

# Sb 掺杂 ZnTe 薄膜结构及其光电性能

## Structure and Photoelectric Properties of Sb-doped ZnTe Thin Films

邹 凯<sup>1,2</sup>, 李蓉萍<sup>1,2</sup>, 刘永生<sup>1,2</sup>, 田 磊<sup>1</sup>, 冯 松<sup>1</sup>

(1 内蒙古大学 物理科学与技术学院, 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, 呼和浩特 010021)

ZOU Kai<sup>1,2</sup>, LI Rong-ping<sup>1,2</sup>, LIU Yong-sheng<sup>1,2</sup>, TIAN Lei<sup>1</sup>, FENG Song<sup>1</sup>

(1 School of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2 Key Laboratory of Semiconductor Photovoltaic Technology at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010021, China)

**摘要:** 采用真空蒸发工艺在玻璃衬底上制备了 ZnTe 和掺 Sb-ZnTe 多晶薄膜, 并在氮气气氛中对薄膜进行热处理。分别利用 XRD、SEM、紫外-可见分光光度计、霍尔效应测试仪对薄膜的晶体结构、表面形貌、元素组成以及光学、电学性能进行表征, 研究 Sb 掺杂量和热处理对薄膜性能的影响。结果表明: 未掺杂薄膜为沿 (111) 晶面择优生长的立方相闪锌矿结构, 导电类型为 P 型。Sb 掺杂并未改变 ZnTe 薄膜晶体结构和导电类型, 但衍射峰强度降低; Sb 含量直接影响着 Sb 在 ZnTe 中的存在形式, 掺 Sb 后抑制了薄膜中 Te 和 Zn 的结合, 使薄膜中 Te 的含量增加; 室温下薄膜的光学透过率和光学带隙取决于掺 Sb 浓度和退火温度, 并且掺 Sb 后 ZnTe 薄膜的载流子浓度显著增加, 导电能力明显增强。

**关键词:** ZnTe 薄膜; Sb 掺杂; 真空蒸发; 光学性能; 电学性能

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.03.007

**中图分类号:** O484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)03-0035-07

**Abstract:** ZnTe and Sb-ZnTe polycrystalline thin films were prepared by vacuum evaporation on glass substrates and annealed in nitrogen environment. By using XRD, SEM, UV-VIS spectrophotometer and Hall effect measurements, the crystal structure, surface morphology, elemental composition, optical and electrical properties of the thin films were characterized, respectively, and the effects of Sb-doping amounts and heat treatment on the performance of the films were studied. The results show that pure ZnTe film is the cubic structure and preferentially orients in the (111) direction and its conductive type is P type. Sb-doping does not change the structure and conductive type of the films, but the intensity of diffraction peaks is lower than that of pure ZnTe films; the concentration of Sb directly affects the form of Sb in the ZnTe. Sb doping inhibits the combination of Te and Zn, and leads to the increase of Te in the films. In addition, the optical transmittance and optical band gap of the films depend on the concentration of Sb and annealing temperature, and Sb-doping can also result in an obvious increasing of carrier concentration and reduce the resistivity, which significantly enhance the conductivity of the films.

**Key words:** ZnTe thin film; Sb-doped; vacuum evaporation; optical property; electrical property

ZnTe 是一种典型的 II-VI 族直接带隙半导体化合物, 室温下禁带宽度约为 2.26 eV<sup>[1]</sup>。由于其较宽的能隙、低的电子亲和势、高的光电转换效率和可实现重掺杂等特点而成为很有发展前景的光电功能材料, 在 LED、光电探测、光伏电池等方面具有广泛的应用价值<sup>[2,3]</sup>。近年来关于 CdTe 太阳电池的研究表明, ZnTe 和 CdTe 之间的价带偏移小, 只有 0.1 eV, 是制

作高转换效率 CdTe 太阳电池背接触层的理想材料<sup>[4]</sup>, 而且 ZnTe 在多结叠层太阳能电池领域也具有潜在的应用价值<sup>[5]</sup>。作为太阳电池的背接触层材料, ZnTe 薄膜除了质量要好, 即结晶度高、厚度均匀以外, 还应该具有较低的缺陷态密度、适当的费米能级和一定的电阻率。自从 Meyers 等<sup>[6]</sup>提出使用重掺杂 p 型 ZnTe 作为 CdTe 吸收层与金属电极间的背接触层

