SnS/ZnO 叠层太阳能电池的制备及性能研究

范文娟，邹敏，常会，霍红英，夏冬

（攀枝花学院 生物与化学工程学院，四川 攀枝花 617000）

摘 要：目的 获得光电性能较佳的 SnS/ZnO 叠层太阳能电池。**方法** 通过磁控溅射法，采用不同的溅射参数在 FTO 玻璃上制备 SnS 和 ZnO 薄膜，研究 SnS 和 ZnO 薄膜的晶体结构、表面形貌和光学性能，最终获得制备叠层太阳能电池的最佳方案。**结果** 沉积 SnS 薄膜的溅射功率、沉积时间、工作气压为 28 W，40 min，2.5 Pa 和 36 W，25 min，2.3 Pa 时，获得的两种 SnS 薄膜均在(111)晶面具有良好的择优取向，晶粒较大，表面致密光滑，禁带宽度分别为 1.48，1.83 eV。沉积 ZnO 薄膜的溅射功率、溅射时间、工作气压为 100 W，10 min，2.5 Pa 时，ZnO 薄膜的结晶性能更优，透过率更大，适合作为太阳能电池的 n 层。以宽禁带 SnS(1.83 eV)为外 p 型吸收层，窄禁带宽度 SnS(1.48 eV)为内 p 型吸收层制备的 FTO/n-ZnO/p-SnS(1.83 eV)/n-ZnO/p-SnS(1.48 eV)/Al 叠层太阳能电池，其光电转化效率为 0.108%，短路电流为 0.90 mA，开路电压为 0.40 V。**结论** 制得的叠层太阳能电池性能较传统单层太阳能电池更优。

关键词： SnS 薄膜；ZnO 薄膜；SnS/ZnO 叠层太阳能电池

中图分类号： TG174.444；TM914.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2014)06-0090-05

Study on the Properties and Preparation of SnS/ZnO Tandem Solar Cell

FAN Wen-juan, *ZOU Min*, *CHANG Hui*, *HUO Hong-ying*, *XIA Dong*

(College of Biology & Chemical Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China)

ABSTRACT: Objective To obtain SnS/ZnO tandem solar cell possessing better photoelectric performance. **Methods** SnS and ZnO thin films were deposited on FTO glass with the magnetron sputtering method. The crystal structure, surface topography and optical property of SnS and ZnO prepared with different puttering parameters were investigated, and then the best technique for preparing SnS/ZnO tandem solar cell was acquired. **Results** Under the conditions of sputtering power of 28 W, deposition time of 40 min, working pressure of 2.5 Pa and sputtering power of 36 W, deposition time of 25 min, and working pressure of 2.3 Pa, the SnS films all had good (111) preferred orientation, the grain size was big, the surface was smooth and dense, and the energy bad gaps were 1.48 and 1.83 eV, respectively. Under the conditions of sputtering power of 100 W, deposition time of 10 min and working pressure of 2.5 Pa, ZnO was more suitable as the n layer of solar cell, because it had better crystallization properties and higher transmitance. Using large energy gap SnS(1.83 eV) film as the external absorption p layer and low energy gap SnS (1.48 eV) film as the internal absorption p layer, the FTO/n-ZnO/p-SnS(1.83 eV)/n-ZnO/p-SnS(1.48 eV)/Al tandem solar cell was prepared. The energy conversion efficiency of the tandem solar cell was 0.108%, and the short circuit current and open circuit voltage

收稿日期： 2014-07-14；**修订日期：** 2014-08-31

Received: 2014-07-14; **Revised**: 2014-08-31

基金项目： 攀枝花市应用技术研究与开发项目(2012CY-S-3)；太阳能技术集成及应用推广四川省高校重点实验室项目(2013TYNZ-08)

Fund: Supported by Research and Development of Applied Technology Program of Panzhihua(2012CY-S-3), and Application and Integration of Solar Technology Program of Key Laboratory of University of Sichuan Province (2013TYNZ-08)

作者简介： 范文娟(1983—)，女，四川人，讲师，主要从事太阳能光电材料和光催化材料的研究。

Biography: FAN Wen-juan (1983—), Female, from Sichuan, Master, Lecturer, Research focus: research solar photolectric and photocatalytic materials.

were 0.90 mA and 0.40 V, respectively. **Conclusion** The photoelectric properties of the SnS/ZnO tandem solar cell were better than those of ordinary monolayer solar cell.

