

# 碲锌镉探测器载流子屏蔽效应非线性变化研究

黎 森<sup>1</sup> 肖沙里<sup>2</sup> 杨国强<sup>2</sup> 马跃东<sup>2</sup>

<sup>1</sup>通用电气医疗集团 CT 探测器工程部, 北京 100176

<sup>2</sup>重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030

**摘要** 搭建了基于像素阵列碲锌镉晶体的辐射成像探测系统,采用 X 射线源完成了不同管电压条件下的成像探测实验。实验结果表明,在保持较高辐照通量的条件下,管电压的增大会导致探测器出现范围逐渐扩大的无信号响应屏蔽区域,无响应区域边缘像素出现非线性信号变化。进一步通过建立探测器有限元模型,求解了第一类边界条件电势泊松方程,仿真模拟了不同特征光子能量及线性衰减系数条件下,碲锌镉晶体内部电势及电场分布。仿真结果表明,随着入射光子能量及线性衰减系数的变化,辐照中心的晶体内部出现相对高电势区域,造成电子载流子迁移路径出现扭曲而使得相应位置像素电极无法获得载流子感应电荷信号;而晶体内部相对高电势区域范围的非线性变化,是信号屏蔽区域边缘的像素单元信号随着入射光子能量的增加出现非线性变化的主要原因。

**关键词** 探测器; 医学辐射成像; 射线诊断成像; 半导体; 像素阵列

**中图分类号** TL 816<sup>+</sup> **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s104001

## Pixellated CdZnTe Detector Based Investigation for Non-Linear Variation of Screening Effect Caused by Accumulated Carriers

Li Miao<sup>1</sup> Xiao Shali<sup>2</sup> Yang Guoqiang<sup>2</sup> Ma Yuedong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GE Healthcare Imaging Sub-System Department, Beijing 100176, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

**Abstract** With different X-ray tube voltages the imaging screening effect of the pixellated CdZnTe detector is investigated under the ultrahigh irradiance. Moreover, a novel fluctuation process of the screening effect has been observed. Measurement results reveal that event counts of pixels which are distributed at the edge of the irradiated area experience a sudden increase followed by a continuous decrease when the tube voltage rises from 15 kV to 45 kV. Based on the Poisson equation, a theoretical model of the CdZnTe detector solved by the finite element method is developed which enables the penetrating investigation of the carrier collection in the CdZnTe crystal. A comparison between model simulations and test results shows that pixels in the central irradiated area are completely screened under increasing incident photon energy and linearity attenuation parameter. This is because the emergence of the relatively higher potential region, which is caused by the increasing of incident photon energy and linearity attenuation parameter, leads to the twist of the electron drift way. Furthermore, with the increase of the incident photon energy, the inconsecutive expansion of the accumulated carrier scope results in the fluctuation of the event counts of pixels distributed around the screening area. The imaging results deduced from the simulations are well consistent with the experimental data.

**Key words** detectors; medical radiation imaging; radiographic; semiconductor; pixel array

**OCIS codes** 040.6070; 250.0040; 340.7440; 130.5990

## 1 引 言

具有射线光子直接转换特性的半导体辐射探测器由于其高灵敏度、高原子序数,在辐射能谱探测及成像

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(10876044,61274048)

