基于透镜阵列多元聚焦的 连续晶体三维位置灵敏探测器设计和仿真

李 婷^{1,2,3},庄 凯^{1,2,3},李道武^{1,3},梁秀佐^{1,3},刘彦韬^{1,3},

张译文^{1,3},孔令钦^{1,2,3},章志明^{1,2,3,4},帅 磊^{1,3,4,*},魏 龙^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院 高能物理研究所,北京市射线成像技术与装备工程技术研究中心,北京 100049;

2.中国科学院大学核科学与技术学院,北京 100049;3.国家原子能机构核技术(核探测与核成像)研发中心,北京 100049;
 4.济南中科核技术研究院,山东济南 250131)

摘要:连续晶体闪烁体探测器可以实现 γ 射线作用点的三维位置定位。本文提出一种新的探测器结构, 引入透镜阵列实现作用点定位。探测器采集多元聚焦图像,从而改变对连续晶体闪烁光分布探测的需 求。文中建立连续晶体、透镜阵列和光子计数器阵列的模型进行模拟研究,建立多元聚焦的光路反演重 建算法定位 γ 射线作用点的三维位置。通过重建结果分析评估基于透镜阵列的连续晶体探测器性能, 这种结构具有较好的定位能力和位置分辨。对于尺寸为 48 mm×48 mm×45 mm 的硅酸钇镥(LYSO) 闪烁晶体,实现了 xy 平面位置分辨优于 1.54 mm,z 方向位置分辨优于 3.13 mm。基于连续晶体和透 镜阵列结构的探测器还可对多作用点的情形进行重建,分析三组选定位置的重建结果,该结构对双作用 点定位具有可行性。

关键词:连续晶体探测器;透镜阵列;作用点定位;位置灵敏探测器
 中图分类号:TL99;O572.212
 文献标志码:A
 文章编号:1000-6931(2024)01-0239-09
 doi:10.7538/yzk.2023.youxian.0042

Design and Simulation of Three-dimensional Position Sensitive Detector with Monolithic Scintillation Crystal Based on Lens Array for Multiple Focus Points

LI Ting^{1,2,3}, ZHUANG Kai^{1,2,3}, LI Daowu^{1,3}, LIANG Xiuzuo^{1,3}, LIU Yantao^{1,3}, ZHANG Yiwen^{1,3}, KONG Lingqin^{1,2,3}, ZHANG Zhiming^{1,2,3,4}, SHUAI Lei^{1,3,4,*}, WEI Long^{1,2,3,4}

(1. Beijing Engineering Research Center of Radiographic Techniques and Equipment,

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. CAEA Center of Excellence on Nuclear Technology

Applications for Nuclear Detection and Imaging, Beijing 100049, China;

4. Jinan Laboratory of Applied Nuclear Science, Jinan 250131, China)

Abstract: The monolithic scintillation crystal detector has the ability to position the

收稿日期:2023-02-06;修回日期:2023-02-24

基金项目:国家自然科学基金(11705224,11805213)

^{*}通信作者:帅 磊

three-dimension interaction location of the gamma ray in the detector depending on accurate acquisition of scintillation light distribution. Depth estimation of light field can be solved by a lens array in light field technology. A new detector model was designed in the paper which introduced a lens array for positioning the interaction in the monolithic detector. The scintillation light is focused by each lens unit in the lens array. Photons in some discrete pixels of the photon counter array where the scintillation light is focus on are detected to form an image of multiple focus points instead of the scintillation light distribution detection based on continuous crystal. The position of the scintillation light source in the crystal can be reconstructed from the focus image through optical path inversion. The detector model consisting of a monolithic crystal, a lens array and a multi-pixel photon counter was established in the paper. The monolithic scintillator was a lutetium-yttrium silicate (LYSO) scintillator with dimensions 48 mmimes48 mmimes45 mm. The lens was hemispherical with a radius of 15 mm supposed to be uniformly distributed in 3×3 array and the material was as same as the crystal. The crystal and the lens array were considered as a whole in the simulation. The multi-pixel photon counter was set at 44.4 mm from the crystal surface. The pixel size of the photon counter array was 3 mm and the quantum efficiency was 30%. The axis of symmetry of the three parts was same. The reconstruction algorithm was based on optical path inversion from multiple focus points for locating the 3D position of gamma-ray interaction. The intersection points of the inverted optical paths and the set z plane with different depths in the crystal was calculated in the reconstruction process. When the intersection points converged towards the same point in the z_0 plane, the depth of interaction was z_0 and the intersection point in the z_0 plane was the interaction point. The reconstruction results were analyzed to evaluate the performance of the monolithic scintillation crystal detector based on the lens array. The x/y resolution is better than 1.54 mm and the z resolution is better than 3.13 mm. The two interaction points when coincidence occurs are reconstruced in the condition that the energy is the same. The detector is feasible for the positioning of two interaction points by the reconstruction results of three groups of selected positions. The monolithic scintillation detector based on a lens array has both good positioning ability and position resolution. The detector is suitable for the position reconstruction of multiple interaction points.

