

# Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 深缺陷能级研究

周洁 封松林 卢励吾

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家实验室, 北京, 100083)

司承才 李言谨 胡晓宁

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要** 利用深能级瞬态谱 (DLTS) 研究了 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te ( $x=0.4$ ) p<sup>+</sup>n 光伏二极管中的缺陷能级. 通过改变注入脉冲条件, 获得 2 个电子陷阱和 2 个空穴陷阱, 电子陷阱的能级位置分别为  $E(0.06)$  和  $E(0.15)$ , 空穴陷阱的能级位置分别为  $H(0.075)$  和  $H(0.29)$ . 这些深能级的浓度约为浅能级浓度的百分之几. 通过改变注入脉冲的宽度, 测量了这些能级的多子俘获截面, 根据这些深能级的特征参数, 估算了器件的少子寿命和零偏压的动态电阻与面积的乘积, 并讨论了一些缺陷能级的本质.

**关键词** 深能级瞬态谱, 缺陷能级, Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te.

## 引言

3~5  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  光谱范围的合金半导体 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料在红外成像、尤其在红外焦平面列阵的应用中日益重要, 对材料的质量提出了更高要求. HgCdTe 材料电学性质是由调节金属空位与金属间隙原子的平衡来控制的, 但大量缺陷 (尤其是具有陷阱或复合中心作用的缺陷) 的存在, 对器件的少子寿命、发光效率有严重影响. 因此, 研究这些缺陷的特征参数, 及其在产生-复合过程中的行为和作用是很重要的.

对半导体材料中的杂质与缺陷通常采用霍尔测量、光吸收、光荧光、光电导等测试手段进行研究, 但这些方法仅限于研究位于禁带中带边附近的浅能级, 至于半导体材料中的深中心则通常采用电容瞬态谱等光谱技术研究. 由于 HgCdTe 是窄禁带材料, 采用这种方法有一定的困难和特殊性, 但用它结合窄禁带物理过程特点, 来测量表征深中心的特征参数 (如能级位置、浓度及俘获截面等), 仍不失为一种较为理想的方法.

近年来, 对 n 型 HgCdTe 材料深中心研究的报导不多, 利用深能级瞬态谱 (DLTS) 大多是研究 n 型 MIS 结构的样品, 仅限于测量电子陷阱. 本文首次报道利用 DLTS 谱测量 p<sup>+</sup>n 结样品中的电子和空穴陷阱, 利用这些陷阱能级作为参数计算了少子寿命, 及与

本文 1993 年 4 月 1 日收到, 修改稿 1994 年 1 月 23 日收到

产生-复合有关的器件在零偏压下的动态电阻与面积乘积  $RA$  品质因子, 对进一步改善器件性能具有一定意义.

## 1 实验

### 1.1 样品制备

将淬火-固态再结晶生长的  $\text{HgCdTe}$  单晶在  $\text{Hg}$  蒸汽压中长时间退火后, 得到  $n$  型材料, 其组份  $x$  值为 0.4 ( $1\sim 3\ \mu\text{m}$ ), 在 77 K 下其载流子浓度和迁移率分别为  $5\times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$  和  $1\times 10^4\ \text{cm}^2/\text{v}$ , 将晶片用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  机械抛光后, 在含 10%  $\text{Br}$  的甲醇溶液中腐蚀 10 s, 采用离子注入  $\text{B}^+$  形成  $p$  区, 制备成平面型  $p-n$  结, 利用  $\text{In}$  和  $\text{Au}$  作为电极材料.

### 1.2 测量

采用瑞典 Innovance AB 型深能级谱仪结合德国 R210 型致冷器进行测量, 温度范围为  $10\sim 300\ \text{K}$ .

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 电子陷阱

在负偏压 0.6 V 再叠加脉冲偏压 0.5 V 的测试条件下, 得到的 DLTS 谱如图 1, 图中在 20 和 100 K 附近出现了多子峰, 这些能级为电子陷阱. 通过改变率窗口, 由这两个能级的 Arrhenius 图确定了低温端能级位置为  $E_1 = E_c - 0.06\ \text{eV}$ , 高温端的能级位置为  $E_2 = E_c - 0.15\ \text{eV}$ . 其浓度分别为  $2\times 10^{11}\ \text{cm}^{-3}$  和  $1\times 10^{11}\ \text{cm}^{-3}$ . 改变注入脉冲的宽度 ( $0.1\ \mu\text{s}\sim 10\text{ms}$ ), 测量  $E_1$  和  $E_2$  的电子俘获截面, 得到  $\sigma_{n_1} = 1\times 10^{-15}\ \text{cm}^2$ ,  $\sigma_{n_2} = 5.86\times 10^{-17}\ \text{cm}^2$ . 在  $80\sim 110\ \text{K}$  温度范围内测量  $\sigma_{n_2}(T)$ , 发现  $\sigma_{n_2}$  与温度  $T$  无明显关系, 即  $\sigma_{n_2}(T)$  基本上为常数. 当有少数注入时, 能级  $E_1$  不再出现, 而能级  $E_2$  仍存在. 由此可判别  $E_1$  的  $\sigma_n$  稍大于  $\sigma_p$ , 而  $E_2$  的  $\sigma_n$  则远大于  $\sigma_p$ , 据此估算了这两个能级

