

文章编号:1001-9014(2012)02-0113-05

Cd_{1-x}Mn_xTe 晶体衬底的红外透过性能

张继军, 王林军, 闵嘉华, 施凌云, 黄健, 秦凯丰,
施朱斌, 唐可, 梁小燕, 夏义本
(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘要:研究了生长态和退火后 Cd_{1-x}Mn_xTe 晶片的吸收边和红外透过性能. Cd_{1-x}Mn_xTe 晶体采用垂直 Bridgman 法生长, 获得面积为 30 mm × 40 mm 的 (111) 面 Cd_{1-x}Mn_xTe 单晶片; 晶片在 Cd 气氛下退火. 近红外光谱表明, 吸收边的截止波长反映晶片的 Mn 含量范围为 0.1887 ≤ x ≤ 0.2039, 其中轴向成分波动差值约为 0.0152, 径向成分波动差值约为 0.0013; x = 0.2 的 Cd_{1-x}Mn_xTe 晶体吸收边的吸收系数变化范围为 2.5 ~ 55 cm⁻¹; 退火后, 晶体的吸收边位置没有变化, 表明晶片中 Mn 含量未受到退火的影响. 傅里叶变换红外透射光谱表明, 晶片在红外光波数为 4000 ~ 500 cm⁻¹ 范围的红外透过率为 45% ~ 55%; 退火后, 晶片的红外透过率提高到 61% 以上, 接近理论值 65%.

关键词:晶体生长; 碲镉汞外延衬底; 吸收边; 红外透过率; 退火

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A

Infrared transmission of Cd_{1-x}Mn_xTe crystal

ZHANG Ji-Jun, WANG Lin-Jun, MIN Jia-Hua, SHI Ling-Yun, HUANG Jian,
QIN Kai-Feng, SHI Zhu-Bin, TANG Ke, LIANG Xiao-Yan, XIA Yi-Ben
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The absorption edge and IR transmission of the as-grown and annealed Cd_{1-x}Mn_xTe wafer were investigated. The Cd_{1-x}Mn_xTe crystal was grown by the vertical Bridgman method, from which several (111) face monocrystalline wafers with area of 30 mm × 40 mm were sliced. The wafer was annealed under Cd atmosphere. The cut-off wavelength of the absorption edge obtained from the NIR transmission spectra indicates that the Mn composition within the as-grown wafer is in the range of 0.1887 ≤ x ≤ 0.2039, and the Mn variation is about 0.0152 and 0.0013 in the axial and radial directions of the wafer, respectively. The absorption coefficient of Cd_{1-x}Mn_xTe (x = 0.2) deduced from the absorption edge of the NIR transmission spectrum ranges from 2.5 to 55 cm⁻¹. The FT-IR spectra in the wavenumber range 4000 ~ 500 cm⁻¹ show that the IR transmittance of the as-grown wafer is in the range of 45% ~ 55%. Annealing does not change the positions of absorption edge, which shows that the annealing treatment has no effect on the Mn composition of the wafer. IR transmittance of the annealed wafer increases to above 61% in the wavenumber range of 4000 ~ 500 cm⁻¹, which is close to the theoretical value of 65%.

Key words: crystal growth; HgCdTe epitaxial substrates; absorption edge; IR transmittance; annealing treatment

PACS: 81.05. Dz, 78.30. Fs, 78.40. Fy

引言

红外探测器是现代红外技术的核心, 而 Hg_{1-x}Cd_xTe 则是迄今为止应用最为广泛的红外探测器材料^[1]. 目前, 获得大面积、成分均匀的高质量 Hg_{1-x}Cd_xTe 外延薄膜是第三代红外焦平面阵列

(IRFPA) 探测器制备的关键问题^[2]. 衬底是外延生长的基础, 直接决定外延层的质量. Cd_{1-x}Zn_xTe 晶体是目前较为常用的 Hg_{1-x}Cd_xTe 外延衬底材料^[3], 但是 Zn 的分凝系数大 (1.35), 很难得到成分均匀的大尺寸 Cd_{1-x}Zn_xTe 衬底. Triboulet 等人^[4] 研究发现, Cd_{1-x}Mn_xTe 可以用于外延生长 Hg_{1-x}Cd_xTe 衬底