Key words: monolithic crystal detector; lens array; interaction position; position sensitive detector

射线成像技术广泛应用于生物医学、天文 学、辐射环境监测、国土安全以及公共安全等领 域^[1-5]。位置灵敏探测器作为射线探测的关键 设备,是决定射线成像系统性能指标的重要因 素。基于闪烁体的位置灵敏探测器阻止本领 高,位置分辨、能量分辨和时间分辨优异,还具 有操作简易、稳定性好等优点,使得闪烁体探测 器在射线成像应用中起着重要的作用。闪烁体 探测器利用闪烁晶体将γ射线能量转化为闪烁 光,再由光子计数器转化为电信号,电信号内包 含γ射线和晶体作用的位置信息和能量信息。 目前大多数高分辨的γ探测器采用晶体阵列耦 合光子计数器阵列来实现。当以缩小晶体单 元尺寸的方式进一步提高晶体阵列探测器的 空间分辨时,受到了机械加工的限制,难以继 续提升分辨性能,并且晶体间隔的填充降低 了探测器的探测效率,这些是晶体阵列探测 器存在的问题。 基于连续晶体的探测器可以避免晶体阵列 带来的问题,具有设计结构简单、能量分辨率 高、探测器效率高以及低造价等优点。随着新 的闪烁晶体、硅光电倍增管(SiPM)和数字电子 学技术的发展,连续晶体探测器有了新的可行 性方案。连续晶体探测器通过所探测到每个 γ 事例的闪烁光分布来计算 γ射线在晶体内的作 用位置。因此当采用连续晶体结构的探测器 时,高分辨的 γ射线位置定位算法是不可缺少 的。目前已有多种高分辨的定位算法被研究和 应用开发,如神经网络定位算法^[6-7]以及 K-NN 定位算法^[8-10],这些算法都依赖于精确获取闪 烁光输出分布。

光学成像技术中,在普通成像系统主透镜 的一次像面处插入透镜阵列,每个透镜单元及 其后对应的传感器区域记录光线在场景中相同 部分在不同视角下所成像的集合,因此采用二 维透镜阵列能得到同时包含位置和传播方向在 内的四维光场数据,解决光场深度估计和光源 定位问题。本文引入透镜阵列耦合连续晶体光 输出面,提出一种新型的连续晶体探测器结构, 实现对射线作用点的三维位置探测,并有望实 现多个作用点的定位重建。在闪烁光传输过程 中,透镜阵列中的各个透镜单元对其接收到的 闪烁光聚焦,在光子计数器阵列平面上形成含 有多个聚焦点的图像,每个聚焦点包含有闪烁 光源位置和传播方向的信息,由聚焦点图像通 过光路反演即可重建闪烁光源在晶体内的位 置。这种结构的探测器不需要对连续晶体闪烁 光分布进行精确探测,通过探测聚焦位置即可 实现作用点定位重建。本文通过建立模型进行 蒙特卡罗模拟研究,提出一种连续晶体对射线 作用点的三维定位的解决方法,并通过重建算 法结果分析来评估这一技术的可行性,并对晶 体内两个作用点的情形进行研究。

1 重建算法原理

透镜阵列应用在光场成像领域中,通常单 元透镜直径非常小,因而又可称为微透镜阵列。 微透镜阵列作为一种基础的阵列光学元器件, 对光信息有很好的聚焦、准直、交换、多重成像 和综合成像的能力,已经应用于光场成像 3D 技术、深度估计等研究中[11-13]。在深度估计应 用中,通过透镜阵列中的透镜单元在不同视场 对同一个物体成像,相当于将三维物体的深度 信息转化为二维透镜阵列所成像的角度信 息^[14-15],每个透镜单元所成的像都包含着深度 信息。经过透镜中心的光线传输方向不变,以 此简化光线的传播,可将透镜阵列简化为小孔 阵列,光场成像深度估计原理如图1所示。不 同深度的光源A、B的光线在经过透镜阵列后, 在像平面的单元图像中位置不同,反映出A、B 光源在物体空间中的位置差异。





