

文章编号:1673-2812(2013)04-0562-06

## 掺 Zn 改善 SnS<sub>2</sub> 光电薄膜的性能

康海涛<sup>1,2</sup>, 李 健<sup>1,2</sup>, 柴燕华<sup>1</sup>

(1. 内蒙古大学物理科学与技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010021;  
2. 内蒙古自治区高等学校半导体光伏技术重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010021)

**【摘要】** 热蒸发制备 Zn 掺杂 SnS<sub>2</sub> 薄膜, 研究不同 Zn 含量及热处理条件对薄膜的物相结构、表面形貌和光电性能的影响。实验给出用 Sn:S=1:1.08(wt) 混合粉末沉积的薄膜, 经 380℃、15min 热处理后得到简单正交晶系的 SnS<sub>2</sub> 薄膜; 9(wt%) 掺 Zn 后的薄膜热处理条件为 370℃、20min。Sn、S 和 Zn 分别以正 4 价、负 2 价和正 2 价存在于薄膜中。SnS<sub>2</sub> 薄膜的直接光学带隙为 2.12eV, 掺 Zn 后为 2.07eV; 薄膜的电阻率从未掺 Zn 时的  $4.97 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$  降低到  $2.0 \Omega \cdot \text{cm}$ , 下降了两个数量级, 所有 SnS<sub>2</sub> 薄膜导电类型均为 N 型。

**【关键词】** 热蒸发; SnS<sub>2</sub> 薄膜; Zn 掺杂; 热处理; 特性  
中图分类号: O484.4 文献标识码: A

## Improved Properties of the Zn-doped SnS<sub>2</sub> Thin Films

KANG Hai-tao<sup>1,2</sup>, LI Jian<sup>1,2</sup>, CHAI Yan-hua<sup>1</sup>

(1. School of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;  
2. Key laboratory of semiconductor photovoltaic technology for colleges of Inner Mongolia autonomous region, Hohhot 010021, China)

**【Abstract】** Zn doped SnS<sub>2</sub> thin films were prepared by thermal evaporation. Effects of Zn contents and heat-treatment condition on thin film phase structure, surface morphology and photoelectric performance were investigated. Results show that after heat-treatment at 380℃ for 15 min the films with weight ratio of Sn to S = 1:1.08 take on simple orthorhombic structure. The heat-treatment condition of 9 wt% Zn doped SnS<sub>2</sub> thin films was at 370℃ for 20 min. The state of Sn, S and Zn were Sn<sup>4+</sup>, S<sup>2-</sup> and Zn<sup>2+</sup>. After Zn doping, the direct optical band gap of SnS<sub>2</sub> thin films reduced from 2.12eV to 2.07eV, and the resistivity two orders of magnitude decreased from  $4.97 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$  to  $2.0 \Omega \cdot \text{cm}$ . The conducting type of all SnS<sub>2</sub> thin films was n-type.

**【Key words】** thermal evaporation; SnS<sub>2</sub> thin film; Zn-doping; heat-treatment; properties

### 1 引言

SnS<sub>2</sub> 材料以其禁带宽(直接带隙 2.0~3.5eV)、有较强的各向异性, 优良的光学性质等优点, 近年来受到关注<sup>[1]</sup>。SnS<sub>2</sub> 是 IV—VI 族化合物半导体材料, 晶体结构在二维和三维之间, 一般为简单晶系的六角(a=b=0.365nm, c=0.589nm) 和菱形晶系(a=b=

0.3647nm, c=5.3118nm)。SnS<sub>2</sub> 可用于制作光电薄膜转换器件、锂电池的阴极材料及全息记录材料等<sup>[2-5]</sup>。地球中 Sn、S 资源储量丰富, 制作 SnS<sub>2</sub> 薄膜的过程中对环境产生的污染也很低, 加之两种材料的价格低, 可大大降低制作器件成本。如能将宽带隙的 SnS<sub>2</sub> 薄膜作为太阳电池的窗口层, 与吸收层 SnS 形成异质结, 就可制成新型的 SnS<sub>2</sub>/SnS 薄膜太阳电池。目前, 国内对 SnS<sub>2</sub> 薄膜的制备及性能研究还很少, 很

收稿日期: 2013-02-25; 修订日期: 2013-03-29

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2009MS0109); 内蒙古自治区高等学校科技基金资助项目(NJ10017)