收稿日期: 2008-12-21, 修回日期: 2009-06-18

Received date: 2008-12-21, revised date: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(50902091); 上海市博士后科研资助计划(09R21413000)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 5090209) and Shanghai Postdoctoral Scientific Program (No. 09R21413000)

作者简介: 张继军(1981-), 男, 湖北咸宁人, 讲师、博士, 主要研究领域为化合物半导体晶体生长, 核辐射探测器设备. E-mail: zhangjijun222@shu.edu.cn.

材料,主要因为:首先, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 为闪锌矿结构,晶格常数随Mn含量变化在 $6.37 \sim 6.48 \text{ \AA}$ 范围内变动,与任意波段 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 外延层匹配;其次,Mn在 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体中的分凝因数接近于1,易于采用溶体法生长组分均匀的大尺寸晶体.

$Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体通常采用垂直 Bridgman 法生长,但是由于晶体生长过程中熔点高、堆垛层错能低、Cd 蒸汽压高和 Te 脱溶等现象, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体中存在孪晶、位错、Te 夹杂相等缺陷^[5],这些缺陷的存在不利于 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 作为衬底材料的应用.据报道晶体在一定气氛下退火可以减少或消除生长态晶体内的各类缺陷^[6],但是目前 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体退火方面却少见报道.借鉴对 $Cd_{1-x}Zn_xTe$ 的研究方法^[7],采用紫外-可见-近红外光谱仪和傅里叶变换红外光谱仪研究 Bridgman 法生长到的 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体的吸收边和红外透过性能,以了解晶体的成分均匀性、内部缺陷和自由载流子吸收等性能.并研究退火对 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体性能的影响.

1 实验方法

1.1 晶体生长和晶片退火

$Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体通过垂直 Bridgman 法生长.首先采用高纯的 Cd(7N)、Te(7N)、Mn(5N)原材料,按化学计量比在高真空下(10^{-4} Pa)封装到内径为30mm的镀有碳膜的石英坩埚中.封好的原料在 1120°C 的均匀温度场中合成 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 多晶,然后在自行研制的两温区晶体生长炉中进行单晶生长,采用的坩埚下降速度为 1 mm/h ,温度梯度为 13 K/cm ,如图1所示.图1(a)为直径30mm的 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶锭,如图1(b)为晶锭沿轴向孪晶界切片后获得的体积为 $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的(111)面 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶片^[5].

对生长态的 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶片进行Cd气氛下退火.退火过程中 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶片温度为 973 K ,Cd气氛蒸汽压为 0.23 atm ,退火时间为 120 h .

1.2 红外光谱仪测量

采用日本岛津 UV-3150 型紫外-可见-近红外光谱仪测量晶片在 $700 \sim 800 \text{ nm}$ 近红外波长范围内的透射光谱;采用美国 Nicolet Nexus 公司的傅里叶变换红外光谱仪,测试晶片在 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 中红外波数范围内的透射光谱.对图1(b)所示的生长态和退火后的晶片进行表面处理,先用粒度分别为 $2.5 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$ 的 MgO 粉机械抛光,再用2%的 Br-MeOH 溶液化学抛光 $4 \sim 5 \text{ min}$,最后得

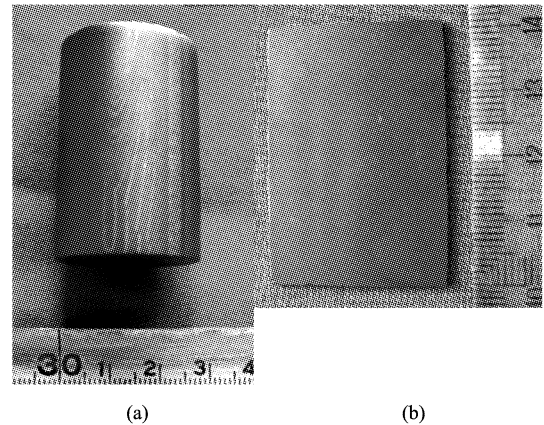


图1 Bridgman 法生长的 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (a)晶锭 (b)单晶片
Fig. 1 (a) The $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ingot grown by the Bridgman method (b) the $Cd_{1-x}Mn_xTe$ wafer with dimension of $30 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$ sliced from the ingot

到厚度为 1 mm 的样品.测试温度为 300 K .