KEY WORDS: SnS film; ZnO film; SnS/ZnO tandem solar cell

能源是人类存在和发展的重要物质基础。随着社会的发展,传统石化能源日益枯竭,寻找可再生能源已迫在眉睫。太阳能取之不尽,且无毒无污染,是最理想的能源来源。太阳能电池可以利用光伏效应将太阳能直接转化为电能,是人们利用太阳能的一种重要方式。目前,占主流的硅基太阳能电池存在稳定性不好、成本较高等缺点,其他化合物半导体(如铜铟硒、碲化镉等)太阳电池也存在着资源不足、成本高、化学污染等问题[1—2],因此开发一种廉价、环保、高效的太阳电池材料成为了近几年的研究热点[3]。

SnS 是Ⅳ—Ⅵ族半导体化合物材料,其导电类型通常为 p 型。制备方法不同,得到的 SnS 禁带宽度也不相同,其直接禁带宽度值一般为 1.0 ~2.1 eV[4—7],较为接近太阳能电池的最佳禁带宽度值 1.5 eV;并且,SnS 材料在可见光范围的吸收系数值大于 10^4 cm^{-1},理论光电转化效率为 25%;同时,SnS 薄膜化比较容易,用作太阳能电池材料耗损小;再者,构成 SnS 的 S 和 Sn 元素在地球上的储量较为丰富,价格低廉,无毒且无污染;因此,SnS 非常适合作为太阳能电池的吸收层,引起了研究者的广泛研究[8]。人们大多采用传统成膜方式,如化学沉积法、电沉积法、热蒸发法、喷雾溅射法、磁控溅射法等,制备 SnS 单吸收层太阳能电池。单吸收层太阳能电池的禁带宽度是一个固定值,只能吸收太阳光谱中某段波长的光,其光电转化效率较低。随着材料制备技术的不断进步和发展,制备叠层结构的太阳能电池成为了提高光电转化效率的最有效手段[9—10]。叠层结构一般由 2 个或多个 p-n 结,按照禁带宽度从大到小的顺序向里叠合,太阳光中波长较短的光被外层宽禁带宽度材料利用,波长较长的光透射进入电池被内层窄禁带宽度材料利用,这就可能最大限度地将光能转化为电能。文中在单层FTO/n-ZnO/p-SnS/Al太阳能电池的基础上,采用磁控溅射法制备出吸收层禁带宽度不同的双 p-n 结 FTO/n-ZnO/p-SnS/n-ZnO/p-SnS/Al 叠层太阳能电池,并研究了该叠层太阳能电池的光电性能。

1　实验

1.1　SnS 和 ZnO 薄膜的制备

基片为 FTO 玻璃,镀膜前经丙酮、酒精和去离子水超声清洗。利用 JGP-405 型真空磁控溅射镀膜系统,使用 ϕ60 mm×3 mm 的 SnS 和 ZnO 靶材(纯度均为 99.99%),分别采用直流和射频磁控溅射法沉积 SnS 薄膜和 ZnO 薄膜。沉积均在纯度达 99.99% 的 Ar 气氛中进行,Ar 流量为 50 mL/min(标况下),用分子泵抽至本底真空度达 1×10^{-4} Pa,基片与溅射靶的间距为 60 mm。具体溅射工艺参数见表 1。

表 1　磁控溅射沉积工艺条件

Tab. 1 Deposition parameter conditions of magnetron sputtering

样品	编号	溅射功率/W	沉积时间/min	工作气压/Pa	衬底温度/℃
SnS	a	28	40	2.5	室温
SnS	b	36	25	2.3	室温
ZnO	c	100	10	2.5	室温
ZnO	d	140	10	3.0	室温

