

93-97

Hg_{1-x}Cd_xTe 液相外延薄膜的光致发光

李标 常勇^V 褚君浩 陈新强 曹菊英 唐文国 汤定元

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家实验室, 上海, 200083)

A **摘要** 用红外光荧光测量分析了 Hg_{1-x}Cd_xTe 液相外延薄膜的发光特性, 观察到局域激子及束缚激子发光. 当外延层减薄至 2μm 后, PL 信号的峰位将向高能方向移动, 这是由于外延薄膜纵向组份不均匀引起的.

关键词 光荧光, Hg_{1-x}Cd_xTe, 液相外延.

TN30426

引言

HgCdTe

TN213

Hg_{1-x}Cd_xTe 是研制红外探测器的重要材料. 液相外延是一种较为成熟的生长 Hg_{1-x}Cd_xTe 薄膜的工艺, 目前最好性能的 512×512 元红外焦平面阵列探测器就是用液相外延 Hg_{1-x}Cd_xTe 材料研制的^[1]. 液相外延技术现已成为各国红外研究中的重要手段.

光致发光(PL)光谱测量可用于检测材料的杂质、缺陷及晶体质量, 我们用垂直浸渍液相外延技术生长了 Hg_{1-x}Cd_xTe 薄膜, 并用光荧光测量方法分析了 HgCdTe 液相外延样品的发光特性.

③

1 实验内容

采用 Hg 回流垂直浸渍液相外延系统生长 Hg_{1-x}Cd_xTe 薄膜, 这种系统可生长大面积、组份均匀、表面形貌好的样品, 且溶液的 Hg 压容易控制^[2]. 生长衬底为(111)面的 CdTe 或 CdZnTe, 面积为 18mm×20mm, 采用竖直进出片, 水平生长的夹具固定衬底, 即样品的下降与拉起都是在竖直方向, 而生长则在水平方向. 在水平方向生长可使外延层的组份和厚度均匀, 而以垂直方式脱离生长溶液可以减少母液粘连^[3]. 生长结束后, 样品在富 Hg 气氛下原位退火 6h, 使材料的导电类型变为弱 p 型. 退火后 77K 时的 p 型载流子浓度 $p \approx 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率 $> 150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

进行 PL 测试前, 外延薄膜样品经抛光和腐蚀处理后, 然后放入可控温的 Oxford 1204 液氮杜瓦瓶中, 用 514nm 的 Ar⁺激光激发样品正表面, 产生的荧光信号经抛物面镜收集后用 Nicolet 800 傅里叶变换光谱仪分析.

2 结果与讨论

由于 Hg_{1-x}Cd_xTe 外延样品普遍存在着纵向组份的不均匀性, 而荧光测量反映的是样品表面的信息. 为了准确地解释实验结果, 可用拟合红外透过率方法^[4,5]求出外延样品的表面组份, 以便对 PL 信号进行分析.

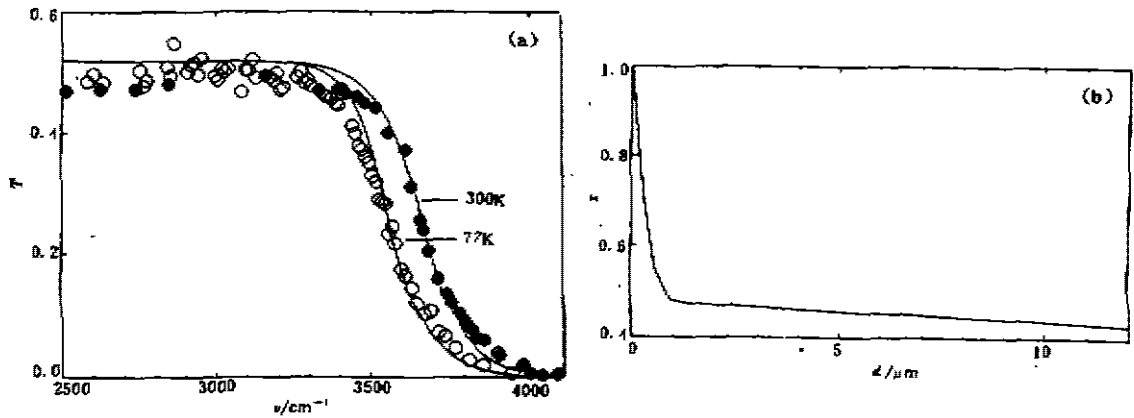


图1 p型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延薄膜在 300K 和 77K 的
(a) 红外透射曲线和 (b) 拟合得到的纵向组份分布.