以来,许多研究者对 ZnTe 薄膜的制备方法和性质进行了研究,同时如何选取适当的掺杂元素制备结构和光电性能优异的 ZnTe 薄膜也成为人们研究的重点。Aqili 等<sup>[7]</sup>将蒸发法制备的 ZnTe 薄膜在 AgNO<sub>3</sub> 溶液中浸泡,制备了 Ag 掺杂 ZnTe 薄膜,并对其结构和电学性能进行了研究。Li 等<sup>[8]</sup>和 Huo 等<sup>[9]</sup>的研究表明 Cu 和 N 掺杂可以有效提高 ZnTe 的电导率,但过量的 Cu 会扩散到 CdTe 层中并引入缺陷,造成太阳能电池性能的不稳定,而 N 掺杂需要用到有毒的氨(NH<sub>3</sub>),这将不可避免地增加工艺的复杂性,从而限制了它的应用。利用 MBE 制备 I 掺杂、Cl 掺杂、和 Cr 掺杂 ZnTe 外延层的研究也有报道<sup>[10-12]</sup>,但 MBE 技术对真空度要求较高,且生长缓慢、制造成本高,因此不适合大规模生产。

有研究表明金属元素 Sb 掺杂可以有效改善薄膜材料的光学和电学性能<sup>[13,14]</sup>,而且 Sb 在 ZnTe 中可以形成浅受主能级,是高效的掺杂剂<sup>[15]</sup>,因此在本工作选择 Sb 作为掺杂元素,利用工艺简单的真空蒸发法制备 Sb 掺杂 ZnTe 薄膜,并对其结构和光电性能等进行研究,以期制备出光电性能优异的 ZnTe 薄膜,为提高 CdTe 太阳能电池性能提供实验依据。

1 实验

1.1 ZnTe 薄膜的制备和性能测试

首先将高纯(5N)ZnTe 和 Sb 单质按照 Sb:ZnTe 原子配比 3%,5%,7%,9% 配制混合,并放入玛瑙研钵中进行充分研磨、粉化,然后置于真空蒸发室的钨舟中。再将清洗干净并用高纯氮气烘干的玻璃衬底放入蒸发室内,抽真空到  $5.0 \times 10^{-4}$  Pa 以上时进行 ZnTe 薄膜的蒸镀。实验中衬底的温度为室温,衬底转速为 6r/min,实验过程中用两台石英膜厚监控仪在线监控 ZnTe 的蒸发速率及其薄膜厚度。调节蒸发电流使

ZnTe 的沉积速率控制在 0.3~0.4nm/s,沉积厚度约为 250nm。将实验制备好的薄膜样品置于自动控温扩散炉中,先对装置抽真空,以排去炉内空气,然后通入高纯 N<sub>2</sub>,并保持一定氮气流量,快速升温到所需温度,对样品进行热处理。热处理温度分别为 200,250,300,350℃,热处理时间为 20min。

采用 PW-1830/40 型 X 射线衍射仪对样品的晶体结构进行测试,辐射源为 CuK<sub>α</sub> 线;样品表面形貌利用 S-4800 型冷场发射式扫描电子显微镜进行观察,并结合 EDX 能谱对样品进行成分分析;薄膜的光学透过率采用 Lambda-750S 紫外-可见分光光度计进行测试;利用 HSM-3000 型霍尔效应测试仪对薄膜的电学性能进行表征。

2 结果与讨论

2.1 薄膜的物相结构分析

图 1(a)为热处理温度  $T=300^{\circ}\text{C}$  时不同浓度 Sb 掺杂 ZnTe 薄膜的 XRD 图谱。由图可知,未掺杂 ZnTe 薄膜样品为立方晶系闪锌矿结构,其三强峰分别对应(111),(220),(311)晶面,XRD 的择优取向为(111)晶面,同时薄膜中还出现了(200),(222),(400),(331),(420)晶面的衍射峰。掺 Sb 并未改变 ZnTe 薄膜的晶体结构,薄膜仍为沿(111)晶面择优生长的立方相闪锌矿结构。但随着 Sb 掺杂量的增加,样品的三强峰逐渐减弱,并出现了其他物相的衍射峰,例如掺杂浓度为 3%的样品中出现了 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Sb<sub>0.405</sub>Te<sub>0.595</sub> 的衍射峰,而掺杂浓度为 5%的样品中则只出现了 Sb<sub>0.405</sub>Te<sub>0.595</sub> 的衍射峰,没有 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的衍射峰出现。这表明掺杂量不同时,Sb 在 ZnTe 中将以不同的化合物形式存在,掺杂浓度较低时,Sb 在 ZnTe 中形成氧化物和 Sb,Te 化合物,掺杂浓度较高时则主要形成 Sb、Te 化合物。这可能是因为 Sb 含量较少时,Sb 原子大

