

钒掺杂 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$ 晶体生长与深能级缺陷研究

游思伟, 艾涛, 栾丽君

(长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: CdMnTe (碲锰镉)材料作为新一代的半导体材料, 在核辐射探测领域具有很高的应用价值。本实验采用 Te 溶液垂直布里奇曼法生长 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶体, 研究其光电性能及深能级缺陷的分布。紫外-可见-近红外光谱分析表明晶锭中部和尾部的禁带宽度分别为 1.602 和 1.597 eV。光致发光谱中, 晶体的(D⁰, X)峰形尖锐, 半峰宽较小, 表明缺陷或杂质含量低, 晶体质量好。室温 I - V 测试晶锭中部和尾部晶体电阻率分别为 2.85×10^{10} 和 $9.54 \times 10^9 \Omega \text{ cm}$, 漏电流分别为 3 和 8.5 nA。霍尔测试表明晶体导电类型为 n 型。通过热激电流谱研究了 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶体中缺陷的能级和浓度, 其中晶锭中部和尾部样品中源于 Te 反位(Te_{Cd}^2+)的深施主能级(E_{DD})的值分别为 0.90 和 0.812 eV。并且深施主能级 E_{DD} 使费米能级位于禁带中央, 从而使晶体呈现高电阻率。

关键词: $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$; 深能级缺陷; 深施主能级; 费米能级

中图分类号: TG145; TN304; O77⁺1; O782⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)05-1873-06

CdMnTe 晶体是一种具有发展前景的室温核辐射探测器材料, 在医学成像、环境保护、工业监控、核安全检测以及天体物理研究等领域具有重要的应用^[1-4]。然而, 熔体法生长 CdMnTe 晶体时, Cd 的饱和蒸气压高, 导致 Cd 容易挥发, 进而使成分偏离化学计量比而引起相关缺陷。相比于熔体法生长, Te 溶液垂直布里奇曼法(Te-VBM)是生长低散射、低相变孪晶、高纯度 CdMnTe 单晶最有效的方法, 其生长原理是采用过量的 Te 作为溶剂, 使多晶锭从上端溶解进入熔区形成过饱和溶液, 单晶锭从下端定向析出。该方法最大的优点就是消除相变孪晶, 生长的晶体质量均匀、纯度高。Sahoo 等人^[5]采用 Te-VBM 生长 CdTe 过程中有效去除了多晶料中的杂质, 对晶体起到了很大的提纯效果; Luan 等人^[6]采用 Te-VBM 生长的 $\text{CdMnTe}:\text{V}$ 晶体中孪晶的密度明显降低, γ 射线能谱分辨率达到 11.62%。

研究表明, CdMnTe 晶体的光电性能和晶体缺陷密切相关, 其中深能级缺陷对 CdMnTe 晶体电学性能的影响最大^[7]。Te-VBM 生长 CdMnTe 晶体时, 过量的 Te 在晶体中形成的点缺陷主要为 $\text{Te}_{\text{Cd}}^{2+}$ (Te 反位)、 Te_{I}^{-} (Te 间隙)和 $\text{V}_{\text{Cd}}-\text{Te}_{\text{Cd}}$ (Cd 空位-Te 反位)^[8]。这些深能级缺陷可以和相关缺陷作用而使晶体呈现出高电阻率^[9], 还可以作为载流子的复合中心, 减少载流子寿命, 降低晶体的电输运性能^[10, 11]。因此, 在生长 CdMnTe 晶体时, 应该避免深能级缺陷带来的不利影响, 将深能

级缺陷的浓度控制在适当水平。

目前对 CdMnTe 晶体深能级缺陷研究甚少。因此, 本研究通过 Te-VBM 生长钒掺杂的 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}(\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V})$ 晶体, 分析晶体的光学和电学性能, 以及深能级缺陷的种类和分布。

