

## $\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜的共蒸发法制备及其表征

束 青, 武莉莉, 冯良桓, 王文武, 曹五星, 张静全, 李 卫, 黎 兵

(四川大学 材料科学与工程学院, 成都 610064)

**摘 要:** 采用  $\text{CdTe}$  和  $\text{Te}$  双源共蒸发的方法, 调控  $\text{CdTe}$  和  $\text{Te}$  源的蒸发速率, 首次制备出一系列不同  $x$  组分的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  二元化合物薄膜, 并在  $\text{N}_2$  气氛下进行  $185^\circ\text{C}$  退火处理。通过 XRD、SEM、紫外-可见吸收光谱分析及暗电导率-温度关系对  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的结构、形貌、光学和电学性质进行表征。紫外-可见吸收光谱分析表明, 不同  $x$  组分的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜, 其禁带宽度可在  $0.99\sim 1.46\text{ eV}$  之间变化, 随着  $x$  值从  $0.8$  减小到  $0.2$ , 吸收边向长波方向移动, 而且透过率也显著下降。XRD 结果表明,  $x$  值小于  $0.6$  时, 刚沉积的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜为非晶相; 随着  $x$  的值逐渐靠近  $1$ , 刚沉积的薄膜明显结晶, 沿  $\text{CdTe}(111)$  方向择优生长, 退火处理促使薄膜从非晶转变为多晶。 $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的导电类型为  $p$  型, 其暗电导率随温度的上升而增大, 当温度继续升高至临界点时, 薄膜暗电导率-温度关系出现反常。这些结果表明,  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜将有望用于  $\text{CdTe}$  薄膜太阳能电池以拓展电池的长波光谱响应。

**关 键 词:**  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜; 双源共蒸发;  $\text{CdTe}$  太阳电池

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

## Preparation and Characterization of $\text{Cd}_x\text{Te}$ Thin Films Deposited by Co-evaporation

SHU Qing, WU Li-Li, FENG Liang-Huan, WANG Wen-Wu, CAO Wu-Xing, ZHANG Jing-Quan, LI Wei, LI Bing

(College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:**  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films with different  $x$  values were deposited for the first time through controlling evaporation rates of  $\text{CdTe}$  and  $\text{Te}$  powder by vacuum co-evaporation. Then the films were annealed in  $\text{N}_2$  atmosphere at  $185^\circ\text{C}$ . The morphological, structural, optical, and electrical properties of the  $\text{Cd}_x\text{Te}$  films were investigated by X ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), UV-visible absorption spectrum and temperature dependence of the dark conductivity. UV-visible absorption spectrum demonstrates that energy band gaps ( $E_g$ ) of different  $\text{Cd}_x\text{Te}$  films change from  $0.99\text{ eV}$  to  $1.46\text{ eV}$ . The absorption edges of different  $\text{Cd}_x\text{Te}$  films move towards longer wavelength and their transmittances reduce dramatically as the  $x$  value decreases from  $0.8$  to  $0.2$ . XRD shows that as-deposited  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films are amorphous when value of  $x$  is less than  $0.6$ . Otherwise,  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films are crystalline whose  $\text{CdTe}$  phase with preferential in  $(111)$  direction while value of  $x$  is approaching  $1$ . The result indicates that annealing treatment is helpful for the films shifting from amorphous to polycrystalline. All the films exhibit  $p$ -type conductivity and the conductivity increases firstly as temperature rises. But it becomes abnormal while the temperature reaches a certain point. Data from this research suggest that  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films can potentially be used for  $\text{CdTe}$  thin film solar cells to improve the long wavelength response.

