

温度对碲锌镉光子计数探测器计数性能的影响及机理研究

李颖锐¹, 吴森², 郭玉¹, 席守智², 符旭¹, 查钢强¹, 介万奇¹

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室 辐射探测材料与器件工信部重点实验室, 陕西 西安 710071; 2. 陕西迪泰克新材料有限公司, 陕西 西安 710071)

摘要: 基于线阵光子计数探测器模块, 实现了碲锌镉探测器的光子计数应用。研究了大剂量 X 射线下碲锌镉探测器的计数性能, 发现碲锌镉光子计数探测器根据其典型计数性能可分为两类: C1, C2。分析了这两类典型的光子计数探测器的计数性能与 X 射线能谱响应特性、前放脉冲信号上升时间以及碲锌镉探测器缺陷水平的内在联系, 在此基础上研究了温度对 C2 类碲锌镉光子计数探测器计数性能的影响规律, 升高温度可以抑制探测器的极化失效, 提高计数率, 且当温度升高至 33℃ 时, 探测器计数性能可得到显著改善。最后利用线阵光子计数探测器模块, 获得了不同温度下 C2 类碲锌镉光子计数探测器的多能区成像结果, 升高温度可以显著增加其图像衬度, 提高成像质量。该研究为通过控制外部条件提高碲锌镉光子计数探测器性能提供了有效手段。

关键词: 碲锌镉; 光子计数; 极化效应; 温度; 多能区成像

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1016001

Effect and mechanism of temperature on photon counting performance of CdZnTe detectors

Li Yingrui¹, Wu Sen², Guo Yu¹, Xi Shouzhizhi², Fu Xu¹, Zha Gangqiang¹, Jie Wanqi¹

(1. MIIT Key Laboratory of Radiation Detection Materials and Devices, State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710071, China; 2. Imdetek Co., Ltd, Xi'an 710071, China)

Abstract: The application of CdZnTe photon counting detectors was achieved based on a linear array photon counting module. Two kinds of typical counting performance (C1, C2) have been observed when CdZnTe photon counting detectors were exposed to high flux X-ray beams. The X-ray pulse height spectrum characteristics, rise time of preamplifier pulse signal and defect level of the two typical CdZnTe detectors were studied and the intrinsic relationship between the above three results and the photon counting performance were demonstrated. Based on these results, the influence of temperature on the photon counting performance of the C2 detectors was studied. Increasing temperature can restrain the failure of detector induced by polarization effect and increase the counting rate, i.e. when the temperature rises to 33 °C, the counting performance of the detector was significantly improved. Finally, the multi-energy region imaging results of C2 detectors at different temperatures were obtained using the linear array photon counting module, which showed that raising temperature significantly increase the

收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-07-21

基金项目: 工业和信息化部项目(MJ-2017-F-05)

作者简介: 李颖锐(1991-), 男, 博士生, 主要从事碲锌镉光子计数探测器设计方面的研究。Email: 13409215437@163.com

导师简介: 查钢强(1980-), 男, 教授, 博士, 主要从事碲锌镉探测器设计方面的研究。Email: zha_gq@nwpu.edu.cn

image contrast and improve the imaging quality. The study provides an effective means to improve the performance of CdZnTe photon counting detectors by controlling external conditions.

Key words: CdZnTe; photon counting; polarization effect; temperature; multi-energy imaging

0 引言

X 射线探测技术已在安检、医疗成像等领域^[1-2]得到了广泛的应用,多能谱光子计数技术被认为具有重大的发展前景^[3]。与目前普遍使用的能量积分型 X 射线探测器相比,多能谱光子计数技术引入了能谱的信息,一次扫描可以得到不同能区的成像结果,将 X 射线成像由“黑白”引入了“彩色”,可以大幅降低扫描剂量,通过合理设置电子学阈值,滤除能量较低的脉冲,可以完全消除低能噪声对成像结果的影响,提高成像信噪比。