1 实验

采用 Te-VBM 生长直径为 30 mm, 长度为 130 mm 的 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶体。晶体的制备过程为: (1) 将高纯度的原料 Cd、Mn、Te 和 V(掺杂浓度为 5×10^{17} 个原子/ cm^3)按化学计量比称量, 然后装入镀碳膜的石英坩埚中, 并在 1×10^{-4} Pa 的真空条件下密封; (2) 将密封好的石英坩埚装入合料炉进行合料; (3) 将合好料的石英坩埚放进双温区单晶炉, 以 10 K/cm 的温度梯度和 0.15 mm/h 的生长速率进行单晶体生长。

图 1 为 Te 溶液垂直布里奇曼法生长的 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶锭。在晶锭中部和尾部切割大小为 5 mm × 5 mm × 2 mm 的晶片, 分别编号为 CMT1 和 CMT2。实验测试前对晶片做以下处理: (1) 粗抛; (2) 用 MgO 悬浊液、硅溶胶和 H_2O_2 混合溶液进行细抛; (3) 分别用去离子水、丙酮溶液以及甲醇溶液对晶片进行超声清洗; (4) 采用 2% 的溴甲醇溶液对晶片进行化学抛光。

采用 X 射线粉末衍射仪在 20°~80° 范围内对晶体进行

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 陕西省重点研发计划 - 国际科技合作项目 (2020KWZ-008)

作者简介: 游思伟, 男, 1996 年生, 硕士, 长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061, E-mail: 1463329038@qq.com

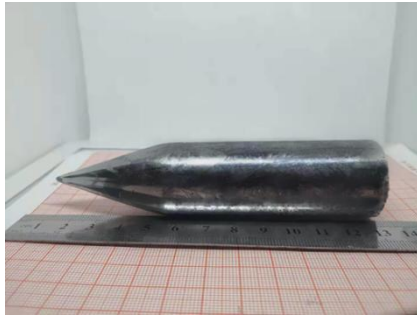


图 1 Te 溶液垂直布里奇曼法生长的 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体
Fig.1 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V crystals grown by Te solution vertical Bridgman method

衍射分析;采用紫外-可见-近红外光谱仪在 600~1100 nm 波长范围内测量晶体的透过光谱;采用 Agilent4155C 半导体参数分析仪在偏置电压为-1~1 V 和-100~100 V 范围内进行 I-V 测试;采用高阻霍尔测试仪利用范德堡四探针法对 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体的导电类型和霍尔迁移率进行测试;采用 10 K 光致发光谱研究晶体中的杂质和缺陷;采用热激发电流谱在 200 V 偏置电压和 0.2 K/s 的升温速率条件下,对晶体中的深能级缺陷进行研究。

2 结果与讨论

2.1 X 射线衍射分析

图 2 为 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体的 XRD 图谱。在 20°~80° 范围内的主要衍射峰与标准 PDF 卡片 #65-8867 的(111), (220), (311), (400), (331), (422) 和(511)的衍射峰高度吻合。分析表明, Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体为闪锌矿结构,从尖锐的衍射峰强度可以看出晶体具有良好的结晶度。其中(111)面衍射峰强度最高,峰形最尖锐,说明 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体沿(111)方向择优生长。与未掺杂的 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te 相比,钒掺杂并没有改变晶体的结构。

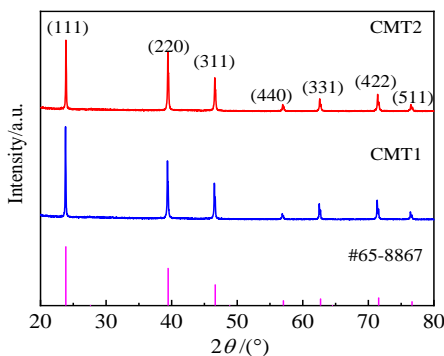


图 2 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体的 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V crystals