Fig. 1 Infrared transmission (a) and the fitted composition-in-depth profile
(b) of p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ liquid phase epitaxial film at 300K and 77K

根据 Hougén 模型^[4], 当一束光照射到 HgCdTe 外延层/ CdTe 衬底两层结构的样品表面时, 其透过率 $T_{1,3}$ 为

$$T_{1,3} = \frac{(1-R_1)(1-H)T_{2,3}a_1}{1-R_1(1-H)R_{2,3}(a_1)^2} \quad (1)$$

其中 R_1, R_2, R_3 分别是 3 个界面的反射率, a_1 是外延层吸收率, 与薄膜纵向组份分布有关^[5].

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 外延薄膜的纵向组份分布可表示为^[4]

$$x(z) = \frac{1 - (x_s + sd)}{1 + 4(z/\Delta z)^2} + (x_s + sd) - sz, \quad (2)$$

式中 z 是外延层离开衬底的距离, $x_s, s, \Delta z$ 是拟合参数, x_s 与外延层表面组份有关, Δz 与过渡区宽度有关, s 与外延层组份的纵向变化率有关. 这 3 个参数可通过拟合室温红外透射率的吸收边及本征吸收区得到^[5]. 式(1)和(2)对用 MBE、LPE、MOCVD 等外延技术生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 外延样品均适用.

图 1(a) 为 PL 测量使用的 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延薄膜样品在 300K 和 77K 时的红外透射曲线. 图中圆点为实验数据, 实线为计算结果. 计算时根据室温透射光谱拟合求出式(2)中 $x_s, s, \Delta z$ 的值, 然后只改变温度, 令 $T=77\text{K}$, 代入式(1)求出 77K 时的透过率. 可见此时的计算结果仍与实验点符合, 说明公式(1)和(2)拟合纵向组份分布的模型在低温情况下仍然成立.

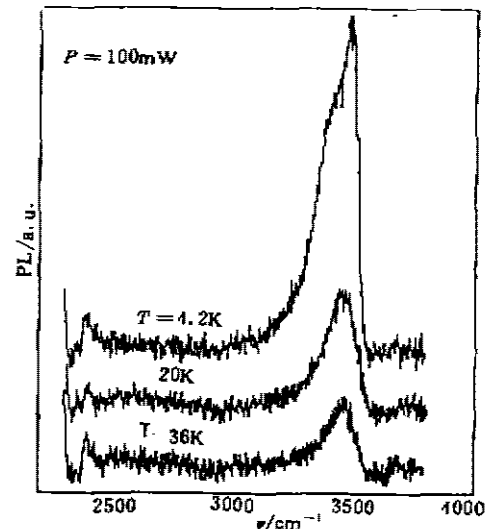


图2 p型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延
薄膜样品的变温光致发光谱
(激光功率 $p=100\text{mW}$, 样品表面组份 $x=0.413$)
Fig. 2 Variable-temperature photoluminescence
of p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ liquid phase epitaxial
film (the surface composition
of epilayer is $x=0.413$)