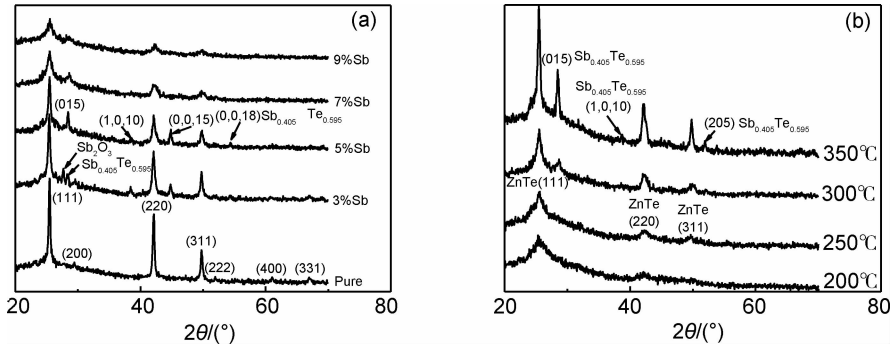


图 1 ZnTe 薄膜的 XRD 图谱 (a)Sb 掺杂浓度的影响;(b)热处理温度的影响

Fig. 1 XRD patterns of ZnTe thin films (a)effect of the concentration of Sb;(b)effect of the heat treatment temperature

部分分散在薄膜表面或以未电离状态存在于晶界内, 比较容易氧化形成  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ 。由 XRD 图谱还可以看出随着 Sb 掺杂浓度增加衍射峰的宽度增加并出现偏移现象, 而且样品晶格常数的计算结果也随着 Sb 掺杂浓度的增加而变大。因此随着掺杂量的增加 Sb 原子还有可能进入晶粒内部取代 Zn 原子, 或与薄膜中多余的 Te 原子形成 Sb、Te 化合物, 从而导致 Sb 在薄膜中的不同存在形式。

根据谢乐公式计算了薄膜样品的晶粒尺寸, 计算结果表明随着 Sb 掺杂浓度的增加, 晶粒尺寸逐渐减小。原因可能是掺 Sb 后薄膜再结晶过程中杂质原子会阻碍沉积原子的扩散与岛的联并速度, 所以样品晶粒尺寸比未掺杂时变小, 同时因为 Sb, Zn 的离子半径不同, 因而 Sb 置换 Zn 后将会导致晶格发生畸变, 使薄膜的结晶程度变差, (111) 晶面择优取向程度降低, 立方相变弱。

在图 1(b) 中则给出了  $\text{ZnTe}(\text{Sb}7\%)$  薄膜样品的 XRD 图谱, 热处理温度分别为 200, 250, 300, 350℃。由图可见不同热处理温度下样品的物相结构均为立方晶系闪锌矿结构, 热处理温度较低时, 薄膜结晶程度较

差, 随着热处理温度升高, ZnTe 薄膜的结晶程度提高, 衍射峰增强, 并沿 (111) 晶面择优生长。在热处理温度 300℃ 时, 薄膜出现  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  的物相。当热处理温度为 350℃ 时, ZnTe 衍射峰明显增强, 同时  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  的衍射峰也增强。由谢乐公式计算的样品晶粒尺寸也随着热处理温度的增加而呈现增大的趋势。以上分析表明适当的热处理有助于晶粒的生长, 可以使缺陷得到不同程度的消除, 提高薄膜的结晶度, 而且提高热处理温度还有助于促进薄膜中 Sb 和 Te 的结合。并且从后面的成分测试及电学性能测试可以发现 Sb, Te 化合物的偏析可以显著降低薄膜的电阻率。

2.2 薄膜的表面形貌

薄膜的表面形貌是影响其性能的重要因素, 利用扫描电子显微镜得到了不同 Sb 掺杂浓度 ZnTe 薄膜的 SEM 照片, 见图 2。通过 SEM 测试可以看出用蒸发法制备的 ZnTe 和掺 Sb-ZnTe 薄膜表面为颗粒状, 颗粒度均较小, 未掺杂时薄膜表面平整致密, 随着 Sb 含量增加薄膜平整性变差, 表面有颗粒析出造成局部团簇现象, 而掺 Sb 浓度为 7% 时, 薄膜表面较掺杂浓度 3% 与 5% 的样品更加致密平整。

