

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904879

基于 SiPM 的线阵式 X 射线背散射探测器 设计与性能评估*

李维姣^{1,2}, 陈嘉敏², 邬小玫¹, 王威琪¹, 常青青²

(1. 复旦大学电子工程系 上海 200433; 2. 公安部第三研究所 上海 200031)

摘要:为了实现现场快速安全检查过程中敏感物质的细分,探讨了一种通过 X 射线背散射信号求取物质密度的方法,并完成了实现该方法的核心部件——一种基于硅光电倍增管(SiPM)的线阵式闪烁体探测器的设计和功能验证。该探测器具有能量分辨的能力,能够分析不同物质在不同能量下的散射衰减。在环境温度 $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 条件下,该探测器输出的脉冲幅值稳定,能量分辨率在 22.1%~25.7%变化(室温条件时能量分辨率为 23.6% @ 59.5 KeV)。其线阵的结构为实现散射与透视图像空间上的一一对应,进而实现散射信息与透视信息的融合打下了基础。不同材料的散射能谱测量结果表明,该探测器所探测的能量曲线能够反映物质的密度特性,验证了其用于散射能谱探测以实现物质分类的可行性,在现场查缉装备的智能识别方面极具应用前景。

关键词: 安全检查;硅光电倍增管;能谱;线阵式背散射探测

中图分类号: TH83 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8040

Design and performance evaluation of linear array X-ray backscattering detector based on SiPM

Li Weijiao^{1,2}, Chen Jiamin², Wu Xiaomei¹, Wang Weiqi¹, Chang Qingqing²

(1. Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. The Third Research Institute of the Ministry of Public Security, Shanghai 200031, China)

Abstract: In order to achieve the fine classification of different suspicious substances in on-site rapid security inspection, this paper discusses an idea to obtain the density of substances by means of X-ray backscattering signal, and completes the design and functional verification of a linear scintillator detector based on silicon photo-multiplier (SiPM), which is the core component to realize the proposed method. The detector has energy resolution ability and is able to analyze the scattering attenuation of different substances under different energies. The output pulse amplitude of the detector is stable under the ambient temperature of -10°C to 50°C , and the energy resolution varies from 22.1% to 25.7% (the energy resolution is 23.6% @ 59.5 KeV at room temperature). The structure of the linear array lays a foundation for realizing spatial one-to-one correspondence between scattering and perspective images, and then hopefully realizing the fusion of scattering and perspective information. The test results of scattering energy spectra of different substances show that the energy curve detected with the detector can reflect the density characteristics of the substances, which verifies the feasibility of using the detector to measure scattering energy spectrum and achieve substance classification. The detector designed in this paper has great application prospect in intelligent identification of spot investigation equipment.

Keywords: security inspection; silicon photo-multiplier; energy spectrum; backscattering linear array detector

0 引言

目前,辐射成像技术被广泛应用于社会的各个方面,尤其是 X 射线透视成像在日常安全检查中发挥着重要作用。该技术对高密度、高有效原子序数的金属敏感,特别适用于对刀具、枪支等的安全检查。然而,透视成像存在着以下几个问题^[1-2]:1)有机物由于有效原子序数较低常被漏检,即使双能 X 射线透视图像也仅能够将物质从相对原子序数(Z_{eff})的维度粗分为有机物、无机物、混合物3类;2)透视探测器接收到的信号是在射线穿透路径上所有的物体衰减效果的叠加,由于叠加效应,薄的物质,尤其是薄有机物,极易被穿透,导致在透视图像显示不清,存在极大的安全隐患;3)要求射线源与探测器在物体的两侧,因此设备的体积受限,且存在探测死角。

基于康普顿散射效应的 X 射线背散射成像可在一定程度上解决上述问题。散射射线具有对高密度低有效原子序数的有机物特别敏感的特点,且背散射信号检测的是后向散射的信号,射线源与探测器在同一侧,不受体积等限制,墙体、不能随意移动的爆炸物疑似物等均能探测。由于上述优点,使得散射成像在工业探伤、地质探测、安检等领域具有广泛应用^[3-5]。将散射与透射信息相融合,优势互补,是目前 X 射线安全检查领域的一个重要研究方向。

传统 X 射线背散射成像设备通常采用飞点扫描的方式^[3],以光电倍增管(photo-multiplier tube, PMT)作为光电转换器件所谓飞点扫描方式,即通过调制盘将 X 射线从锥形束转为笔形束,以完成单点的扫描成像。每一时刻仅有一点 X 射线能够到达物体,射线光束随调制盘的转动而移动,进而完成单行的扫描。由于 X 射线与物体发生作用后的散射是四向的,在飞点扫描的结构下,散射探测器通常为面积较大的面探测器,以实现在一个点的扫描时间内接收较大范围的散射信号。

由于存在机械扫描结构,基于飞点扫描的背散射探测系统难于小型化,且由于面探测器每个时刻仅接收来自被照射物体上一点的散射信号,与采用扇形光束照射线阵探测器的透视探测系统不能结合,也就不能实现散射与透视图像空间上的一一对应。尽管散射信号理论上能够反映物质的密度信息 ρ ,可以从密度维度上对物质进行分类,但基于飞点扫描的散射探测器由于面积较大,同时接收较多散射光子,其输出信号反映的是散射信号的积分结果,即所有波长光子的叠加。因此只能反映散射的强弱,不能进一步区分散射光子的波长或能量。因此传统散射探测器不论从空间上还是从物质分类特征提取上,都难以与透视相融合,无法用于物质的细分。