**Key words:**  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films; co-evaporation;  $\text{CdTe}$  solar cells

收稿日期: 2015-03-26; 收到修改稿日期: 2015-05-06

基金项目: 国家 973 计划项目(2011CBA00708) National 973 Project of China(2011CBA00708)

作者简介: 束 青(1990-), 女, 硕士研究生. E-mail: shuqing2011@126.com

通讯作者: 武莉莉, 教授. E-mail: wulily77@163.com

碲化镉(CdTe)多晶薄膜太阳能电池以其结构简单、制备成本低、易于规模化生产等优点<sup>[1-3]</sup>成为太阳能电池领域研究的热点<sup>[4]</sup>。目前, CdTe 太阳能电池的最高效率已由 2011 年的 17.3%<sup>[5]</sup>提升到了 21.5%<sup>[6]</sup>。针对提高 CdTe 电池性能方面的研究, 众多科研工作者采用了不同的方法, 比如在提高电池短波响应方面, 减薄 CdS 窗口层厚度<sup>[7]</sup>、采用 ZnS/CdS 复合窗口层<sup>[8-9]</sup>等, 以减少光子入射损失, 使更多的光子能够到达 CdTe 层被吸收, 从而提高电池短路电流密度。另一方面, CdTe 的禁带宽度约为 1.5 eV<sup>[10]</sup>, 只有波长小于 850 nm 的光子才能够被其吸收并产生光生载流子, 长波方向的光子则以热的形式损失。为了利用长波区域的光子, 有人提出在 CdTe 电池模型的基础上引入禁带宽度小于 1.5 eV 的膜层。Paudel<sup>[11]</sup> 和 Josell<sup>[12]</sup>等采用 CdSe/CdTe 的电池结构既提高了短波区域的光吸收, 也扩展了长波段的光谱响应, 同时提高了 CdTe 电池的  $J_{SC}$  和  $V_{OC}$ 。CdSe 的引入是目前文献报道的关于提高长波光谱响应的常用方法, 本研究则试图寻找新的薄膜材料, 以替代 CdSe 层实现长波区域光子的利用。

CdTe 的禁带宽度为 1.5 eV, 而 Te 的禁带宽度仅为 0.33 eV, 如果能调制 CdTe 中 Te 和 Cd 的组分, 形成  $Cd_xTe$  薄膜, 其带隙宽度可以在 0.33~1.5 eV 之间变化, 这种薄膜应用于 CdTe 太阳能电池中, 将有可能拓展长波光谱响应。目前,  $Cd_xTe$  薄膜材料的相关信息在国内外均未见相关报道。 $Cd_xTe$  薄膜成分简单只有 Cd、Te 两种元素, 应用于 CdTe 太阳能电池中不会引入新的杂质元素, 影响 p-n 结特性; 而且采用共蒸发 CdTe 和 Te 所制备的二元化合物薄膜比近空间升华法制备的 CdTe 薄膜有更高的载流子浓度<sup>[13]</sup>。

此外, 考虑到 Te 的熔点较低(450℃), 而 CdTe 加热会直接升华, 所以本研究采用双源共蒸发方法制备  $Cd_xTe$  薄膜。即通过调节 CdTe 和 Te 源的蒸发电压, 控制两个蒸发源的蒸发速率, 调控沉积在衬底上的薄膜组分, 即可制备出一系列  $x$  值在 0~1 之间的  $Cd_xTe$  薄膜, 做到禁带宽度可在 0.33~1.5eV 之间连续可调。本研究还通过对不同 Cd/Te 比例及退火前后的  $Cd_xTe$  薄膜表征, 研究了不同  $Cd_xTe$  薄膜的表面形貌、微观结构、光学性质及电学性质等方面的差异。

## 1 实验方法

### 1.1 $Cd_xTe$ 薄膜的制备

采用真空蒸发法在硼硅玻璃衬底上制备  $Cd_xTe$

薄膜, 本底真空为  $7 \times 10^{-4}$  Pa, 用两个钨丝呈螺旋状缠绕的石英舟分别加热 CdTe 粉料(99.999%)和 Te 粉(99.999%), 并用两台 LHC-2 石英膜厚监控仪在线监控两源的蒸发速率及厚度。蒸发源和衬底之间装有移动挡板, 以防止原料受热蒸发产生的气体和易挥发的杂质污染蒸发源及衬底。在室温下, 通过控制 CdTe 和 Te 源的蒸发速率, 制得 Cd/Te 原子比分别为 0.2、0.4、0.6 及 0.8 的  $Cd_xTe$  薄膜, 同时利用膜厚监控仪对其厚度进行监控, 使薄膜厚度均控制在 100 nm 左右。再将上述组分的样品在同一氮气气氛下退火, 退火温度为 185℃, 气压为 0.02 MPa。