2.2 紫外-可见-近红外光谱

图 3 为 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体的紫外-可见-近红外透过光谱。从图中可以得出,晶体的截止波长位于 750 nm 附近。当波长小于 750 nm 时,入射光能量大于禁带宽度,价带的电子跃迁到导带引起光吸收,此时的透过率几乎为零。当入射波长位于 750~825 nm 时,晶体透过率随波长呈指数倍增加。当入射波长大于 825 nm 时,光子能量小于禁带宽度,不足以激发电子引起跃迁,大部分被透过,如图 3 所示, CMT1 透过率为 59.7%, CMT2 透过率为 52.6%。吸收系数 α 与禁带宽度(E_g)的经验公式为^[12]:

$$\alpha = \frac{A(h\nu - E_g)^\gamma}{h\nu} \quad (1)$$

其中, $h\nu$ 为入射光子能量, α 为晶体的吸收系数, A 为常数, γ 为电子从价带跃迁到导带的跃迁机率,对于直接带隙半导体的 γ 取值为 1/2。由公式(1)可以得出, CMT1 和 CMT2 的禁带宽度分别为 1.602 和 1.597 eV。计算结果表明,钒掺杂并没有明显影响 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 带隙宽度。

2.3 光致发光谱

晶体中的杂质和缺陷可以在很大程度上引起材料光电性能的变化。本实验采用光致发光(PL)谱研究 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体中的杂质和缺陷能级,如图 4 所示。10 K 时 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体的 PL 谱可以分为 3 个区域^[13]: (1) 近带边区(1.70~1.76 eV), 激子束缚施主杂质产生的 (D^0, X)峰; (2) 施主和受主对区(1.61~1.70 eV), 施主-受主杂质对复合引起的 DAP 峰; (3) 杂质缺陷复合区(1.44~1.61 eV), 通常称为 D_{complex} 峰。

在 PL 谱中, (D^0, X)峰的尖锐程度以及半峰宽大小可以表征晶体质量^[14]。从图 4 中得出, CMT1 中(D^0, X)峰强度最大,半峰宽为 8.4 meV,表明晶体质量较好。图中显示的 CMT2 的(D^0, X)峰与 CMT1 中相比明显降

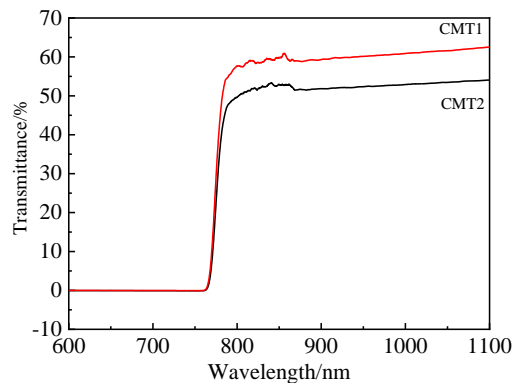


图 3 Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V 晶体的紫外-可见-近红外透过光谱
Fig.3 Transmittance spectra of UV-VIS-NIR of Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V crystals

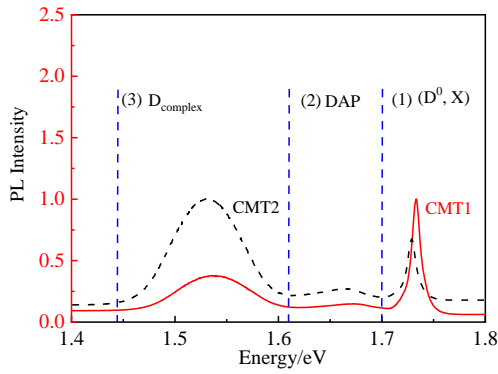


图 4 10 K 时 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 的光致发光谱
Fig.4 PL spectra of $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ crystals at 10 K