作者简介: 康海涛(1987—), 男, 山西大同人, 硕士, 主要从事光伏薄膜材料研制。E-mail: haitaokang87@126.com。

通讯作者: 李 健, 教授。E-mail: lijian\_imu@126.com。

多基础性的工作需要深入进行,所以开发研制性能良好的 SnS<sub>2</sub> 新型光电薄膜,有着重要的意义和学术价值。常用制备 SnS<sub>2</sub> 薄膜的方法有:溅射镀膜<sup>[6]</sup>,热溶剂分解技术<sup>[7]</sup>,连续离子层吸附反应<sup>[8]</sup>,热蒸发<sup>[9]</sup>,还原化学沉淀<sup>[10]</sup>,水热合成法<sup>[11]</sup>,浸涂法<sup>[12]</sup>等。

本研究组前期已用热蒸发法制出 N 型 SnS<sub>2</sub> 薄膜<sup>[13]</sup>,通过对薄膜的结构、光学、表面和电学性能测试,研制的 SnS<sub>2</sub> 薄膜性能均良好但电阻率非常高,如果要将 SnS<sub>2</sub> 作为薄膜太阳能电池的窗口层或其它光电器件,都要求薄膜有良好的电学性质,所以必须对 SnS<sub>2</sub> 薄膜进行合适的掺杂以改善其电学特性。本研究仍采用热蒸发沉积掺杂 SnS<sub>2</sub> 薄膜,选择 Zn、Sb 和 Al 元素对 SnS<sub>2</sub> 进行掺杂,研究掺杂元素、含量、热处理条件等对薄膜结构、形貌、表面化学成分、光电、结构性能的影响。在保证薄膜的结构、光特性、表面形貌良好的基础上,找到最有效的掺杂元素及掺杂工艺。

## 2 实验

### 2.1 薄膜的制备

因 Sn 和 S 元素的饱和蒸气压、蒸发温度、蒸发速率等不同,同源共蒸沉积薄膜时,成分偏离问题较突出。在配制 Sn 和 S 的混合粉末时不能完全按照 SnS<sub>2</sub> 标准计量比进行,要根据热蒸发法中物质的最大蒸发速率与饱和蒸汽压的关系式: $J_m \approx 2.64 \times 10^{24} P_v \left( \frac{1}{\sqrt{TM}} \right)$  (个/cm<sup>2</sup>·s, Pa) (式中 M: 摩尔质量, P: 压强; T 为蒸发温度), 进行计算后再确定混合粉末的配比。

计算给出:

Sn:S:Zn 的蒸发速率比是 1:2.26:2.04;

Sn:S:Sb 的蒸发速率比是 1:2.26:1.23;

Sn:S:Al 的蒸发速率比是 1:2.26:2.18。

看到 S 的蒸发速率是 Sn 的 2.26 倍,在蒸发过程中 S 元素会先沉积在衬底上, S 过量沉积会造成薄膜的化学成分偏离大,因此在配料时相对减少了 S 元素的量。经大量实验筛选,用 Sn:S=1:1.08(质量比)配料制备出的 SnS<sub>2</sub> 薄膜性能最好。

实验过程,将高纯 Sn、S 粉(质量比 1:1.08)的粉末与 3、5、7、9 % (wt) 的高纯 Zn 或 Al 和 Sb 粉末混合后充分研磨均匀。

用 DM-450A 型真空镀膜机沉积薄膜,蒸发源是高纯钼舟(99.99%),蒸发源与衬底的距离为 13cm;衬底为载玻片清洗干净烘干。镀膜时衬底不加热,真空度为  $3.0 \times 10^{-3}$  Pa,蒸发电流 130A,时间 1~2min。

### 2.2 薄膜的热处理

热蒸发沉积后的薄膜结构性能较差,基本处于非晶或很差的多晶结构,主要因晶界较多及产生大量的缺陷,造成薄膜整体性能差。为改善薄膜的结晶状况,对沉积的薄膜进行了合适的热处理。考虑到 Sn 在高温下极易氧化生成 SnO<sub>2</sub> 及其他的化合物,所以在热处理过程用大流量的氮气进行保护。

本实验的热处理条件:温度选 280、300、320、340、350、370、380、400℃ 共 8 个温度段;时间 15min~40min。

XRD 测试给出:用 Sn:S 配比为 1:1.08(质量比)沉积的薄膜,经过 380℃ 热处理 15~20 min 后,能制出单一相的 SnS<sub>2</sub> 薄膜,其它热处理条件制备的 SnS<sub>2</sub> 薄膜均为混合相;实验还给出掺 Al 和 Sb 元素的 SnS<sub>2</sub> 薄膜及掺 Zn 含量 3~7wt% 的薄膜,物相也是混合相结构。所以本文以下只分析讨论掺 Zn 为 9wt% 的 SnS<sub>2</sub> 薄膜的性能。

