

Fabrication of CdS Film-Based Photodetector by Electron Beam Evaporation Method

Zhiyong Xu, Honglei Chen, Liangpeng Jia, Min Wang*

School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui
Email: 2661915011@qq.com, *Minwang@hfut.edu.cn

Received: Apr. 2nd, 2019; accepted: Apr. 17th, 2019; published: Apr. 24th, 2019

Abstract

CdS films-based photodetectors were successfully fabricated by depositing CdS films with thickness of 100 nm on SiO₂/Si substrate in combination with evaporating the Au/Cr electrodes using the shadow mask. The as-produced CdS films were characterized by XRD, XPS and AFM and the results show that CdS films possess excellent compactness and good crystallinity. The photoresponse test shows that the CdS films based photodetectors has excellent photoresponse performance, and possess a responsivity up to 22 A/W under the ultraviolet irradiation with a power of 1 mW/cm² and a wavelength of 365 nm. At the same time, its repeatability is verified. This work confirms that electron beam evaporation method is an effective approach for the fabrication of high-performance film-based photodetectors.

Keywords

Electron Beam Evaporation, CdS Film, Photo Detect, Photoresponse

电子束蒸镀法制备硫化镉薄膜光探测器

徐志勇, 陈红蕾, 贾良鹏, 王 敏*

合肥工业大学, 材料科学与工程学院, 安徽 合肥
Email: 2661915011@qq.com, *Minwang@hfut.edu.cn

收稿日期: 2019年4月2日; 录用日期: 2019年4月17日; 发布日期: 2019年4月24日

摘 要

采用电子束蒸镀法在SiO₂/Si基底上蒸镀厚度为100 nm的硫化镉薄膜, 然后利用掩膜版蒸镀电极, 成功

*通讯作者。

制备出了硫化镉薄膜光探测器。运用XRD、XPS和AFM对硫化镉薄膜进行了表征,结果表明所制备的薄膜具有非常好的致密性和良好的结晶性。光响应测试表明,所构筑的硫化镉薄膜光探测器光响应性能优异,在功率为 1 mW/cm^2 ,波长为 365 nm 紫外光照射下的响应度达到 22 A/W ,同时也其可重复性进行了验证。该工作表明电子束蒸镀法是一种有效制备薄膜光探测器的手段。

关键词

电子束蒸镀, 硫化镉薄膜, 光探测, 光响应

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光探测器因通信、传感、成像等多种应用而受到广泛的关注,薄膜光探测器件拥有高面积覆盖率,较大的比表面积,对控制和传感性能有极大的提高,已成为一种重要的光电探测器[1]。CdS 是 II-VI 族化合物半导体材料,是直接带隙材料,其能带间隙约为 2.42 eV ,吸收系数在 $10^4\text{ cm}^{-1}\sim 10^5\text{ cm}^{-1}$,对光的利用率较高,广泛的应用于纳米激光器,光传感器,场效应晶体管等方面。原则上,在适当的照明光源条件下,半导体材料都应表现出光电特性,但只有 CdS 在可见光范围内具有高灵敏度和良好的人眼匹配度,CdS 非常接近理想的光电导体[2]。硫化镉薄膜的一般制备方法有溅射法[3],化学气相沉积法[4],化学水浴沉积法[5],真空蒸发法[6],溶胶-凝胶法[7]等。其中电子束蒸发法,薄膜的纯度高,厚度控制准确,操作简单且重复性高,成膜质量好,符合我们对膜的要求。故我们采用电子束真空镀膜机和掩模版制备了所需的硫化镉薄膜,并构筑了相应的光探测器。对制备的器件的形貌结构和光电性能进行了研究。

2. 实验

实验采用尺寸为 $1.0\text{ cm} \times 1.0\text{ cm}$ 的硅片(SiO_2/Si)作为基底,经过丙酮超声 5 min ,乙醇超声 5 min ,除去表面大部分灰尘和异物,氮气吹干,放入等离子清洗机中清洗 15 min ,进一步去除表面的有机物灰尘等,确保基底样品干净,拥有亲水性。将处理好的硅片和沟道宽度为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的掩模版匹配贴紧,在电子束蒸发镀膜机基片板上固定好,确保掩模版上所有的镂空图案区域都覆盖在硅片基底上。设置好蒸发参数,蒸镀 100 nm 的硫化镉薄膜。将硫化镉薄膜/硅片样品取出,分别进行 XRD、AFM、拉曼和 XPS 测试分析,再将硫化镉薄膜/硅片,再用相匹配的同样间距的电极掩模版匹配,使电极孔与薄膜带对齐贴紧,在硫化镉薄膜/硅片上分别蒸镀 10 nmCr 和 100 nmAu 作为电极。最终样品的结构为:电极/硫化镉薄膜/硅片,即制备出硫化镉光探测器。

3. 实验结果分析

图 1 为 100 nm 硫化镉薄膜在硅片基底上的 XRD 衍射图谱。在 CdS 的衍射图谱中在 25° 、 26.6° 、 28.3° 、 43.9° 和 47.9° 的位置上有 5 个衍射峰,由硫化镉的 PDF 卡片可知,对应的晶面分别为六方纤锌矿结构硫化镉的(110)、(002)、(101)、(110)和(103)的衍射晶面,故所制备的薄膜为六方纤锌矿结构的硫化镉薄膜。所制备的硫化镉薄膜中,(002)晶面对应最强衍射峰。在密排六方结构中,具有最低自由能的晶面就是(002)晶面,故薄膜在(002)晶面具有高度的择优取向。衍射图谱没有出现明显的杂峰,表明样品纯度较高,杂质含量少。

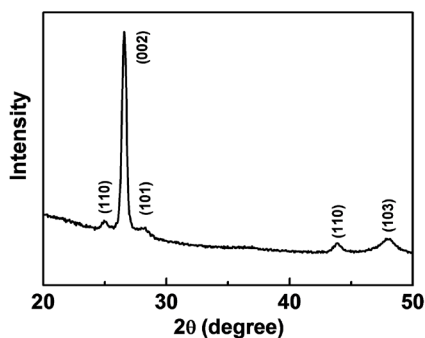


Figure 1. XRD image of the 100 nm CdS thin film/silicon substrate

图 1. 100 nm 硫化镉薄膜/硅基底的 XRD 图谱

图 2 为 100 nm 硫化镉薄膜/硅片中镉和硫元素的 XPS 图谱。图 2(a) 为镉元素的窄扫描图谱，位于 405.1 eV 和 411.9 eV 处的峰对应的是 $Cd3d_{5/2}$ 和 $Cd3d_{3/2}$ 的电子结合能，面积比为 1.3:1，相对于块状镉金属的结合能 404 eV 和 411 eV 几乎没有偏移和变化。图 2(b) 为硫元素的窄扫描图谱，位于 161.5 eV 和 162.7 eV 处的峰对应 $S2p_{3/2}$ 和 $S2p_{1/2}$ 的电子结合能，面积比为 2.0:1，相对于块状硫晶体的结合能 165 eV，略有偏移。用 XPS 半定量法对镉、硫元素进行定量分析，发现硫化镉薄膜中镉原子和硫原子的原子个数比接近 1:1。样品成分确实为硫化镉，且纯度高，与之前的 XRD 分析吻合。

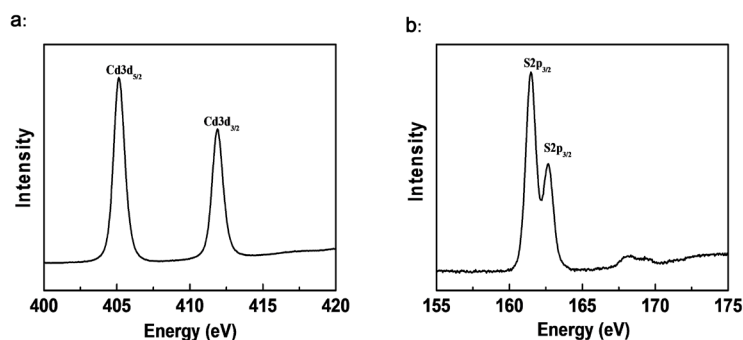


Figure 2. XPS image of the 100 nm CdS thin film/silicon substrate; (a) XPS image of Cd, (b) XPS image of S element

图 2. 100 nm CdS 薄膜/硅片的 XPS 谱图；(a) 镉元素 XPS 图谱，(b) 硫元素 XPS 图谱

图 3 为利用原子力显微镜对所制得到的 100 nm 硫化镉薄膜/硅片基底进行观察并拟合所得到的 2D 图 3(a) 和 3D 图 3(b)，通过统计计算， $R_q = 1.14$ nm， $R_a = 0.905$ nm，可见整体粗糙度低，薄膜表面起伏小，生成的薄膜颗粒均匀连续，结晶性好，致密且无缺陷和掉落。

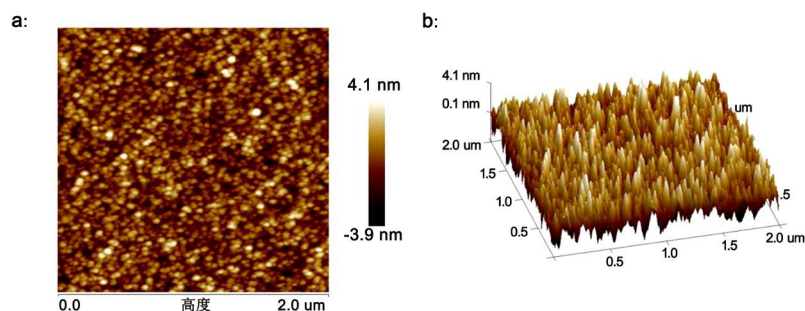


Figure 3. AFM image of the 100 nm CdS thin film/silicon substrate; (a) 2D image, (b) 3D image

图 3. 100 nm 硫化镉薄膜/硅片的 AFM 图；(a) 2D 图，(b) 3D 图

图 4 为一对电极之间的硫化镉薄膜的光学显微图和模型图。可以看出, 制备的硫化镉薄膜器件符合模型, 硫化镉薄膜清晰完整, 没有发现裂纹。光学显微图左边的电极比较清晰, 右边比较模糊是由于电极和基底存在高度差导致的, 若电极发生扩散则光学显微图中两边的电极都会模糊。图 5 为光探测器在偏压为 1 V, 功率为 1 mW/cm^2 , 波长为 365 nm 的光照条件下的周期性加光撤光得到的电流 - 时间曲线, 计算光谱响应度表示其探测性能。光谱响应度(R_λ)是评价光探测器灵敏程度的一个重要参数[8], 表示光电导体有效面积上每单位入射光功率产生的光电流, 计算公式为 $R_\lambda = \Delta i/pS$ [9], 其中 Δi 是光电流, 表示光照下的电流与暗电流之差, p 是光功率。S 是薄膜有效受光面积。在图 5 中, 选取其中一个周期, 在偏压为 1 V 时, 打开波长为 365 nm 的光源, 调节光照功率为 1 mW/cm^2 , 暗电流由 $6.18 \mu\text{A}$ 上升到 $6.62 \mu\text{A}$ 。电流增加了 $0.44 \mu\text{A}$, 即 $\Delta i = 0.44 \mu\text{A}$ 。关闭电源, 电流下降至加光前。电极的沟道间距为 $50 \mu\text{m}$, 薄膜的宽度为 $40 \mu\text{m}$, 所以有效受光面积 $S = 50 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 。代入公式可得 $R_\lambda = 22 \text{ A/W}$ 。因此, 电子束蒸镀法制备的硫化镉薄膜光探测器具有较高的响应度。图 5 中并没有给出一个完整的周期曲线, 是因为在加光时, 电流上升是由于硫化镉薄膜在光照条件下吸收光子, 使部分电子的能量上升, 跃迁至导带, 从而使电流增加, 在撤去光照时, 电子和空穴的复合, 电流逐渐恢复至原水平, 硫化镉电子与空穴完全复合速度较慢, 而我们需要计算暗电流和加光电流即可, 便没有给出一个完整的周期。

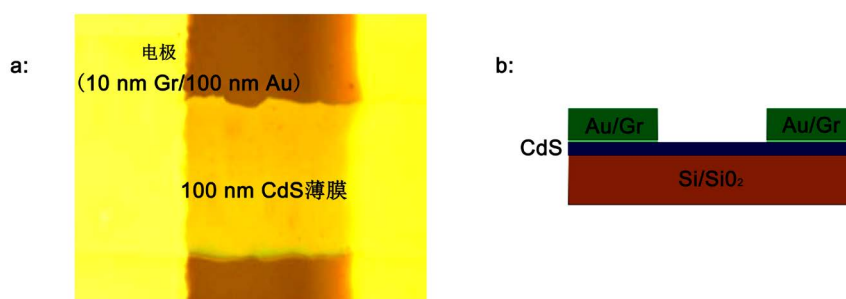


Figure 4. 100 nm CdS Thin Film Photodetector; (a) Optical micrograph, (b) Model figure
图 4. 100 nm 硫化镉薄膜光探测器; (a) 光学显微图, (b) 模型图

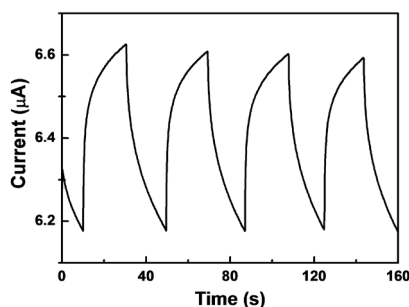


Figure 5. Periodic I-t curve of CdS thin film photodetector
图 5. 硫化镉薄膜光探测器电流 - 时间曲线

表 1 是为了验证可重复性, 我们按相同的流程和方法制作 10 个 100 nm 硫化镉薄膜器件, 并在偏压为 1 V, 功率为 1 mW/cm^2 , 波长为 365 nm 的光照条件下的测试其光电性能, 对所有器件进行加光撤光测试相应的电流 - 时间曲线图, 并计算每个器件的光电流和响应度, 并做成表格。统计表格, 可以看出, 平均的光照电流之差 $\Delta i = 0.38 \mu\text{A}$, 平均的光谱响应度为 $R_\lambda = 19 \text{ A/W}$ 。集中在平均值附近的器件个数占 50%, 由此可见, 电子束蒸发镀膜在重复制备硫化镉光探测器时, 器件都具有光响应, 且对光的响应度稳定, 能够实现重复制备。

Table 1. Statistics of photocurrent and responsivity of CdS photodetector
表 1. 硫化镉薄膜光探测器光电流和响应度统计表

器件	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
光电流	0.28 μA	0.31 μA	0.38 μA	0.39 μA	0.42 μA	0.31 μA	0.51 μA	0.44 μA	0.38 μA	0.36 μA
响应度	14 A/W	15 A/W	19 A/W	20 A/W	21 A/W	15 A/W	26 A/W	22 A/W	19 A/W	18 A/W

4. 结论

本文通过电子束蒸镀法成功的在硅片上制备出了硫化镉薄膜光探测器。XRD, XPS 和 AFM 都表明电子束蒸发镀膜所制得的硫化镉薄膜厚度均匀, 纯度高, 结晶性好, 质量可靠。其光响应测试表明制备的硫化镉薄膜光探测器具有良好的光响应度, 通过统计多个器件光响应数据, 器件的性能稳定, 可重复性强。电子束蒸镀法是一种有效制备薄膜光探测器的手段。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(21473047)。

参考文献

- [1] Cai, C., Ma, Y., Jeon, J., *et al.* (2017) Epitaxial Growth of Large-Grain NiSe Films by Solid-State Reaction for High-Responsivity Photodetector Arrays. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1606180.
- [2] Amalnerkar, D. (1999) Photoconducting and Allied Properties of CdS Thick Films. *Materials Chemistry and Physics*, **60**, 1-21. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00061-9)
- [3] 傅华新, 林鸿权. 无机镉化合物的开发与应用[J]. 湖南化工, 1995(2): 6-10.
- [4] Chang, Y., Munsee, C., Herman, G., *et al.* (2005) Growth, Characterization and Application of CdS Thin Films Deposited by Chemical Bath Deposition. *Surface and Interface Analysis*, **37**, 398-405. <https://doi.org/10.1002/sia.2012>
- [5] 王现利. CdS 薄膜的水浴法制备及表征[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] Nair, M., Nair, P., Zingaro, R., *et al.* (1994) Conversion of Chemically Deposited Photosensitive CdS Thin Films to n-Type by Air Annealing and Ion Exchange Reaction. *Journal of Applied Physics*, **75**, 1557-1564. <https://doi.org/10.1063/1.356391>
- [7] Song, W., Mao, D., Feng, L., *et al.* (1996) Effect of CdCl₂ Treatment of CdS Films on CdTe/CdS Solar Cells. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, **426**, 331-335. <https://doi.org/10.1557/PROC-426-331>
- [8] Konstantatos, G. and Sargent, E. (2010) Nanostructured Materials for Photon Detection. *Nature Nanotechnology*, **5**, 391-400. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.78>
- [9] Li, L., Wu, P., Fang, X., *et al.* (2010) Single-Crystalline CdS Nanobelts for Excellent Field-Emitters and Ultrahigh Quantum-Efficiency Photodetectors. *Advanced Materials*, **22**, 3161-3165. <https://doi.org/10.1002/adma.201000144>

Hans 汉斯

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: app@hanspub.org