平面型CdZnTe探测器的能谱特性模拟

朱伟峰[1,2] 吴金杰[2] 汤显强[1,2] 赵 瑞[2] 鲁平周[1,2]
屈冰冰[1,2] 李梦宇[1,2] 秦 峰[2,3]

1（成都理工大学 成都 610059）
2（中国计量科学研究院 北京 100029）
3（中国计量大学 杭州 310018）

摘要 CdZnTe（CZT）探测器是一种高原子序数的化合物半导体探测器，具有体积小、探测效率高、可在常温环境使用等特点，广泛应用于X、γ射线探测领域。为了更好地研究CZT探测器能谱特性的影响因素，通过Geant4软件建立探测器几何模型，模拟计算CZT晶体的本征探测效率和吸收率；根据Hecht公式计算电荷收集效率，通过收集晶体中的沉积能量和位置信息得到γ射线能谱；通过分析晶体的物理特性，探索其对探测器性能的影响。模拟计算结果表明：电荷收集不完整是影响探测器能谱性能的重要因素，当能量低于50 keV时，γ射线谱基本不受空穴尾迹的影响，而能量在50~100 keV的γ射线能谱受空穴尾迹的影响较为明显，高于100 keV的γ射线能谱受空穴尾迹的影响逐渐加重。通过增加偏压的方式可以降低空穴尾迹对能谱的影响，同时偏压的增加会使峰位产生偏移，偏移程度受最大电荷收集效率的影响。

关键词 CZT探测器，本征探测效率，吸收率，电荷收集效率，空穴尾迹
中图分类号 TL814
DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050402

Simulation of energy spectrum characteristics of planar CdZnTe detector

ZHU Weifeng[1,2] WU Jinjie[2] TANG Xianqiang[1,2] ZHAO Rui[2] LU Pingzhou[1,2]
QU Bingbing[1,2] LI Mengyu[1,2] QIN Feng[2,3]

1(*Chengdu University of Technology*, *Chengdu 610059*, *China*)
2(*National Institute of Metrology*, *Beijing 100029*, *China*)
3(*China Jiliang University*, *Hangzhou 310018*, *China*)

Abstract **[Background]** A CdZnTe (CZT) detector is a compound semiconductor detector with a high atomic number and high detection efficiency, it can be used at room temperatures to detect short wavelength radiation such as X-ray and γ ray. **[Purpose]** This study aims to investigate the factors affecting the energy spectrum characteristics of the CZT detector. **[Methods]** The geometric model of the detector was established by using Geant4 software, and the intrinsic detection efficiency and absorption rate of CZT crystal in the planar size of 10 cm×10 cm were simulated. The charge collection efficiency of the crystal was calculated using the Hecht formula and the γ-ray energy spectrum was obtained by collecting the deposition energy and position information in the crystal. By analyzing the physical properties of crystals, the impact of physical properties on detector performance was explored. **[Results]** Simulation results show that incomplete charge collection significantly influences the spectral performance of the

国家市场监督管理总局技术保障专项(No.2022YJ33)资助
第一作者：朱伟峰，男，1996年出生，2021年毕业于南华大学核科学技术学院，现为硕士研究生，从事X射线计量研究领域
通信作者：赵瑞，E-mail：zhaorui@nim.ac.cn
收稿日期：2022-11-09，修回日期：2023-03-19
Supported by Special Technical of the State Administration for Market Regulation (No.2022YJ33)
First author: ZHU Weifeng, male, born in 1996, graduated from University of South China in 2021, master student, focusing on X-ray metrology
Corresponding author: ZHAO Rui, E-mail: zhaorui@nim.ac.cn
Received date: 2022-11-09, revised date: 2023-03-19

detector. When the γ ray energy is less than 50 keV, the spectrum is not affected by hole wake whilst the influence of hole wake is more obvious when the energy is between 50 keV and 100 keV. The energy spectrum is gradually aggravated by the influence of hole wake when the γ ray energy is above 100 keV. **[Conclusions]** This effect of hole wake for CZT detector can be reduced by increasing the bias voltage, but the increased bias voltage shifts the spectrum's peak, and the shift amount is determined by the maximum charge collection efficiency of the crystal.

