, 26_N$ 被布置为对入射条纹图样27进行采样并将入射条纹图样27转换成多个光学平板信号。

[0098] X射线探测器24还包括与结构化闪烁体层26光学通信的光学探测器层30。光学探测器层30包括多个子像素 $30_1, \dots, 30_N$ 。每个子像素与结构化闪烁体层的相应平板 $26_1, \dots, 26_N$ 对齐,以探测从结构化闪烁体层的相应平板 $26_1, \dots, 26_N$ 发射的相应光学平

板信号。

[0099] X射线探测器24还包括信号组合装置32，信号组合装置32被布置为以电子方式从多个子像素30读出表示条纹图样27的信号。

[0100] 光学探测器层30还包括多个光学探测单元34，多个光学探测单元34被配置为基于相关光学平板信号的存在来提供多个探测信号。

[0101] 信号组合装置32被配置为生成至少第一输出信号31<sub>A</sub>和第二输出信号31<sub>B</sub>作为光学探测器层30的光学探测单元34的探测信号的组合。至少第一输出信号31<sub>A</sub>和第二输出信号31<sub>B</sub>均与因在结构化闪烁体层的相应平板26<sub>1</sub>、……、26<sub>N</sub>上接收到入射X射线条纹图样27而引起的空间信号幅度成比例。X射线探测器24的像素信号包括以由平板的宽度W定义的条纹采样分辨率从至少两个相邻子像素采集的至少第一输出信号31<sub>A</sub>和第二输出信号31<sub>B</sub>。在图4的实施例中，平板的宽度W基本上是入射X射线辐射27的条纹周期的一半。

[0102] 因此，基本思想是使用结构化闪烁体阵列26并结合光学探测器层30和信号组合装置32以将入射X射线条纹图样27与相邻闪烁体平板分离，从而采集相衬成像条纹图样的直接测量结果。各个闪烁体平板26<sub>1</sub>、……、26<sub>N</sub>与各个子像素光学对齐。这使得不需要能机械移动的分析器光栅。在图4所示的情况下，通过监测第一输出信号31<sub>A</sub>与第二输出信号31<sub>B</sub>的比率来代替机械步进相位光栅进行位置步进的效果。

[0103] 在图4中，示出了所提出的传感器的实施例，其中，大像素P沿着一个平面方向被分割成六个闪烁体平板。这六个闪烁体平板光学耦合到光学探测器层30。图4还图示了相邻像素。

[0104] 任选地，可以使用结构化闪烁体层26与光学探测层30之间的光学耦合层来实现光学耦合。任选地，光学耦合层被提供为光纤板（未示出）。

[0105] 通常，像素P具有几百微米的宽度，并且被分割成具有约20至30微米的间距的闪烁体平板。光学探测器层30也由具有相同尺寸的多个像素构成。光学探测器层30的每个像素被分割以匹配结构化闪烁体层26的分割。图4示出了光学探测器层30沿着与结构化闪烁体层26相同的方向被分割成六个子像素。光学探测器层30中的子像素与结构化闪烁体层26的平板光学对齐。换句话说，在结构化闪烁体平板26<sub>1</sub>处的相对较高水平的入射X射线辐射将使该平板发射相对较大的光学信号到光学探测器层30的子像素30<sub>1</sub>中。然而，由于闪烁体是结构化的，因此来自结构化闪烁体平板26<sub>1</sub>的相对较大的光学信号不会泄漏到光学探测器层30的相邻子像素中。

[0106] 在图4中，第一输出信号31<sub>A</sub>和第二输出信号31<sub>B</sub>读出光学探测单元的第一输出和第二输出。任选地，例如，可以将两个通道设计为具有闪烁体间隔以将第一信号读出为“峰值”条纹值并且将第二信号读出为条纹图样的“谷值”。在所示实施例中，在“偶数”编号的平板内登记的事件被累积到第一读出通道31<sub>A</sub>中。类似地，在“奇数”编号的平板内登记的事件也被累积到第二读出通道31<sub>B</sub>中。在所示实施例中，每个像素P因此采集与在“奇数”平板和“偶数”平板中登记的信号电平相对应的两个测量结果。

[0107] 在图4所示的实施例中，提供对闪烁体间距W的选择，使得两个通道中的一个通道包含来自条纹图样27的峰值的信息，而另一个通道采集条纹图样27的谷值。因此，闪烁体间距W的选择与X射线探测器24一起使用的系统的入射X射线束的波长密切相关。然而，这是最低要求的情况，并且应当理解，闪烁体间距W能够任选地被设计为对条纹图样27进行过采

样。因此，闪烁体间距W的设计遵循与在设计能移动的分析器光栅的间距时对常规探测器所做的类似考虑。

[0108] 因此，第一输出信号31<sub>A</sub>的输出与第二输出信号31<sub>B</sub>的输出之间的比率指示条纹相位和条纹可见性。然而，在结构化闪烁体被设计为对X射线条纹进行过采样的情况下，闪烁体间距可以任选地被配置为W的分数，例如，条纹周期的三分之一或四分之一。任选地，结构化闪烁体可以被设计为对干涉条纹27进行过采样，这使得能够直接探测相位信息和散射信息。

[0109] 许多不同的光学探测部件可以被包括在光学探测单元内。

[0110] 根据实施例，光学探测单元包括一个或多个硅光电倍增管，所述一个或多个硅光电倍增管被配置为探测从结构化闪烁体层的相应平板发射的相应光学平板信号。

[0111] 硅光电倍增管(SiPM)是固态雪崩光电二极管(APD)的阵列，其对单光子敏感，并且被制造在普通硅基板上。

[0112] 阵列的硅光电倍增管及其淬灭电阻器任选地并联连接。淬灭电阻器允许将电压逆向偏置下降以足以在短时间后停止雪崩。在此之后，APD将再次经由电阻器充电至全偏置电压。尽管阵列的所有硅光电倍增管都是并行读取的，但是每个设备都以数字(“盖革”)模式工作。因此，硅光电倍增管根据接收到一个光子还是数千个光子来生成具有可变动态范围的信号。

[0113] 硅光电倍增管的离散操作模式意味着会丢失关于原始光子的能量的信息。任选地，提出通过提供具有几平方毫米大小的大型硅光电倍增管像素来解决这种缺乏比例性的问题，其中，每个硅光电倍增管像素任选地具有一千个以上的硅光电倍增管单元。硅光电倍增管单元的数量应当足够高，以便能够验证探测到的活动是源自X射线相互作用事件，而不是源自来自硅光电倍增管本身内部的“暗计数”事件。

[0114] 图5图示了使用硅光电倍增管拓扑结构的根据实施例提出的X射线探测器。交替的阴影平板表示位于交替的光学探测器层上方的交替的闪烁体平板与直接光学耦合到闪烁体平板上方的信号组合装置。图5图示了被分成六个结构化闪烁体平板26<sub>1</sub>、……、26<sub>6</sub>的单个像素P，这六个结构化闪烁体平板26<sub>1</sub>、……、26<sub>6</sub>又被光学耦合到被提供在光学探测器层30中的六个子像素30<sub>1</sub>、……、30<sub>6</sub>。任选地，每个硅光电倍增管都具有其自己的淬灭电阻器。任选地，可以使用有源硅光电倍增管淬灭电路。

[0115] 所示的拓扑结构示出了共阴极装置，其中，硅光电倍增管的二极管阴极一起连接到阴极38。在每个子像素30<sub>1</sub>、……、30<sub>6</sub>内，硅光电倍增管的阳极连接在一起。因此，流过一个子像素的阳极连接的电流对应于在该子像素中激发的硅光电倍增管的电流之和。图5中的信号组合装置32是阳极每隔一个平板与第一信号组30<sub>1</sub>、30<sub>3</sub>、30<sub>5</sub>和第二信号组30<sub>2</sub>、30<sub>4</sub>、30<sub>6</sub>的总线连接。其实际效果是将所有与条纹间距的前半部分相关的探测到的光子事件相加在一起以形成第一输出信号31<sub>A</sub>，并且将所有与条纹间距的后半部分相关的探测到的光子事件相加在一起以形成第二输出信号31<sub>B</sub>。

[0116] 任选地，提供X射线探测器24，其中，与一个子像素相关联的多个光学探测单元34并联电连接，以在操作中生成与由来自结构化闪烁体层26的平板的光发射触发的光学探测单元的数量成比例的第一输出信号和/或第二输出信号。

[0117] 在操作中，当在结构化闪烁体平板26<sub>1</sub>处经历大的X射线通量时，对应大的可见光

通量被光学传输到子像素30<sub>1</sub>中。大的可见光通量将引起硅光电倍增管34<sub>A</sub>、34<sub>B</sub>、34<sub>C</sub>、34<sub>D</sub>、34<sub>E</sub>、34<sub>F</sub>中的大部分激发，并且对应大的电流被提供为第一输出信号31<sub>A</sub>。

[0118] 任选地，信号组合装置可以包括用于每个输出信号31<sub>A</sub>、31<sub>B</sub>的信号验证电路（未示出）。信号验证电路被配置为分别向第一输出信号31<sub>A</sub>和/或第二输出信号31<sub>B</sub>应用阈值，以确保硅光电倍增管报告真实的闪烁体相互作用，而不是报告暗计数。因此，当一定数量的单元在由所使用的闪烁体材料限定的时间间隔内激发时，认为存在有效事件。信号验证电路可以以模拟形式被提供为比较器，或者在模数转换级之后被提供为数字比较器。

