



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105143921 B

(45)授权公告日 2018.10.23

(21)申请号 201480023147.0

(22)申请日 2014.04.03

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105143921 A

(43)申请公布日 2015.12.09

(30)优先权数据
13165097.0 2013.04.24 EP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.10.23

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2014/056633 2014.04.03

(87)PCT国际申请的公布数据
W02014/173644 EN 2014.10.30

(73)专利权人 皇家飞利浦有限公司
地址 荷兰艾恩德霍芬

(72)发明人 M·U·沙贝

(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

代理人 李光颖 王英

(51)Int.Cl.
G01T 1/20(2006.01) (续)

(56)对比文件
US 2012/0056078 A1,2012.03.08,
US 2009/0268067 A1,2009.10.29,
CN 101163988 A,2008.04.16,
CN 101163988 A,2008.04.16,
US 2012/0056078 A1,2012.03.08,
US 2008/0191139 A1,2008.08.14,
Carsten Degenhardt et al..“The
Digital Silicon Photomultiplier - A Novel
Sensor for the Detection of Scintillation
Light”.《2009 IEEE Nuclear Science
Symposium Conference Record》.2009,第2383-
2386页.

审查员 李新科

权利要求书2页 说明书16页 附图7页

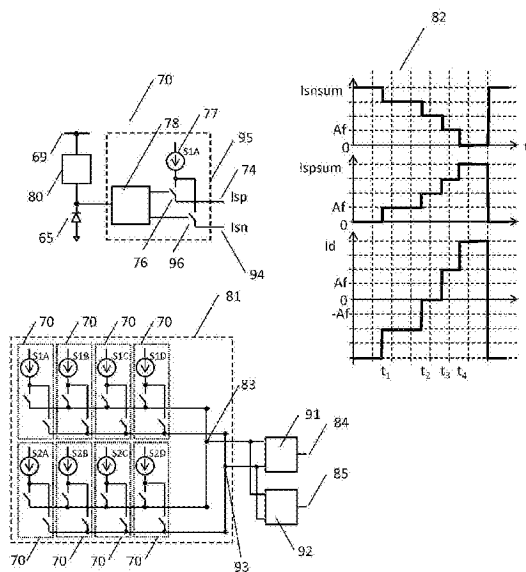
(54)发明名称

使用光学探测器像素阵列和像素元触发状态感测电路来对辐射量子的探测

(57)摘要

本发明涉及一种用于对光脉冲中的可见光子的数目进行积分的辐射探测设备。还公开了一种系统、方法以及计算机程序产品。所述辐射探测设备包括：光学探测器像素阵列，其具有能够被可见光子触发的多个像素元；多个像素元触发状态感测电路；以及求和单元。每个像素元触发状态感测电路生成具有指示受触发的像素元的第一预定幅度的数字信号或指示未受触发的像素元的第二预定幅度的数字信号。所述求和单元生成模拟信号，所述模拟信号的幅度对应于受触发的像素元的数目，并且所述求和单元从而执行期望的积分。所述模拟信号还可以使得计时单元在预定累积可见光子计数条件得到满足时生成

时间戳。



CN 105143921 B

[接上页]

(51) Int.Cl.

G01T 1/24(2006.01)

G01T 1/208(2006.01)

1. 一种辐射探测设备 (61、81), 包括:

光学探测器像素阵列 (3a), 其具有能够被可见光子触发的多个像素元 (9);

多个像素元触发状态感测电路 (63、95);

至少一个第一电流求和单元 (73、83);

其中, 针对所述光学探测器像素阵列 (3a) 的至少部分:

每个像素元 (9) 与像素元触发状态感测电路 (63、95) 通信, 所述像素元触发状态感测电路被配置为生成具有指示受触发的像素元 (9) 的第一预定幅度的数字电流信号或具有指示未受触发的像素元 (9) 的第二预定幅度的数字电流信号;

其中, 所述至少一个第一电流求和单元 (73、83) 是电流求和节点, 所述电流求和节点被配置为接收来自所述多个像素元触发状态感测电路 (63、95) 的所述数字电流信号, 并且被配置为生成具有对应于在所述光学探测器像素阵列 (3a) 的所述部分之内的受触发的像素元的实时数目的幅度的模拟信号。

2. 根据权利要求1所述的辐射探测设备 (61、81), 其中, 每个像素元触发状态感测电路 (63、95) 还被配置为接收重置信号; 并且每个像素元触发状态感测电路被配置为保持具有指示受触发的像素元 (9) 的幅度的所述数字电流信号的所述幅度, 直到接收到重置信号为止。

3. 根据权利要求1所述的辐射探测设备 (61、81), 其中, 所述像素元 (9) 是SiPM像素元或SPAD像素元, 并且所述像素元触发状态感测电路被形成在与所述SiPM像素元或所述SPAD像素元相同的基板上。

4. 根据权利要求1所述的辐射探测设备 (81), 其中, 每个像素元触发状态感测电路 (95) 具有第一输出部 (74) 和第二输出部 (94);

其中, 所述第一输出部 (74) 被配置为生成所述数字电流信号; 并且

所述第二输出部 (94) 被配置为生成对所述第一输出部的互补数字电流信号;

所述辐射探测设备还包括第二求和单元 (93) 和差分单元 (91);

其中, 所述第一电流求和单元 (83) 被配置为接收来自所述多个像素元触发状态感测电路 (95) 的所述第一输出部 (74) 的所述数字电流信号, 并且被配置为生成具有对应于所述受触发的像素元的数目的幅度的模拟信号;

其中, 所述第二求和单元 (93) 被配置为接收来自所述多个像素元触发状态感测电路 (95) 的所述第二输出部 (94) 的所述数字电流信号, 并且被配置为生成具有对应于所述未受触发的像素元的数目的幅度的模拟信号;

其中, 所述差分单元 (91) 被配置为通过从由所述第一电流求和单元 (83) 生成的所述模拟信号中减去由所述第二求和单元 (93) 生成的所述模拟信号来生成指示所述受触发的像素元的数目的模拟信号。

5. 根据权利要求1所述的辐射探测设备 (61、81), 还包括与所述至少一个第一电流求和单元 (73、83) 通信的模数转换器; 其中, 所述模数转换器被配置为生成对应于所述模拟信号的数字信号。

6. 根据权利要求4所述的辐射探测设备 (81), 其中, 每个像素元触发状态感测电路 (95) 包括电流源 (77) 和至少第一开关 (76、96), 所述第一开关用于将所述电流源选择性地电连接到所述第一输出部 (74) 或电连接到所述第二输出部 (94), 使得所述电流源 (77) 在像素元

(9) 受触发的情况下被连接到所述第一输出部 (74), 或者在像素元 (9) 未受触发的情况下被连接到所述第二输出部 (94)。

7. 根据权利要求1所述的辐射探测设备 (61、81), 还包括比较器 (104) 和计时单元 (107); 其中, 所述比较器 (104) 被配置为接收所述模拟信号, 并且被配置为将所述模拟信号与阈值水平 (103) 进行比较; 其中, 所述比较器 (104) 还被配置为使得所述计时单元 (107) 生成指示所述模拟信号达到所述阈值水平 (103) 时的时间的的时间戳。

8. 根据权利要求7所述的辐射探测设备 (61、81), 其中, 所述时间戳指示探测到预定累积数目的可见光子的时间。

9. 根据权利要求1所述的辐射探测设备 (61、81), 其中, 每个辐射探测设备 (61、81) 还包括与所述光学探测器像素阵列 (3a) 光学通信的闪烁体元件 (2a); 所述辐射探测设备 (61、81) 还包括能量确定单元; 其中, 所述能量确定单元被配置为接收指示所述受触发的像素元 (9) 的数目的所述模拟信号, 并且被配置为基于所述模拟信号的幅度来计算入射在所述闪烁体元件 (2a) 上的辐射量子的能量。

10. 根据权利要求1所述的辐射探测设备 (61、81), 其中, 所述像素元 (9) 是有源淬灭 SiPM 像素元。

11. 一种包括多个根据权利要求1-10中的任一项所述的辐射探测设备 (61、81) 的PET成像系统 (20);

其中, 每个辐射探测设备 (61、81) 还包括与所述光学探测器像素阵列 (3a) 光学通信的闪烁体元件 (2a)。

12. 一种供在PET成像、荧光显微镜检查或切连科夫辐射探测中使用的可见光子求和方法, 所述方法包括以下步骤:

从光学探测器像素阵列 (3a) 接收指示对在所述光学探测器像素阵列 (3a) 之内的一个或多个像素元 (9) 的触发的信号;

感测在所述光学探测器像素阵列 (3a) 之内的所述一个或多个像素元 (9) 的触发状态;

生成具有指示受触发的像素元 (9) 的第一预定幅度的数字电流信号或具有指示未受触发的像素元 (9) 的第二预定幅度的数字电流信号;

对所述数字电流信号进行求和, 以生成具有对应于受触发的像素元 (9) 的实时数目的幅度的模拟信号。

13. 根据权利要求12所述的可见光子求和方法, 还包括以下方法步骤:

将所述模拟信号与阈值水平进行比较; 并且

当所述模拟信号达到所述阈值水平时生成时间戳。

14. 一种计算机可读存储介质, 其包括用于执行根据权利要求12所述的方法步骤的计算机可执行指令。

使用光学探测器像素阵列和像素元触发状态感测电路来对辐射量子的探测

技术领域

[0001] 本发明涉及对辐射量子的探测,并且应用于高能粒子物理学应用和显微镜检查。这样的应用涵盖对荧光显微镜检查中和来自切连科夫辐射的可见光子(optical photon)形式的辐射量子的直接探测,以及借助于由闪烁体元件产生的可见光子来对辐射量子的间接探测。本发明具体应用于PET成像系统和荧光寿命成像显微镜检查(FLIM),并且更具体地,本发明能够被使用在飞行时间(TOF)PET成像系统中。

背景技术

[0002] 在PET成像中,在将诸如患者或动物的对象定位在PET成像区域中之前向其施予放射示踪剂。放射示踪剂优选被对象中的区域吸收,并且跟随摄入周期对其分布进行成像。随后,临床医生解读图像中的特定区域中的相对摄入,并且可以对对象执行诊断。放射示踪剂经历放射性衰变,这导致正电子的产生。每个衰变事件产生一个在人类组织中最多行进几毫米的正电子,随后所述正电子在所述人体组织中与电子在湮灭事件中相互作用,所述湮灭事件产生两个相反方向的伽玛光子。所述两个伽玛光子每个都具有511keV的能量,并且随后所述两个伽玛光子被围绕PET成像区域径向设置的伽玛光子探测器探测到,所述伽玛光子探测器的每个在被入射伽玛光子撞击时产生电信号。在本文中被定义为包括与光学探测器光学通信的闪烁体元件的伽玛光子探测器中,闪烁体元件将高能伽玛光子转换成包括许多可见光子的闪烁光脉冲,并且由光学探测器产生电信号。由时间戳加注单元向每个电信号颁发时间戳,并且将所述时间戳与重合确定单元中的其他时间戳进行比较。如果两个伽玛光子的时间戳发生在对彼此窄的时间间隔之内,通常如果它们在 $\pm 3\text{ns}$ 之内,则它们被识别为重合。接收重合伽玛光子的两个探测器的位置定义了空间中沿其发生湮灭事件的直线,所述直线被称为响应线(LOR)。随后,重建这样的LOR以产生指示放射示踪剂在成像区域之内的分布的图像。