Key words CZT detector, Intrinsic detection efficiency, Absorption rate, Charge collection efficiency, Hole wake

CdZnTe（$Cd_{48}Zn_{30}Te_{52}$）具有较高的平均原子序数，在探测X/γ射线时，CZT材料与射线作用时具有较大的光电吸收截面[1–3]。当射线穿过晶体时，使更多能量沉积到CZT晶体中，通过光电效应生成电信号。与Si（Z=14）晶体相比，CZT材料具有更高的平均原子序数，这也使得CZT探测器具有更高的探测效率；与Ge材料相比，CZT晶体具有较大的禁带宽度、高电阻率且不需要制冷系统的辅助，在常温的条件下就可以获得低水平的漏电流和较高的能量分辨率，使得CZT探测器具有更广的应用前景[4–5]。此外，CZT探测器体积可以做得很小，有较好的空间分辨率，使用起来更加的便捷。鉴于这些优点，CZT探测器广泛应用于国防安全检测、医学诊断、工业探伤和航空天文观测等领域[6–7]。

鉴于CZT晶体生长环境的苛刻要求和生长技术的不完善，晶体内部存在缺陷，载流子的输运过程中存在严重的俘获和去俘获效应，使得电荷收集不完全，导致探测器测量生成的脉冲幅度谱产生波形失正，严重时甚至无法生成一个完整的能谱[8–13]。为了验证电荷收集不完整对能谱测量的影响，采用蒙特卡罗Geant4模拟软件，研究CZT探测器在不同电荷收集效率下对能谱的影响。在载流子向两极漂移的过程中，受到晶体材料中杂质和缺陷的影响，发生复合、俘获和扩散等作用，表现为晶体中载流子的迁移率和寿命的减小，进而导致探测器内载流子的不完全收集，导致射线能谱的全能峰的低能部分有很长的拖尾现象（称为空穴尾迹），使得探测器的能量分辨率有所下降。电荷收集效率除了受电荷迁移寿命积的影响之外，还受到CZT探测器电极间所加偏压和晶体厚度的影响。为了研究这些因素对电荷收集效率和能谱测量的影响，于晖、张蒙蒙等学者通过蒙特卡罗模拟CZT探测器发现电子与空穴的迁移寿命积之比越小，其能量分辨率越好[5]；谢占军等学者利用在MCNP程序加入Hecht方程，对^{60}Co谱和^{137}Cs谱进行了模拟，得到的模拟谱与实验谱基本一致[9]；徐慧超通过分析探测器的噪声组成，证明电荷收集不完全是影响探测器性能的主要因素[14]。本文通过在Geant4程序中引入Hecht方程，通过改变偏压研究电荷的不完全收集对不同能量γ射线能谱测量的影响。

1 实验原理与方法

1.1 γ射线的穿透能力

不同能量的γ射线对CZT晶体具有不同的穿透能力，可用质量衰减系数来进行表征。同样可用吸收率来表征CZT晶体对不同能量γ射线的衰减能力，如式（1）、（2）所示。

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\times\rho d} \tag{1}$$

$$\phi = 1 - e^{-(\mu/\rho)\times\rho d} \tag{2}$$

式中：I_0表示入射前的γ射线的强度；I表示经过衰减后的射线强度；(μ/ρ)为质量衰减系数，$cm^2\cdot g^{-1}$；ρ为CZT晶体的密度，$g\cdot cm^{-3}$；d为晶体的厚度，cm；ϕ表示CZT晶体对γ射线的吸收率。

当X/γ射线进入到探测器中，射线与CZT晶体材料可能发生光电效应和康普顿效应，当入射能量高于1.02 MeV时，还可能发生电子对效应。光子部分或全部能量沉积到晶体中，使物质发生电离产生电子-空穴对，称为载流子。在CZT晶体中产生一对电子-空穴对所需要的平均电离能为w（w=4.6 eV，CZT），在晶体中沉积的能量越多，相应产生的电子-空穴对数也就越多。射线在晶体中沉积的能量与产生的电子-空穴对呈线性关系，可以通过蒙特卡罗方法模拟得到的沉积能量谱来表征实测能谱中所得到的脉冲幅度谱。输出脉冲的幅度与电极两端收到的电荷数目成正比关系，与CdTe相比，CZT晶体中掺杂了Zn元素，使它的禁带宽度增大，电阻率增强，漏电流减小，而低的漏电流使得CZT探测器可以承受更高的偏压，有利于提高电荷收集效率，获得更好的能量分辨率。

1.2 Hecht方程

使用Geant4模拟光子与探测器内物质发生相互作用的整个物理过程，在每一个step（Geant4中统计收集信息的最小单位）阶段收集它所沉积的能量和在发生相互作用时所在的位置信息。由于载流子在向两极的漂移过程中会出现复合、俘获和扩散等现象，所以在统计信息时加入Hecht方程[15]，研究不