(111)面 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶片位错蚀坑采用 Nakagawa 溶液(去离子水:双氧水:氢氟酸 = $100 \text{ ml} : 100 \text{ ml} : 150 \text{ ml}$)腐蚀 30 s 得到^[8],然后在 Olympus BX60 金相显微镜下观察. Te 夹杂相采用 Olympus BX51 红外透射显微镜检测.位错密度和夹杂相密度的计算是在晶片表面每个测试点周围 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 范围内随机取5个位置测定,求出位错密度和表面 Te 夹杂相密度的平均值.文中以表面层 Te 夹杂相密度近似表示晶体的体 Te 夹杂相密度.

2 结果与讨论

2.1 近红外透射光谱

近红外透射光谱主要研究 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体的吸收边.图2显示的是 300 K 温度下测得生长态 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶片不同位置在 $700 \sim 800 \text{ nm}$ 近红外波长范围内的透射光谱图.图2中插图显示晶片的近红外光谱测试点位置.对图2所示晶片测试点的红外透射曲线在 $27\% T_{\text{max}} \sim 47\% T_{\text{max}}$ 红外透过范围内与波长 λ 作线性拟合(T_{max} 为 $700 \sim 800 \text{ nm}$ 波长范围的最大透过率),得到测试点的吸收边截止波长 λ_{co} ,再根据 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 晶体的截止波长 λ_{co} 和Mn含量 x 的经验公式^[9]

$$x = 3.152 - 0.00412\lambda_{\text{co}} \quad (1)$$

得到晶片中各测试点的Mn含量,如表1所示.由图2可见,晶片中Mn成分沿轴向由低到高分布,在晶片头部(靠近初始生长区)测试点1处Mn的浓度 $x = 0.1887$,晶片尾部(靠近最后生长区)测试点3处

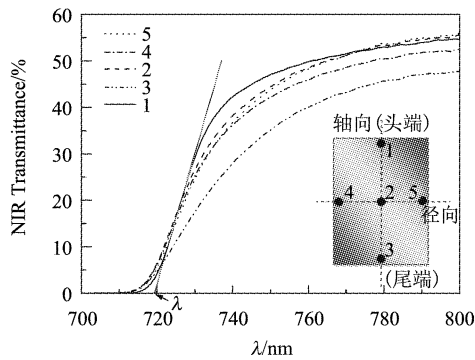


图2 生长态 Cd_{1-x}Mn_xTe 晶片不同部位近红外透过光谱(700~800 nm)

Fig. 2 The near infrared transmission spectra of different regions on the as-grown Cd_{1-x}Mn_xTe wafer (700~800 nm)

Mn 的浓度 $x = 0.2039$, 晶片中心 2 处 Mn 的含量符合晶体生长前的原始化学配比 $x = 0.2$. 为评价晶片成分均匀性, 本文定义一个成分波动差值 ΔC :

$$\Delta C = x_{\max} - x_{\min} \quad (2)$$

式(2)中, x_{\max} 和 x_{\min} 分别为 Mn 含量最大值和最小值. 因此, 通过近红外透过光谱得到晶片轴向成分波动差值 ΔC 约为 0.0152, 径向成分波动差值 ΔC 约为 0.0013. 晶片轴向成分波动与晶体生长过程 Mn 的分凝相关, 实验结果表明 Mn 的分凝系数小于 1. 晶片径向成分波动则反映了晶体生长过程的固液界面形状, 由于径向成分波动很小, 表明固液界面形状基本保持平直, 这有利于减少晶体中的位错和夹杂相.