作者简介: 黎 森(1982—),男,博士,工程师,主要从事半导体辐射探测器方面的研究。E-mail: miao.li@ge.com

探测领域一直都倍受关注<sup>[1-2]</sup>。国内外相关研究机构在相关晶体材料生长技术及载流子迁移性能改进方面已经取得了一定的进展<sup>[3-5]</sup>,从而使得各种电极结构的半导体辐射探测器能够取代传统闪烁体探测器广泛应用于医学诊断成像、核物理诊断、天体物理等相关研究领域。其中,面元像素类直接转换半导体辐射探测器的研究是现阶段国内外 X 射线与伽玛射线成像探测领域倍受关注的研究方向<sup>[6-9]</sup>。对医学诊断成像系统而言,连续高辐照注量率条件下直接转换半导体探测器对不同光子能量的响应性能是不可忽视的关键指标。因此,有必要对高辐照注量率条件下的探测器对不同入射光子能量的成像性能作进一步的实验研究及理论分析。通过搭建面元像素碲锌镉探测系统,采用管电压可调的 X 射线源研究了不同入射光子能量对探测器性能的影响。测试得到了非线性变化探测器屏蔽效应信号。进一步求解不同入射光子特征能量及线性衰减系数条件下的电势分布泊松方程,获得了不同条件下探测器内部的电势及电场分布,讨论分析了晶体内部电势分布的变化对电子载流子收集过程的影响,实验结果与理论分析相符。

## 2 X 射线成像实验测试与分析

采用可调 X 射线源完成了面元像素碲锌镉探测器的辐射成像测试。其中 X 射线管阴极为铑(Rh)靶,阳极管电压为 10~80 kV 可调,设置管电流 20  $\mu\text{A}$  恒定不变。探测器为脉冲计数模式碲锌镉探测器,采用 40 mm $\times$ 40 mm $\times$ 5 mm 尺寸碲锌镉晶体制备而成<sup>[10]</sup>。平面阴极与像素阳极都为铟电极,平面阴极偏压为 -1000V,X 射线管出射窗口与探测器阴极表面距离为 10 mm,探测时间 5 min。当管电压从 15 kV 逐渐增大至 45 kV 时,所得成像探测图像如图 1 所示。明显的,当 X 射线管电压为 15 kV 时,辐照区域内探测器像素单元能够获得相应的探测信号,辐照中心区域最高辐射事件计数值为  $1.75\times 10^5$ 。而当管电压逐渐增加至 20 kV 时,辐射探测图像出现中心区域像素单元无信号响应的环形信号图像,如图 1(b)所示。一方面探测器整体辐射事件计数值明显下降,最高事件计数值从 15 kV 管电压时的  $1.75\times 10^5$  减少至  $1.25\times 10^5$ ;另一方面,15 kV 管电压时辐照成像面积约为 10 mm $\times$ 10 mm,小于实际辐照面积;而出现图 1(b)所示辐照中心区域无信号响应现象时无信号响应区域扩大为约 15 mm $\times$ 15 mm,即探测器的成像信号响应范围随着管电压的增大也明显出现扩大。进一步增大 X 射线管电压至 25 kV,从图 1(c)中可以看出,探测器成像范围变化不大,但环形边缘像素单元的辐射事件计数值却反而明显增大,最大事件计数值增大为  $3.25\times 10^5$ 。从