同电荷收集效率下对能谱测量的影响。

由Hecht方程计算得到的电荷收集效率表示在电极上收集到的载流子数目与光子能量沉积到CZT晶体中产生的总的载流子数目的比值，如式(3)所示。

$$\eta_{(z)} = \frac{\lambda_e}{d}\left(1 - e^{-(d-z)/\lambda_e}\right) + \frac{\lambda_h}{d}\left(1 - e^{-z/\lambda_h}\right) \quad (3)$$

式中：$\lambda_e = \mu_e\tau_e E$、$\lambda_h = \mu_h\tau_h E$、$\lambda_e$和$\lambda_h$分别表示电子的平均自由程和空穴的平均自由程，cm；$\mu_e\tau_e$表示电子的迁移率与寿命的乘积，$cm^2\cdot V^{-1}$；$\mu_h\tau_h$表示空穴的迁移寿命积，$cm^2\cdot V^{-1}$；d为探测器阳极板与阴极板之间的距离，也就是CZT晶体的厚度，cm；E为探测器中的电场强度，$V\cdot cm^{-1}$；z表示射线与CZT晶体发生相互作用的位置与阴极板之间的直线距离，cm；$\eta_{(z)}$表示在距离阴极板不同深度处的电荷收集效率。

考虑到在探测器工作时，射线在探测器中沉积的能量产生电子-空穴对，在电场的作用下，电子朝阳极方向漂移，空穴向阴极漂移，在漂移的过程中发生俘获、吸收和扩散等作用，造成电荷收集的不完整，从而影响到能谱的测量。其中，Hecht方程中$\mu_e\tau_e$取3×10^{-3} $cm^2\cdot V^{-1}$，$\mu_h\tau_h$取5×10^{-5} $cm^2\cdot V^{-1}$[16]，在偏压为500 V时，其最大电荷收集效率为73%；偏压设置为2 000 V时，最大电荷收集效率为92%。随着射线在晶体中入射深度的增加，产生的光生载流子的渡越时间变长，被俘获或被复合的概率增加，电荷收集效率逐渐减小，如图1所示。

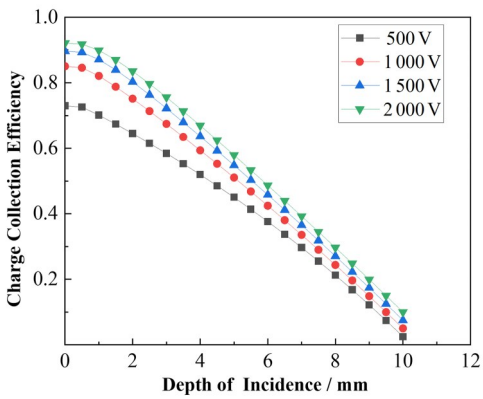


图1 不同偏压下电荷收集效率随入射深度的变化
Fig.1 Charge collection efficiency varies with depth of incidence at different bias voltage

2 几何模型

为了研究CZT晶体对γ射线的衰减能力，采用一个简单的几何模型加以验证，其中CZT晶体尺寸设置为10 mm×10 mm×T，T表示晶体厚度在1~10 mm进行选取，组成成分Cd：45%，Zn：5%，Te：50%，密度为5.78 $g\cdot cm^{-3}$[16]。图2(a)为验证CZT晶体对γ射线衰减能力所构建的几何模型，图2(b)是利用Geant4软件根据图2(a)所示的几何模型搭建的立体模型，以及在E_γ=20 keV，120 keV下γ射线在晶体中与物体发生相互作用的径迹。如图2(a)，探测器(15 mm×15 mm×5 mm)其表面积比晶体大一些，这样可以保证穿过晶体的射线都可以被探测器收集，其厚度没有硬性要求，γ射线源设为4 mm×4 mm的面源，位置与晶体表面重合。保证只要射线进入到探测器内部就可以被记录下来，通过计算可以得到晶体对γ射线的吸收率；收集射线与晶体相互作用的信息，改变入射γ射线的能量，得到CZT晶体对不同γ射线能量下的本征探测效率。