低, 半峰宽为 10.6 meV, 表明 CMT2 中杂质和缺陷浓度大, 晶体质量降低。在施主和受主对区, DAP 峰的强度反应浅施主和浅受主复合缺陷的浓度。CMT2 晶体靠近晶锭尾部的 Te 溶剂区, 杂质和缺陷浓度高, 因此浅施主能级钒可能和其他浅受主能级(如 Na 和 Li 等)结合^[15], 使 DAP 峰强度增大。在杂质和缺陷复合区, $\text{D}_{\text{complex}}$ 峰与 Cd 空位缺陷和位错相关^[16]。 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶体中 Cd 空位相关的缺陷可能为 $\text{V}_{\text{Cd}}-\text{V}_{\text{Cd}}$ (V 占 Cd 位-Cd 空位)等。随着 Cd 空位浓度以及位错密度的增加, 导致 $\text{D}_{\text{complex}}$ 峰强度增加。此外, DAP 峰和 (D^0, X) 峰强度比值($I_{\text{DAP}}/I_{(\text{D}^0, \text{X})}$)以及 $\text{D}_{\text{complex}}$ 峰和 (D^0, X) 峰强度比值($I_{\text{D}_{\text{complex}}}/I_{(\text{D}^0, \text{X})}$)可以反映晶体质量以及缺陷浓度^[17]。通过对 PL 谱中峰值的计算, CMT1 和 CMT2 中 $I_{\text{DAP}}/I_{(\text{D}^0, \text{X})}$ 比值分别为 0.145 和 0.42, $I_{\text{D}_{\text{complex}}}/I_{(\text{D}^0, \text{X})}$ 分别为 0.371 和 1.503。相比于 CMT2, CMT1 的 $I_{\text{DAP}}/I_{(\text{D}^0, \text{X})}$ 和 $I_{\text{D}_{\text{complex}}}/I_{(\text{D}^0, \text{X})}$ 的值更小, 表明 CMT1 中杂质和缺陷含量更少, 结晶质量更好。

2.4 电学性能

图 5 为 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 样品室温下不同偏置电压的 I - V 曲线。从图 5 可以看出, I - V 曲线中 I 与 V 表现为良好的线性关系。体电阻率计算公式为:

$$\rho = \frac{VS}{Id} \quad (2)$$

式中, V 为偏置电压, I 为电流, S 为电极面积, d 为晶片厚度。

在偏置电压为 $-1 \sim 1 \text{ V}$ 时, 由公式(2)得出, CMT1 和 CMT2 电阻率分别为 2.85×10^{10} 和 $9.54 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。通过高偏置电压下的 I - V 曲线, 如图 5b 所示, 可以表征晶体中漏电流的大小。CMT1 和 CMT2 的漏电流分别为 3 和 8.5 nA。晶体中的漏电流的差异可能与晶体内部的杂质以及缺陷的分布和浓度有关。由于晶锭尾部 Te 溶剂区, 其杂质和缺陷浓度较大, Cd 空位缺陷含量也更多, 导致电阻率降低, 漏电流增加。

室温霍尔测试结果如表 1 所示, $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶体的导电类型为 n 型, 晶锭中部样品的霍尔迁移率为 $7.2 \times 10^3 \text{ cm}^3 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 大于晶锭尾部晶体的霍尔迁移率 $4.9 \times 10^3 \text{ cm}^3 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 这可能是因为晶锭尾部晶体有较多的杂质和缺陷所致, 这一结论和光致发光谱结果一致。

2.5 热激电流谱

图 6 为 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶体的热激电流(TSC)谱和拟合曲线。为了降低 TSC 谱中重叠峰的相互干扰, 在分析 TSC 谱峰时, 采用同步多峰法(SIMPFA)。该方法拟合出半导体材料中主要陷阱峰的参数, 并最大程度地减少误差之和。TSC 谱中单峰的强度可以描述如下^[18, 19]:

$$I_{\text{TSC}}^i(T) = N_{T_i} e \mu_n A E \tau_n D_{t,i} T^2 \exp\left\{-\frac{E_{a,i}}{KT} - \frac{kD_{t,i}}{\beta E_{a,i}}\right\} \times T^4 e^{\frac{E_{a,i}}{KT}} \times \exp\left[1 - 4\frac{KT}{E_{a,i}} + 20\left(\frac{KT}{E_{a,i}}\right)^2\right] \quad (3)$$