### 1.2 表征方法

采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, SPECTRO ARCOS, 德国)测定  $Cd_xTe$  薄膜的组分  $x$  值; 使用型号 Ambios Technology XP-2 的探针式台阶仪测定薄膜厚度; 利用型号 HITACHI S4800 的扫描电子显微镜(SEM)测试薄膜表面形貌; 用丹东方圆仪器有限公司的 DX-2600 型 X 射线衍射仪作 XRD 衍射测试(Cu-K $\alpha$  辐射,  $\lambda=0.15405$  nm, 扫描范围为  $10^\circ \sim 70^\circ$ ); 使用 Pekin Elmer 公司的 Lambda-950 紫外-可见分光光度计测试薄膜的透过谱, 测量光谱范围为 200~2500 nm, 扫描波长精度  $\pm 0.1$  nm。薄膜的暗电导率-温度关系由自制的双探针设备测量, 测量温度范围是 297~497 K。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $Cd_xTe$ 薄膜的组分与结构

采用 CdTe 和 Te 双源共蒸发的方法, 控制 CdTe 和 Te 源的蒸发电压来调控两者的蒸发速率, 制备出不同 Cd/Te 比例的  $Cd_xTe$  薄膜, 并使用 OES 测定刚沉积的薄膜组分, 结果如表 1 所示。从测试结果来看, 在室温下沉积的薄膜组分与监控目标成分相差较小, 这在一定程度上体现了双源共蒸发法在薄膜组分控制方面的优势。

图 1 为沉积态不同组分  $Cd_xTe$  薄膜的 XRD 图谱。Cd/Te 比例为 0.2、0.4 时, 未出现明显的 CdTe 或 Te 的衍射峰, 这说明薄膜主要以非晶态形

表 1 沉积态的  $Cd_xTe$  薄膜样品的组分

Table 1 The Cd/Te ratio of as-deposited  $Cd_xTe$  thin film

Theoretical $x_0$	Actual $x_1$	$x_1/x_0$
0.2	0.2260	1.130
0.4	0.4500	1.125
0.6	0.6499	1.083
0.8	0.8812	1.102

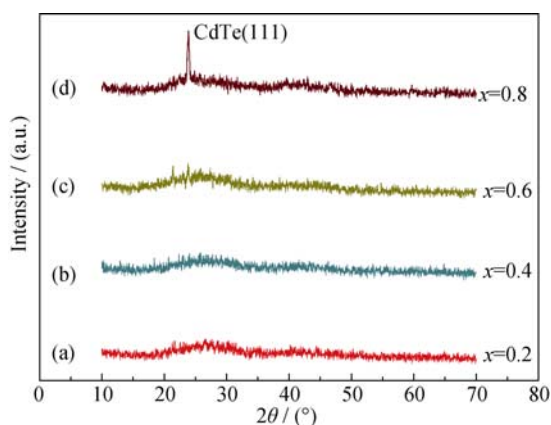
图 1 沉积态  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜 XRD 图谱对比

Fig. 1 XRD patterns of as-deposited  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films ( $x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )

式存在。随着  $x$  的增加, 薄膜逐渐出现立方相  $\text{CdTe}$  (111) 方向的衍射峰 ( $2\theta=23.8^\circ$ )。

图 2 给出退火处理后  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的衍射峰情况。从图中看出, 经  $185^\circ\text{C}$  退火处理的薄膜存在  $\text{Te}$  和  $\text{CdTe}$  的衍射峰。在  $x=0.2$  时,  $\text{Te}$  的衍射峰最强, 出现  $\text{Te}$  的 (101)、(100)、(110) 方向衍射峰, 表明退火后薄膜从非晶相转变为六方相结构。在  $x=0.4$  和  $x=0.6$  时, 同时观察到  $\text{CdTe}$  和  $\text{Te}$  的衍射峰, 表明薄膜中同时存在  $\text{CdTe}$  和  $\text{Te}$  的多晶相, 相比于刚沉积的薄膜, 两者峰强均明显增大。 $x=0.8$  时, 样品中  $\text{Te}$  和  $\text{Cd}$  元素比接近 1:1, 薄膜主要呈  $\text{CdTe}$  立方相结构,  $\text{Te}$  的衍射峰消失, 多余的  $\text{Te}$  原子状态不能确定。与刚沉积的薄膜相比, 退火后  $\text{CdTe}$  相在 (111) 方向峰强增大, 同时出现  $\text{CdTe}(220)$  和  $\text{CdTe}(311)$  方向的衍射峰。在  $x$  值较小时, 薄膜以  $\text{Te}$  的非晶态为主; 随着  $x$  的增加, 薄膜从  $\text{Te}$  非晶逐步过渡到  $\text{CdTe}$  多晶; 当  $x$  大于等于 0.8 时, 薄膜以  $\text{CdTe}$  多