1.2　表征及分析

1) 采用日本玛珂公司 MXPAHF 型 X 射线衍射仪(辐射源为 Cu 靶,Kα 射线)对 SnS 和 ZnO 薄膜的晶体结构进行分析。

2) 采用日本 JEOL 公司 JSM-6700F 型扫描电子显微镜对 SnS 薄膜的表面形貌进行观察。

3) 采用美国 PerkinElmer 公司 Lambda950 型紫外可见分光光度计测定 SnS 和 ZnO 薄膜的透射光谱。

2　结果与分析

2.1　p 型 SnS 薄膜性能分析

2.1.1　晶体结构

表 1 中 a,b 号 SnS 薄膜样品的 XRD 图谱如图 1 所示。图谱中,2θ 为 26.57°,37.76°,51.75°出现的衍射峰为衬底 FTO 玻璃中正交晶系 SnO_2(PDF 卡片为 46-1088)的(110),(200)和(211)晶面。a 样品的图谱中,2θ 为 31.72°,30.60°,39.29°,45.49°左右存在 1 个最强衍射峰、1 个次强衍射峰和 2 个较弱衍射峰,分别与 SnS(PDF 卡片为 75-0925)的(111),(110),(104)和(200)晶面相吻合,说明 a 样品为在(111)晶

面具有很好择优取向的正交晶型 SnS 薄膜。b 样品的图谱中,2θ 为 31.53°左右存在 1 个最强衍射峰,2θ 为 30.47°,39.04°左右存在 2 个较强衍射峰,2θ 为 45.50°左右存在 1 个较弱衍射峰,分别与 SnS(PDF 卡片为 39-0354)的(111),(101),(131)和(002)晶面相吻合,说明 b 样品仍为在(111)晶面具有很好择优取向的正交晶型 SnS 薄膜。观察 a,b 号 SnS 薄膜的各晶面衍射峰,可以发现两样品均无多余散杂峰存在,且主峰峰型尖锐,强度也较大,说明其结晶性能都较好。再分别对比 a,b 号 SnS 薄膜的各晶面衍射峰,可以发现 b 样品出峰峰强更大,峰更尖锐,说明 b 样品结晶性可能比 a 样品更好。

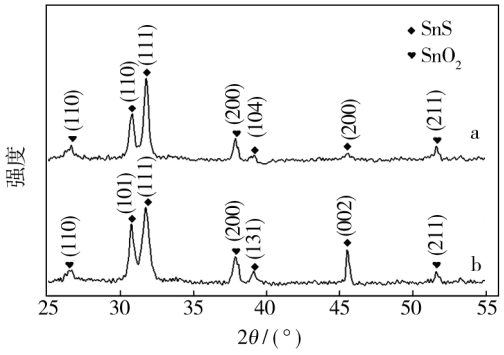
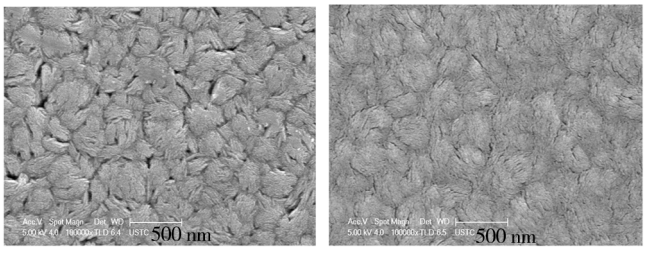


图 1 SnS 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD spectra of SnS films

