

短波 HgCdTe 光电二极管中缺陷能级对器件性能的影响*

胡新文 李向阳 王勤 陆慧庆 赵军 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海, 200083)

张胜坤[✓]

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海, 200433)

TN 364.2
TN 214

摘要 利用变频导纳谱研究了 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x=0.6$) n^+-on-p 结中的深能级缺陷, 得到其缺陷能级位置在价带上 $0.15eV$, 同时给出了其俘获截面和缺陷密度, 初步认为是 Hg 空位或与其相关的复合缺陷. 根据深能级的有关参数, 估算了器件的少子寿命和器件优值参数 R_0A .

关键词 导纳谱, 缺陷能级, $Hg_{1-x}Cd_xTe$.

汞碲 光电二极管
红外器件

引言

目前, $1-3\mu m$ HgCdTe 红外探测器件在航天遥感技术、光纤通信等领域有着越来越重要的实用价值, 因此对材料的要求也越来越高, 但是对于大组分材料中的缺陷情况国内研究的还不多, 而缺陷尤其是深能级的存在直接影响着材料的少子寿命及器件的噪声等电学性质^[1,2]. 因此, 研究缺陷在材料中的行为就变得尤为重要.

研究半导体中杂质和缺陷的方法有很多, 如霍尔测量、光吸收、光荧光、DLTS 等等. 1972 年 D. L. Losee^[3] 提出导纳谱方法, 它与其它方法相比其优点有: (1) 很容易鉴别浅捕获; (2) 每一种电导峰都对应于一个特别的俘获能级和密度; (3) 对于反向电阻较低、漏电流较大的器件也不影响这种技术的应用, 因此它越来越成为研究缺陷能级的一种有效方法.

人们对于材料的研究集中在组分较小的样品上, 而对大组分材料研究还不多. 本文对组分 $x=0.6$ 的室温短波 HgCdTe 光伏器件测量了其变频导纳谱.

1 实验

以改进的固体区溶法生长了组分 $x=0.6$ 的 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 晶体, 经抛光、腐蚀、钝化等一系列表面处理工艺后, 采用 B 离子注入形成平面 pn 结, 注入能量 $150keV$, 注入剂量为 $6 \times 10^{13}cm^{-2}$, 样品的电容和电导通过 HP 4275A LCR 仪测量, 测量温度由 Fluke 8840A 数字电压表给出, 温度范围 $77 \sim 300K$, 测量频率分别为 $500kHz$ 、 $300kHz$ 、 $100kHz$ 、 $50kHz$ 和 $30kHz$, 实验是在复旦大学表面物理国家重点实验室进行.

* 国家科技预研基金(编号 11·3·2②号)资助项目
稿件收到日期 1998-01-16, 修改稿收到日期 1998-05-10

2 实验原理

对于包含深能级的 n^+ -on-p 结, 其电导为

$$G_T = [e_p \omega^2 / e_p^2 + \omega^2] (N_T / P) C_0, \quad (1)$$

式(1)中 ω 为所用角频率, N_T 是深能级密度, P 是衬底材料的净受主浓度, e_p 是空穴的发射率.

$$e_p = g^{-1} \sigma_p \langle v_p \rangle N_v \exp[(E_v - E_t) / KT], \quad (2)$$

式(2)中陷阱基态简并因子 $g=4$, $\langle v_p \rangle$ 是价态空穴的平均热速率, σ_p 是空穴的俘获截面, N_v 是价带有效态密度, E_v 是价带顶能量, E_t 是陷阱能量. C_0 是深能级对所加交流频率完全不能响应的结电容, 即高频结电容.

$$C_0 = \epsilon A / W, \quad (3)$$

式(3)中 ϵ 是半导体介电常数, A 是结面积, W 是耗尽层宽度. 由深能级引入的附加电容为

$$C_T = [e_p^2 / (e_p^2 + \omega^2)] (N_T / P) C_0; \quad (4)$$

总的结电容为

$$C = C_0 + C_T.$$

假定 P 和 C_0 对温度仅有微弱依赖关系. 则电导在给定频率下随温度的变化主要是 e_p (T) 的作用. 在这种情况下, 当 $e_p = \omega$ 时, G_T 达最大值

$$G_T | \max = 1/2 \omega (N_T / P) C_0. \quad (5)$$

当温度很低时, 发射率 e_p 较小, 以致 $e_p \ll \omega$, 此时 $C = C_0$; 当温度升高后, 到 $e_p \gg \omega$ 时, $C = C_0 + (N_T / P) C_0$, 电容随温度的增量为

$$\Delta C = (N_T / P) C_0. \quad (6)$$

N_T / P 由式(5)或式(6)决定, 而 P 可用 Hall 或 $C-V$ 测量给出, 从而得出缺陷密度 N_T . 缺陷能级 E_t 由发射率 e_p 随温度的变化特性决定, 由于 $\langle v_p \rangle$ 随 $T^{1/2}$ 变化, N_v 随 $T^{3/2}$ 变化, 以 $T^2 \omega^{-1} - 1 / KT$ 作图就可得出其激活能 $\Delta E = E_t - E_v$.

