

# Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 的扫描光致发光研究

常勇 褚君浩 唐文国 沈文忠 茅文英 汤定元

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

**A 摘要** 用傅里叶变换红外扫描光致发光方法研究了 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 体单晶样品, 该方法可直接得到 HgCdTe 晶片组分的二维平面分布, 并可得到辐射复合在复合机制中所占比重的平面分布, 以及晶体中非平衡载流子寿命的分布.

**关键词** 光致发光, Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te, 寿命.

引言

Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 光电器件, 尤其是焦平面器件制造工艺的发展, 对材料的检测手段提出了越来越高的要求, 不但要求检测总体性质, 而且对各微区的性质及分布也要迅速准确地加以评价. 为此, 已建立了多种有关的检测手段<sup>[1~4]</sup>, 但这些测量手段都必须在样品上制备电极, 这样就在一定程度上影响了这些技术的很广泛使用.

尽管光致发光平面扫描技术因其方便易行、非破坏性和非接触性早已在其它半导体材料的性能检测与工艺控制研究等方面得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>, 但是对于 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 来说, 由于它的禁带宽度较窄, 光生非平衡载流子辐射复合占的比重较小, 而且, 在中波红外以上区域, 所能选用的探测器总的灵敏度低, 各种干扰(包括热背景干扰)大, 所有这些加大了这一手段的研究难度. 我们利用傅里叶变换红外光致发光技术的高灵敏度、高分辨率、快速以及自动化程度高的优点, 在原有光致发光实验设备的基础上, 实现了扫描光致发光测量, 不仅得到样品表面的组分分布, 而且还得到了非平衡载流子寿命的面分布.

## 1 实验

光致发光扫描实验选用 Sb 掺杂和未掺杂的 HgCdTe 单晶片, 在液氮温度下(77K)进行, 这是因为 HgCdTe 光电器件主要在此温区工作. 待测样品先经溴-甲醇溶液进行化学腐蚀, 以减少表面复合的影响, 然后将样品置于金属液氮杜瓦中, 放在与样品表面平行的平面内运动的扫描装置上, 机械系统移动的精度是 10μm, 用 cw Ar<sup>+</sup>514.5nm 激光激发样品正表面, 发光用抛物面镜收集, 送入装有液氮致冷的 InSb 和 HgCdTe 探测器的 Nicolet 800 傅里叶变换光谱仪中进行分析. 激光可根据器件工艺的不同要求进行聚焦, 机械系统可选用不同的步长, 从而得到不同的分辨率. 现有条件下, 整个系统的最高分辨率 20μm. 需要指出的是, 扫描是通过样品的移动实现的, 实验光路在整个实验过程中保持不变, 从而保证了样品不同点发光强度的可比性.

## 2 结果与分析

图1为一样品不同点的光致发光光谱. 这一样品是 Sb 掺杂  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  晶片的一部分. 位于最高能端的最强的发光峰在 50K 以上时, 与激发光功率成近似平方的关系, 说明它和激光激发生成的电子、空穴的浓度和乘积有关, 而且峰位与带隙的温度依赖关系完全一致, 它来源于带到带的跃迁. 4.2K 至大于 100K 温度下 Sb 掺杂  $\text{HgCdTe}$  的光致发光性质的讨论见文献[6]. 光致发光的带间跃迁峰位的二维分布如图2所示, 忽略样品自吸收造成的不大于 1~2meV 的影响, 可以认为发光峰位置在数值上等于禁带宽度  $E_g$ . 从而可利用表征  $E_g$ 、组分  $x$  和温度  $T$  之间关系的经验公式<sup>[7,8]</sup>:

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

由光致发光峰峰位的面分布可以不受 Urbach 带尾的影响, 更直接、更准确地定出样品组分  $x$  的面分布, 结果如图3所示. 所测得的另外一块未掺杂的完整  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  晶片的组分面分布如图4所示. 从图3和图4中可见组分不均匀(晶片的边缘组分较大, 晶片的中心组分较小). 其原因有: (1) 晶体生长过程中, 如果固液界面凹向熔体, 则先凝结的周围区域  $x$  组分较大; (2)  $\text{HgTe}$  熔液比重比  $\text{HgCdTe}$  熔液高, 对于一个垂直坩埚, 熔体结晶时析出的过剩  $\text{HgTe}$  将向凹状界面的中部聚集, 从而加剧了晶片横向组分的不均匀性. 如果要生长晶体的组分较大, 熔液内  $\text{CdTe}$  含量越多, 横向的均匀性也就越差<sup>[9]</sup>. 因此, 在  $\text{HgCdTe}$  晶体生长过程中, 保持平面状的固液界面对生长晶体的横向组分均匀性是非常重要的, 对大组分  $\text{HgCdTe}$  晶体的生长尤为重要.

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  中光生非平衡载流子的体内复合的, 主要途径有辐射复合、Shockly-Read 复合和 Auger 复合 3 种, 光致发光直接对应着其中的辐射复合过程. 利用低温下光生载流子密度远大于平衡值的近似(即  $n \approx p$ ,  $n$  和  $p$  分别是  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  中的电子、空穴浓度), 以上过程的速率方程可写为:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\eta \alpha I_0}{h \omega_{ex}} - \frac{n}{\tau}, \quad (1)$$

式(1)中

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{SR}} + \frac{1}{\tau_A},$$

$\alpha$  是量子能量为  $h\omega_{ex}$  的激发光子的吸收系数,  $I_0$  是激发功率密度,  $\eta$  是量子效率,  $\tau$  是光生非平衡载流子寿命,  $\tau_r$  是其辐射复合寿命,  $\tau_{SR}$  是 Shockly-Read 复合寿命,  $\tau_A$  是 Auger 复合寿

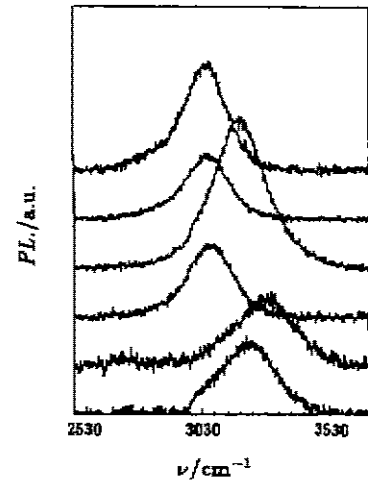


图1 掺Sb样品在77K下不同点的光致发光光谱

Fig.1 The photoluminescence spectra from different points on the surface of Sb-doped sample at 77K

命,光致发光强度  $I_{PL} \propto n/\tau_r$ , 在维持激发光强不变的准平衡情况下,载流子浓度不随时间变化,即:  $\frac{dn}{dt} = 0$ , 这时

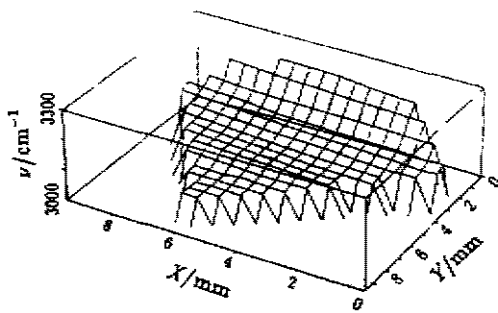


图2 图1所示样品光致发光的带到带跃迁发光峰位置平面分布  
Fig. 2 The scanning photoluminescence band-to-band peak energy distribution of the sample shown in Fig. 1

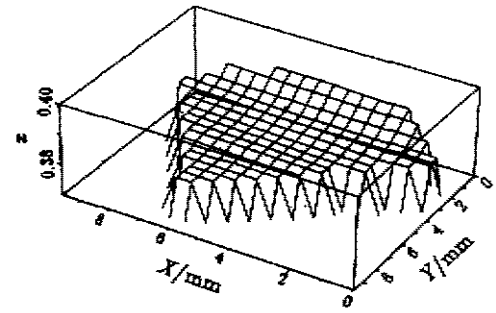


图3 由图2得到的样品表面组分x的二维平面分布  
Fig. 3 The 2-D distribution of surface composition x obtained from Fig. 2

$$n = \frac{\eta a I_0 \tau}{\hbar \omega_{ex}}$$

光致发光强度:

$$I_{PL} \propto \frac{n}{\tau_r} = \frac{\eta a I_0 \tau}{\hbar \omega_{ex} \tau_r} \quad (2)$$