2.1.2 表面形貌

图 2 为 a,b 号 SnS 薄膜表面 SEM 形貌图。可以看出,a 样品的晶粒呈清晰的平铺树叶状,大晶粒粒径约为 370 nm,小晶粒粒径约为 200 nm,薄膜的晶粒分布总体上较均匀,晶粒之间间隙小,紧密度高,具有很明显的均相致密生长微结构特征,且薄膜表面平滑。b 样品大致呈平铺羽绒状,粒径约为 350 nm,晶粒间几乎无空洞和间隙,颗粒紧密度较 a 样品增大,薄膜表面也较 a 样品更平滑。有研究报道,薄膜表面越光滑致密,微观晶粒粒径越大,晶粒间隙和空洞越少,就越能减少太阳能电池的漏电现象,从而提高太阳能电池的转化率和输出功率[11—12]。通过 SEM 分析可知,从整体上来讲,a,b 号 SnS 薄膜晶粒粒径较大,且表面平滑致密,故认为采用磁控溅射法制备的 a,b 号 SnS 薄膜可以作为叠层太阳能电池的内外两个 p 型吸收层。



a a样品 b b样品

图 2 SnS 薄膜的表面形貌

Fig. 2 SEM images of SnS films

2.1.3 光学性能

图 3 为 a,b 号 SnS 薄膜在 200 ~ 1100 nm 的透射光谱图。可以看出,a,b 薄膜的透过率均随着波长增大而逐渐增大,但二者的吸收边和最大透过率不同。对于 b 号 SnS 薄膜,当波段在 200 ~ 650 nm 时,透过率很低,几乎为零;波长大于 650 nm 以后,透过率迅速增大,最大透过率达到 63%。对于 a 号 SnS 薄膜,入射波长小于 750 nm 时,透过率几乎为零;当入射波长超过 750 nm 后,透过率显著提高,最大值达到 38%。总体上来看,b 样品的透过率大于 a 样品,且 b 样品透射光谱的震荡干涉峰比 a 样品更明显,这可能是因为 b 号薄膜的均匀性和结晶性较 a 号薄膜更好的缘故。对于叠层太阳能电池来讲,一般要求外吸收层透过率更大,故从透射光谱分析得出,b 号 SnS 薄膜适合作为叠层太阳能电池的外 p 型吸收层,a 号 SnS 薄膜适合作为内 p 型吸收层。

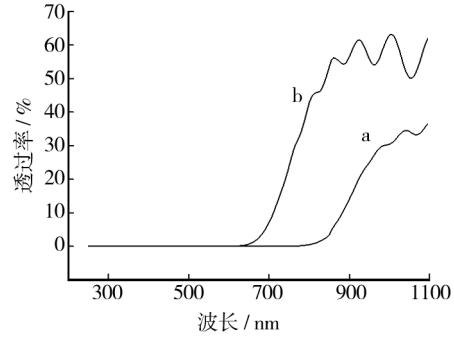


图 3 SnS 薄膜的透射光谱

Fig. 3 Transmittance spectra of SnS film

如果忽略薄膜的反射因素,已知透过率 T 和薄膜厚度 d,根据关系式(1)可以求出薄膜的吸收系数 α。光子能量 $h\upsilon$ 和吸收系数 α 之间的关系如(2)式所示[13],其中:A 为常量,E_g 表示半导体的禁带宽度,h 为普朗克常数,υ 为入射光频率,n 对于 SnS 直接带隙半导体材料而言通常为 2。

$$\alpha=\frac{1}{d}\ln\ (100/T) \tag{1}$$

$$(ah\upsilon)^n=A(h\upsilon-E_g) \tag{2}$$

a,b 号 SnS 薄膜的厚度分别为 930,622 nm,根据

公式(1)可算得各自的 α 值,再根据 $h\nu = 1240/\lambda$ (λ 为入射光波长)[14]计算出二者的 $h\nu$ 值,作 $(\alpha h\nu)^2$-$h\nu$ 关系曲线,如图 4 所示。从图 4 可以看出,a,b 号 SnS 薄膜的 $(ahv)^2$ 和 $h\nu$ 均有线性关系,说明通过磁控溅射法制备的 a,b 号 SnS 材料电子跃迁过程均是直接允许的,为直接带隙型半导体材料[15]。对 $(ahv)^2$-$h\nu$ 曲线进行线性拟合,可以估算出 a,b 号 SnS 薄膜的禁带宽度分别为 1.48,1.83 eV。禁带宽度的不同可能是由于在不同溅射功率、工作气压和沉积时间下制备的 SnS 薄膜结晶性能、均匀性和表面形貌不同。根据叠层太阳能电池多个吸收层按照禁带宽度大小的叠合顺序,禁带宽度较宽的 b 号 SnS 应作为外吸收 p 层,禁带宽度较窄的 a 号 SnS 应作为内吸收 p 层,这与透射光谱的分析结果一致。