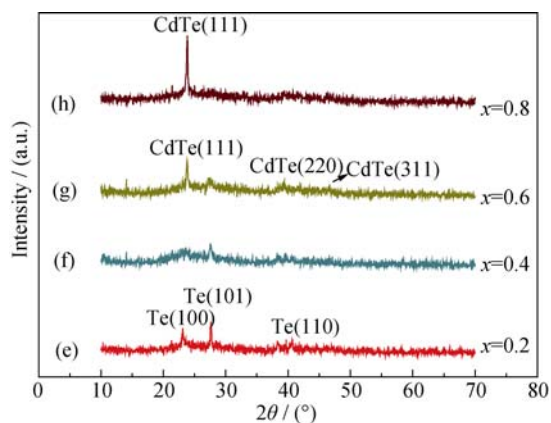
图 2  $185^\circ\text{C}$  退火后  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的 XRD 图谱对比

Fig. 2 XRD patterns of  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films annealed at  $185^\circ\text{C}$  ( $x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )

晶态为主。

根据 Debye-Scherrer 公式<sup>[14]</sup>

$$D = k\lambda / b \cdot \cos\theta \quad (1)$$

其中  $\lambda$  是 X 射线的波长 (0.15406 nm), 常数  $k$  为形状因子 (约为 0.89),  $b$  为 X 射线衍射图谱中主晶相最强峰的半高宽,  $\theta$  为衍射角。计算出刚沉积的  $\text{Cd}_{0.8}\text{Te}$  薄膜晶粒大小约为 23.9 nm, 退火后  $\text{Cd}/\text{Te}$  比例为 0.2、0.4、0.6 及 0.8 的薄膜晶粒大小约为 22.4、22.8、22.6、26.9 nm, 随着薄膜中  $\text{Cd}/\text{Te}$  比增大, 晶粒尺寸也逐渐增大, 与前述结果一致。

## 2.2 $\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜的形貌分析

图 3 为室温沉积及退火处理后  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的表面 SEM 照片。从图 3(a~d) 可知,  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜在  $x$  值较小时, 薄膜表面平整, 几乎看不到任何小颗粒。随着  $x$  值增大, 薄膜表面粗糙度增加, 并显现出大量的小颗粒物, 这与前面 XRD 表征的结果一致。图 3(e~h) 为退火后  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的表面 SEM 照片。与图 3(a~d) 相比, 退火后薄膜晶粒长大, 观察到均匀的晶粒, 这与 XRD 结果一致。

综合分析 XRD 与 SEM 结果可知, 用共蒸发法在室温下沉积的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜在  $x$  值较小 ( $x < 0.6$ ) 时, 以非晶态形式存在;  $x \geq 0.6$  时, 薄膜以  $\text{CdTe}$  的多晶和  $\text{Te}$  的非晶混合共存,  $185^\circ\text{C}$  退火后薄膜从非晶态转变为多晶态并促使小晶粒长大, 但仍主要是  $\text{CdTe}$  和  $\text{Te}$  的混合共存状态。当  $x \geq 0.8$  时, 薄膜的主要成分以  $\text{CdTe}$  为主。此外, 由于  $\text{Te}$  的饱和蒸汽压较高, 在退火过程中, 薄膜表面的  $\text{Te}$  单质可能部分析出<sup>[12]</sup>。

