

新型CZT半导体X射线和 γ 射线探测器研制与应用展望*

查钢强 王涛 徐亚东 介万奇[†]
(西北工业大学材料学院 西安 710072)

2013-5-26收到

[†] email: jwq@nwpu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20131205

The development of CZT semiconductor X-ray and γ -ray detectors

ZHA Gang-Qiang WANG Tao XU Ya-Dong JIE Wan-Qi[†]
(School of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要 CdZnTe(CZT)半导体是一种性能优异的室温X射线和 γ 射线探测材料, 在环境监测、医学诊断、工业无损检测、安全检查、空间科学等众多领域有广泛的应用前景。文章简要介绍了CZT探测器的基本工作原理和性能评价指标, 阐述了CZT晶体物理性能对CZT探测器性能的影响规律和CZT探测器的模拟与设计方法。CZT半导体探测器的应用与发展前景广阔, 为此需要重点开展高质量、低成本的CZT晶体生长研究, CZT探测器的设计与制备以及辐射探测整机系统的设计与开发。

关键词 CdZnTe半导体, 高能射线探测器

Abstract CdZnTe is an excellent candidate for high efficiency, high-resolution room-temperature nuclear radiation detectors, which are being widely used in environmental monitoring, medicine, industrial non-destructive testing, security inspection and space science. The working principle and performance evaluation of CZT detector were first described briefly. And then the relationship between the CZT crystal physical properties and the CZT detector performance was discussed. The CZT detector simulation and design methods were presented. For promotion of the application and development of the CZT detector, the studies on high-quality, low-cost CZT crystal growth technology, CZT detector design and fabrication and the radiation detection system should be enhanced.

Keywords CdZnTe semiconductor, radiation detectors

1 引言

自从1895年伦琴发现X射线以来, 高能射线对于人类社会产生了深远而广泛的影响, 现已在环境监测、医学诊断、工业无损检测、安全检

查、核科学与技术、天文观测以及高能物理等领域广泛应用。高能射线的探测是高能射线应用的关键技术之一, 因此不断发展高能射线探测材料和高性能探测技术是目前高能射线应用领域的重要发展方向。

高能射线探测器已经经历了气体探测器、闪烁体探测器和半导体探测器三代探测器, 其中气体探测器因其体积大和探测效率低而逐渐被闪烁

* 国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2011YQ040082)资助项目

体探测器和半导体探测器所取代。

目前国内广泛采用的是闪烁体探测器, 由于其不需要冷却, 通常作为便携式X射线和 γ 射线能谱仪用于现场监测, 但闪烁体只有配备光电倍增管等附件才能工作, 因此仅能提供中等程度的能量分辨率, 不适合中低能量范围的射线探测。

半导体探测器作为第三代探测器具有分辨率高、装置简单等优点。目前发展较为成熟的半导体探测器主要有硅(Si)探测器和高纯锗(Ge)探测器。由于Si的原子序数低, Si探测器对能量大于20 keV以上的高能射线探测效率非常低。而由于Ge的禁带宽度小, 必须在液氮温度以下才能工作, 因此限制了其使用范围。

为了进一步提高高能射线探测技术, 尤其是在20—800 keV能量范围的中等能量射线的探测技术, 寻找具有高原子序数、高电阻率、高载流子输运特性和合适的禁带宽度的新型半导体探测材料, 具有重要的应用价值。近年来, 化合物半导体CdZnTe(简称为CZT)探测器受到人们的高度重视, 这是因为: (1)与Si相比, CZT材料原子序数大, 因而探测效率更高, 1 mm厚的CZT晶片对60 keV γ 射线的光电探测效率可达97.4%, 而Si探测器对60 keV γ 射线的光电探测效率不到10%; (2)与高纯Ge相比, CZT具有较大的禁带宽度, 因而CZT探测器可以在室温下工作, 省去了制冷系统, 体积较小, 使用更加方便; (3)CZT晶体具有高电阻率和高载流子输运特性, 可以保证CZT探测器具有很好的电荷收集效率和能量分辨率; (4)与闪烁体相比, CZT探测器可以通过光刻工艺制备像素电极, 探测器的单元探测面积可以很小, 因此可以在成像系统中提供较高的空间分辨率; (5)CZT晶体还具有化学性质稳定、无极化和无潮解等特点, 确保了器件性能的稳定性。目前国际上辐射探测器技术的发展战略是, 在小于20 keV的低能段, 以Si探测器为主, 在大于800 keV的高能段, 重点发展闪烁体探测器, 而在20—800 keV的中等能量范围内, 重点发展CZT探测器。目前安检设备采用的X射线能量通常为100—160 keV, 核医学仪器采用的射线能量