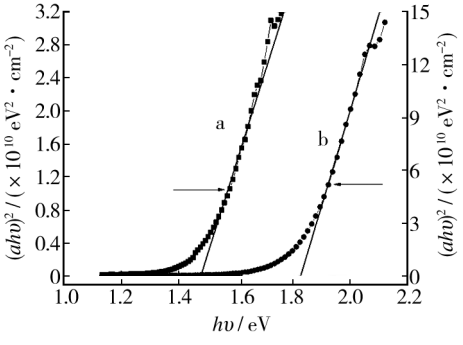


图 4　SnS 薄膜的 $(ahv)^2$-$h\nu$ 曲线

Fig. 4　$(ahv)^2$ versus $h\nu$ curves of SnS film

2.2　n 型 ZnO 薄膜性能分析

2.2.1　晶体结构

表 1 中 c,d 号 ZnO 薄膜样品的 XRD 图谱如图 5 所示。由图 5 可见,c,d 样品的 XRD 图谱非常相似。二者在 2θ 为 26.57°,37.76°,51.75°出现的衍射峰仍为衬底 FTO 玻璃中正交晶系 SnO_2(PDF 卡片为 46-1088)的(110),(200)和(211)晶面,在 2θ=34.41°的最强衍射峰对应 ZnO 薄膜的(002)晶面,在 2θ = 36.25°的峰对应 ZnO 薄膜的(101)晶面。图谱中不存在其他明显的散杂峰,表明通过磁控溅射法制备出的 c,d 号 ZnO 薄膜纯度很高,且均为在(002)晶面具有较强择优取向的六方晶系结构(PDF 卡片为 65-3411)[16]。另外,对比 c,d 样品的 XRD 图谱可以得出,c 样品的(002)晶面衍射峰较 d 样品峰型更强,更尖锐,说明 c 样品可能比 d 样品结晶性更好。

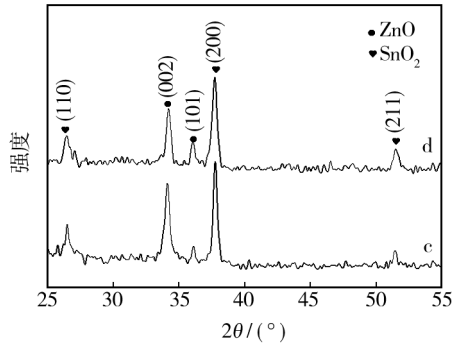


图 5　ZnO 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD spectra of ZnO films

2.2.2　透射光谱

图 6 为 c,d 号 ZnO 薄膜在 250 ~ 1100 nm 的透射光谱图。由图 6 可见,c 号 ZnO 薄膜的吸收边约位于 370 nm 处,对应于 ZnO 的特征吸收边;d 号 ZnO 薄膜的吸收边约位于 310 nm 处,相对于 ZnO 特征吸收边发生了蓝移。此外在可见光区域,c 和 d 号 ZnO 薄膜均出现较微弱震荡干涉峰,说明磁控溅射法制备的薄膜均匀性和结晶性能较好[17]。对比 c,d 样品的光谱图还可以得出,c 样品的光透过率大于 d 样品。由于太阳能电池材料的透过率一般越大越好,再综合 ZnO 晶体结构的分析结果,认为 c 号 ZnO 薄膜更适合作为 SnS/ZnO 叠层太阳能电池中的 n 层材料。