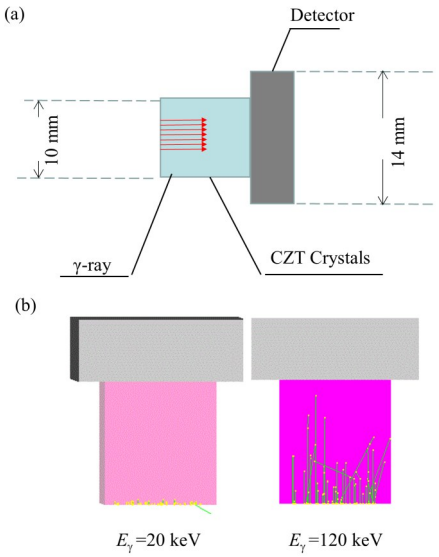


图2 探究CZT晶体衰减特性的结构示意图(a)，Geant4模拟20 keV、120 keV γ射线与晶体相互作用的径迹(b)
Fig.2 Structure diagram (a) for exploring CZT crystal attenuation characteristics, the track of interaction between 20 keV, 120 keV γ-ray with crystal (b) by Geant4 simulation

为了将晶体与实际的探测器联系起来，利用Geant4建立其整体结构模型，CZT晶体的尺寸为10 mm×10 mm×10 mm；Pt金属电极位于晶体两侧，面积10 mm×10 mm，厚度50 nm；Al窗厚度为1.14 mm，距晶体表面9.39 mm；外部箱体的尺寸为25.4 mm×25.4 mm×60 mm，放射源设为8 mm×8 mm的面源，位于距晶体中心距离为3 cm，其结构示意图如图3所示。将Hecht方程添加到Geant4代码中，根据Hecht方程中的参数设置发现电荷收集效率与γ射线在晶体中沉积能量的位置有关，通过调用Geant4中SteppingAction类的指针统计每一个step所沉积的能量，同时记录其所处的位置信息，然后，通过Hecht方程计算出当前位置处的电荷收集效率，再乘以当前位置处step所沉积的能量，通过所有

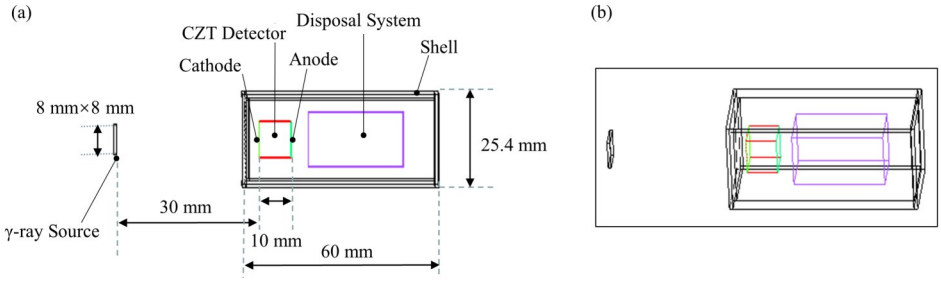


图3 平面型CZT探测器的几何模型(a)和Geant4建立的探测器模型(b)
Fig.3 Geometric model of a planar CZT detector (a) and the detector model established by Geant4 (b)

step在晶体中所沉积的能量进行累加求和得到总的沉积能量，也就是一个event沉积到晶体中的能量，最终就可以得到考虑到电荷收集效率后的探测器实际输出的能谱。其中，模拟过程中所选用的物理模型是Geant4官方所提供的QBBC物理模型，该模型提供了光子与物质的相互作用，主要反应有光电效应，康普顿效应，电子对效应和瑞利散射等。为了提高模拟效率，对于能量低于1 eV的光子我们不再予以追踪。

3 实验结果与分析

当CZT晶体的厚度为2 mm，对于入射γ光子的能量低于80 keV，晶体对γ射线的本征探测效率高达96%，但随着射线能量升高，晶体的本征探测效率开始显著地降低，在250 keV时晶体的本征探测效率低于20%。增加晶体厚度，在同一能量下，其探测效率呈现明显的上升趋势。当晶体的厚度达到10 mm，在射线能量同为250 keV，其探测效率为68.35%，随着射线能量增加，其探测效率下降的幅度也较为平缓；当射线能量达到600 keV，其探测效率仍有36.12%，而2 mm晶体的探测效率不足15%，因此，增加晶体的厚度有利于对于高能射线的探测，如图4所示。