若散射探测器^[6-8]采用与透视探测器类似的线阵结

构,有望推动散射成像设备由飞点扫描方式升级为扇形束扫描,则单行的扫描时间可以显著缩短,系统的成像速度将因此得到极大的提升^[8]。且散射与透视探测器所接收到的信号来自于被照射物体上同一点,即空间上一一对应,实现探元与被测点空间上固定的映射关系。若能辅助以散射能谱探测则有望实现从散射信号中获得物质的密度信息,为物质分类增加一个维度的信息。

传统的能谱探测器,虽能采集较为精确的能谱信号,但存在速度慢、像素点少、需要主动降温等问题,不适合于现场快速查缉的场景。能谱探测器主要有3种类型^[9]:气体电离探测器、闪烁体探测器和半导体探测器。气体电离探测器虽然能量分辨率高,但其体积大,探测效率低。半导体探测器能量分辨率尚可,探测效率高,但需要配备制冷设备以保证正常运行,因此成本一直无法降低,体积也相应较大。闪烁体探测器特别适合于大型阵列式的设计,其成本较低,可在常温下工作。

闪烁体探测器的一般结构为闪烁体耦合光电转换器件,闪烁体接收 X 射线将其转化为可见光子,光电转换器件将其转为电信号。通过对电脉冲信号的采集与处理实现 X 射线粒子的探测。闪烁体探测器的能谱分辨率虽然不能跟其他两种探测器类比,但由于其体积小、成本低,易于制作大型的线阵探测器。

本文在研究散射能谱与物质分类关系的基础上,设计并实现了一种基于 SiPM 的线阵式闪烁体探测器。有别于传统的散射探测器,该探测器为线阵结构,每个探元所探测的范围固定,且具有一定的能量分辨能力。最后详细评估了该探测器的能量分辨率及温度对其能量分辨率的影响,并通过实验初步验证了该探测器在现场快速查缉过程中实现物质分类的可行性。

1 基本原理

康普顿散射在本质上是非相干散射的一种。当康普顿散射发生时,X 射线在与物质发生作用的过程中,入射光子能量的一部分被电子吸收,使之脱离原子核的束缚而逸出,光子本身由于碰撞的作用方向发生改变,且能量的损失使光子波长变长。该部分光子称为散射光子^[10-11],如图1所示。能量为 E_i 的入射光子由于康普顿效应与物体反应后释放出一个能量为 E_g 的反冲电子和一个能量为 E_r 的散射光子,反冲电子与入射光子夹角为 φ ,散射光子与入射光子的夹角为 θ 。

根据能量守恒和动量守恒的原理,图1中散射光子能量和反冲电子的能量可以分别表示为:

$$E_r' = h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 + \cos\theta)} \quad (1)$$

$$E_g = E_i - E_r' = h\nu - h\nu' = \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} h\nu \quad (2)$$

式中: α 为入射光子能量; $h\nu$ 和电子能量 $mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$ 的比值。从式(1)和(2)中可以看到, 康普顿效应主要涉及自由电子、入射角度和入射光子能量, 因此其发生概率与原子序数 Z 无关, 而仅与每克电子数, 即物质的电子密度有关, 与能够反映物质相对原子序数的双能透视形成互补。

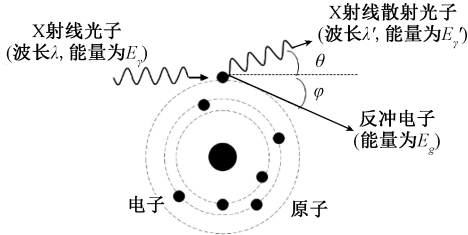


图1 康普顿散射原理

Fig.1 Schematic diagram of Compton scattering

式(1)表明, 在角度一定的前提下, 康普顿散射引起的光子波长偏移是一定的, 与物质属性无关, 因此若能探测到能谱, 则能谱探测器在相同的位置上采集到的谱线峰位应一致。经过散射后, 能量为 E 的光子到达探测器被接收的光子数目^[12-14]:

$$N = N_0 f_1(E) f_2(E) \frac{d\sigma}{d\Omega}(E_0, \theta) \Delta V \Delta \Omega \rho_e \quad (3)$$

式中: N 即探测器接收的光子数量; N_0 为入射光子数; ρ_e 为物体受照射部分的电子密度; ΔV 是物体受照射的体积; $\Delta \Omega$ 为散射光子进入探测器的立体角; $\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_0, \theta)$ 为在能量 E_0 和角度 θ 时的 Klein-Nishina 微分散射截面; $f_1(E) = e^{-i\sigma(E)\rho_e}$ 为入射光的衰减; $f_2(E) = e^{-i\sigma(E)\rho_e}$ 为散射光衰减, $\sigma(E)$ 和 $\sigma(E_0)$ 为相应能量下的质量衰减系数。