[0003] 在这样的系统中,常常由积分单元进一步支持将伽玛光子对识别为重合事件。积分单元通过对每个闪烁光脉冲中存在的可见光子的总数进行积分来计算每个入射伽玛光子的能量。如果在时间上重合的伽玛光子中的每个的能量在具有伽玛光子的特性的预定范围之内,则将在时间上重合的闪烁光脉冲作为重合事件来处理。然而,如果伽玛光子中的一个或两者的能量处于预定范围之外,则拒绝该对在时间上重合的事件。这样的被拒绝的事件可以是伽玛光子散射的结果;所述散射的现象改变伽玛光子轨迹及其能量并且因此导致错误的LOR。

[0004] 以大致相同的方式执行诸如显微镜检查和切连科夫辐射探测的应用中的根据直接探测到的辐射量子进行对光脉冲的积分和计时。在例如荧光显微镜检查中,直接探测可见光子,因此不存在闪烁体元件。同样地,在不存在闪烁体元件的情况下因此直接探测切连科夫辐射,可见光子是由电介质生成的。

[0005] 因此,对光脉冲的积分和计时是这样的成像系统的共同特征。两种因素均影响由

这样的系统生成的图像的图像分辨率。常规地,使用光学探测器的阵列来探测这样的光脉冲。所述闪烁光脉冲是跨阵列中的探测器而分布的,所述探测器中的每个通常能够区分出对个体可见光子的探测,并且由单独的积分与计时单元分析来自探测器的信号。就这方面而言,硅光电倍增管(SiPM)阵列和单光子雪崩二极管(SPAD)阵列都已经被使用过。模拟和数字SiPM以及SPAD两者都已经被使用过,其中,模拟设备响应于对可见光子的探测而生成雪崩电流脉冲,并且数字设备包括额外的电子电路,所述额外的电子电路使得输出信号在两个电压电平之间转变。

[0006] 专利申请W02006/111883A2公开了一种用于在对这样的光脉冲进行积分和计时中与SiPM探测器阵列一起使用的电路。在W0 2006/111883A2中,数字触发电路被配置为响应于选定数目的、从第一数字值转变到第二数字值的探测器元而输出指示积分时间段的开始的触发信号。读出数字电路计算对探测器元的阵列中的探测器元在积分时间段上从第一数字状态到第二数字状态的转变次数的计数。

[0007] Carsten Degenhardt等人的文献“The digital Silicon Photomultiplier-A novel sensor for the detection of scintillation light”(2009IEEE Nucl.Sci.Symp.Conf.Record,2009年10月1日,第2383-2386页)公开了一种完全数字硅光电倍增管,在所述完全数字硅光电倍增管中,每个探测到的光子被直接转换成传感器的盖革模式元中的每个中的数字信号。

[0008] 在Spanoudaki and Levin的文献“Photo-Detectors for Time of Flight Positron Emission Tomography (ToF-PET)”(Sensors,2010年,卷10,第10484-10505页)中公开了另一更加常规的、与结合对光学脉冲的积分和计时的模拟硅光电倍增管(SiPM)光学探测器一起使用的电路。在该文献中,将一组模拟SiPM探测器以并行方式连接,以生成来自这样的光学脉冲的复合信号。然后可以对该复合信号进行积分,并且该复合信号可以在阈值被超过时使得计时单元生成时间戳。

[0009] 然而,在这样的光学脉冲中的可见光子的数目的积分方面以及在所述光学脉冲的计时方面仍然存有改进的余地。

发明内容

[0010] 本发明的目的是改进对光脉冲中的可见光子的数目的积分。本发明的另外的目的是改进对这样的光脉冲的计时。还公开了一种与本发明有关的设备、方法、系统以及计算机程序产品。

[0011] 这些目的是由辐射探测设备来实现的,所述辐射探测设备包括:光学探测器像素阵列,其具有能够被可见光子触发的多个像素元;多个像素元触发状态感测电路;以及求和单元。根据本发明,每个像素元与像素元触发状态感测电路通信,所述像素元触发状态感测电路被配置为生成具有指示受触发的像素元的第一预定幅度的数字信号或指示未受触发的像素元的第二预定幅度的数字信号。所述求和单元被配置为接收来自所述多个像素元触发状态感测电路的所述数字信号,并且被配置为生成具有对应于所述光学探测器像素阵列中受触发像素元的数目的幅度的模拟信号。

[0012] 由于由每个像素元触发状态感测电路生成的数字信号的幅度是预定幅度,因此由所述求和单元生成的模拟信号的幅度对应于多个预定水平中的一个,并且因此将准确地指

示受触发的像素元的累积数目。因此,所述模拟信号对应于所述光学脉冲中的可见光子的累积数目;并且因此是所述光脉冲中的可见光子数目的积分。所述模拟信号随着时间的变化表示所述光学探测器像素阵列中的探测到的可见光子的数目,所述模拟信号随着时间的变化表示还可以有利地指示显微镜检查应用中的诸如荧光寿命的材料性质。

[0013] 此外,由于所述模拟信号对应于对累积数目的可见光子的所述探测,因此所述模拟信号涉及可见光子探测剖析图(profile)上的定义点,并且还可以被使用在对光脉冲的计时中。因此,所述模拟信号可以用于使得更具可重复性的计时测量。

[0014] 相对照之下,现有技术的W02006/111883A2公开了使用移位寄存器电路来对光脉冲中的可见光子的数目进行积分。在这样的途径中,通过使用移位寄存器对每个像素元的数字状态按时钟记录(clock-out)并在数字求和电路中对所述数字状态进行求和来确定可见光子的总数,这样的方案将在可获得积分结果之前导致若干时钟时期的延迟。在本发明中,实时地响应于对像素元的触发而生成由求和单元生成的模拟信号。因此,可实时获得求和结果,因此实时获得积分结果,从而提供实时计时信息并且准许对光学脉冲的有效性(validity)做出更快的决断。本发明还表示现有技术中的途径的简化,这是因为可通过信号幅度实时地获得积分结果;因此在本发明中不要求时钟记录电路和数字加法器电路。

[0015] 与现有技术的Spanoudaki和Levin的文献中详细阐述的途径相对照;由于在本发明中由每个像素元触发状态感测电路生成的信号幅度是预定幅度,因此本发明中由求和单元生成的模拟信号对应于探测到的可见光子的数目。在现有技术中,通过使模拟SiPM设备以并行方式连接而产生的信号导致复合雪崩电流,由于雪崩处理的统计结果,所述复合雪崩电流具有不可靠的幅值。因此,在本发明中,所述模拟信号提供了更具可重复性的并且更具可靠性的对探测到的可见光子数目的积分。所述模拟信号还是更具可重复性的计时信号,所述更具可重复性的计时信号可以因此用于使得计时单元产生时间戳。

[0016] 根据本发明的另一方面,每个像素元触发状态感测电路还被配置为接收重置信号;每个像素元触发状态感测电路被配置为保持具有指示受触发像素元的幅度的数字信号的幅度,直到接收到重置信号为止。在光脉冲的时期之内对每个像素元进行重置的能力准许像素元在该时期中对多于一个可见光子进行计数,这有利地准许对具有更高可见光子入射率的光脉冲进行计数。

[0017] 根据本发明的另一方面,所述数字信号是数字电流信号,并且所述求和单元是电流求和单元。有利地,能够在电子电路中对数字电流进行快速切换和求和,从而提高积分的速度。

[0018] 根据本发明的另一方面,所述像素元是SiPM像素元或SPAD像素元,并且所述像素元触发状态感测电路被形成在与所述SiPM像素元或所述SPAD像素元相同的基板上。通过将所述像素元触发状态感测电路形成在与所述像素元相同的基板(例如,相同的硅片)上,实现了更快的积分,这是因为它们的减小的分隔、杂散电容和串联电阻引起降低的信号传播延迟。

[0019] 根据本发明的另一方面,公开了一种差分求和配置,所述差分求和配置具有降低对数字信号的实际生成中出现的漂移、漏电流和非线性的有害效应的易感度的益处。根据该方面,每个像素元触发状态感测电路具有第一输出部和第二输出部。所述第一输出部被配置为生成数字信号;并且所述第二输出部被配置为生成对所述第一输出部的互补数字信

号。所述辐射探测设备还包括第二求和单元和差分单元。所述第一求和单元被配置为接收来自所述多个像素元触发状态感测电路的所述第一输出部的所述数字信号,并且被配置为生成具有对应于受触发的像素元的数目的幅度的模拟信号。所述第二求和单元被配置为接收来自所述多个像素元触发状态感测电路的第二输出部的所述数字信号,并且被配置为生成具有对应于未受触发的像素元的数目的幅度的模拟信号。此外,所述差分单元被配置为通过从由所述第一求和单元生成的所述模拟信号中减去由所述第二求和单元生成的所述模拟信号来生成指示受触发的像素元的数目的模拟信号。

[0020] 根据本发明的另一方面,还提供与所述至少第一求和单元通信的模数转换器;其中,所述模数转换器被配置为生成对应于所述模拟信号的数字信号。有利地,所述数字信号可以被包括所述辐射探测设备的系统的其他部分更容易地进行处理。有利地,在例如重合确定单元中,可以更容易地将这样的信号与其他信号进行比较,以便提高一对在时间上重合的事件被认为源自于相同的伽玛光子的确定性。

[0021] 根据本发明的另一方面,在所述差分求和配置中,所述数字信号是数字电流信号,并且每个像素元触发状态感测电路包括电流源和至少第一开关,所述第一开关用于将所述电流源选择性地电连接到所述第一输出部或电连接到所述第二输出部,使得所述电流源在像素元受到触发的情况下被连接到所述第一输出部,或者在像素元未受触发的情况下被连接到所述第二输出部。有利地,可以在电子电路中对数字电流进行快速切换和求和,从而提高积分的速度。

[0022] 根据本发明的另一方面,实施计时功能,并且所述辐射探测设备还包括比较器和计时单元。所述比较器接收所述模拟信号并将所述模拟信号与阈值水平进行比较;并且使得所述计时单元生成指示所述模拟信号达到所述阈值水平的的时间的时间戳。有利地,提供了计时功能的更加简单的实施方式,这是因为所述积分单元和所述计时功能共享某个电子电路。

[0023] 根据本发明的另一方面,所生成的时间戳指示探测到预定累积数目的可见光子的时间。探测到的累积数目的可见光子对应于累积数目的受触发的像素元。有利地,生成了更加可靠的时间戳,这是因为通过基于探测到预定累积数目的可见光子来生成时间戳,所述时间戳涉及光学脉冲探测剖析图上的相同的并且因此更具可重复性的点。

[0024] 根据本发明的另一方面,每个辐射探测设备还包括与所述光学探测器像素阵列光学通信的闪烁体元件。所述辐射探测设备还包括能量确定单元;其中,所述能量确定单元被配置为接收指示所述受触发的像素元的数目的所述模拟信号,并且被配置为基于所述模拟信号的幅度来计算入射在所述闪烁体元件上的辐射量子的能量。可以使用根据校准生成的标度因子或根据对辐射量子的预测数据来确定探测到的可见光子的能量与数目之间的对应性,因此确定探测到的可见光子的能量与受触发的像素元的数目之间的对应性,所述对应性被使用在所述计算中。

[0025] 根据本发明的另一方面,所述辐射探测设备中的所述像素元是有源淬灭(quenched) SiPM像素元。与无源淬灭像素元相比,有源淬灭像素元具有更快的恢复时间,从而准许对光学探测器阵列中的更高速率的可见光子入射的探测。