[0119] 流过平板下方的一个子像素中的阳极的电流对应于来自子像素中激发的硅光电倍增管的电流之和。任选地，在平板下面的多个子像素间不共享阳极信号，并且对每个平板执行事件验证，使得第一输出信号31<sub>A</sub>和第二输出信号31<sub>B</sub>能够是所有验证事件之和。

[0120] 在前面的讨论中，已经讨论了涉及具有被分成两个交替的平板组的六个平板的一个像素的拓扑结构。本领域技术人员将理解，典型的X射线探测器将具有数千个像素。这些像素可以被细分成任意数量的平板，并且任意数量的平板可以互连以利用三个通道、四个通道、五个通道、六个通道或更多个通道对入射X射线的条纹进行采样。利用更多数量的通道对入射X射线图样的条纹进行采样使得条纹图样能够被过采样，从而提供增强的图像分辨率。

[0121] 根据实施例，提供了如前所述的X射线探测器24，其中，信号组合装置能被配置成第一模式，在第一模式中，从相邻子像素的第一集合采集第一输出信号31<sub>A</sub>和第二输出信号31<sub>B</sub>，并且信号组合装置能被配置成第二模式，在第二模式中，从相邻子像素的第二集合采集第一输出信号和所述第二输出信号，其中，子像素的第一集合和第二集合相对于彼此以一定角度对齐，由此使得能够在不同方向上进行子像素累积而无需调整X射线探测器的位置。

[0122] 任选地，子像素的第一集合与第二集合以90°的角度对齐（换句话说，子像素的第一集合与第二集合的子像素形成矩形网格）。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至90°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至80°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至60°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合以0°至30°之间的内角对齐。因此，可以在许多不同方向上对条纹图样进行采样。

[0123] 该申请涉及对相衬条纹的直接测量，这可以消除常规的相衬成像系统10的分析器光栅20。常规地，布置光栅和/或闪烁体平板而使得避免在平行于光栅或矩形闪烁体平板的方向上缺少临床相关结构，需要最少两次采集，包括将源光栅(G0)、相位光栅(G1)和分析器光栅(G2)旋转90°。在使用具有矩形闪烁体平板的直接条纹探测器的情况下，探测器本身也需要旋转。

[0124] 以下实施例描述了用于在相衬X射线探测器中使用的自适应像素拓扑结构，其可以在不旋转探测器的情况下分辨精细结构。

[0125] 图6a)图示了具有四个像素P<sub>1</sub>、……、P<sub>4</sub>的常规的探测器拓扑结构。覆盖像素的闪烁体各自沿着一个方向进行构造。换句话说，两个交替的平板通道具有大的纵横比。常规地，该配置假设在一个长的方向上进行精细构造，而仍然可以另一个方向上使用原始数字探测器的间距。在示例中，200μm×200μm的常规像素尺寸可以在x方向上被构造成10个平板，而

沿着y方向,平板保持被构造为其原始的200μm的长度。

[0126] 上述拓扑结构意味着优选在一个方向上探测精细结构。为了确保不会丢失沿着另一个方向的临床相关结构,必须提供旋转光栅(源光栅和相位光栅)的方法。这将需要同步旋转所有光栅,准确实现这种要求且具有廉价的机械设计是困难的。因此,提出了将2D结构化阵列与能够沿着其他优选方向选择性布置子像素分箱的电子读出电路相结合。

[0127] 图6b)图示了已经转过90度的常规的平板装置。

[0128] 图7a)图示了在常规的像素P<sub>1</sub>、……、P<sub>4</sub>的边界内精细构造的二维子像素化拓扑结构。该子像素化拓扑结构包括多个硅光电倍增管或光电二极管作为光学探测单元。2D可选择直接条纹探测器能在两种模式之间切换,其中,在第一模式中,沿着第一优选方向对输出信号进行分箱,而在第二模式中,沿着第二优选方向对输出信号进行分箱。在图7a)中,2D可选择直接条纹探测器被示为处于第一模式,其中,条纹图样由在垂直方向上具有交替的平板通道的四个像素进行采样。图7b)示出了第二模式,其中,条纹图样由在水平方向上具有交替的平板通道的四个像素进行采样。

[0129] 应当理解,被配置为使用该实施例的探测器的X射线干涉仪和/或系统将要求源光栅G0和相位光栅G1随着在第一模式与第二模式之间改变而旋转90°,反之亦然。

[0130] 图8示出了用于获得用于如在关于图7的非限制性示例的概念性术语中所讨论的那样对条纹采样进行取向的可选择的垂直和水平子像素布置的电路的示意图,在上述关于图7的非限制性示例中,子像素的第一集合与第二集合在不同模式中彼此垂直对齐。

[0131] 虚线40图示了常规的像素边界。在常规的像素边界内是光学探测元件42的网格,光学探测元件42任选地(并且如图所示)是多个硅光电倍增管。任选地,光学探测元件42的网格包括光电二极管或者与光电二极管进行组合。在图8的示例中,硅光电倍增管的阴极接地,并且硅光电倍增管的阳极经由淬灭电阻器连接到Hz和Vt选择开关。标签“Hz”是指指示水平取向的数字信号,并且标签“Vt”是指指示垂直取向的数字信号。这两个信号是互补的。

[0132] 任选地,硅光电倍增管被提供有有源淬灭元件。

[0133] 任选地,每个光学探测元件42被提供为硅光电倍增管的并联网络,如图5中的特征34<sub>A,B</sub>所示。在这种情况下,每个并联网络的输出分别连接到开关Hz和Vt。

[0134] 在图8中,图示了同时处于开路的Hz和Vt开关,但这仅仅是为了清楚地提供示意图中的开关位置。在操作中,当Hz开关闭合时,Vt开关将处于开路。当Hz开关处于开路时,Vt开关将闭合。

[0135] 在这种情况下,信号组合装置包括开关Hz和Vt的网络以及使得能够将第一输出信号和第二输出信号沿着优选方向分箱的总线。当Hz开关闭合且Vt开关处于开路时,连接交替的水平行的光学探测元件。当Hz开关处于开路且Vt开关闭合时,连接交替的垂直行的光学探测元件。因此,可以在水平方向和垂直方向上对X射线条纹图样的条纹进行采样并将X射线条纹图样的条纹输出为至少第一输出信号和第二输出信号。

[0136] 例如,当执行暗场成像时,该方法可能是特别有利的,因为它允许在多个方向上确定精细的临床结构,而无需对患者或X射线成像系统进行复杂的重新布置。

[0137] 根据第一方面的实施例(在图9中示出了其非限制性示例),提供了X射线探测器24,其中,结构化闪烁体44<sub>1</sub>、44<sub>2</sub>、44<sub>3</sub>、44<sub>4</sub>、44<sub>5</sub>、44<sub>6</sub>还包括:第一闪烁体元件44<sub>1</sub>和第二闪烁体元件44<sub>2</sub>,它们各自由彼此具有不同衰减时间常数的不同闪烁体材料形成。信号组合装置48

还包括第一事件验证滤波器48a和第二事件验证滤波器48b。

[0138] 减少第一闪烁体平板和第二闪烁体平板中的光学串扰是有利的,因为这种串扰会使得所获得的条纹图样变得模糊。根据该实施例,提出在结构化闪烁体中的相应的交替闪烁体平板中使用两种不同类型的材料。

[0139] 具有不同衰减时间常数的两种不同类型的闪烁体材料的示例任选地是BG0和LYSO,如前所述,但是本领域技术人员还会想到许多其他闪烁体材料的组合。

[0140] 每种类型的不同闪烁体材料都会表现出显著不同的衰减时间常数。换句话说,对在平板44下面的光学探测器层46中的光学探测单元的激励将会引起作为时间的函数的累积的激发图样。任选地,每个个体光学探测单元被配置为独立于多个探测单元中的其他光学探测单元进行刷新。因此,对于单个光子相互作用事件,各个光学探测单元可以重新激发多次。

[0141] 第一输出信号或第二输出信号的幅度将会表现出不连续的步进。信号将会是全尺度的,这取决于每个闪烁体平板的光学探测单元的数量。

[0142] 在图9所示的实施例中,为每个平板提供匹配的滤波器48a、48b(或者任选地,为像素内的每个平板类型提供一个匹配的滤波器)。匹配的滤波器使得能够鉴别由子像素探测到的信号,从而鉴别信号是由直接在子像素上方的闪烁体平板生成的,还是由来自相邻闪烁体平板的光学串扰引起的。

[0143] 任选地,丢弃未能由数字滤波器48a、48b验证为源自正确的闪烁体平板的事件。由数字滤波器48a和48b识别的被确定为源自正确的平板的有效事件对该特定闪烁体平板和子像素的第一输出信号50a和/或第二输出信号50b做出贡献。

[0144] 任选地,来自第一闪烁体平板下面的子像素的丢弃信号被提供给用于交替信号类型的滤波器(未示出)。因此,可以将归因于第一闪烁体平板44<sub>1</sub>的输出信号提供给44<sub>2</sub>的对应探测器电路,而被确定为源自与第一闪烁体平板相邻的平板的信号被提供给这些相邻平板的探测电路。相邻平板的探测电路可以任选地应用重合逻辑单元(未示出)来验证被第一闪烁体平板拒绝的信号是否源自相邻平板中的一个平板。如果确定该信号源自相邻平板中的一个平板,则将信号添加到该相邻平板的输出。