碲锌镉(CdZnTe)探测器的最佳工作射线能量范围几乎覆盖了所有的医疗影像设备和安检成像设备工作时的射线能量,被认为是实现 X 射线多能谱光子计数技术的最佳材料^[4],是未来高能射线探测技术发展的重点。CdZnTe 光子计数探测器在乳腺 X 摄影、骨密度仪、医疗 CT、安检 CT、工业无损检测极具应用前景^[5],不同应用场景对计数率提出了不同的要求^[6-7]。然而 CdZnTe 光子计数探测器在大剂量 X 射线入射下易发生极化失效^[5],极大限制了 CdZnTe 光子计数探测器的应用。已有很多研究者对 CdZnTe 极化特性进行了相关研究,具有代表性的是 2008 年 Derek S.Bale 模拟了 CdZnTe 在大剂量 X 射线下的极化过程,并阐述了探测器发生极化时载流子的输运特性^[8-9]。大部分研究者的研究工作集中在通过 Pockels 效应原理或模拟的方法来研究大剂量 X 射线下 CdZnTe 探测器的内电场分布^[10-11],推导出载流子输运特性。然而,对于大剂量 X 射线下 CdZnTe 光子计数探测器计数特性的直接研究较少,温度对 CdZnTe 探测器计数特性的影响规律也鲜有报道,其机理仍需进一步探讨。

文中采用陕西迪泰克新材料有限公司研制的像素线型阵列(线阵)光子计数探测器模块,研究了大剂量 X 射线入射下 CdZnTe 光子探测器的计数特性,测试了探测器的 X 射线能谱响应、前置放大器脉冲信号上升时间,分析得出其与碲锌镉材料缺陷

水平的内在联系,在此基础上研究了不同温度下 CdZnTe 光子计数探测器计数性能,分析得出温度对计数性能的影响规律,提出通过升高探测器温度优化光子计数性能。最后实现了线阵 CdZnTe 光子计数探测器的多能区扫描成像,结果表明升高探测器温度可以提高成像质量。

1 线阵 CdZnTe 光子计数探测器模块和测试系统

该实验采用改进的垂直布里奇曼法生长的高阻 Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:In 晶体,所采用的 CdZnTe 晶体的长宽高为 16.7 mm×4.4 mm×2.0 mm,所制备的 CdZnTe 光子计数探测器结构为线阵探测器,阳极结构如图 1 所示,16 个像素呈线型阵列排布,每个像素的尺寸为 1.8 mm×0.9 mm,像素间距为 0.1 mm,边缘像素与探测器边缘距离为 0.3 mm。

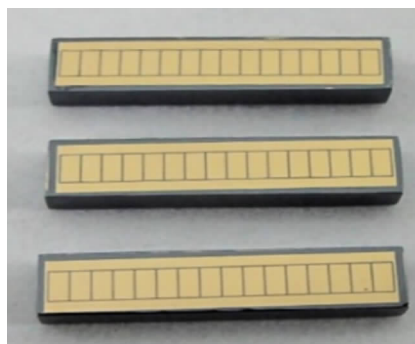


图 1 CdZnTe 光子计数探测器阳极结构

Fig.1 Anode structure of CdZnTe photon counting detectors

探测器的阴极为平面电极结构,阴极与阳极所用的电极材料均为 Au。探测器阳极通过点胶工艺与 PCB 线路基板相连,封装后 CdZnTe 线阵光子计数探测器如图 2 所示。

线阵 CdZnTe 光子计数探测器模块如图 3 所示,是由一块 FPGA 板及 32 路脉冲计数专用读出集成电路(ASIC)为核心组成的电路系统。探测器每个像素信号独立读出,信号经由 ASIC 进行滤波、成型、放大、幅值甄别、计数统计等处理最终输出计数

率。ASIC 内置 5 个比较器,可分别设定不同的阈值,实现对 X 射线 5 个能量区间的光子同时计数。

测试系统采用 XRB011 型 X 射线源,其最高工作电压为 80 kV,管电流可在 0.001~0.600 mA 范围调节,通过配套的 LabVIEW 程序控制。实验时线阵探测器模块位于 X 射线源正下方且与 X 射线源的距离为 45 cm。测试的环境温度采用 Hp-1320P 恒温台控制,并采用 TELESKY 贴片式电子温度计进行实时监控。