[0026] 根据本发明的另一方面,公开了一种包括多个辐射探测设备的PET成像系统,其中,每个辐射探测设备还包括与光学探测器像素阵列光学通信的闪烁体元件。所述辐射探

测设备在PET成像系统中的使用准许更加可靠地确定伽玛光子能量。这提高了一对在时间上重合的事件被认为源自于相同的伽玛光子的确定性,从而准许由这样的系统生成更高分辨率的图像。

[0027] 根据本发明的另一方面,公开了一种供在PET成像、荧光显微镜检查或切连科夫辐射探测中使用的计时方法,所述计时方法包括与所述辐射探测设备有关的公开的一个或多个方法步骤。有利地,所述方法得到了对应于受触发的像素元的数目的实时模拟信号。

[0028] 根据本发明的另一方面,公开了一种计算机程序产品,所述计算机程序产品包括用于执行根据本发明的方法步骤的一个或多个方法步骤的计算机可执行指令。所述计算机程序产品可以是计算机可读存储介质,例如,软盘、磁硬盘驱动器、USB驱动器、光盘、ROM或RAM,并且此外,所述计算机可执行指令可以是可下载的。

附图说明

[0029] 图1图示了根据本发明的特定方面的多个伽玛光子探测器。

[0030] 图2图示了根据本发明的特定方面的示范性PET成像系统。

[0031] 图3图示了在飞利浦数字光子计数(PDPC)系统中使用的现有技术的计时方案的特征。

[0032] 图4图示了本发明的第一实施例的方面,其中,示出了像素元电路60、辐射探测设备61以及电流波形62。

[0033] 图5图示了本发明的第二实施例的方面,其中,示出了像素元电路70、辐射探测设备81以及电流波形82。

[0034] 图6图示了根据本发明的一些方面的供使用的电流源的实施例。

[0035] 图7图示了可以用于实施图4中图示的任选的电流到数字转换器71的电流到数字转换器电路102以及可以用于实施图4中图示的任选的触发电平电路72的触发电路103、104的实施例。

[0036] 图8图示了可以用于实施图5中图示的差分电流放大器91的差分放大器电路的实施例。

[0037] 图9图示了根据本发明的一些方面的系统实施方式。

具体实施方式

[0038] 为了改进对光脉冲中的可见光子数目的积分,并且进一步改进对这样的脉冲的计时,参考PET成像系统中的伽玛光子探测来描述本发明。然而,应当理解,本发明也可以应用于高能粒子物理学的更加宽泛的领域(包括对切连科夫辐射的探测)并且应用于显微镜检查。

[0039] 在PET成像中,由多个伽玛光子探测器执行对伽玛光子的探测。这样的伽玛光子探测器通常被围绕PET成像区域径向设置,以便接收来自所述PET成像区域的伽玛光子。在操作中,每个伽玛光子探测器通过在闪烁体元件中创建闪烁光脉冲来响应于对伽玛光子的接收,所述每个伽玛光子探测器包括与光学探测器光学通信的闪烁体元件。光学探测器通过生成电信号来响应于对可见光子的探测,所述光学探测器可以是包括能够被可见光子触发的一个或多个像素元的光学探测器像素阵列。对伽玛光子的接收进行计时的处理对于PET

成像而言是非常重要的,在所述PET成像中,通过重合来确定伽玛光子的起源位置。通常通过一个或多个时间戳加注单元来执行该计时处理,其中,时间戳加注单元向接收到的伽玛光子分配时间戳。如上所述,确定每个伽玛光子的能量的处理在PET成像中也是重要的,尤其是在确定在时间上重合的事件的有效性中也是重要的,并且这通常是由一个或多个积分单元来确定的。常规地,时间戳加注单元和积分单元接收来自光学探测器像素阵列的信号并将结果传达给重合确定单元,在所述重合确定单元中,做出对事件对的重合的决断。

[0040] 图1图示了根据本发明的特定方面的多个伽玛光子探测器。在图1中示出了多个伽玛光子探测器1,其中,每个伽玛光子探测器包括与对应的光学探测器像素阵列3a、3b、3c或3d光学通信的闪烁体元件2a、2b、2c或2d。为了便于图示,图1仅示出四个伽玛光子探测器,并且应当理解,可以重复该构造,以便从扩大的接收区接收伽玛光子。所述多个伽玛光子探测器1可以例如围绕PET成像系统的成像区域被径向设置。为了便于图示,图1中的闪烁体元件2a、2b、2c、2d被图示为与它们的对应的光学探测器像素阵列3a、3b、3c、3d是分离的,然而,在实践中,示范性闪烁体元件2a的面5与其对应的光学探测器像素阵列3a的面6可以紧密接触,或借助于光学指标匹配层而被光学耦合,以便促进两者之间的光学通信。此外,在图1中,由2a、2b、2c、2d例示的个体闪烁体元件可以借助于反射光垒层7、8相互光学隔离,以便防止相邻闪烁体元件之间的闪烁光的耦合。还可以在闪烁体元件2a、2b、2c、2d的除了图1中示出的具有光学探测器像素阵列的光学界面以外的所有表面上使用这样的反射光垒层7、8。以这种方式,在闪烁体元件之内生成的闪烁光被保留在该闪烁体元件之内,直到所述闪烁光被其对应的光学探测器像素阵列探测到为止。在操作中,由闪烁体元件2a和在图1中用阴影示出的所述闪烁体元件2a的对应的光学探测器像素阵列3a例示的伽玛光子探测器对诸如伽玛光子10的辐射量子的接收做出响应。伽玛光子10可以是一对反向探测到的伽玛光子10、13中的一个,该对伽玛光子10、13是由于跟随放射性衰变的湮灭事件而形成的,其中,放射性衰变产生正电子14并被电子15湮灭。放射性衰变源可以例如是放射示踪剂。闪烁体元件2a对伽玛光子10的接收引起闪烁光11的生成,通过全内反射和层7、8的组合使所述闪烁光11保留在闪烁体元件2a之内,直到所述闪烁光11被光学探测器像素阵列3a探测到为止,引起在阵列电输出12a处的电信号。光学探测器像素阵列3a包括一个或多个光学探测器像素6,被示为图1中的黑色阴影,其中,每个光学探测器像素6包括一个或多个像素元9。最小的光学探测器元件因此是像素元9,所述像素元9例如可以是以盖革模式连接的硅光电倍增管(SiPM)。

[0041] 图2图示了根据本发明的特定方面的示范性PET成像系统。例如,可以在图2中图示的系统中使用图1的示范性伽玛光子探测器。在图2中,PET成像系统20包括由围绕成像区域21设置的伽玛光子探测器模块24、25例示的多个伽玛光子探测器模块。每个伽玛光子探测器模块24、25可以包括一个或多个伽玛光子探测器,例如,由图1中的物件2a和3a的组合形成的伽玛光子探测器。在伽玛光子探测器模块24、25之内的每个伽玛光子探测器产生指示对伽玛光子的接收的电信号,时间戳加注单元28经由总线接收根据所述对伽玛光子的接收的电信号。尽管被图示为单个单元,但是时间戳加注单元28也可以被复现,使得一个或多个时间戳加注单元与每个伽玛光子探测器模块24相关联,从而在本地向接收伽玛光子的伽玛光子探测器提供时间戳加注功能。在操作中,伽玛光子探测器模块24、25分别探测到的示范性伽玛光子22、23引起电信号,所述电信号是由时间戳加注单元28分别经由总线26和27来

接收的。每个总线26、27表示在每个伽玛光子探测器模块24、25之内的一个或多个伽玛光子探测器的图1中的一个或多个阵列电输出12a、12b、12c、12d。返回到图2，时间戳加注单元28至少颁发指示每个接收到的伽玛光子的接收时间的的时间戳。也可以将积分单元包括在时间戳加注单元28之内以对与每个伽玛光子相关联的闪烁光进行积分，以便确定其能量。时间戳加注单元28与重合确定单元29通信，如果接收到的伽玛光子的时间戳发生在对彼此窄的时间间隔(通常为 $\pm 3ns$)之内，则所述重合确定单元29将接收到的伽玛光子识别为重合。重合确定单元29还可以分析与每个接收到的伽玛光子相关联的能量，并拒绝具有落在预定能量窗口之外的能量的伽玛光子的、在时间上重合的伽玛光子。重合确定单元29与重建处理器30通信，所述重建处理器30针对每对被认为重合的、接收到的伽玛光子构造响应线，并对多条这样的响应线进行进一步处理，以便使用诸如滤波反投影和迭代重建的技术来重建表示重合伽玛光子的起源位置的图像的数据。在飞行时间(TOF)PET中，重建处理器可以进一步考虑接收到的重合伽玛光子之间的小的时间差，以便更好地使它们的起源位置局部化。在反应深度(DOI)PET中，还可以对两个探测到的伽玛光子的轨迹进行评估，以便通过减少视差误差来提高重建图像的空间分辨率。重建处理器30还与图像处理单元31通信，所述图像处理单元31被配置为将表示重合伽玛光子的起源位置的数据处理成适合于在输出设备上呈现为图像的格式。图像处理单元31还与诸如显示器、打印机等的呈现图像的输出设备32通信。控制单元33与PET成像系统的所有描述过的单元通信，并对上文所述的操作加以协调。

[0042] 当使用时，要被成像的对象的部分(例如，人体或动物体的部分)被定位在图2中的示范性PET成像系统的成像区域21中。该部分可以是在对象之内的器官，在所述器官中，期望测量放射示踪剂的摄入。在将对象的部分定位在成像区域21中之前，可以向对象施予放射示踪剂，并且可以准许流逝摄入时期。在所述成像处理期间，多个伽玛光子探测器1接收由在成像区域21之内的放射性衰变事件引起的伽玛光子，例如，由被施予到对象的放射示踪剂的衰变引起的伽玛光子。在成像处理之后，PET成像系统20产生指示放射示踪剂在成像区域21之内的分布的图像。

[0043] 为了突出显示本发明的益处，图3图示了在飞利浦数字光子计数(PDPC)系统中使用的现有技术的计时方案的特征。在专利申请W02006/111883A2中公开了这样的系统。在现有技术的图3中，闪烁体元件40与光学探测器像素阵列41光学通信，以形成伽玛光子探测器。可以在图2中图示的PET成像系统20中使用多个这样的伽玛光子探测器。返回现有技术的图3，由在光学探测器像素阵列41之内的像素元探测在闪烁体元件40之内生成的闪烁光。光学探测器像素阵列41包括一个或多个光学探测器像素，其中，每个光学探测器像素包括多个像素元52。像素元可以是单光子雪崩二极管(SPAD)，其又被称为硅光电倍增管(SiPM)，并且可以以盖革模式对所述像素元进行操作。在操作中，最初对SiPM或像素元进行重置，使得其输出处于逻辑假状态。SiPM对可见光子的接收引起其节点的击穿和在其输出处对逻辑真状态的触发。光学探测器像素阵列41中的最小光学探测器元件因此是像素元52，其中，能够独立启用和禁用每个像素元，并且能够读出其逻辑输出。在一种配置中，光学探测器像素具有大约4mm的间距，并且像素元具有大约50微米的间距。光学探测器像素因此可以包括数千个像素元。在光学探测器像素阵列41之内的像素元是被按行布置的，如由像素元行42、43所例示的，为了便于图示，仅示出了其中的两行。可以存在一个或多个这样的像素元行。关