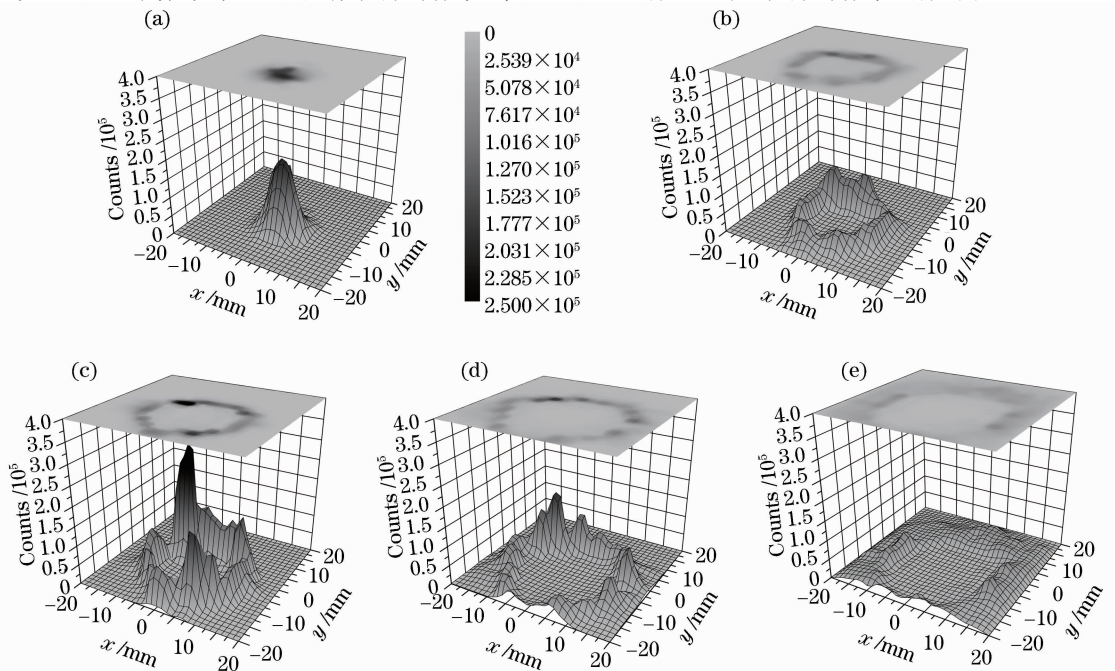


图 1 测试所得不同管电压铑靶 X 射线源探测图像。(a) 15 kV; (b) 20 kV; (c) 25 kV; (d) 35 kV; (e) 45 kV

Fig. 1 Detected images of the Rh—target X ray source for different tube voltages. (a) 15 kV; (b) 20 kV; (c) 25 kV;

(d) 35 kV; (e) 45 kV

图 1(d)和图 1(e)可以看出,随着管电压从 25 kV 增大到 35 kV,探测器辐射事件计数值再次明显降低,最大事件计数值降低为约  $1.75 \times 10^5$ ,相应的响应信号范围也有所扩大;管电压进一步增大到 45 kV 时,辐射事件计数值继续降低为  $5.0 \times 10^4$ ,响应信号范围继续扩大,即碲锌镉探测器对 X 射线辐照响应信号随着射线管电压升高出现中心区域无计数的成像极化现象,辐照中心区域像素单元信号完全丢失,但辐照边缘区域像素单元仍然存在辐射事件计数,而且围绕辐照中心无响应区域的边缘像素计数值随着 X 射线管电压的增大会经历先减小后增加继而再减小的非线性变化过程,其响应信号范围也逐渐扩大。

### 3 系统模型与仿真

#### 3.1 探测器内电势分布理论与模型

根据像素阵列碲锌镉探测器原理,其成像信号主要来源于电子载流子在晶体内电场作用下迁移运动的感应信号,即晶体内电场分布是决定像素阵列电极碲锌镉晶体载流子收集性能的关键。因此,考虑不同能量入射光子在碲锌镉晶体中不同线性衰减特性对初始电荷密度的影响,建立满足晶体内部电势分布的泊松方程

$$\nabla\varphi(r, z) = -\rho(z)/(\epsilon\epsilon_0), \tag{1}$$

式中  $\varphi$  表示晶体内部电势分布,  $r, z$  分别表示辐照区域半径及像素阳极方向轴向厚度,  $\rho(z)$  为晶体内部初始载流子电荷密度分布函数,  $\epsilon$  为碲锌镉晶体相对介电常数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数。假设入射光子能量能够通过入射光子特征能量  $E_\gamma$  表示,则晶体内部初始载流子电荷分布满足

$$\rho(z) = \rho_0\mu \exp(-\mu z), \tag{2}$$

$$\rho_0 = qE_\gamma\Phi_\gamma/\sigma_{e-h} \tag{3}$$

式中  $q$  表示  $1.6 \times 10^{-19}$  C 单位电荷量,  $E_\gamma$  为入射晶体的特征光子能量,  $\Phi_\gamma$  为单位面积内垂直穿过探测器阴极表面并作用在晶体内部的光子数量( $\text{mm}^{-2}$ ),即垂直入射探测器的辐射通量,  $\sigma_{e-h}$  是碲锌镉材料的平均电离能(4.64 eV),  $\rho_0$  为单位时间内  $E_\gamma$  能量及  $\Phi_\gamma$  辐射通量条件下入射光子产生的初始空间电荷密度。  $\mu$  为特定能量入射光子在碲锌镉晶体内部的线性衰减系数。