在特定的两个不同波长的入射光子能量分别为 E_1 和 E_2 , 由式(3)可得所探测到的两个能量的光子数量 N_1 和 N_2 存在如下关系:

$$\ln \frac{N_1}{N_2} = \frac{f_2(E_1)}{f_2(E_2)} = i(\sigma(E_2) - \sigma(E_1))\rho_e \quad (4)$$

被照射物体在该点处的 $\sigma(E)$ 可由相应的透视图像推算出来^[13-14], 进而通过采集相应位置在不同波长的的散射光子数, 就能够推算出该点处物质的电子密度。

综上, 探测散射的能谱曲线, 分析不同能量下散射信号的强弱变化情况, 能够推算出物质的电子密度, 从而为传统双能透视的基于 Z_{eff} 的分类方法^[13-14] 增加一个维度的信息。通过透视和散射的联合有望实现物质的细分, 为提高分类的准确性提供可能。

2 基于 SiPM 的背散射线阵探测器设计

由若干探测单元排列而成的线阵散射探测器的结构

如图2所示。探测单元前加装准直器, 以限制接收散射信号的人射角度, 保证探元与被测物的空间对应关系。为实现能谱探测, 本文选用闪烁体探测器的基本结构, 即探测单元由光电转换器件耦合闪烁晶体实现。

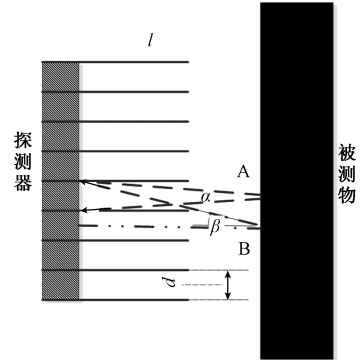


图2 线阵探测器

Fig.2 The schematic diagram of the linear array detector

在图2所示结构中, 可以看出散射线阵探测器设计过程在以下两个方面需要着重关注: 1) 散射探测器每个探测单元的接收面积为 mm^2 量级, 是飞点扫描的面探测器面积的千分之一; 加之前端对信号方向加以约束的准直器的限制, 每个探测单元接收到的信号约为面探测器的万分之一量级, 信号极其微弱; 2) 线阵探测器探测单元的数量与探测的区域成正比, 对于 40 cm 长的探测区域, 探测单元如果为 4 mm 宽, 则需要 100 个像素点, 因此对探测器的成本和一致性提出更高的要求。

考虑到信号极其微弱、且单点成像面积小, 快速发展的硅光电倍增管 (silicon photo-multiplier, SiPM) 成为线阵散射探测器中光电转换的首选器件, 特别适合于现场快速检查的应用场景, 在背散射成像设备中极具应用前景^[15]。

SiPM 由工作在盖革模式 (Geiger mode) 下的光电二极管 (G-APD) 阵列组成, 每个 G-APD 称为一个微元^[16-18]。当可见光光子击中微元时, 由于雪崩效应, 该微元将会产生大量的电荷, 并在电场的加速下形成电流。这时由于回路中电流的上升, 该微元中的淬灭电阻分压变大, 作用于微元两端的电压下降至雪崩电压以下而回到正常状态。SiPM 利用雪崩效应对信号进行放大, 增益通常与 PMT 相当, 达到 $10^5 \sim 10^6$, 但相对于 PMT 而言, SiPM 具有工作电压低 (30 V 以下, 远低于 PMT 1 000 V), 渡越时间短, 体积小巧紧凑等特点。

按照闪烁体能谱探测器的基本结构, 探测单元采用 SiPM 和闪烁晶体一对一耦合方式将散射光子转换为电信号, 信号通过同轴接插件引出, 通过多芯微同轴线接入至后端数据采集系统, 并且每个探头绑定一个带温度传感的存储器芯片, 用来检测探头所处环境的温度以及存

储探头的相关参数和数据。探测单元整体结构如图 3 所示。

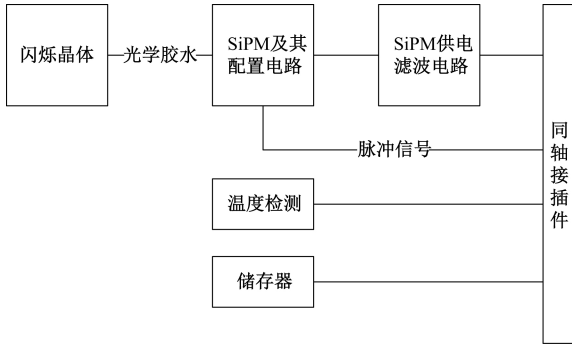


图 3 基于 SiPM 的散射能谱探测器框图

Fig.3 The block diagram of the scattering energy spectrum detector based on SiPM

常见闪烁晶体及其性能^[19]如表 1 所示。针对散射信号较为微弱的特点,光输出是首先关注的参数,铯酸铋(BGO)的光输出较低,不适合于此应用场景。能量分辨能力是本设计的关键要素之一,所以所选择的晶体标称能量分辨率性能至关重要。线阵式的探测结构对晶体的稳定性和一致性提出较高要求,同时考虑到现场检测的需求,需要选择不潮解、无背景辐射的晶体。