图 2 CdZnTe 光子计数探测器封装结构

Fig.2 Packaging structure of CdZnTe photon counting detectors

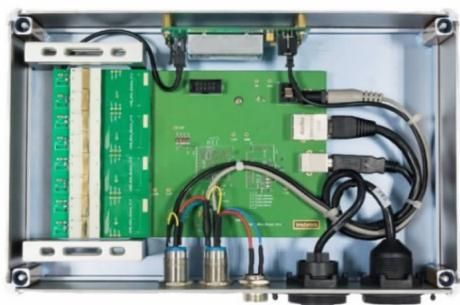


图 3 线阵 CdZnTe 光子计数探测器模块

Fig.3 Linear array CdZnTe photon counting detector module

2 结果与讨论

2.1 CdZnTe 光子计数探测器计数特性

该实验测试了超过 50 块 CdZnTe 光子计数探测器,探测器外加偏压 500 V,X 光机管电压设置为 80 kV,管电流测试范围为 0.020~0.600 mA,步进 0.02 mA,X 射线的剂量随着管电流的增加线性增加。图 4 所示为两类典型的 CdZnTe 光子计数探测器计数率测试结果。C1 代表计数性能优异的探测器,随着管电流增加,探测器的计数率先线性增加后

趋于饱和值,这是由于模块内 ASIC 芯片处理脉冲信号能力不足导致信号堆积所致。C2 代表计数性能差的探测器,X 射线管电流增加至 0.15 mA 时,计数率线性增加,随着管电流继续增加,计数率偏离线性并逐渐降低。

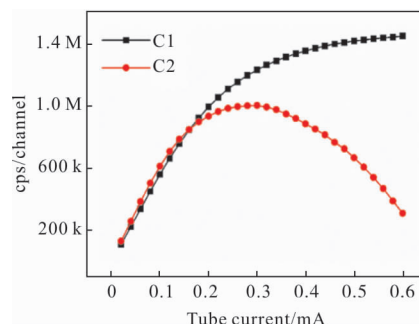
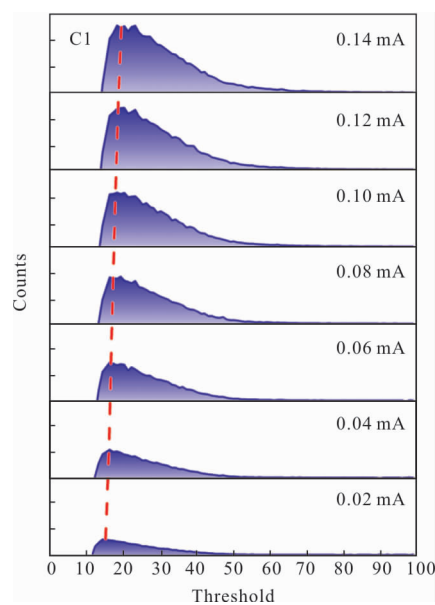


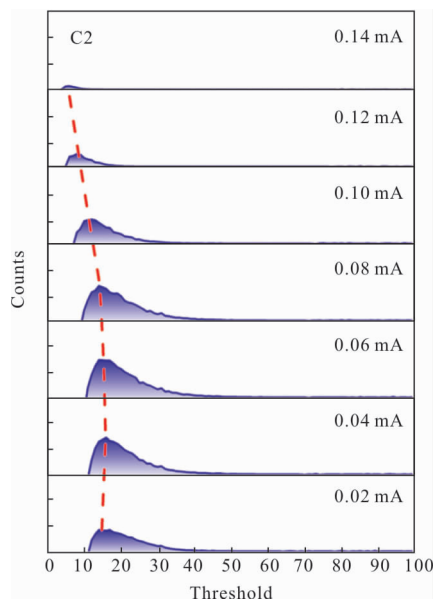
图 4 两种典型的 CdZnTe 光子计数探测器计数率
Fig.4 Counting rate of two typical CdZnTe photon counting detectors

