



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101839991 B

(45) 授权公告日 2013. 06. 12

(21) 申请号 201010170816. 0

US 5859893 A, 1999. 01. 12,

(22) 申请日 2010. 05. 06

CN 101576514 A, 2009. 11. 11,

(73) 专利权人 清华大学

审查员 黄彬

地址 100084 北京市 100084-82 信箱

(72) 发明人 刘亚强 王石 魏清阳 程建平

马天予 吴朝霞

(74) 专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事

务所(普通合伙) 11201

代理人 廖元秋

(51) Int. Cl.

G01T 1/202(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101539630 A, 2009. 09. 23,

US 3732419 , 1973. 05. 08,

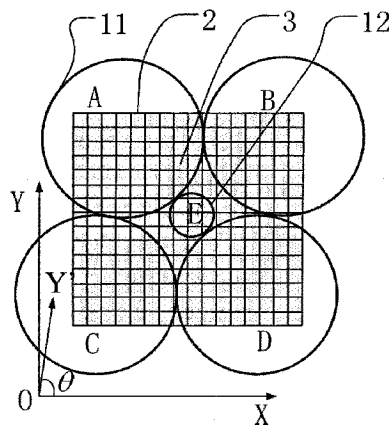
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

一种复合光敏器件斜排列式高能射线探测器

(57) 摘要

本发明的实施例公开了一种复合光敏器件斜排列式高能射线探测器,包括:闪烁晶体模块、复合光敏器件阵列和解码模块,闪烁晶体模块用于产生闪烁光,由长条形闪烁晶体单元沿所述长条形闪烁晶体单元的宽度方向排列而成;复合光敏器件阵列,用于探测来自所述闪烁晶体模块的闪烁光并输出信号,包括第一组光敏器件和第二组光敏器件,第一组光敏器件的尺寸大于第二组光敏器件的尺寸,第一组光敏器件排列成菱形;解码模块,用于根据来自复合光敏器件阵列的信号,获得高能射线的空间位置和能量。根据本发明提供的高能射线探测器,可以通过灵活选择光敏器件尺寸,获得更小的探测死区,在两个方向上得到不同的空间分辨率。



1. 一种复合光敏器件斜排列式高能射线探测器,其特征在于,包括闪烁晶体模块、复合光敏器件阵列和解码模块,

所述闪烁晶体模块,用于产生闪烁光,所述闪烁晶体模块由长条型闪烁晶体单元沿所述长条型闪烁晶体单元的宽度方向排列而成;

所述复合光敏器件阵列,用于探测来自所述闪烁晶体模块的闪烁光并输出信号,所述复合光敏器件阵列包括第一组光敏器件和第二组光敏器件,所述第一组光敏器件的尺寸大于所述第二组光敏器件的尺寸,所述第一组光敏器件是四个排列为菱形的光敏器件,所述第二组光敏器件是一个光敏器件,放置于所述菱形中心,所述第二组光敏器件与所述第一组光敏器件中部分光敏器件紧密相邻;

所述解码模块,用于根据来自复合光敏器件阵列的信号获得高能射线的空间位置和能量。

2. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,所述复合光敏器件阵列包括多个由所述第一组光敏器件和第二组光敏器件组成的阵列。

3. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述第一组光敏器件和第二组光敏器件的光敏器件包括光电倍增管、硅光电倍增管或雪崩二极管。

4. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述第二组光敏器件与第一组光敏器件中相对的两个光敏器件紧密相邻。

5. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述长条型闪烁晶体单元的宽度方向为方形、长方形或菱形。

6. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述长条型闪烁晶体单元为以下材料的晶体之一:

锗酸铋、硅酸镱、硅酸钪镱、硅酸钆、硅酸钇、氟化钡、碘化钠、碘化铯、钨酸铅、铝酸钇、溴化镧、氯化镧、溴化铈、硅酸镱、铝酸镱、碘化镱。

7. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述闪烁晶体模块为方形、长方形或加工研磨成多边形。

8. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述复合光敏器件阵列与闪烁晶体模块之间通过光学胶或光导材料粘结。

9. 如权利要求 8 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述光导材料为以下材料中的一种:有机塑料、玻璃和光纤。

10. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述高能射线探测器为单块或多块拼接成平面、弧形或环形。

11. 如权利要求 1 所述的高能射线探测器,其特征在于,所述解码模块得到高能射线的空间位置和能量,包括以下方式之一:

当使用直接坐标系时,

$$\begin{cases} E = V_A + V_B + V_C + V_D + V_E \\ X = \frac{V_B + V_D + \frac{1}{2}V_E}{E} \\ Y = \frac{V_A + V_B + \frac{1}{2}V_E}{E} \end{cases} ;$$