3 实验结果与讨论

3.1 深能级缺陷

在 -1.0eV 偏压下分别测量了频率为 500kHz、300kHz、100kHz、50kHz 和 30kHz 的导纳谱, 图 1 给出了组分 $x=0.6$ 时室温下光伏二极管不同频率的电导随温度变化曲线. 由图 1 可见, 随着频率的变化, 电导都有一个峰值. 图 2 给出了不同频率下电容随温度变化的曲线, 读取各个电导处温度值, 对 $T^2 \omega^{-1} - 1 / KT$ 作图 (见图 3), 得出缺陷激活能 $\Delta E = 0.15 \pm 0.01\text{eV}$, 其能级位置 $E_t = 0.15\text{eV} + E_v$. 由式(2)近似计算俘获截面, 在 $170\text{K} < T < 225\text{K}$ 范围内得到其俘获截面 $2.9 \times 10^{-18}\text{cm}^2$.

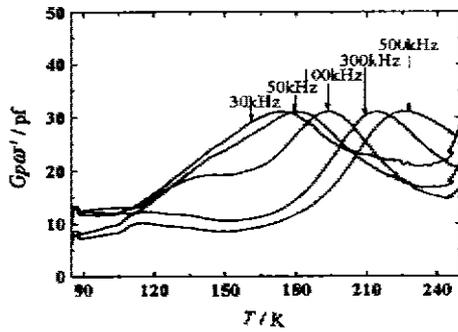


图1 不同频率下 Hg_{0.4}Cd_{0.6}Te 离子注入 n⁺-on-p 结 -1V 偏压的电导-温度特性
Fig. 1 Temperature dependence of the conductance at -1V-bias for an n⁺-on-p Hg_{0.4}Cd_{0.6}Te photodiode at different frequencies applied

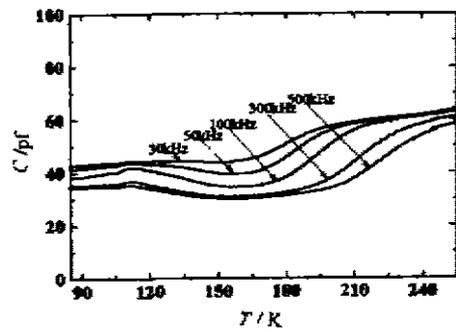


图2 不同频率下 Hg_{0.4}Cd_{0.6}Te 离子注入 n⁺-on-p 结 -1V 偏压的电容-温度特性
Fig. 2 Temperature dependence of the capacitance at -1V-bias for an n⁺-on-p Hg_{0.4}Cd_{0.6}Te photodiode at different frequencies applied

测量 77K 和 300K 下器件的霍尔,其 77K 和 300K 下的载流子浓度分别为 $1.66 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $1.89 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,可见在测量温度范围内 P 随温度变化不大,再由公式(6)得出缺陷密度 $N_T = 6.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

由导纳谱给出了 p-Hg_{1-x}Cd_xTe 中的多子俘获,即空穴俘获密度、能级和俘获截面.在计算激活能 ΔE 时,我们曾假设俘获截面 σ_p 与温度无关,这是基于当俘获截面为 $10^{-15} - 10^{-18} \text{ cm}^2$ 时,缺陷是中性的,与温度无关;如果实验测得俘获截面是 $10^{-12} - 10^{-15} \text{ cm}^2$,对应于一个吸引中心,此时 $\sigma_p \propto T^{-\alpha}$;同样如果俘获截面是 $10^{-22} - 10^{-18} \text{ cm}^2$,则对应于一个排斥中心,此时 $\sigma = \sigma_\infty \exp(E_p/KT)$, σ_∞ 是 $T = \infty$ 时的俘获截面.基于俘获截面的大小,我们认为该缺陷是一个中性俘获中心.

1980 年 D. L. Polla^[4] 等对组分 $x = 0.305$ 的液相外延材料经 B 离子注入成结,测得缺陷能级位置 $E_T = 0.16 \text{ eV} + E_v$; 1994 年 G. Sarusi^[5] 等也报道了 MOCVD 生长材料中的缺陷激活能为 0.14eV,这与以上测得结果是一致的,说明这种缺陷不随材料生长方法和组分而变,我们初步认为它是 Hg 空位或与之相关的复合缺陷.