为了分析 C1 与 C2 探测器计数性能差异的原因,测试了这两类探测器的 X 射线能谱响应,探测器偏压设置为 200 V,X 光机管电流设置范围为 0.02~0.14 mA,如图 5 所示,横坐标为阈值道址,纵坐标为计数值。对于 C1 探测器,X 光机管电流增加至 0.14 mA 过程中,X 射线能谱峰值道址未发生偏移。对于 C2 探测器,随着 X 光机管电流逐渐增大,X 射线能谱峰道址向低道址偏移,表明 C2 探测器收集



(a) C1 探测器 X 射线脉冲能谱响应

(a) X-ray pulse energy spectrum response of C1 detector



(b) C2 探测器 X 射线脉冲能谱响应

(b) X-ray pulse energy spectrum response of C2 detector

图 5 C1,C2 探测器 X 射线能谱响应

Fig.5 X-ray energy spectrum response of C1 and C2 detectors

到的脉冲信号幅值降低,载流子收集不完全,即探测器的收集效率降低。这可能是由于 C2 探测器缺陷水平较高,当大剂量 X 射线入射时,探测器内部产生了大量非平衡载流子,载流子被 CdZnTe 内陷阱能级俘获形成空间电荷,产生与外加电场相反的自建电场,削弱了探测器内部的净电场,探测器发生极化,从而造成探测器收集效率降低。当能谱向低能端偏移时,信号幅值低于系统能量阈值时,就会发生探测器的计数率下降。C1 和 C2 的计数性能差异的原因可能是探测器内缺陷浓度不同,C2 探测器具有较高的缺陷浓度,在大剂量 X 射线作用下更容易形成空间电荷,造成探测器计数性能恶化。

为了进一步验证大剂量 X 射线下,由于 C2 探测器净电场强度降低导致探测器收集效率降低,实验测试了前置放大器脉冲信号上升时间与 X 射线剂量的关系。探测器偏压固定为 200 V,上升时间取上升沿的 10%~90%,每个管电流下测试 50 组数据求平均以保证结果的可靠性。如图 6 所示,C1 探测器随着 X 射线剂量增加,上升时间保持稳定,表明探测器内电子的输运过程基本不受 X 射线剂量的影响。对于 C2 探测器,X 射线剂量增加时,上升时间逐渐

增大,即电子渡越时间不断增加,证明探测器净电场强度随 X 射线剂量增加不断降低,电子在漂移渡越过程中会发生更多的复合以及俘获效应,最终导致电子的收集效率降低。

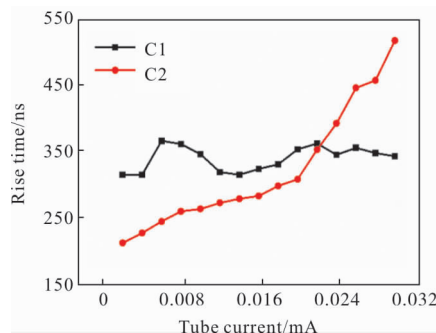


图 6 C1,C2 探测器脉冲信号上升时间

Fig.6 Rise time of pulse signal for C1 and C2 detectors

2.2 温度对计数特性的影响

根据上述分析,推测 C2 探测器计数性能差是大剂量 X 射线下空间电荷形成,探测器净电场强度降低,电子收集效率降低导致的。研究表明空间电荷的形成主要与空穴的俘获有关^[1,8],CdZnTe 晶体内被俘获的空穴去俘获概率^[12]如公式(1)所示:

$$e_p = N_v \sigma_p \nu \exp(-(E_T - E_V)/kT) \quad (1)$$

式中: N_v 为导带的有效态密度; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; σ_p 为空穴的俘获截面; ν 为空穴的平均热运动速率; $E_T - E_V$ 为陷阱能级与价带能量差。根据公式(1),温度升高,空穴去俘获概率增大,因此该实验拟通过调控探测器温度优化探测器计数性能。