[0145] 以这种方式,可以提高X射线探测器24的信噪比。

[0146] 根据第一方面的实施例(在图10中图示出其示例),提供了X射线探测器70。X射线探测器还包括被设置在结构化闪烁体层71与光学探测器层74之间的结构化滤色器层72。第一闪烁体元件71<sub>1</sub>被配置为发射具有第一波长的可见光,并且第二闪烁体元件71<sub>2</sub>被配置为发射具有第二波长的可见光。结构化滤色器层72被配置为在光学探测器层74中的探测之前对具有相应波长的第一可见光和第二可见光进行滤波,以提高光学探测器层的串扰性能。

[0147] 在图10中,示出了根据该实施例的X射线探测器的剖视示意图。闪烁体平板71<sub>1</sub>、71<sub>3</sub>、71<sub>5</sub>被提供为发射第一波长的第一闪烁体材料,并且闪烁体平板71<sub>2</sub>、71<sub>4</sub>和71<sub>6</sub>被提供为发射第二波长的第二闪烁体材料。光学探测器层74中的对应光学探测单元被滤光器层72覆盖。滤光器层72包括具有第一颜色和第二颜色的多个滤色器,每个滤色器被适当地调谐到由上述对应的闪烁体发射的可见光的波长。任选地,光学探测单元73<sub>1</sub>、73<sub>2</sub>、73<sub>3</sub>、73<sub>4</sub>、73<sub>5</sub>、73<sub>6</sub>被提供为具有有源或无源淬灭电路的硅光倍增管(如图9所示,具有无源淬灭电阻器)。

[0148] 图11图示了备选实施例,其包括具有像素P的X射线探测器76,像素P包括结构化闪

闪烁层78，其中，结构化闪烁体的第一集合78<sub>1</sub>、78<sub>3</sub>和78<sub>5</sub>是第一类型的闪烁体材料，并且结构化闪烁体的第二集合78<sub>2</sub>、78<sub>4</sub>和78<sub>6</sub>是第二类型的闪烁体材料。第一类型和第二类型的闪烁体材料具有不同的衰减时间常数。光学探测器层还包括光学探测单元，光学探测单元包括光电二极管，每个像素P有一个光电二极管。备选地，光学探测单元包括具有有源或无源淬灭电路的硅光电倍增管。

[0149] 光学探测层80包括连接到形成信号组合装置的双通道光子计数前端电子电路的光电二极管102。光子计数前端电子电路具有对第一衰减时间常数敏感的第一通道80a和对第二衰减时间常数敏感的第二通道80b。因此，前端通道可以分离源自任一类型的闪烁体平板的事件。

[0150] 快速通道82包括第一放大器86和第一整形器88，它们与鉴别器90和第一计数器92串联。慢速通道84包括第二放大器94、第二整形器96，它们与第二放大器98和第二计数器100串联。

[0151] 在操作中，图11中图示的X射线探测器76包括快速整形器通道82，快速整形器通道82被配置为针对源自快速闪烁体78<sub>1</sub>、78<sub>3</sub>和78<sub>5</sub>的事件生成足够幅度的脉冲高度。来自慢速闪烁体78<sub>2</sub>、78<sub>4</sub>和78<sub>6</sub>的信号将引起大的弹道亏损，从而允许忽略来自慢速闪烁体的贡献。对较快闪烁体的脉冲高度的鉴别使得能够解释源自相同类型的平板的事件的数量。闪烁体的衰减时间常数的差异使得来自慢速闪烁体的所得能量基础足够低而不会显著损害对快速事件的鉴别。

[0152] 慢速整形器通道82根据由慢速闪烁体产生的事件来产生可接受的信号。任选地，电荷敏感放大器表现出慢的转换速率，由此滤除了仅能够由快速闪烁体引起的事件，这避免了来自快速闪烁体的过多背景电荷。

[0153] 所描述的快速-慢速架构能够分离源自具有不同衰减时间常数的结构化闪烁体平板的光子。任选地，提供电流镜104以复制光电二极管电流I<sub>PD</sub>。

[0154] 根据本实施例，信号组合装置读取每个像素P的通道。读出通道的数量任选地与每个闪烁体类型的光子相互作用的数量相对应。例如，在所示的具有两种类型的闪烁体材料的系统中，将提供两个读出通道，每个读出通道对来自相应的不同闪烁体材料的光子相互作用的数量进行计数。该拓扑结构特别适用于光子计数电子器件，在光子计数电子器件中，仅登记事件的数量，而忽略了X射线光子的能量。任选地，X射线探测器可以是多能量分箱探测器。

[0155] 任选地，图11的信号组合装置可以被提供为两个整形器共用的单个电荷敏感放大器(CSA)级。CSA耦合到整形器88和96。技术人员将理解，可以使用许多不同的拓扑结构，这些拓扑结构具有与上面讨论的功能类似的功能。任选地，给定特定像素尺寸和光电二极管电容器的等效电容，可能不需要使用CSA级。如果等效输入电容足够小，则可以完全去除CSA，从而提供单级整形器拓扑结构。在该实施例中，每个像素需要单个光电二极管。然而，取决于所选择的闪烁体类型和X射线通量，可以提供进一步的子像素化。

[0156] 任选地，针对每个条纹间距提供两个以上的结构化闪烁体平板。例如，可以针对每个条纹间距提供三个结构化闪烁体平板。备选地，可以针对每个条纹间距提供四个结构化闪烁体平板。光学探测器单元(例如，硅光电倍增管单元组或光电二极管)的数量应当按比例增加，或者应当采用具有三个或四个不同响应时间或闪烁波长的闪烁体。通过在更大的X

射线相衬成像系统中移动源光栅G0或相位光栅G1,针对每个条纹间距采用两个以上的采样点使得不需要相位步进。

[0157] 任选地,信号组合装置提供了将所有平板信号或子像素信号读出为个体信号的可能性,而不是将它们相加在一个像素区内部。利用个体读出信号,与每个平板相对应的子像素的大小将在 $5\mu\text{m}$ 至 $20\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ 之间。然后能够通过在数字域中执行平板信号的添加来提取相位信息和幅度信息。该方法还允许处理平板间距与条纹间距的分数比,例如,每个条纹2.4个平板。在数字域中,与预期条纹频率的余弦函数和正弦函数相乘并随后求和能够提供正确的求和信号。

[0158] 信号组合装置116及其任选实施例可以以许多不同的方式实施,现在将对其进行讨论。

[0159] 图5图示了包括相邻子像素的硅光电倍增管的信号组合装置,该硅光电倍增管并联连接以对来自相邻子像素的输出电流求和。该信号组合装置包括硅光电倍增管之间的布线和互连,这些布线和互连能够例如通过以半导体制造工艺在硅基板上沉积金属轨道来提供。

[0160] 参考图8,信号组合装置116提供总线和开关Hz和Vt的网络。开关Hz和Vt的互补切换使得相邻子像素能够以与图5中相同的方式并联连接,然而,改变开关Hz和Vt的设置使得相邻子像素互连能够旋转90°。开关Hz和Vt能够被实施为例如集成硅开关或集成CMOS模拟开关。

[0161] 图9图示了这样的实施例,其中,交替的子像素与具有不同衰减时间常数的两种类型的闪烁体平板44<sub>1</sub>、44<sub>2</sub>进行光学通信。第一事件验证滤波器48a和第二事件验证滤波器48b使得能够分离错误输入的且相邻的子像素的光信号(作为光学串扰)。第一事件验证滤波器48a和第二事件验证滤波器48b能够被实施为模拟滤波电路,该模拟滤波电路使用例如与被探测的闪烁体材料的衰减常数相对应的匹配滤波器。

[0162] 备选地或组合地,能够使用模数转换器(ADC)将来自子像素的探测信号从模拟格式转换成数字格式。然后,第一事件验证滤波器48a和第二事件验证滤波器48b将被提供为数字信号处理(DSP)模块中的数字滤波器。DSP模块能够被实施在现场可编程门阵列(FPGA)或专用集成电路(ASIC)中。备选地或组合地,DSP模块能够被实施在微处理器或计算机处理器上。

[0163] 因此,能够以许多不同方式提供上述实施例中讨论的信号组合装置116,同时保留所公开的功能。

[0164] 根据第二方面,提供了一种用于相衬X射线成像或暗场X射线成像的干涉仪110。所述干涉仪包括:

[0165] 相位光栅结构112;以及

[0166] 根据上述第一方面或其实施例的X射线探测器114a、114b、116。

[0167] 所述相位光栅结构和所述X射线探测器被布置在光路中,使得所述相位光栅结构和所述X射线探测器的所述结构化闪烁体层形成用于关联X射线辐射的干涉仪装置。

[0168] 图3图示了当图1的元件落在支架110之间时的干涉仪。

[0169] 根据第三方面,提供了一种X射线成像系统118,包括:

[0170] X射线源120;

[0171] 根据第二方面的干涉仪110;以及

[0172] 控制器122。

[0173] 控制器122被配置为激述X射线源120以利用X射线辐射128照射能被定位在光路中的感兴趣对象126。干涉仪110的X射线探测器114a、114b被配置为对X射线波前进行采样和探测。控制器122被配置为以电子方式从干涉仪110的X射线探测器114a、114b、116的多个子像素读出表示条纹图样的信号。