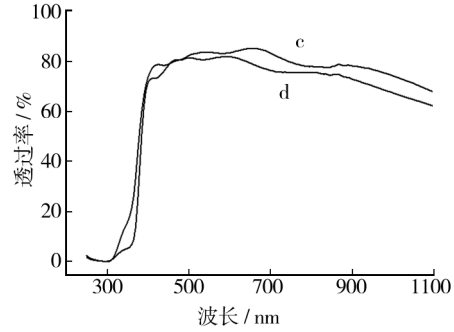


图 6　ZnO 薄膜的透射光谱

Fig. 6 Transmittance spectra of ZnO films

2.3　SnS/ZnO 叠层太阳能电池性能分析

依次在 FTO 衬底上沉积 c 号 ZnO 薄膜作为第一 p-n 结中的 n 层,b 号 SnS 薄膜作为第一 p-n 结中的宽禁带 p 层,c 号 ZnO 薄膜作为第二 p-n 结中的 n 层,a 号 SnS 薄膜作为第二 p-n 结中的窄禁带 p 层,最后镀上 Al 电极,制得 FTO/n-ZnO/p-SnS(1.83 eV)/n-ZnO/p-SnS(1.48 eV)/Al 叠层太阳能电池,编号为 A。同时按照相同的方法制备出分别以 a,b 号 SnS 薄膜作为 p 层,c 号 ZnO 薄膜作为 n 层材料的 FTO/n-ZnO/p-SnS(1.83 eV)/Al 和 FTO/n-ZnO/p-SnS(1.48 eV)/Al 单层太阳能电池,分别编号为 B 和 C。采用 CHI600C 电化学工作站(上海辰华仪器有限公司)测试太阳能电

池的光伏特性,测试时以 100 mW/cm^2 为光照强度。三种太阳能电池的光伏特性曲线如图 7 所示,由图可以得到太阳能电池的各性能参数,见表 2。

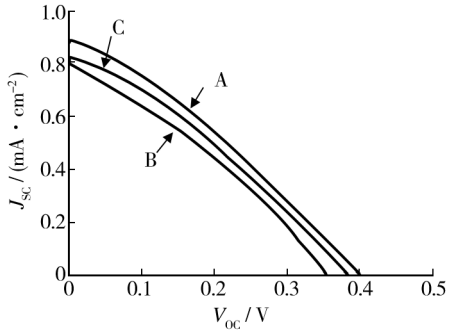


图 7 太阳能电池 *J-V* 曲线

Fig. 7 *J-V* curves of solar cells

表 2 太阳能电池性能参数

Tab. 2 Photovoltaic characteristics of solar cells

样品	短路电流/mA	开路电压/V	填充因子/%	光电转化效率/%
A	0.90	0.40	30.1	0.108
B	0.79	0.36	31.2	0.089
C	0.83	0.39	30.5	0.098

由表 2 可知,A 号叠层太阳能电池的转换效率最高,达 0.108%;B 号单层太阳能电池的光电转化效率最低,为 0.089%。这是因为 A 号叠层太阳能电池通过宽禁带(1.83 eV)和窄禁带(1.48 eV)吸收层的叠加后,外吸收 p 层可以利用能量大于 1.83 eV 的光波,内吸收 p 层可以利用能量大于 1.48 eV 的光波,从而使得整个叠层太阳能电池吸收波段有所增大;而 B 号单层太阳能电池只能利用能量大于 1.83 eV 的光波。故相比之下,A 号叠层太阳能电池能将更多的光能转换为电能,从而光电转化效率有所提高。此外,A 号叠层太阳能电池的短路电流、开路电压也最大,分别为 0.90 mA 和 0.40 V。综上分析可知,FTO/n-ZnO/p-SnS(1.83 eV)/n-ZnO/p-SnS(1.48 eV)/Al 叠层太阳能电池的性能较传统单层太阳能电池更优。