## 3 结果与讨论

### 3.1 薄膜的 XRD 分析

用 PW1830 型 X 射线衍射仪(Cu 靶,  $\lambda=0.154187$  nm, 荷兰)测试薄膜的物相结构。图 1 给出不同热处理条件、不同掺 Zn 含量的 SnS<sub>2</sub> 薄膜的 XRD 谱。

图 1A 中曲线 a:380℃、15min 热处理的 SnS<sub>2</sub> 薄膜,在  $2\theta=14.800^\circ$ 、 $28.173^\circ$ 、 $31.717^\circ$ 、 $49.947^\circ$  处出现分别出现 SnS<sub>2</sub> 的(001)、(100)、(101)和(110)晶向的特征峰;相应的 d 值分别为 0.59804nm、0.31648nm、0.28189nm 和 0.18244nm。对应于 PDF 卡 23-0677 号的 SnS<sub>2</sub>,属于简单正交晶系的 P-3m1(164)空间群。可见合适的热处理条件可以使薄膜释放内应力,修补断键填补位错,偏离平衡位置的 Sn 原子获得足够的能量扩散到晶格位置,消除部分晶界,大大提高了薄膜的晶化程度。

曲线 b:380℃、20min 热处理后,与曲线 a 相比,b 中 SnS<sub>2</sub> 薄膜只出现(001)和(101)晶向的特征衍射峰,峰强有所减弱。

图 1B 中曲线 a:350℃、30min 热处理,9wt% 掺 Zn 的 SnS<sub>2</sub> 薄膜。(100)峰和(110)峰因掺 Zn 发生晶格畸变,d 值减小了 0.6~0.7%,仍在允许偏差范围之内。

曲线 b:370℃、20min 热处理,9wt% 掺 Zn 后出现 SnS<sub>2</sub> 薄膜的三强峰,沿(001)晶向择优生长增强,薄膜的结晶情况要优于曲线 a。

从图 1 的 XRD 分析看出:掺 Zn 后 SnS<sub>2</sub> 薄膜晶格结构并未发生改变,对应的空间群没变,薄膜结晶状况

良好。在 SnS<sub>2</sub> 薄膜中都未出现 Zn 及相应化合物的相,说明部分 Zn 离子进入晶格(间隙或替位),其余则无序分布在薄膜表面,没形成 Zn 元素的独立相。

### 3.2 薄膜表面形貌分析

用 CSPM5500 原子力显微镜对薄膜进行表面形貌分析。图 2 为 SnS<sub>2</sub> 薄膜的原子力显微镜(AFM)图。

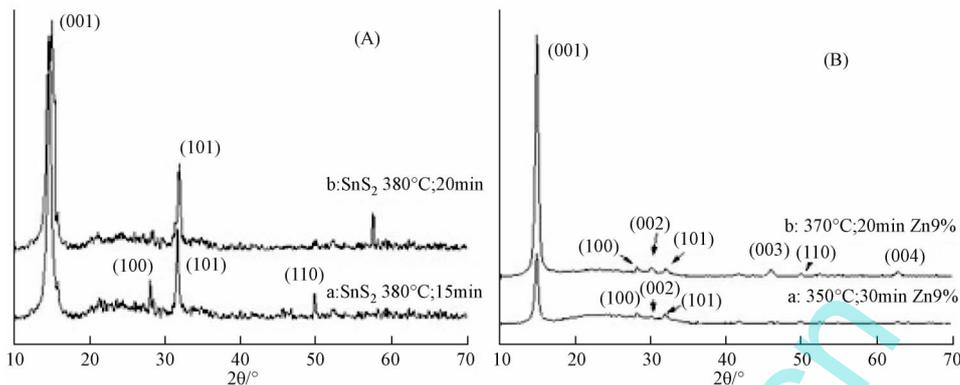


图 1 SnS<sub>2</sub> 薄膜的 XRD 图谱 (A) 未掺杂 SnS<sub>2</sub>; (B) 掺 9%Zn 的 SnS<sub>2</sub>

Fig. 1 XRD spectra of different Zn-doped SnS<sub>2</sub> thin films under different heat treatment condition