表 1 生长态 Cd_{1-x}Mn_xTe 晶片不同部位近红外透过光谱截止波长, 中红外透过率, 位错密度和 Te 夹杂相密度

Table 1 The cut-off wavelength, IR transmittance, dislocation density and Te inclusion density on different portion of the as-grown Cd_{1-x}Mn_xTe wafer

| 生长态 Cd _{1-x} Mn _x Te 晶片 | | | | | |
|---|---------------------------------|---------|----------|---------------------------------|----------------------------------|
| 测试点 | $\lambda_{\text{co}}/\text{nm}$ | Mn/ x | $T/(\%)$ | $D_{\text{d}}/(\text{cm}^{-2})$ | $D_{\text{Te}}/(\text{cm}^{-2})$ |
| 1 | 719.25 | 0.1887 | 48.8 | 1.7×10^5 | 2.1×10^3 |
| 2 | 716.45 | 0.2002 | 55.3 | 5.2×10^4 | 1.7×10^3 |
| 3 | 715.57 | 0.2039 | 45.9 | 2.1×10^5 | 4.5×10^3 |
| 4 | 716.4 | 0.2004 | 51.7 | 9.3×10^4 | 3.1×10^3 |
| 5 | 716.72 | 0.1991 | 52.4 | 7.9×10^4 | 3.1×10^3 |

测量点的相对位置示于图 2 插图, T 为测量范围内的平均红外透过率, D_{d} 为位错密度, D_{Te} 为 Te 夹杂密度.

利用近红外透过光谱, 还可以得到 Cd_{1-x}Mn_xTe 晶体在吸收边附近的吸收系数 α . 以图 2 中晶片测试

点 2 为例, 此时 Cd_{1-x}Mn_xTe 中 Mn 含量 $x \approx 0.2$. 假设晶片表面为理想镜面且两面平行, 考虑光在样品内部经多次反射, 而忽略干涉效应, 吸收系数 α 应为:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2} - (1-R)^2}{2TR^2} \right\} \quad (3)$$

式(3)中, d 为晶片厚度, R 为反射率 ($R = 0.23$)^[10], T 为透过率. 根据式(3)算得吸收系数 α 与入射近红外光能量的关系, 如图 3 所示. 由图 3 可见, Mn 含量 $x = 0.2$ 的 Cd_{1-x}Mn_xTe 晶体在吸收边的吸收系数 α 变化范围为 $2.5 \sim 55 \text{ cm}^{-1}$, 且与入射近红外光能量的关系符合 Urbach 方程^[11],

$$\alpha = \alpha_0 \exp[\beta_0(E - E_0)/kT] \quad (4)$$

式(4)中, α_0 , β_0 , E_0 均为常数, 与入射光能量和温度变化无关, k 为 Boltzmann 常数. 图 3 中虚线为拟合结果, 拟合得到 $\alpha_0 = 4.578$, $\beta_0 = 1.432$, $E_0 = 1.695 \text{ eV}$. 可见在入射红外光能量小于禁带宽度时晶体的吸收系数与光子能量呈指数关系.

2.2 傅里叶变换红外透射光谱

红外透过率是衡量 Cd_{1-x}Mn_xTe 晶片作为 Hg_{1-x}Cd_xTe 外延衬底材料的一个非常重要标准. 为此, 研究了生长态 Cd_{1-x}Mn_xTe 晶片在 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ ($2.5 \sim 20 \mu\text{m}$) 的中红外波段的红外透过率. 其红外透过光谱见图 4, 测量点位置与近红外透过光谱一致. 测量结果见表 1, 同时还列出了对应位置采用缺陷腐蚀获得的位错密度 D_{d} 和 Te 夹杂相密度 D_{Te} .