图 7 为 C2 探测器不同温度下的计数率测试结果。在较低 X 射线剂量下(图中管电流 0.15 mA),计数率曲线不受温度的影响,而大剂量 X 射线剂量

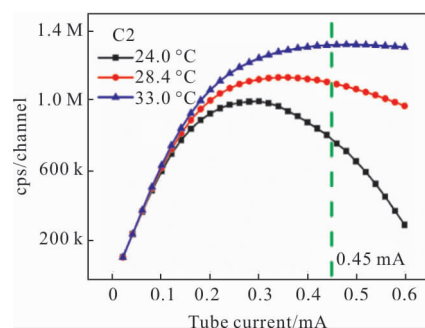


图 7 C2 探测器不同温度的计数率

Fig.7 Counting rate of C2 detector at different temperatures

下,升高温度,计数率曲线形状发生变化,由 C2 类探测器计数率曲线逐渐向 C1 类转变,当温度升高至 33 °C 时,探测器计数性能得到明显优化。

图 8 所示为 X 光机管电流为 0.45 mA 时,C2 探测器 X 射线能谱与探测器温度的关系,随着温度的升高,X 射线能谱向高能端偏移。根据公式(1),升高温度促进晶体内部被缺陷能级俘获的空穴的去俘获,从而减小空间电荷浓度,降低由空间电荷堆积而导致的自建电场的强度,增加探测器内部净电场强度,提高电子的收集效率,增大脉冲信号的幅值,因此 X 射线能谱向高能端偏移,当脉冲信号幅值高于系统能量阈值时,表现为探测器计数率的升高。实验结果证明了调控 CdZnTe 光子计数探测器的温度优化其光子计数性能的可行性。

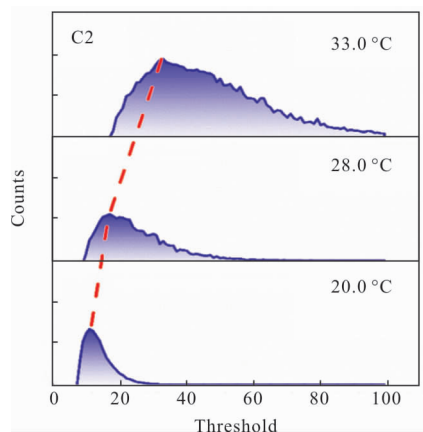


图 8 C2 探测器 X 射线能谱与温度的关系

Fig.8 Relationship between X-ray energy spectrum and temperature of C2 detector

2.3 温度对多能区成像的影响

利用线阵光子计数探测器模块,获得了圆珠笔的多能区成像图,能够清晰的看到圆珠笔的结构以及内部金属弹簧。实验时设置 X 光机管电压为 80 kV,管电流为 0.6 mA,扫描帧率为 20 Hz,成像物体移动速度为 2.5 mm/s。图像从左向右设置的阈值范围为 20-35;35-50;50-65;65-80;≥80;≥20。系统阈值和 X 射线能量对应关系如公式(2)所示:

$$y = -20.648 + 1.22x \quad (2)$$

式中:y 为系统阈值;x 为 X 射线能量(keV)。

图 9(b)、(c)分别为 C2 类探测器 20 °C 和 33 °C 时多能区成像结果,图(d)为 C1 类探测器 33 °C 时多能区成像结果。从图中可以看出,升高探测器温度,C2

类探测器图像衬度显著提升,像素均匀性得到优化,成像质量明显提高。这是因为升高温度抑制了 C2 类探测器的极化,提高了计数率,使图像更清晰,测试结果与理论结果一致。如图 9(d)所示,虽然升高温度使 C2 类探测器的成像质量得到优化,但仍与相同温度下 C1 类探测器成像质量有差距,这表明温度对探测器计数性能的优化作用是有限的。

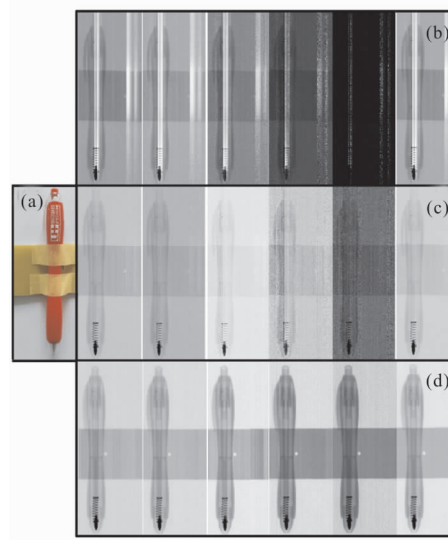


图 9 (a) 成像用圆珠笔实物图;(b) 20 °C 时 C2 类探测器多能区成像;(c) 33 °C 时 C2 类探测器多能区成像;(d) 33 °C 时 C1 类探测器多能区成像

Fig.9 (a) Ballpoint pen for imaging; (b) multi-energy imaging of C2 detectors at 20 °C; (c) multi-energy imaging of C2 detectors at 33 °C; (d) multi-energy imaging of C1 detectors at 33 °C

3 结论

利用线阵光子计数探测器模块研究了大剂量 X 射线下 CdZnTe 探测器的计数特性,并实现了 CdZnTe 光子计数探测器多能区扫描成像。分析得到了两类探测器(C1,C2)的 X 射线能谱响应、前置放大器上升时间与其缺陷水平的内在联系。并进一步研究了温度对 C2 类探测器计数特性和多能区成像的影响,升高探测器温度可以促进被缺陷能级俘获的空穴的去俘获过程,抑制探测器的极化失效。当温度升高至 33 °C 时,C2 类探测器的计数率曲线形状向 C1 类转变,计数性能得到显著改善,其成像质量也得到显著提高。

参考文献:

- [1] Soldner S A, Bale D S, Szeles C. Dynamic lateral polarization in CdZnTe under high flux X-ray irradiation [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, 54(5): 1723-1727.
- [2] James R, Brunett B, Heffelfinger J, et al. Material properties of large-volume cadmium zinc telluride crystals and their relationship to nuclear detector performance [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1998, 27(6): 788-799.
- [3] Hao Jia, Zhang Li, Chen Zhiqiang, et al. Multi-energy X-ray imaging technique and its application in computed tomography[J]. *CT Theory and Applications*, 2011, 20(1): 141-150.(in Chinese)
- [4] Martini M. Semiconductor radiation probes for nuclear medicine and radiobiology the state of the art [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, 20(1): 294-309.
- [5] Szeles C, Soldner S A, Vydrin S, et al. CdZnTe semiconductor detectors for spectroscopic X-ray imaging [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 55(1): 572-582.
- [6] Heismann B J, Henseler D, Niederloehner D, et al. Spectral and spatial resolution of semiconductor detectors in Medical X-and Gamma ray imaging; proceedings of the Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)[C]//2008 NSS' 08 IEEE, 2013.
- [7] Kappler S, Grasruck M, Niederlöhner D, et al. Dual-energy performance of dual kVp in comparison to dual-layer and quantum-counting CT system concepts [C]// Proceedings of SPIE , 2009, 19(8): 70.
- [8] Bale D S, Szeles C. Nature of polarization in wide-bandgap semiconductor detectors under high-flux irradiation: Application to semi-insulating Cd_{1-x}Zn_xTe [J]. *Physical Review B*, 2008, 77(3): 035205.
- [9] Bale D S, Soldner S A, Szeles C. A mechanism for dynamic lateral polarization in CdZnTe under high flux X-ray irradiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(8): 082101.
- [10] Wilson M D, Barnes P, Cernik R C, et al. Comparison of the X-ray performance of small pixel CdTe and CZT detectors; proceedings of the Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC) [C]//2010 IEEE, 2010.
- [11] Elhadidy H, Dedic V, Franc J, et al. Study of polarization phenomena in n-type CdZnTe [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 47(5): 055104.
- [12] Schlesinger T E, Toney J E, Yoon H, et al. Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material [J]. *Materials Science & Engineering R*, 2001, 32(4): 103-189.