## 2.3 $\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜的光学性质

图 4 给出不同组分  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜退火前后的紫外-可见光吸收光谱图。随着  $x$  值减小, 刚沉积的薄膜在可见光范围内的整体透过率逐渐降低, 同时  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的吸收边从  $\text{CdTe}$  吸收边附近逐渐向长波方向移动, 吸收光波长范围逐步增大 (图 4(a))。当  $x$  值较小时, 退火后薄膜的整体透过率明显降低;  $\text{Cd}/\text{Te}$  元素比例接近 1:1 的薄膜, 其透过率受退火影响较小 (图 4(b))。

由半导体光吸收理论可知, 直接带隙半导体材料的吸收系数与光能隙满足 Tauc 公式<sup>[15]</sup>:

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

其中  $\alpha$  为吸收系数,  $h$  为普朗克常量,  $A$  为常数,  $E_g$  为禁带宽度。根据公式 (2) 作出  $\alpha h\nu^{1/2} \sim h\nu$  关系曲线, 当  $(\alpha h\nu)=0$  时得到的横截距即为  $E_g$ 。计算可得不同薄膜的禁带宽度。

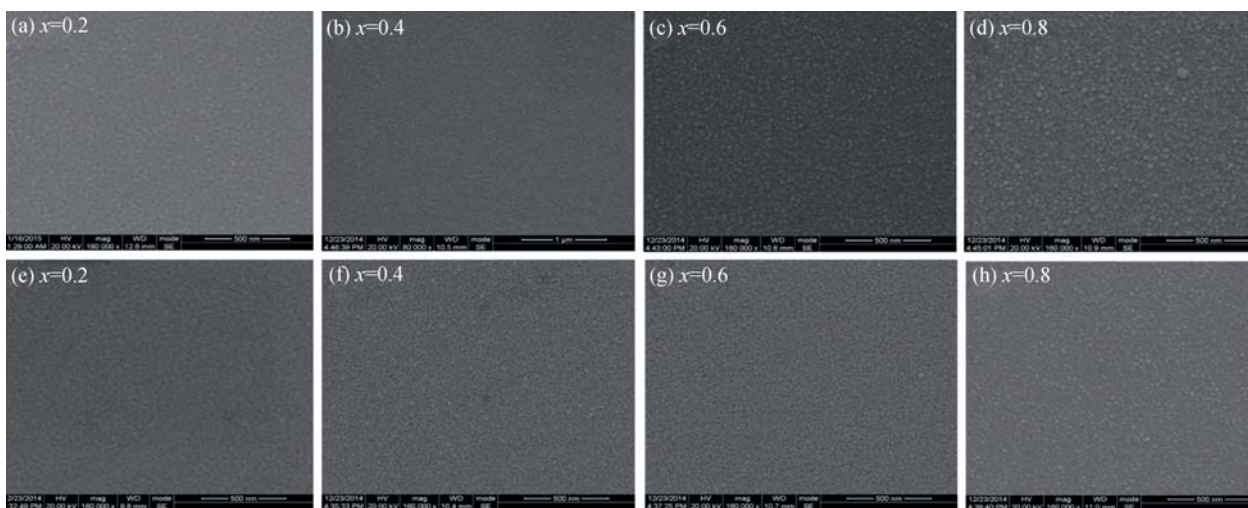
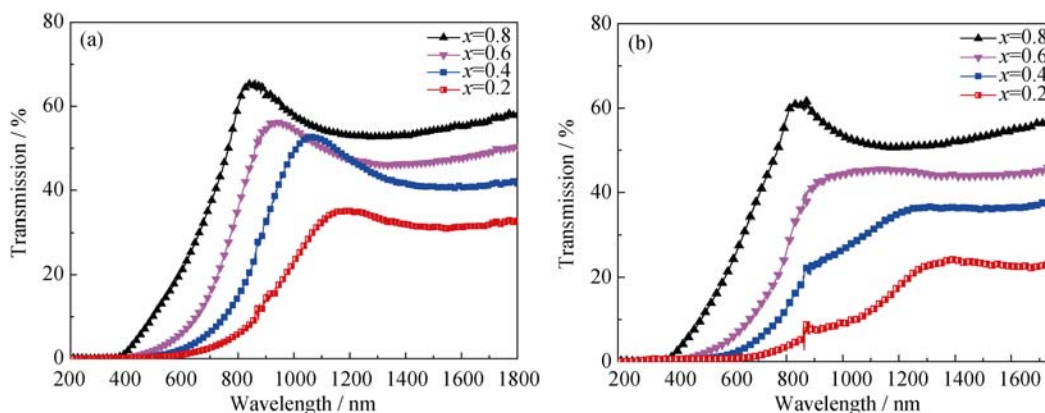
图 3 不同条件下制备的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的 SEM 照片