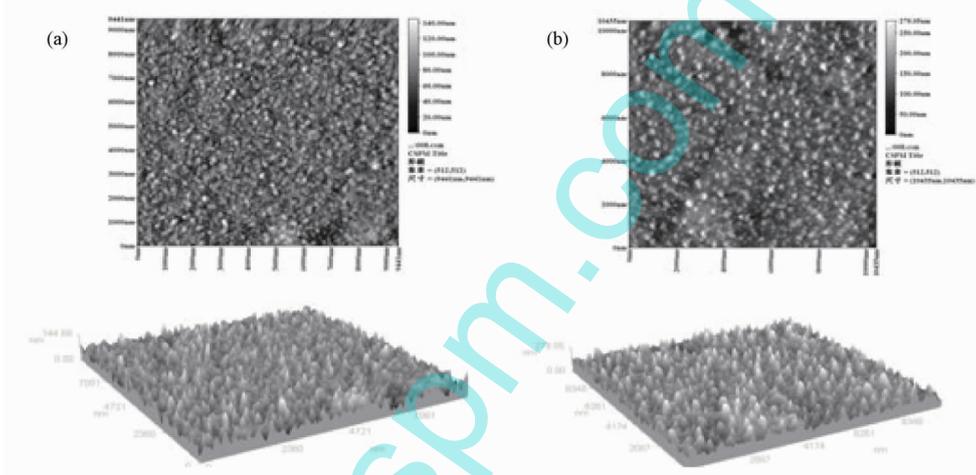


图 2 SnS<sub>2</sub> 薄膜的 AFM 图 (a) 未掺杂的 SnS<sub>2</sub>; (b) 掺 9%Zn 的 SnS<sub>2</sub>

Fig. 2 AFM micrograph of SnS<sub>2</sub> thin film (a) SnS<sub>2</sub>; (b) SnS<sub>2</sub>:Zn(9wt%)

表面粗糙度是衡量沉积薄膜质量的重要参数之一,高质量的薄膜要求薄膜表面均匀、平整<sup>[14]</sup>。图 2 (a)是 SnS<sub>2</sub> 薄膜的(380℃, 15min)AFM 图,薄膜表面呈现较致密均匀的颗粒状,颗粒团聚情况较弱,表面粗糙度均方根 R<sub>MS</sub> = 13.9nm;用 ET3000 型手动轮廓仪(日本)测试薄膜厚度约为 188.1nm,薄膜表面算数平均偏差粗糙度 Ra = 85nm,比 AFM 测试的 R<sub>MS</sub> 大,主要由于手动轮廓仪给出的是局部表面粗糙度,而原子力显微镜给出的是整个薄膜表面粗糙度的平均值。

图 2 (b) 为 9wt% 掺 Zn 薄膜(370℃, 20min)的 AFM 图。看到掺 Zn 后使薄膜表面的致密性变好,表面颗粒非常致密均匀,表面粗糙度均方根 R<sub>MS</sub> 增大到 25.1nm,手动轮廓仪测出薄膜厚度为 290.3nm,算数平均偏差粗糙度 Ra 为 114nm。因为适宜的掺 Zn 和热处理有利于晶粒的长大和结晶,随着晶粒长大到一定的程度,会受到生长空间的限制。表面新生晶粒不

断堆积,晶粒间会出现相互挤压团聚形成团聚体,导致表面变得致密,粗糙度随之增加。

### 3.3 薄膜的表面化学组份分析

用 Kratos Amicus 光电子能谱仪(英国)对 SnS<sub>2</sub> 薄膜及掺 Zn 薄膜进行表面化学组成分析。由于采用载玻片做衬底,测试出现荷电效应,通过 C1S 的标准结合能进行了全谱校正。SnS<sub>2</sub> 薄膜及掺 Zn 薄膜的 XPS 谱参看图 3。

图 3(a)是掺 Zn(9wt%)的 SnS<sub>2</sub> 薄膜的全谱图。XPS 总谱图中出现 Sn、S、C、O、Na 和 Zn 元素,其中 O、Na 元素来自玻璃衬底、C 是测试固定样品的导电胶带污染造成的。总谱图中 S 的峰很弱,是因为薄膜表面 S 含量较少,加之 S 灵敏度低(1.74)引起的。

图 3 的 (b)、(d)图,分别对应于 SnS<sub>2</sub> 和 SnS<sub>2</sub>:Zn(9wt%)薄膜中 Sn 元素的精细扫描 XPS 图。从 b、d 图看到 Sn3d<sub>5/2</sub> 和 3d<sub>3/2</sub> 双线特征峰基本相同、对称且无