3 结论

1) 利用直流磁控溅射法在 FTO 玻璃上制备 p 型 SnS 薄膜,当磁控溅射功率为 28 W,工作气压为 2.5 Pa,溅射时间为 40 min 时,制备的 SnS 薄膜禁带宽度为 1.48 eV,适合作为叠层太阳能电池的内 p 型吸收层;磁控溅射功率为 36 W,工作气压为 2.3 Pa,溅射时间为 25 min 时,制备的 SnS 薄膜禁带宽度为 1.83 eV,适合作为叠层太阳能电池的外 p 型吸收层。

2) 利用射频磁控溅射法在 FTO 玻璃上制备 n 型 ZnO 薄膜,当磁控溅射功率为 100 W,工作气压为 2.5 Pa,沉积时间为 10 min 时,制备的 ZnO 薄膜晶相结构较优,透过率较好,更适合作为太阳能电池 n 层。

3) FTO/n-ZnO/p-SnS (1.83 eV)/n-ZnO/p-SnS (1.48 eV)/Al 叠层太阳能电池的光电效率为0.108%,短路电流为 0.90 mA,开路电压为 0.40 V,性能较传统单层太阳能电池更优。

参考文献

[1] STAEBLER D L, WRONSKI C R. Reversible Conductivity Changes in Discharge-produced Amorphous Si[J]. Applied Physics Letters, 1977, 31(4): 292—294.

[2] 程莉莉. 锡硫化合物薄膜的制备及其光电特性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
CHENG Li-li. Preparation and Photovoltaic Performance of Tin Sulfides Films [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[3] 夏冬林,雷盼,石正忠,等. 沉积电位对电沉积 ZnS 薄膜的影响[J]. 影像科学与光化学, 2012, 30(2): 129—133.
XIA D L, LEI P, SHI Z Z, et al. Influences of Deposition Potential on ZnS Thin Films Prepared by Electrodeposition Technique[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2012, 30(2): 129—133.

[4] GAO C, SHEN H, SUN L. Preparation and Properties of Zinc Blende and Orthorhombic SnS Films by Chemical Bath Deposition[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(15): 6750—6755.

[5] SOHILA S, RAJALAKSHMI M, GHOSH C, et al. Optical and Raman Scattering Studies on SnS Nanoparticles[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(19): 5843—5847.

[6] GAO C, SHEN H. Influence of the Deposition Parameters on the Properties of Orthorhombic SnS Films by Chemical Bath Deposition[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(9): 3523—3527.

[7] JAYASREE Y, CHALAPATHI U, BHASKAR P U, et al. Effect of Precursor Concentration and Bath Temperature on the Growth of Chemical Bath Deposited Tin Sulphide Thin Films [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(7): 2732—2740.

[8] TANUSEVSKI A. Optical and Photoelectric Properties of SnS Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition[J]. Semiconductor Science Technology, 2003, 18(6): 501—505.

(下转第 110 页)

Topography Evaluation [J]. Surface Technology, 2013, 42 (1): 123—126.

[8] GUO K, LAHATE D. Optimally Sparse Multidimensional Representation Using Shearlets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2007, 39(1): 298—318.

[9] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear Total Variation Based Noise Removal Algorithms [J]. Physica D, 1992, 60(1/2/3/4): 259—268.

[10] CHAN T F, ZHOU H M. Total Variation Improved Wavelet Thresholding in Image Compression [C]//Proc of the 7th International Conference on Image Processing. Vancouver, Canada: IEEE Computer Society, 2000: 391—394.

[11] EASLEY G R, LABATE D, COLONNA F. Shearlet-based Total Variation Diffusion for Denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(2): 260—268.

[12] GUO K, LABATE D, LIM W Q, et al. Wavelet with Composite Dilations and Their MRA Properties[J]. Appl Comput Harmon Anal, 2006, 20(2): 202—236.

[13] GUO K, KUTYNIOK G, LABATE D. Sparse Multidimensional Representations Using Anisotropic Dilation and Shear Operators[C]//Proceedings of the International Conference on the Interactions between Wavelets and Splines. Athens: GA, 2005: 16—19.