于现有技术的图3中执行的计时功能而言；行触发逻辑44、45对与之对应的像素元行42、43中的所有像素元的逻辑状态执行逻辑或操作，并且用于分别在行触发输出46、47处生成数字行触发信号。因此，在行触发输出46、47的对应的像素元行42、43中的像素元中的一个或多个已经被触发为处于逻辑真状态时，将行触发输出46、47设定为逻辑真状态。在由触发逻辑单元50生成的信号49处于逻辑真状态时，计时单元48被配置为生成指示由闪烁体元件40接收到伽玛光子的时间的的时间戳。在一种配置中，触发逻辑单元50对行触发输出46、47处的信号执行或操作，并且因此使得计时单元48在光学探测器像素阵列41中的像素元中的任一个被可见光子触发到逻辑真状态时都生成时间戳。

[0044] 关于在现有技术的图3中执行的积分功能而言；积分单元51用于通过对每个接收到的伽玛光子的闪烁光脉冲中的可见光子的数目进行积分来确定每个接收到的伽玛光子的能量。伽玛光子能量是诸如PET成像的应用中的有用参数，在所述PET成像中，重合确定单元可以使用伽马光子能量来改进对受散射的伽马光子与未受散射的伽玛光子之间的鉴别，并且从而提高一对在时间上重合的事件被认为源自于相同伽玛光子的确定性。积分单元51通过以下方式来进行操作：即，使用移位寄存器分别在像素状况信号输出53和54处将每个像素元行42、43中的每个像素元（由像素元52例示）的状况时钟记录为针对每行的数字字，并使用顺序加法器电路55和56以及加法器电路57添加所述数字字来生成指示受触发的像素元的数目的数字字。控制单元33协调上文所述的各项操作，还可以从计时单元48接收时间戳，并且从积分单元51接收积分结果，并且还可以控制它们以将其转移到在图1中图示的PET成像系统20之内的重合确定单元29。

[0045] 在本发明中，采取不同的途径来对计时触发信号进行积分和生成。图4图示了本发明的第一实施例的各方面，其中，示出了像素元电路60、辐射探测设备61以及电流波形62。参考图4，在本发明中，像素元触发状态感测电路63被配置为生成具有指示受触发的像素元的第一预定幅度的数字信号（I_{sp}）或具有指示未受触发的像素元的第二预定幅度的数字信号（I_{sp}）。在图4中图示的像素元触发状态感测电路63中，数字信号是在第一输出部64处生成的数字电流信号。然而，应当理解，其中数字信号是数字电压信号或包括离散的电荷包的数字电荷信号的备选实施例也在本公开的范围之内。

[0046] 在图4中图示的实施例中，数字信号是数字电流信号，并且第一预定幅度为非零幅度，并且第二预定幅度为零幅度。在一个范例中，第一预定幅度为1微安，并且第二预定幅度为0微安。在第二范例中，第一预定幅度为1微安，并且第二预定幅度是具有不到第一预定幅度的十分之一的值的漏电流。针对第一预定幅度的其他合适的值处于大约100纳安到几十微安的范围中。第一预定幅度和第二预定幅度因此是可区分的。因此，在图4中，开关66要么处于导通状态使得电流源67被传导到输出部64，要么处于非导通状态。也预期像素元触发状态感测电路63的其他配置，在所述其他配置中，第一预定幅度和第二预定幅度是可区分的；例如，使第一预定幅度为正幅度，并且使第二预定幅度为负幅度。在这样的配置中可以使用一个或多个电流源和或开关。同样地，在其中数字信号为数字电荷信号的实施例中，针对两个预定幅度，幅度应当是可区分的，因此其离散电荷包应当是可区分的。例如，这可以通过电荷包的幅度或符号差异来实现。应当理解，就其中数字信号是数字电压信号的备选实施例而言，电压信号的第一幅度和第二幅度应当同样是可区分的。

[0047] 在操作中，当可以例如是SiPM像素元或SPAD像素元的雪崩光电二极管65处于非触

发状态时,开关66处于非导通状态,使得电流源67与第一输出部64断开,并且因此在第一输出部64处生成的数字电流信号具有第二预定幅度。当雪崩光电二极管65接收到可见光子时,雪崩光电二极管65转变成触发状态,在所述触发状态中,雪崩电流在雪崩光电二极管65中流动。比较器68被配置为感测雪崩电流并使得开关66转变成导通状态,使得电流源67连接到第一输出部64,并且因此在第一输出部64处生成的数字电流信号具有第一预定幅度。以这种方式,像素元触发状态感测电路63实时地响应于由可见光子对光电二极管65的触发而在第一输出部64处生成数字信号。实时是指这是在没有任何时钟记录时期的情况下实现的,所述时钟记录时期是使用移位寄存器读出数字信号的备选途径中所固有的。实时信号可以经受用于使开关66闭合的时间以及由实际电子电路中的杂散电容和串联电阻引起的RC传播延迟的上升时间,但是这仍然被认为是实时的,这是因为能够使用标准电路布局技术将这样的传播延迟布置为处于皮秒数量级。数字信号随后被保持处于触发状态,直到像素元触发状态感测电路63被重置为止。可以在完成积分之后实现重置操作,并且可以由本地定时电路生成这样的异步重置信号或同步重置信号或者由控制单元实现这样的异步重置信号或同步重置信号。异步重置信号可以例如在光学探测器像素阵列中的像素元探测到预定数目的可见光子之后的固定的时间间隔引起重置操作。在一个预期的实施例中,可以在光脉冲时期之内激活重置操作,使得在多于一个阶段中运行对光脉冲中的可见光子总数的积分,以便对更高速率的可见光子入射进行计数。

[0048] 图4中的雪崩光电二极管65可以是模拟SiPM或数字SiPM,这是因为像素元触发状态感测电路63的操作将提供具有两个预定幅度中的一个的信号。可以使用例如本领域技术人员已知的MOS开关和技术来实施用于将比较器68配置为感测雪崩电流的各种手段。也可以在光电二极管电路或像素元触发状态感测电路63中包括锁存器,所述锁存器用于保持具有指示受触发的像素元的幅度的数字信号的幅度。通过偏压源69将雪崩光电二极管65偏置到盖革模式,并且雪崩光电二极管65可以包括有源淬灭电路或无源淬灭电路80。与诸如电阻器的无源淬灭电路相比,有源淬灭电路有利地减少了光电二极管恢复时间。

[0049] 图4中的辐射探测设备61图示了多个像素元电路60的连接,连同任选的电流到数字转换器电路71和任选的触发电平电路72。八个示范性像素元电路60中的光电探测器形成像素元阵列,尽管可以形成具有其他数目的像素元的像素元阵列。将每个电流源在两行中的每行中的位置分别识别为S1A-S1D和S2A-S2D。在图4中示出的辐射探测设备61中,通过求和单元将由个体像素元电路60中的每个生成的数字电流加和起来,所述求和电路是由求和节点73来实施的,在所述求和节点73处,总电流表示示范性阵列中的所有像素元的组合状况。由于由个体像素元电路60中的每个生成的电流(因此信号)是具有预定幅度的数字信号,因此求和节点73处的总电流的幅度是模拟电流或信号,所述模拟电流或信号对应于指示示范性光学探测器像素阵列中的受触发的像素元的数目的多个预定水平中的一个。因此在不需要任何进一步处理的情况下执行积分单元的功能。因此,所述信号指示引起闪烁光脉冲的伽玛光子的能量。由于如上文所述,由个体像素元电路60中的每个生成的电流是实时地响应于对像素元电路60中的像素元的触发而生成的,因此通过以这种方式对电流进行求和也实时地响应于对像素元的触发而生成模拟信号。实时还是指这将经受过实际电子电路中的杂散电容和串联电阻引起的RC传播延迟的上升时间,尽管如上所述,这仍然被认为是实时的,这是因为能够使用标准电路布局技术将这样的传播延迟布置为处于皮秒的数量

级。有利地,由于模拟信号是实时地响应于对像素元的触发而生成的,因此积分技术实时地提供积分结果,从而准许对闪烁光脉冲的有效性做出快速决断。此外,由于该信号的幅度表示对累积数目的可见光子的探测,因此其提供准确的计时信号。以这种方式,其表示对这样的闪烁光脉冲的计时的改进。求和节点73还可以包括连接到诸如地电势的固定电势的电阻器,以用于将电流转换成模拟电压信号,所述模拟电压信号的幅度以相同的方式指示在光学探测器像素阵列之内的受触发的像素元的数目。

[0050] 通过范例的方式,图4中的电流波形62图示了由于探测到四个可见光子在求和节点73处的来自一行像素元的电流,所述四个可见光子分别是在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 处被接收到的,此时第一预定幅度为正幅度,并且第二预定幅度为零幅度。电流波形62因此表示由求和单元生成的模拟信号,在该示范性情况中,所述求和单元是由求和节点73来实施的。最初,在求和节点73处电流为零,并且每次探测到额外的可见光子时总电流就升高一个台阶,所述台阶具有指示受触发的像素元的预定幅度(Af)。由于每个台阶的幅度是预定的,因此模拟信号的幅度对应于指示受触发的像素元的总数的多个预定水平中的一个,并且此外,所述模拟信号的幅度直接指示探测到的可见光子的累积数目;从而执行期望的积分。

[0051] 在其中数字信号是数字电压信号的备选实施例中,应当理解,可以通过将开关选择性地连接到两个预定电压电平中的一个来生成数字电压信号,并且可以通过使用模拟求和运算放大器电路对电压进行求和来执行对数字信号的求和,以便生成期望的模拟信号。在其中数字信号是数字电荷信号的备选实施例中,应当理解,可以通过电荷积分器对表示第一预定幅度和第二预定幅度的离散电荷包进行求和,以便生成期望的模拟信号。参考图4,在其中数字信号是数字电荷信号的一个范例实施方式中,由雪崩光电二极管65对可见光子的接收引起开关66在预定间隔(T)内闭合,并且将通过电流源67中的电流与预定间隔(T)的乘积确定的电荷包(Q)转移到第一输出部64。可以由电荷积分器对电荷进行求和,例如,所述电荷积分器被实施为具有值(C)的电容器,其中,通过电荷包对电容器值的比率(Q/C)来确定在电容器两端的电压的结果得到的变化。可以使用单稳态的触发电路或其他单次击中(one-shot)触发电路来控制对开关66的闭合的定时。由于这样的电荷积分器电路的实际实施方式中的漏电流,期望可以将至少所述数字信号的第一预定幅度可更进一步地与任何漏电流在任何积分时期的结尾处由电荷积分器生成的模拟信号处的净结果区分开。

[0052] 可以使用连接到图4中的辐射探测设备61的任选的电流到数字转换电路71来在输出部74处提供数字化的信号,其中,所述数字化的信号指示求和节点73处的电流。这样的数字化促进控制单元或重合确定单元随后对所述信号的处理。用于该目的的合适的电流到数字转换器包括例如被适当配置的运算放大器电路。

[0053] 连接到图4中的辐射探测设备61的任选的触发电平电路72可以用于使得计时单元(例如,时间到数字转换器)生成指示探测到预定累积数目的可见光子的时间的时间戳,从而提供更加可靠的计时信号。任选的触发电平电路72可以包括比较器,所述比较器用于将求和节点73处的模拟信号与预定阈值水平进行比较,其中,阈值水平对应于预定累积数目的探测到的可见光子。在一种设想的配置中,当累积数目的可见光子超过预定数目的(例如,一个或多个)可见光子时,使得计时单元(例如,时间到数字转换器)生成时间戳。通过这样做提供了更加可靠的并且简化的计时方案。

[0054] 图5图示了本发明的第二实施例的各方面,其中,示出了像素元电路70、辐射探测

设备81以及电流波形82。图5图示了图4中图示的电路的发展,其解决了电流开关(例如,图4中图示的开关66)中常常遇到的非线性问题。参考图5中的像素元电路70,每个电流源具有两个输出部,即,生成信号(Isp)的第一输出部74和生成信号(Isn)的第二输出部94。第一输出部74以与图4中的输出部64相同的方式进行操作,因此当雪崩光电二极管65处于未受触发的状态时,开关76处于非导通状态,使得电流源77与第一输出部74断开,并且因此在第一输出部74处生成的数字电流信号具有第二预定幅度。当雪崩光电二极管65接收到可见光子时,雪崩光电二极管65转变成触发状态,在所述触发状态中,雪崩电流在雪崩光电二极管65中流动。比较器78被配置为感测雪崩电流并使得开关76转变成导通状态,使得电流源77连接到第一输出部74,并且因此在第一输出部74处生成的数字电流信号具有第一预定幅度。也可以在光电二极管电路或像素元触发状态感测电路63中包括锁存器,所述锁存器用于保持具有指示受触发的像素元的幅度的数字信号的幅度。因此,可以使数字信号的幅度保持处于触发状态,直到像素元触发状态感测电路95被重置为止。可以在完成积分之后实现重置操作,并且可以由本地定时电路生成这样的异步重置信号或同步重置信号或者由控制单元实现这样的异步重置信号或同步重置信号。在一个预期的实施例中,可以在光脉冲的时期之内激活重置操作,使得在多于一个阶段中运行对光脉冲中的可见光子总数的积分,以便对更高速率的可见光子入射进行计数。

[0055] 在图5中图示的优选实施例中,第一预定幅度为非零幅度,并且第二预定幅度为零幅度。在一个范例中,第一预定幅度为1微安,并且第二预定幅度为0微安。在第二范例中,第一预定幅度为1微安,并且第二预定幅度是具有不到第一预定幅度的十分之一的值的漏电流。针对第一预定幅度的其他合适的值处于大约100纳安到几十微安的范围中。重要的是,第一预定幅度和第二预定幅度是可区分的。因此,在图5中,开关76要么处于将电流源S1A传导到输出部74的导通状态,要么处于非导通状态。也预期像素元触发状态感测电路63的其他配置,在所述其他配置中,第一预定幅度和第二预定幅度是可区分的,例如,使第一预定幅度为正幅度,并且使第二预定幅度为负幅度。可以通过相对于负电势连接电流源77的上端子来实现负幅度。备选地,在这样的配置中可以使用一个或多个电流源和或开关。

[0056] 图5中的像素元电路70中的第二输出部94被配置为生成对第一输出部的互补数字信号;因此,当在第一输出部74处生成的数字电流信号具有第一预定幅度时,在第二输出部94处生成的数字电流信号则具有第二预定幅度,并且反之亦然。在图5中图示了可以用于实现该目的的一种开关配置,尽管应当理解,包括单刀双掷开关的其他配置可以备选地用于控制第一输出部74和第二输出部94。

[0057] 图5中的比较器78根据所描述的第一输出部74和第二输出部94处的互补信号取决于雪崩光电二极管65的触发状态来可操作地控制开关76、96。例如,可以例如由使用MOS开关构造的逻辑非门(logic inverter)来生成所述互补信号。如参考图4所描述的,由偏压源69将图5中的雪崩光电二极管65偏置到盖革模式,并且所述雪崩光电二极管可以包括有源淬灭电路或无源淬灭电路80。

[0058] 图5中的辐射探测设备81图示了多个像素元电路70的连接,连同差分电流放大器91以及任选的触发电平电路92。八个示范性像素元电路70中的光电探测器形成了像素元阵列,尽管可以形成具有其他数目的像素元的像素元阵列。分别将每个电流源在两行中的每行中的位置标识为S1A-S1D和S2A-S2D。在图5示出的辐射探测设备81中,通过由求和节点83

实施的求和单元对由个体像素元电路70的第一输出部中的每个生成的电流进行求和,在所述求和节点83处,总电流表示示范性阵列中的所有像素元的组合触发状况。因此,求和节点83处的信号是模拟信号,所述模拟信号的幅度对应于在光学探测器像素阵列之内的受触发的像素元的数目。因此在不需要任何进一步处理的情况下执行积分单元的功能。这样的信号还指示引起闪烁光脉冲的伽玛光子的能量。有利地,快速地提供了积分结果,从而准许对闪烁光脉冲的有效性做出快速决断。然而,为了解决与可以被用作开关76和96的典型的MOS开关相关联的非线性问题,通过由求和节点93实施的额外的求和单元对示范性阵列中的所有像素元的组合互补信号进行求和;并因此同样对由所有第二输出部94生成的组合信号进行求和,以在求和节点93处生成组合模拟信号。如上所述,在优选实施例中,第一预定幅度为非零幅度,并且第二预定幅度为零幅度。以这种方式,求和节点93处的模拟信号具有对应于未受触发的像素元的数目的幅度。进一步参考图5中的辐射探测设备81,被实施为差分电流放大器91的差分单元从第一求和节点83处的电流信号中减去第二求和节点93处的电流信号,并在输出部84处生成两个电流的差的模拟表示。因此,从表示受触发的元的数目的信号中减去表示未受触发的元的数目的信号。通过这样做,使输出部84处的信号对在开关76、96的实际实施方式中出现的漂移和漏电流以及非线性效应的较不敏感。在预定信号幅度如参考优选实施例所述的情况下,输出部84处的两个电流的差的模拟表示因此指示辐射探测设备81中的受触发的像素元的数目。以后可以使这样的模拟信号数字化,以便促进控制单元或重合确定单元对其的后续处理。用于该目的的合适的电流到数字转换器包括例如被适当配置的运算放大器电路。

[0059] 图5中的电流波形82图示了针对一行像素元由于探测到四个可见光子的求和节点83处的组合电流 (I_{spsum}), 求和节点93处的组合电流 (I_{snsum}) 以及在差分电流放大器84的输出部84处的这两个电流的差 ($I_d = I_{spsum} - I_{snsum}$), 所述四个可见光子分别是在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 处被接收的。最初,在求和节点73处电流为零,并且每次探测到额外的可见光子时总电流就升高一个台阶,所述台阶具有指示受触发的像素元的预定幅度 (A_f)。由于每个台阶的幅度是预定的,因此所述模拟信号的幅度对应于指示受触发的像素元的总数的多个预定水平中的一个,并且此外,所述模拟信号的幅度直接指示探测到的可见光子的累积数目;从而执行期望的积分。

[0060] 参考图5,应当指出,备选地,可以使求和节点83、93每个包括连接到固定电势(例如,地电势)的额外的电阻器,以用于将求和节点83、93处的电流转换成模拟电压信号,可以用差分电压放大器代替图5中的差分电流到数字转换器84的类似方式来确定所述模拟电压信号的幅度差。以这种方式,可以生成指示在光学探测器像素阵列之内的受触发的像素元的数目的类似数字信号。

[0061] 连接到图5中的辐射探测设备81的任选的触发电平电路92可以用于使得计时单元(例如,时间到数字转换器)生成指示探测到预定累积数目的可见光子的时间的时间戳,从而提供更加可靠的计时信号。任选的触发电平电路92可以包括用于从第一求和节点83处的电流中减去第二求和节点93处的电流的差分电流放大器,以及用于将该差分信号与预定阈值水平进行比较的比较器,其中,所述阈值水平对应于预定累积数目的探测到的可见光子。在一种设想的配置中,当累积数目的可见光子超过预定数目的(例如一个或多个)可见光子时,使得计时单元(例如,时间到数字转换器)生成时间戳。通过这样做提供了更加可靠的并

且简化的计时方案。

[0062] 图6图示了供根据本发明的一些方面使用的电流源的实施例。可以使用图6中图示的电流源S1A、S1B来实施图4和图5中的电流源S1A-S1D和S2A-S2D。在图6中,使用编程电流(I_{ext})对NMOS设备P3中的电流进行编程,所述NMOS设备P3经由P4对PMOS设备P0中的漏极-源极电流进行设定。因此,通过设备P0中的电流乘以每个设备P1、P2中的沟道的宽度对长度的比率与P0中的沟道的宽度对长度的比率的比值来设定设备P1、P2中的漏极-源极电流。可以通过图6描述的方式来实施多个电流源。可以将这样的设备实施在与SiPM或SPAD阵列相同的硅基板上,其中,有利地降低它们与它们的对应的光学探测器的分隔引起RC信号传播延迟降低,或者备选地可以将这样的设备实施为外部的芯片外电路。其他电流源实施例也是合适的。

[0063] 图7图示了可以用于实施图4中图示的任选的电流到数字转换器71的电流到数字转换器电路102以及可以用于实施图4中图示的任选的触发电平电路72的触发电路103、104的实施例。在操作中,图7中的共同的输入部101连接到图4中的求和节点73以接收电流 I_{spsum} ,所述电流 I_{spsum} 是根据阵列的部分中的所有像素元触发状态感测电路63的第一输出部64的求和电流。电阻器105将电流 I_{spsum} 转换成电压。当闭合采样开关106时,模数转换器102执行由共同的输入部101接收到的电流 I_{spsum} 的模数转换。随后,可以在PET成像系统中的重合确定单元中对电流 I_{spsum} 的数字表示进行处理,以便对在时间上重合的事件的重合进行验证。采样开关106确定转换发生的时间,并且可以维持闭合,使得转换结果可实时获得,或者可以任选地延迟其闭合,以例如等待直到已经触发了时间戳为止,以便防止过早地开始积分结果转换。有利地,避免了与错误开始的转换相关联的重置时间,这是因为所述转换仅是在针对源自于有效光学脉冲的时间戳的触发具有较高水平的置信度的时候启动的。比较器104和可见光子触发参考水平103协作以当在光学探测器阵列的部分之内已经探测到预定累积数目的可见光子时使得计时单元107生成时间戳。在电流 I_{spsum} 超过指示预定数目的可见光子的水平时,比较器104使得计时单元107生成时间戳。通过这样做,提供了更具可重复性的计时,这是因为时间戳涉及探测到的光学脉冲的剖析图上的相同的点。可以将图7中图示的这样的设备制作在与SiPM或SPAD阵列相同的基板上,或者备选地可以将所述设备制作作为外部的芯片外电路。图7中的电路还可以适于接收来自图5中的求和节点83和93的电流,并使用差分放大器配置使这些节点处的电流相减以执行相同的想要的功能。

[0064] 图8图示了可以用于实施图5中图示的差分电流放大器91的差分放大器电路的实施例。图8中的电路针对一行像素元(例如,像素元行42)接收来自像素元触发状态感测电路95的第一输出部74和第二输出部94的电流 I_{spsum} 和 I_{snsum} ,并生成与电流之差($I_{spsum} - I_{snsum}$)成比例的输出电压 V_{out} 。可以通过调节电阻器值R1来设定互阻抗增益,并且可以通过调节电阻器值的比率($R3/R2$)来设定电压增益。随后可以通过模数转换器使输出电压 V_{out} 数字化,以便提供可以在重合确定单元中以数字方式进行处理、指示受触发的像素元或可见光子的累积数目的信号。

[0065] 图9图示了根据本发明的一些方面的系统实施方式。例如,可以在PET成像系统中使用图9中图示的系统实施方式,以便生成用于在重合确定单元中确定和/或验证重合所需的信号。参考图5中图示的辐射探测设备的第二实施例描述了图9中的系统的操作,尽管应当理解,所述系统也可以适于与图4中图示的第一实施例一起使用。参考图9,闪烁体元件40