[0174] 图3图示了当该元件落在支架118内时的系统118。

[0175] 任选地,控制器122是嵌入式计算机、个人计算机PC或使得能够控制X射线系统和处理输出信息的另一处理单元。

[0176] 任选地,X射线成像系统是逆向X射线相衬成像系统,其中,源光栅G0与相位光栅G1之间的距离小于相位光栅G1与分析器光栅G2之间的距离。

[0177] 任选地,X射线成像系统是X射线相衬成像系统,其中,源光栅G0与相位光栅G1之间的距离大于相位光栅G1与分析器光栅G2之间的距离。

[0178] 任选地,控制器122被配置为使用宽范围的X射线相衬图像重建算法根据以电子方式从X射线探测器114a、114b、116的信号组合装置读出的信号来准备X射线图像输出数据。控制器122可以在任选包括的控制器显示器(未示出)上显示X射线图像输出数据,或者能够将X射线图像输出数据传输到服务器(未示出)或PACS系统(未示出)以供进一步使用。

[0179] 任选地,X射线源120是相干X射线源。

[0180] 任选地,提供具有两种模式的X射线成像系统的实施例。X射线探测器的信号组合装置116能被配置成第一模式,在第一模式中,从相邻子像素的第一集合采集第一输出信号和第二输出信号,并且信号组合装置116能被配置成第二模式,在第二模式中,从相邻子像素的第二集合采集第一输出信号和第二输出信号,其中,相邻子像素的第一集合和第二集合相对于彼此以一定角度对齐,由此使得能够在不同方向上进行子像素累积而无需调整X射线探测器的位置。

[0181] 任选地,子像素的第一集合与第二集合以90°的角度对齐(换句话说,子像素的第一集合与第二集合的子像素形成矩形网格)。任选地,子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至90°之间的内角对齐。任选地,子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至80°之间的内角对齐。任选地,子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至60°之间的内角对齐。任选地,子像素的第一集合与第二集合以0°至30°之间的内角对齐。

[0182] 在该系统的该实施例中,X射线源120中包括的X射线源120(和/或源光栅124(G0))能围绕轴从X射线源120指向X射线探测器114a、114b、116在第一轴向状态与第二轴向状态之间旋转。当X射线探测器114a、114b、116的信号组合装置116被配置成其第一模式时,X射线源120被设置在第一轴向状态中。当X射线探测器114a、114b、116的信号组合装置116被配置成其第二模式时,X射线源120(和/或其源光栅124(G0))旋转到第二轴向状态。与第一轴向状态相比,第二轴向状态绕轴顺时针或逆时针旋转大约90°(但是也能够使用一系列其他角度,如上所述)。这使得能够通过旋转X射线源120和/或源光栅124(G0)在两个优选方向上探测精细结构。

[0183] 根据第四方面,提供了一种用于相衬X射线成像和/或暗场X射线成像的方法130,包括以下步骤:

- [0184] a) 生成132X射线辐射以检查感兴趣对象并将X射线辐射导向感兴趣对象；  
[0185] b) 在X射线探测器134处接收已经被感兴趣对象相位调制的X射线辐射；  
[0186] c) 使用包括多个平板的结构化闪烁体层将经调制的X射线辐射转换136成多个光学平板信号，所述多个平板被布置为对入射条纹图样进行采样；  
[0187] d) 使用与包括多个子像素的结构化闪烁体层光学通信的光学探测器层来探测138多个光学平板信号，其中，每个子像素与结构化闪烁体层的相应平板对齐以探测从结构化闪烁体层的相应平板发射的相应光学平板信号，其中，光学探测器层还包括多个光学探测单元，所述多个光学探测单元被配置为基于相关光学平板信号的存在来提供多个探测信号；  
[0188] e) 使用信号组合装置以电子方式从多个子像素读出140表示条纹图样的信号，  
[0189] 其中，信号组合装置被配置为生成至少第一输出信号和第二输出信号作为子像素的光学探测单元的探测信号的组合，其中，至少第一输出信号和第二输出信号均与因在结构化闪烁体层的相应平板上接收到入射X射线条纹图样而引起的空间信号幅度成比例，并且其中，X射线探测器的像素信号包括以由平板的宽度定义的条纹采样分辨率从至少两个相邻子像素采集的至少第一输出信号和第二输出信号。  
[0190] 图12图示了根据第四方面的方法。  
[0191] 任选地，提供具有两种模式的第四方面的实施例。在步骤d1) 中，X射线探测器的信号组合装置116被配置成第一模式，在第一模式中，从相邻子像素的第一集合采集第一输出信号和第二输出信号。  
[0192] 在步骤e1) 中，使用信号组合装置以电子方式从相邻子像素的第一集合读出表示在第一方向上的条纹图样的信号。  
[0193] 在步骤d2) 中，X射线探测器的信号组合装置被配置成第二模式，在第二模式中，从相邻子像素的第二集合采集第一输出信号和第二输出信号，其中，相邻子像素的第一集合和第二集合相对于彼此以一定角度对齐。  
[0194] 在步骤e2) 中，使用信号组合装置以电子方式从相邻子像素的第二集合读出表示在第二方向上的条纹图样的信号。  
[0195] 应当理解，可以预想到步骤d1)、d2)、e1) 和e2) 的各种读出序列。例如，序列d1)、e1)、d2)、e2) 可能是优选的。任选地，也可以应用序列d2)、e2)、d1)、e1)。  
[0196] 任选地，子像素的第一集合与第二集合以90°的角度对齐(换句话说，子像素的第一集合与第二集合的子像素形成矩形网格)。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至90°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至80°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合彼此以0°至60°之间的内角对齐。任选地，子像素的第一集合与第二集合以0°至30°之间的内角对齐。  
[0197] 根据第五方面，提供了一种用于控制根据第三方面的X射线成像系统的计算机程序单元，所述计算机程序单元当由处理单元运行时适于执行根据第四方面的方法的步骤。  
[0198] 根据第六方面，提供了一种存储有根据第五方面的计算机程序单元的计算机可读介质。  
[0199] 因此，计算机程序单元可以被存储在计算机单元中，所述计算机程序单元也可以是本发明的实施例的部分。该计算单元可以适于执行或引发对上述方法的步骤的执行。此

外,该计算单元可以适于操作上述装置的部件。该计算单元能够适于自动操作和/或运行用户的命令。计算机程序可以被加载到数据处理器的工作存储器中。因此,可以装备数据处理器来执行本发明的方法。

[0200] 本发明的该示例性实施例覆盖从一开始就使用本发明安装的计算机程序,以及借助于将现有程序更新转换为使用本发明的程序的计算机程序二者。

[0201] 计算机程序可以被存储和/或被分布在合适的介质上,例如,与其他硬件一起或作为其他硬件的部分供应的光学存储介质或固态介质,但是也可以以其他形式分布,例如经由互联网或其他有线或无线的电信系统分布。然而,计算机程序也可以存在于网络(如万维网)上,并且能够从这样的网络被下载到数据处理器的工作存储器中。

[0202] 根据本发明的另外的示例性实施例,提供了用于使计算机程序单元可用于下载的介质,所述计算机程序单元被布置为执行根据本发明的先前描述的实施例中的一个实施例的方法。

[0203] 应当注意,本发明的实施例是参考不同主题来描述的。尤其地,一些实施例是参考方法型权利要求来描述的,而其他实施例是参考装置型权利要求来描述的。然而,除非另有说明,本领域技术人员将从以上和以下的描述中推断出,除属于一种类型的主题的特征的任意组合之外,涉及不同主题的特征之间的其他组合也被认为在本申请中被公开。然而,所有的特征都能够被组合来提供多于特征的简单加合的协同效应。

[0204] 虽然已经在附图和前面的描述中详细图示和描述了本发明,但是这样的图示和描述应当被认为是图示性或示例性的,而非限制性的。本发明不限于所公开的实施例。本领域技术人员通过研究附图、公开内容以及权利要求,在实践请求保护的发明时能够理解并实现对所公开的实施例的其他变型。

[0205] 在权利要求中,“包括”一词不排除其他元件或步骤,并且词语“一”或“一个”不排除多个。单个处理器或其他单元可以实现在权利要求中记载的若干项的功能。虽然某些措施被记载在互不相同的从属权利要求中,但是这并不指示不能有利地使用这些措施的组合。权利要求中的任何附图标记都不应被解释为对范围的限制。

