

CdZnTe 像素探测器的电输运性能

南瑞华 王朋飞 坚增运 李晓娟

Investigation on electrical transport properties of CdZnTe pixel detector

Nan Rui-Hua Wang Peng-Fei Jian Zeng-Yun Li Xiao-Juan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 206101 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.206101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.206101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

欧空局监测器单粒子翻转能量和角度相关性

Energy and angular dependence of single event upsets in ESA SEU Monitor

物理学报.2016, 65(20): 206103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.206103>

金属有机化学气相沉积法生长条件对 AlN 薄膜面内晶粒尺寸的影响

Influence of growth conditions on the lateral grain size of AlN film grown by metal-organic chemical vapor deposition

物理学报.2013, 62(8): 086102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.086102>

纳米压印技术制备表面光子晶体 LED 的研究

A study of LED with surface photonic crystal structure fabricated by the nanoimprint lithography

物理学报.2013, 62(3): 036104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.036104>

CdS:Cu 一维纳米结构及其光子学特性研究

Synthesis and photonics characteristics research of CdS:Cu 1D nanostructures

物理学报.2012, 61(20): 206101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206101>

闪锌矿 GaN/AlGaIn 量子点中激子态及光学性质的研究

Exciton states and optical properties in zinc-blende GaN/AlGaIn quantum dot

物理学报.2012, 61(10): 106102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.106102>

CdZnTe像素探测器的电输运性能*

南瑞华¹⁾²⁾ 王鹏飞^{1)†} 坚增运¹⁾ 李晓娟¹⁾

1) (西安工业大学材料与化工学院, 陕西省光电功能材料与器件重点实验室, 西安 710021)

2) (西北工业大学材料学院, 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

(2017年4月4日收到; 2017年7月20日收到修改稿)

碲锌镉(CdZnTe)是一种性能优异的室温核辐射半导体探测器材料, 广泛应用于核安全、核医学以及空间科学等领域. 然而, 传统的CdZnTe平面探测器受制于“空穴拖尾”效应的影响, 探测性能有待改善. 采用改进的垂直布里奇曼法生长的In掺杂Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te单晶制备出单载流子收集的4×4像素阵列探测器, 通过电流-电压(*I-V*)测试和 γ 射线能谱响应测试, 研究了像素探测器的电学性能和载流子电输运性能, 随之与相应的CdZnTe平面探测器进行了性能对比. 结果表明, CdZnTe像素探测器的电阻率约为 $1.73 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$, 且施加100 V偏压后单像素点的最大漏电流小于2.2 nA; 当施加偏压升高至300 V时, 单像素点对²⁴¹Am@59.5 keV的 γ 射线的最佳能量分辨率可达5.78%, 探测性能优于相同条件下制备的CdZnTe平面探测器.

关键词: 碲锌镉, 像素探测器, γ 射线能谱响应

PACS: 61.72.uj, 61.82.Fk

DOI: 10.7498/aps.66.206101

1 引言

碲锌镉(CdZnTe)探测器因其在室温下对X/ γ 射线具有较高的空间和能量分辨率, 且响应速度快、灵敏度高, 被认为是一种性能优异的室温核辐射半导体探测器^[1-6]. 传统的CdZnTe平面探测器要得到较高的能量分辨率, 需要对空穴和电子都进行有效收集, 从而产生全幅度的输出信号. 然而CdZnTe晶体本身的空穴传输特性相对较差, 使得空穴俘获问题较严重, 因此会使能量分辨率降低和光电峰效率减小, 即“空穴拖尾”效应^[7-9]. 为了消除空穴俘获产生的影响, 科研人员们提出将电极结构设计为像素结构, 以此来实现只收集电子的单载流子读出技术^[10-13]. CdZnTe像素阵列探测器是通过在CdZnTe晶体表面光刻出多个小像素单元(如像素尺寸0.4 mm×0.4 mm), 这些像素单元通过倒装片技术与ASIC的多通道前置放大、成形电

路组元相连, 最后由集成的读出芯片对信号进行处理. 所需晶体体积和像素形状根据空间和能量分辨率以及要测量的能谱范围等探测要求而定^[14-19].