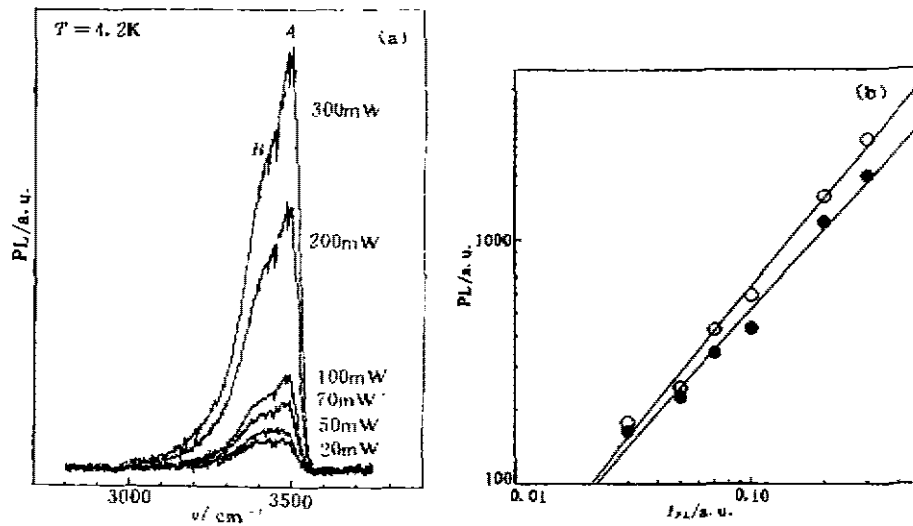


图 3 (a) 4.2K 时 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延薄膜样品的变光强 PL 光谱(样品的表面组份 $x=0.413$), (b) PL 光谱发光强度与入射激光功率的变化关系

Fig. 3 (a) The photoluminescence of p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ liquid phase epitaxy film with variable laser intensity at 4.2K (the surface composition of epilayer is $x=0.413$), (b) dependence of PL intensity on laser intensity

图 1(b) 为拟合(a)中的室温透过率得到的外延层纵向组份分布, 可见该样品的表面组份 $x_s=0.413$, 过渡区宽度 $\Delta x \approx 1.2\mu\text{m}$. 由禁带宽度公式^[6]

$$E_g(x, T) = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2(10^{-4}))T + 0.35x^4 \quad (3)$$

可求出不同温度下样品表面层的带宽.

图 2 为图 1 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延样品在不同测试温度下的光致光谱. 由图可知, 当温度下降时, 最高能量发光峰的峰强逐渐增大, 并伴有蓝移现象, 当温度降到 4.2K 时, 在最高峰的低能侧约 10meV 处又出现一个发光峰.

为了判断 4.2K 时出现的 2 个发光峰的性质, 我们在不同的激光功率下进行了 PL 测试, 并给出了 PL 信号的强度随入射激光功率的变化关系, 如图 3(a) 和 (b). 由图可见, 在不同的激发功率下 2 个 PL 峰基本呈对称线型, 这样可以用两个高斯函数来拟合 PL 谱. 激子复合跃迁强度 I_{sc} 用高斯函数表示为^[7]

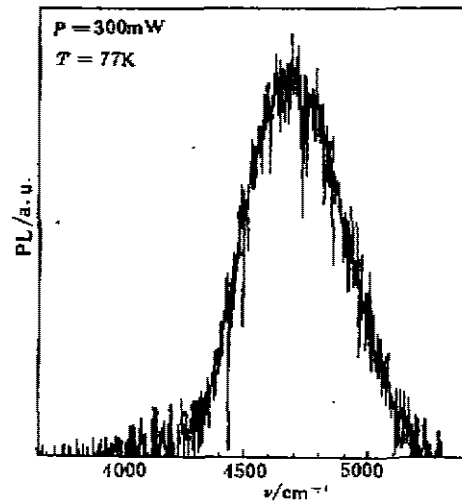


图 4 减薄后 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延薄膜样品在 77K 时的光致光谱 (激光功率密度 $P=300\text{mW}/\text{cm}^2$)

Fig. 4 Photoluminescence of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ liquid phase epitaxial film after thinned at 77K (the laser power density is $300\text{mW}/\text{cm}^2$)

$$I_{ax} = A \exp\left[-\frac{[\hbar\omega - E(T)]^2}{2\sigma^2(T)}\right] \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right), \quad (4)$$

式中 A 、 $E(T)$ 、 $\sigma(T)$ 分别为激子跃迁的振幅、能量位置和扩展因子。由于很难从实测 PL 谱中准确确定各峰的能量位置, 为此可以通过调节式(4)中的参数 A 、 $E(T)$ 、 $\sigma(T)$, 使式(4)的计算结果与实验光谱符合, 由此得到的峰值能量 $E(T)$ 较精确^[7]。