当使用斜坐标系时,

$$\begin{cases} E = V_A + V_B + V_C + V_D + V_E \\ X = \frac{V_A \times \cos(\theta) + V_B \times (1 + \cos(\theta)) + V_D + \frac{1}{2}V_E \times (1 + \cos(\theta))}{E} \\ Y = \frac{(V_A + V_B) \times \sin(\theta)}{E} \end{cases}$$

其中, X 和 Y 分别高能射线的空间位置中的水平位置和垂直位置;E 为高能射线能量; V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 分别为第一组光敏器件中的四个光敏器件的输出信号; V_E 为第二组光敏器件的输出信号; θ 为 Y' 与 X 的夹角。

一种复合光敏器件斜排列式高能射线探测器

技术领域

[0001] 本发明涉及辐射探测成像领域,尤其是涉及一种复合光敏器件斜排列式高能射线探测器。

背景技术

[0002] 高能射线探测技术常用探测器之一为闪烁体探测器。闪烁体探测器通常利用一种能够有效阻挡和吸收电磁波辐射并与之产生发光作用的闪烁晶体作为探测材料。当高能射线入射到闪烁晶体内,根据射线能量、闪烁晶体有效原子系数和密度的不同,与闪烁晶体发生不同比例的光电效应、康普顿散射效应及电子对效应,将能量沉积在闪烁晶体中,被激发的闪烁晶体退激发出微弱的闪烁光,退激服从指数衰减规律,不同材料的闪烁晶体具有不同的发光光谱,包括不同的发光衰减时间,不同的峰位值等。利用光敏器件将位于可见光区或紫外光区的闪烁光经过光电转换和倍增,形成脉冲信号。脉冲信号强度反映了高能射线的能量;脉冲信号发生的时间反映了高能射线的入射时间;脉冲信号的在多个光敏器件中的强度分配反映了高能射线的入射位置等。闪烁探测器具有探测效率高,分辨时间短等特点,被广泛应用于核医学、安全检查、高能物理和宇宙射线探测的研究中,是当今辐射探测技术领域不可或缺的主要手段。

[0003] 传统闪烁探测器在进行成像探测时,通常用长条形闪烁晶体单元组成方形闪烁晶体阵列来耦合光敏器件方形阵列或六边形阵列的方法进行高能射线的定位分析。闪烁晶体阵列除与光敏器件耦合的一面外其他六面用反光膜覆盖。闪烁晶体阵列间的长条形闪烁晶体单元之间按一定的规则粘贴或喷涂上不同长度的反光材料,长条形闪烁晶体单元之间添加硅油,并用高度透明的光学胶固定。闪烁晶体阵列和光敏器件阵列之间直接耦合或添加光导材料,如有机塑料、玻璃、光纤等。

[0004] 当高能射线入射到闪烁晶体阵列,和长条形闪烁晶体单元发生作用,将能量沉积在长条形闪烁晶体单元上,长条形闪烁晶体单元退激发出大量低能光子,如可见光或紫外光,低能光子在长条形闪烁晶体单元中传播,经过多次反射最终被光敏器件探测到或逃逸或被长条形闪烁晶体单元吸收。当低能光子遇到没有反射膜的表面将透射到临近的长条形闪烁晶体单元中从而可能被其它光敏器件探测到。最终所有光敏器件将得到不同强度的信号,信号的强度反映了探测到低能光子的数量,各个光敏器件上信号的和可以反映入射高能射线的能量,通过低能光子在各个光敏器件的分布可以得到高能射线的入射位置。因此传统探测器通常采用 Anger 重心法定位。

[0005] 如图 1 所示,为现有技术中采用闪烁晶体阵列耦合方形光敏器件阵列的传统闪烁探测器的原理图。图 2 为采用闪烁晶体阵列耦合 PQS 方式的光敏器件阵列的传统闪烁探测器的原理图。图 3 为采用闪烁晶体阵列耦合正六边形光敏器件阵列的传统闪烁探测器的原理。其中,1 为光敏器件,2 为闪烁晶体模块,3 为长条形闪烁晶体单元。在图 1 中,光敏器件阵列排列为方形。在图 3 中,光敏器件阵列排列为正六边形。

[0006] 以光敏器件方形阵列为例,如图 1 中所示,四个光敏器件光输出信号为 V_A 、 V_B 、 V_C 、

V_D , 则高能射线的空间位置 X, Y 和能量 E 分别由以下公式确定 :

$$[0007] \quad \begin{cases} E = V_A + V_B + V_C + V_D \\ X = \frac{V_B + V_D}{E} \\ Y = \frac{V_A + V_B}{E} \end{cases}$$