[14] EASLEY G, LABATE D, WANG Q L. Sparse Directional Image Representations Using Discrete Shearlet Transform [J]. Appl Comput Harmon Anal, 2008, 25(1): 25—64.

[15] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear Total Variation Based Noise Removal Algorithms[J]. Phys D, 1992, 60 (1/2/3/4): 259—268.

[16] AUBERT G, KORNPROBST P. Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Variations[M]. New York: Springer, 2009.

[17] SONG Bing. Topics in Variational PDE Image Segmentation, Inpainting and Denoising[D]. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 2003.

[18] BLOMGREN P V. Color TV: Total Variation Method for Restoration of Vector-Valued Images[D]. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 1998.

[19] YUNME I C, LEVINE S, MURAL I R. Variable Exponent Linear Growth Functionals in Image Restoration[J]. SIAM Applied Mathematics, 2006, 66(4): 1383—1406.

[20] PO D D-Y, DO M N. Directional Multiscale Modeling of Images Using the Contourlet Transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1610—1620.

[21] SMOLKA B, GHYDZINSKI A. Fast Detection and Impulsive Noise Removal in Color Images [J]. Real-time Imaging, 2005, 11(5/6): 389—402.

(上接第 94 页)

[9] YAO W J, ZENG X B, PENG W B, et al. The Precombination Layer in Tunnel Junctions for Micromorph Tandem Solar Cells[J]. Chin Phys, 2011, 20(7): 078401.

[10] QU X S, ZHANG S S, BAO H Y, et al. The Effect of InAs Quantum-dot Size and Interdot Distance on GaInP/GaAs/GaInAs/Ge Multi-junction Tandem Solar Cells[J]. Journal of Semiconductors, 2013, 34(6): 062003.

[11] 贾影, 李健, 闫君. 用 Zn 掺杂和热处理改善 SnS 薄膜的电学特性[J]. 功能材料, 2013(8): 1081—1085.
JIA Ying, LI Jian, YAN Jun. Electrical Characterization Improvement of the Zn-doped and Heat-treatment to SnS Thin Films [J]. Journal of Functional Materials, 2013 (8): 1081—1085.

[12] REDDY N K, REDDY K T R, FISHER G, et al. The Structural Behaviour of Layers of SnS Grown by Spray Pyrolysis[J]. Journal Physics D: Applied Physica, 1999, 32(9): 988—991.

[13] 程树英, 陈岩清, 钟南保, 等. 阴极恒电位法电沉积 SnS 薄膜的性能研究[J]. 太阳能学报, 2006(7): 695—699.
CHEN Shu-ying, CEHN Yan-qing, ZHONG Nan-bao, et al. Research on Properties of SnS Films Prepared by Constant-potential Cathodic Electrodeposition[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006(7): 695—699.

[14] 朱春燕, 朱昌. 磁控反应溅射 AlN 薄膜光学性能研究[J]. 表面技术, 2008, 37(1): 17—19.
ZHU Chun-yan, ZHU Chang. The Optical Properties of AlN Film by Magnetron Reactive Sputtering[J]. Surface Technology, 2008, 37(1): 17—19.

[15] AARON G, HORACIO M, MANUELA C R, et al. A Study of the Structural, Optical and Electrical Properties of SnS Thin Films Modified by Plasma[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2013, B3(6): 352—358.

[16] 韦美琴, 张光胜, 姚文杰. 溶胶-凝胶法制备掺铝氧化锌薄膜[J]. 表面技术, 2007, 36(4): 34—36.
WEI Mei-qin, ZHANG Guang-sheng, YAO Wen-jie. Aluminum-doped ZnO Thin Films by the Sol-Gel Method[J]. Surface Technology, 2007, 36(4): 34—36.

[17] 王洪森, 赵玉辉. ZnO：Si 透明导电薄膜厚度对其光电性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 21—24.
WANG Hong-sen, ZHAO Yu-hui. Impact of Film Thickness on Photoelectric Properties of Transparent Conductive Silicon Doped ZnO Thin Films[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 21—24.