Fig. 3 Morphology of  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films observed by SEM images immediately after deposition (a-d) and annealing at  $185^\circ\text{C}$  (e-h)

图 4 不同条件制备的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的紫外-可见吸收光谱图

(a)沉积态  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜; (b)经过退火处理的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜

Fig. 4 UV-visible absorption spectra of different  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films

(a)  $\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.6}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.8}\text{Te}$ , as-deposited; (b)  $\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.6}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.8}\text{Te}$  and annealed at  $185^\circ\text{C}$

图 5 为禁带宽度  $E_g$  与薄膜 Cd/Te 比例的关系曲线。从图中可以直观地看到,  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的禁带宽度随着  $x$  值的增加从 1.0 eV 逐渐增加到 1.5 eV 附近, 因此, 改变  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的  $x$  值, 能够有效调节薄膜禁带宽度, 实现对薄膜吸收边的调节。退火处理后, 薄膜禁带宽度比退火前增加了 0.1~0.2 eV。结合  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的结构特点, 推测  $x=0.2$  的薄膜中 Te 含量很高, 薄膜禁带宽度主要由 Te 决定, 退火后少量 Te 损失对其影响不大; 当  $x$  介于 0.4 到 0.6 之间时, 薄膜内 CdTe 和 Te 成分相当, 薄膜禁带宽度由两者共同决定, Te 的损失对薄膜禁带宽度有明显影响, 退火前后  $E_g$  相差较大;  $x=0.8$  时的薄膜成分以 CdTe 为主, 其禁带宽度也主要由 CdTe 决定, 退火引起的 Te 损失对样品禁带宽度影响很小,  $E_g$  变化不大。

## 2.4 $\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜的电学性质

$\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的电阻较高, 难以用 Hall 测试系统

准确测得其电学性质(如载流子浓度及迁移率等)。采用冷热探针仪测得  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜为 p 型半导体, 并研究了  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的暗电导率-温度关系, 图 6 是刚

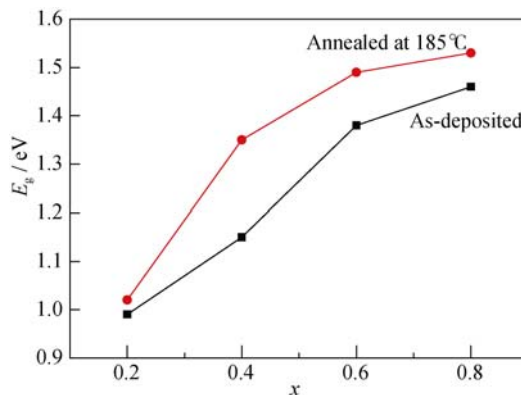
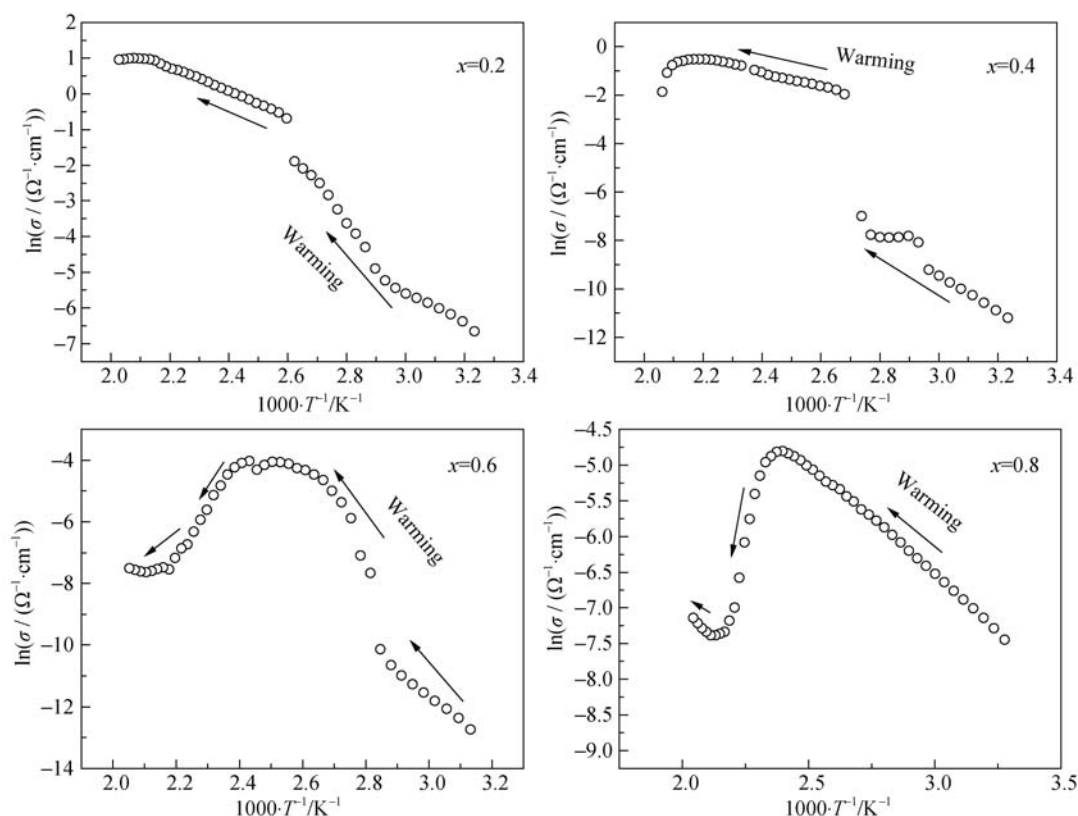
图 5 不同组分  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的禁带宽度  $E_g$ 