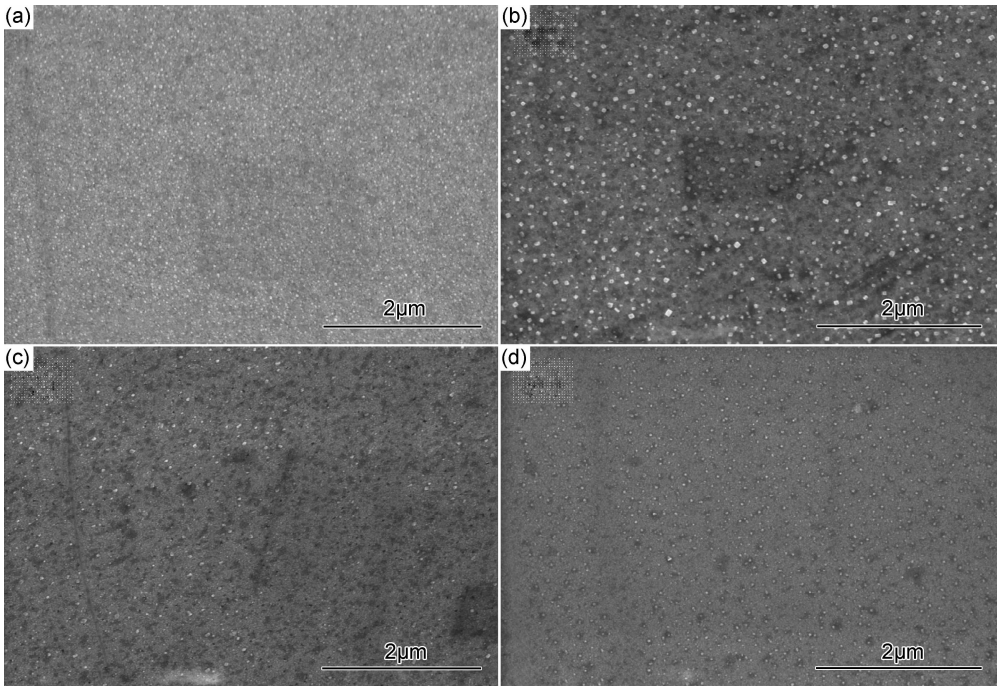


图 2 ZnTe 薄膜的 SEM 照片 (a) 纯 ZnTe; (b) 3% Sb; (c) 5% Sb; (d) 7% Sb  
Fig. 2 SEM images of ZnTe thin films (a) pure ZnTe; (b) 3% Sb; (c) 5% Sb; (d) 7% Sb

2.3 薄膜的 EDX 成分分析

元素组分也是引起 ZnTe 薄膜结构变化的重要因素。图 3 分别给出了纯 ZnTe 和  $\text{ZnTe}(\text{Sb}3\%)$  薄膜的 EDX 能谱图, 可以看出, 样品中除了 Zn, Te, Sb 外, 还出现了 O, Si, Na, Mg 等元素。分析认为, O 来自于空

气中的吸附氧和玻璃衬底, 而能谱中的 Si, Na, Mg 则是玻璃衬底的信号。

在表 1 中列出了热处理温度  $T=300^\circ\text{C}$  时不同浓度 Sb 掺杂 ZnTe 薄膜中各元素的原子分数。EDX 测试结果显示所有薄膜样品均富 Te, 这可能是因为

Te 的饱和蒸气压比 Zn 低,使真空蒸发沉积的薄膜缺失 Zn 造成的。通过对比发现 Sb 掺杂 ZnTe 薄膜中,Te 与 Zn 的原子比均比未掺杂 ZnTe 薄膜更偏离 Te 和 Zn 的化学计量比。这说明 Sb 的掺入可以抑制薄膜中 Te 和 Zn 的结合,使薄膜富 Te 情况更加明显。

但是对于 ZnTe 而言富 Te 有助于降低薄膜的电阻率,改善其电学性能<sup>[16]</sup>。这个结果在后面的电阻率测试中也得到了验证。所以富 Te 的 ZnTe 薄膜对于作为 n-CdS/p-CdTe 异质结太阳电池的背接触层是非常有利的。