本文采用改进的垂直布里奇曼法(the modified vertical bridgman method, MVB)生长的CdZnTe晶体, 通过光刻等技术在晶片表面制备4×4像素结构电极, 对每个像素点的电流-电压(*I-V*)特性和 γ 射线能谱响应特性进行研究, 并将此结果与CdZnTe平面探测器的性能进行对比分析.

2 实验

将MVB法生长的In掺杂Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te晶体沿晶锭生长方向切割成10 mm×10 mm×2 mm的单晶片后, 进行机械抛光以去除晶片表面的机械划痕, 接着采用MgO粉末和去离子水配成的悬浊液进行粗抛, 采用Si溶胶和H₂O₂配成的溶液进行细抛, 直至在显微镜下观察不到明显的划痕为止. 然

* 国家自然科学基金项目(批准号: 51502234, 51602242)和凝固技术国家重点实验室(西北工业大学)开放课题(批准号: SKLSP201410)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 18710748870@163.com

后用去离子水反复清洗晶片后用氮气吹干,使晶片表面呈镜面状,确保晶片表面没有水痕.随之将晶片浸泡在丙酮溶液中1—2 h以确保清洗干净.然后采用溴甲醇溶液(体积分数为2%)进行化学腐蚀2 min以去除晶片表面的损伤层.最后采用光刻、剥离和真空蒸镀技术制备出如图1所示的CdZnTe像素探测器,阴极为平面电极(图1(a)),阳极为 4×4 像素结构电极(图1(b)),每个像素电极的尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,像素阵列按照从左向右、从上向下的顺序依次标记为1—4, 5—8, 9—12, 13—16.

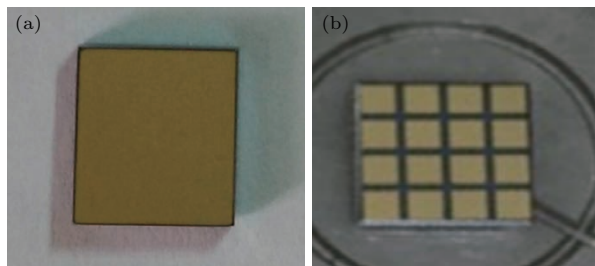


图1 (网刊彩色) 4×4 CdZnTe 像素探测器

Fig. 1. (color online) 4×4 CdZnTe pixel detector.

CdZnTe探测器需要在较高的偏压下工作,在一定的电压范围内,载流子的漂移速度随着外加偏压的增加而增大,进而减少了载流子被俘获和复合

的概率;而漏电流随着外加偏压的增加而增大,导致噪声随之增加.电阻率越高,探测器所能承受的外加偏压就越大,漏电流也就越小.因此,对于探测器级别的CdZnTe晶体,要求具有较高的电阻率.此外,载流子的迁移率寿命乘积是衡量载流子电输运特性的最重要参数之一,为使探测器具有良好的电输运特性,要求CdZnTe晶体具有较高的载流子迁移率寿命乘积.

采用Agilent 4155 C半导体参数分析仪测试室温下CdZnTe像素探测器中每个像素点的 I - V 特性.测试电压范围 -100 — 100 V .随之,采用Multi Channel Analyzer 6560能谱测试系统进行探测器的 γ 射线能谱响应测试,选用 ^{241}Am @ 59.5 keV 的 γ 射线作为辐射源,测试不同电压下探测器的能谱响应曲线.