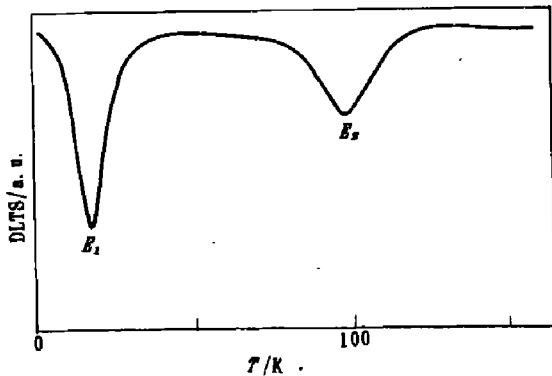


图 1  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.4$ ) 材料中的多子谱  
Fig. 1 The majority carrier spectroscopy in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.4$ ) material

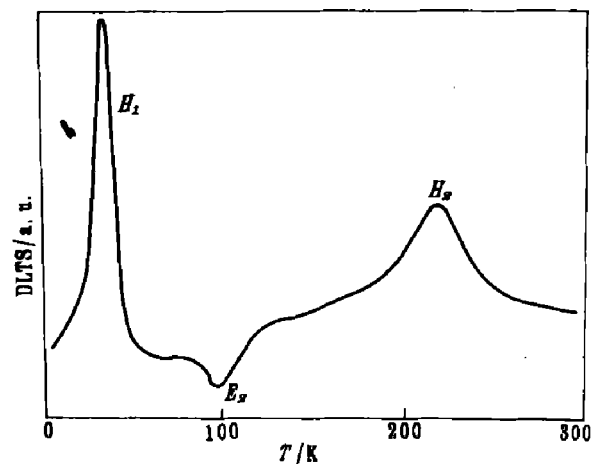


图 2  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.4$ ) 材料中的少子谱  
Fig. 2 The minority carrier spectroscopy in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.4$ ) material

的空穴俘获截面的  $\sigma_{p1}$  与  $\sigma_{p2}$ .

### 2.2 空穴陷阱

在负偏压 0.6 V 上再叠加 1.0 V 的脉冲电压, 在有少数注入时, 得到如图 2 所示的 DLTS 谱. 由图 2 可见存在 2 个少数能级 (即空穴陷阱), 分别在 30 K 附近和 200 K 附近, 其能级位置  $H_1$  为  $E_v+0.075\text{ eV}$ ,  $H_2$  为  $E_v+0.29\text{ eV}$ , 浓度分别为  $4\times 10^{11}\text{ cm}^{-3}$  和  $2\times 10^{11}\text{ cm}^{-3}$ . 通过改变注入脉冲宽度, 获得  $H_1$  的空穴俘获截面  $\sigma_{p1}$  为  $9\times 10^{-13}\text{ cm}^2$ ,  $H_2$  的  $\sigma_{p2}$  为  $1\times 10^{-14}\text{ cm}^2$ . 计算方法如下: 改变注入脉冲宽度  $t_s$ , 由  $C_s=C_\infty(1-e^{-c_p t_s})$  得到  $C_p=\sigma_p\langle V_p\rangle p$ , 其中  $\langle V_p\rangle$  为空穴热速度,  $p$  为少数浓度, 可由下式得到:

$$p = p_0 \exp\left(\frac{qV_F}{kT} - \frac{Z}{L_D}\right). \quad (1)$$

式 (1) 中  $p_0$  为平衡时少数浓度, 满足  $n_0 p_0 = n_i^2$ ;  $V_F$  为正向偏压;  $L_D$  为电子扩散长度;  $Z$  是从结区到 p 区的距离. 由于这 2 个能级也只在少数谱中出现, 所以  $\sigma_p$  也只是稍大于  $\sigma_n$ .