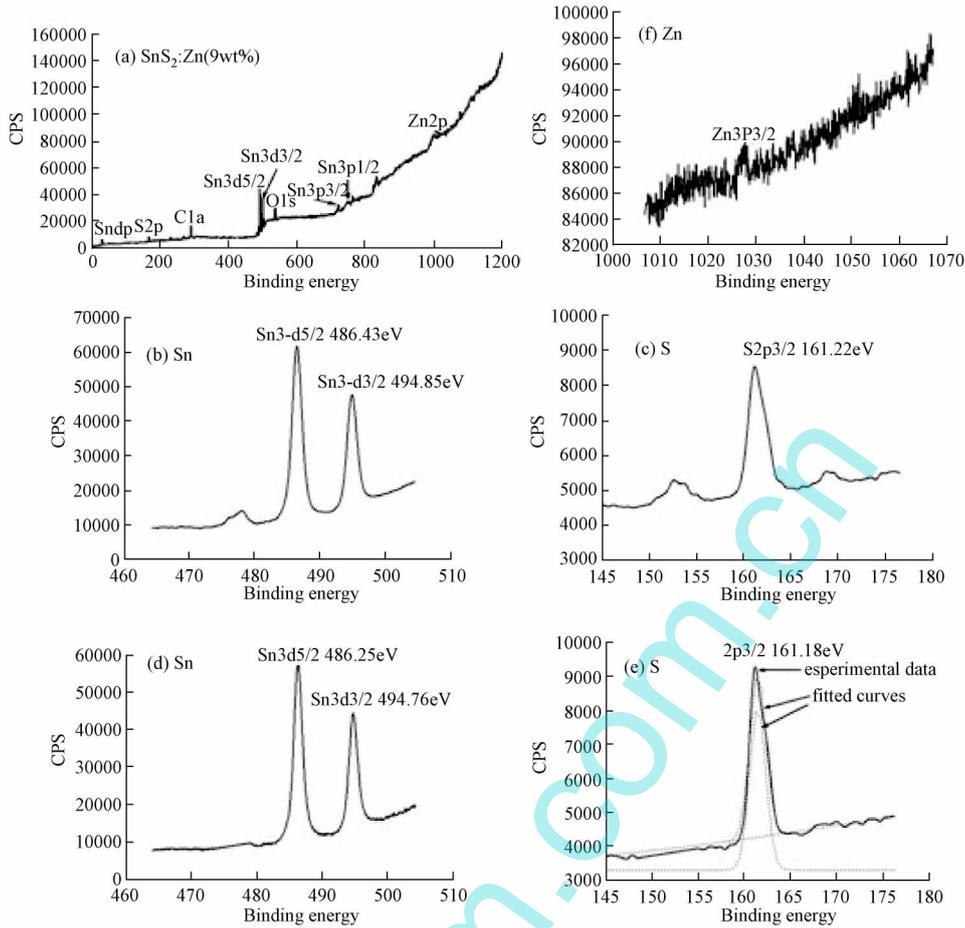


图 3 SnS<sub>2</sub> 薄膜的 XPS 谱图

Fig. 3 XPS spectrum of SnS<sub>2</sub> thin films

伴峰, 结合能都比标准值大, 说明薄膜中 Sn 只存在一种价态, 呈+4 价。

图 3(c) 是 SnS<sub>2</sub> 薄膜中 S 元素的精细扫描 XPS 谱, S 的 2P<sub>3/2</sub> 特征峰基本对称无伴峰, 结合能为 161.22eV, 比标准值 164eV 减少 2.78eV, 说明 S 在 SnS<sub>2</sub> 薄膜中以-2 价存在。

图 3 的(e)图, 是掺 Zn 后 SnS<sub>2</sub> 薄膜中 S 的精细扫描图。S 的 2P<sub>3/2</sub> 峰高能部分略有不对称出现伴峰, 但还不足以使两峰明显分离, 说明掺 Zn 使 S 原子周围化学环境发生变化, 2P<sub>3/2</sub> 峰的结合能为 161.18eV, 比标准值减少 2.82eV, S 在薄膜中仍呈-2 价。(f) 图是 SnS<sub>2</sub>:Zn 薄膜中 Zn 元素的精细扫描图。因样品表面 Zn 含量很少, 所以特征强度较弱。Zn 的 2P<sub>3/2</sub> 的结

合能为 1022.56eV, 比标准值增大 0.76eV, Zn 在 SnS<sub>2</sub> 薄膜中以+2 价存在。

根据全谱图中各元素特征峰强度与所占的原子百分比, 计算出 SnS<sub>2</sub> 薄膜掺 Zn 前后各元素的含量见表 1。

表 1 的数据给出: SnS<sub>2</sub> 薄膜表面 Sn 和 S 的原子比为 1:1.08, S 元素的含量明显少; SnS<sub>2</sub>:Zn(9wt%) 薄膜表面的原子比 Sn:S=1:1.55, 薄膜的化学计量比接近标准情况。这是因掺 Zn 后提高了 Sn 的蒸发速率, 从而减小了 Sn 与 S 蒸发速率的差距, 促进 SnS<sub>2</sub> 的形成, 改善了 SnS<sub>2</sub> 薄膜表面的化学计量比。