建立如图 2 所示的 2D 柱坐标系探测器有限元模型,为了保证仿真结果的正确性及避免像素阵列电极附近电势分布的非物理性扩散,模型中探测器材料属性均与实际探测器一致。像素电极材料设置为铟(In),平面阴极材料设置为金(Au),探测器材料设置为碲锌镉。如图所示,建立的碲锌镉晶体尺寸半径  $R=12$  mm,辐照区域与实际一致  $R_r=10$  mm,晶体厚度  $L=5$  mm。碲锌镉晶体相对介电常数  $\epsilon=11$ <sup>[11]</sup>,电阻率为  $10^{10}$   $\Omega \cdot \text{cm}$ 。电极尺寸 1.86 mm,电极中心间距 2.46 mm。

在晶体内部区域设定电势分布泊松方程,受辐照区域初始电荷密度如(2)和(3)式,未受辐照的边缘区域初始电荷密度设为 0。同时,设定几何模型各个边界的第一类边界条件(Dirichlet 边界条件),阴极平面电势

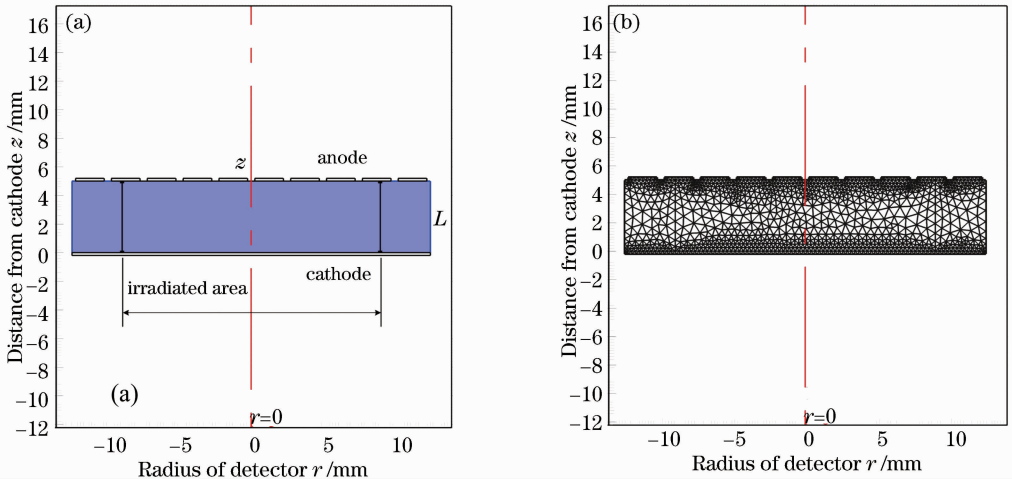


图 2 面元像素碲锌镉探测器物理模型。(a) 2D 物理模型; (b) 有限元网格化模型

Fig. 2 Geometry of the CdZnTe detector model. (a) 2D view of the CdZnTe detector with the assumed irradiated area; (b) finite element method meshed model

$\varphi(r, 0) = V_{\text{cathode}} = -1000 \text{ V}$ , 阳极像素电极电势  $\varphi(r, L) = V_{\text{anode}} = 0$ , 辐照区域轴向边界电势  $\varphi(R, L) = (L - z)V_{\text{cathode}}/L$  ( $R$  为辐照区域半径), 辐照通量  $\Phi_\gamma = 10000 \text{ mm}^{-2}$ 。

基于以上模型, 即可求解得到不同物理参数条件下的碲锌镉晶体内部电势分布。根据(3)式, 对于特定入射通量  $\Phi_\gamma$  的光子, 初始空间电荷密度只与入射光子特征能量相关, 因此, 所建立的模型主要通过改变入射光子能量  $E_\gamma$  及相应的线性衰减系数  $\mu$  来影响初始空间电荷密度, 继而得到不同辐照条件下的晶体内部电势分布, 并分析讨论探测器感应信号主要来源的电子载流子迁移路径变化。考虑到 X 射线球管实际产生光子能量范围, 改变入射特征光子能量  $E_\gamma$  及线性衰减系数  $\mu$  并仿真计算了表 1 所示特征能量条件下的晶体内部电势分布。