3 结果与分析

3.1 I - V 测试

16个像素点的 I - V 测试结果如图2所示.Bolotnikov等^[20]指出,低偏压下的漏电流测试可以

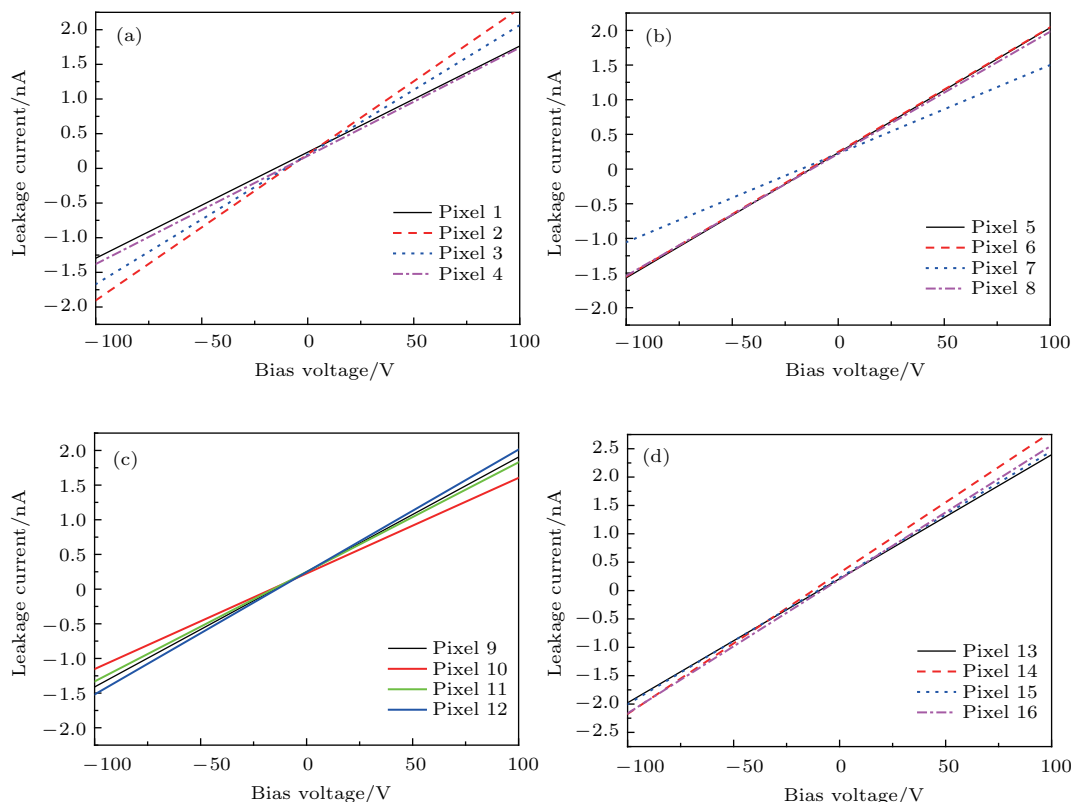


图2 (网刊彩色) 不同像素点的 I - V 曲线图

Fig. 2. (color online) I - V curves of different pixels.

反映材料的体电阻率, CdZnTe 的体电阻率结果为

$$\rho = \frac{RS}{D} = \frac{VS}{ID}, \quad (1)$$

式中, ρ 是体电阻率, R 是体电阻, V 是测试所加电压, I 是测试电流, S 是电极接触面积, D 是晶片厚度.

经估算, CdZnTe 像素探测器在室温下的体电阻率约为 $1.73 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$, 能够满足制备室温核辐射探测器的电阻率性能要求. 通常认为, CdZnTe 高阻特性的获得是由深能级缺陷或复合体将费米能级钉扎在禁带中央附近所引起. 其次, 高偏压下的 I - V 曲线可以反映漏电流所产生的噪声, 漏电流越小, 产生的噪声越小, 对探测器的能量分辨率产生的影响也就越小. 表 1 列出了在外加偏压为 100 V 时 16 个像素点的漏电流值. 结果表明, 不同像素点的漏电流值有所不同, 这可能与晶片内部的缺陷分布不均匀等因素有关. 例如 Te 夹杂相的富集会使得漏电流值增大, 因为 Te 的禁带宽度 (约为 0.33 eV) 远小于 CdZnTe 的禁带宽度 (约为 1.57 eV), 从而具有较大的漏电流.

表 1 16 个像素点在 -100—100 V 下的漏电流
Table 1. Leakage currents of 16 pixels between -100—100 V.

Pixel	Current/nA			
1—4	1.29	1.90	1.67	1.38
5—8	1.57	1.55	1.05	1.54
9—12	1.41	1.15	1.33	1.52
13—16	1.98	2.18	2.00	2.16

3.2 能谱响应测试

3.2.1 载流子迁移率寿命乘积的计算

探测器的收集效率通过实验方法难以直接测定, 通常是测试 CdZnTe 平面探测器在不同电压下的能谱响应结果后进而采用间接拟合的方法获得. 其测试原理是: 随着施加电压的增大, 能谱中全能峰的位置对应的道数增大, 即能够收集到的载流子数目增加. 如果电压增大到一定值后能谱中全能峰位置对应的道数变化趋于稳定, 即收集到的载流子数趋于饱和, 可以近似认为此时探测器的收集效率为 1. 对不同偏压下的道数进行归一化处理, 利用单载流子 Hecht 方程对实验数据进行拟合, 进而即

