

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 55



CdZnTe 共面栅核探测器 模拟设计和制备工艺研究

- 作者： 闵嘉华
- 专业： 材料学
- 导师： 桑文斌



7181

2011

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 55



CdZnTe 共面栅核探测器 模拟设计和制备工艺研究

● 作者：闵嘉华

● 专业：材料学

● 导师：桑文斌



图书在版编目(CIP)数据

2006 年上海大学博士学位论文. 第 2 辑/博士学位论文编辑部编. —上海: 上海大学出版社, 2010. 6

ISBN 978 - 7 - 81118 - 513 - 3

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162510 号

2006 年上海大学博士学位论文

——第 2 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890 × 1240 1/32 印张 278 字数 7 760 千

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—400

ISBN 978 - 7 - 81118 - 513 - 3/G · 514 定价: 880.00 元(44 册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

Simulation and Fabrication Technology of CdZnTe Coplanar-grid Detectors

Candidate: Min Jiahua

Major: Materials Science

Supervisor: Sang Wenbin

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任:	夏义本	教授,上海大学	200072
委员:	陈高庭	研究员,中科院上海光机所	201800
	程兆年	研究员,中科院上海微系统所	200050
	姚思德	研究员,中科院上海应用物理所	201800
	吴汶海	教授,上海大学	200072
导师:	桑文斌	教授,上海大学	200072

学大数

评阅人名单:

陈高庭 研究员,中科院上海光机所

姚思德 研究员,中科院上海应用物理所

罗 乐 研究员,中科院上海微系统所

答辩委员会对论文的评语

CdZnTe(CZT)核辐射探测器具有巨大的应用前景,是目前国际上的研究热点。论文取得的主要研究成果与创新点如下:

1. 采用有限元方法模拟计算,对 CZT 共面栅阳极结构进行了优化设计,为制备实际 CZT 共面栅器件提供了理论依据。

2. 采用 $\text{KOH}-\text{KCl}+\text{NH}_4\text{F}/\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液对 CZT 表面进行二步法化学钝化新工艺,改善了器件表面的化学计量比,为深入进行 CZT 表面钝化研究提供了有力手段。

3. 采用 Cr 作为 Au 与 CZT 晶片间的过渡层,解决了微条形 CZT 探测器的电极制备的关键工艺技术。

4. 采用自制的晶体成功研制了 CZT 共面栅结构探测器件。器件对放射源²⁴¹Am 的响应能谱的初步测试结果表明,在 59.4 keV 能量位置处的半高宽为 5.83 keV,其能量分辨率比采用 MSM 工作方式提高 8%。

论文立题新颖,研究内容丰富,数据翔实,结论可信。反映出作者具有较好理论基础和专业知识,已具备独立进行科学研究的能力。

闵嘉华同学在博士学位论文答辩中,思路清晰,回答问题正确。已符合授予博士学位的标准。经答辩委员投票一致通过其论文答辩,建议授予博士学位。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过闵嘉华同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主任:夏义本

2006年7月18日

摘 要

CdZnTe(CZT)核辐射探测器具有较高的探测效率和较好的能量分辨率,广泛应用于X、 γ 射线探测和成像装置,在国家安全防务、核探测、核控制、天体物理以及医学等领域具有巨大的应用前景。CZT中空穴的输运性能较差,会降低传统平板器件的探测效率和能量分辨率,采用共面栅结构的CZT探测器可以克服空穴收集的问题,提高器件的性能。本文模拟分析不同电极参数下的权重势分布及电荷收集特性,优化设计CZT共面栅探测器的微条电极结构,研究CZT核辐射探测器制备中表面钝化、电极制备等关键工艺,研制CZT共面栅探测器件信号读出电路,从而初步研制出CZT共面栅探测器件。主要研究内容与结果如下:

1. 采用ANSYS软件从基于权重势理论计算不同电极参数设计下的感应电荷,讨论电子俘获修正以及边缘效应对器件电荷感特性的影响出发,通过变化栅极条宽和栅间距及栅极位置等因素,对简单的共面栅阳极结构进行了局部的调整,设计了不同的栅极尺寸,讨论了不同栅极设计的权重势分布和电荷收集特性,以此优化共面栅探测器电极的几何构型,从理论上设计出合理的阳极形状以及尺寸。模拟计算结果表明:在工艺许可范围内,采用较小的栅极条宽和栅间距的电极设计较为理想,这样可以保证探测器的感应信号在尽可能大的区域(非电荷感应区)与载流子的运动情况无关,同时也可以较大的范

围内收集更多可以贡献完整感应电荷的电子,使之与受激发位置无关,有利于提高器件的有效探测体积;采用调整两组栅极输出信号的相对增益 G 的方法,可以有效地修正由于电子俘获造成的器件响应在深度上的不均匀,实现电子俘获的修正,从而有效改善响应深度上的均匀性;通过将次外条收集栅和次外条非收集栅分别加宽一倍可以使两组栅电极的权重势分布在器件宽度上具有良好的均匀性,在此基础上采用调整增益 G 值来修正电子俘获,就能在理论上使得 CZT 共面栅器件在深度和宽度方向上均能得到均匀的响应特性;在次外条收集栅和非收集栅分别加宽一倍的基础上增加了用于降低表面漏电流的保护环,加了保护环之后,收集栅与非收集栅分别作用下的权重势分布在非电荷感应区依旧重合,器件侧向(x 方向)的权重势分布的均匀性并未受到明显的影响;在此基础上完成了实际 CZT 共面栅器件阳极的设计。

2. 首次提出并采用 $\text{KOH}-\text{KCl}+\text{NH}_4\text{F}/\text{H}_2\text{O}_2$ 混合溶液对 CZT 表面进行二步法化学钝化新工艺,即先采用 $\text{KOH}-\text{KCl}$ 溶液对表面处理过的 CZT 表面进行处理,然后再用 $\text{NH}_4\text{F}/\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液对其进行表面氧化。测试分析表明:新工艺不但有效地去除了由于溴甲醇(5% Br+Methanol)腐蚀所产生的富 Te 层,改善了器件表面的化学计量比,又在表面形成了一层附着力强、难以剥离,起到保护作用的氧化层。器件漏电流与钝化前相比下降了两个数量级,与传统采用的 $\text{KOH}-\text{KCl}$ 溶液或 $\text{NH}_4\text{F}/\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液钝化工艺相比也都有不同程度的降低。更重要的是解决了 CZT 共面栅探测器的微条形电极之间的电隔离,微条间电阻达到 $34\text{ G}\Omega\cdot\text{mm}^{-2}$ 。同时还对二步法钝化工艺制

备的钝化膜的厚度用红外椭圆偏振仪测量,发现膜厚随钝化时间的增加而增加,钝化时间 10 min 得到的钝化膜,厚约为 17 nm,比用 AES 剥离测试中,按 SiO_2 剥离速度估算的膜厚 20 nm 略小。使用红外椭圆偏振仪测试 CZT 钝化膜厚的有关文献目前尚未见报道。

3. 通过分析比较采用不同工艺制备的 Au 电极层与 CZT 接触的 $I-V$ 特性和测量电极和 CZT 晶体间的附着强度,发现化学方法沉积 Au 电极可以在 CZT 表面获得最佳欧姆接触,但不适用于光刻工艺。溅射 Au 电极具有最大的电极附着强度,但电学性能不理想。真空蒸发 Au 可以获得性能良好的欧姆接触电极,用 Cr 作为 Au 与 CZT 晶片间的过渡层(即 Au/Cr 复合电极层)可以在保持欧姆接触特性的情况下增加电极层的附着强度。Au/Cr 复合电极层配合“浮脱”法光刻工艺,可获得电极图形完整、接触附着力高的具有欧姆特性的共面栅电极。其中真空蒸发 Au/Cr 复合电极以厚度约 50 nm 的 Cr 层作为 Au(厚度约 500 nm)与 CZT 晶片间的过渡层,克服了真空蒸发沉积 Au 电极的附着力较差,难以获得图形完整的微条共面栅电极的难题,从而基本解决了微条形 CZT 探测器的电极制备的关键工艺技术。

4. 根据 CZT 核探测器件用前置放大器的特点,提出前置放大器的参数指标,研制了 CZT 共面栅器件的信号读出电路。电路放大倍数 2×10^{12} V/C,信噪比 5 : 1。

5. 采用本实验室自制晶体研制了 CZT 共面栅结构探测器件。测试了该器件对放射源 ^{241}Am 的响应能谱,并将能谱与器件在 MSM 结构工作模式下获得的能谱进行了比较。初步测试

结果表明,共面栅工作方式下,器件在 59.4 keV 能量位置处的半高宽为 5.83 keV,其能量分辨率比采用 MSM 工作方式提高 8%。

关键词 CdZnTe,有限元,权重势,表面钝化,电极制备,共面栅探测器,信号读出电路

Abstract

CdZnTe (CZT) nuclear detectors have been widely utilized as X-ray and γ -ray detectors, and imaging instruments for its high detecting efficiency and good energy resolution, and it has become a choice for many applications as a material in the field of national security, nuclear detecting, nuclear control, astrophysical research and medical imaging etc. However, the poor transport of holes will degrade the spectral performance of the conventional metal-semiconductor-metal planar CZT detectors. The coplanar-grid detection technique can overcome the hole collection problem and improve the collection efficiency and energy resolution of CZT detectors. The performance of CZT coplanar-grid detectors are greatly influenced by the fabrication processes, and thus the main purpose of this paper is to study the key fabrication processes including the optimized design of grid patterns, surface passivation and contact fabrication, to design the read out circuit for the device, and finally to assemble the device together with the circuit in order to form a detector. The main results obtained in this paper are as follows:

The weighting potential profiles and the charge induction characteristics of CZT coplanar-grid detectors with different

grid pattern design have been calculated by finite element method software ANSYS. It is demonstrated that smaller grid width and grid pitch within the permission of technique can help to get higher efficiency and larger detecting volume, and thus improve the energy resolution. The impact of the edge effect on the detector response could be effectively eliminated by widening the strip next to the edge grid strip of the detector. The errors of charge induced efficiency resulting from the electron trapping effect can be corrected by adjusting the relative gain(G) of the two grid signals prior to subtraction. The grid patterns have been designed according to the simulation result.

A novel passivation process, which is called as two-step passivation technics, is presented for the first time, in which the CZT sample is first etched by KOH - KCl agent and then passivated by the $\text{NH}_4\text{F}/\text{H}_2\text{O}_2$ agent. The results of AES show that the novel passivation process forms an oxide layer on the CZT surface and leaves a nearly stoichiometric interface layer between the oxide layer and the CZT substrate. $I-V$ characteristics show that the surface leakage current of the CZT detectors passivated by the novel process is reduced obviously in comparison with those either by KOH - KCl or $\text{NH}_4\text{F}/\text{H}_2\text{O}_2$ process.

The thickness of the passivation films prepared by the two-step passivation technics was measured by Infrared Spectroscopic Ellipsometry. It is found that the thickness of the passivation films increases with the increase of the

passivation time. The thickness of the passivation films on CZT, which has been passivated for 10 minutes, is about 17 nm, less than the estimated values by SiO_2 peel-off rate. To the author's knowledge, it hasn't been reported that Infrared Spectroscopic Ellipsometry was applied to measure the CZT passivated film thickness.

The $I - V$ characteristics and adhesion strength of different contacts including evaporated Au, Electroless deposited Au, sputtering Au and evaporated Au/Cr have been investigated. It is found that the best ohm contact on the CZT surface can be got by Electroless deposited Au, but the Electroless deposited Au is not suitable for photolithography technology because of its poor adhesion strength. Sputtering Au electrode has the largest adhesion strength but no ideal ohm contact characteristic.

The evaporated Au/Cr has been chosen as the electrode of the coplanar-grid detector because the vacuum evaporation technique can be easily compatible with the photolithography, and the evaporated Au/Cr electrode has good ohm contact and considerable adhesion strength to the CZT crystal.

The parameters of pre-amplifier for the CZT coplanar grid detector have been proposed, according to the characteristic of the CZT coplanar grid detector. The signal readout circuits have been fabricated. The magnification and the signal-to-noise ratio of the circuits reached $2 \times 10^{12} \text{ V/C}$ and 5 : 1, respectively.

A CZT coplanar-grid detector device has been fabricated with two grid anodes and one cathode. The devices' energy spectra were measured and compared with that measured in the MSM structure model when they were connected with the pre-amplifier. Results show that the coplanar grid structure has a FWHM of 5.83 keV at 59.4 keV, 8% higher than that of the MSM structure.

Key words CdZnTe, Finite Element, weighting potential profiles, CZT surface passivation, electrode contact, Coplanar Grid Detector, signal readout circuit

目 录

第一章 绪论	1
1.1 核辐射探测器件	1
1.1.1 核辐射探测器的发展	1
1.1.2 探测器的性能指标	5
1.1.3 γ 射线与物质的相互作用	7
1.1.4 脉冲幅度谱的获得机理	13
1.1.5 CZT 探测器的基本工作原理	17
1.2 国内外 CZT 探测器研究概况	18
1.2.1 国外研究概况	18
1.2.2 国内研究概况	20
1.3 CZT 探测器制备过程中的关键问题	21
1.4 论文的研究意义、主要研究目的和内容	23
1.4.1 论文研究意义	23
1.4.2 本论文主要研究目的和内容	25
第二章 CZT 共面栅核探测器有限元模拟	27
2.1 权重势理论	27
2.2 共面栅探测器的基本工作原理	28
2.3 电子俘获和电荷感应效率及感应效率的计算	32
2.3.1 电子俘获和电荷感应效率	32
2.3.2 感应效率的计算	34
2.4 模拟结果与讨论	35
2.4.1 共面栅器件电极的条宽和间距尺寸的	