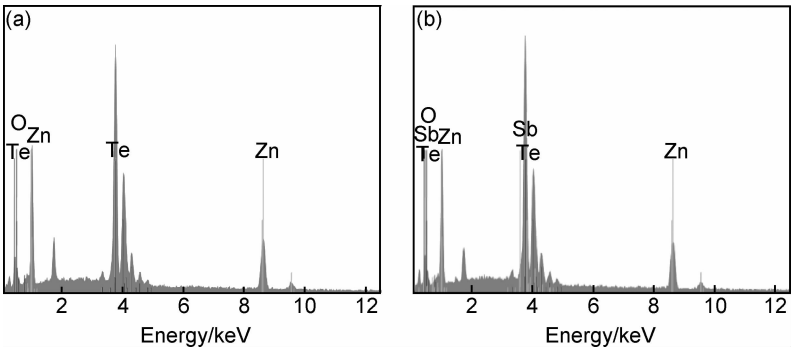


图 3 ZnTe 薄膜的 EDX 能谱图 (a) 纯 ZnTe;(b) 3% Sb  
Fig. 3 EDX spectra of ZnTe thin films (a) pure ZnTe;(b) 3% Sb

表 1 薄膜中各元素的原子分数

Sample	Te/%	Zn/%	Sb/%	Te:Zn
ZnTe (pure)	53.82	46.18		1:0.86
ZnTe (3% Sb)	54.88	41.88	3.24	1:0.76
ZnTe (5% Sb)	51.48	42.56	5.98	1:0.82
ZnTe (7% Sb)	51.20	39.50	9.30	1:0.77
ZnTe (9% Sb)	54.69	33.57	11.74	1:0.61

2.4 薄膜的光学性质

2.4.1 ZnTe 薄膜的透射光谱

利用紫外可见分光光度计对薄膜透过率进行了测试,图 4(a)为热处理温度 300℃ 时不同 Sb 掺杂量的 ZnTe 薄膜透射光谱。由图可见,未掺杂 ZnTe 薄膜在可见光范围内透过率较高,随着掺杂浓度提高,薄膜的透过率明显降低,吸收限红移。而光波透过厚度为  $d$  的薄膜样品时,其透射系数与反射系数之间的关系

为<sup>[19]</sup>:

$$T = (1 - R)^2 \exp(\alpha d) \tag{1}$$

其中,  $T$  为薄膜透过率,  $d$  为薄膜厚度,  $R$  为反射率,  $\alpha$  为吸收系数。在薄膜吸收边附近,  $R$  一般很小,它不会影响吸收边的位置,可以近似认为  $R=0$ 。则有

$$\alpha = -\frac{\ln T}{d} \tag{2}$$

所以薄膜的透过率降低将导致吸收系数增加。因此 Sb 的掺杂量直接影响着 ZnTe 薄膜的光学特性, Sb 的掺杂量越高,薄膜的光吸收特性越好。分析图 4(b)不同热处理温度下 ZnTe(7% Sb)样品的透射光谱可以看出,随着热处理温度升高,薄膜的透过率逐渐降低,而且其他掺杂浓度的样品也存在类似的现象,这与文献[17]报道结果相似。表明 Sb 掺杂浓度一定时,提高热处理温度也可以增加薄膜的光吸收特性。

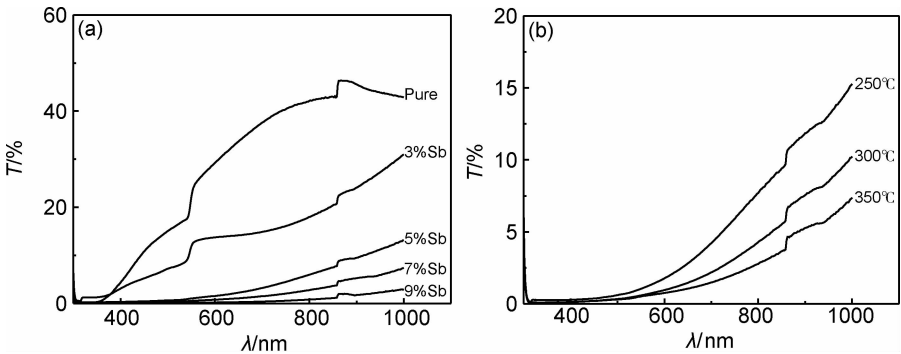


图 4 薄膜的透射光谱 (a) Sb 掺杂浓度的影响;(b) 热处理温度的影响  
Fig. 4 Transmittance spectra of the films (a) effect of the concentration of Sb;  
(b) effect of the heat treatment temperature

2.4.2 样品的光学带隙

ZnTe 是直接带隙半导体材料<sup>[18]</sup>,其吸收系数  $\alpha$  可根据以下公式计算:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$$