图5所示，能量低于50 keV时，1 mm晶体可以做到完全吸收；但随着γ射线能量的升高，其穿透能力增强，表现为在同一晶体厚度下吸收率下降。相同入射能量下，随着晶体厚度的增加，晶体的吸收率逐渐升高，当入射能量高于400 keV，CZT晶体的吸收率接近线性吸收，将600 keV的模拟数据进行线性拟合，得到的线性拟合曲线方程为：

$$\phi = 0.024\,5d - 0.012\,9,\ R^2=0.998\,6 \qquad (3)$$

式中：R^2表示线性曲线拟合的优度，值越接近于1，表示线性拟合度越好。

图6~10为入射γ射线的能量为20 keV、50 keV、100 keV、200 keV以及600 keV时在附加偏压500 V、1 000 V、1 500 V、2 000 V条件下，电荷收集

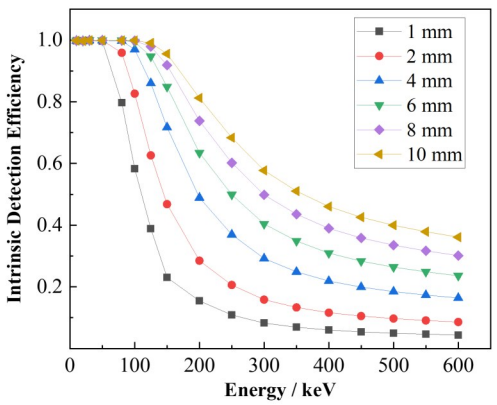


图4 不同厚度的CZT晶体的本征探测效率随能量的变化
Fig.4 Variation of intrinsic detection efficiency of CZT crystals of different thicknesses with energy

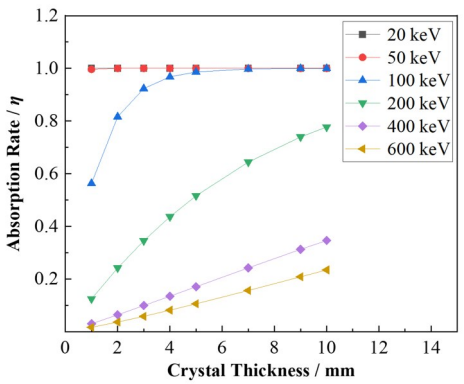


图5 不同能量下CZT晶体的吸收率随晶体厚度的变化
Fig.5 The absorption rate of CZT crystals varies with the thickness of the crystals with different energy

效率的改变对能谱测量的影响以及不考虑Hecht方程（理想能量沉积谱）的能谱。当偏压增加时，全能峰的峰位逐渐向右偏移，且越接近理想值，因为随着偏压升高，射线在探测器中沉积能量产生的光生载流子向两极漂移速度加快，漂移过程中被俘获和复合的概率减少，探测器两极收集到的电荷量也就更多，表现为峰位向右偏移，且全能峰的峰位偏移程度与它最大的电荷收集效率有关。表1给出了光子在50 keV、100 keV能量下的峰位偏移值，偏压的增加

使得载流子的最大电荷收集效率开始上升，峰位的偏移程度逐渐缩小，峰址越接近理想峰址，偏移程度为射线入射能量减去模拟得到的全能峰峰位道址所对应的能量而得的差值，且随着偏压的升高，差值也逐渐减小。对于20 keV、200 keV、600 keV的能量点其峰值的偏移程度也满足这一规律。

表1　入射γ射线能量(E_γ)峰位偏移
Table 1　Peak shift of incident γ-ray energy (E_γ)

偏压 Bias voltage / V	最大电荷收集效率 Maximum charge collection efficiency η / %	E_γ=50 keV			E_γ=100 keV		
		全能峰峰位 Full energy peak position / keV	能量×最大电荷收集效率 Energy×maximum charge collection efficiency / $E_\gamma \times \eta$	峰位偏移量 Peak deviation / keV	全能峰峰位 Full energy peak position / keV	能量×最大电荷收集效率 Energy×maximum charge collection efficiency / $E_\gamma \times \eta$	峰位偏移量 Peak deviation / keV
500	72.99	36.61	36.50	14.39	72.01	72.99	27.99
1 000	85.04	42.54	42.52	7.46	84.09	85.04	15.59
1 500	89.67	44.85	44.84	5.15	88.89	89.67	11.11
2 000	92.11	46.00	46.06	4.00	91.07	92.11	8.93