范围为20—511 keV, 工业CT大都采用100—450 keV的X射线, 天文学家关心的包含大量天体演变信息的宇宙射线能量范围主要在20—300 keV^[1-3]。

国际上从事CdZnTe晶体生长与CdZnTe探测器制备研究的单位主要有美国的eV公司, 加拿大的Redlen公司和以色列Orbotech公司等。在CZT探测器的应用方面, 国外做了大量的探索。2007年, 国际原子能组织提出了在核安全监测领域采用CZT探测器替代传统闪烁体探测器的发展计划。GE, Philipps、Siemens等国际著名的医疗器械厂商已经开始开发基于CZT探测器的编码窗口准直的便携式 γ 相机、医疗CT、PET-CT、SPECT、骨密度仪和X射线乳腺检查仪等核医学设备, 我国引进的大量骨密度仪和乳腺检查仪器均以CZT器件为核心探测器。此外, 国际上的很多天文卫星均采用了CZT探测器, 如美国的SWIFT和NuSTAR等, 用于宇宙射线的分析, 揭示一系列天体的演变过程。我国计划2018年在“天宫二号”计划中发射一颗X射线时变和偏振探测卫星(XPT), 也将配备CZT探测器。

国内从上世纪90年代开始, 就有单位开始了CdZnTe晶体的研究, 中国科学院上海技术物理研究所、昆明物理研究所和华北光电技术研究所成功地生长了用于HgCdTe外延生长衬底用的CdZnTe单晶。进入新世纪, 国内开始重视CdZnTe作为高能射线探测器的应用, 西北工业大学、四川大学、上海大学均已开展用于高能射线探测的CdZnTe晶体生长研究, 并取得了显著进展。其中西北工业大学材料学院自1994年就开始了CdZnTe晶体生长以及器件性能研究, 从晶体生长过程的传热、传质与液相对流行为的分析入手, 将坩埚旋转加速技术引入布里奇曼法晶体生长工艺中, 通过控制固液界面的稳定性和温场的均匀性, 改善了成分的均匀性, 发展了大尺寸CZT晶体的生长技术, 已成功地生长出直径为60 mm、电阻率高于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 、载流子迁移率与寿命之积($\mu\tau$ 值)高于 $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$ 的探测器级CdZnTe晶体。

鉴于CZT探测器对于提升我国安全检查、医学诊断、工业探伤以及天文观测等领域整体技术

水平的重要意义，科技部在首批国家重大科学仪器设备开发专项中批准立项实施“新型CZT半导体X射线和γ射线探测器研制”。该项目以发展CZT半导体探测器及成套技术为目标，研制具有自主知识产权的系列化CZT探测器。主要包括：(1)开发大尺寸探测器级CZT晶体生长技术，形成制备高电阻率、高载流子迁移率和寿命之积($\mu\tau$ 值)的CZT单晶工业化批量生产能力；(2)设计抗辐照、低噪声、高增益、低输出阻抗以及高响应速度的CZT探测器单路和多路前端电子学系统；(3)针对不同应用背景进行CZT探测器结构的模拟、设计和优化；(4)发展CZT晶体表面加工处理技术、电极制备工艺以及探测器封装工艺，制备出满足不同应用背景的高性能CZT探测器。

2 CZT探测器的工作原理

X射线和γ射线与CdZnTe探测器作用机制主要包括三种效应：光电效应、康普顿效应和正负电子对效应。在光电效应中，γ射线把全部能量交给一个原子而消失，同时激发出电子—空穴对。在原子序数为Z的材料中，当光子能量大于K壳层的电子束缚能时，光电吸收截面 τ_a 由下式给出：

$$\tau_a = AZ^5(h\nu)^{-7/2}, \quad (1)$$

式中A为常数， $h\nu$ 为γ射线的能量。光电吸收截面随原子序数迅速增加，这说明原子序数高的材料对γ射线的探测效率更高。当射线能量增加时，光电吸收截面 τ_a 开始迅速减小，这说明探测器对高能射线的探测效率会显著降低。