(3)

其中,  $A$  为常数,  $E_g$  是能隙宽度,  $h\nu$  为光子能量。在已知薄膜厚度的情况下,从薄膜的透射光谱可以得到样品的吸收系数与波长  $\lambda$ (或能量  $h\nu$ ) 的关系。图 5(a) 为不同 Sb 掺杂量 ZnTe 薄膜的  $(\alpha h\nu)^2$  与  $h\nu$  关系图。拟合光吸收边在横轴  $h\nu$  上的截距就是样品光学带隙宽度  $E_g$ 。从图 5(a) 中可以看出对不同掺杂浓度的样品在 300℃ 条件下进行热处理时,未掺 Sb 的 ZnTe 薄膜的带隙约为 2.22eV,小于单晶的 2.26eV。ZnTe(3%

Sb), ZnTe(5% Sb), ZnTe(7% Sb), ZnTe(9% Sb) 各样品的光学带隙分别为 2.16, 1.94, 1.85, 1.66eV, 随着掺 Sb 掺杂浓度的增加,样品的光学带隙逐渐减小。这可能是因为 Sb 含量增加后, Sb 原子占据 ZnTe 晶格中 Zn 位置形成 Sb<sub>Zn</sub> 缺陷的几率增加。而 Sb, Zn 的离子半径分别为 0.076nm 和 0.074nm, Sb 置换 Zn 后将会导致晶格发生畸变,引起薄膜的光学吸收特性发生变化,因此随着 Sb 掺杂浓度的增加薄膜透过率降低、光学带隙减小。而对于不同热处理温度下的 ZnTe (7% Sb) 样品,从图 5(b) 可以看出随着热处理温度增加样品的光学带隙也逐渐变小,这表明热处理也可以影响 ZnTe 薄膜的光学带隙,但影响并不明显。

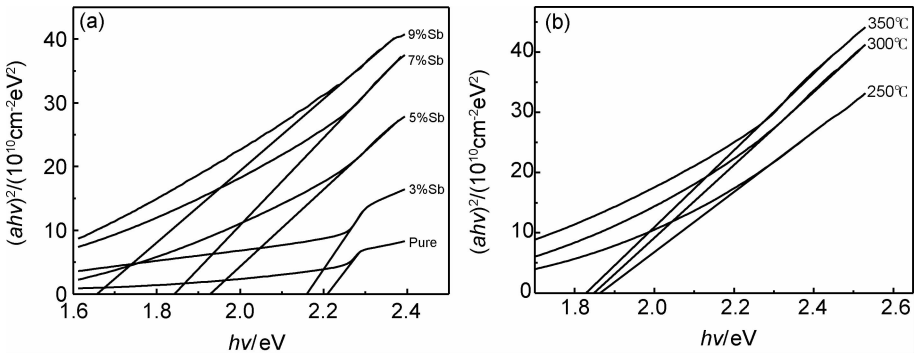


图 5 薄膜样品的光学带隙 (a)Sb 掺杂浓度的影响;(b)热处理温度的影响  
Fig. 5 Optical band gap of the films (a)effect of the concentration of Sb;(b)effect of the heat treatment temperature

2.5 薄膜的电学性能

用霍尔效应测量系统对实验制备的 ZnTe 薄膜样品在室温下的导电类型、电阻率、载流子迁移率和载流子浓度进行了测量,测量结果见表 2 和表 3。测试中所有薄膜样品均显示 P 型,这表明 Sb 掺杂并未改变薄膜的导电类型。从表 2 可以看出,热处理温度为 300℃ 时,未掺杂 ZnTe 样品的载流子浓度为  $6.617 \times$

$10^{15}/\text{cm}^3$ ,随着掺杂浓度增加,样品的载流子浓度显著增加,并呈现先增大后减小的规律,ZnTe(7% Sb) 的样品达到  $1.418 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ,提高了 5 个数量级, Sb 含量再增加时,载流子浓度反而下降,并且薄膜的电阻率随掺杂浓度增加也明显降低,而样品迁移率的变化却并不明显。从表 3 可以看出对于 ZnTe(7% Sb) 的薄膜样品,随热处理温度升高,薄膜的电阻率呈现先减小后

表 2 热处理温度 300℃ 时不同 Sb 浓度掺杂 ZnTe 薄膜的电学参数  
Table 2 Electrical parameters of different Sb-doped ZnTe thin films treated at 300℃