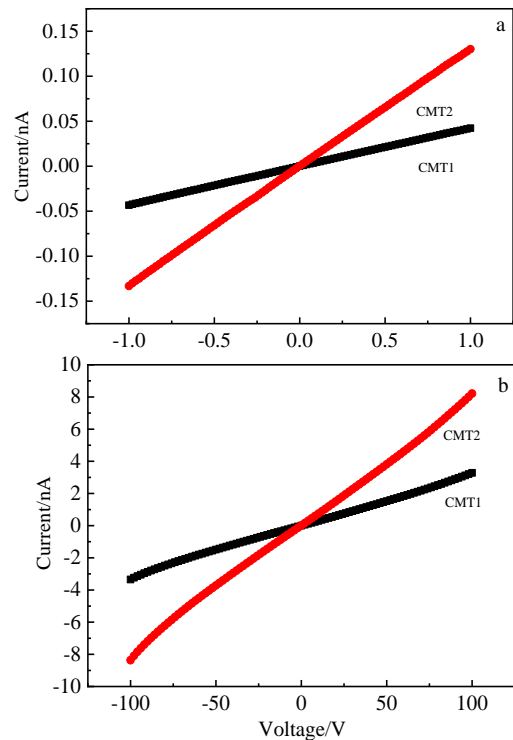


图 5 室温下 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶体的 I - V 曲线
Fig.5 I - V curves of $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ crystals at room temperature: (a) bias voltage from -1 V to 1 V and (b) bias voltage from -100 V to 100 V

表 1 $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ 晶体的电学参数

Sample	Resistivity/ $\Omega \cdot \text{cm}$	Hall mobility/ $\times 10^3 \text{ cm}^3 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	Conductivity type
CMT1	2.85×10^{10}	7.2	n
CMT2	9.54×10^9	4.9	n

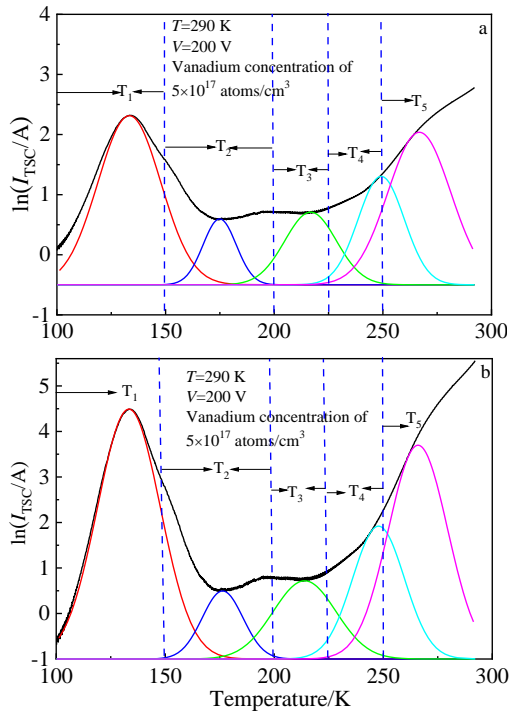


图 6 CMT1 和 CMT2 的 TSC 谱和拟合曲线

Fig.6 TSC spectra and fitting curves of CMT1 (a) and CMT2 (b)

式中, e 为单元电荷, μ_n 载流子的迁移率, A 是电极面积, E 为偏置电压, τ_n 为载流子的寿命, $D_{t,i}$ 为温度相关的系数, T 为绝对温度, K 为玻尔兹曼系数, β 是加热速率, $E_{a,i}$ 为第 i 个陷阱能级的热激活能, N_{T_i} 为第 i 个陷阱能级陷阱的载流子浓度。