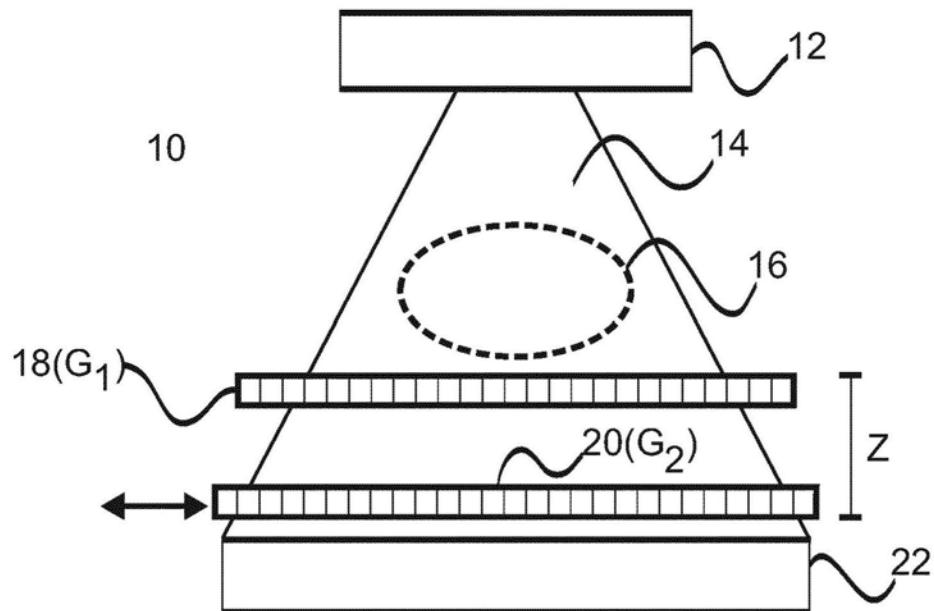


图1

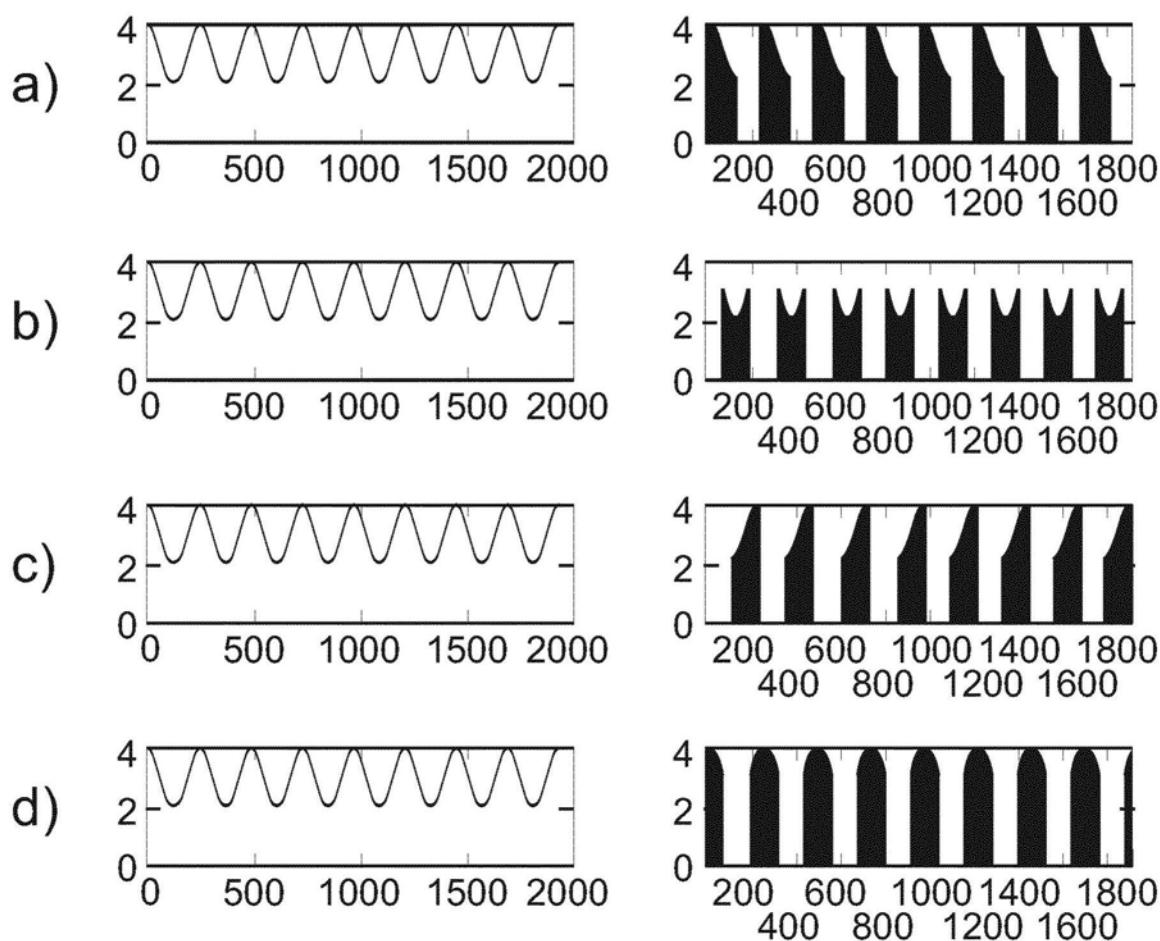


图2

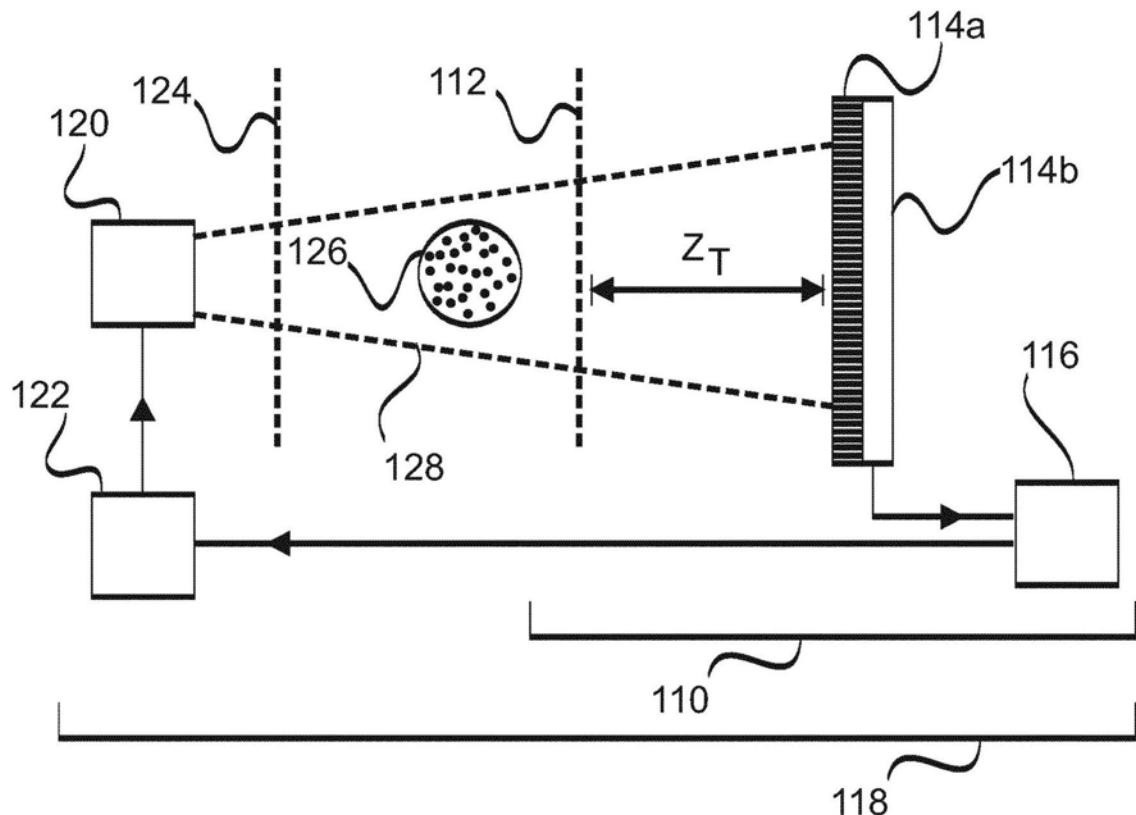


图3