由表 1 可见: SnS<sub>2</sub> 薄膜表面 Zn 元素的含量只有 1.68 wt%, 远低于配料时的 9wt%。产生的原因可能

表 1 SnS<sub>2</sub> 薄膜表面的原子百分含量

Table 1 Atomic concentration of SnS<sub>2</sub> thin films

Sample	Element sensitivity factor	Percentage content of atomic molar%	Percentage content of atomic weight%
SnS <sub>2</sub>	Sn3d, 24.72	48.00	77.00
	S2p, 1.74	52.00	23.00
SnS <sub>2</sub> :Zn(9wt%)	Sn3d, 24.72	38.50	69.30
	S2p, 1.74	59.80	29.02
	Zn2p, 27.30	1.70	1.68

是 Zn 的蒸发温度低(618K),且可直接升华,造成蒸发过程 Zn 挥发较多。

### 3.4 薄膜的光学特性

用 U-3400 型紫外-可见分光光度计测试薄膜的光透率。图 4 给出入射光波长在 300~900nm 范围内,SnS<sub>2</sub> 薄膜的光透率。图 4 中的插图 A 是 SnS<sub>2</sub> 和 SnS<sub>2</sub>:Zn

(9wt%)薄膜的光吸收系数曲线,B 图是薄膜的光学带隙。

从图 4 的曲线 a 可看到,在波长为 500nm 时,SnS<sub>2</sub>薄膜光透过率(膜厚 188.1 nm)约 20%,经一定温度的热处理,薄膜的结晶面积增大,结构特性变好,使得光透过率降低。在波长为 900nm 时达到 75%,本征吸收边约在 430nm。

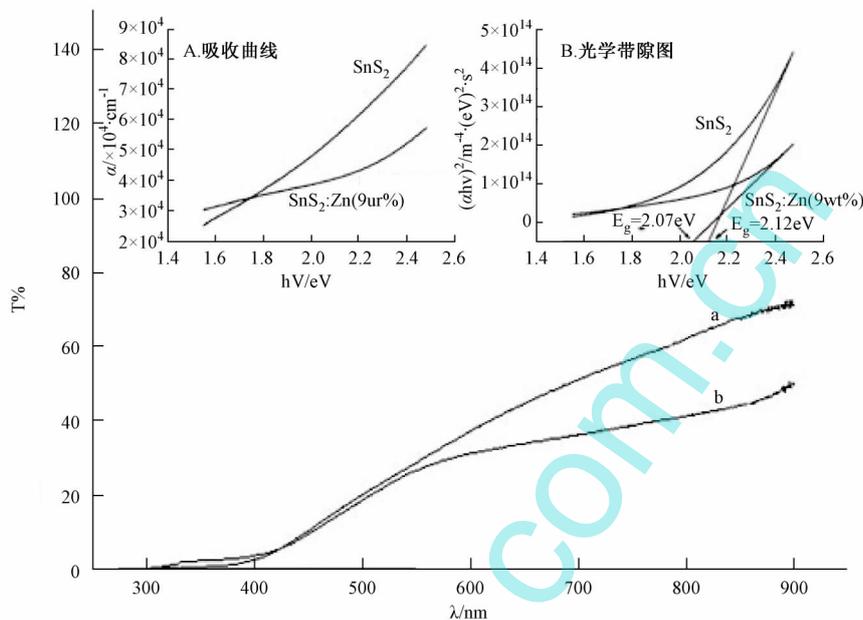


图 4 SnS<sub>2</sub> 薄膜的光学特性

Fig. 4 Optical characteristic curves of SnS<sub>2</sub> thin films

曲线 b 是厚度为 290.3nm 的 SnS<sub>2</sub>:Zn 薄膜的光透率。从波长为 550nm 开始,曲线增加的趋势变缓,在 900nm 时达到 50%。与未掺 Zn 时相比,光透率降低了约 20%。主要是掺 Zn 后薄膜的致密性变好,表面粗糙度增大,薄膜的光吸收增强,所以导致光透率降低<sup>[15]</sup>,本征吸收边波长约 540nm,发生红移。

图 4 中插图 A 是薄膜的光吸收曲线,入射光子能量与吸收系数基本呈线性关系,电子直接跃迁不含声子过程,即可判定 SnS<sub>2</sub> 薄膜为直接带隙。