晶片上各点的红外透过率基本都在 45% ~ 55% 范围内, 最高达到 55.3%. 红外透过曲线在入射红外光波长范围内基本保持水平, 表明红外透过率不随入射光波长变化而变化. 红外透过率与晶片的位错密度和 Te 夹杂密度密切相关. 位错密度和

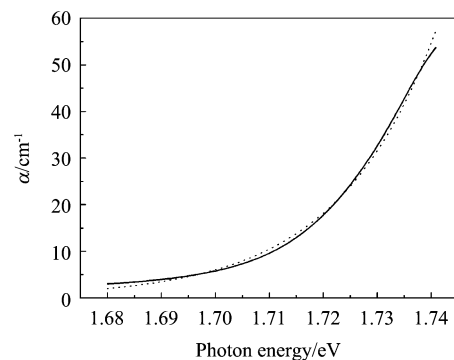


图 3 室温下 Cd_{1-x}Mn_xTe ($x = 0.2$) 的吸收系数与入射光子能量的关系

Fig. 3 Room temperature absorption coefficient of Cd_{1-x}Mn_xTe ($x = 0.2$) crystal vs. photon energy

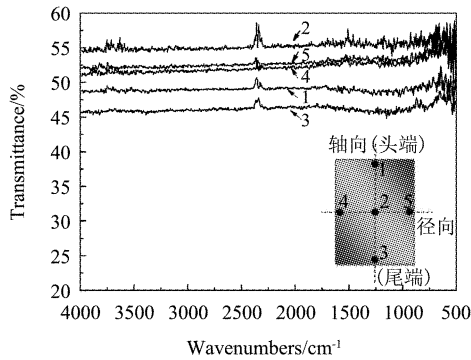


图4 生长态 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶片不同部位的中红外透过光谱
Fig. 4 The Mid-infrared transmission spectra of different regions on the as-grown $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ wafer ($4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$)

Te 夹杂密度都越低,红外透过率就越大。

$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体在入射光波数 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ (波长 $2.5 \sim 20 \mu\text{m}$) 的中红外范围内理论透过率按以下公式计算:

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-ad}}{1 - R^2 e^{-ad}}, \quad (5)$$

其中, T 为红外透过率, a 为吸收系数, R 为反射率, d 为晶片厚度. 当 a 取为无穷小、 $R = 0.21$ 时^[12], 计算得到晶体的理论红外透过率为 65%. 可见, 吸收系数是影响晶体红外透过率的主要原因. 在 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体对红外光的吸收主要表现为晶格吸收和自由载流子吸收. 这两种吸收机理分别由晶体中的晶格振动和自由载流子吸收所造成, 且与入射红外光的频率密切相关. 随着光子频率的增加, 晶格振动加剧, 从而导致透过率的减小^[13], 但与此同时, 晶体中自由载流子的吸收变小, 透过率随之增加^[14], 在这两种吸收机理的共同作用下, 生长态 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体在入射光波数 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 的中红外范围内的透过率图谱基本为水平的直线. $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体中存在的位错和夹杂相缺陷会造成晶体中的晶格错配, 从而导致晶格振动缺陷加剧, 晶体的红外透过率降低. 另外, 半绝缘态的 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体很难得到, 表明晶体中的自由载流子浓度很高, 自由载流子的吸收使晶体的红外透过率降低. 因此, 利用晶体在中远红外入射光波数范围 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 的红外透过率谱线可以评价晶体的结晶质量.

2.3 退火对晶体红外透过性能的影响

为提高 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体的红外透过率, 对生长态(111)面 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶片进行 Cd 气氛退火. 退火后晶片各测试点的近红外吸收边截止波长 λ_{co} 、

中红外透过率、位错和 Te 夹杂相密度如表 2 所示. 退火前后晶片中同一位置典型的近红外透过光谱和中红外透射图谱如图 5、图 6 所示.

表 2 退火后 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶片不同部位的近红外透过光谱截止波长, 中红外透过率, 位错密度和 Te 夹杂相密度

Table 2 The cut-off wavelength, IR transmittance, dislocation density and Te inclusion density on different portions of the annealed $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ wafer

| 退火后 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶片 | | | | | |
|--|---------------------------------|---------------|----------|---------------------------------|----------------------------------|
| 测试点 | $\lambda_{\text{co}}/\text{nm}$ | Mn/x | $T/(\%)$ | $D_{\text{d}}/(\text{cm}^{-2})$ | $D_{\text{Te}}/(\text{cm}^{-2})$ |
| 1 | 719.26 | 0.1887 | 62.7 | 7.5×10^4 | 1.1×10^3 |
| 2 | 716.48 | 0.2001 | 63.5 | 2.7×10^4 | 9.4×10^2 |
| 3 | 715.55 | 0.2039 | 61.4 | 8.2×10^4 | 2.3×10^3 |
| 4 | 716.4 | 0.2004 | 61.9 | 3.2×10^4 | 1.7×10^3 |
| 5 | 716.7 | 0.1992 | 63.1 | 2.9×10^4 | 1.5×10^3 |