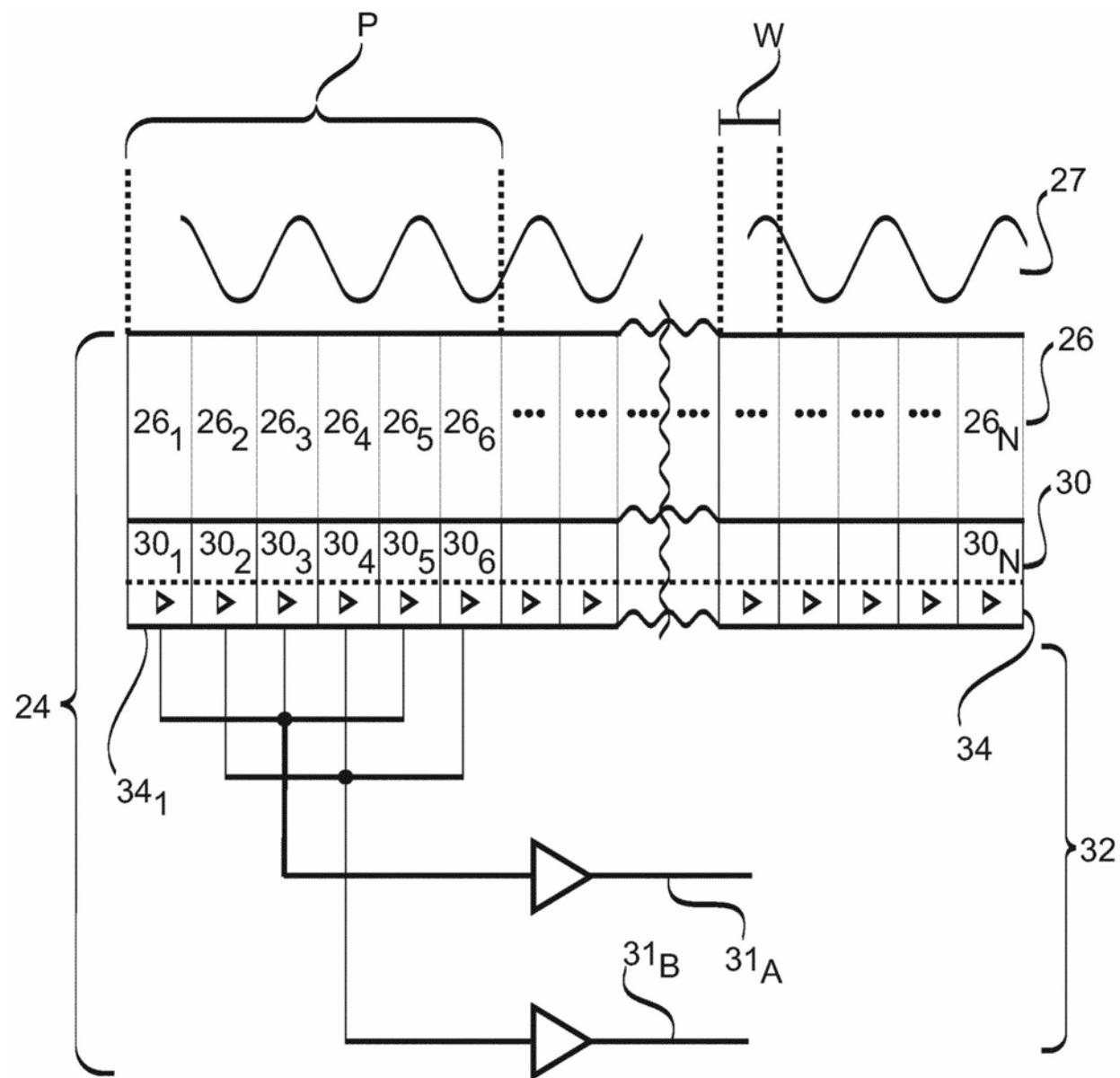


图4

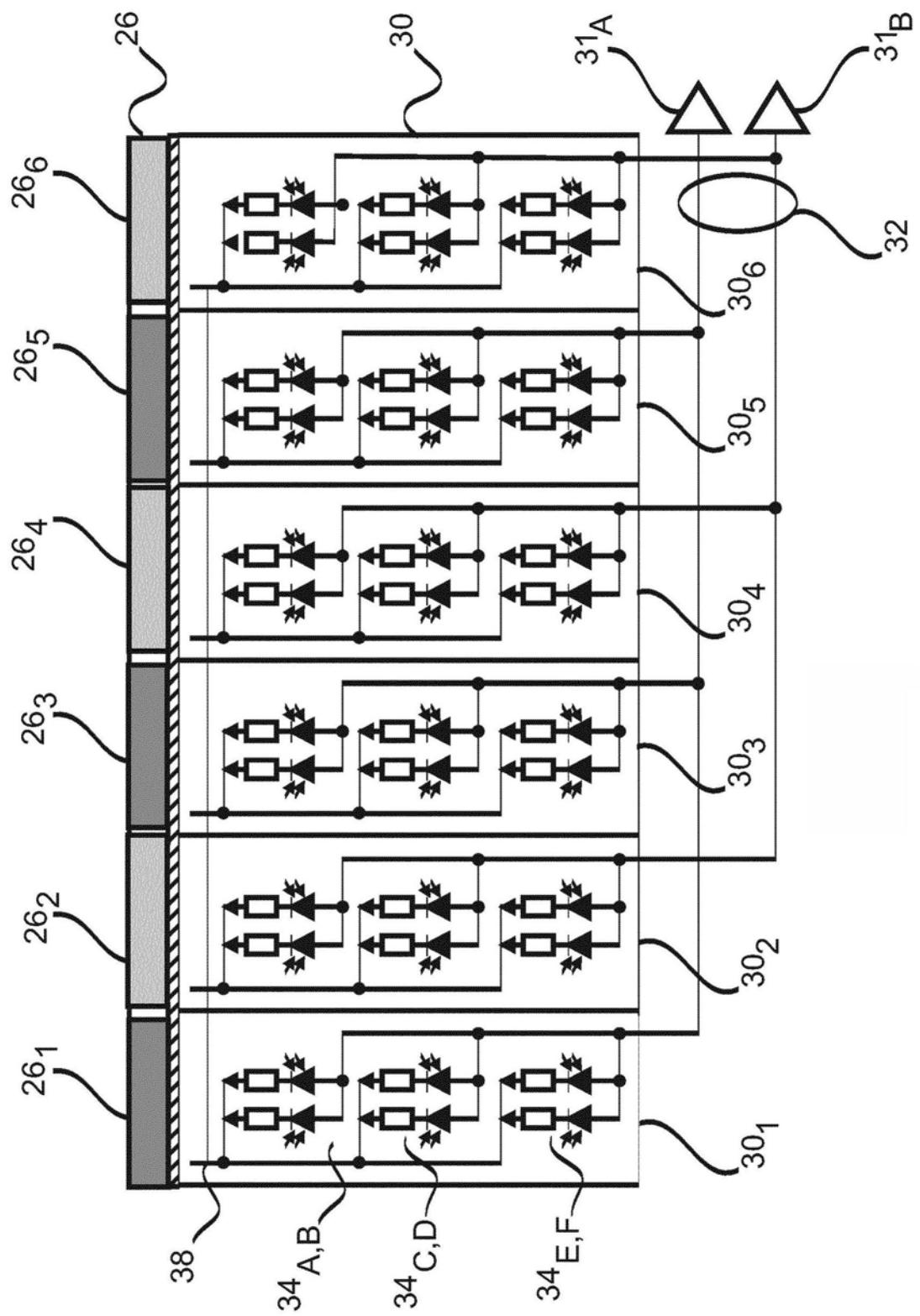


图5

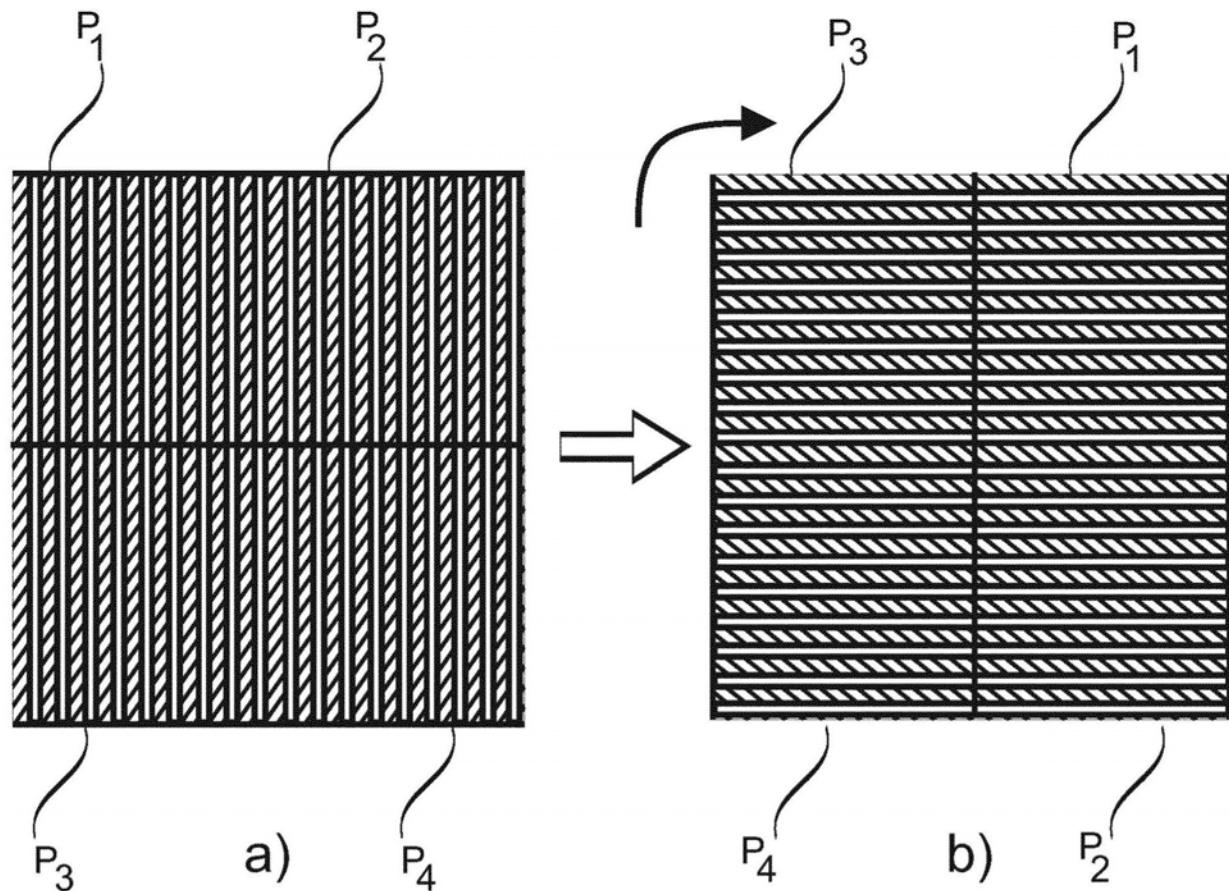


图6