表 1 常见闪烁晶体性能对比

Table 1 Performance comparison of different scintillators

特性	YSO;Ce	NaI;TI	BGO	LYSO	CsI;TI
光输出(光子数量/MeV)	24 000	37 700	8 200	30 000	64 800
发射波长/nm	420	415	505	420	540
密度/(g·cm ⁻³)	4.54	3.67	7.31	7.4	4.53
有效原子系数	34	51	76	65	54
衰减时间/ns	60	230	300	40	680
能量分辨率 @ 662 KeV/%	<8	7.5	9	7.4	9
熔点/°C	2 000	651	1 050	2 150	621
折射率	1.8	1.85	2.15	1.82	1.79
潮解性	不潮解	易潮解	不潮解	不潮解	易潮解
背景辐射	无	无	无	有	无

硅酸钇(YSO;Ce)属于单斜晶系的稀土正硅酸盐晶体,是一种良好的闪烁晶体,具有晶体密度高、能量分辨能力强、无本底辐射、衰减时间短、不潮解等特点。本文所设计的闪烁探测器即采用 YSO 晶体。

SiPM 采用 SensL 的 C 系列 FC30035,其中心响应波长为 420 nm,与 YSO 的光输出匹配。其微元尺寸为 35 μm,数量为 4 774,增益在超过雪崩电压 2.5 V 的情况

下高达 3 × 10⁶,有效光子探测效率(photon detection efficiency, PDE)高达 31%。单芯片封装面积为 4 × 4 mm²,有效探测面积为 3 × 3 mm²^[18]。所设计的探测器的每个探测单元采用 16 个 FC30035 排列组成线性阵列,中心间距 4.2 mm,总尺寸为 4.2 × 67.2 mm²。根据有效探测宽度,探测器可配置不同个数的探测单元,如在 40 cm 的有效探测宽度下,可配置 6 个探测单元。

SiPM 的阳极信号经过前置跨阻放大器将电流信号转化为电压信号,通过主放大器对信号幅值进行调理后,送入自行设计的高速采集系统或示波器。

3 实验结果

3.1 能量分辨性能测试及最佳能量分辨率条件

1) 测试平台搭建

闪烁晶体输出的光子数量与入射光子的能量成正比,被 SiPM 接收到后,引起相应数量的微元导通。因此 SiPM 输出脉冲的高度可以反映入射光子的能量,如果用已知波长的入射光子对 SiPM 的输出脉冲进行定标,就可以得出输出脉冲高度与入射光子能量的关系。使用能谱分辨率表征此线阵探测器的能谱探测性能^[20],即能谱曲线中谱峰的半高宽与此处峰值的比值。

背散射探测器不同偏置电压下的能量分辨率采用如图 4 所示的平台进行测试,由于系统中的散射信号主要集中在 80 KeV 以下,为低能信号,因此能量标定的射线源采用低能的镅-241(²⁴¹Am),其能谱为 59.5 KeV 的单峰。将其放置于能谱探测器中晶体阵列的顶部 1 cm 处,正对射源的通道即为测试通道。探测器输出的脉冲信号经过同轴线接入主放大器后送入高速示波器进行采样。示波器的采样率为 1 Gsps,带宽为 1 GHz, SiPM 的工作电压由线性直流稳压源提供。



图 4 背散射探测器单一探测单元能量性能测定平台
Fig.4 Photo of the energy performance measurement platform of the single detection unit of backscattering detector

2) 探测器输出结果

在室温条件下, SiPM 工作电压为 28.5 V 时高速示波器上主放大器的输出脉冲如图 5 所示。可以看出, 信号无过冲, 脉冲宽度约为 400 ns, 且脉冲相对平滑, 下降沿无剧烈抖动。

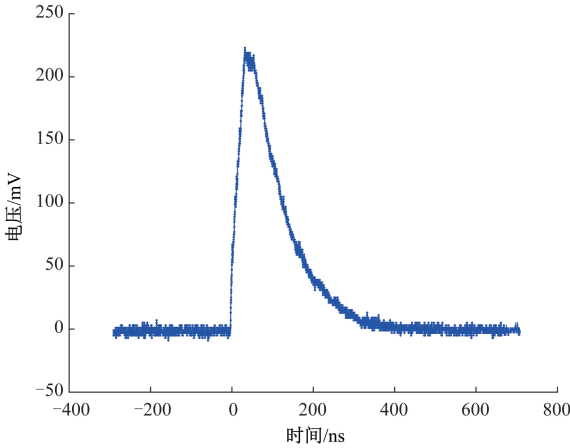


图 5 放大后脉冲信号

Fig.5 The amplified output pulse signal

3) 最优供电电压的选择

为研究不同工作条件对背散射探测器能量分辨率的影响, 为优化系统参数提供依据, 本文首先研究了 SiPM 工作电压与能量分辨的关系。

Senel FC30035 的雪崩电压约为 24.5 V, 其推荐的工作电压为超过雪崩电压 1~5 V。故在上述实验条件下, 考虑实际供电需求及信号幅值, 对 SiPM 的供电电压进行调节, 从 26 V 起按 0.5 V 增幅步进, 重复采集过程, 直至 SiPM 供电电压为 29 V。

单次实验采集 10^4 个脉冲数据进行统计分析。由于脉冲幅度与接收光子能量成正比, 因此按照脉冲幅度做直方图, 采用曲线拟合的方法寻找谱峰, 并计算半峰宽, 分析能量分辨率, 图 6 所示为 28.5 V 时的能谱曲线及能量分辨率。