将透镜阵列应用于连续晶体探测器,射线 在晶体内作用转化的闪烁光传输到晶体光输出 面,再经由透镜单元传输到透镜与空气的界面 上发生折射而改变闪烁光传输方向,闪烁光在 空气中向靠近光轴的方向继续传输。经过透镜 阵列时闪烁光的传播示意图如图 2 所示,蓝色 光线表示晶体沉积射线能量后转化的闪烁光,



图 2 经过透镜阵列的闪烁光传播示意图 Fig. 2 Schematic diagram of propagation of scintillation light through lens array

红色光线表示从透镜阵列出射的闪烁光,出射 闪烁光继续传输直到被光电器件探测,透镜对 闪烁光传输方向的调制作用使得其接收到的闪 烁光到达光子计数器阵列的位置更加集中。光 子计数器阵列的光电器件采集图像并输出电信 号,被后续电子学转化为数字信号形成数字图 像。当调节光子计数器阵列与透镜阵列的间 距,使得闪烁光被探测的位置集中形成的光斑 小于光电器件像素大小时,采集图像可视为一 组聚焦点的像素化图像,一次事例形成的图像 中含有多个成像亮点。这些光斑或亮点仍包含 有射线作用点的位置和沉积能量信息,成像亮 点在图像中的位置与作用点的位置有关,成像 亮点的光子数与射线的沉积能量、透镜对射线 作用点的立体角有关。

采集到多个聚焦亮点图像进行射线作用 点位置重建时,主要基于闪烁光路的光线对应 关系和光的可逆性原理。射线能量不大时射线 作用点可视为一个点光源,因而在闪烁光的传 播路径上,闪烁光源、任一透镜中心和该透镜对 应的图像亮点在一条光线上。将光路反演,图 像亮点和透镜中心的连线反推到晶体内,反推 的光线必定经过闪烁光源。算法中通过预设晶 体内不同深度的平面,示意图如图 3 所示,计算 反推光线与平面的交点 S_i,当各个透镜反推光 线的交点在晶体的某一深度平面内汇聚为一点 时,该点即为射线与晶体的作用点,此时的平面 深度即为作用点的 z 值,再计算当前深度平面 中反推光线与平面的交点即为作用点的 x、y 值。由此,基于透镜阵列的连续晶体探测器通



图 3 多点聚焦的光路反演重建算法示意图 Fig. 3 Schematic diagram of reconstruction algorithm based on optical path inversion from multiple focus points

过多点聚焦和光路反演,实现了晶体探测器对 射线作用点的位置重建。

2 探测器模拟研究及算法处理流程

2.1 探测器蒙特卡罗模型及模拟参数设置

使用 FLUKA 蒙特卡罗模拟软件,建立连 续晶体及透镜阵列模型以计算光子计数器阵 列的采集图像。闪烁体选用尺寸为48 mm× 48 mm×45 mm的连续晶体,材料为LYSO, 折射率为 1.82。晶体表面除出光面耦合透镜 阵列端面外,均涂有黑色吸收层以防止多次反射 造成多重影像。透镜采用半球型,半径为15 mm, 选取 3×3 阵列, 球心均匀分布, 材料与晶体相 同,在模型中可将透镜阵列与连续晶体视为一 个整体,对闪烁光没有介质界面。光子计数器 阵列采用 SiPM 阵列,像素大小为 3 mm,量子 效率为 30%,设置在距离晶体出光面 44.4 mm 的位置。连续晶体、透镜阵列、SiPM 阵列的对 称轴在一条直线上,垂直于晶体出光面。采集 图像中每个像素的数值为当前像素探测到的闪 烁光子计数。