通过对图 3 中 PL 信号的拟合, 可知 4.2K 时出现的 A、B 两个发光峰对应的能量分别是 432meV 和 416meV, 各峰的强度随着入射激光功率的增大而增加。在对数坐标中, A、B 峰的发光强度 I_{PL} 与入射激光功率 P_L 均有较好的线性关系。如果将 I_{PL} 与 P_L 的关系用指数形式表示, 即 $I_{PL} = C \cdot P_L^\gamma$ (C 为比例系数), 则 A、B 峰的指数因子 γ 分别为 1.43 和 1.4, 这说明它们都与束缚激子发光有关。因为自由激子的发光强度 I_{PL} 与激光功率 P_L 基本成线性关系, 即 $\gamma \approx 1$, 而束缚激子发光对应的指数因子 γ 大于 1^[8,9]。

根据式(3)可以算出当表面组份 $x=0.413$ 时, 其对应的带宽 $E_g = 440\text{meV}$, 这样, A 峰的能量位置比禁带宽度 E_g 约小 8meV。由于 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的空穴有效质量大, 组份无序等将引起波函数变化, 从而产生局域激子 LX。当 $x \approx 0.4$ 时, 局域化能级约为 10meV^[10,11]。这样, 结合光强与激光功率的关系可以认为 A 峰发光是由局域化激子 LX 引起的。B 峰的能量比 E_g 约小 24meV, 该能级位置与用类氢模型算出的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的类氢受主能级相近, 可见 B 峰是类氢受主 BX 发光。这一受主能级与 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延薄膜中 Hg 空位的存在有关^[12]。

将图 1 样品的外延层用抛光和腐蚀方法仔细减薄至 $2\mu\text{m}$ 左右, 然后在 77K 下进行 PL 测量, 结果如图 4 所示。可见 PL 谱的噪声较大, 其 77K 时的峰值能量位置为 584meV, 比未减薄样品的峰位约高 145meV, 半峰宽也增加到 37meV。通过拟合透射光谱得到此时样品的表面组份变为 $x \approx 0.5$ 。因为 HgCdTe 和 CdTe 的自由能不相等, 在液相外延生长过程中衬底的 Cd 原子将向外延层中扩散, 这样, 随着外延层厚度的减薄, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的组份 x 将增加, 使 PL 信号的峰值向高能端移动。又由于液相外延生长的初期阶段缺陷、位错较多, 成核不均匀^[13], 及抛光过程中引入的应力损伤等影响, 故外延层减薄后, 其 PL 谱的半峰宽和噪声变大。

3 结论

用荧光光谱对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延薄膜样品进行了分析, 观察到了局域激子及束缚激子发光。由于外延薄膜的纵向组份不均匀, 当外延层减薄后, PL 信号峰位将向高能方向移动。

参考文献

- 1 Daniel Amingual. *SPIE*, 1991, 40: 1512
- 2 李 标, 陈新强, 褚君浩, 等. *红外与毫米波学报*, 1995, 14(3): 216
- 3 Wan C F, Weirauch D F, Korenstein R, et al. *J. Electron. Materials*, 1986, 15: 151
- 4 Hougén C A. *J. Appl. Phys.*, 1989, 66: 3763
- 5 Li Biao, Chu J H, Liu K. et al. *J. Phys. C*, 1995, 7: 29
- 6 Chu J H, Xu S Q, Tang D Y. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, 43: 1064
- 7 沈文忠. 博士论文, 中科院上海技术物理所, 1995: 120

- 8 Gold J S, Myers T, Giles N C, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**:6866
- 9 Feng E C, Bevan M J, Choyke W J, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**:2595
- 10 Fuchs F, Koidl P. *Semicond Sci. Technol.*, 1991, **6**:71
- 11 Tomm J W, Hermann H. *J. Cryst. Growth*, 1994, **138**:175
- 12 Capper P, Gosney J J, Jones C L, *et al.* *J. Cryst. Growth*, 1985, **71**:57
- 13 Sher A. *et al.* *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1990, **8**:1093

PHOTOLUMINESCENCE OF $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ LPE FILMS

Li Biao Chang Yong Chu Junhao Chen Xinqiang

Cao Juying Tang Wenguo Tang Dingyuan

(*National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The infrared photoluminescence of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ LPE films was presented. The localized exciton (LX) and bound exciton (BX) were observed from the PL measurement. After reducing the epilayer thickness to about $2\mu\text{m}$, the movement of PL peak to higher energy side occurred, which was ascribed to the non-uniformity of longitudinal composition of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epilayer.

Key words photoluminescence, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, liquid phase epitaxy.