在一定波长入射光的照射下,薄膜的光吸收系数  $\alpha$  与透射率 T 及膜厚 d 的关系为:  $\alpha = \frac{1}{d} \ln(\frac{1}{T})$ , 由此可计算出 SnS<sub>2</sub> 薄膜和掺 Zn 的薄膜光吸收系数都在 10<sup>4</sup> cm<sup>-1</sup> 量级以上。再根据  $\alpha$  与光学带隙 E<sub>g</sub> 关系:  $\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^n$ , 其中 A 是常数取 2 × 10<sup>4</sup>; 直接带隙半导体 n 取 1/2, 通过线性拟合  $(\alpha h\nu)^2 \rightarrow h\nu$  外推

到曲线上的  $\alpha=0$  点,即可得到薄膜的光学带隙 E<sub>g</sub>。

插图 B 给出 SnS<sub>2</sub> 薄膜直接光学带隙为 2.12eV, 掺 Zn 后为 2.07eV。

### 3.5 SnS<sub>2</sub> 薄膜的电学特性

用 TD-3000 半导体导电类型测试仪测出 SnS<sub>2</sub> 薄膜为弱 N 型, SnS<sub>2</sub>:Zn(9 wt %) 薄膜则为较强的 N 型。用 ESCORT-3155A 万用表对 SnS<sub>2</sub> 薄膜的电阻进行测试,相应的数据在表 2 中给出。

从表 2 可见, SnS<sub>2</sub> 薄膜的电阻率很高为 4.97 × 10<sup>2</sup> Ω·cm; SnS<sub>2</sub>:Zn(9wt%) 的电阻率为 2.00 Ω·cm, 比未掺 Zn 时降低了 2 个数量级,说明 9wt% 的掺 Zn 明显改善 SnS<sub>2</sub> 薄膜的导电性。这是因为 Zn<sup>2+</sup> 的直径远小于 SnS<sub>2</sub> 的晶格常数,部分 Zn<sup>2+</sup> 以间隙式存在于晶格中,起到施主杂质的作用,向导带提供导电电子,大大增加了载流子的浓度,使薄膜的电阻率下降;而薄

表 2 SnS<sub>2</sub> 薄膜的电阻率

Table 2 Resistivity of SnS<sub>2</sub> thin films

Film type	Film thickness/cm	Resistance/Ω	Film length/cm	Film width/cm	Resistivity/Ω·cm
SnS <sub>2</sub>	1.88 × 10 <sup>-5</sup>	3.20 × 10 <sup>7</sup>	2.30	1.90	4.97 × 10 <sup>2</sup>
SnS <sub>2</sub> :Zn(9wt%)	2.90 × 10 <sup>-5</sup>	7.70 × 10 <sup>4</sup>	2.40	2.20	2.00 × 10 <sup>0</sup>

膜中还有部分的 Zn<sup>2+</sup> 可能以替位形式替代 Sn<sup>4+</sup>, 此时 Zn 则起受主作用。分析给出在 SnS<sub>2</sub> 薄膜中 Zn 元素同时以间隙或替位两种方式存在, 而宏观测试的电阻是间隙 Zn 或替位 Zn 产生的载流子叠加后的总体效果。

## 5 结 论

1. 采用工艺简单的单源热蒸发法沉积掺杂 SnS<sub>2</sub> 薄膜, 以改善 SnS<sub>2</sub> 薄膜的性能特别是导电性能。本实验筛选出最有效的掺杂元素是 Zn, 最合适的掺 Zn 含量为 9% (wt)。实验将 Sn:S=1:1.08 (wt) 和 Zn (9% wt) 粉末均匀混合沉积薄膜, 经 370℃、20min 热处理得到良好的 SnS<sub>2</sub> 和 SnS<sub>2</sub>:Zn 多晶薄膜。XRD 分析给出 9wt% 的掺 Zn 未改变 SnS<sub>2</sub> 薄膜的晶格结构, 但掺 Zn 后可提高 Sn 的蒸发速率, 从而一定程度上改善了薄膜表面的化学计量比, 使 SnS<sub>2</sub> 薄膜表面的 Sn:S 比, 从 1:1.08 提高到 Sn:S=1:1.55。XPS 分析给出 SnS<sub>2</sub>:Zn (9wt%) 薄膜表面 Zn 的实际含量只有 1.68 wt%, 主要在制备过程中流失较多。

2. 掺 Zn 可明显改善 SnS<sub>2</sub> 薄膜的导电性, 使薄膜的电阻率降低两个数量级, 但不改变薄膜的导电类型。Zn 在 SnS<sub>2</sub> 薄膜中分别以间隙和替位两种形式共存, 而对薄膜的导电性改善起决定作用的是间隙形式的 Zn。

3. 制备的 SnS<sub>2</sub> 薄膜均为直接光学带隙, 掺 Zn 后 SnS<sub>2</sub> 薄膜的本征吸收边发生红移, 光学带隙为 2.07eV, 比纯 SnS<sub>2</sub> 薄膜的减小 0.05eV。

## 参 考 文 献

[1] T. Jiang, G. A. Ozin, A. Verma, et al. Adsorption and sensing properties of microporous layered tin sulfide materials[J]. *J. Mater. Chem.*, 1998, 8:1649.