每次采集过程中除 SiPM 工作电压调节外其余所有实验设置保持不变, 实验结果如表 2 所示。

图 7 所示为输出信号幅值随 SiPM 供电电压变化的情况。可以看出, 随着 SiPM 工作电压增加, 输出信号幅值随之增加, 能量分辨率逐渐提升。为在系统应用时获取较高的能量分辨率, SiPM 供电电压宜采用 28.5 V 及以上的偏置电压。需要强调的是, 过高的偏置电压会使得 SiPM 的暗噪声与暗电流增大, 因此 28.5 V 为最优选择。

4) 温度对能量分辨率的影响

为进一步评估环境温度对背散射探测器能量分辨率的影响, 将探测器放置在高低温试验箱 (嘉兴韦斯实验设备有限公司生产, 型号 WSHW-080B, 温度设置精度为

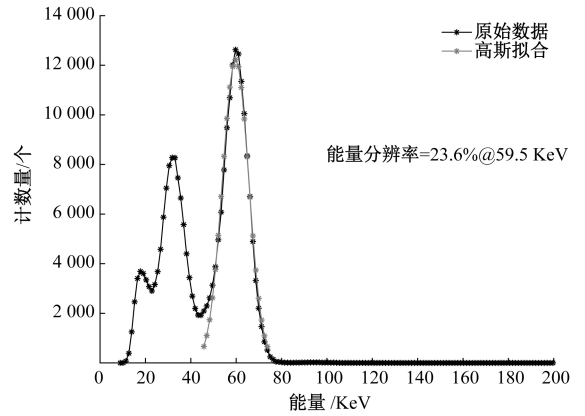


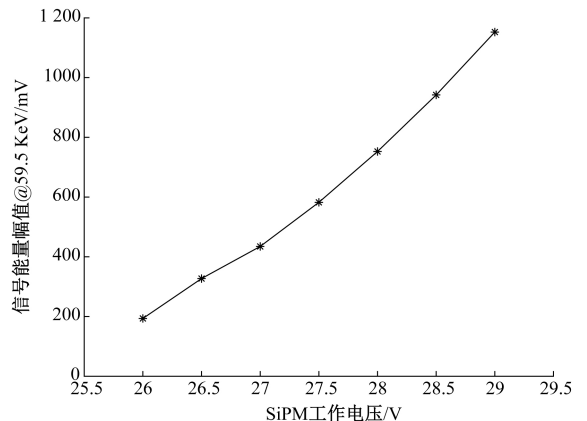
图 6 ^{241}Am 在 SiPM 工作电压在 28.5 V 时的能谱曲线 (能量分辨率为 23.6% @ 59.5KeV)

Fig.6 The energy spectrum curve of ^{241}Am at operation voltage of 28.5 V (the energy resolution is 23.6% @ 59.5KeV)

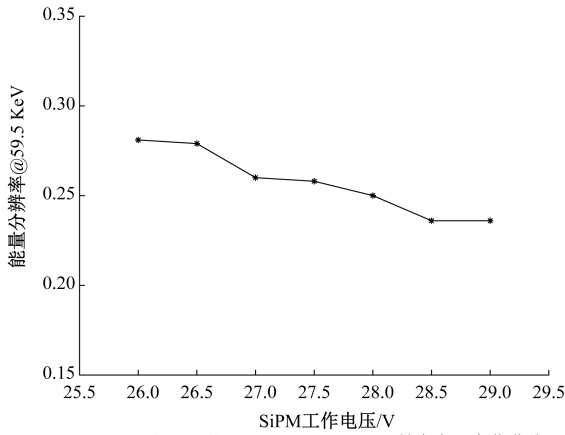
表 2 SiPM 供电电压对能量分辨率性能的影响

Table 2 The influence of SiPM supply voltage on energy resolution performance

SiPM 供电电压/V	信号幅值 @ 59.5 KeV/mV	能量分辨率 @ 59.5 KeV%
26.0	193.5	28.1
26.5	327.1	27.9
27.0	434.6	26.0
27.5	582.3	25.8
28.0	752.5	25.0
28.5	942.0	23.6
29.0	1 152.5	23.6



(a) 输出信号幅值随 SiPM 供电电压变化曲线 (a) The curve of output signal amplitude vs. SiPM supply voltage @59.5 KeV



(b) 探头能量分辨率@59.5 KeV随SiPM供电电压变化曲线
(b) The curve of probe energy resolution vs. SiPM supply voltage @59.5 KeV

图 7 输出信号随 SiPM 供电电压变化曲线

Fig.7 The curves of output signal vs. SiPM supply voltage

$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) 中进行测试。为避免温度对后端的数据采集系统的影响,仅将背散射探测器放置在高低温试验箱中,通过多芯微同轴线缆将信号引出至外部电路进行实验。测试结果如表 3 所示。

表 3 温度对背散射探测器能量分辨率的影响

Table 3 The influence of temperature on energy resolution of backscattering detector

探头的温度/ $^{\circ}\text{C}$	信号幅值 @ 59.5 KeV/mV	能量分辨率 @ 59.5KeV/%
-10	1 013.3	25.1
0	1 011.3	25.7
10	1 009.0	25.0
20	999.6	23.8
30	964.9	22.1
40	935.8	24.2
50	884.1	24.5