在改变脉宽测量俘获截面的实验中, 当脉宽从  $\mu\text{s}$  级改变到  $\text{ms}$  级时, 在能级  $H_1$  的低温端又出现一个峰 (参见图 3), 反映出该能级  $H'_1$  俘获空穴的能力很小, 能级位置约为  $E_v+0.035\text{ eV}$ .

能级  $H_2(E_v+0.29\text{ eV})$  虽然只在少数谱中出现, 但能级位置却位于禁带上半部, 似乎应该是电子陷阱, 但实质上它却是空穴陷阱, Jones<sup>[1]</sup>等人认为在 p 型  $\text{HgCdTe}$  中与 Hg 空位有关的深中心有 2 个, 即禁带中  $E_v+\frac{1}{2}E_g$  位置和  $E_v+\frac{3}{4}E_g$  位置, 前者为 Hg 空位的单负电态, 后者为 Hg 空位的双负电态, 我们得到的能级位置与后者相符, 估计结果亦与 Hg 空穴有关, 但 Jones 等人认为该能级的  $\sigma_p < \sigma_n$ , 与我们的结果不符. 在我们实验中, 该能级只在  $p^+n$  结的少数注入时才出现, 即  $\sigma_p < \sigma_n$ , 这一结果与 Kinch<sup>[2]</sup>的结果一致.

从而, 我们在  $x=0.4$  的 n 型  $\text{HgCdTe}$  中获得 4 个主要能级, 其在带隙中的位置如图 4 所示, 其中 3 个能级的位置分别约位于为  $E_c-\frac{1}{4}E_g$ 、 $E_c-\frac{1}{2}E_g$  和  $E_c-\frac{3}{4}E_g$ .

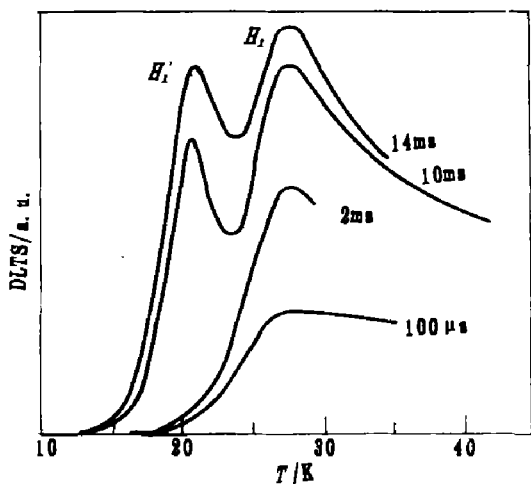


图 3 能级  $H_1$  和  $H'_1$   
Fig. 3 The energy levels of  $H_1$  and  $H'_1$

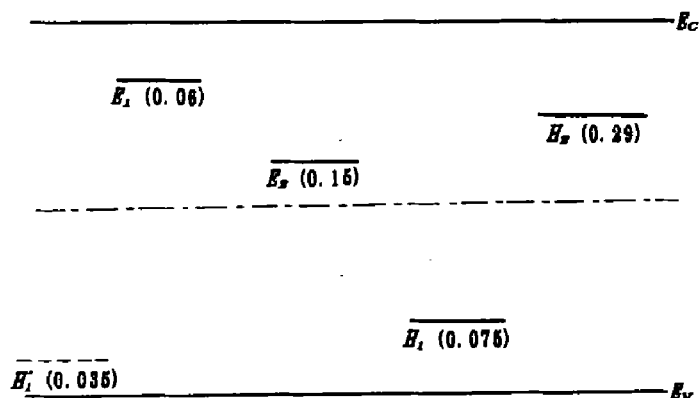


图 4 n- $\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$  中深缺陷能级图  
Fig. 4 The deep defect levels in n- $\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$

### 2.3 少子寿命和 $R_0A$ 品质因子的估算

通常用 DLTS 谱的特征参数表征产生-复合机制中带-杂质-带的 Shockley-Read 复合参数少子寿命, 位于空间电荷区的杂质或缺陷在产生-复合机制中起重要作用, 在 n 型材料中, Shockley-Read 复合中心应起类受主 (一般为空穴陷阱) 作用, 尤其应考虑位于带隙附近深中心对产生-复合过程中的贡献, 能级  $H_1$  和  $H_2$  正是 n 型材料中的类受主能级, 但能级  $E_2$  又位于  $E_g/2$  附近. 对于  $n > N_T$  的材料, 少子寿命  $\tau$  可表示为

$$\tau = \tau_{p_0} \frac{n_0 + n_1}{n_0 + p_0} + \tau_{n_0} \frac{p_0 + p_1}{n_0 + p_0}. \quad (2)$$