设置γ射线能量为 511 keV,在晶体内仅 发生一次作用。探测器的作用过程为:当γ射 线与闪烁晶体发生作用时,沉积部分或全部能 量产生闪烁光。闪烁光在连续晶体和透镜阵列 的一体化结构中传输,当传输到透镜与空气的 界面时发生折射,并沿折射方向继续传播至光 子计数器阵列被探测成像,成像结果如图 4 所 示。为研究晶体内某选定作用点位置的重建结 果统计特性,将γ事例转换为质子事例,质子的 出射位置即为γ事例的作用点位置。以晶体入 射面中心点(0,0,-45)(单位 mm,下同)开始 设置作用点位置,在 $z \in [-45, -20], x \in$ $[0,8],y\in[x,8]$ (单位 mm,下同)晶体空间内, 间隔1 mm 设置作用点。在 $x \in [12, 24], y \in$ [x, 24]晶体空间内,间隔4 mm 设置作用点, z方向间隔仍为1 mm。本文将设置在晶体边沿 的作用点 x、y 坐标取为 23 mm, 而非 24 mm。

2.2 多元聚焦的光路反演重建算法流程

算法处理流程分为以下3个步骤。

1) 确定亮点像素位置

采集图像以亮点为中心形成9个分立的区域,区域内除亮点外仍有少量的光子。因采用





position is on or departure from axis of crystal symmetry

的半球型透镜对"点"物的成像存在像差,部分 闪烁光子分布在焦点区域外,亮度低于焦点。 首先对采集图像进行区域划分,区域划分采用 K-Means聚类算法。划分区域后,在每个区域内 采用峰值法确定亮点像素位置,记录为(x_i,y_i), *i*=1~9。

2) 计算重建位置

在 2.1 节所述的模型下,闪烁光源、透镜中 心、图像亮点所在的光线为一条直线,在光路反 演时可直接采用几何比例关系,计算反演光路 光线与晶体内深度为 z_0 的平面交点 S_i 的位置 为 $(x_i, y_i)|z_0, i=1~9$ 。计算所有交点之间的 距离,以式(1)最小距离平方和来确定作用点的深 度 z_{Smin} 值,如图 5 所示 z_{Smin} 可估计为-40 mm。 xy 值由深度为 z_{Smin} 的平面上各交点的平均值 $(\bar{x}, \bar{y})|z_{Smin}$ 确定。



图 5 重建时计算最小距离平方和参数结果示意图 Fig. 5 Schematic diagram of minimum distance square sum parameter in reconstruction

$$f(z) = \sum \| S_i(z) - S_j(z) \|^2$$
 (1)

3) 判选重建结果

固定一个作用点位置进行多次事例重建了 后,对重建位置结果的x,y,z3个方向分别做 拟合分析,x,y方向重建结果为高斯分布,超过 3 σ 的重建结果认定为异常值,在后续分析中剔 除。在算法程序中,可用式(1)的 $f(z_{Smin})$ 作为 参数进行判选。在单个作用点时, $f(z_{Smin})$ 的大 小可以表征成像亮点位置确定的准确程度,从 而可反映重建结果偏离真实值的程度。文中数 据分析时设定 $f(z_{Smin})$ 值超过40时,重建结果 偏离真实值,不进行统计分析。

3 重建结果分析

3.1 单个作用点时探测器定位性能

以 2.2 节重建流程计算得到 2.1 节模型 中作用点位置设置下1 000次事例的重建结 果,重建结果绘制为散点图,如图 6 所示,以 作用点位置为(4,4,-20)时的重建结果示 意,画图时将 z 取绝对值(下同)。分析重建结 果的各方向统计特性,如图 7 所示。以下对选 取位置的重建结果分析时发现 z 方向的结果 不是标准的高斯分布,在下文的计算中仍以 高斯分布进行计算,对不同选取位置的重建 结果进行对比分析。

选取表 1 中 6 个作用点位置,分别计算得 出重建结果的 x、y、z 3 个方向平均值和标准差 来评估当前结构探测器的定位能力。结果表明,





图 6 未进行判选和经过判选的重建结果散点图

Fig. 6 Scatter diagram of reconstruction result before or after data filtering



Fig. 7 Distribution of reconstruction result in x, y and z directions

透镜阵列的引入,能解决连续晶体的作用点定 位问题,定位精度较好。

表 1	固定在不同作用点位置的重建结果						
	Table 1 Reconstruction result						
of interaction at different positions							