与光学探测器像素阵列41光学通信,以形成伽玛光子探测器。可以在图2中图示的PET成像系统20中使用多个这样的伽玛光子探测器。返回到图9,由在光学探测器像素阵列41之内的像素元探测在闪烁体元件40之内生成的闪烁光。光学探测器像素阵列41包括一个或多个光学探测器像素,其中,每个光学探测器像素包括多个像素元。像素元可以是单光子雪崩二极管 (SPAD),其又被称为硅光电倍增管 (SiPM),并且可以以盖革模式对所述像素元进行操作。在操作中,最初对SiPM或像素元进行重置,使得其输出处于逻辑假状态。SiPM对可见光子的接收引起其节点的击穿和在其输出处对逻辑真状态的触发。因此,光学探测器像素阵列41中的最小光学探测器元件是像素元,其中,能够独立启用和禁用每个像素元,并且能够读出每个像素元的逻辑输出。在一种配置中,光学探测器像素具有大约4mm的间距,并且像素元具有大约50微米的间距。因此,光学探测器像素可以包括数千个像素元。在光学探测器像素阵列41之内的像素元被按行布置,如由像素元行42、43所例示的,为了便于图示,仅示出了其中的两行。可以存在一个或多个这样的像素元行。

[0066] 关于图9中图示的系统中执行的积分功能而言;积分单元110通过对每个伽玛光子的闪烁光脉冲中的可见光子的数目进行积分来确定由闪烁体元件40接收到的每个伽玛光子的能量。积分单元110通过确定光学探测器阵列41的至少部分中的受触发的像素元的累积数目来对可见光子的数目进行积分。在图9中的图示中,该部分对应于像素元行42、43。积分单元110包括一个或多个差分电流放大器111、112,其中,每个差分电流放大器根据对图5中的物件91的描述进行操作。在图9中图示的实施方式中,每个差分电流放大器111、112被配置为针对其各自行中的所有像素元接收来自像素元触发状态感测电路95的所有第一输出部74的组合电流信号 I_{spsum} 。图5中图示了一种合适的配置。同样地,每个差分电流放大器111、112被配置为针对其各自行中的所有像素元接收来自像素元触发状态感测电路95的所有第二输出部94的组合电流信号 I_{snsum} 。以这种方式,每个差分电流放大器111、112的输出是表示其各自行中的受触发的像素元的数目的模拟信号。然后,将针对阵列的部分的所有差分电流放大器的输出加到一起,以生成指示阵列的该部分中的受触发的像素元的总数的信号,因此生成指示接收到的可见光子的总数的信号。所述求和可以发生在电流求和单元或电荷求和单元(未示出)中,所述电流求和单元或所述电荷求和单元可以使用运算放大器电路而被示范性地实施。尽管图9中图示的实施例示出了由一个差分电流放大器111、112接收来自一行像素的信号配置,但是也可以预期其他配置,例如,使用一个差分电流放大器来接收来自多行的信号。在又一实施例中,可以从指示阵列的部分中的受触发的像素元的总数的信号导出另外的信号113,并且在积分结果满足预定累积计数条件的情况下,因此在计数值超过、等于或小于预定值或者在预定值的预定范围之内的情况下使用所述的另外的信号来验证由计时单元48颁发的时间戳。通过这样做可以提高对由伽玛光子引起的时间戳的确定性。因此,可以在图2中给出细节的PET成像系统中的重合确定单元29中使用所述伽玛光子能量,在所述重合确定单元29中,所述伽玛光子能量可以用于提高对受散射的伽马光子与未受散射的伽玛光子之间的分辨,并且从而确定响应线的有效性。图9中的控制单元33协调上文所述的各项操作,还可以从计时单元48接收时间戳,并且从积分单元51接收积分结果,并且还可以控制它们以将其转移到图1中图示的PET成像系统20中的重合确定单元29。

[0067] 关于在图9中图示的系统中执行的计时功能而言,多个触发电路114与时间戳触发

单元117和计时单元48协作,以生成指示在光学探测器阵列41之内已经探测到了预定数目的可见光子的时间的时间戳。在实践中,一个或多个触发电路足以执行多个触发电路114的期望的计时功能,其中,每个触发电路92a、92b执行如参考图5中的单元92所描述的电流差分运算。因此,每个触发电路92a、92b被配置为针对其各自行中的所有像素元接收来自像素元触发状态感测电路95的所有第一输出部74的组合电流信号 I_{spsum} 。同样地,每个触发电路92a、92b被配置为针对其各自行中的所有像素元接收来自像素元触发状态感测电路95的所有第二输出部94的组合电流信号 I_{snsun} 。在一种配置中,每个触发电路92a、92b包括差分电流放大器,所述差分电流放大器用于从电流 I_{spsum} 中减去电流 I_{snsun} ,并且用于在输出115和116处生成与该差成比例的输出信号。由时间戳触发单元117接收每个触发电路92a、92b的输出115、116,所述时间戳触发单元117在输出118处生成触发信号,所述触发信号使得计时单元48在预定累积的受触发的像素计数条件被满足的情况下生成时间戳。所述条件可以是累积触发像素元计数值等于或小于预定值,或者在预定值的预定范围之内。通过这样做可以生成指示接收到的可见光子的剖析图上的相同点的可重复时间戳。时间戳触发单元117接收来自多个触发电路114的个体信号,并且被配置为确定在光学探测器像素阵列41的部分中的接收到的可见光子的总数。在一种设想的配置中,时间戳触发单元117包括电荷求和放大器或电压求和放大器,所述电荷求和放大器或所述电压求和放大器用于对由多个触发电路114的输出115、116输出的信号中的每个进行求和,并且生成与该加和成比例的输出电压,所述时间戳触发单元117还包括比较器,所述比较器将所述加和与指示预定累积受触发的像素计数值的信号进行比较。当预定累积受触发的像素计数条件被满足时,时间戳触发单元117借助于输出118使得计时单元48生成时间戳。然后,经由控制单元33将时间戳发送到重合确定单元,或者在另一实施例中,可以将时间戳保持在计时单元48的缓存器中,并且仅在从积分单元110接收到的验证信号113指示由积分单元110设定的预定累积计数条件已经被满足的情况下才将所述时间戳发送到控制单元33。有利地,改进的积分处理引起更加快速的积分,并且因此能够做出对时间戳进行处理还是将其拒绝的更快的决断。因此,在输出118处的无效触发信号无意中使得计时单元48生成时间戳的情况下,计时单元48也可以在较短的时间戳验证延迟之后得到重置,提高了对计时单元的利用。应当理解,图9的各种备选实施方式也是可能的,其中,可以在组合的电路中共享对多个触发电路114和积分单元110共同的电路元件,例如,电流到数字转换器电路。

[0068] 总而言之,已经具体参考PET成像系统描述了用于对光脉冲中的可见光子的数目进行积分的辐射探测设备。还描述了供根据所述设备使用的系统、方法以及计算机程序产品。所述辐射探测设备包括:光学探测器像素阵列,其具有能够被可见光子触发的多个像素元;多个像素元触发状态感测电路;以及求和单元。根据本发明,每个像素元与像素元触发状态感测电路通信,所述像素元触发状态感测电路被配置为生成具有指示受触发的像素元的第一预定幅度的数字信号或具有指示未受触发的像素元的第二预定幅度的数字信号。所述求和单元被配置为接收来自多个像素元触发状态感测电路的数字信号,并且被配置为生成具有对应于受触发的像素元的数目的幅度的模拟信号。所述模拟信号的幅度指示期望的积分操作;并且还可以将所述模拟信号的幅度与比较器组合,以使得计时单元在预定累积可见光子计数条件被满足时生成时间戳。

[0069] 尽管已经在附图和上面的说明中详细地图示并描述了本发明,但是这样的图示和

描述应当被认为是说明性或示范性的而非限制性的；本发明不限于所公开的实施例，并且能够用于对在光脉冲中的可见光子的数目进行积分，并且用于在粒子物理学和显微镜检查领域之内的各种应用中从对辐射量子的探测所得到的光脉冲进行计时。