[0008] 如果用泛源照射到探测器上, 采集足够数量的高能射线粒子, 根据上述重心法计算每一个高能射线粒子的位置, 并绘于二维直方图中, 得到泛场直方图或称二维位形图。从高能射线粒子与晶体发生作用到被光敏器件探测产生电脉冲信号的过程的随机性, 导致输出信号的不确定性, 入射到同一块长条型晶体单元的若干个高能射线粒子会输出不同的 X, Y 信号, 反映在泛场直方图中就是每一个晶体块呈现一个白色团块。根据泛场直方图上的白色团块的分布情况, 确定它们的分界线, 并记录在查找表中。数据采集时可以根据每个入射事件产生的 X, Y 信号和查找表, 判断该入射粒子进入了哪一个长条型晶体单元, 从而得到相应的晶体块在探测器模块中的位置编码。另一种方法是利用泛场直方图使用最大似然估计方法, 从粒子入射的 X, Y 值判断它发生在哪个长条型晶体单元中。

[0009] 现有技术的缺点是, 传统探测器在 X, Y 方向上得到的空间分辨率是一样的, 而且如果采用图 1、图 2 和图 3 中的闪烁探测器, 光敏器件之间有较大的探测死区。

发明内容

[0010] 本发明的目的旨在至少解决上述问题之一, 特别提出了一种具有光敏器件尺寸选择灵活、不同空间分辨率、探测死区小和可扩展等特点的复合光敏器件斜排列式高能射线探测器。

[0011] 本发明实施例开了一种复合光敏器件斜排列式高能射线探测器, 包括: 所述高能射线探测器包括: 闪烁晶体模块、复合光敏器件阵列和解码模块,

[0012] 所述闪烁晶体模块, 用于产生闪烁光, 所述闪烁晶体模块由长条型闪烁晶体单元沿所述长条型闪烁晶体单元的宽度方向排列而成;

[0013] 所述复合光敏器件阵列, 用于探测来自所述闪烁晶体模块的闪烁光并输出信号, 所述复合光敏器件阵列包括第一组光敏器件和第二组光敏器件, 所述第一组光敏器件的尺寸大于所述第二组光敏器件的尺寸, 所述第一组光敏器件包括四个排列为菱形的光敏器件, 所述第二组光敏器件包括一个光敏器件, 放置于所述菱形中心, 所述第二组光敏器件与所述第一组光敏器件中部分光敏器件紧密相邻;

[0014] 所述解码模块, 用于根据来自复合光敏器件阵列的信号获得高能射线的空间位置和能量。

[0015] 根据本发明实施例提供的高能射线探测器, 具有以下特点和优点:

[0016] 1、可以灵活选择光敏器件的尺寸: 大尺寸光敏器件构成的菱形角度可以根据小尺寸光敏器件的大小来确定, 排列的倾斜角度可以任意改变, 因此可以利用各种尺寸的光敏器件。

[0017] 2、可以选择不同类型的光敏器件组合, 可以由圆形的光敏器件如光电倍增管和长方形的的光敏器件如雪崩二极管组成。

[0018] 3、可以获得 X, Y 两个方向上不同的空间分辨率 :由光敏器件的排列特性可以得出在 Y 方向上的分辨率优于 X 方向。

[0019] 4、更高效的探测高能射线 :斜排列的复合光敏器件之间的缝隙面积小于传统方形排列的光敏器件阵列,因此复合光敏器件斜排列高能射线探测器探测的盲区较小。

[0020] 5、可扩展 :探测器模块可以拼接扩展成大平板探、弧形或环形探测器。

[0021] 本发明提供的高能射线探测器可以通过灵活选择光敏器件尺寸,获得更小的探测死区,在两个方向上得到不同的空间分辨率。

[0022] 本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0023] 本发明上述的和 / 或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中 :

[0024] 图 1 为采用闪烁晶体阵列耦合方形光敏器件阵列的传统闪烁探测器的原理示意图 ;

[0025] 图 2 为采用闪烁晶体阵列耦合 PQS 方式的光敏器件阵列的传统闪烁探测器的原理示意图 ;

[0026] 图 3 为采用闪烁晶体阵列耦合正六边形光敏器件阵列的传统闪烁探测器的原理示意图 ;

[0027] 图 4 为根据本发明实施例的采用方形闪烁晶体阵列耦合复合光敏器件斜排列式高能射线探测器原理示意图 ;

[0028] 图 5 为本根据本发明实施例的高能射线探测器获取的二维泛场直方图 ;

[0029] 图 6 为根据本发明实施例的圆形的第一组光敏器件和长方形的第二组光敏器件组成的斜排列式高能射线探测器原理示意图 ;

[0030] 图 7 为图 4 中光敏器件斜排列式高能射线探测器扩展成平面探测器的原理示意图。

[0031] 其中,

[0032] 1 为光敏器件阵列,11 为第一组光敏器件,12 为第二组光敏器件,2 为闪烁晶体模块,3 为长条型闪烁晶体单元。

具体实施方式

[0033] 下面详细描述本发明的实施例,所述实施例的示例在附图中示出,其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的,仅用于解释本发明,而不能解释为对本发明的限制。