设置值/mm	x重建值/mm	y重建值/mm	z重建值/mm						
(0,0,-25)	0.01 ± 0.35	-0.01 ± 0.32	-25.22 ± 0.64						
(0,0,-40)	0.04 ± 0.29	0.04 ± 0.31	-38.06 ± 0.50						
(0,4,-25)	0.05 ± 0.34	4.07 \pm 0.31	-24.66 ± 0.57						
(0, 4, -40)	0.06 ± 0.31	4.07 \pm 0.28	-39.41 ± 0.72						
(4,4,-25)	4.11±0.29	4.07±0.31	-24.41 ± 0.55						
(4,4,-40)	4.29±0.26	4.26 ± 0.26	-40.97 ± 0.94						

对中心透镜所对的 $z \in [-45, -20], x \in [0,8], y \in [x,8]$ 晶体空间区域的作用点重建 结果的 x, y, z 3 个方向误差进行统计分析,结 果列于表 2。结果表明,基于连续晶体和透镜 阵列结构的探测器在 x, y 方向的定位准确度 较高,在 z 方向的定位准确度较弱。

表 2 中心区域重建结果定位误差情况 Table 2 Position error of reconstruction result of interaction in central region

类别	<i>x</i> 重建 误差/mm	y 重建 误差/mm	<i>z</i> 重建 误差/mm		
最小值	-0.80	-0.84	-2.06		
中位值	0.07	0.07	0.61		
最大值	1.00	1.02	2.85		

选取 y=0 mm 平面,以 x=0、2、4、6、8 mm 时重建结果的 x、z 方向平均值做分布图,如 图 8所示。重建结果的位置是不均匀、非线性



图 8 y=0 mm 平面固定作用点重建结果 Fig. 8 Reconstruction result of interaction in y=0 mm plane

的,在虚线框选的位置分别出现了 z 方向的重 建位置重叠和 xy 平面内的重建位置重叠。这 种现象的出现是由于采集图像的像素化和重建 算法中对图像像素点的定位网格化带来的。

3.2 单个作用点时探测器位置分辨性能

表 3 列出在不同区域的重建结果,分别计

算作用点定位在 x,y,z 3 个方向的误差及半高 宽,3 个区域分别对应中心、边线、边角位置上 的透镜。其中,中心透镜对应坐标值范围为 $x \in [0,8], y \in [x,8]; 边线透镜对应坐标值范$ $围为 <math>x \in [0,8], y \in [12,24]; 边角透镜对应坐$ $标值范围为 <math>x \in [12,24], y \in [x,24].$

表 3 不同区域的作用点定位误差及位置分辨 Table 3 Position error and resolution of reconstruction result of interactions in different regions

作用点 区域	<i>x</i> 误差 范围/mm	y误差 范围/mm	<i>z</i> 误差 范围/mm	x 半高宽 范围/ mm	y 半高宽 范围/ mm	z 半高宽 范围/ mm	x 半高宽 中位值/ mm	y 半高宽 中位值/ mm	<i>z</i> 半高宽 中位值/ mm	可重建 事例数
中心透镜	$-0.80 \sim 1.00$	$-0.84 \sim 1.02$	$-2.06 \sim 2.85$	0.24~1.12	0.22~1.12	0.54~2.96	0.68	0.69	1.46	$295 \sim 795$
边线透镜	-0.73~0.29	$-0.83 \sim 1.04$	$-0.04 \sim 3.21$	0.53~1.39	0.40~1.54	0.81~3.13	0.78	0.71	1.74	$10\!\sim\!429$
边角透镜	-0.60~0.60	-0.68~0.59	0.76~3.70	0.55~1.20	0.57~1.22	0.97~2.68	0.77	0.82	2.01	10~183

中心透镜对应的区域内误差及分辨性能优 于边线透镜,边角透镜对应的区域内作用点重 建结果误差及分辨最差。可重建事例数为数据 判选后的事例数,数值高可表征发生在该作用 点的事例容易被重建,可见晶体内可重建范围 集中在晶体入射面、靠近晶体中心轴。以各方 向的半高宽最大值计,xy平面位置分辨优于 1.54 mm,z方向位置分辨优于 3.13 mm。以 各方向的半高宽中位值来看,均匀分布在晶体 横向截面上的作用点,一半数量的作用点位置 分辨优于 0.82 mm;均匀分布在z方向上的作用 点,一半数量的作用点位置分辨优于 2.01 mm。 探测器的位置分辨性能良好。

3.3 两个作用点时探测器定位性能

晶体内发生康普顿散射事例或偶然符合事 例时,在两个以上作用点位置产生闪烁光,这些 闪烁光在一次采集时间窗内不能被区分,因此 光子计数器阵列采集到的图像是闪烁光的叠加 图像。连续晶体通过光分布重建作用点定位的 重建结果仅能给出一个作用点位置,且可能不 能定位到任何一个作用点的真实位置上。透镜 阵列的引入,将光子计数器阵列对光分布的精 确连续探测转换成亮点的离散探测,不仅可以 实现单个作用点的位置重建,还有望实现多作 用点的位置重建。

本文研究发生偶然符合事例时双作用点的 情况,射线能量为单一能量。2.1节模型中固 定作用点的图像为一次光电事例的图像,当晶体内发生偶然符合的两次光电事例,成像结果数据可由单个作用点的图像进行加和来获得。选取3组事例分析双作用点重建的可行性,位置组合分别为(0,1,-40)+(0,1,-30)、(0,1,-40)+(0,4,-30)、(-8,-8,-40)+(8,8,-30),重复100次事例。

表4列出3组事例重建结果的统计情况。 (0,1,-40)+(0,1,-30)、(-8,-8,-40)+ (8,8,-30)两组事例的重建结果平均值及标准 差与单个作用点的情况一致,(0,1,-40)+ (0,4,-30)这组事例的位置重建结果较差。通 过分析 xy 重建值的分布发现,按照 2.2 节重 建流程的判选条件仍有偏离较大的结果未被剔 除,这部分偏离结果是由于亮点位置定位不准 确带来的。重复 1 000 次事例后分析 xy 重建 值分布,超过 3 σ 的重建结果认定为偏离结果, 剔除这些偏离结果后这组事例的重建结果平均 值及标准差与单个作用点的情况一致,但可重 建事例率仅为 7%,即当前组合位置的准确重 建程度较低。图 9 为 3 组事例的重建结果散点 图,其中图 9b 中已剔除偏差较大的结果。

以上重建是基于两个作用点沉积的能量 接近,当能量差异较大时重建准确度会下降。 考虑应用到康普顿散射时,如设定射线入射 方向为垂直晶体,(0,1,-40)+(0,4,-30) 这组事例的散射角约为16.7°,(-8,-8,-40)+

表 4 连续晶体内两个作用点重建结果统计情况 Table 4 Reconstruction result of two interactions in monolithic crystal

位置组合	x_1 重建值/mm	yı 重建值/mm	z_1 重建值/mm	x_2 重建值/mm	y2 重建值/mm	z_2 重建值/mm
(0,1,-40)+(0,1,-30)	0.02 \pm 0.30	1.31 ± 0.12	-39.67 ± 0.36	0.01 ± 0.22	1.01 ± 0.05	-29.90 ± 0.16
(0,1,-40)+(0,4,-30)	0.27 \pm 0.33	1.26 ± 0.32	39.43 \pm 0.59	0.01 ± 0.35	2.88 \pm 0.86	28.41±1.09
	0.27 \pm 0.33	1.07 ± 0.28	39.24±0.69	0.05 ± 0.24	3.52 \pm 0.13	29.19 \pm 0.18
(-8, -8, -40) + (8, 8, -30)	-7.63 ± 0.25	-7.60 ± 0.23	-38.19 ± 0.29	7.63 \pm 0.16	7.64 \pm 0.16	-28.89 ± 0.29



Fig. 9 Scatter diagram of reconstruction result of two interactions in monolithic crystal

(8,8,-30)这组事例的散射角约为 66.2°。康 普顿散射角较大的事例重建准确度较高,目康 普顿散射角较大的事例散射点能量和吸收点能 量相近,利于双作用点的定位。本文重点研究 探测器的定位性能,后续研究如能进一步解决 能量探测问题,透镜阵列结构的连续晶体探测 器便可为康普顿射线成像技术提供一种新型的 探测器构型。