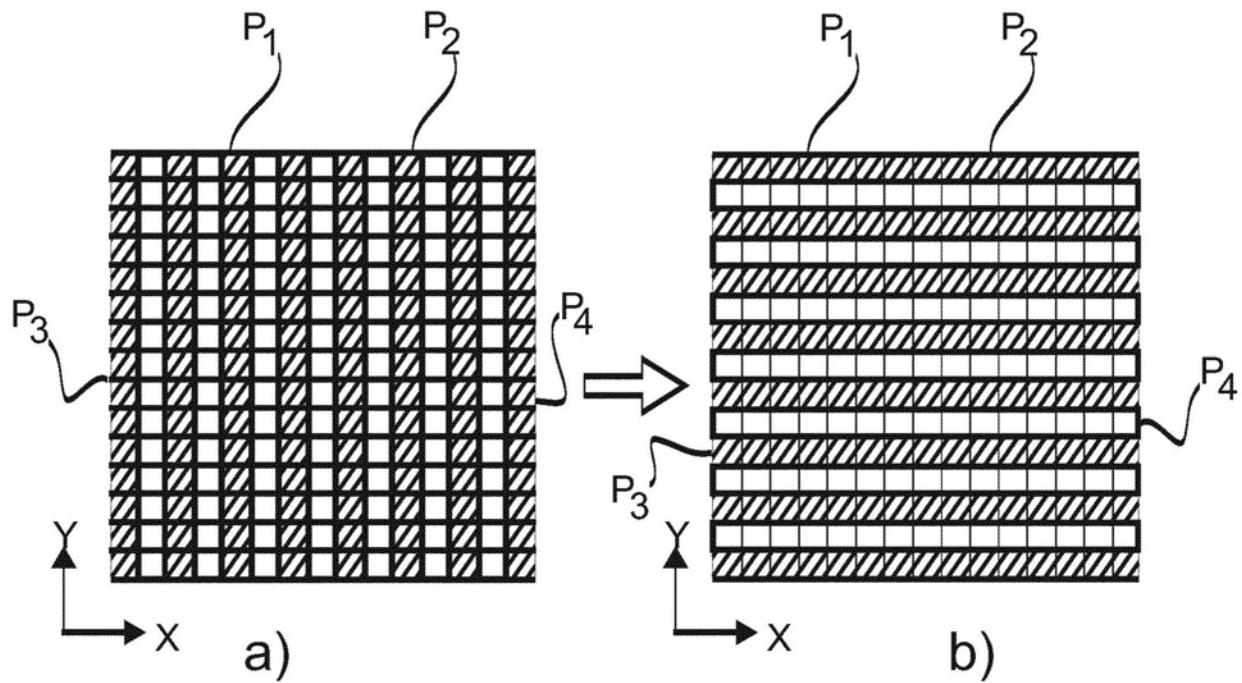


图7

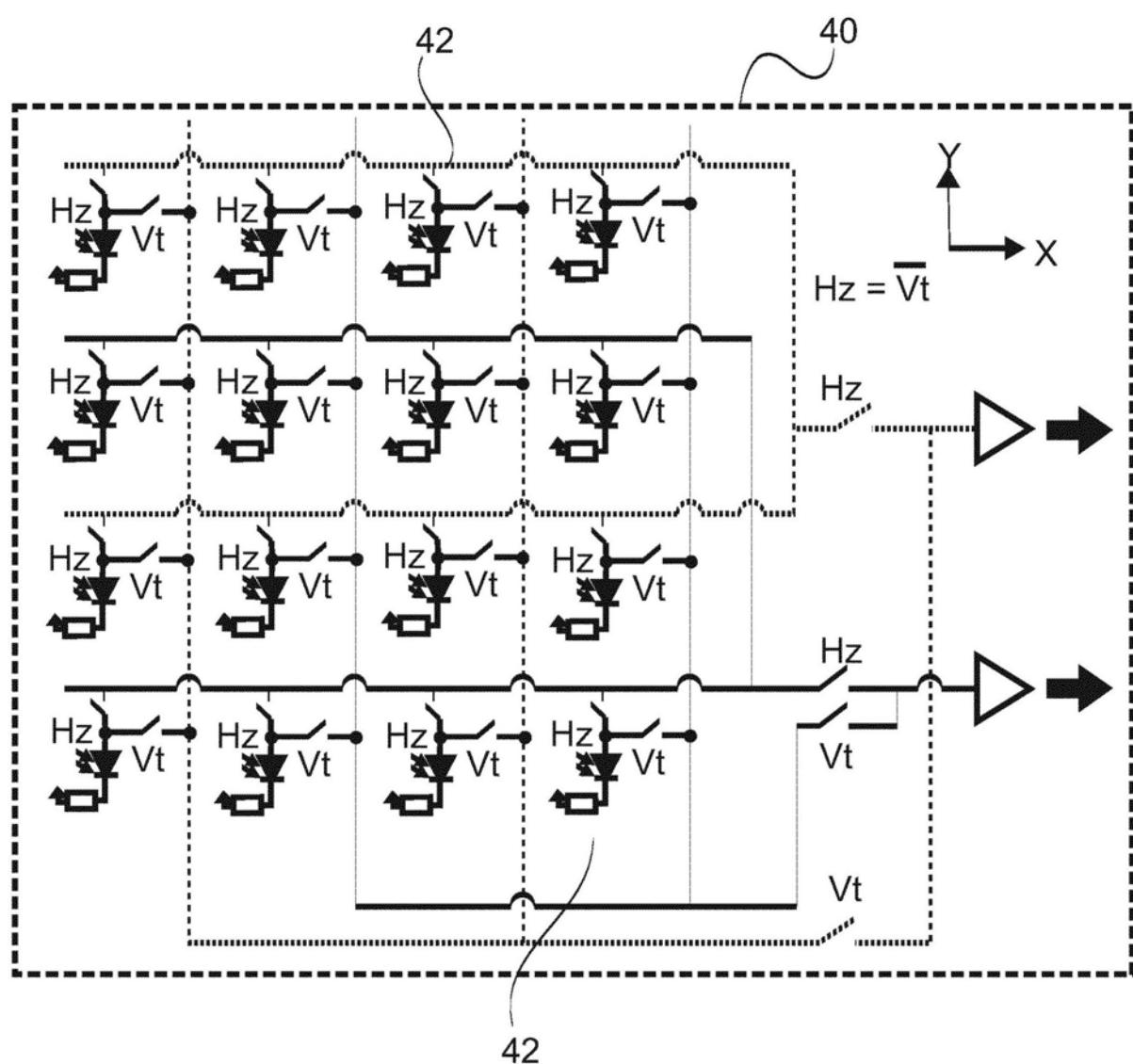


图8

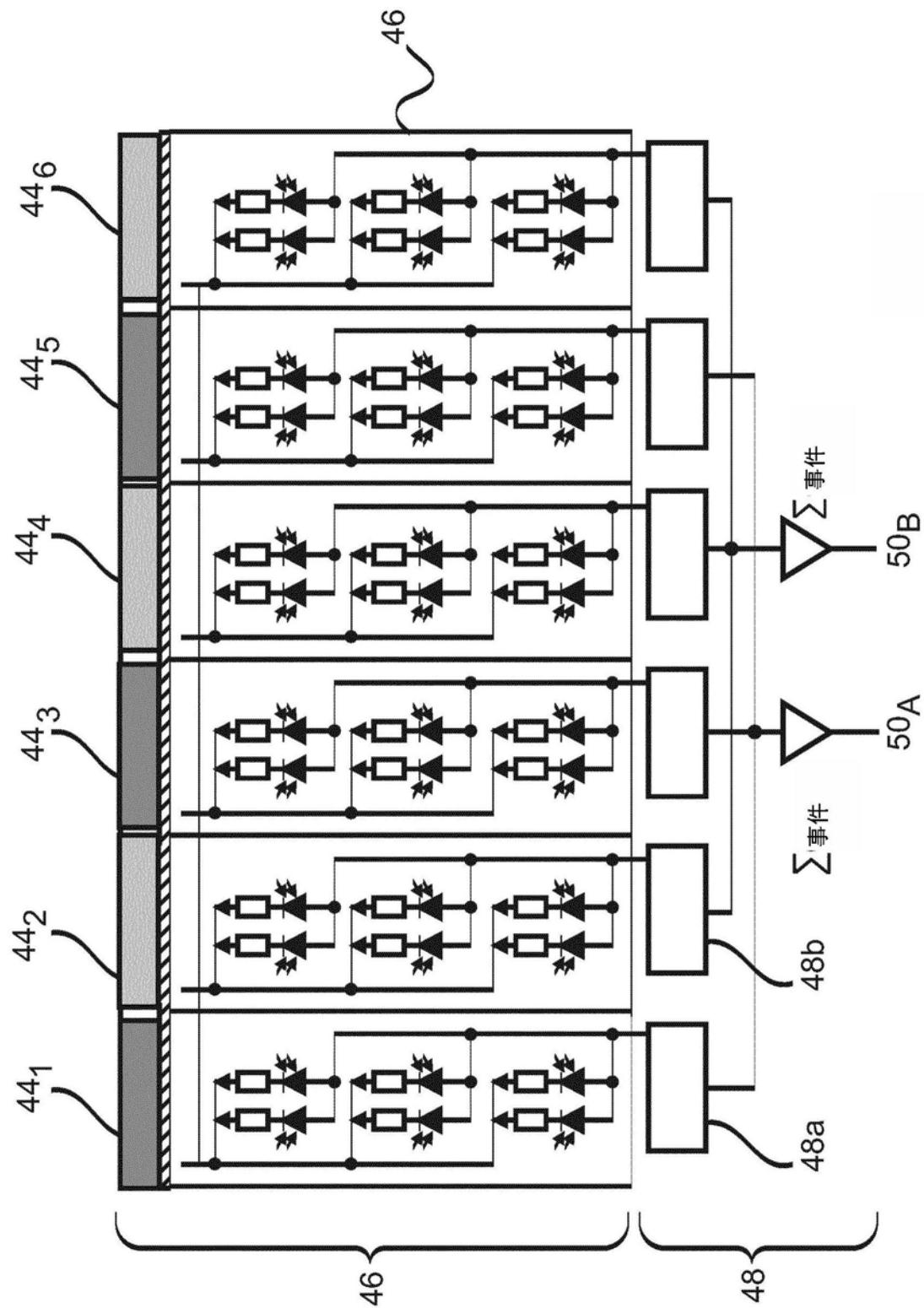


图9