其中  $\tau_{n_0}^{-1} = \sigma_p \langle V_p \rangle N_T$ ,  $\tau_{p_0}^{-1} = \sigma_n \langle V_n \rangle N_T$ ,  $n_0 p_0 = n_i^2$ ,  $n_1 = N_c \exp[-(E_c - E_T)/kT]$ ,  $p_1 = N_v \exp[-(E_T - E_v)/kT]$ . 若有数个能级存在时, 有

$$\tau^{-1} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}. \quad (3)$$

现将我们获得的各能级的参数代入, 相应的少子寿命分别为  $\tau_{H_1} \approx 2.03 \times 10^{-6}$  s,  $\tau_{H_2} \approx 2.14 \times 10^{-6}$  s,  $\tau_{E_1} \approx 1.93 \times 10^{-4}$  s,  $\tau_{E_2} \approx 1 \times 10^0$  s, 因此  $\tau^{-1} = \tau_{H_1}^{-1} + \tau_{H_2}^{-1} = 1.04 \times 10^{-6}$  s, 能级  $E_1$  和  $E_2$  在  $\tau$  的计算中则不起作用.

少子寿命  $\tau$  是非平衡载流子单位时间的复合率, 由于位于  $E_g/2$  两侧的少子能级  $H_1$  和  $H_2$  的  $\tau_{n_0} \approx \tau_{p_0}$ , 因此都起到复合中心的作用. 又由于它们是受主型的能级, 因此能级  $H_2$  可能与双重荷负电的受主型的 Hg 空位有关.

作为产生-复合中心的陷阱, 当电子通过陷阱激发到导带时会产生噪声电流, 使光探测器的可靠性退化, 探测器的一个主要参数为  $R_0A$ , 探测器通常在零偏压下工作, 其动态电阻  $R_0$  为

$$R_0^{-1} = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0}.$$

利用  $J = \frac{I}{A}$ , 则上式变为

$$(R_0A)^{-1} = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0}. \quad (4)$$

$R_0A$  称为发光二极管的品质因子.

考虑来自空间电荷区的产生-复合电流, 有

$$(R_0A)_{g-r} = \left[ \frac{V_{bi}}{qn_i \omega f(b)} \right] \tau_0. \quad (5)$$

式 (5) 中  $V_{bi}$  为内建电压;  $n_i$  为本征载流子浓度;  $\omega$  为耗尽层宽度;  $f(b) = \int_0^\infty \frac{du}{u^2 + 2bu + 1}$ , 其中

$$b = \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\tau_{p_0}}{\tau_{n_0}}\right).$$

由以上各式可见, 在耗尽区中最有效的 S-R 中心为  $E_t \approx E_i$ ,  $\tau_{n_0} = \tau_{p_0}$ , 在  $V=0$ ,  $f(b)=1$  时,  $(R_0A)_{g-r}$  具有与  $n_i^{-1}$  相同温度的变化, 由此估测在 200 K 时,  $(R_0A)_{g-r} \approx$

$1.43 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 除空间电荷区的产生-复合电流外, 尚有扩散电流、表面漏电流、带间隧穿电流等对  $(R_0A)$  值的贡献, 这些产生噪声电流的源可能导致光探测器可靠性退化.

### 3 结语

我们根据从  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.4$ ) 样品中获得的深能级参数, 对二极管少子寿命与品质因子作了估算, 认为在我们研究的样品中虽存在多个深能级, 但由于它们的浓度仅为浅能级的百分之几, 因此对器件的性能尚不致产生很大的影响. 受主型的空穴陷阱能级  $H_2$  可能与双重荷负电的 Hg 空位有关.

### 参考文献

- 1 Jones CE. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1982,21:187
- 2 Kinch MA. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1982,21:215

## STUDIES OF DEEP DEFECT LEVELS IN $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Zhou Jie Feng Songlin Lu Liwu

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Si Chengcai Li Yanjin Hu Xiaoning

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** The defect levels in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$   $p^+n$  junction photodiodes were studied by using Deep Levels Transient Spectroscopy (DLTS). Two electron traps,  $E(0.06)$ , and  $E(0.15)$  and two hole traps,  $H(0.075)$  and  $H(0.29)$ , were obtained, respectively. Their concentrations are only a few percent of shallow levels. According to these characteristic parameters, the minority lifetime of the devices and the product of area times the dynamic resistance at zero bias are estimated. The nature of some defect levels is suggested, too.

**Key words** deep levels transient spectroscopy, defect levels,  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ .