

文章编号:1001-9014(2011)06-0514-04

# 四元并行电容性 Frisch 栅肖特基 CdZnTe 探测器

施朱斌, 王林军, 闵嘉华, 秦凯丰, 梁小燕, 张继军, 黄健, 唐可, 夏义本  
(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

**摘要:** 由于 CdZnTe (CZT) 探测器尺寸和能量分辨率受到工艺限制, 采用电容性 Frisch 栅探测器结构, 将多个薄的单元探测器并行叠加使其等效为大体积的探测器, 用于克服单元小探测器探测效率低的缺点, 同时单极电荷的几何结果有效克服了载流子的复合. 探测器的电极接触为肖特基接触 (In-p/CZT-AuCl<sub>3</sub>), 进一步压缩了权重势, 降低了噪声, 降低了漏电流, 从而得到大体积多元并行探测器的能量分辨率不受单元能量分辨率最差探测器的限制, 并且探测效率为单元探测器的 2.45 ~ 7.31 倍.

**关键词:** 电容性 Frisch 栅; 肖特基; 并行探测器; 碲锌镉探测器  
**中图分类号:** TN304; TN303 **文献标识码:** A

## CdZnTe detectors with parallel capacitive Frisch grid

SHI Zhu-Bin, WANG Lin-Jun, MIN Jia-Hua, QIN Kai-Feng, LIANG Xiao-Yan,  
ZHANG Ji-Jun, HUANG Jian, TANG Ke, XIA Yi-Ben  
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The crystal size and energy resolution of CdZnTe (CZT) detectors are limited by crystal growth technology. In this paper, capacitive Frisch grid detector structure was used to reduce the leakage current and overcome the charge carriers' recombination by the geometric of unipolar charge. The electrode contact of the detector was made of Schottky contact which can further compress the weight of potential and reduce the leakage current noise. A large volume multi-element parallel detector was made by capacitive Frisch grid structure and Schottky contact electrode (In-p/CZT-AuCl<sub>3</sub>). The energy resolution of multi-element detectors is not limited to the worst energy resolution unit and the detection efficiency is 2.45 ~ 7.31 times more than that of the single unit.

**Key words:** capacitive Frisch; Schottky contact; parallel detector; CdZnTe detector  
**PACS:** 81.05. Dz

## 引言

CZT 具有较大的禁带宽度和较高的平均原子序数, 因而可在常温下工作, 并具有较强的阻止本领和抗辐射能<sup>[1]</sup>. 与传统的 NaI 闪烁体探测器相比, CZT 探测器具有更高的能量分辨率<sup>[2]</sup>. Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te 晶体生长仍处于研究阶段, 得到单晶颗粒大、组分和结构均匀性好且电阻率高的材料还比较困难<sup>[3-7]</sup>. 制备高质量大体积探测器的成本相对较高, 且单个探测器体积小、总探测效率低以及测量时间长, 限制了其在实际中的应用.

最新研究表明, 采用 Frisch 栅结构可获得优良性能, 特别是能有效解决空穴俘获问题. 但一些不利因

素仍然存在, 如栅极接近阳极时引入的电子噪声及响应的不均匀性等. Guillaume Montémont 等人提出了电容性 Frisch 栅探测器结构<sup>[8]</sup>, 在最大程度压缩权重势的同时, 不引入栅极与阳极之间的漏电流. 采用这种电极的探测器空穴尾迹与电子噪声问题都可以得到较好地改善, 为研究厚度较大的探测器指明了方向. In/p-CZT/AuCl<sub>3</sub> 肖特基器件<sup>[9-10]</sup>起到了有效降低噪声且不降低多元探测器的能量分辨率的作用<sup>[11-13]</sup>.

研究将多个单元电容栅肖特基器件组合成并行探测器, 最终实现四元并行 CZT 电容性 Frisch 栅肖特基型探测器. 这类探测器解决了单个探测器体积小, 总探测效率低的缺点, 大大缩短了测量时间, 尤其适于便携式谱仪系统.