[0034] 为解决上述问题,本发明实施例提供了一种复合光敏器件斜排列式高能射线探测器,包括闪烁晶体模块、复合光敏器件阵列和解码模块。具体地说,复合光敏器件阵列,用于探测闪烁光并输出信号,包括第一组光敏器件和第二组光敏器件,至少五个光敏器件斜排列而成。在本发明的一个实施例中,其中两组光敏器件的尺寸不同,第一组光敏器件的尺寸大于第二组光敏器件的尺寸,以下为了便于描述将第一组光敏器件中的光敏器件称为大尺

寸光敏器件,将第二组光敏器件中的光敏器件称为小尺寸光敏器件。在本发明的一个实施例中,大尺寸光敏器件的数量为 4 个,小尺寸光敏器件的数量为 1 个,小尺寸光敏器件位于四个大尺寸光敏器件构成的菱形的中心。

[0035] 结合图 4 所示,第一组光敏器件 11 包括四个排列为菱形的大尺寸光敏器件 A、B、C、D,四个光敏器件的中心在一个菱形上。第二组光敏器件 12 包括一个小尺寸光敏器件 E。小尺寸光敏器件 E 放置于上述菱形中心。菱形的角度能够通过大尺寸光敏器件和小尺寸光敏器件的尺寸而定,且可让小尺寸光敏器件与大尺寸光敏器件中的部分光敏器件紧密排列。如图 4 中所示让小尺寸光敏器件 E 和相对的两个大尺寸光敏器件 A 和 D 紧挨。

[0036] 其中,第一组光敏器件和第二组光敏器件的光敏器件类型包括:光电倍增管、硅光电倍增管、雪崩二极管。第一组光敏器件和第二组光敏器件的光敏器件类型可以相同,也可不同。

[0037] 此外,复合光敏器件斜排列式高能射线探测器还包括闪烁晶体模块 2,用于生成闪烁光,闪烁晶体模块 2 由长条型闪烁晶体单元 3 沿长条型闪烁晶体单元的宽度方向排列而成。其中,长条型闪烁晶体单元 3 的宽度方向为方形、长方形或菱形,图 4 中所示宽度方向为方形。

[0038] 长条型闪烁晶体单元 3 可以采用以下材料的晶体之一:锗酸铋、硅酸镱、硅酸钷、硅酸钆、硅酸钷、氟化钡、碘化钠、碘化铯、钨酸铅、铝酸钷、溴化镧、氯化镧、溴化铯、硅酸镱、铝酸镱、碘化镱。

[0039] 将上述用于捕获高能射线的长条型闪烁晶体单元 3 排列成闪烁晶体模块 2。其中,长条型晶体单元 3 的横切面以及组成的闪烁晶体模块 2 的形状包括正方形或长方形或菱形。

[0040] 闪烁晶体模块 2 在不同的位置粘结不同长度的反光膜,未粘接反光膜的地方用硅油填充,利用光学胶固定闪烁晶体模块 2。其中为了提高闪烁晶体模块 2 与光敏器件阵列的耦合,可以对闪烁晶体模块进一步加工,进行切割和打磨成其它多边形。

[0041] 在本发明的一个实施例中,复合光敏器件斜排列式高能射线探测器是利用光学胶将上述闪烁晶体模块 2 与斜排列复合光敏器件阵列直接粘结在一起。在本发明的另一个实施例中,还可用上述闪烁晶体模块耦合光导材料后再耦合斜光敏器件阵列。其中,光导材料为以下材料中的一种:有机塑料、玻璃和光纤。

[0042] 高能射线入射到闪烁晶体模块 2 后产生闪烁光,被光敏器件探测到。光敏器件将探测到的信号经过转换和放大后得到电脉冲信号,输出到解码模块。解码模块利用脉冲信号在光敏器件阵列的权重分配,得到高能射线在上述闪烁晶体模块中的坐标。

[0043] 其中,解码模块对对脉冲信号进行解码的方法包括两种。

[0044] 方法一:使用直角坐标系 XOY。

[0045] 结合图 4 所示,五个光敏器件输出信号为 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 、 V_E ,则高能射线的空间位置 X, Y 和能量 E 分别由以下公式确定:

$$[0046] \begin{cases} E = V_A + V_B + V_C + V_D + V_E \\ X = \frac{V_B + V_D + \frac{1}{2}V_E}{E} \\ Y = \frac{V_A + V_B + \frac{1}{2}V_E}{E} \end{cases}$$

[0047] 方法二：使用斜坐标系 XOY'。

[0048] 结合图 4 所示，五个光敏器件输出信号为 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 、 V_E ， θ 为 Y' 与 X 的夹角，则高能射线的空间位置 X, Y 和能量 E 分别由以下公式确定：

$$[0049] \begin{cases} E = V_A + V_B + V_C + V_D + V_E \\ X = \frac{V_A \times \cos(\theta) + V_B \times (1 + \cos(\theta)) + V_D + \frac{1}{2}V_E \times (1 + \cos(\theta))}{E} \\ Y = \frac{(V_A + V_B) \times \sin(\theta)}{E} \end{cases}$$