能量为20 keV的能谱除了全能峰的峰位随偏压的改变发生偏移，但空穴尾迹对能谱影响较小，主要是因为从阴极入射的γ射线的能量主要沉积在CZT探测器晶体的表层，电荷收集效率主要受电子向阳极漂移的影响，空穴的贡献很低。其中20 keV、50 keV的能谱中均在高压500 V时的计数最高且随着偏压的升高计数逐渐减小，由于入射射线的能量较低，能量主要沉积在阴极部分，电荷收集效率随着入射深度增加逐渐降低，而500 V的电荷收集效率衰减速度与其他偏压下的衰减相比较为平缓，这使得在峰位处相邻道的计数十分接近，经过展宽后，使得峰值计数增加，但随着偏压的增加这种趋势逐渐减弱。其中，50 keV能谱中出现的两个小峰是由CZT探测器中的Te核素的K_α（27 keV）和K_β（30 keV）产生的特征X射线逃逸所生成的逃逸峰。

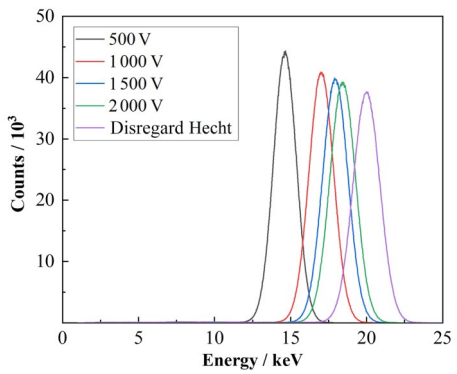


图6　CZT探测器对20 keV的能谱响应
Fig.6　Spectral response of the CZT detector to 20 keV radiation

当射线能量为100 keV，随着射线在晶体中入射深度的加深，空穴在向阳极漂移的过程中，由于其漂移速度比电子的漂移速度慢1~2个数量级，漂移过程中发生俘获和复合概率增加，造成电荷的不完全收集，导致全能峰的低能部分有一个很长的拖尾，造成探测器的能量分辨率变差。通过增大偏压，使空穴的漂移速度加快，被俘获和复合的概率降低。电荷的收集效率增加，使得探测器能谱的空穴尾迹逐渐减小，探测器的能量分辨率变好。如图8和图9所示。

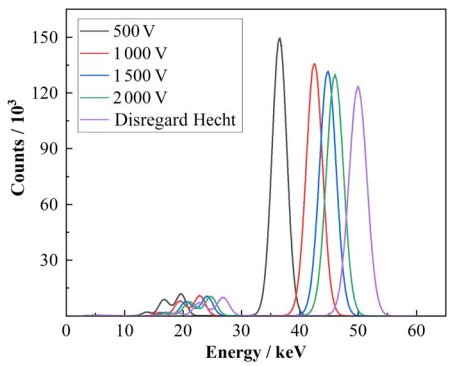


图7　CZT探测器对50 keV的能谱响应
Fig.7　Spectral response of the CZT detector to 50 keV radiation

随着射线能量不断增大，其穿透能力也愈加增强，在晶体中的作用深度也越深，电荷的收集效率变得更低，探测器的能谱受空穴尾迹的影响也越加明显。尤其当射线的能量达到600 keV时，受电荷收集效率的影响，空穴尾迹对全能峰低能部分有一个极大展宽，使探测器的能量分辨率变得越来越差，如图10所示。

能量分辨率是衡量探测器性能的重要标准之一，根据模拟得到的能谱，寻找全能峰所对应的能量以及在该全能峰下所对应的半高宽，将半高宽与峰值能量的比值表示为该探测器在不同能量下的能量分辨率。表2给出了CZT探测器在不同能量下的能

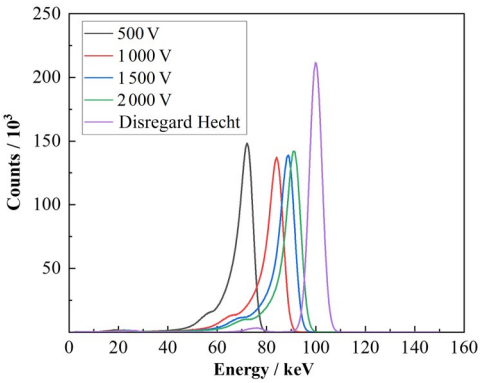


图8 CZT探测器对100 keV的能谱响应
Fig.8 Spectral response of the CZT detector to 100 keV radiation