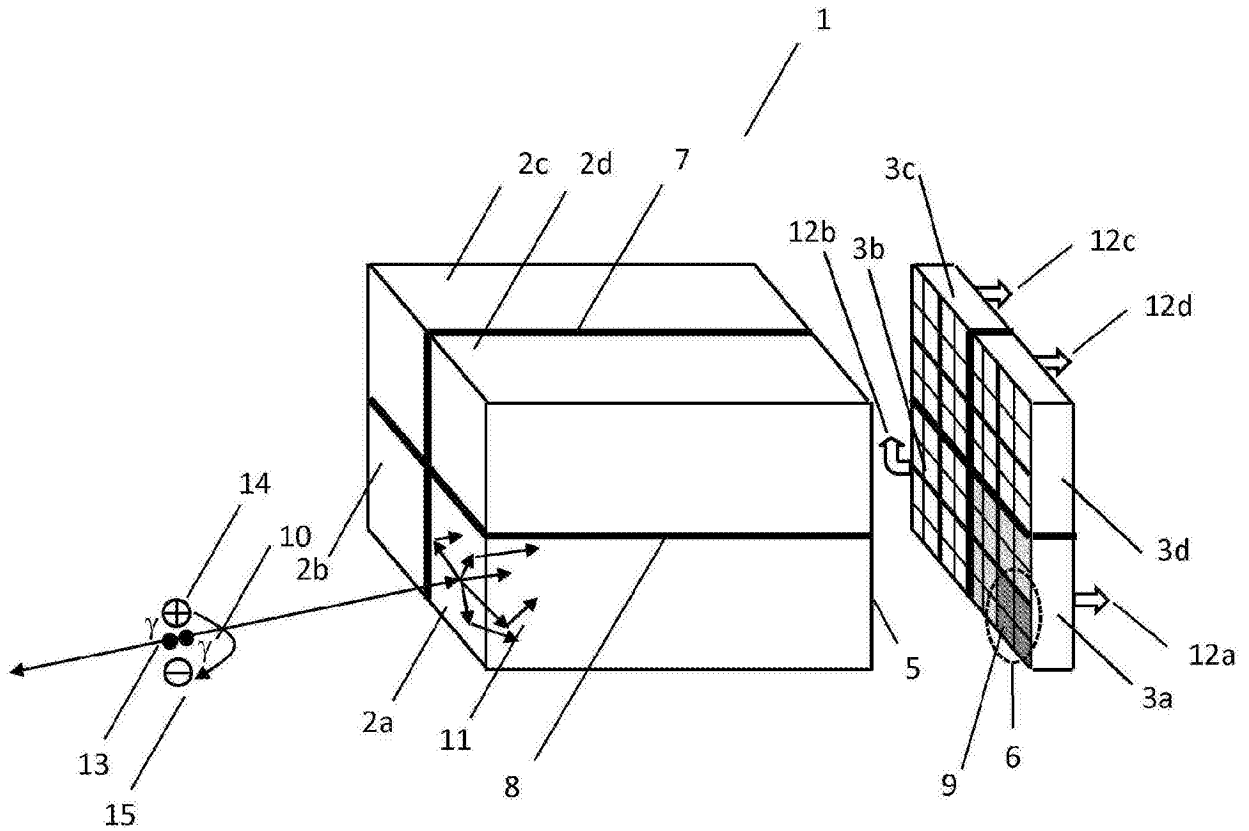


图1

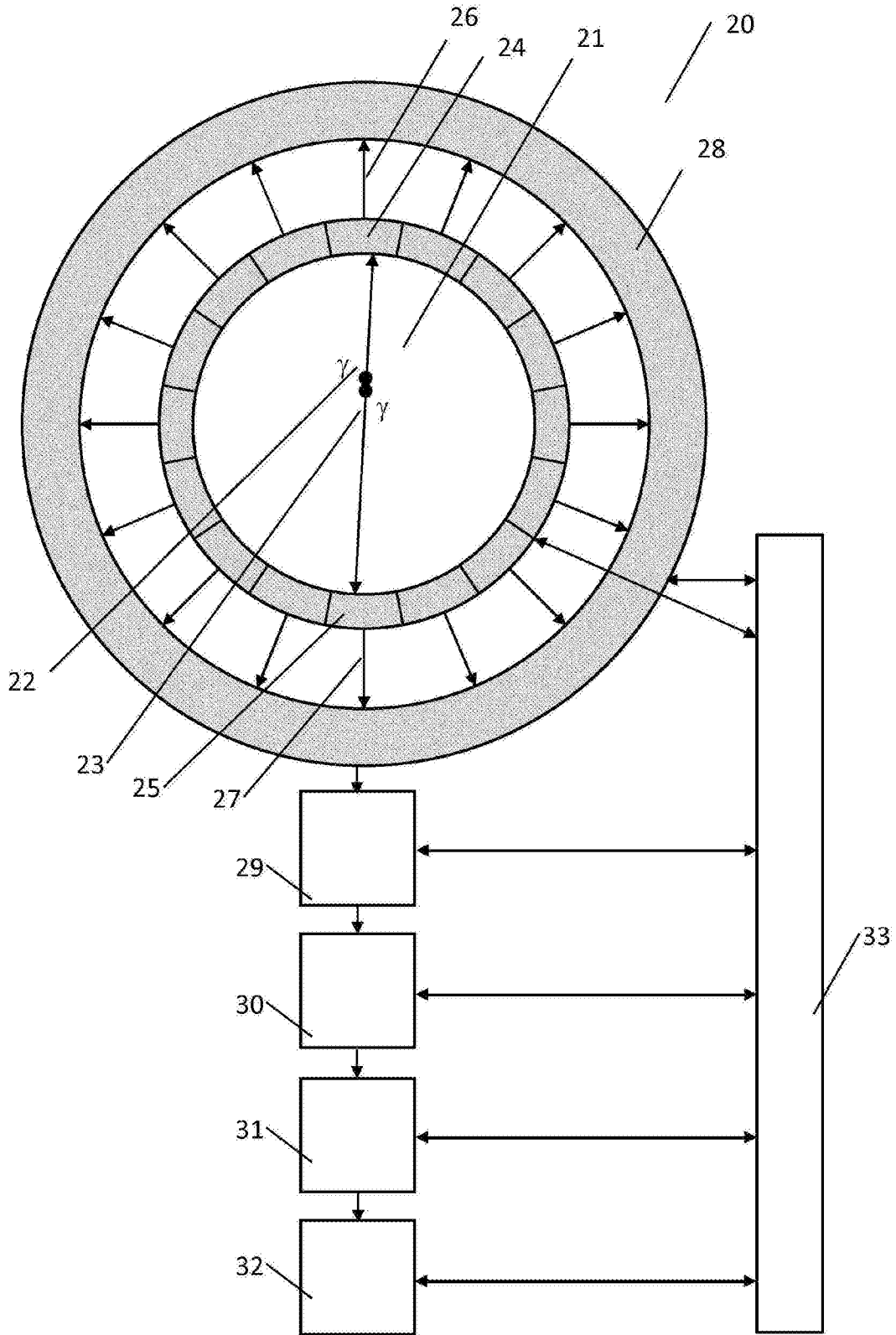


图2

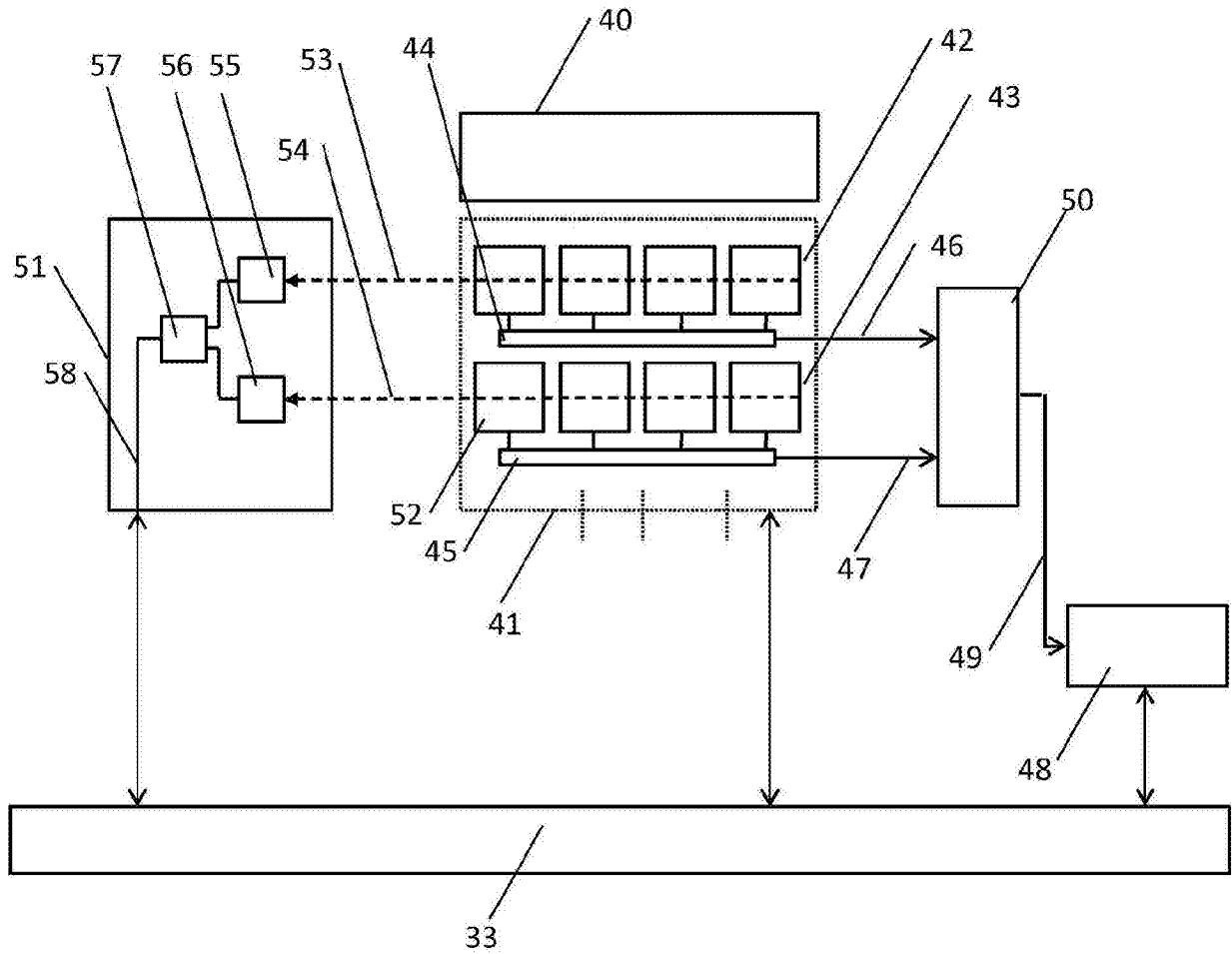


图3现有技术

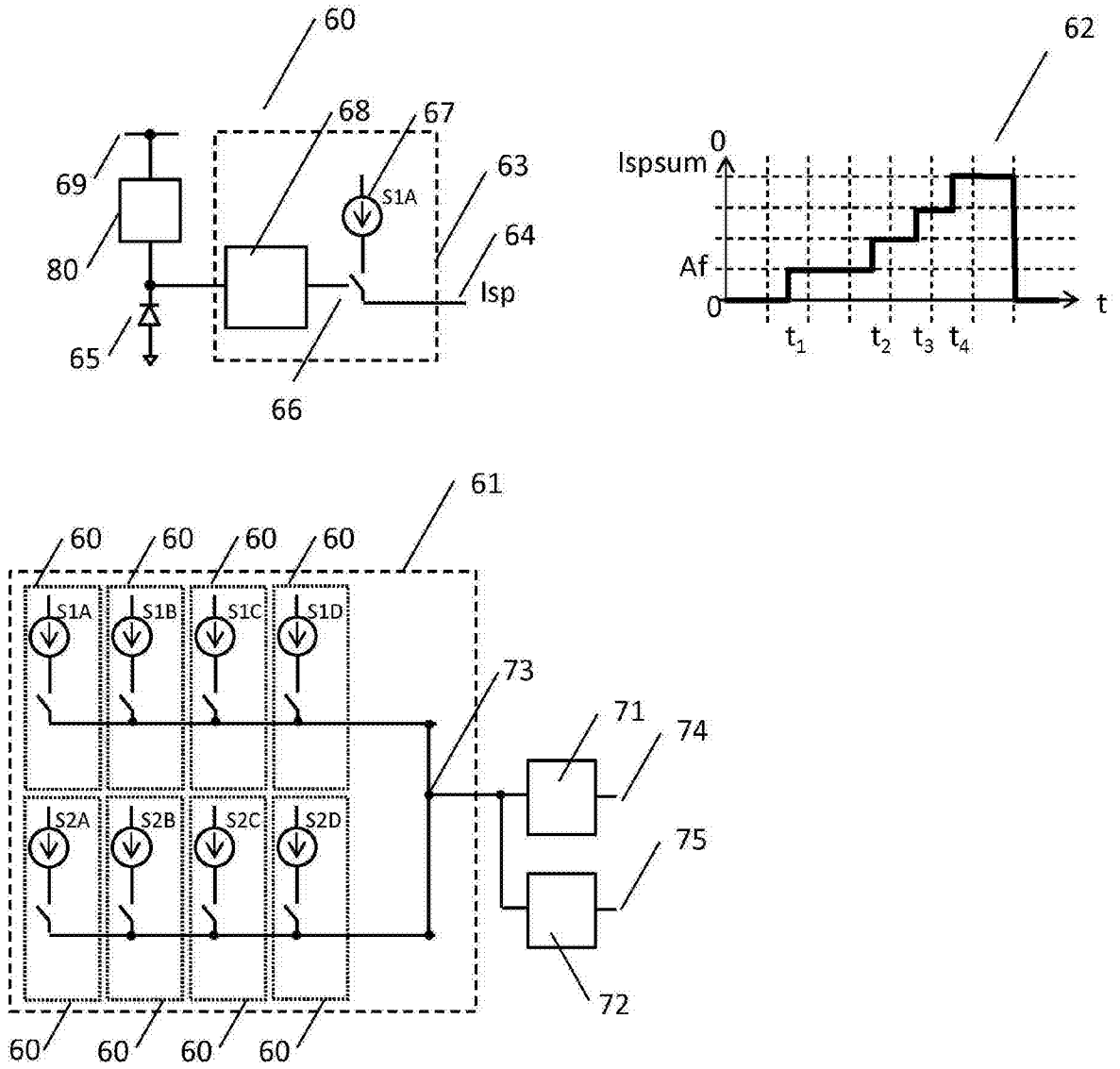


图4