[0050] 通过上述方法可以获得 X, Y 两个方向上不同的空间分辨率。如图 4 中所示，由光敏器件的排列特性可以得出在 Y 方向上的分辨率优于 X 方向。根据上述方法计算每一个高能射线粒子的位置，并绘于二维直方图中，得到泛场直方图或称二维位形图。入射到同一块长条型晶体单元的若干个高能射线粒子会输出不同的 X、Y 信号，反映在泛场直方图中就是每一个晶体块呈现一个白色团块。根据泛场直方图上的白色团块的分布情况，确定它们的分界线，并记录在查找表中。数据采集时可以根据每个入射事件产生的 X、Y 信号和查找表，判断该入射粒子进入了哪一个长条型晶体单元，从而得到相应的晶体块在探测器模块中的位置编码。

[0051] 下面以闪烁晶体模块为 9 行 9 列组成 9×9 方阵的高能射线探测器为例，对本发明进一步说明。

[0052] 其中，闪烁晶体材料为硅酸钷镭，长条型闪烁晶体单元尺寸： $5.7\text{mm} \times 5.7\text{mm} \times 20\text{mm}$ ；闪烁晶体阵列：9 行 9 列组成 9×9 方阵， $52\text{mm} \times 52\text{mm}$ 。

[0053] 复合光敏器件阵列为：

[0054] 第一组光敏器件：4 个 Hamamatsu R9779（直径 51mm），光电倍增管，四个大尺寸光电倍增管斜排列角度：菱形小角角度 86 度。光电倍增管阴极电压：-1500V，光电倍增管阳极电压：0V（接地）。

[0055] 第二组光敏器件：1 个 Photonis XP1912（直径 19mm），小尺寸光电倍增管中心在菱形中心上。

[0056] 伽马射线源：铯（Cs-137）点源，强度 $0.4 \mu\text{Ci}$ ，能量 662KeV

[0057] 数据采集：光电倍增管信号经前置放大器进入 ADC 模块（模数转化模块），提取时间和位置信息，传入 Flow board 模块（数据接收模块），用 PowerPC 接收和传输到 PC 机，使用 LabView 程序采集。

[0058] 实验结果分析：

[0059] 光敏器件斜排列式高能射线探测器的光敏器件采用光电倍增管，闪烁晶体阵列为

9×9 方阵, 铯 (Cs-137) 伽马源距离探测器 30cm 远, 可近似为泛场源, 当伽马射线入射到闪烁晶体阵列后激发闪烁晶体, 闪烁晶体退激、产生可见光, 可见光经四个光电倍增管转化为电信号, 放大后输出到数据采集部分。最后得到泛场的直方图如图 5 所示, 其中 9×9 阵列结构清晰可见。图像灰度代表计数率, 颜色越白表示该处伽马射线的强度越高。

[0060] 图 4 所示的第一组光敏器件和第二组光敏器件均为圆形, 本发明实施例提供的复合光敏器件斜排列式高能射线探测器亦可实施为选择不同类型的光敏器件组合而成。如图 6 中所示, 第一组光敏器件为圆形的光电倍增管, 第二组光敏器件为长方形的雪崩二极管。具体的说, 光敏器件 A、B、C、D 为圆形的光电倍增管, 光敏器件 E 为长方形的雪崩二极管。

[0061] 并且上述实施例中提供的复合光敏器件斜排列式高能射线探测器可以扩展。即探测器模块可以拼接扩展成平面、弧形或环形探测器。图 7 示出了光敏器件斜排列式高能射线探测器扩展成平面探测器的原理示意图。如图中 7 所示, 第一组光敏器件包括 9 个光敏器件, 第二组光敏器件包括 4 个光敏器件。相邻 4 个大尺寸光敏器件, 即第一组光敏器件斜排列, 其菱形中心位置放置小尺寸光敏器件, 即第二组光敏器件。

[0062] 根据本发明实施例提供的高能射线探测器, 具有以下特点和优点:

[0063] 1、可以灵活选择光敏器件的尺寸: 大尺寸光敏器件构成的菱形角度可以根据小尺寸光敏器件的大小来确定, 排列的倾斜角度可以任意改变, 因此可以利用各种尺寸的光敏器件。

[0064] 2、可以选择不同类型的光敏器件组合, 如图 5 中所示, 可以由圆形的光敏器件如光电倍增管和长方形的的光敏器件如雪崩二极管组成。

[0065] 3、可以获得 X, Y 两个方向上不同的空间分辨率: 如图 4 中所示, 由光敏器件的排列特性可以得出在 Y 方向上的分辨率优于 X 方向。

[0066] 4、更高效的探测高能射线: 斜排列的复合光敏器件之间的缝隙面积小于传统方形排列的光敏器件阵列, 因此复合光敏器件斜排列高能射线探测器探测的盲区较小。