在康普顿效应中，光子和电子发生弹性碰撞，光子把它的一部分能量交给了电子，所以光子的能量减小了。发生康普顿效应后，光子的能量减少了，方向改变了，在晶体内可能再次发生康普顿效应与光电效应，这也是在半导体探测器中经常出现康普顿连续谱(平台)的原因。

当γ射线能量足够高并大于电子和正电子的静止能量之和(1.022 MeV)时，会产生正负电子对，正负电子对产生的截面随射线能量的增加而增加。通常CdZnTe探测器的探测范围在10—1000 keV，

在这个能量范围内，不会产生正负电子对。

CZT探测器工作时，CZT晶体吸收X射线或γ射线产生的电子—空穴对，在外加电场的作用下分别向阳极和阴极运动，并在电极上产生感应电流脉冲。该感应电流可由Shockley—Ramo原理描述^[4, 5]：

$$i = E_v qv, \quad (2)$$

其中*i*为电极上收集到的感应瞬态电流，*q*为电荷电量，*v*为电荷运动的瞬时速度，*E_v*为电荷瞬间所处位置处的电场在电荷运动速度方向上的分量。

在(2)式的推导过程中，假设电极之间没有固定的空间电荷。对于半导体探测器的特殊情况，任之恭^[6]和Cavalleri等人^[7]证明了即使存在空间电荷该方程依然成立。感应电流经前置放大器放大，产生一个高度与探测器电流的时间积分成正比的电压脉冲。进一步进入成形放大器，进行放大成形，过滤掉噪声并使信噪比达到最高，最后输入多道脉冲幅度分析仪，得到射线的能谱。由于射线的能量与它们所产生的电子—空穴对数目成正比，如果不考虑探测器内电荷收集不完全，前置放大器产生的电压脉冲将正比于入射射线的能量。

而实际上载流子在输运过程中不可避免地会发生复合和俘获过程，载流子的迁移率越大，寿命越长，在输运过程中被俘获的概率越小。Hetch等^[8]研究了载流子迁移率和寿命对探测器两端收集到的电荷量的影响规律，得到

$$Q(x_0) = \frac{qVN_0}{d^2} \times \left\{ (\mu\tau)_e \left[1 - \exp\left(\frac{x_0 - d}{(\mu\tau)_e V}\right) \right] + (\mu\tau)_h \left[1 - \exp\left(\frac{-x_0}{(\mu\tau)_h V}\right) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中 x_0 为电子—空穴对产生的位置，*q*为单位电荷电量， N_0 为射线产生电子—空穴对的数目，*d*为晶片的厚度，*V*为外加偏压， $(\mu\tau)_e$ 和 $(\mu\tau)_h$ 分别是电子迁移率与寿命之积以及空穴迁移率与寿命之积。也有一些学者在此基础上，提出了改进的推算方法^[9]。探测器收集效率可表示为

$$\eta = \frac{Q}{N_0} \quad (4)$$

由(3)式可以看出,当晶体的载流子输运特性一定时,收集到的电荷取决于射线与晶体发生相互作用的具体位置。还需要指出的是,(3)式和(4)式推导的假设前提是,探测器内的电场是完全均匀的,且不考虑去俘获的影响,在应用和理解时需要加以注意。不同能量的 γ 射线对CdZnTe的穿透能力不一样,穿透能力可以用吸收系数来表征^[10]:

$$I_{\text{trans}} = I_0 e^{-ad}, \quad (5)$$

其中 d 为晶片的厚度, a 为吸收系数。

表1给出了CdZnTe对10—10000 keV能量的X射线的吸收系数和光电吸收系数^[11]。根据(5)式可以得到不同厚度的CdZnTe晶体对不同能量X射线的吸收效率,如图1所示^[12]。从图中我们可以看出,1 mm厚的CdZnTe晶片即可吸收98%以上能量低于²⁴¹Am@59.5 keV的X射线。对于⁵⁷Co@122 keV的X射线,2 mm厚的CdZnTe晶片可吸收约70%。能量低于60 keV的X射线进入CdZnTe晶片后,大部分吸收发生在入射端附近,因此,电子—空穴对主要产生在入射端附近。在探测器工作时,产生的电子向阳极移动,空穴向阴极移动。由于CdZnTe晶体中空穴的迁移率和寿命之积远小于电子,通常要求射线从阴极入射,以使空穴在探测器内漂移较短距离,从而减少俘获概率,提高电荷收集效率,同时提高能量分辨率。而当能量大于200 keV时,X射线在CdZnTe晶片中的接近均匀吸收,由于通常CdZnTe晶体中空穴的迁移率和寿命之积很小,导致全能峰由于空穴收集的不完全而被极大地展宽,甚至无法得到明显的全能峰。

3 CZT探测器的主要性能

通常从探测效率、分辨率和稳定性三个方面评判高能射线探测器性能的优劣。其中分辨率包

表1 不同能量的X射线在CdZnTe中的吸收系数

光子能量 / keV	吸收系数 / cm ⁻¹	光电吸收系数 / cm ⁻¹
10	8.76×10 ³	8.60×10 ³
20	1.36×10 ³	1.28×10 ³
30	1.29×10 ³	1.24×10 ³
50	6.51×10 ²	6.24×10 ²
60	3.99×10 ²	3.78×10 ²
100	1.02×10 ²	8.92
125	5.85	4.69
200	1.99	1.22
400	7.08×10 ⁻¹	1.78×10 ⁻¹
600	4.98×10 ⁻¹	6.39×10 ⁻²
1000	3.56×10 ⁻¹	2.06×10 ⁻²
5000	2.17×10 ⁻¹	1.51×10 ⁻³
10000	2.38×10 ⁻¹	6.38×10 ⁻⁴

括空间分辨率、时间分辨率和能量分辨率。稳定性包括环境稳定性和时间稳定性。

半导体探测器的探测效率主要取决于光电吸收效率和载流子的收集效率。对于固定材料而言,光电吸收效率几乎是不变的。光电吸收效率主要取决于半导体材料的平均原子序数。由于CdZnTe的平均原子序数为50,而Si的原子序数只有14,因此CdZnTe探测器的探测效率远大于Si探测器。1 mm厚的CdZnTe晶片对60 keV的 γ 射线的光电探测效率可达97.4%,1 mm的Si探测器对60 keV的 γ 射线的光电探测效率不到10%。可以通过增加晶体的厚度来提高CZT探测器对高能射线的探测效率。但当晶体的厚度增加时,射线产生的光生载流子的渡越时间变长,被复合或俘获的概率增大,载流子的收集效率下降,从而影响探测器的探测效率和能量分辨率。

能量分辨率是表征探测器性能的一个重要参数,是指把相近能量的谱线分开的能力,同时也反映了噪声的强弱,常以谱线的半高宽或相对线宽来衡量。谱峰的半高宽 ΔE 由以下几个因素决定^[13]:

$$\Delta E = f(\sigma_F^2, \sigma_e^2, \sigma_c^2), \quad (6)$$

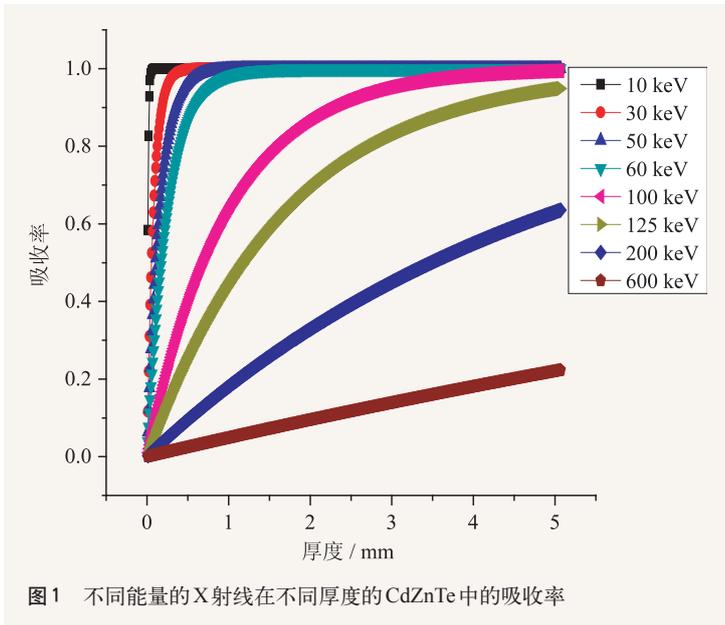


图1 不同能量的X射线在不同厚度的CdZnTe中的吸收率

式中 σ_r^2 是 Fano 噪声的方差, σ_e^2 是由探测器漏电流和电子学引起的噪声的方差, σ_c^2 是电荷收集不完全引入噪声的方差。

空间分辨率是指阵列式多通道探测器对空间立体角的分辨能力, 包括角度分辨率和位置分辨率。角度分辨率可用于未知放射源位置的判断, 先进的便携式 γ 能谱仪, 不仅需要判断放射源的有无, 还需要判断放射源的位置。位置分辨率通常是针对用于辐射成像的像素探测器, 如医疗 CT 和工业无损检测等。CZT 探测器的空间分辨率主要取决于探测器的结构设计和后续的读出电路系统。角度分辨可根据 CZT 探测器对不同入射角度的 X 射线的能谱响应差别进行鉴别和分析。位置分辨主要取决于像素电极的大小, 通过电极结构的设计和后续电子学的信号处理, 可以有效地减少各像素之间的信号串扰。但由于射线与 CZT 晶体发生作用是一个随机的核物理过程, 射线产生的电子—空穴对随机分布在一定空间位置内, 因此, CZT 探测器对射线探测的位置分辨受射线种类的本质限制。通过 GEANT4 软件的模拟计算可以发现, ^{241}Am @ 59.5 keV 的射线与 CZT 晶体作用后, 仅有 84% 的电子—空穴对分布在直径为 100 μm 的区域内。

时间分辨率是指探测器能够分辨的两个信号的最小时间间隔。探测器的时间分辨率在很多应

用场合也有较高的要求, 如最近发展的 X 射线时变观测天体 X 射线的研究, 通过对黑洞和中子星 X 射线双星、邻近的超大质量黑洞系统、 γ 射线暴等天体 X 射线流量快速变化的观测, 可以研究在黑洞强引力场、中子星强磁场等极端条件下物质的动力学和高能辐射过程等基本物理问题。此外在高能物理研究中, 对高能射线产生时间的精确判断也需要好的时间分辨率, 从而要求探测器具有较短的响应时间。探测器的响应时间主要取决于两个过程: 一是光与物质相互作用过程, 即入射光子与探测器相互作用产生可参与导电的光生载流子, 它由探测器的材料、结构等内部因素决定, 这个过程时间非常短, 通常小于 10^{-12}s ; 二是电信号输出过程, 即光生载流子在外电路作用下输出信号的过程, 其作用时间由外部电路的电学参数(如阻容元件)决定。

半导体探测器吸收高能射线后, 产生电子—空穴对。在射线消失后, 因射线产生的电子—空穴对并不能立即消失, 以致于在下一个射线照射时, 上一个射线产生的电子—空穴对依然存在, 二者信号发生重叠, 从而影响探测器对较高剂量 X 射线的能量分辨。探测器在接收 X 射线后再次回复基态的时间取决于非平衡载流子在探测器内的渡越时间。CZT 平面探测器的渡越时间可由下式^[3]给出:

$$t = \frac{d}{\mu E} = \frac{d^2}{\mu V} \quad (7)$$

其中 d 为探测器的厚度, μ 为载流子的迁移率, E 和 V 分别为电场强度和外加电压。

当光生载流子漂移至探测器两端电极后, 还存在一部分光生载流子被晶体内的缺陷俘获, 需要延迟一段时间, 才能从陷阱中逃离出来, 即发生载流子的去俘获。如果去俘获时间超过探测器的电荷收集时间, 就会导致在下一个脉冲收集过程中, 前一个射线产生的载流子从陷阱中逃出, 被再次收集, 这就引起了所谓的余辉效应。在扫