用上述公式对 TSC 谱进行分峰拟合, 得到的拟合参数见表 2。陷阱 T_1 位于价带上方(0.132±0.01) eV, 该陷阱来源可能是 $V_{Cd}-V_{Cd}$ 缺陷复合体, 也可能是与此能量相近的杂质陷阱, 如 Cu、Ag、Na、O 等^[20]。根据文献, CdZnTe:In 和 CdZnTe:Al 晶体中该能量附近的缺陷分别源于 $In_{Cd}-V_{Cd}$ 和 $Al_{Cd}-V_{Cd}$ ^[18, 21]。陷阱 T_2 位于价带顶(0.245±0.01) eV, 与 Zerrai 等人^[22]研究的 E_2 (0.26 eV)陷阱位置接近。 T_2 可能为钒相关的电子缺陷, 也可能为 Te 沉淀/夹杂等引起的结构缺陷^[23]。Liu 等人^[24]认为浅施主杂质可以有效地补偿晶体中的 Cd 空位 (V_{Cd})而使晶体呈现出高电阻率。陷阱 T_3 位于导带底(0.375±0.02) eV, Nan 等人^[10]研究认为, 能量在 0.40 eV 左右的缺陷通常与 Te_{Cd}^{2+} 有关, 所以得出 T_3 为与 Te_{Cd}^{2+} 相关的缺陷。陷阱 T_4 位于价带上方(0.603±0.01) eV, Zhou 等人^[15]研究认为激活能为 0.60 eV 左右的缺陷与 Te_i^{2+} 相关。该缺陷是在 Te 过量的晶体生长条件下形成的。陷阱 T_5 位于价带上方(0.648±0.01) eV, 可能还是由钒引起的。Zerrai 等人^[25]在用深能级瞬态光谱研究

表 2 SIMPA 拟合得到的缺陷参数

Table 2 Defect parameters obtained by SIMPA fitting

Trap	CMT1		CMT2		Origins
	E_a/eV	N_T/cm^{-3}	E_a/eV	N_T/cm^{-3}	
T_1	0.132	3.62×10^{15}	0.143	4.96×10^{15}	$V_{Cd}-V_{Cd}$
T_2	0.245	2.13×10^{14}	0.236	2.45×10^{14}	V-related electron trap
T_3	0.392	2.35×10^{14}	0.375	2.57×10^{14}	Te_{Cd}^{2+}
T_4	0.614	3.21×10^{15}	0.603	3.54×10^{15}	Te_i^{2+}
T_5	0.652	1.02×10^{16}	0.648	1.25×10^{16}	V-related hole trap
E_{DD}	0.90		0.812		Te_{Cd}^{2+}

CdTe:V 晶体时发现能量在 0.65 eV 附近的缺陷是与钒相关的空位缺陷。根据计算得出, CMT1 中缺陷的总密度比 CMT2 中的更小。

TSC 谱中, CMT1 和 CMT2 中的深施主能级 E_{DD} 的值分别位于 0.90 和 0.812 eV。Nan 等人^[23]用 Te 过量的方法生长掺 In 的 CdZnTe: In 晶体时, 发现过量的 Te 占据 Cd 空位(V_{Cd}^{2+})形成了 Te 反位(Te_{Cd}^{2+}), Te_{Cd}^{2+} 与剩余的 V_{Cd} 形成缺陷复合体($Te_{Cd}-V_{Cd}$), 该缺陷复合体即所在能级, 即深施主能级 E_{DD} 。Yang 等人^[26]在研究掺 In 的 CdZnTe: In 晶体时也指出, 与 Te_{Cd}^{2+} 相关的缺陷复合体是形成 E_{DD} 能级的主要来源。考虑到 Te 溶液法的晶体生长过程和掺杂钒引入的上述缺陷 T_2 和 T_5 , CMT1 和 CMT2 晶体中的深施主能级 E_{DD} 主要来源于 Te_{Cd}^{2+} 相关的缺陷复合体。