Sample	Carrier concentration/ $\text{cm}^{-3}$	Carrier mobility/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	Resistivity/ $(\Omega \cdot \text{cm})$
ZnTe(pure)	$6.617 \times 10^{15}$	1.248	$7.558 \times 10^2$
ZnTe(3% Sb)	$1.374 \times 10^{18}$	1.220	$3.721 \times 10^0$
ZnTe(5% Sb)	$5.710 \times 10^{18}$	7.764	$1.408 \times 10^{-1}$
ZnTe(7% Sb)	$1.418 \times 10^{20}$	1.091	$4.036 \times 10^{-2}$
ZnTe(9% Sb)	$6.102 \times 10^{19}$	6.918	$1.479 \times 10^{-2}$

表 3 不同热处理温度下 ZnTe(7% Sb) 薄膜的电学参数  
Table 3 Electrical parameters of the ZnTe(Sb7%) films treated at different temperatures

Heat treatment temperature/℃	Carrier concentration/ $\text{cm}^{-3}$	Carrier mobility/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	Resistivity/ $(\Omega \cdot \text{cm})$
250	$2.429 \times 10^{19}$	2.104	$1.222 \times 10^{-1}$
300	$1.418 \times 10^{20}$	1.091	$4.036 \times 10^{-2}$
350	$8.235 \times 10^{19}$	3.805	$1.992 \times 10^{-2}$

增大的趋势,而载流子迁移率则先减小后增大,但变化不大。

电阻率  $\rho$  的计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p} \quad (4)$$

其中  $n$ 、 $p$  分别为电子和空穴浓度,  $\mu_n$ 、 $\mu_p$  分别为电子和空穴迁移率。由于实验中制备的 ZnTe 薄膜均为 P 型,  $p \gg n$ , 从而上式中第一项可忽略。因此 ZnTe 薄膜电阻率主要由空穴浓度和空穴迁移率决定。在室温下本征激发的影响不是很大,载流子主要由杂质电离提供。而测试结果也显示出,在室温下掺杂浓度和热处理温度对薄膜的载流子迁移率影响并不大,因此 ZnTe 薄膜电阻率的降低主要是由于掺 Sb 后薄膜中杂质 Sb 的电离使样品中空穴浓度增加所致。并且由前面的 XRD 分析可知,提高热处理温度后薄膜中化合物  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  的衍射峰明显增强,说明提高热处理温度也有助于促进 Te 与 Sb 的化合,使薄膜中 Sb 原子的电离呈度增加,从而使样品中载流子浓度增大,降低薄膜电阻率。以上分析表明,Sb 掺杂量和热处理温度都对薄膜的电学性能有影响,因此选择适当的掺杂浓度和热处理温度可以改变薄膜的电学特性,对于 ZnTe 薄膜而言,要获得较低的电阻率,应选择较高的掺杂浓度并且在较高温度下对薄膜进行热处理。

### 3 结论

(1) 采用真空蒸发法制备的 ZnTe 和掺 Sb-ZnTe 薄膜均为立方晶系闪锌矿结构,择优取向为 (111) 晶面,Sb 掺杂并未改变薄膜的物相结构,但衍射峰强度降低。

(2) 掺 Sb 后薄膜的晶粒尺寸减小,表面粗糙呈度增加。并且 Sb 掺杂抑制了薄膜中 Te 和 Zn 的结合,使薄膜富 Te 情况更加严重,而富 Te 将有助于降低薄膜电阻率。

(3) 薄膜的光学透过率和光学带隙取决于掺 Sb 浓度和热处理温度,随着掺 Sb 浓度和热处理温度增加,薄膜透过率降低,光学带隙减小,但热处理温度对光学带隙的影响并不大。

(4) 对于 ZnTe 薄膜而言,Sb 掺杂和热处理均未改变薄膜的导电类型,但掺杂明显影响了薄膜的电学性能,要获得较低的电阻率,应选择较高的掺杂浓度并将薄膜在较高温度下进行热处理。