描式的成像探测器中，如医疗CT和工业CT尤其不希望出现余辉效应。

CZT探测器的性能稳定性是决定探测器应用的关键指标参数之一，稳定性大致可以概括为两个方面，即环境稳定性和时间稳定性。环境稳定性包括探测器的正常工作温度范围，探测器抗温度冲击和振动冲击以及潮湿气氛的能力等，机械稳定性主要取决于探测器的制备和封装工艺。CZT晶体作为一种半导体，其电学性能在不同温度下会有显著变化，因此需要对不同工作温度下的CZT探测器的能谱响应特性进行标定，以减少温度变化引起的测量误差。时间稳定性主要包括探测器的极化和辐照损伤，尽管CZT探测器的极化效应远远低于CdTe探测器，在一般剂量探测范围内，甚至观察不到极化效应，但在大剂量射线照射情况下，CZT探测器依然存在一定的极化效应。CZT探测器在工作的同时也会遭受X射线的辐照并产生一定的晶格损伤，长时间大剂量的辐照引起的辐照损失会导致器件性能的恶化。

4 CZT晶体物理性能与探测器性能的关系

CZT探测器的性能主要取决于CZT晶体的物理性能，通常要求CZT晶体具有高电阻率、高迁移率和寿命之积，同时要求晶体质量均匀。此外，晶体的表面特性以及与金属电极的接触特性也是影响器件性能的关键因素之一。

用于探测器的CZT晶体通常要求具有高电阻率，这是因为探测器是在一定偏压下工作的，在一定电压范围内，电压越大，载流子的漂移速度就越大，载流子被复合和俘获的概率就会减少。然而电压越大，漏电流就会越大，从而导致探测器的噪音增大。电阻率越高，探测器能承受的电压就越大，漏电流就越小。因此，电阻率是评价CZT晶体质量的重要参数之一。CZT晶体的理论电阻率可达 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ，通常探测器级的CZT晶体电阻率要求大于 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ^[14]。

载流子输运特性是决定探测器电荷收集效率

和影响探测器能量分辨率的关键因素。对能量分辨率有较高要求的CZT探测器，要求电荷收集效率大于90%，要求载流子的渡越时间远小于载流子的寿命^[3]。渡越时间取决于探测器的厚度、外加电压和载流子的迁移率，当器件厚度一定且外加电压受电阻和漏电流限制时，减少渡越时间的方法只能是提高载流子的迁移率。CZT晶体的载流子迁移率主要取决于晶体的结晶质量和杂质浓度，通常采用高纯度原料生长的位错密度较低的单晶，电子的迁移率约为 $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ，空穴的迁移率约为 $100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。因此，为了获得探测器级的CZT晶体，需要增大晶体内载流子的寿命。而CZT晶体内载流子的寿命对晶体内的深能级缺陷非常敏感，获得高载流子寿命的CZT晶体需要严格控制晶体内深能级缺陷。

晶体的表面特性也是影响CZT探测器的关键因素之一^[15]。表面成分偏析、表面漏电流和表面复合中心也会影响器件性能，因此CZT的表面加工处理技术是CZT探测器制备过程中的关键技术之一。在探测器制备过程中，除了控制好晶体的表面质量，还需要选择合适的电极制备工艺，以获得良好的界面接触特性。CZT晶体与金属的接触势垒以及界面缺陷对CZT探测器的漏电流、极化和电荷收集效率均有很大影响。对于高阻CZT晶体，希望在获得双欧姆接触的同时，避免载流子的双注入。对于低阻CZT晶体，可以通过制备肖特基接触以减少漏电流。

晶体的质量均匀性也是评价晶体性能的指标之一，尤其是在制备大面积像素探测器时，质量均匀性直接影响成像的均匀性。

5 CZT探测器的模拟与设计

不同应用背景对CZT探测器的能量分辨率、收集效率以及空间和时间分辨率有着不同的要求，而且在不同应用领域，不同能量的X射线与CZT半导体的作用机理也不一样。为了满足不同应用需求，需要对CZT探测器进行结构设计。