[0067] 5、可扩展: 探测器模块可以拼接扩展成大平板探、弧形或环形探测器。

[0068] 本发明提供的高能射线探测器可以通过灵活选择光敏器件尺寸, 获得更小的探测死区, 在两个方向上得到不同的空间分辨率。

[0069] 以上所述仅是本发明的优选实施方式, 应当指出, 对于本技术领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明原理的前提下, 还可以做出若干改进和润饰, 这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

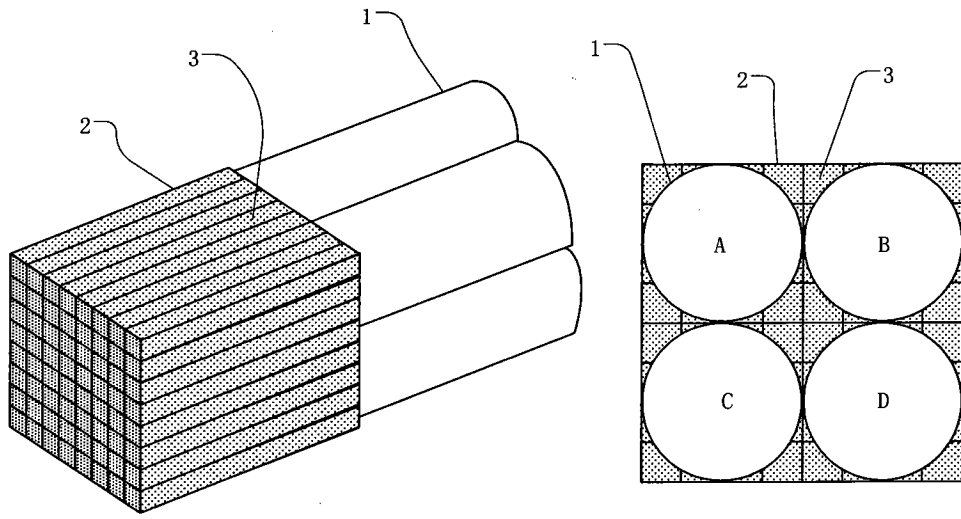


图 1

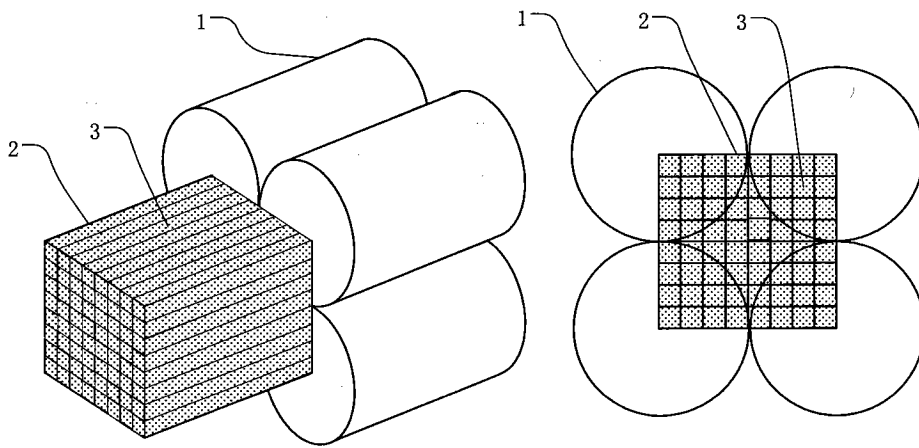


图 2

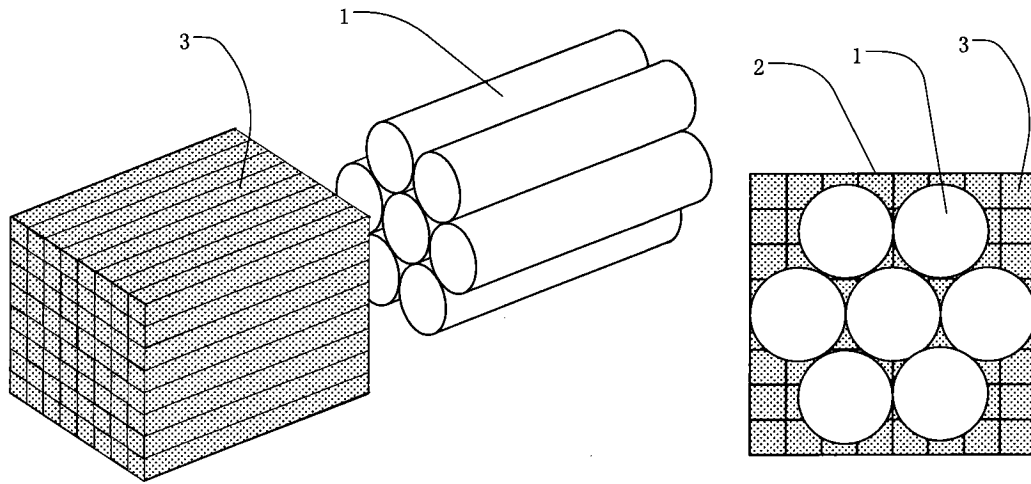