### 参考文献

[1] ACHARYA K P, ERLACHER A, ULLRICH B, et al. Optoe-

- lectronic properties of ZnTe/Si heterostructures formed by nano-second laser deposition at different Nd:YAG laser lines[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(7-8): 4066-4069.
- [2] DAVAMI K, KANG D, LEE J S, et al. Synthesis of ZnTe nanostructures by vapor-liquid-solid technique[J]. Chem Phys Lett, 2011, 507(1-3): 208.
- [3] GUO Q, KUME Y, FUKUHARA Y, et al. Observation of ultra-broadband terahertz emission from ZnTe films grown by metalorganic vapor epitaxy[J]. Solid State Commun, 2007, 141(4): 188-191.
- [4] SPATH B, FRITSCHÉ J, SAUBERLICH F, et al. Studies of sputtered ZnTe films as interlayer for the CdTe thin film solar cell [J]. Thin Solid Films, 2005, 480: 204-207.
- [5] FENG L H, WU L L, LEI Z, et al. Studies of key technologies for large area CdTe thin film solar cells[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(15): 5792-5797.
- [6] MEYERS P V. Polycrystalline Cadmium Telluride n-i-p Solar Cell[R]. SERL Subcontract Report ZL-7-06031-2, Final Report, Solar Energy Research Institute, 1990.
- [7] AQILI A K S, SALEH A J, ALI Z, et al. Ag doped ZnTe films prepared by closed space sublimation and an ion exchange Process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 520: 83-88.
- [8] LI S Y, JIANG Y, WU D, et al. Enhanced p-type conductivity of ZnTe nanoribbons by nitrogen doping[J]. J Phys Chem C, 2010, 114(17), 7980-7985.
- [9] HUO H B, DAI L, LIU C, et al. Electrical properties of Cu doped p-ZnTe nanowires[J]. Nanotechnology, 2006, 17(24): 5912-5915.
- [10] TANAKA T, HAYASHIDA K, NISHIO M, et al. Photoluminescence of iodine-doped ZnTe homoepitaxial layer grown by metalorganic vapor phase epitaxy[J]. J Appl Phys, 2003, 93(9): 5302-5306.
- [11] TANAKA T, HAYASHIDA K, NISHIO M, et al. Photoluminescence of Cl-doped ZnTe epitaxial layer grown by atmospheric pressure metalorganic vapor phase epitaxy[J]. J Appl Phys, 2003, 94(3): 1527-1530.
- [12] LUO M, VANMIL B L, TOMPKINS R P, et al. Photoluminescence of ZnTe and ZnTe:Cr grown by molecular-beam epitaxy[J]. J Appl Phys, 2005, 97(1): 013518.
- [13] 李蓉萍, 李琦. 掺 Sb-CdTe 薄膜的结构及其光学特性研究[J]. 真空科学与技术, 2002, 22(6): 474-476.
- LI R P, LI Q. Properties of Sb-doped CdTe thin films[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2002, 22(6): 474-476.
- [14] WU D, JIANG Y, ZANG Y G, et al. Device structure-dependent field-effect and photoresponse performances of p-type ZnTe: Sb nanoribbons[J]. J Mater Chem, 2012, 22(13): 6206-6212.
- [15] BARATI A, KLEIN A, JAEGERMANN W, et al. Deposition and characterization of highly p-type antimony doped ZnTe thin films[J]. Thin Solid Films, 2009, 517(7): 2149-2152.
- [16] MAHALINGAM T, JOHN V S, RAJENDRAN S, et al. Annealing studies of electrodeposited zinc telluride thin films[J].

Surface and Coatings Technology, 2002, 155(2-3): 245-249.

[17] 蔡道林,郑家贵,冯良桓,等. ZnTe 薄膜特性研究[J]. 材料科学与工艺,2004,12(5):479-482.

CAI D L, ZHENG J G, FENG L H, et al. Study the characteristics of ZnTe films[J]. Materials Science and Technology, 2004,12(5):479-482.

[18] RAO G K, BANGERA K V, SHIVAKUMAR G K. Studies on the photoconductivity of vacuum deposited ZnTe thin films[J]. Materials Research Bulletin, 2010, 45 (10): 1357-1360.

[19] 刘恩科,朱秉升,罗晋生,等. 半导体物理学[M]. 4 版. 北京:国防工业出版社, 2010. 106-108, 256-258.

LIU E K, ZHU B S, LUO J S, et al. Semiconductor Physics

[M]. Forth ed. Beijing:National Defense Industry Press, 2010. 106-108, 256-258.

**基金项目:**内蒙古自治区教育厅项目(NJ09006)

**收稿日期:**2013-04-11;**修订日期:**2014-04-28

**通讯作者:**邹凯(1988-),男,硕士,主要从事半导体材料及太阳能电池方面的研究,联系地址:内蒙古呼和浩特市如意开发新区沙尔沁工业园内蒙古日月太阳能科技有限责任公司(010111), E-mail: zoukai19880607@163.com