首先根据CZT探测器需要探测的不同对象，

采用蒙特卡罗方法模拟不同种类和能量的射线与CZT晶体的作用规律,得出射线在CZT晶体中产生的电子—空穴对的分布规律。常用的模拟软件有欧洲核子研究组织(CERN)开发的开源软件GEANT4。进一步根据CZT晶体内载流子输运规律和Shockley—Ramo定理,模拟所产生的电子—空穴对在输运过程中,在CZT探测器电极上产生的信号。进而结合读出电路电子学参数,模拟出不同电极结构CZT探测器的能谱响应特性。晶体内的载流子输运规律除了取决于载流子输运特性外,还取决于探测器内的电场分布,而探测器内电场分布主要取决于探测器的电极结构和探测器内部的空间电荷分布。

由于CZT晶体中空穴的迁移率与寿命之积比电子低1—2个数量级,空穴被俘获的概率要远大于电子。由于空穴的不完全收集引起的统计涨落极大,导致探测器的能量分辨率急剧恶化。根据Shockley—Ramo理论可知,电极上的感应电荷与探测器中的权重势场有关。为提高CdZnTe探测器对高能射线的能量分辨率,需要优化探测器内的权重场分布,让电子运动产生的感应电荷远大于空穴运动产生的感应电荷,以减少空穴收集不完全引入的噪声。比较典型的有电容弗利希结构探测器^[16]、Capture结构探测器^[17]和像素探测器^[18]。对于成像探测器,通过优化电极结构可以有效减少像素之间的信号串扰。

为了提高能量分辨率,除了通过优化探测器的权重势场来减少空穴漂移过程对总感应电荷的影响外,还可以通过电子学的修正和补偿来减少空穴被俘获的影响,从而提高能量分辨率,如采用共平面栅格CZT探测器^[19]。由于电子和空穴的迁移率相差很大,因此探测信号经过前置放大器会产生上升时间相差很大的电压信号。通过后续电路设计可剔除上升时间慢的空穴信号,以减少空穴的影响,从而提高能量分辨率,这种电子学技术被称为上升时间甄别技术(risetime discrimination, RTD)^[20]。此外,何中等^[21]提出的3D结构CdZnTe探测器的设计方案,根据能量沉积的位置来修正电子被俘获的影响,可进一步提高探测器的能量分辨率。

6 结论与展望

尽管CZT晶体与探测器已有较为成熟的发展与应用,在CZT晶体物理性能与器件开发应用领域中还存在一些亟待解决的科学和技术问题。相关问题可以概括为三个方面:(1)高质量、低成本的CZT晶体生长技术;(2)CZT探测器的设计与制备;(3)基于CZT半导体探测器的辐射探测系统的设计与开发。

CZT探测器要求高电阻、高载流子迁移率和寿命之积、高均匀性的大尺寸CZT单晶。发展高质量、低成本的CZT晶体生长技术是推动CZT探测器应用的关键技术之一。未来仍需进一步研究CZT晶体结构缺陷与晶体光电性能之间的内在关系,以及CZT晶体内各种结构缺陷的形成机理和调控技术,并发展大尺寸CZT晶体生长和改性技术,提高单晶利用率。此外对于低能X射线的能谱和成像探测以及脉冲射线的时间响应测试,大尺寸、高质量的CZT薄膜也是未来需要重点研究的方向之一。

针对不同的应用背景,进行CZT探测器结构的模拟和设计是不断提高CZT探测器性能的基础。首先需要详细模拟不同能量和剂量的射线与CZT相互作用的详细过程,以及产生电子—空穴对的分布规律。进一步需要针对不同应用背景进行CZT探测器尺寸和电极结构的模拟设计。在模拟过程中,需要重点考虑CZT晶体材料本身缺陷的分布特性以及载流子输运特性。在探测器制备过程中,需要进一步完善CZT晶体的精密无损加工和表面处理技术,控制好CZT晶体与金属电极的接触特性和界面缺陷。同时,做好探测器的钝化和封装,以提高探测器在使用过程中的环境稳定性。

CZT探测器的最终应用形式是辐射探测系统的关键器件。因此,基于CZT探测器的整机系统的设计与开发是推动CZT探测器实现最终应用的关键。整机系统的设计与开发需要根据CZT探测器产生的信号特点,设计与之相匹配的电子