其中 SiPM 工作电压设置为 28.5 V,示波器单次采集 10^4 个脉冲进行能量分辨率分析。从表 3 可以看出,其能量分辨率波动范围在 22.1% 到 25.7% 之间,性能表现相对稳定,且在探头温度为 30°C 时达到最佳的 22.1%。其稳定的能量分辨率保证了现场使用环境变化时的探测效果。

3.2 不同物质散射能量曲线测量

为了验证所设计的背散射探测器对物质分类的可能性,本文设计了基于 VJ technology IXS1650 射线源的实验系统,实验装置如图 8 所示。射线源高压可在 80~160 kV 间调节,电流调节范围为 0.2~3 mA。在实验中,将射线源设定为 120 kV,1 mA。准直器^[8]的长度 l 与探

测器探测单元有效探测面积 d 比值为 8 时,准直效果较好。FC30035 的有效探测面积为 $3 \times 3 \text{ mm}^2$,相应的准直器长度为 2.4 cm,准直器材料选用混合比例为 50:50 的钨铜合金。

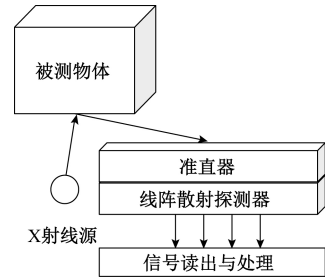


图 8 散射能谱测量装置

Fig.8 The scattering energy spectrum test equipment

线阵探测器的信号通过另外设计的一块基于 AD9212 的多通道高速采集卡进行信号采集。信号处理使用 MATLAB 完成。本文选择了聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 和聚四氟乙烯 (PTFE) 两种物质来研究所设计的探测器用于散射能谱物质分类的可能性,其中 PTFE 是典型的高密度低有效原子序数的有机物,与毒品的性质比较接近。测试结果如图 9 所示。需要说明的是,X 射线源直射能量曲线是通过 X 射线源直接照射线阵能谱探测器得到的,非散射线。

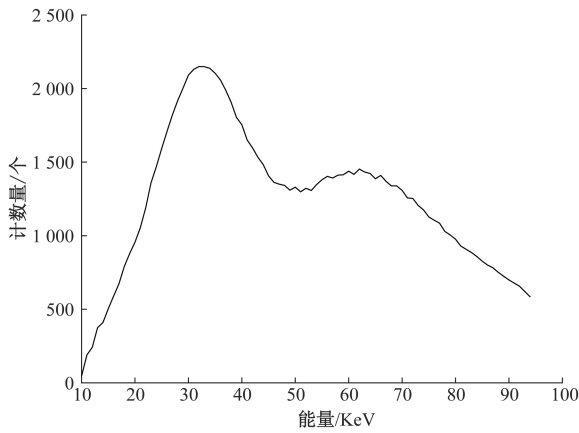
4 讨论

在尺寸为 40 cm 宽的行李箱包检查仪通道内,基于 SiPM 的线阵式散射能谱探测器单排阵列的成像面积为 $4.2 \times 67.2 \text{ mm}^2$,整体面积远小于原来的面探测器 $40 \times 20 \text{ cm}^2$,结构紧凑。

在 10 ms 的计数时间内可以达到 1 000 以上的计数量,可见其响应效率很高,单纯用于成像,其成像速度可以与面阵相当,加之不需使用 X 射线调制盘,结构简单,易于实现小型化。

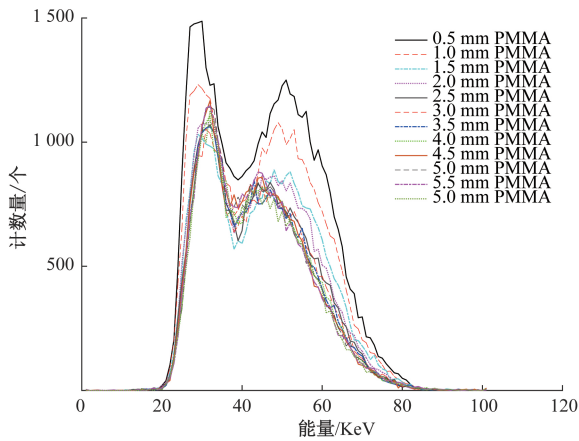
本文介绍的线阵探测器作为具有一定能量分辨能力的探测器,室温条件下,其在 ^{241}Am 特征峰位置能量分辨达到了 23.6%,特别适合能量主要集中在 80 KeV 以下的 X 射线散射射线能量曲线的测量,弥补了目前现场使用的散射探测器只能成像的缺陷,为物质分辨增加了一个维度的信息。在现场快速筛查的过程中,通常希望对物质进行半定性分析,给出是否可疑的提示,本文所设计的线阵式散射探测器的能量分辨性能完全可以满足上述要求。