为了研究深施主能级与费米能级之间的关系, 采用变温 $I-V$ 测试对费米能级进行估算。费米能级可以通过下式描述^[26]:

$$\frac{E_F - E_C}{kT} = \ln I + C \quad (4)$$

式中, E_C 和 E_F 分别代表导带底的能级位置和费米能级位置, k 为玻尔兹曼常数, I 为对应温度 T 下电极间的电流, C 为常数。

根据公式(4)拟合得出 $(kT)^{-1}$ 与 $\ln I$ 的关系曲线, 根据曲线得到 CMT1 和 CMT2 的导带底能级与费米能级之差($E_C - E_F$)分别为 0.913 和 0.851 eV, 如图 7 所示。通常施主掺杂的半导体费米能级略向导带方向移动。经过上述分析, 与 Te_{Cd}^{2+} 相关的深施主能级 E_{DD} 位于 0.90 和 0.812 eV, 它使费米能级的位置位于禁带中央。另外, 溶液法生长的 $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V$ 中 Te 反位(Te_{Cd}^{2+})以及浅施主杂质钒补偿了 Cd 空位缺陷(V_{Cd}), 导致空位缺陷浓度降低, 从而使晶体电阻率升高。

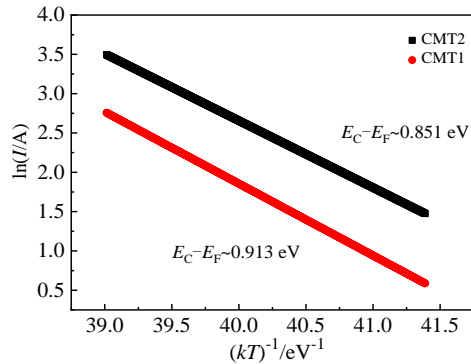


图7 温度变化下的 $(kT)^{-1}$ 与 $\ln I$ 的线性拟合曲线

Fig.7 Linear fitting results of $(kT)^{-1}$ and $\ln I$ with temperature change

3 结论

1) 采用 Te 溶液垂直布里奇曼法生长了直径为 30 mm, 长度为 130 mm 的 $\text{CdMnTe}:\text{V}$ 晶体。

2) 晶锭中部和尾部晶体的禁带宽度分别为 1.602 和 1.597 eV, 透过率分别为 59.7% 和 52.6%; 晶锭中部样品的 PL 谱中(D^0, X)峰尖锐, 半峰宽为 8.4 meV, 表明晶体中杂质和缺陷浓度较低, 晶体质量较好。

3) 晶锭中部晶体的电阻率高, 漏电流小, 表明晶体电学性能较好。

4) 采用热激电流谱分析了 $\text{V}_{\text{Cd}}-\text{V}_{\text{Cd}}$ 缺陷复合体、钒形成的电子缺陷、 $\text{Te}_{\text{Cd}}^{2+}$ 、 Te_i^{2-} 、钒形成的空位缺陷等能级; 晶锭中部晶体的陷阱浓度小于晶锭尾部晶体的陷阱浓度; 深施主能级 E_{DD} 源于 $\text{Te}_{\text{Cd}}^{2+}$, 导致费米能级位于禁带中央, 从而使晶体呈现出高电阻率。