表 1 模拟计算特征能量及线性衰减系数<sup>[12]</sup>

Table 1 Values of the energy and linear attenuation parameters

Energy $E_\gamma/\text{keV}$	5	15	20	25	35
Linear attenuation $\mu/\text{cm}^{-1}$	$5.12 \times 10^3$	$2.96 \times 10^2$	$1.36 \times 10^2$	$7.47 \times 10^1$	$1.66 \times 10^2$

### 3.2 数值计算与分析

图 3 为改变入射光子特征能量值时碲锌镉晶体内部空间电势及电子载流子迁移路径(箭头方向)的相应变化。

从图 3(a)和(b)的变化可以看到, 当保持入射光子通量不变并假设辐照均匀, 即探测器辐照区域内各处初始光生载流子信号分布均匀。入射光子特征能量从 5 keV 增大至 15 keV 时, 晶体内部电势分布及电子载流子迁移路径都会随之发生明显变化。当入射光子能量升高, 其初始电荷密度增大, 辐照中心所出现高空间电荷密度区域导致了晶体内部出现相对高电势区域, 晶体内部电场分布在高电势区域的影响下发生扭曲, 电

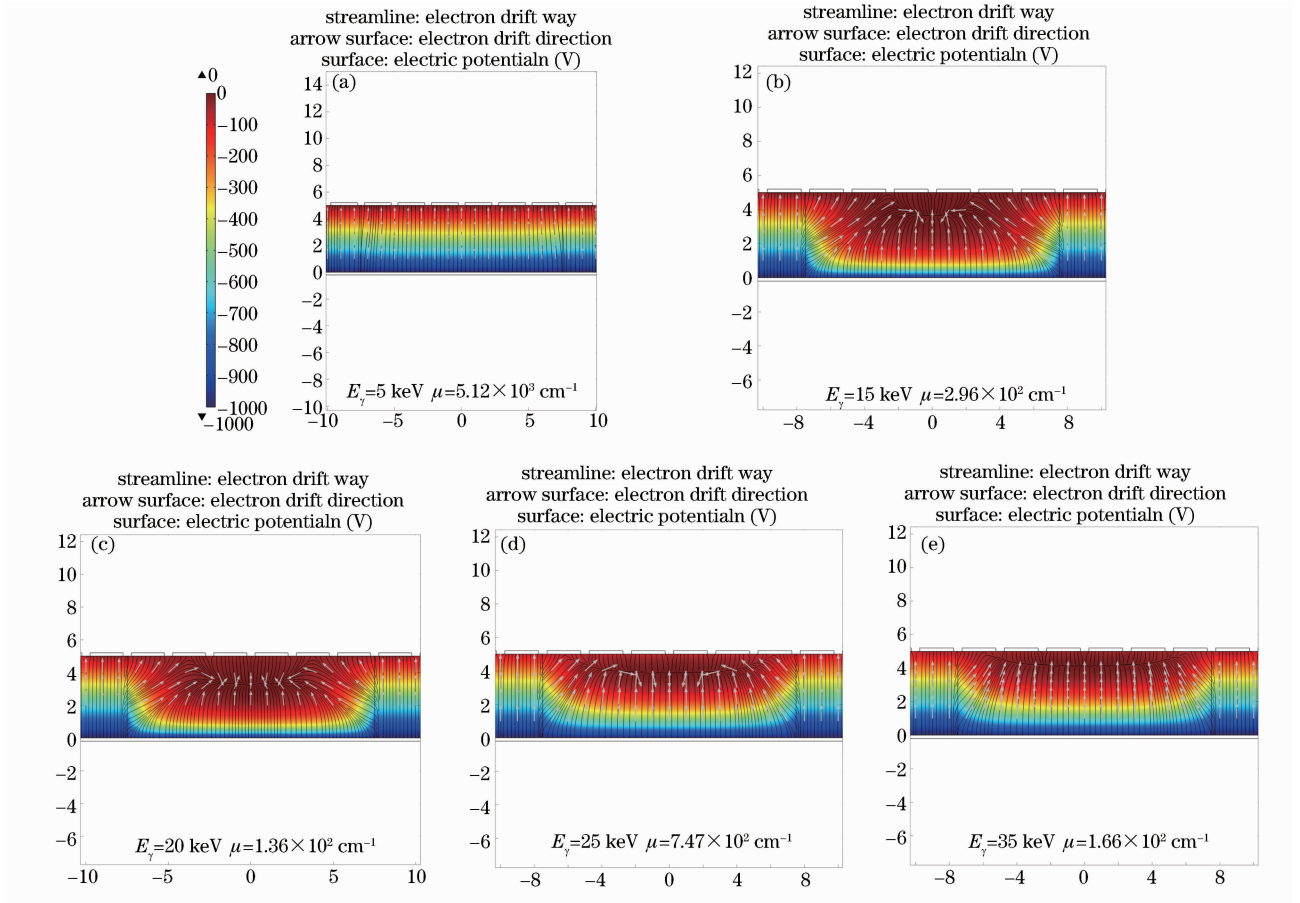


图 3 不同入射特征光子能量条件下的碲锌镉探测器内电势分布及电子载流子迁移轨迹变化

Fig. 3 Distributions of the electric potential and drift-way of electron carriers in the CdZnTe crystal for different photon energies. (a) 5 keV photons; (b) 15 keV photons; (c) 20 keV; (d) 25 keV; (e) 35 keV