3.2 少子寿命和器件优值参数 R_0A

对于短波 n⁺-on-p 光电二极管结构,主要考虑少子从 P 区向耗尽区的扩散限制和空间电荷区的产生复合电流作用^[6],当 $d \gg L_c$ 时

$$(R_0A)_d = \frac{(KT)^{\frac{1}{2}}}{q^{\frac{3}{2}} n_i^2} N_a \left(\frac{\tau_c}{\mu_c} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

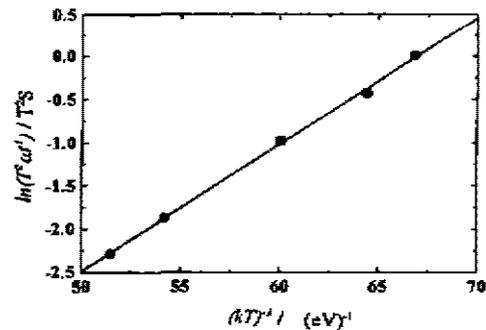


图3 由图1电导峰值决定的陷阱激活能的关系图
Fig. 3 Arrhenius plot used to determine trap activation energy based upon the peaks of conductance shown in Fig. 1

假定 $\tau_0 = \tau_{n0} = \tau_{p0}$, 在 $V = 0$ 时, $f(b) = 1$. 这时

$$(R_0A)_{gr} = \frac{V_b \tau_0}{qn_s W}, \quad (8)$$

其中 n_s 是本征载流子浓度, μ_n 为电子迁移率, N_a 是受主浓度, K 为玻尔兹曼常数, q 是电子电荷, V_b 为内建电场, W 是耗尽层宽度. 少子寿命 τ_s 主要由 Shockley-Read 复合决定^[7,8]:

$$\tau_s = \tau_{S-R} = \frac{\tau_{p0}(n_0 + n_1 + \Delta) + \tau_{n0}(p_0 + p_1 + \Delta)}{(n_0 + p_0 + \Delta)}, \quad (9)$$

$$\tau_{p0} = [\sigma_p \langle v_p \rangle N_T]^{-1}. \quad (10)$$

将测得的深能级参数 E_t, N_t, σ_p 代入式(7)~(10), 可得室温下 $\tau_{p0} = 4.2 \text{ ns}$, $(R_0A)_D = 2.46 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $(R_0A)_{gr} = 1.36 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 考虑扩散电流和产生复合电流两者的贡献, 总的 $R_0A = 8.76 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$. 我们实际测得的器件优值参数 $R_0A = 451 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 与计算值相比低了许多, 这可能是由于还有其它因素, 如受表面漏电流和器件多次测量等的影响.

4 结语

利用变频导纳谱研究了 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.6$) n^+ -on-p 光电二极管中的深能级缺陷, 得出其能级位置在价带上 0.15 eV , 同时给出了其缺陷密度 $N_T = 6.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和俘获截面 $2.9 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, 初步认为这种缺陷是 Hg 空位或与其相关的复合缺陷. 由此深能级参数计算得到器件的少子寿命 $\tau_{p0} = 4.2 \text{ ns}$ 和器件优值参数 $R_0A = 8.76 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$. 比实际测量值大的原因可能是由于还有其它因素如受表面漏电流和器件多次测量等的影响.

REFERENCES

- 1 TANG Ding-Yuan. Semiconductor properties of mercury cadmium telluride, *Infrared Technology* (汤定元, 碲镉汞三元系的半导体性质, 红外技术), 1974, 3(6): 345
- 2 Polla D L. Deep level studies of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ I: narrow-band-gap space-charge spectroscopy, *J. Appl. Phys.*, 1981, 52: 5118
- 3 Losee D L. Admittance spectroscopy of deep impurity levels: ZnTe schottky barriers, *Appl. Phys. Lett.*, 1972, 12(2): 54
- 4 Polla D L. Admittance spectroscopy of deep levels in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, *J. Appl. Phys.*, 1980, 51: 6233
- 5 Sarusi G. Forward tunneling current in HgCdTe photodiodes, *J. Appl. Phys.*, 1994, 76: 4420
- 6 Rogalski A. Analysis of the R_0A product in n^+ -p $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photodiode, *Infrared Phys.*, 1988, 28(3): 139
- 7 Nemirovsky Y. The cutoff wavelength and minority-carrier lifetime in implanted n^+ -on-bulk p $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photodiodes, *J. Appl. Phys.*, 1988, 63(7): 2435
- 8 Polla D L. Experimental determination of minority-carrier lifetime and recombination mechanisms in p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, *J. Appl. Phys.*, 1981, 52: 5182

THE INFLUENCE OF DEFECT LEVELS ON THE DEVICE
PERFORMANCE IN SHORT WAVELENGTH $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$
PHOTODIODES*

HU Xin-Wen LI Xiang-Yang WANG Qin

LU Hui-Qin ZHAO Jun FANG Jia-Xiong

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

ZHANG Shen-Kun

(Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai, 200433, China)

Abstract The defect levels in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.6$) n^+ -on-p junction photodiodes were studied by using the admittance spectroscopy. Measurements identified a hole trap located at 0.15eV above the valence band. The trap density and majority carrier capture cross section were given, with results suggesting hole capture at a neutral trapping center. It was estimated as a Hg-vacancy or some composite defects related with it. The minority lifetime of the devices and the product R_0A of area times the dynamic resistance at zero bias were calculated and the results were discussed, too.

Key words admittance spectra, defect levels, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of Science and Technology in National Defence
Received 1998-01-16, revised 1998-05-10