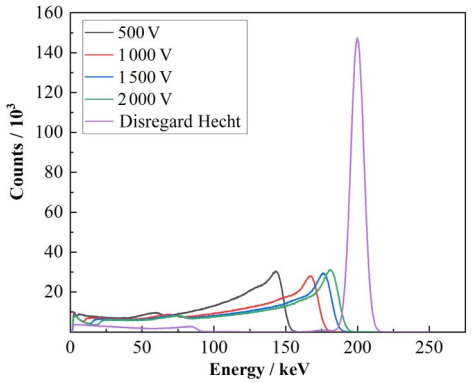


图9 CZT探测器对200 keV的能谱响应
Fig.9 Spectral response of the CZT detector to 200 keV radiation

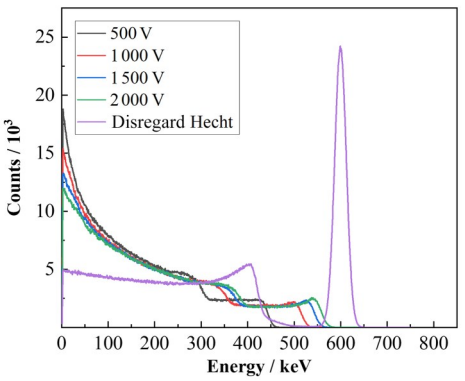


图10 CZT探测器对600 keV的能谱响应
Fig.10 Spectral response of the CZT detector to 600 keV radiation

量分辨率，在相同能量下，随着偏压的增加，探测器的分辨率逐渐改善。能量在200 keV时，由于能谱受到空穴尾迹的影响使得其能量分辨率变差，通过将偏压从500 V增加到2 000 V，分辨率从原先的27.83%降低到15.46%，其分辨率得到了很好改善，对于能量低于50 keV，增加偏压，其分辨率虽有所改善，但幅度较小，主要是因为能谱受尾迹影响很小，所以说分辨率的改善有限，600 keV的能谱由于受空穴尾迹的影响较大，使全能峰的低能部分有很长的延伸无法准确地得到半高宽，只能给出理想谱下的能量分辨率。

表2 不同能量和不同电压下的能量分辨率
Table 2 Energy resolution at different energies and voltage

E / keV	500 V	1 000 V	1 500 V	2 000 V	理想谱 Ideal spectrum
20	11.99%	11.17%	10.95%	10.77%	10.40%
50	8.03%	7.74%	7.53%	7.44%	7.14%
100	9.66%	8.72%	8.01%	7.90%	5.96%
200	27.83%	22.35%	17.35%	15.46%	5.27%
600	–	–	–	–	4.83%

4 结语

CZT探测器是一种高原子序数的常温化合物半导体探测器，其具有高探测效率、高电阻率和漏电流小的特性，可以设置更高的偏压来降低空穴尾迹对能谱测量的影响。本文利用Geant4对不同厚度的CZT晶体的本征探测效率和晶体对γ射线的吸收率进行模拟计算。通过统计γ射线在CZT探测器灵敏体积内沉积能量及相互作用的位置信息，添加Hecht公式计算电荷收集效率，得到沉积能量谱。通过改变偏压，能谱峰位会随偏压的变化发生偏移，偏移程度与最大电荷收集效率有关，在偏压U=500 V，E_γ=50 keV，最大电荷收集效率为72.99%，峰位偏移量为14.39 keV。对于能量低于100 keV的γ射线探测，空穴尾迹对能谱的影响很小；在能量高于100 keV γ射线探测部分，随着探测能量的升高，全能峰左侧低能端受空穴尾迹的影响愈加严重，通过增加偏压的方式可以降低空穴尾迹对能谱的影响，提高探测器的能量分辨率，偏压的增加虽可以降低尾迹对能谱的影响，但漏电流也会随偏压的升高而逐渐增加，使得探测器的分辨率变差，所以在实际测量中通过计算偏压与分辨率的关系曲线，来寻找最佳的电位从而得到更好的能量分辨率。

作者贡献声明 朱伟峰负责实验方案的设计，数据仿真、数据处理和论文撰写；吴金杰提供理论指导和论文的完善意见；汤显强参与数据的仿真和背景的调研；赵瑞提供理论指导和论文的数据分析；鲁平周、屈冰冰、李梦宇、秦峰参与数据的分析和处理。

参考文献

1 Lopez P, Guan F, Rauch M, *et al*. Monte Carlo simulation

of pixelated CZT detector with Geant4: validation of clinical molecular breast imaging system[J]. Physics in Medicine and Biology, 2021, **66**: 12. DOI: 10.1088/1361-6560/ac0588.