收稿日期: 2010-08-10, 修回日期: 2011-04-07

Received date: 2010-08-10, revised date: 2011-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(50902091); 上海市重点学科建设项目(S30107)

作者简介: 施朱斌(1983-), 男, 上海人, 博士研究生, 主要研究方向为 II-VI 族半导体材料在核辐射探测中的应用和核辐射探测系统, E-mail: scott5253@hotmail.com.

## 1 实验

CdZnTe 晶体所用高纯原料 Cd(7N), Zn(7N), Te(7N) 和 In(7N), 是在富 Te 条件下由改进低压垂直布里奇曼法通过四次制备获得<sup>[14-15]</sup>. 其中掺 In 量分别为  $8 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ , 富 Te 量为 86 ppma.

四次晶体的电学性能通过 HL500PC 型高阻霍尔效应测试系统获得, 如表 1 所示. 测试样品为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ , 表面有四个金电极.

表 1 四次晶体生长的电学性能

Table 1 Electrical properties of CdZnTe crystal in four different growth cycle

No	Carrier den-sity $/\text{cm}^{-3}$	Mobility $/(\text{cm}^2/\text{Vs})$	Hall resistivity $/\Omega\text{cm}^2$	Conduction type
1	5.66E09	65.2	1.68E7	p
2	1.91E8	50.5	6.48E8	p
3	1.17E9	59.6	8.96E7	p
4	3.19E9	62.1	6.89E7	p

由金半接触原理所知, p 型半导体要得到肖特基接触, 应该选择功函数比半导体小的金属与半导体形成接触. 由于 CdZnTe 的导电类型为 P 型, 所以实验分别采用物理气相沉积 In 做 CZT 阳极, 用化学气相沉积 Au 做阴极, In/p-CZT/AuCl<sub>3</sub> 肖特基器件起到了有效降低噪音作用<sup>[9-10]</sup>.

Firsch 电容栅探测器的制备首先采用金刚砂粉以及颗粒直径为  $0.5 \mu\text{m}$  的刚玉微粉悬浊液对 CZT 晶体进行机械抛光, 后经去离子水冲洗后在 N<sub>2</sub> 气氛下吹干, 采用 BM 腐蚀液 (5 vol% Br + 甲醇) 和 LB 腐蚀液 (2 vol% Br + 20 vol% 乳酸 + 乙二醇) 分别对抛光后的 CZT 晶片进行表面化学腐蚀, 采用 KOH-KCl + NH<sub>4</sub>F/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液对 CZT 表面进行二步法钝化<sup>[16]</sup>, 采用聚四氟乙烯作为绝缘层包裹在 CZT 周围并用铜箔作为电极延伸, 覆盖于晶体四个侧面 (测试时与阴极并联接地), 其中 CZT 晶体大小为  $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ , 绝缘层长度为  $7.4 \text{ mm}$ , 铜箔覆盖侧面的长度为  $7 \text{ mm}$ , 其中绝缘层与铜箔的厚度共为  $0.2 \text{ mm}$ , 如图 1 所示.

四元并行探测器为四个电容性 Frisch 栅肖特基探测器单元的合并, 四个电容性 Frisch 栅肖特基探测器分别通过各自独立的前置放大器与成型滤波放大器后通过叠加电路把各自的信号合并, 从而实现等同单个大体积探测器的效果, 电子学部分请参阅文献[17]. 单元探测器并行排列, 左右相距  $2 \text{ mm}$ , 上下相隔  $1 \text{ mm}$ , 与放射源的距离为  $60 \text{ cm}$ , 四元并

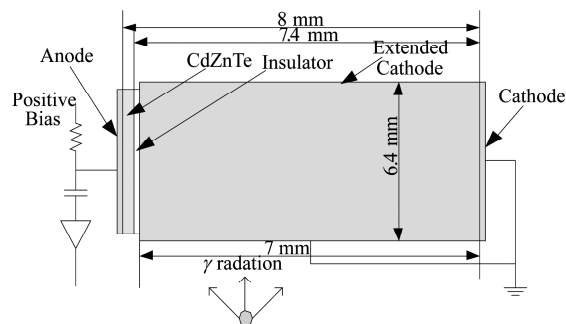


图 1 电容性 Frisch 栅 CdZnTe 探测器示意图

Fig. 1 The schematic structure of capacitive Frisch CdZnTe detector

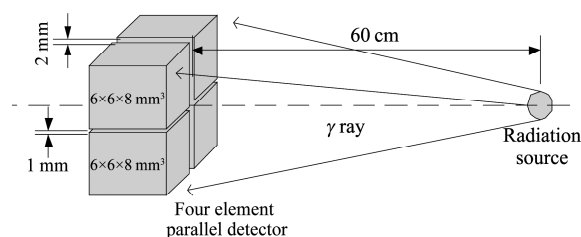


图 2 四元并行探测器测试几何图

Fig. 2 Geometry of four element parallel detectors measurement

行探测器测试的几何示意图如图 2 所示.

## 2 结果与讨论

In/p-CZT/AuCl<sub>3</sub> 结构的四个单元探测器分别命名为 A, B, C, D, 其  $I-U$  特性如图 3 所示. 四个探测器分别由四次晶体生长材料获得, 材料性能差别及探测器制作过程中的工艺控制差异造成四个单元探测器的  $I-U$  曲线差别, 但都保持了良好的肖特基特性. 探测器 ABCD 的电阻分别为 (忽略肖特基空间电荷区的影响) A:  $3.37 \times 10^9 \Omega$ , B:  $1.09 \times 10^{10} \Omega$ , C:  $6.69 \times 10^9 \Omega$ , D:  $5.14 \times 10^9 \Omega$ ; 电阻率分别为 A:  $2.7 \times 10^9 \Omega\text{cm}$ , B:  $8.72 \times 10^9 \Omega\text{cm}$ , C:  $5.35 \times 10^9 \Omega\text{cm}$ , D:  $4.11 \times 10^9 \Omega\text{cm}$ . 与表 1 中霍尔电阻率 (表面电阻率换算时需除以  $1 \text{ mm}$  的晶体厚度) 相吻合, 并且  $I-U$  特性表现出良好的整流作用, 降低了探测器的噪声.

按图 2 所示分别对放射源 <sup>137</sup>Cs、<sup>241</sup>Am、<sup>57</sup>Co、<sup>228</sup>Th、<sup>113</sup>Ba, 测得能谱图如图 4 所示. 图中 A、B、C、D, 分别表示单元探测器 A、B、C、D, A + B + C + D 表示四元并行电容性 Frisch 栅肖特基探测器. 探测器所加偏压为  $1250 \text{ V}$ , 成型时间为  $2 \mu\text{s}$ . 其能量分辨率和探测效率如表 2 所示. 实验所用探测器的 CZT 晶体厚度较厚 ( $8 \text{ mm}$ ), 材料的均一性难以控制, 载流子输运过程中被俘获的几率比一般小厚度探测器有

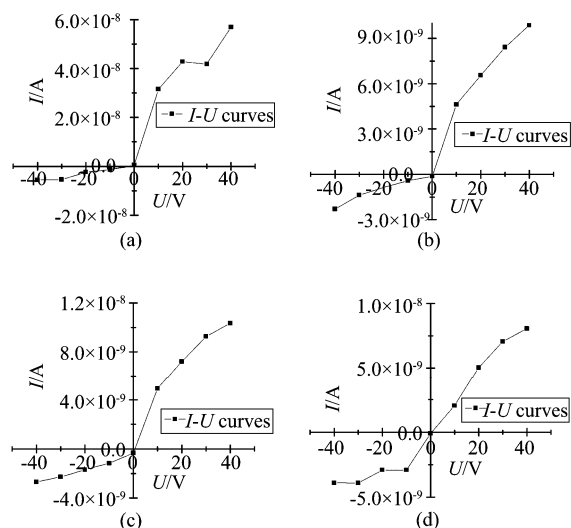


图3 单元电容性 Frisch 栅肖特基探测器的  $I-U$  特性 (a) 探测器 A (b) 探测器 B (c) 探测器 C (d) 探测器 D  
 Fig.3 The  $I-U$  characteristic of single capacitive Frisch schottky CdZnTe detector (a) detector A (b) detector B (c) detector C (d) detector D

所增加, 展宽了特征峰, 加上探测器及电子学仪器噪声对小信号的影响, 因此对于低能  $\gamma$  射线的能量分辨率较差, 但对于高能  $\gamma$  射线的能量分辨率则与国际上发表的文献相近, 单元探测器对于不同  $\gamma$  射线的能量分辨率见表 2. 由表 2 可见, 四元并行探测器的能量分辨率并没有受限于最差的单元探测器, 而是介于能量分辨率最好和最差的单元探测器之间. 探测效率与报道的文献相似, 可以看到四元并行探测器的探测效率分别为单元探测器的 2.45 ~ 7.31 倍.

### 3 结论

采用四个电容性 Frisch 栅 CdZnTe 探测器并行叠加, 克服单个 CdZnTe 晶体探测器体积小, 探测器效率低的缺点, 但并没降低总的能量分辨率. 由于电容性 Frisch 栅结构的探测器降低了漏电流, 同时单极电荷的几何结果有效克服了载流子的复合, 探测器的电极接触为肖特基接触, 则进一步降低了噪声.

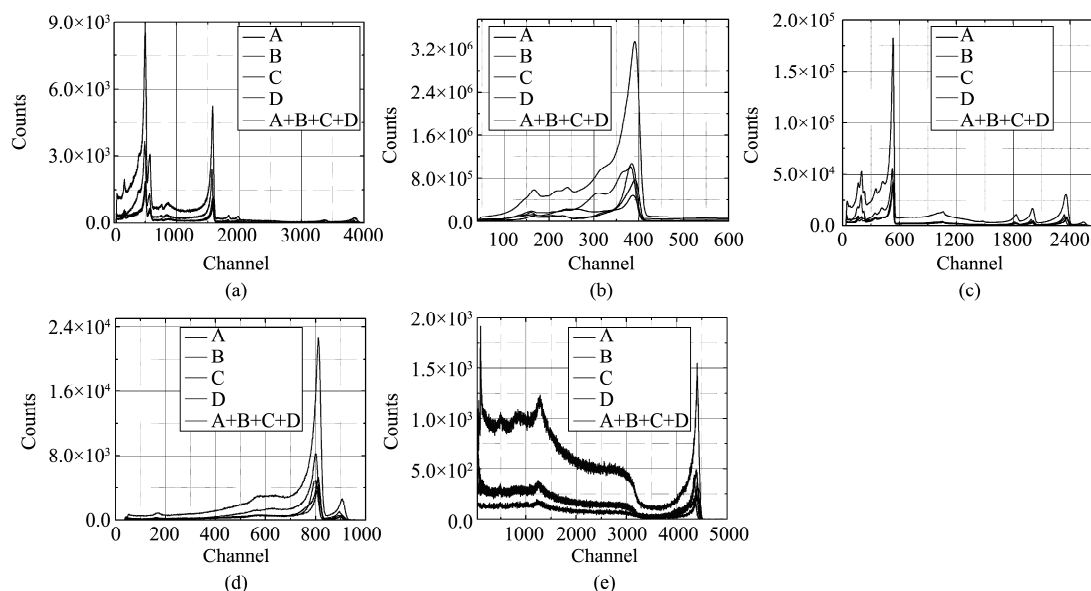


图4 单元探测器 ABCD 与四元并行探测器对不同放射源的能谱图 (a)  $^{228}\text{Th}$  (b)  $^{241}\text{Am}$  (c)  $^{133}\text{Ba}$  (d)  $^{57}\text{Co}$  (e)  $^{137}\text{Cs}$   
 Fig.4 The spectrum of single detector and four element parallel detectors for different radiation sources (a)  $^{228}\text{Th}$  (b)  $^{241}\text{Am}$  (c)  $^{133}\text{Ba}$  (d)  $^{57}\text{Co}$  (e)  $^{137}\text{Cs}$

表 2 单元与多元探测器分辨率及效率

Table 2 The energy resolution and detection efficiency of the single detector and multi element detector

Radiation source	Resolution				Detection efficiency				
	A	B	C	D	All elements	All/A	All/B	All/C	All/D
$^{137}\text{Cs}662\text{keV}$	3.09%	1.90%	2.10%	2.53%	2.37%	3.45	3.42	7.31	3.56
$^{241}\text{Am}59.54\text{keV}$	10.4%	14.15%	8.04%	7.92%	10.53%	4.76	2.45	4.89	4.63
$^{57}\text{Co}122\text{keV}$	3.89%	4.07%	3.49%	4.17%	3.97%	4.31	2.64	5.41	4.88
$^{228}\text{Th}84.4\text{keV}, 215\text{keV}$	12.2%, 2.72%	10.66%, 2.49%	7.69%, 2.36%	7.67%, 3.10%	9.41%, 2.99%	4.96	2.45	5.37	4.90
$^{113}\text{Ba}81\text{keV}, 356\text{keV}$	8.05%, 2.12%	7.30%, 2.10%	6.41%, 1.93%	6.27%, 2.72%	6.54%, 2.59%	4.52	2.94	4.91	4.26

多元叠加探测器的探测效率为单元探测器的 2.45 ~ 7.31 倍,能量分辨率介于单元探测器的最优与最差之间,662 keV:2.37% (1.9% ~ 3.09%),356 keV:2.59% (1.93% ~ 2.72%),215 keV:2.99% (2.36% ~ 3.1%),122 keV:3.97% (3.89% ~ 4.17%),84.4 keV:9.41% (7.76% ~ 12.20%),81 keV:6.54% (6.27% ~ 8.05%),59.54 keV:10.53% (7.92% ~ 14.15%)。这一结果为 CdZnTe 新型高灵敏度便携式核辐射探测器的发展打下基础。目前基于多元电容性 Frisch 栅 CdZnTe 肖特基探测器的核辐射探测器正在进一步研制中。

### REFERENCES

- [1] Zanarini M, Chirco P, Dusi W, *et al.* Radiation damage induced by 2MeV Protons in CdTe and CdZnTe semiconductor detectors[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 2004, **213**:315 - 320.
- [2] Wagenaar D J, Chowhury S, Engdahl J C, *et al.* Planar image quality comparison between a CdZnTe prototype and a standard NaI (Tl) gamma camera [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 2003, **505**(1-2):586 - 598.
- [3] Ge Y, Jie W Q, Li Q, *et al.* Effects of in doping on the properties of CdZnTe single crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **283**(3-4):431 - 437.
- [4] Bolotnikov A E, Camarda G S, Carini G A, *et al.* Modeling the effects of Te precipitates on the electron transport in CdZnTe radiation detectors [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 2007, **579**(1):125 - 129.
- [5] Kim K H, Gul R, Carcelen V, *et al.* Defect levels and thermomigration of Te precipitates in CdZnTe: Pb[J]. *J. Crystal Growth*, 2010, **312**(6):781 - 784.
- [6] Zhang X W, Zhao Z L, Zhang P J, *et al.* Comparison of CdZnTe crystals grown by the Bridgman method under Te-rich and Te-stoichiometric conditions and the annealing effects[J]. *J. Crystal Growth*, 2009, **311**(2):286 - 291.
- [7] Carvalho A, Tagantsev A, Oberg S, *et al.* Intrinsic defects in CdTe and CdZnTe alloys [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2009, **404**(23):5019 - 5021.
- [8] Mont mont G, Argues M, Verger L, *et al.* A capacitive Frisch grid structure for CdZnTe detectors [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2001, **4**(3):278 - 281.
- [9] Kim K H, Cho S H, Sun J H, *et al.* Schottky-type polycrystalline CdZnTe X-ray detectors [J]. *Current Applied Physics*, 2009, **9**(2):306 - 310.
- [10] Ghosh B. Electrical contacts for II-VI semiconducting devices[J]. *Microelectronic Engineer*, 2009, **86**(11):2197 - 2206.
- [11] Redus R, Huber A, Pantazis J, *et al.* Multielement CdTe stack detectors for gamma-ray spectroscopy [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2004, **51**(5):2386 - 2394.
- [12] Watanabe S, Takahashi T, Okada Y, *et al.* CdTe Stacked Detectors for Gamma-Ray Detection[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2002, **49**(3):1292 - 1296.
- [13] Watanabe S, Takahashi T, Nakazawa K, *et al.* Stacked CdTe gamma-ray detector and its application to a range finder[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 2003, **505**(1-2):118 - 121.
- [14] Schlesinger T E, Toney J E, Yoon H, *et al.* Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material[J]. *Mater. Sci. Eng.* 2001, **32**(4-5):103 - 189.
- [15] Burger A, Groza M, Cui Y, *et al.* Development of portable CdZnTe spectrometers for remote sensing of signatures from nuclear materials [J]. *Phys. Status Solidi*, 2005, **2**(5):1586 - 1591.
- [16] Sang W B, Wang K S, Min J H, *et al.* A novel two-step chemical passivation process for CdZnTe detectors [J]. *Semicond. Sci. Tech.*, 2005, **20**(5):343.
- [17] Shi Z B, Sang W B, Qian Y B, *et al.* Readout and signal processing electronics for 2 x 2 CZT detectors in parallel [C]. In the 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology. 2008, 992 - 995.

(上接 498 页)

### REFERENCES

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(9):091101-44.
- [2] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors[J]. *SPIE*, 2009, **7388**:73880J-1.
- [3] Stoltz A J, Benson J D, Smith P J. Morphology of inductively coupled plasma processed HgCdTe surfaces[J]. *J. Electron. Mater.*, 2008, **37**(9):1225 - 11230.
- [4] Smith E P G, Patten E A, Goetz P M, *et al.* Fabrication and characterization of two-color midwavelength/long wavelength HgCdTe infrared detectors[J]. *J. Electron. Mater.*, 2006, **35**(6):1145 - 1152.
- [5] Smith E P G, Venzor G M, Petraitis Y, *et al.* Fabrication and characterization of small unit-cell molecular beam epitaxy grown HgCdTe-on-Si mid-wavelength infrared detectors [J]. *J. Electron. Mater.*, 2007, **36**(8):1045 - 1051.
- [6] Park B A, Musca C A, Antoszewski J, *et al.* Effect of high-density plasma process parameters on carrier transport properties in p-to-n type converted Hg<sub>0.7</sub>Cd<sub>0.3</sub>Te layer[J]. *J. Electron. Mater.*, 2007, **36**(8):913 - 918.
- [7] Baylet J, Ballet P, Castelein P, *et al.* TV/4 dual-band HgCdTe infrared focal plane arrays with a 25- $\mu$ m pitch and spatial coherence[J]. *J. Electron. Mater.*, 2006, **35**(6):1153 - 1158.
- [8] Nguyen T, Musca C A, Dell J M, *et al.* Dark Currents in long wavelength infrared HgCdTe gated photodiodes[J]. *J. Electron. Mater.*, 2004, **33**(6):621 - 629.