子载流子迁移路径发生明显改变;即在高电势区域所产生的附加电场作用下,电子迁移路径出现扭曲,电子载流子无法正常迁移并被阳极电极收集。这就导致了辐照中心区域所对应的像素单元出现信号完全屏蔽的现象,即实验结果图 1(b)所示变化,辐照中心位置像素单元计数突然大幅度降低,而边缘位置像素单元计数则迅速地相对增大,形成环形探测图像。

当入射光子特征能量进一步增大至 20 keV 时,如图 3(c)所示。明显的,虽然辐照中心区域初始电荷密度值随着入射光子能量的增大而不断增大,所形成的高电势区域中心更多的电子载流子受其影响而无法迁移至像素阳极,造成辐照中心像素单元计数完全丢失。但同时也可以看出,由于光子线性衰减系数差异并不明显,高电势区域的范围变化并不明显,位于高电势区域边缘的电子载流子仍然能够迁移至阳极表面附近。因此,当入射光子能量的增大使得相应晶体内部区域产生的光生载流子数量也增大时,位于载流子堆积区域边缘的自由载流子数量也随之增多,其结果为无信号响应区域边缘位置的像素单元所收集到的电子载流子增多,相应事件计数值增多,最终形成如图 1(c)所得探测信号。

当入射光子能量进一步增大时,如图 3(d),(e)所示,初始空间电荷产生位置更接近像素阳极面;所形成的高电势区域开始明显扩大,高电势区域的边缘位置扩大至辐照区域边缘位置。尽管入射光子能量有所增大,但相比辐照中心区域无法迁移至像素阳极面的电子载流子数量,辐照区域边缘位置所存在的能够迁移至阳极表面的光生载流子数量却明显相对较少。因此,随着入射光子能量的不断增大,辐照边缘位置像素单元信号明显不断降低而中心无响应区域却不断扩大,其过程与实验测试中图 1(d),(e)所示成像图像一致。

综上所述,当保持入射光子通量不变,不断增大入射光子能量时,碲锌镉探测器内部会出现辐照中心无计数的载流子信号屏蔽现象。其原因为较高能量的入射光子将增大初始空间电荷密度,继而在晶体内部产生一定范围的相对高电势区域;辐照中心区域对应的像素单元由于电子载流子迁移路径的扭曲而无法收集得到相应的载流子电荷信号。随着入射光子能量的增加,此信号屏蔽效应还会呈现非线性变化情况,即载流子信号屏蔽区域边缘的像素单元信号随着入射光子能量的增加而先增大再减小,而无信号响应区域的范围也随之扩大。