由表 2 和图 5 可知晶片退火前后的截止波长 λ_{co} 变化较小, 表明退火前后 Mn 含量基本没有变化. 退火后, 晶片在 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内的红外透过率大幅提高, 红外透过率由退火前的 45% ~ 55% 提高到 61% 以上, 接近理想的红外透过率值 65.0%, 如表 2 和图 6 所示. Cd 气氛下退火后 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶片中位错密度、Te 夹杂相密度降低了 1 ~ 2 倍, 同时, Cd 气氛退火也有利于补偿晶体中的点缺陷, 提高电阻率, 降低自由载流子对红外光的吸收. 因此, 退火后晶体的红外透过率得到大幅度的提高.

3 结论

采用紫外-可见-近红外光谱仪和傅里叶变换红外光谱仪研究了生长态和退火后 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ (111) 面晶片的吸收边和红外透过性能, 结果表明, 在波

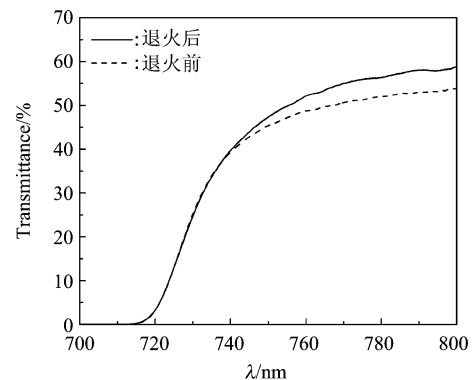


图 5 退火前后 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶片典型的近红外透过光谱
Fig. 5 Typical near-infrared transmission spectra of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ wafers in as-grown and annealed states

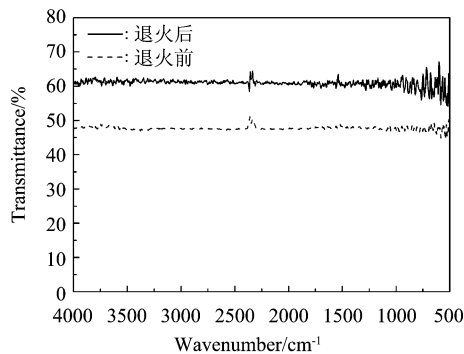


图6 退火前后 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶片典型的中红外透过光谱
Fig. 6 Typical mid-infrared transmission spectra of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ wafers in as-grown and annealed states

长 700 ~ 800 nm 的近红外光范围,吸收边的截止波长反映生长态晶片 (30 mm × 40 mm) 的 Mn 含量范围为 $0.1887 \leq x \leq 0.2039$, 晶片中轴向成分波动差值约为 0.0152, 径向成分波动差值约为 0.0013. $x = 0.2$ 的 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶体吸收边的吸收系数 α 变化范围为 $2.5 \sim 55 \text{ cm}^{-1}$, 其与入射光能量的关系符合 Urbach 方程; 在波数 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ ($2.5 \sim 20 \mu\text{m}$) 中红外入射光波段, 生长态晶体的红外透过率在 45% ~ 55% 范围内, 且不随波数的变化而改变. 晶体对该波长范围红外光的吸收表现为晶格吸收和自由载流子吸收; Cd 气氛退火后, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 晶片的吸收边位置基本没有变化, 晶片中 Mn 的成分含量未受到退火的影响. 退火后, 晶片在 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内的红外透过率提高到 61% 以上, 接近理论值 65%.