参考文献 References

- [1] Mycielski A, Burger A, Sowinska M *et al. Physica Status Solidi*[J], 2005, 2(5): 1578
- [2] Gul R, Bolotnikov A, Kim H K *et al. Journal of Electronic Materials*[J], 2011, 40(3): 274
- [3] Brost G A, Magde K M, Tdvedi S. *Optical Materials*[J], 1995, 4: 224
- [4] Kim K, Jeng G, Kim P *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2013, 114(6): 063 706
- [5] Sahoo D, Srikantiah R V. *Bulletin of Materials Science*[J], 1996, 19(3): 483
- [6] Luan Lijun, Gao Li, Lv Haohao *et al. Scientific Reports*[J], 2020, 10(1): 2749
- [7] Xu Lingyang, Jie Wanqi, Fu Xu *et al. Journal of Crystal Growth*[J], 2015, 409: 71
- [8] Nan Ruihua, Li Tao, Xu Gang *et al. Journal of Materials Science*[J], 2017, 53(6): 4387
- [9] Fraboni B, Cavalcoli D, Cavallini A *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2009, 105(7): 073 705
- [10] Nan Ruihua, Li Tao, Xu Gang *et al. Electronic Materials Letters*[J], 2018, 53: 4387
- [11] Gul R, Keeter K, Rodriguez R *et al. Journal of Electronic Materials*[J], 2011, 41(3): 488
- [12] Xiao Bao, Zhu Mengqin, Zhang Binbin *et al. Optical Materials Express*[J], 2018, 8(2): 431
- [13] Yu Pengfei, Jiang Biru, Chen Yongren *et al. Materials*[J], 2019, 12(24): 4236
- [14] Yu Pengfei, Luan Lijun, Du Yuanyuan *et al. Journal Cryst Growth*[J], 2015, 430: 103
- [15] Zhou Boru, Jie Wanqi, Wang Tao *et al. Physica Status Solidi (a)*[J], 2017, 214(5): 1 600 748
- [16] Du Yuanyuan, Jie Wanqi, Xu Yadong *et al. Journal of Semiconductors*[J], 2013, 34(4): 043 003
- [17] Du Yuanyuan, Jie Wanqi, Wang Tao *et al. Journal Cryst Growth*[J], 2012, 355(1): 33
- [18] Wang Tao, Ai Xi, Yin Ziang *et al. Cryst Eng Comm*[J], 2019, 21(16): 2620
- [19] Fu Xu, Xu Yadong, Gu Yaxu *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2017, 122: 225 102
- [20] Pavlović M, Jakšić M, Zorc H *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2008, 104: 023 525
- [21] Xu Lingyan, Jie Wanqi, Zhou Boru *et al. Journal of Electronic Materials*[J], 2014, 44(1): 518
- [22] Zerrai A, Dammak M, Marrakchi G *et al. Journal Cryst Growth*[J], 1999, 197: 729
- [23] Nan Ruihua, Li Tao, Jian Zengyun *et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2018, 29(23): 20 462
- [24] Liu Hongtao, Sang Wenbin, Li Wanwan *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2007, 36(8): 1373
- [25] Zerrai A, Marrakchi G, Bremond G *et al. Journal Cryst Growth*[J], 1996, 161: 264
- [26] Padmavathy R, Amudhavalli A, Manikandan M *et al. Journal of Electronic Materials*[J], 2019, 49(2): 1243

Growth and Deep Level Defects of V-Doped $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$ Crystal

You Siwei, Ai Tao, Luan Lijun

(School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: As a new generation of semiconductor materials, CdMnTe material has high application value in the field of nuclear radiation detection. In this research, Te solution vertical Bridgman method was used to grow $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ crystal to study the optical and electrical properties and the distribution of deep-level defects of the $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ crystal. UV-VIS-NIR spectroscopy analysis shows that the band gap in the middle and tail of the ingot is 1.602 and 1.597 eV. The photoluminescence spectral analysis shows that the (D^0 , X) peak of the crystal is sharp and the half-width is small, indicating that the defect or impurity content is low and the crystal quality is superior. The room temperature I - V test shows that the resistivities of the middle and tail crystals are 2.85×10^{10} and $9.54 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, and leakage currents are 3 and 8.5 nA, respectively. The Hall test shows that the conductivity type of the crystal is n-type. The energy of the trap peak and the defect concentration in the $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ crystal were studied by heat induced current spectroscopy. The values of the deep donor levels (E_{DD}) derived from the $\text{Te}_{\text{Cd}}^{2-}$ in the middle and tail samples of the ingot are 0.90 and 0.812 eV, respectively. The deep donor level E_{DD} makes the Fermi level in the center of the forbidden band and thus the crystals present a high resistivity.

Key words: $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$; deep-level defect; deep donor level; Fermi level

Corresponding author: Luan Lijun, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China, Tel: 0086-29-82337343, E-mail: nmlj050@chd.edu.cn