Fig. 5 Energy band gap ( $E_g$ ) of different  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films

图 6 不同组分  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的暗电导率与温度关系曲线Fig. 6 Temperature dependence of dark conductivity of different  $\text{Cd}_x\text{Te}$  thin films ( $\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.6}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.8}\text{Te}$  and as-deposited)

沉积的薄膜暗电导率-温度关系曲线。半导体薄膜的暗电导率和温度的关系基本满足阿伦尼乌斯方程<sup>[16]</sup>:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{\kappa T}\right) \quad (3)$$

其中,  $\sigma$  是暗电导率,  $\sigma_0$  是常数,  $E_a$  是电导激活能,  $\kappa$  是玻耳兹曼常数。

从图 6 中可看出,  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的暗电导率随温度升高出现复杂的变化:  $\text{Cd}/\text{Te}$  比例为 0.2 的薄膜暗电导率在升温过程中先缓慢增加, 340 K 后加速增加, 最后趋于平缓; 在低温阶段(室温~420 K)  $x=0.4$  的薄膜暗电导率随着温度变化趋势与  $x=0.2$  时的情况基本一致, 但当温度继续升至 460 K 时暗电导率达到最大后开始减小; 同样,  $x=0.6$  的薄膜暗电导率在低温段也有类似变化, 当温度升至 410 K 时达到最大后开始减小, 温度进一步升至 473 K 时, 薄膜暗电导率达到一极小值随后开始缓慢增大;  $x=0.8$  的薄膜暗电导率变化与  $x=0.6$  的薄膜变化趋势类似, 表现出反常电导现象。随着  $x$  值的增大, 这种反常现象更显著。

根据图 6 计算出在温度低于 385 K 时,  $\text{Cd}/\text{Te}$  比例为 0.2、0.4、0.6 和 0.8 的薄膜暗电导激活能分别

为 0.36、0.63、0.69 和 0.26 eV。由于纯 Te 和 CdTe 都没有出现这种反常暗电导率-温度现象, 因此这种暗电导率随温度复杂变化的情况与  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜内部的结构和成分密切相关, 与 Te 和 CdTe 的共存状态相关。还需对薄膜进行充分的电子学性质表征, 从而揭示其内在机理。