学读出电路，将信号读取之后进行信号处理与数据分析。同时，针对不同的应用需求，探索

新的探测方法和数据处理方法，并开发出相应的应用软件。

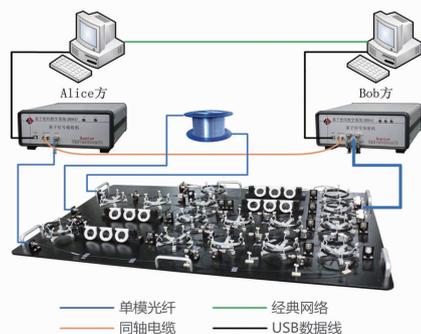
参考文献

- [1] Schlesinger T E, Toney J E, Yoonc H *et al.* Materials Science and Engineering R, 2001, 32: 103
- [2] Limousin O. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 504: 24
- [3] Szeles C. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51: 1242
- [4] Shockley W. Journal of Applied Physics, 1938, 9: 635
- [5] Ramo S. Proceedings of the IRE, 1939, 27: 584
- [6] Jen C K. Proceedings of the IRE, 1941, 29: 345
- [7] Cavalleri G, Fabri G, Gatti E *et al.* Nucl. Instr. Meth., 1963, 21: 177
- [8] Hecht K. Zeitschrift Fur Physik, 1932, 77: 235
- [9] He Z, Knoll G F, Wehe D K. J. Appl. Phys., 1998, 84: 5566
- [10] Knoll G F. Radiation Detection and Measurement. New York: John Wiley & Sons, 1989
- [11] Photcoeff by AIC Software Inc. <http://www.photcoef.com> provides tables/graphs/data on coefficients
- [12] 查钢强, 项行, 刘婷等. 中国科学: 技术科学, 2012, 42 (8): 874
- [13] Owens A, Peacock A. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 531(1-2): 18
- [14] 王涛, 徐亚东, 查钢强等. 机械科学与技术, 2010, 4: 546
- [15] Zha G Q, Jie W Q, Tan T T *et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2006, 566: 495
- [16] McNeil W J, McGregor D S, Bolotnikov A E. Applied Physics Letters, 2004, 84(11): 1968
- [17] Szeles C, Bale D, Grosholz J *et al.* Bellingham: Spic-int Soc Optical Engineering, 2006, 6319:191
- [18] Barrett H H, Eskin J D, Barber H B. Phys. Rev. Lett., 1995, 75(1): 156
- [19] Luke P N, Amman M, Lee J S *et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006, 439: 611
- [20] Niemela A, Sipila H, Ivanov V I. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1996, 377: 484
- [21] Zhang F, He Z, Xu D. IEEE Tran. Nucl. Sci., 2004, 51: 2427



QKEdu-S 量子密码教学科研系统

系统组成

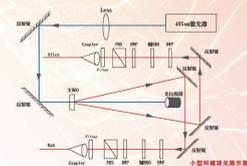


组件清单

名称	数量
QKEdu-T量子信号发射机	1
QKEdu-R量子信号接收机	1
QKEdu-P光学调试平台	1
光纤盘	1
同轴电缆	1
网线	1
可选配件	
PC (Windows XP以上操作系统)	2

QEPS小型纠缠源系统

系统组成



技术指标

泵浦光功率 (mW)	100
偶然符合计数率 (Hz)	< 10
单路光子亮度 (cps.)	> 100k
纠缠光子对亮度 (cps.)	> 10k
H, V偏振对比度	> 25:1
P, N偏振对比度	> 7:1
Bell不等式破坏程度	S > 2.3
可见度	92%

提供最专业的量子通信设备

物理专业: 探测器、小型纠缠源、高亮纠缠源、多光子纠缠等。

通信专业: BB84教学科研系统、B92教学科研系统、可商用的量子通信保密网络。

地址: 合肥市创新产业园D3楼
电话: 400-885-0929
0551-65333590

销售: 13395515356
13395515359
邮编: 230088

传真: 0551-65368589
邮箱: feng.liu@quantum-info.com
网址: <http://www.quantum-info.com>