[2] J. J. Loferski. Theoretical Considerations Governing the Choice of the Optimum Semiconductor for Photovoltaic Solar Energy

Conversion[J]. *J. Appl. Phys.*, 1956, 27(7): 777~784.

[3] Ji Yujie, Zhang Hui, Ma Xiangyang, et al. Single-crystalline SnS<sub>2</sub> nano-belts fabricated by a novel hydrothermal method[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2003, 15 (44): 661~665.

[4] Dongwoo Chun, R. M. Walser, R. W. Bené, et al. Polarity-dependent memory switching in devices with SnSe and SnSe<sub>2</sub> crystals [J]. *Appl. Phys Lett*, 1974, 24 (10):479~481.

[5] 程树英, 黄赐昌, 陈岩清, 等. 光电薄膜 SnS<sub>2</sub> 的制备及其性能[J]. *半导体学报*, 2005, 26 (6) 1173~1117.

[6] N. G. Deshpande a, A. A. Sagade a, Y. G. Gudagea, et al. Growth and characterization of tin disulfide (SnS<sub>2</sub>) thin film deposited by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) technique[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 436:421~426.

[7] M. M. El-Nahass, H. M. Zeyada, M. S. Aziz, et al. Optical properties of thermally evaporated SnS thin films[J]. *Optical Materials*, 2002, 20(3):159~170.

[8] A. Sánchez-Juárez, A. Tiburcio-Silver, A. Ortiz. Fabrication of SnS<sub>2</sub>/SnS heterojunction thin film diodes by plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. *Thin Solid Films*, 2005, 480~481,452~456.

[9] M. M. El-Nahass, H. M. Zeyada, M. S. Aziz, et al. Optical properties of thermally evaporated SnS thin films[J]. *Optical Materials*, 2002, 20(3):159~170.

[10] 马兴泰, 辛宝平, 吴莹, 等. 水油两相体系生物还原—化学沉淀耦合反应制备纳米二硫化锡[J]. *无机化学学报*, 2011, 27(4): 687~691.

[11] 马琳, 李辉, 常焜, 等. 利用水热合成纳米片状 SnS<sub>2</sub> 及其电化学贮放锂性能[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2011, 45(2): 355~363.

[12] Yang Huaming, Huang Chenghuan, Su Xiaohui. Synthesis of homogeneous PVP-capped SnS<sub>2</sub> submicron particles via microwave irradiation[J]. *Materials Letters*, 2006, 60:3714~3717.

[13] 杨晶, 李健, 白海平, 等. SnS<sub>2</sub> 纳米薄膜的制备及结构和光学特性[J]. *材料科学与工程学报*, 2009, 27(1):83~86.

[14] 葛其明, 刘学建, 黄智勇, 等. LPCVD 氮化硅薄膜的化学组成[J]. *材料科学与工程学报*, 2006, 24(2):192~195.

[15] 罗仲宽, 李明, 刘剑洪, 等. 氧化镉薄膜的制备与性质研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2003, 21(6): 06~808.

## (上接第 571 页)

[11] 涂善东. 高温结构完整性原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[12] Stewart, C. M.. Tertiary Creep Damage Modeling of a Transversely Isotropic Ni-Based Superalloy [D]. Master's Thesis, University of Central Florida, Orlando, FL, 2009.

[13] Stewart, C. M., Gordon, A. P.. Analytical Method to Determine the Tertiary Creep Damage Constants of the Kachanov-Rabotnov Constitutive Model[C]. Proceedings of the 2010 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Vancouver, British Columbia, 2010, Nov 12 ~

18th.

[14] 李海燕, 聂景旭. 粘塑性损伤统一本构模型中材料常数的一种确定方法[J]. *航空动力学报*, 2003, 18 (3): 388~393.

[15] 倪永中, 徐鸿. 耦合蠕变损伤的 Chaboche 粘塑性模型的研究[J]. *固体力学学报*, 2009, 30(1):79~83.

[16] 徐鸿, 倪永中, 王树东. 30CrMoNiV5-11 转子钢疲劳-蠕变交互行为实验及模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(32): 88~91.

[17] 束国刚, 赵彦芬, 薛飞, 等. P91 钢蠕变损伤试验研究与数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(23):103~107.