## 4 结 论

搭建了基于像素阵列碲锌镉晶体的辐射成像探测系统,采用 X 射线源完成了不同管电压条件下的成像探测实验。实验观察到了辐照中心区域像素单元无信号响应,而无响应区域边缘像素信号具有非线性变化特征的现象。通过有限元模型求解,仿真模拟了不同特征光子能量及线性衰减系数条件下,碲锌镉晶体内部电势及电场分布的变化。根据仿真结果,讨论分析了入射光子特征能量及光子线性衰减系数不断变化的条件下,碲锌镉探测器内部电势分布及电子载流子迁移运动轨迹的变化趋势。对直接转换类半导体成像探测器在高能量及高通量辐射条件下的应用具有参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 Meng Xin, Ding Honglin, Hao Xiaoyong, *et al.*. Development of large area CdZnTe detector for satellite detection of X and  $\gamma$  rays [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(2): 149–154.
- 2 孟 欣, 丁洪林, 郝晓勇, 等. 用于卫星探测 X、 $\gamma$  射线的大灵敏面积 CdZnTe 探测器的研发[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(2): 149–154.
- 3 Xu Yadong, Jie Wanqi, Zha Gangqiang, *et al.*. A study on the low energy X/ $\gamma$ -ray spectral response of CdZnTe planar detectors[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 307–3077.
- 4 徐亚东, 介万奇, 查刚强, 等. CdZnTe 平面探测器对低能 X/ $\gamma$  射线的光谱响应[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3072–3077.
- 5 Xu Yadong, Jie Wanqi, Sellin P, *et al.*. Study on temperature dependent resistivity of indium-doped cadmium zinc telluride[J]. J Phys D Appl Phys, 2009, 42:03505.
- 6 Xu Yadong, Jie Wanqi, Sellin P J, *et al.*. Characterization of CdZnTe crystals grown using a seeded modified vertical Bridgman method[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(5): 2808–2813.
- 7 Wang Tao, Jie Wanqi, Zeng Dongmei, *et al.*. Temperature dependence of photoluminescence properties of in-doped cadmium zinc telluride [J]. J Mater Res, 2008, 23(5): 1389–1392.
- 8 Liptac J, Parker R, Tang V, *et al.*. Hard X-ray diagnostic for lower hybrid experiments on Alcator C-Mod[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 103504.
- 9 Hong J, Allen B, Grindlay J, *et al.*. Building large area CZT imaging detectors for a wide-field hard X-ray telescope—ProtoEXIST1[J].

- Nucl Instrum Meth, 2009, A605(3): 364–373.
- 8 Franc J, Kubát J, Grill R, *et al.*. Influence of space charge and potential fluctuations on photoconductivity spectra of semiinsulating CdTe [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(4): 1416–1420.
- 9 Camarda G S, Bolotnikov A E, Cui Y, *et al.*. Polarization studies of CdZnTe detectors using synchrotron X-ray radiation [C]. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2007: 1798–1804.
- 10 Li Miao, Xiao Shali, Zhang Liuqiang, *et al.*. Gamma source imaging based on pixellated CdZnTe detection[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 2165–2170.  
黎 森, 肖沙里, 张流强, 等. 基于 CdZnTe 像素阵列探测技术的伽玛源成像[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 2165–2170.
- 11 Antonis P De, Morton E J, Menezes T. Measuring the bulk resistivity of CdZnTe single crystal detectors using a contactless alternating electric field method[J]. Nucl Instrum and Meth A, 1996, 380(1-2): 157–159.
- 12 B Redus. Efficiency of Amptek XR–100T–CdTe and CZT Detectors Application Note ANCZT-1 Rev 2[OL]. <https://www.amptek.com> [2015-04-10].

栏目编辑: 刘丰瑞