2 Boutaghane N, Bouzid B, Zaidi H. Conceptual design of a large pixelated CZT detector with four-hole collimator matched pixel detector for SPECT imaging: a Monte Carlo simulation study[J]. Journal of Instrumentation, 2019, **14**(2): P02026. DOI: 10.1088/1748-0221/14/02/p02026.

3 周红召, 宋明哲, 刘海侠, 等. 使用Geant4模拟CAPture电极CdZnTe探测器对 γ 射线的响应[J]. 原子能科学技术, 2021, **55**(6): 1098–1104.
ZHOU Hongchao, SONG Mingzhe, LIU Haixia, *et al*. Simulating response to gamma ray of CdZnTe detector with CAPture electrode using Geant4[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, **55**(6): 1098–1104.

4 查钢强, 项行, 刘婷, 等. CdZnTe半导体探测器X射线能谱响应特性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, **42**(8): 874–878.
CHA Gangqiang, XIANG Xing, LIU Ting, *et al*. The analysis of CdZnTe detector[J]. Scientia Sinica Technologica, 2012, **42**(8): 874–878.

5 于晖, 张蒙蒙, 杜园园, 等. CdZnTe伽马射线探测器的能谱特性分析[J]. 人工晶体学报, 2021, **50**(10): 1883–1891. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.20210908.001.
YU Hui, ZHANG Mengmeng, DU Yuanyuan, *et al*. Analysis on energy spectra for CdZnTe gamma ray detector[J]. Journa of Synthetic Crystals, 2021, **50**(10): 1883 – 1891. DOI: 10.16553/j. cnki. issn1000-985x. 20210908.001.

6 谷亚旭. CdZnTe核辐射探测器性能不均匀性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
GU Yaxu. Performance non-uniformity of CdZnTEe nuclear radiation detector[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.

7 徐凌燕. CdZnTe晶体中的深能级缺陷及其对光电性能的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
XU Lingyan. Deep-level defects and their effects on the photoelectric properties of CdZnTe crystals[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

8 傅健强. 碲锌镉探测器若干关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
FU Jianqiang. Research on the key techniques of CdZnTe detector[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

9 谢占军, 毛永, 阮向东, 等. 基于蒙特卡罗方法模拟计算CZT探测器的γ能谱[J]. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(1): 52–55. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.01.012.
XIE Zhanjun, MAO Yong, RUAN Xiangdong, *et al*. Simulate the calculation of the energy spectrum of the CZT detector based on the Monte Carlo method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28**(1): 52–55. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.01.012.

10 Park S, Kim Y, Jeon S, *et al*. Mean free paths of charge carriers in CZT crystal[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2007, **579**(1): 130–133. DOI: 10.1016/j.nima.2007.04.023.

11 徐慧超, 张金洲, 沈浩元, 等. N型碲锌镉探测器的制备和性能[J]. 核技术, 2005, **28**(10): 791–793.
XU Huichao, ZHANG Jinzhou, SHEN Haoyuan, *et al*. Fabrication and performance of N type CdZnTe detector [J]. Nuclear Techniques, 2005, **28**(10): 791–793.

12 郝魁红, 赵林, 曹咏娜, 等. 基于CdZnTe探测器的低能γ射线16通道探测系统[J]. 核技术, 2008, **31**(11): 869–872.
HAO Kuihong, ZHAO Lin, CAO Yongna, *et al*. 16-channel CdZnTe system for low-energy γ -ray measurement[J]. Nuclear Techniques, 2008, **31**(11): 869–872.

13 Chun D, Park H, Jang Ho H, *et al*. Monte Carlo simulation of a CZT detector[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2008, **45**(sup5): 549–552. DOI: 10.1080/00223131.2008.10875913.

14 徐慧超, 龚培荣. 平面型碲锌镉(CZT)室温探测器的噪声和性能[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(6): 784–787. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.06.026.
XU Huichao, GONG Peirong. Analysis of noise and resolution of prototype CdZnTe detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(6): 784–787. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.06.026.

15 Hecht K. Zum Mechanismus des lichtelektrischen Primärstromes in isolierenden Kristallen[J]. Zeitschrift für Physik, 1932, **77**: 235–245. DOI: 10.1007/BF01338917.

16 李杨, 罗文芸, 贾晓斌, 等. 平面型CdZnTe探测器电荷收集效率对能谱测量的影响[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2016, **22**(2): 231–237.
LI Yang, LUO Wenyun, JIA Xiaobin, *et al*. Influence of charge collection efficiency on energy spectrum for planar CdZnTe detector[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2016, **22**(2): 231–237.