式(2)说明,辐射复合机制在样品非平衡载流子的复合机制中所占的比重可以通过光致发光表现出来. 而根据 Schacham<sup>[10]</sup>等的计算,带间的直接辐射复合寿命为

$$\tau_r = \frac{1}{B(n+p)}, \quad (3)$$

$$B = 5.8 \div 10^{-3} \sqrt{\epsilon_\infty} \left( \frac{m_0}{m_e^* + m_h^*} \right)^{\frac{3}{2}} \left( 1 + \frac{m_0}{m_e^*} \right) + \frac{m_0}{m_h^*} \left( \frac{300}{T} \right)^{\frac{3}{2}} (E_g^2 + 3k_B T E_g + 3.75(k_B T)^2);$$

$\epsilon_\infty$  是高频介电常数;  $m_e^*$  是电子有效质量;  $m_h^*$  是空穴有效质量;  $m_0$  是电子质量;  $k_B$  为玻耳兹曼常数. 在一定的温度和激发功率下,忽略组分不均匀引起的微小差别,辐射复合寿命基本可近似看作一个定值,这样,光致发光的面分布近似体现了材料中非平衡载流子寿命的分布. 所以,用光致发光扫描方法不但能迅速、简便、非接触和无破坏地得到样品表面组分的面分布,而且还可以得到样品辐射复合寿命与非平衡载流子寿命之比的面分布和近似的非平衡载流子寿命的面分布.

图1所示样品的发光强度二维分布如图5所示,由图5可见,发光强度表现出较大的离

散性,这说明了材料非平衡载流子寿命的分布比较离散.事实上,在  $\text{HgCdTe}$  晶体中大量地存在着晶体缺陷,如位错、亚晶界、晶格扭曲和滑移线等,它们破坏了晶格的对称性,往往在禁带中引入深能级,从而降低非辐射复合寿命和总的非平衡载流子寿命.因为它们的分布是不均匀的,而且对辐射复合的影响也不尽相同,所以,使得发光的分布变得很不均匀,但总的趋势是晶片中部发光较强,边缘较弱,说明样品中部的晶格完整性好,光激发非平衡载流子寿命较长.

晶格不完整性的影响还可以从下面的实验结果直接看出:图 6 是将图 5 的样品人为地用锐器在上面引入划痕(划痕宽度约为  $0.6\text{nm}$ ),可以看到在划痕处发光强度减少了  $1\sim 2$  个数量级,说明在划痕处,辐射复合在复合机制中所占的比重大大下降,总的非平衡载流子的寿命大大缩短.在器件研制中,非平衡载流子寿命是一个很重要的量,用这种扫描方法可以测量得到非平衡载流子寿命分布,是很有意义的.同时说明,如果进一步提高机械系统的精度和自动化水平,提高分辨率精度,还可以分辨出位错和滑移线等晶体缺陷,事实上,在  $\text{GaAs}$  中已用这种光致发光扫描方法看到了上述缺陷<sup>[5]</sup>.

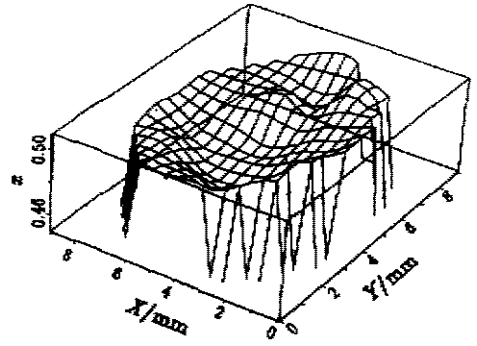


图 4 用扫描光致发光方法得到的非故意掺杂  $\text{HgCdTe}$  完整晶片组分  $x$  的二维平面分布  
Fig. 4 The 2-D distribution of composition  $x$  of a non-intentionally doped  $\text{HgCdTe}$  chip, obtained by scanning photoluminescence