REFERENCES

- [1] CHU Jun-Hao. *Physics and properties of narrow gap semiconductors* [M]. Beijing: Science and Technology Press (褚君浩. 窄禁带半导体物理学. 北京: 科学技术出版社), 2005: 6 - 100.
- [2] Donald A R, Stuart H, James C, *et al.* Third generation imaging sensor system concepts [J]. *SPIE*, 1999, **3701**: 108 - 117.
- [3] YANG Jian-Rong, ZHANG Chuan-Jie, FANG Wei-Zheng, *et al.* Te-rich dipping technique of HgCdTe liquid phase epitaxy [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (杨建荣, 张传杰, 方维政, 等. 碲镉汞富碲垂直液相外延技术. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(5): 325 - 309.
- [4] Triboulet R, Heurtel A. and Rioux J. Twin-free (Cd, Mn) Te substrates [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1990, **101**: 131 - 134.
- [5] Zhang J J, Jie W Q, Wang L J, *et al.* Twins in CdMnTe single crystals grown by Bridgman method [J]. *Crystal Research and Technology*, 2010, **45**: 7 - 12.
- [6] Belas E, Bugar M, Grill R, *et al.* Reduction of inclusions in (CdZn)Te and CdTe: In single crystals by post-growth annealing [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**(9): 1212 - 1218.
- [7] LI Guo-Qiang, JIE Wan-Qi, HUA Hui. Deducing the properties of CdZnTe wafers by IR transmission [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (李国强, 介万奇, 华慧. 根据红外透过率推断 CdZnTe 晶片的性能. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(6): 469 - 472.
- [8] Nakagawa K, Maeda K, Takeuchi S. Observation of dislocations in cadmium telluride by cathodoluminescence microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 1979, **34**: 574 - 575.
- [9] Zhang J J, Jie W Q, Luan L J, *et al.* Evaluation of Mn uniformity in CdMnTe crystal grown by the vertical Bridgman method [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**(8): 1158 - 1162.
- [10] Zaets W, Watanabe K, Ando K. $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ magneto-optical waveguide integrated on GaAs substrate [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, **70**: 2508 - 2510.
- [11] Urbach F. The long-wavelength edge of photographic sensitivity and of the electronic absorption of solids [J]. *Physics Review*, 1953, **92**: 1324.
- [12] Andr R, Dang L S. Low-temperature Refractive Indices of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ and $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, **82**(10): 5086 - 5089.
- [13] HUANG Kun, HAN Ru-Qi. *Solid-state physics* [M]. Beijing: Higher Education Press (黄昆, 韩汝琦. 固体物理学. 北京: 高等教育出版社), 1988: 437 - 463.
- [14] SUN Yi-Cai. *Semiconductor measurement technology* [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press (孙以材. 半导体测试技术. 北京: 冶金工业出版社), 1984: 225 - 260.
- [6] Sahal M, Mar B, Mollar M. CuInS₂ thin films obtained by spray pyrolysis for photovoltaic applications [J]. *Thin Solid Films*, 2009, **517**(7): 2202 - 2204.
- [7] Martineza A M, Arriagab L G, Fernandez A M, *et al.* Band edges determination of CuInS₂ thin films prepared by electrodeposition [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2004, **88**(2-3): 417 - 420.
- [8] Gosslam, Hahn T H, Metzner H, *et al.* Thin CuInS₂ films by three-source molecular beam deposition [J]. *Thin Solid Films*, 1995, **268**(1-2): 39 - 44.
- [9] Wijesundera R P, Siripala W. Preparation of CuInS₂ thin films by electrodeposition and sulphurisation for applications in solar cells [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004, **81**(2): 147 - 154.
- [10] Hou X H, Choy K L. Synthesis and characteristics of CuInS₂ films for photovoltaic application [J]. *Thin Solid Films*, 2005, **480 - 481**: 13 - 18.
- [11] Sharma A K, Rajaram P. Nanocrystalline thin films of CuInS₂ grown by spray pyrolysis [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2010, **172**(1): 37 - 42.
- [12] Peng S J, Cheng F Y, Liang J, *et al.* Facile solution-controlled growth of CuInS₂ thin films on FTO and TiO₂/FTO glass substrates for photovoltaic application [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, **481**(1-2): 786 - 791.

(上接 105 页)