对比图 9(a)~(c) 可以看到,有散射发生时的能谱,相对于直射能谱向左整体偏移,包括两个峰值的转折点。



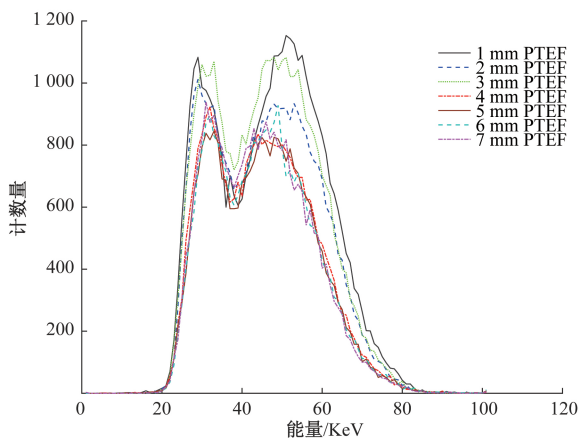
(a) 空白直射状态下的X射线能谱曲线

(a) The x-ray energy spectrum curve under blank direct radiation



(b) 不同厚度聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 的散射能谱曲线

(b) The scattering energy spectrum curves of PMMA with different thickness



(c) 不同厚度聚四氟乙烯 (PTFE) 的散射能谱曲线

(c) The scattering energy spectrum curves of PTFE with different thickness

图9 利用所设计的散射探测器测量的不同物质的散射能谱 (X轴为根据²⁴¹Am归一后的KeV能量值, Y轴为10ms内对应能量的计数)

Fig.9 The scattering energy spectrum curves of different substances measured with the designed scattering detector (X-axis is ²⁴¹Am normalized energy in KeV, and Y-axis is the counts of energy within 10 ms)

完全符合式(1)的理论。

图9(b)和(c)中两个峰位所在点位置一致,但峰值的比重不同。PMMA密度较低(1.18 g/cm³),散射衰减较弱,在低能段PMMA的衰减应当相对平缓。对于相同厚度的两种物质,从高低能的信号强度分配而言,PMMA低能信号占比更大;从信号的整体衰减情况40 KeV以上而言,PTFE(密度2.16 g/cm³)的计数率明显低于PMMA。

基于此,以40 KeV为界限,将所测量的能量曲线划分为高能和低能两部分,将两部分计数量分别积分,根据式(4)建立式(5)的特征值T。

$$T = \frac{\int H_{\text{counts}}}{\int L_{\text{counts}}} \quad (5)$$

式中: $\int H_{\text{counts}}$ 和 $\int L_{\text{counts}}$ 分别表示以40 KeV为分界线的高能和低能部分计数量的总和。按3.3的能量曲线采集方法,分别采集了不同厚度的铝(Al,密度2.7 g/cm³)、工程塑料(ABS,密度1.1 g/cm³)和聚丙烯(PP,0.9 g/cm³)的能量曲线,与前述的PMMA和PTFE能量曲线计算的T值进行对比,结果如图10所示。所选物质除Al外,均为有机物,在双能透视中被归为一类,且已基本覆盖常见有机物的密度范围。

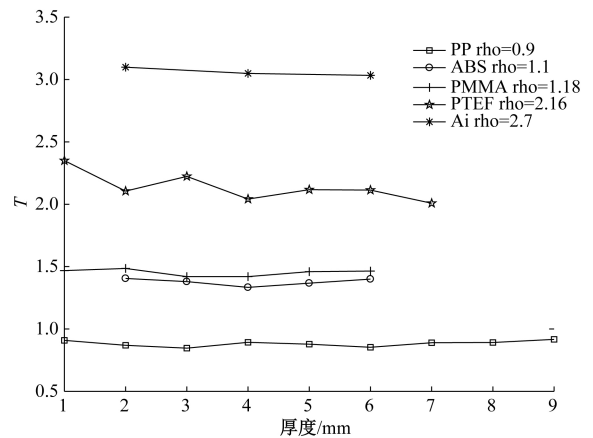


图10 不同物质不同厚度时T值比较

Fig.10 Comparison of T for different substances with different thickness

不同密度的物质在不同厚度时其T值稳定,即使密度相近的ABS和PMMA也在曲线中明显区分开来,据此可以将物质按照密度的不同进行细分。考虑到日后散射探测器的规模将进一步提升,对于更大通道尺寸的现场快速检查装备,探测单元的数量也需提升,使用直接AD转换的方法成本将很高,且数据量巨大。鉴于目前的能量分辨率和能谱特性,后续将考虑分3段能量进行计数

(40 KeV 以下,40~50 KeV 和 50 KeV 以上 3 段)以提高实用性。

5 结 论

本文提出和设计了一种新型的基于 YSO/SiPM 的背散射探测器,实验数据表明,在室温条件 28.5 V 左右时测定²⁴¹Am 的能量分辨率为 23.6% @ 59.5 KeV,环境温度从-10℃~50℃变化时,脉冲幅值稳定,其能量分辨率变化范围 22.1%~25.7%,保证了现场快检尤其是室外检查中恶劣的环境下的性能。

该探测器具有结构紧凑、增益高、响应速度快等特点,且具有一定的能谱分辨能力,填补了目前现场查缉过程中探测器不能探测能谱的缺陷。其线阵的结构与目前透视探测器的线阵结构相对应,在空间上能够一一对应,有利于将二者的信息进一步进行融合,结合相对原子序数和密度两个信息,将有机的分类进一步细化,实现现场快速筛查中的可疑物提示。

参考文献

[1] 张炜, 王国宝, 王强. X 射线背散射成像系统点扫描器设计[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(4): 349-353.
ZHANG W, WANG G B, WANG Q. Design of point scanner used in X-ray backscatter imaging system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(4): 349-353.