可估算出 CZT 晶体的迁移率寿命乘积 $\mu\tau$:

$$C_{\text{CCE}} \approx \frac{\mu\tau V}{d^2} \left[1 - \exp\left(\frac{-d^2}{\mu\tau V}\right) \right], \quad (2)$$

式中, C_{CCE} 是电荷收集效率, V 是外加偏压, d 是晶片厚度, $\mu\tau$ 是载流子的迁移率寿命乘积.

本实验采用未经准直的 ^{241}Am @59.5 keV 的 γ 射线放射源作为激发源, 测试了室温下不同偏压下的 γ 射线能谱响应, 测试结果如图 3(a) 所示. 根据上述测试原理, 采用 (2) 式, 拟合出电子的迁移率寿命乘积约为 $5.41 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1}$ (图 3(b)).

影响载流子迁移率寿命乘积的主要因素是晶体中载流子的散射及俘获中心, 晶体中电离杂质的散射会降低电子和空穴的迁移率, 而晶体中主要的载流子俘获中心为深能级缺陷, 它对载流子寿命有着重要的影响.

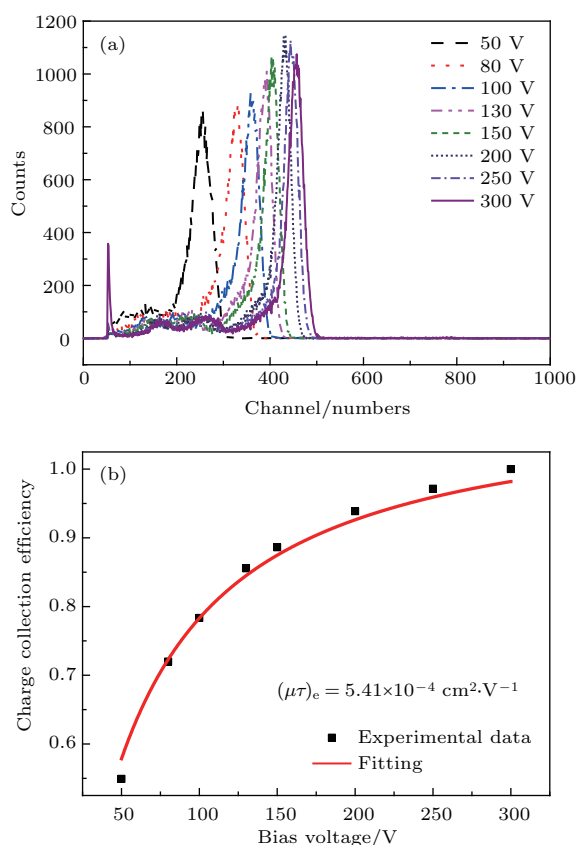


图 3 (网刊彩色) 不同电压下 CdZnTe 探测器的 γ 射线能谱响应曲线 (a) 及载流子 $\mu\tau$ 值拟合结果 (b)

Fig. 3. (color online) γ ray spectroscopy response curves of CdZnTe detector under different voltages (a) and the fitting result of mobility-lifetime product for electron (b).

3.2.2 300 V 电压下的 γ 射线能谱响应测试

300 V 下, CdZnTe 平面探测器的 γ 射线能谱响应曲线如图 4 所示, CdZnTe 像素探测器的 γ 射

线能谱响应曲线如图5所示, 每个像素点下的全能峰均较清晰. 表2分别给出了300 V下CdZnTe平面探测器和CdZnTe像素探测器中每个像素点的半峰宽和能量分辨率的具体测定值. 能量分辨率反映的是探测器对不同能量射线的分辨能力, 是探测器最重要的性能指标之一. 通常将能谱响应曲线中全能峰的半峰宽与全能峰位置的比值称为能量分辨率. 能量分辨率值越小, 分辨能力越强. 影响能量分辨率的主要因素是载流子的输运特性. 当电子-空穴对在晶体内漂移时, 会被缺陷俘获或通过缺陷复合, 从而降低电荷收集效率, 影响探测器的能量分辨率.

理论上, CdZnTe像素探测器的分辨能力应强于CdZnTe平面探测器, 因为当电极结构设计为像素结构时可以有效避免空穴俘获的影响, 进而提高能量分辨能力. 然而, 通过实测值发现不同像素点的能量分辨率略有差异, 这主要是由于晶片内部各类缺陷分布不均匀而造成. 其次, 位于晶片边缘部位的像素点1和4的能量分辨率值低于平面探测器的, 即这2个像素点的分辨能力要弱于平面探测器, 这一现象的发生与边缘效应的影响有关, 即位于

CdZnTe像素探测器角落和边缘处的像素往往会表现出严重的低能拖尾和光电峰计数的减少^[21], 从而可能出现CdZnTe像素探测器边缘像素点的分辨能力弱于平面探测器的现象. 除此之外, 其他像素点的能量分辨率值均优于平面探测器. 总体来看, 像素探测器的分辨能力强于平面探测器, 这与理论分析结果相一致.

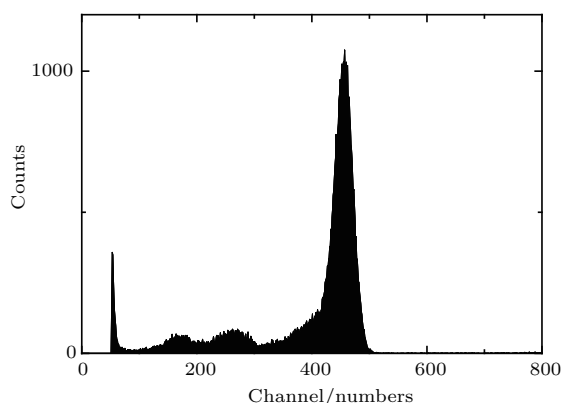


图4 CdZnTe平面探测器的 γ 射线能谱响应曲线
Fig. 4. γ ray spectroscopy response curve for CdZnTe planar detector.

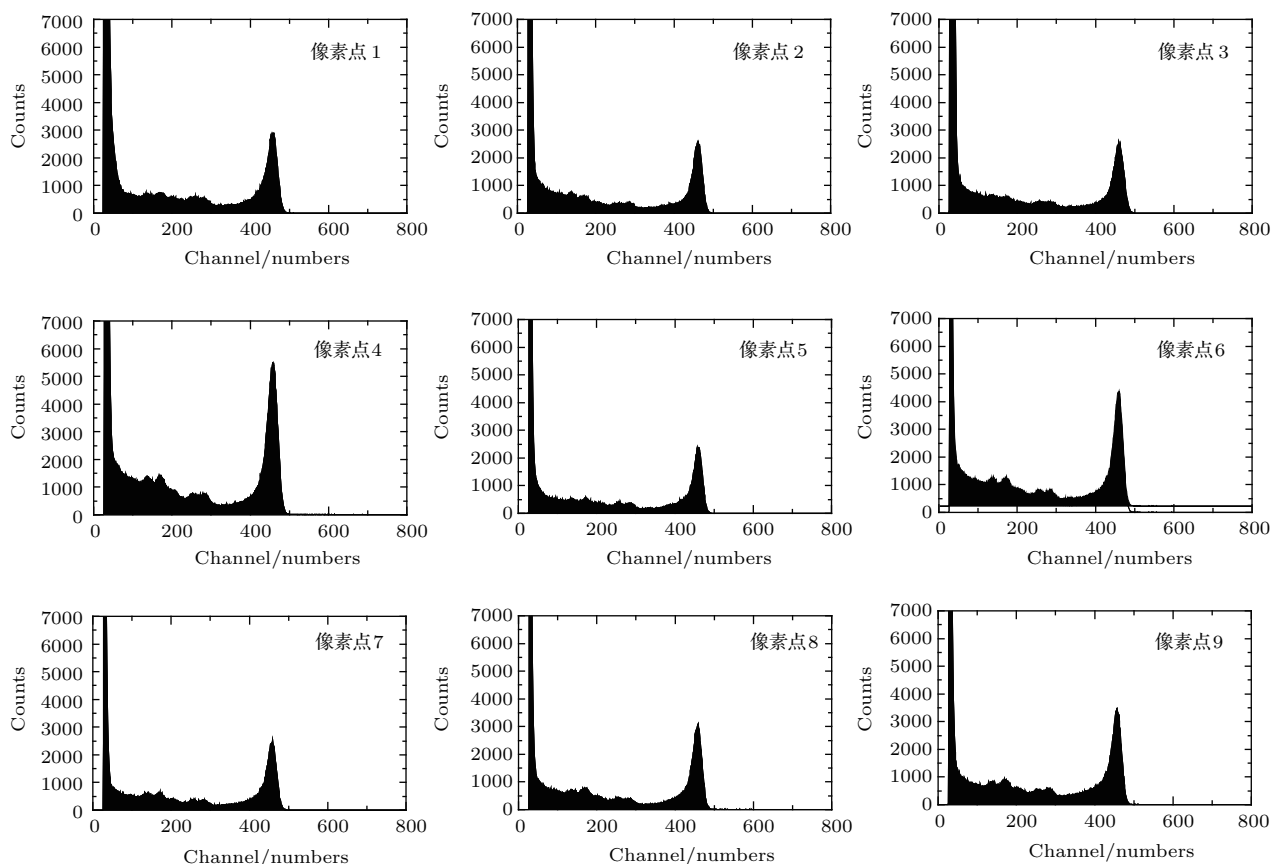


图5 CdZnTe像素探测器16个像素点的 γ 射线能谱响应曲线

Fig. 5. γ ray spectroscopy response of 16 pixels for CdZnTe pixel detector.

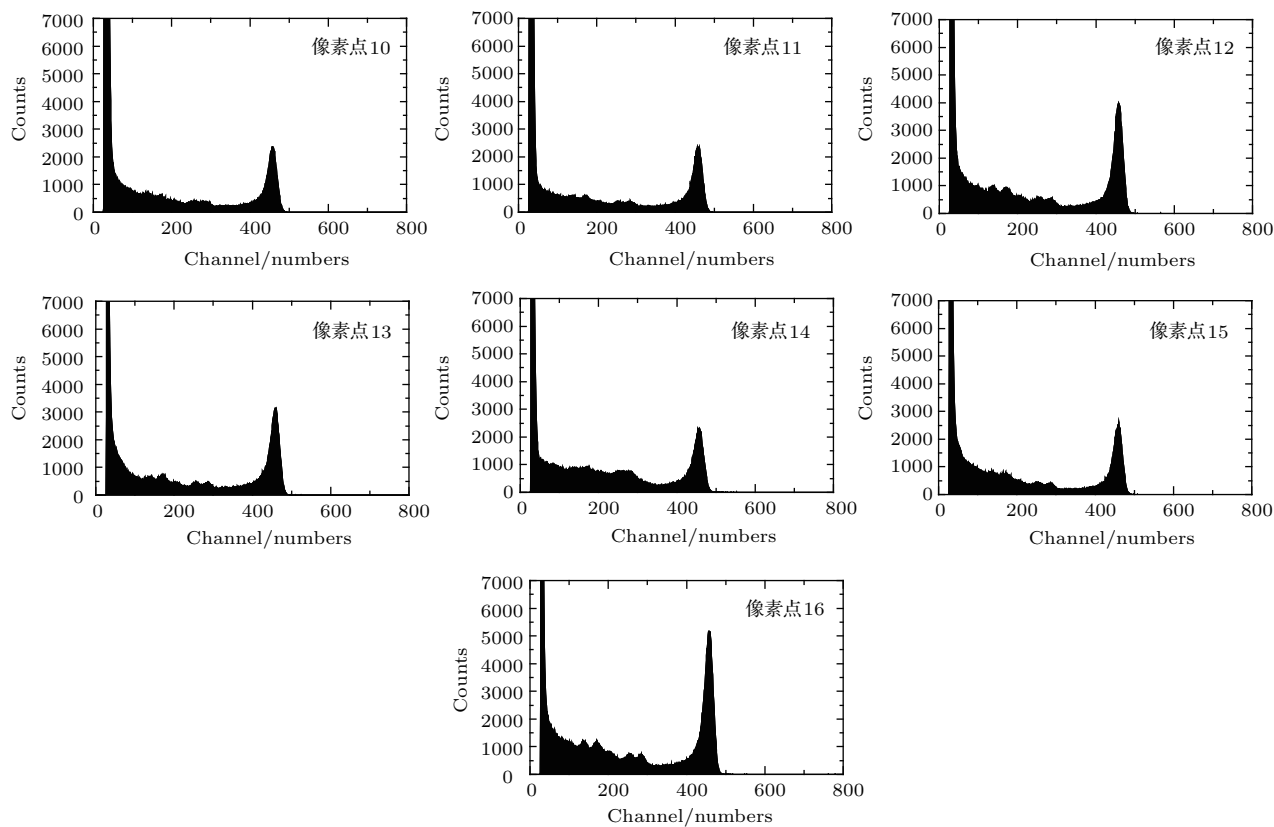


图5 CdZnTe 像素探测器 16 个像素点的 γ 射线能谱响应曲线 (续)

Fig. 5. γ ray spectroscopy response of 16 pixels for CdZnTe pixel detector (continued).

表2 CdZnTe 平面探测器和像素探测器的能谱特征值
Table 2. Energy spectroscopic characteristics of CdZnTe planar detector and pixel detector.

Detector	Pixel	FWHM	Resolution/%
Pixel detector	1	31.34	6.89
	2	27.76	6.07
	3	30.15	6.61
	4	31.35	6.92
	5	26.66	5.86
	6	27.53	6.05
	7	28.79	6.36
	8	27.62	6.10
	9	28.13	6.21
	10	27.97	6.16
	11	27.82	6.13
	12	26.77	5.90
	13	27.52	6.06
	14	30.22	6.69
	15	26.31	5.78
	16	26.43	5.82
Planar detector	—	31.30	6.85

注: FWHM 为谱线的半峰宽.

4 结 论

采用改进的垂直布里奇曼法生长的In掺杂Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te单晶制备出4×4像素探测器,对其电学性能和载流子电输运性能进行了研究,并对比分析了CdZnTe平面探测器和像素探测器对²⁴¹Am@59.5 keV的 γ 射线的探测性能.结果表明,CdZnTe材料的体电阻率约为 $1.73 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$,满足室温核辐射探测器的电阻率性能要求;当施加偏压100 V时,4×4 CdZnTe像素探测器的漏电流在1.05—2.18 nA之间.通过不同电压下的 γ 射线能谱响应测试,估算出CdZnTe探测器的电子迁移率寿命积约为 $5.41 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1}$;对比分析发现,施加偏压为300 V时,平面探测器对 γ 射线的能量分辨率为6.85%,4×4像素探测器的能量分辨率在5.78%—6.92%之间,因此像素探测器的分辨能力优于相同条件下的平面探测器.

参考文献

[1] Lisiansky M, Berner A, Korchnoy V 2017 *J. Cryst. Growth* **467** 54

- [2] Bolotnikov A E, Camarda G S, Cui Y 2013 *J. Cryst. Growth* **379** 46
- [3] Liu Z L, Mao Y Z, Zou S Y 2009 *Nucl. Electron. Detec. Tech.* **29** 1 (in Chinese) [刘志亮, 毛用泽, 邹士亚 2009 核电子学与探测技术 **29** 1]
- [4] Zha G Q, Wang T, Xu Y D 2013 *Physics* **42** 862 (in Chinese) [查钢强, 王涛, 徐亚东 2013 物理 **42** 862]
- [5] Nan R H, Jie W Q, Zha G Q, Wang B, Yu H 2012 *J. Cryst. Growth* **361** 25
- [6] Cavallini A, Tagantsev A K, Oberg S, Briddon P R, Setter N 2010 *Phys. Rev. B* **81** 075215
- [7] Zeng H M, Wei T C, Wang J 2017 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **847** 93
- [8] Emanuelsson P, Omling P, Meyer B, Wienecke M, Schenk M 1993 *Phys. Rev. B* **47** 15578
- [9] Du M, Takenaka H, Singh D J 2008 *Phys. Rev. B* **77** 094122
- [10] Kabiraj D, Ghosh S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1713
- [11] Li Z, Gu G, James R B 2011 *J. Electron. Mater.* **40** 274
- [12] Zhang Q S, Zhang C Z, Lu Y Y 2013 *Sensors* **13** 2447
- [13] Theinert R 2017 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **845** 181
- [14] Kim H, Cirignano L, Shah K 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 1229
- [15] Wang T, Jie W Q, Zhang J J 2007 *J. Cryst. Growth* **304** 313
- [16] Li X, Chu J H, Li L X 2008 *J. Optoelectron. Laser* **19** 751 (in Chinese) [李霞, 褚君浩, 李隼遐 2008 光电子 **19** 751]
- [17] Gul R, Bolotnikov A, Kim H K, Rodriguez R, Keeter K, Li Z, Gu G, James R B 2011 *J. Electron. Mater.* **40** 274
- [18] Wilson M D, Cernik R, Chen H 2011 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **652** 158
- [19] Wang C, Zha G Q, Qi Y, Guo R R, Wang G Q, Jie W Q 2015 *Atomic Energy Sci. Tech.* **49** 1321 (in Chinese) [王闯, 查钢强, 齐阳, 郭榕榕, 王光祺, 介万奇 2015 原子能科学技术 **49** 1321]
- [20] Bolotnikov A E, Boggs S E, Hubertchen C M 2002 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **482** 395
- [21] Mardor I, Shor A, Eisen Y 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 1033

Investigation on electrical transport properties of CdZnTe pixel detector*

Nan Rui-Hua¹⁾²⁾ Wang Peng-Fei¹⁾ Jian Zeng-Yun¹⁾ Li Xiao-Juan¹⁾

1) (Shaanxi Key Laboratory of Photoelectric Functional Materials and Devices, School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

2) (State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 4 April 2017; revised manuscript received 20 July 2017)

Abstract

Semi-insulating cadmium zinc telluride (CdZnTe or CZT) is an excellent material candidate for fabricating room-temperature nuclear radiation semiconductor detectors due to its high resistivity and good carrier transport behaviors. It is widely used in nuclear security, nuclear medicine, space science, etc. Nevertheless, the traditional CdZnTe planar detector is subjected to the effect of “hole trailing” on its hole transport characteristic, where its energy resolution and the photoelectric peak efficiency both decrease, and thus deteriorating the detection performance. In order to eliminate the effect of hole capture, the electrode with pixel structure for CdZnTe detector is designed for detecting single carriers that are only electrons.

In this paper, a $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ wafer cut from an In doped $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ single crystal, grown by the modified vertical Bridgman method, is employed to fabricate a 4×4 CdZnTe pixel detector, which is composed of 16 small pixel units with an area of $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$. Each of the pixel units is linked up with ASIC multichannel preamplifier and shaping amplifier by flip chip technology. Finally, the signal is treated by an integrated sensing chip. In the first case, the electrical properties and carrier transport properties of CdZnTe pixel detector are characterized by current-voltage (I - V) measurement via an Agilent 4155C semiconductor parameter analyzer and γ ray energy spectrum response via a standard Multi Channel Analyzer 6560 spectra measurement system, respectively. In the second case, the differences between CdZnTe planar detector and 4×4 pixel detector in the detection performance are discussed in detail. The results indicate that the bulk resistivity of CdZnTe pixel detector is determined to be about $1.73 \times 10^{10}\ \Omega\cdot\text{cm}$ by a linear fit of I - V curve. The maximum leakage current of a single pixel is less than 2.2 nA for a bias voltage of 100 V. Furthermore, the carrier transport behaviors are evaluated with the mobility-lifetime product for electron in CdZnTe detector, which is $5.41 \times 10^{-4}\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}$ estimated by γ ray energy spectroscopy response under various bias voltages from 50 to 300 V at room temperature. The energy resolutions of the two CdZnTe detectors can reflect the ability of them to distinguish different energy rays during operation. The best energy resolution of a single pixel in CdZnTe pixel detector for $^{241}\text{Am}@59.5\text{ keV}$ γ ray increases up to 5.78% under a 300 V bias voltage, whereas that of CdZnTe planar detector is only 6.85% in the same conditions. As a consequence, the detection performance of 4×4 CdZnTe pixel detector is better than that of the planar detector.

Keywords: cadmium zinc telluride, pixel detector, gamma-ray energy spectroscopy response

PACS: 61.72.uj, 61.82.Fk

DOI: 10.7498/aps.66.206101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51502234, 51602242) and the Fund of the State Key Laboratory of Solidification Processing in Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. SKLSP201410).

† Corresponding author. E-mail: 18710748870@163.com