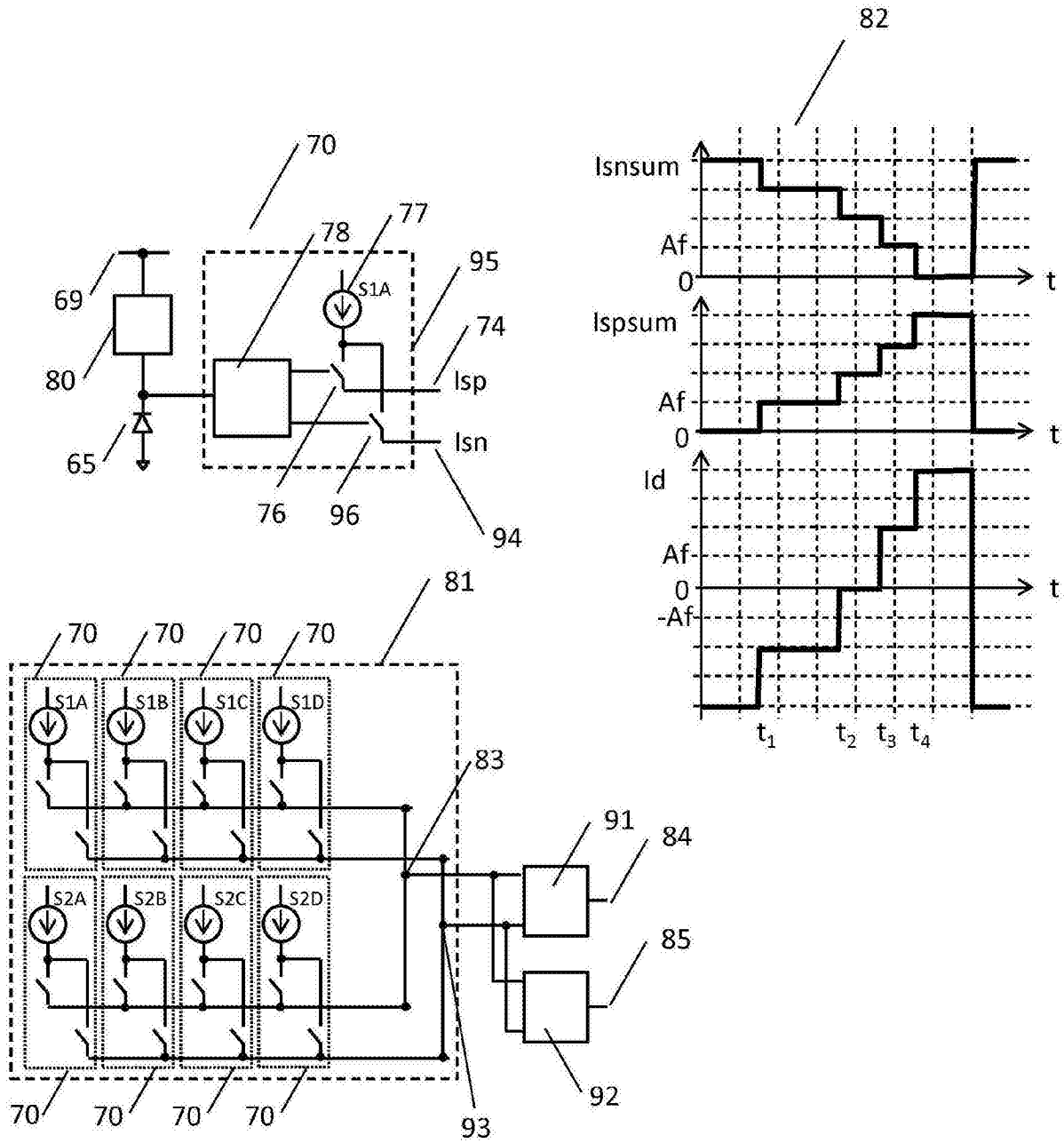


图5

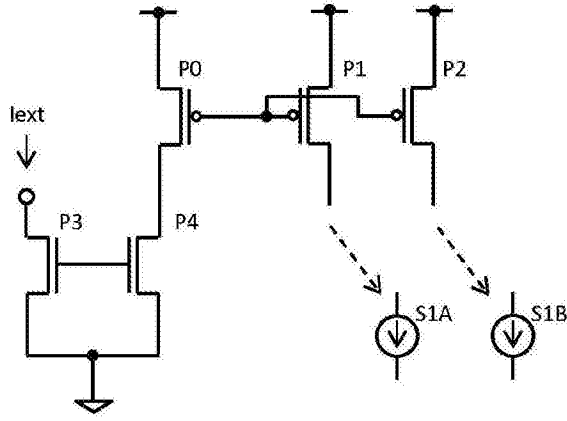


图6

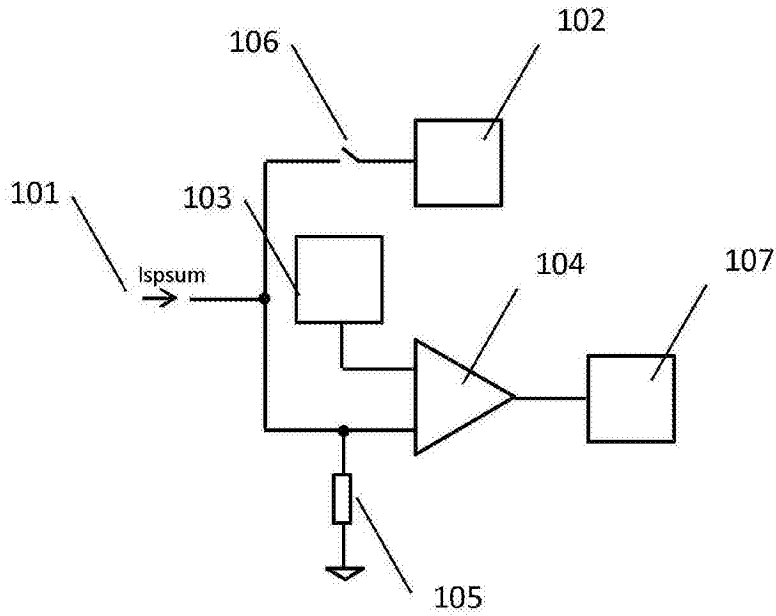


图7

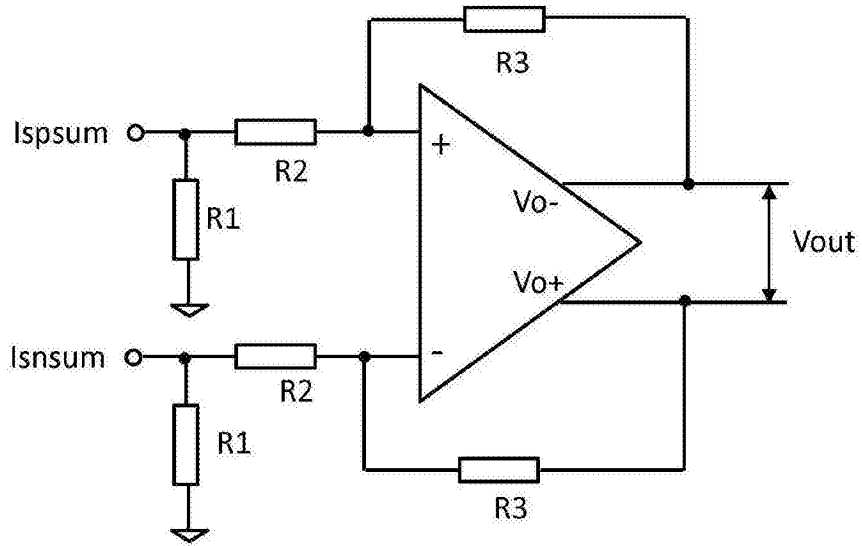


图8

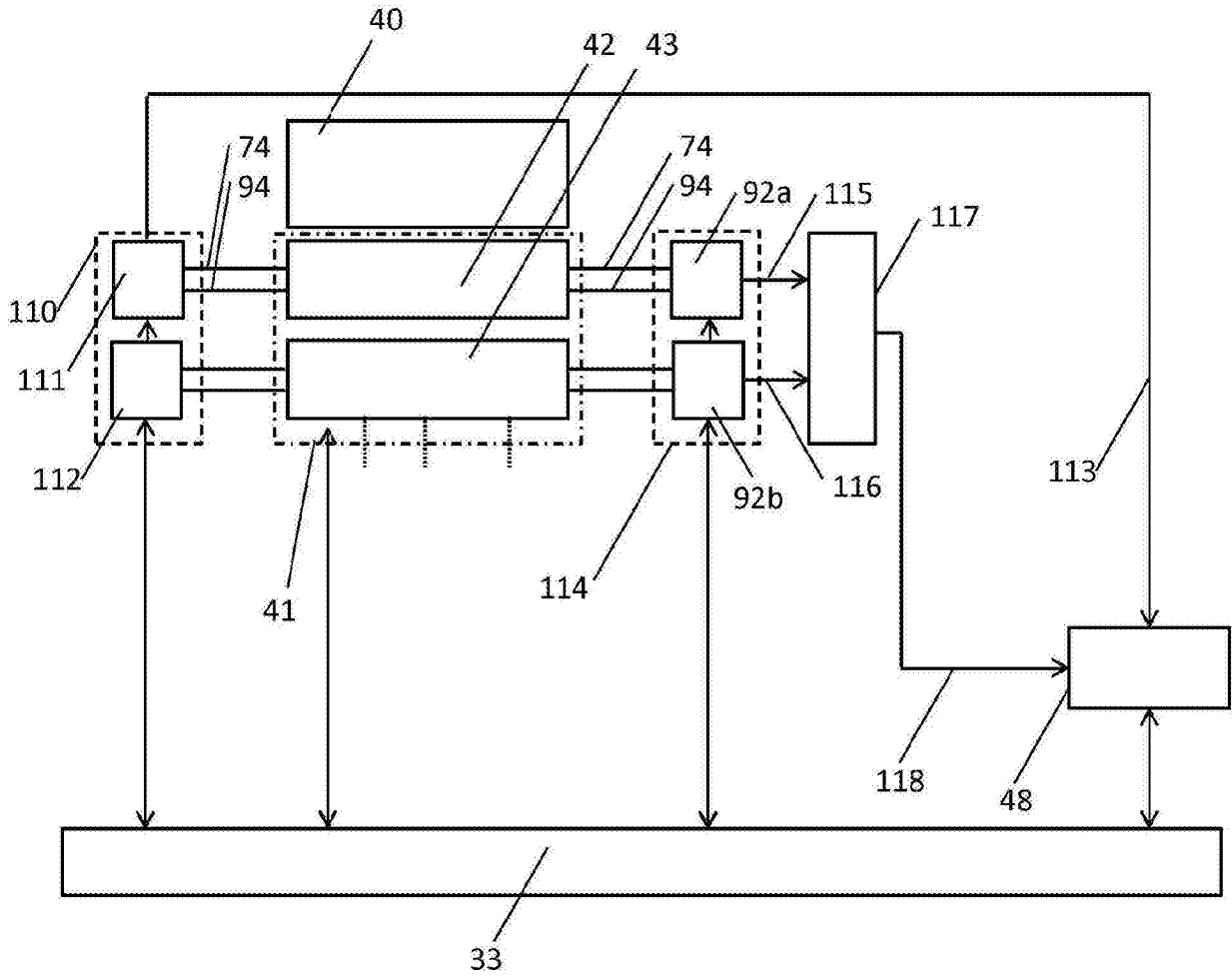


图9