结论 4

透镜阵列应用于连续晶体探测器时,射线 沉积能量转换的闪烁光传输到透镜与空气的界 面上发生折射,改变其传输方向,在透镜单元接 收范围内的闪烁光出射到空气后均向靠近该透 镜单元光轴的方向继续传输,直至被光子计数 器阵列采集,形成光斑阵列的离散图像。光子 计数器阵列采集位置在透镜焦距附近时,采集 的光斑图像会形成聚焦点样式的图像。透镜阵 列的引入,改变了连续晶体探测器中对出射闪 烁光连续分布的精确探测,转换为对离散的闪 烁光聚焦点阵列的探测。通过多元聚焦的光路 反演重建能解决连续晶体探测器对射线作用点 的定位问题,实现射线作用点的三维位置探测。 文中模拟采用像素大小为 3 mm 的光子计数器

阵列采集聚焦点图像,xv平面重建位置误差在 1.04 mm 内,z方向重建位置误差在 3.70 mm 内,xv平面位置分辨优于 1.54 mm,z 方向位 置分辨优于 3.13 mm,探测器性能良好。本文 采用数据为连续晶体和透镜阵列一体化结构的 较理想情况下的结果,实际探测时透镜阵列和 连续晶体之间存在的界面将影响聚焦点图像的 亮暗情况,从而影响"亮点"的定位,后续研究中 需要改进"亮点"像素位置算法。透镜阵列的引 入还能实现对连续晶体内双作用点的同时定位, 有望应用于康普顿散射探测,但同样需要改进 "亮点"像素位置算法并解决能量探测的问题。

参考文献:

- JONES T, TOWNSEND D. History and future [1] technical innovation in positron emission tomography[J]. Journal of Medical Imaging, 2017, 4(1): 011013.
- [2] MCGREGOR D S. Materials for gamma-ray spectrometers: Inorganic scintillators[J]. Annual Review of Materials Research, 2018, 48(1): 245-277.
- [3] NIKL M, YOSHIKAWA A. Recent R&D trends in inorganic single-crystal scintillator materials for radiation detection[J]. Advanced

Optical Materials, 2015, 3(2): 463-481.

- [4] SIVELS C B, MCINTYRE J I, BOWYER T W, et al. A review of the developments of radioxenon detectors for nuclear explosion monitoring
 [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2017, 314(2): 829-841.
- [5] YANAGIDA T. Inorganic scintillating materials and scintillation detectors[J]. Proceedings of the Japan Academy Series B-Physical and Biological Sciences, 2018, 94(2): 75-97.
- [6] 周宇,王永纲. 基于连续晶体 PET 探测器模块电子学设计[J]. 核电子学与探测技术,2014,34
 (3):307-311.

ZHOU Yu, WANG Yonggang. The readout electronics for the continuous crystal PET detector module[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, 34(3): 307-311(in Chinese).

- [7] DU J W, WANG Y G, ZHANG L J, et al. Performance study of neural network position estimators for the monolithic scintillator PET detector modules[C] // IEEE Nuclear Science Symposuim & Medical Imaging Conference. [S. l.]: [s. n.], 2010.
- [8] van DAM H T, SEIFERT S, VINKE R, et al. A practical method for depth of interaction determination in monolithic scintillator PET detectors
 [J]. Physics in Medicine and Biology, 2011, 56 (13): 4 135-4 145.
- [9] ZHANG X M, WANG X H, REN N, et al. Performance of a SiPM based semi-monolithic

scintillator PET detector[J]. Physics in Medicine and Biology, 2017, 62(19): 7 889-7 904.

- [10] BORGHI G, TABACCHINI V, SCHAART D R. Towards monolithic scintillator based TOF-PET systems: Practical methods for detector calibration and operation [J]. Physics in Medicine and Biology, 2016, 61(13): 4 904-4 928.
- [11] TAVAKOLI B, JAVIDI B, WATSON E. Three dimensional visualization by photon counting computational integral imaging[J]. Optics Express, 2008, 16(7): 4 426-4 436.
- [12] PARK S G, YEOM J W, JEONG Y M, et al. Recent issues on integral imaging and its applications[J]. Journal of Information Display, 2014, 15(1): 37-46.
- [13] DANSEREAU D G, PIZZRRO O, WILLIAMS S B. Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras[C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: [s. n.], 2013: 1 027-1 034.
- [14] DAMGHANIAN M, OLSSON R, SJOSTROM M, et al. Spatial resolution in a multi-focus plenoptic camera [C] // IEEE International Conference on Image Processing. [S. l.]: [s. n.], 2014: 1 932-1 936.
- [15] QI J C, LIU B, CHEN R, et al. X-ray threedimensional imaging based on light field imaging technology[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68 (2): 024202.