图 3

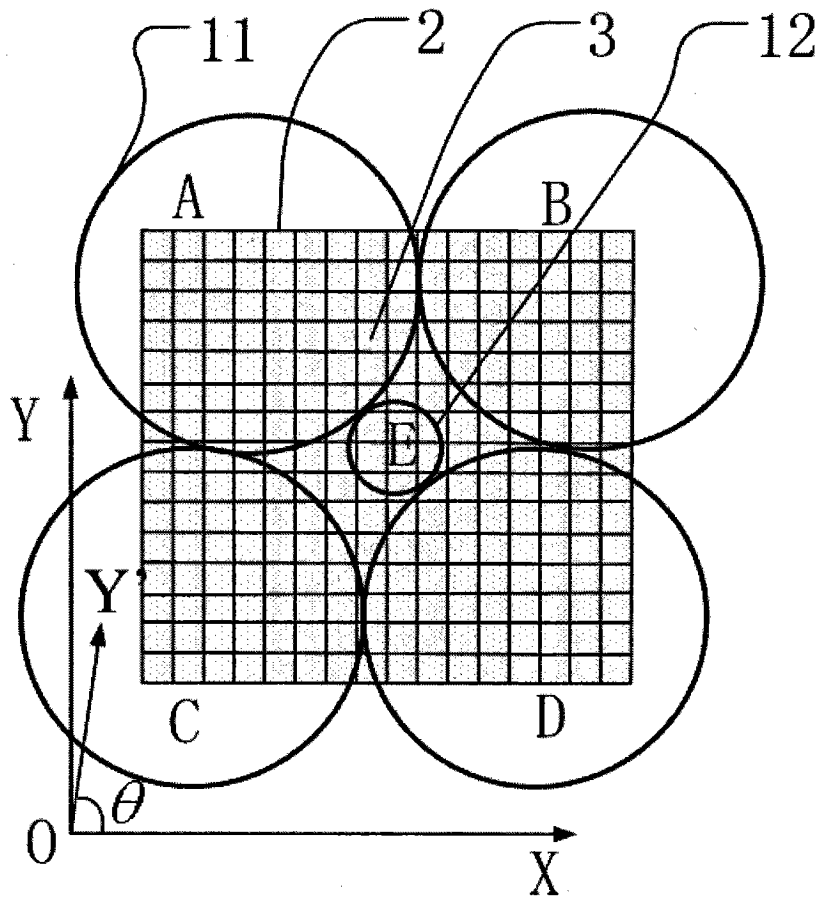


图 4

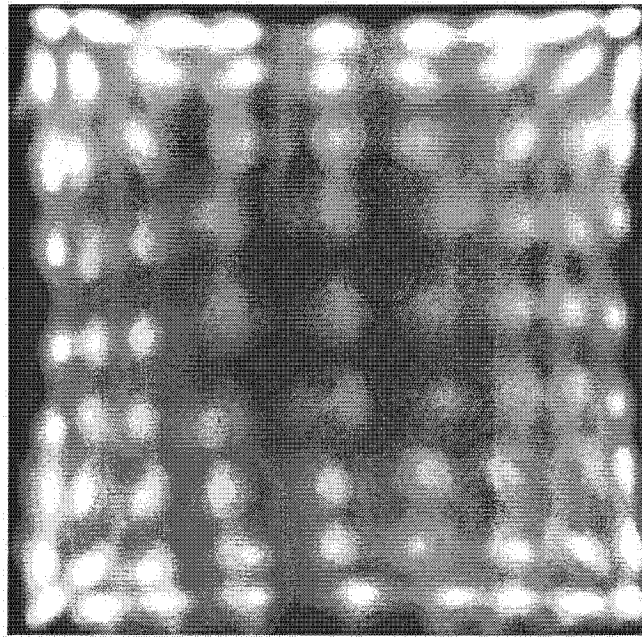


图 5

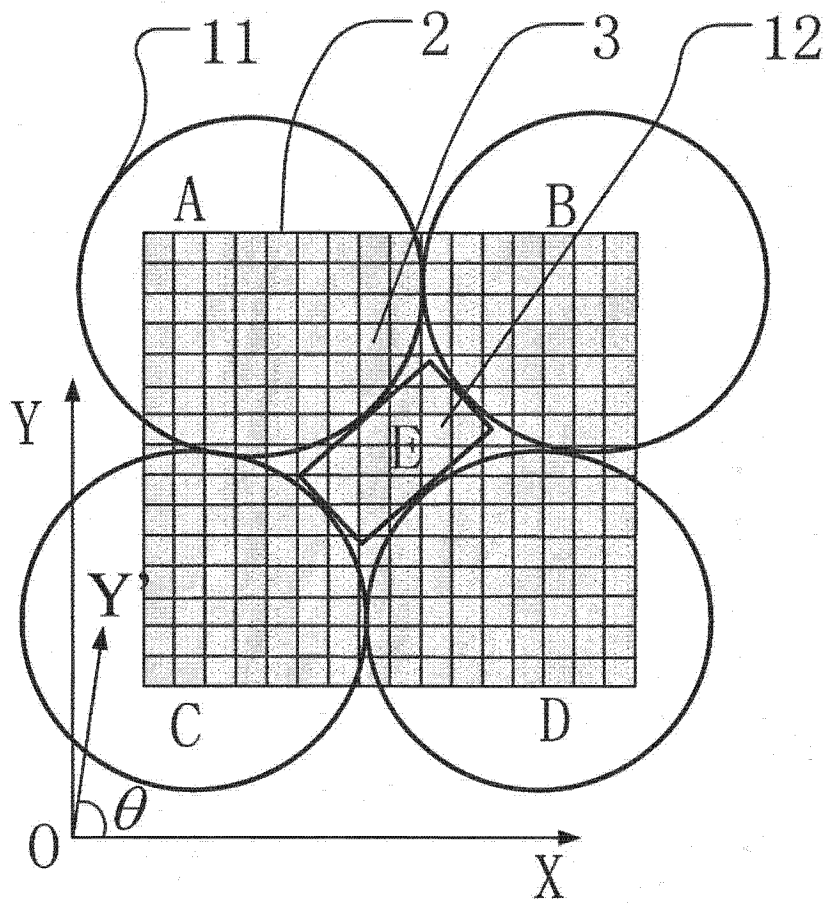


图 6

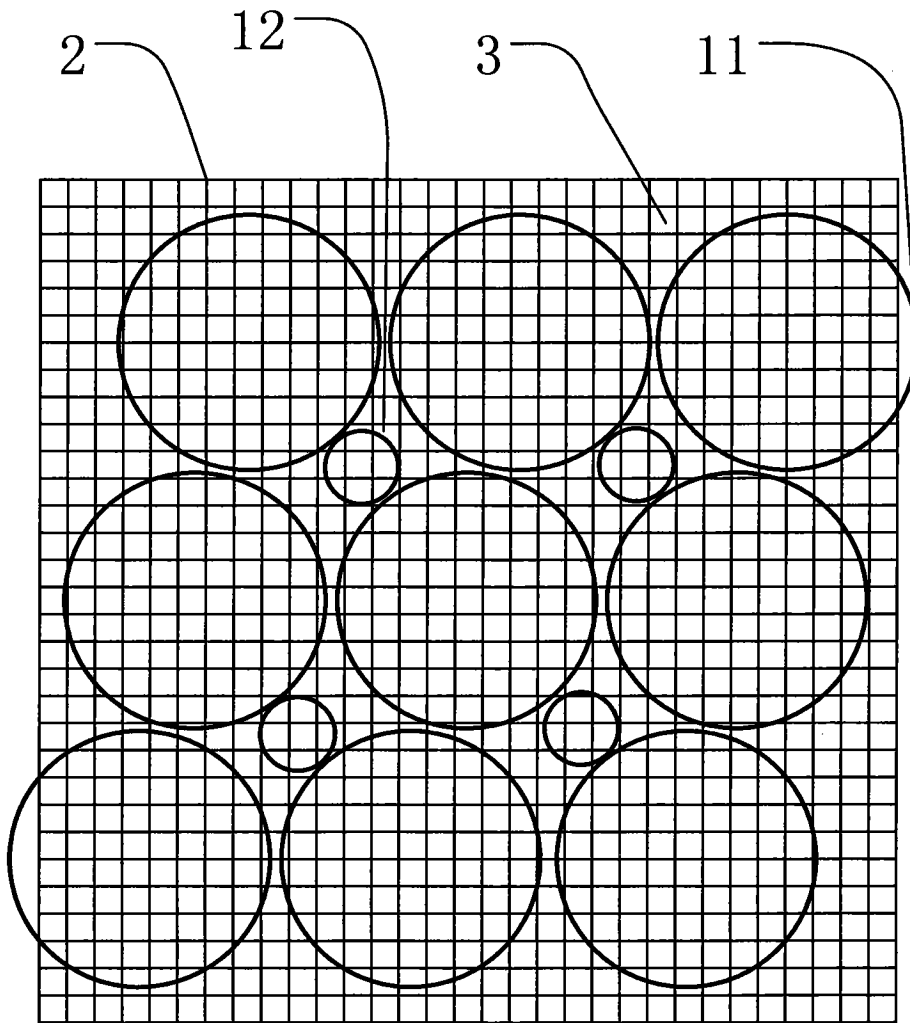


图 7