### 3 结论

1) 采用双源共蒸发法, 通过调节 CdTe 和 Te 源的蒸发电压来控制两源的蒸发速率, 制备出不同组分的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  二元化合物薄膜, 其禁带宽度可在 0.33~1.5 eV 之间连续可调。即减小  $x$  值能够有效降低  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜禁带宽度, 且吸收边向长波方向移动。

2) 刚沉积的  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜结晶性差; 在氮气气氛下退火后, 薄膜结晶性改善。随  $\text{Cd}/\text{Te}$  比例的增大, 薄膜结构由 Te 的六方相向 Te 和 CdTe 的共存相转变,  $\text{Cd}/\text{Te}$  比例接近 1:1 时,  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜中出现 CdTe 的立方相结构。

3)  $\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜是 p 型半导体, 薄膜的暗电导率先随温度的升高而增加, 当温度增加到临界点时, 其暗电导率-温度关系出现反常现象。

致谢: 感谢四川大学分析测试中心吴曦老师对 OES 组分测试及 SEM 形貌分析测试所提供的帮助。感谢朱居木教授对 XRD 测试数据分析所提供的帮助。

### 参考文献:

- [1] FERKIDES C S, MARINSKIY D, VISWANATHAN V, *et al.* High efficiency CSS CdTe solar cells. *Thin Solid Films*, 2000, **361**: 520-526.
- [2] MCCANDLESS B E, DOBSON K D. Processing options for CdTe thin film solar cells. *Solar Energy*, 2004, **77**(6): 839-856.
- [3] LI YUAN-JIE, ZHENG JIA-GUI, FENG LIANG-HUAN, *et al.* The effect of different preparation temperatures on the photoelectric properties of CdTe films and solar cells. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 625-629.
- [4] YANG XUE-WEN, ZHENG JIA-GUI, ZHANG JIN-QUAN, *et al.* Characteristics of CdTe solar cell device. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(5): 2504-2507.
- [5] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, *et al.* Solar cell efficiency tables (version 40). *Progress in Photovoltaics*, 2012, **20**(5): 606-614.
- [6] <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=895118> (press release by First Solar, February 5, 2015.).
- [7] FERKIDES C, BRITT J, MA Y, *et al.* High Efficiency CdTe Solar Cells by Close Spaced Sublimation. *Proceedings of the Twenty Third IEEE Photovoltaic*, 1993: 389-393.
- [8] XIAO CHUANXIAO, PAUDEL N R, GRICE C R, *et al.* CdTe solar cells using combined ZnS/CdS window Layers. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2014: 2428-2430.
- [9] HAN JUNFENG, FU GANHUA, KRISHNAKUMAR V, *et al.* Preparation and characterization of ZnS/CdS bi-layer for CdTe solar cell application, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2013, **74**(12): 1879-1883.
- [10] VIGIL-GALAN O, SANCHEZ-MEZA E, RUIZ C M, *et al.* Physical properties of Bi doped CdTe thin films grown by CSVT and their influence on the CdS/CdTe solar cells PV properties. *Thin Solid Films*, 2007, **515**(15): 5819-5823.
- [11] PAUDEL NABA R, YAN YANFA. Enhancing the photo-currents of CdTe thin-film solar cells in both short and long wavelength regions. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **105**(18): 183510.
- [12] JOSELL D, DEBNATH R, HA J Y, *et al.* Windowless CdSe/CdTe solar cells with differentiated back contacts: J-V, EQE, and photo-current mapping. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, **6**(18): 15872-15979.
- [13] AHMAD F R, COURNOYER J R, RAGHAVAN K C, *et al.* Tellurium-rich CdTe, and the effect of tellurium content on the properties of CdTe. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(8): 2888-2894.
- [14] WEI AIXIANG, LIU JUN, ZHUANG MIXUE, *et al.* Preparation and characterization of ZnS thin films prepared by chemical bath deposition, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2013, **16**(6): 1478-1484.
- [15] XU HANG, WU LILI, WANG WENWU, *et al.* The influence of hydrogen on the properties of Zinc Sulfide thin films deposited by magnetron sputtering. *International Journal of Photoenergy*, 2014, **720560**: 1-6.
- [16] HE JIAN-XIONG, WU LI-LI, HAO XIA, *et al.* Effect of annealing on Al<sub>2</sub>Sb multilayer films. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, **25**(1): 27-31.