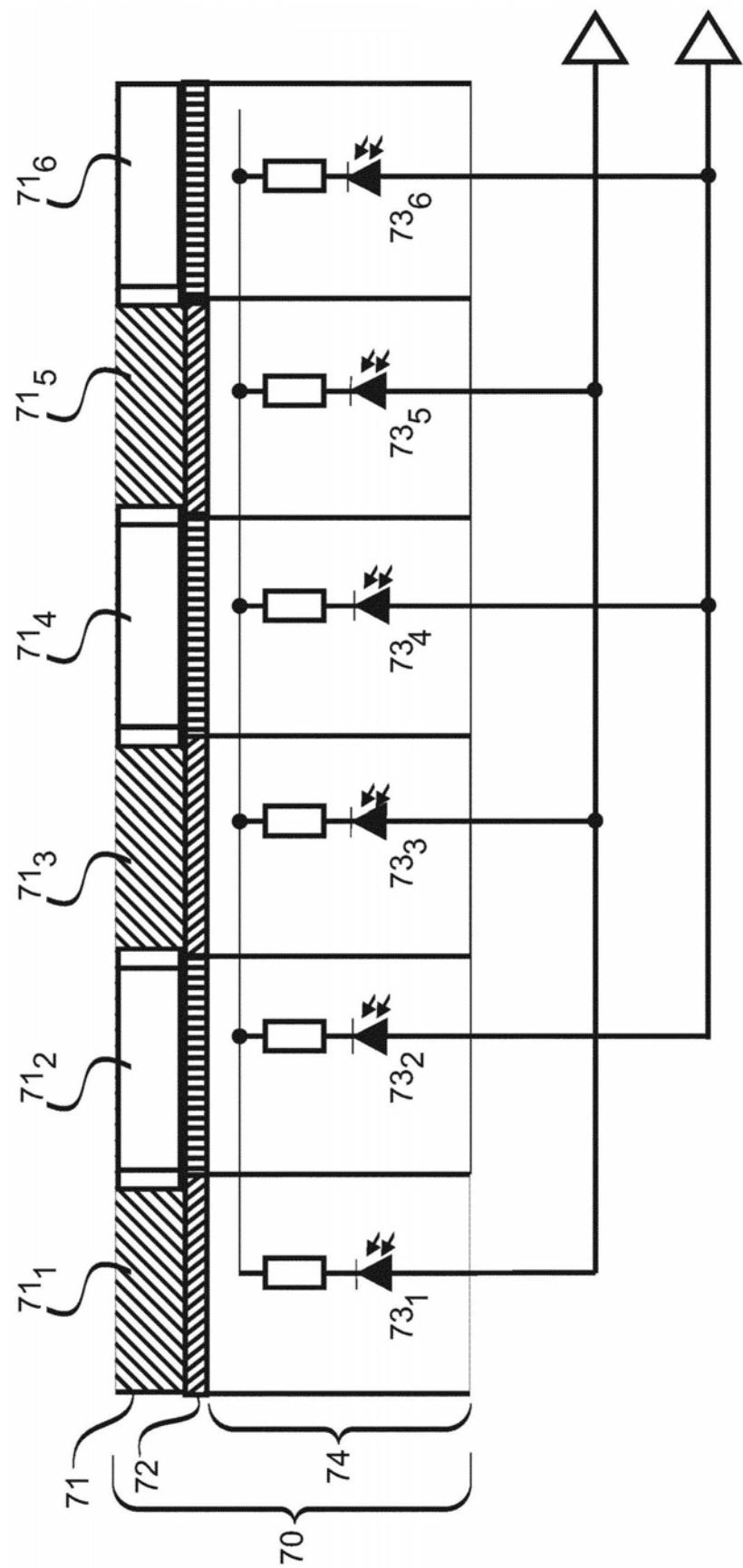


图10

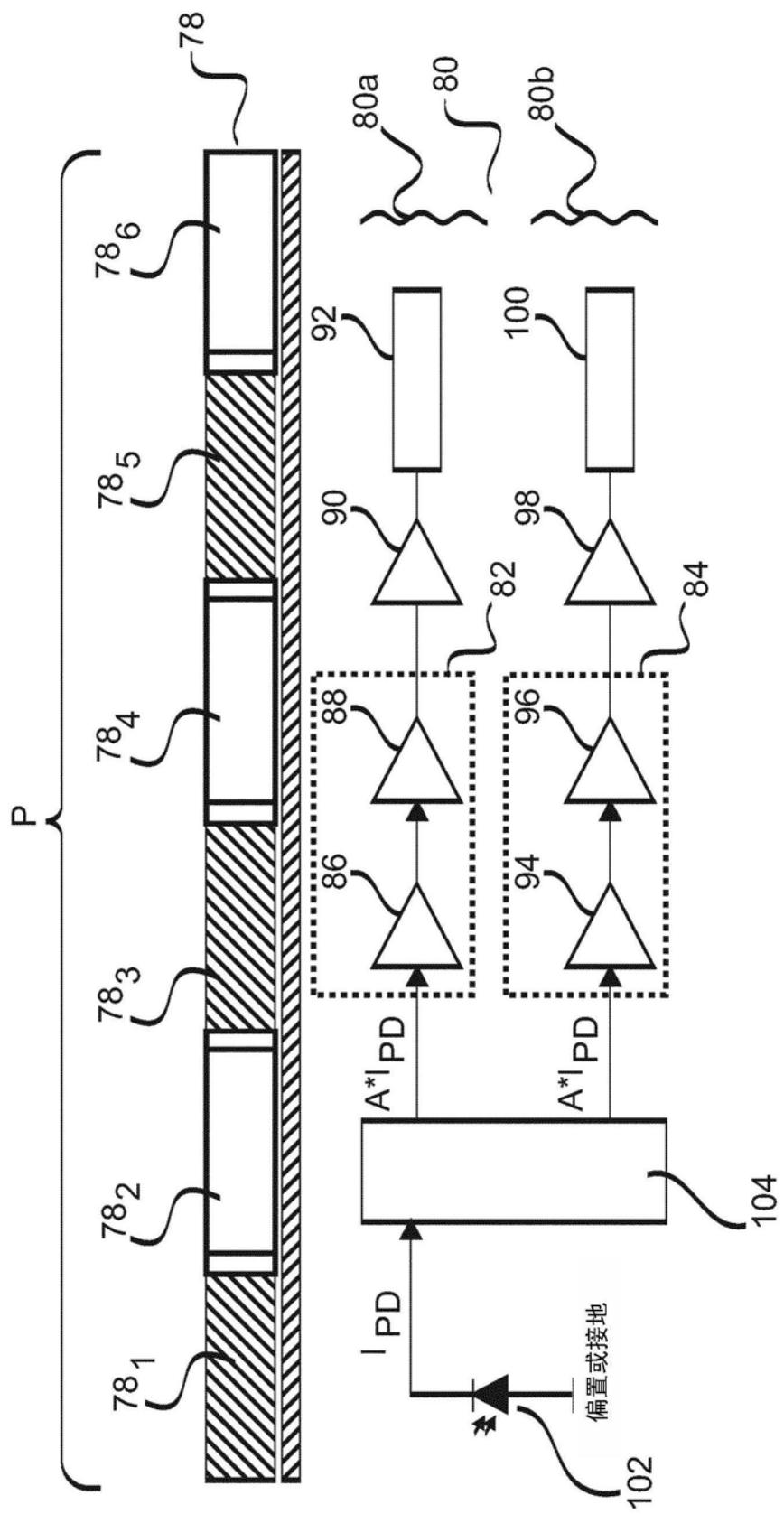


图11

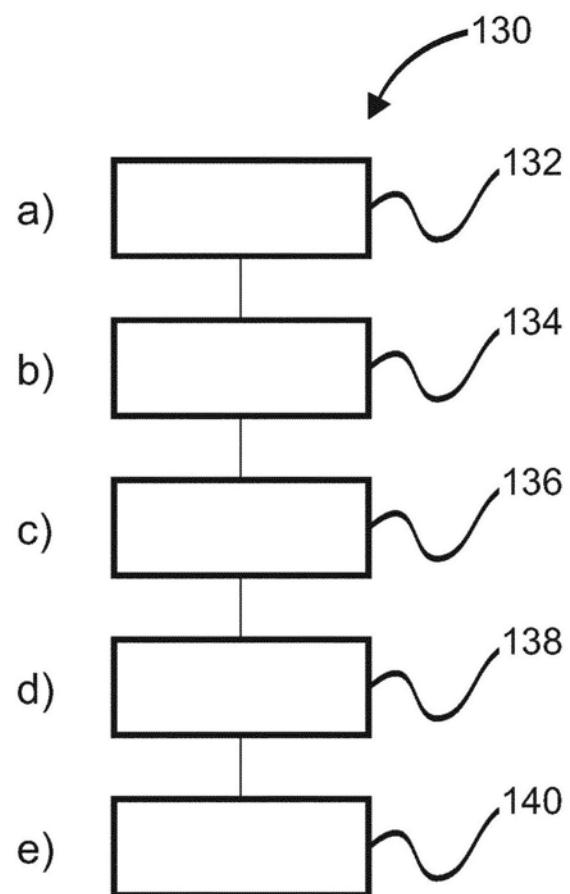


图12