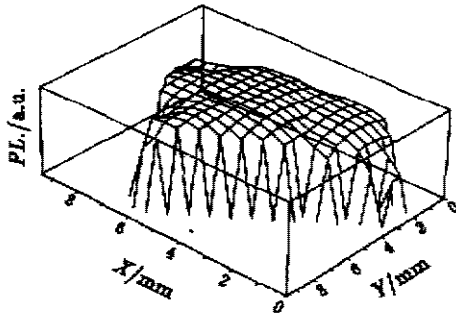


图 5 图 1 所示晶片的带间带发光的对数发光强度分布  
Fig. 5 The scanning photoluminescence logarithmic distribution of band-to-band peak intensity of the sample shown in Fig. 1

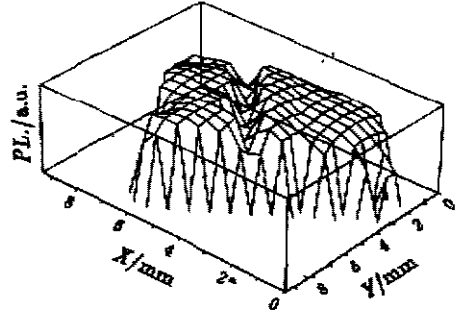


图 6 图 5 所示样品在表面人为制造划痕后的对数发光强度  
Fig. 6 The scanning photoluminescence logarithmic distribution of band-to-band peak intensity of the sample shown in Fig. 5 after intentional scribing

### 3 结论

用红外傅里叶变换光致发光扫描方法研究了  $\text{HgCdTe}$  样品,结果表明这种方法不但可

以直接得到 HgCdTe 晶片组分的二维平面分布,而且还可以得到辐射复合在复合机制中所占比重的二维平面分布,在一定的近似条件下,就得到了晶体非平衡载流子寿命的平面分布,从而,对样品晶体质量的分布有了大体的了解,所有以上能够得到的参数,对材料生长和器件的制造工艺来说都是重要的.由于这种方法迅速、简便、非接触和无破坏性,因而将可以方便地应用在 HgCdTe 材料生长和器件制造的各个过程.

### 参考文献

- 1 龚海梅,碲镉汞表面与界面的研究,中国科学院上海技术物理研究所博士论文,1993
- 2 Baja J, Babulac L O, et al. *J. Vac. Technol.*, 1987, **A5**: 3186
- 3 Kopanski J J, Lowney J R, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1992, **B10**: 1553
- 4 茅文英,褚君浩,等. *红外与毫米波学报*, 1994, **13**(5): 352
- 5 Hovel H J. *Semicond. Sci. Technol.*, 1992, **7**: A1
- 6 Chang Y, Chu J H, Tang W G, Shen W Z, Tang D Y. *Infrared Phys. & Technology*, (in press)
- 7 Chu J H, Xu S Q, Tang D Y. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**: 1064
- 8 Chu J H, Li B, Lin K, Tang D Y. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**: 1234
- 9 Jones C L, Capper P, et al. *J. Crystal Growth*, 1982, **56**: 581
- 10 Schacham S E. *J. Appl. Phys.*, 1985, **57**: 2001

## SCANNING PHOTOLUMINESCENCE ANALYSIS OF $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Chang Yong Chu Junhao Tang Wenguo Shen Wenzhong  
Mao Wenyang Tang Dingyuan

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical  
Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** The Fourier transform infrared scanning photoluminescence analysis was performed on HgCdTe bulk crystal slices. The experimental results show that this analysis method can be used to directly determine the 2-D distribution of the composition and to obtain the distribution of the ratio of radiative recombination lifetime to the non-equilibrium carrier lifetime.

**Key words** photoluminescence, HgCdTe, lifetime.