[2] 郑金州, 鲁绍栋. X 射线技术在安检领域的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2012, 21(2): 357-364.
ZHENG J ZH, LU SH D. The application of X-ray technology in security inspection domain [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2012, 21(2): 357-364.

[3] HERR M D, MCINERNEY J J, LAMSER D G, et al. A flying spot X-ray system for Compton backscatter imaging[J]. IEEE Trans Med Imaging, 1994, 13(3): 461-469.

[4] 周维全. X-ray 背散射成像技术在公共安全领域的应用探讨[J]. 中国新通信, 2016, 18(5): 148.
ZHOU W Q. Application of x-ray backscatter imaging technology in public security [J]. China New Telecommunications, 2016, 18(5): 148.

[5] 张炜, 王国宝, 王强. X 射线背散射透射一体成像系统设计[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(2): 154-158.
ZHANG W, WANG G B, WANG Q. Design of x-ray backscatter & transmission imaging system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(2):

154-158.

[6] ZOU J, HU Z, GUI J, et al. Geant4-based monte carlo simulator for fan-and cone-beam X-ray CT [C]. International Conference on Bioinformatics & Biomedical Engineering. IEEE, 2010:1-4.

[7] 王振涛, 王立强, 吴志芳, 等. 阵列康普顿背散射成像系统设计的蒙特卡罗仿真研究[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(6): 831-834.
WANG ZH T, WANG L Q, WU ZH F, et al. The Monte Carlo simulation of compton back-scattering imaging system with detector array [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(6): 831-834.

[8] 李维姣, 邬小玫, 王威琪, 等. 基于 SiPM 的阵列式 X 射线背散射探测器设计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 17(5): 1034-1041.
LI W J, WU X M, WANG W Q, et al. Design of X-ray backscatter array detector based on sipm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 17(5): 1034-1041.

[14] 丁洪林. 核辐射探测器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
DING H L. Nuclear radiation detector [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010.

[10] 李启磊. X 射线散射图像处理方法研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2010.
LI Q L. Image processing methods for x-ray scattering imaging system[D]. Nanjing: Southeast University, 2010.

[11] 王明宇. 安检设备 X 射线背散射图像处理[D]. 南京: 东南大学, 2013.
WANG M Y. X-ray backscatter image processing in inspection equipment[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.

[12] PAULUS C, TABARY J, PIERRON N B, et al. A multi-energy x-ray backscatter system for explosives detection[J]. Journal of Instrumentation, 2013, 8(4): P04003-P04003.

[13] SUN L. Based on dual-energy transmission and low-energy scatter of explosives classification [C]. International Symposium on Photoelectronic Detection & Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8624: 86241101-86241109.

[14] YUAN P X, SUN L N. Representation of object classification curve by dual-energy X-ray transmission technology[J]. Journal of Northeastern University, 2006, 27(3): 336-339.

[15] LALLEMAN A S, FERRAND G, ROSSE B, et al. A dual X-ray backscatter system for detecting explosives: Image and discrimination of a suspicious content [C].

- Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference. 2011;299-304.
- [16] RISIGO F, BULGHERONI A, CACCIA M, et al. SiPM technology applied to radiation sensor development [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment), 2009, 607(1):75-77.
- [17] SHI F, LIU J G, HONG L U, et al. Comparative studies of silicon photomultipliers and traditional vacuum photomultiplier tubes [J]. Chinese Physics c: English edition, 2011, 35(1):50-55.
- [18] VINOGRADOV S, ARODZERO A, LANZA R C. Performance of x-ray detectors with SiPM readout in cargo accelerator-based inspection systems [C]. Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference. IEEE, 2013;682959701-682959706.
- [19] 赵景泰, 王红, 金滕滕, 等. 闪烁晶体材料的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2010, 29(10):40-48.
ZHAO J T, WANG H, JIN T T, et al. Research development of inorganic scintillating crystals [J]. Materials China, 2010, 29(10):40-48.
- [20] 蒋薇薇, 鲁昌华, 张玉钧, 等. 基于提升小波改进阈值的光谱信号去噪研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12):69-74.
JIANG W W, LU CH H, ZHANG Y J, et al. Research on spectrum signal denoising based on improved threshold

with lifting wavelet [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(12):69-74.

作者简介



李维皎, 2009 年于复旦大学获得硕士学位。现为复旦大学博士研究生, 公安部第三研究所助理研究员。主要研究方向为医学成像设备及其在禁毒反恐领域的应用。

E-mail: wonjiao@163.com

Li Weijiao received her M. Sc. degree in 2009 from Fudan University. Now, she is a Ph. D. candidate in Fudan University, and a research assistant in The Third Research Institute of the Ministry of Public Security. Her main research interests include medical imaging equipment and its related application in anti-terrorism, narcotics interdiction



陈嘉敏 (通信作者), 公安部第三研究所副研究员, 长期从事于禁毒、反恐相关系统和仪器的设计与研发工作。

E-mail: 13621721332@139.com

Chen Jiamin (Corresponding author) is an associate research fellow in The Third Research Institute of the Ministry of Public Security. His main research interest include design and development of narcotics interdiction and anti-terrorism system and instrument.