

γ 辐照室温短波 HgCdTe 光伏器件的 导纳谱研究*

胡新文 赵 军 陆慧庆 李向阳 方家熊

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

(1998 年 9 月 7 日收到; 1998 年 11 月 13 日收到修改稿)

利用变频导纳谱研究了 γ 辐照前后 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.6$) $\text{n}^+\text{-on-p}$ 结中的深能级缺陷. 辐照前其缺陷能级位置在价带上 0.15 eV, 俘获截面 $\sigma_p = 2.9 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, 缺陷密度 $N_t = 6.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 初步认为是 Hg 空位或与其相关的复合缺陷; 经过 10^4 Gy 的 γ 辐照后其能级变得更深, 在价带上 0.19 eV, 同时其俘获截面增加了近一个数量级, 而缺陷密度基本上没有变化. γ 辐照引入的这种能级变化最终使器件的性能(探测率)下降了 1/2 以上.

PACC: 6180; 7155; 8530

1 引 言

红外探测器抗辐照加固问题是目前航空、航天应用中亟待解决的重要问题. 器件抗辐照性能的提高对于应付突然情况或恶劣环境如核爆炸条件下以及在光电对抗中仪器正常工作也有着重要的实际意义, 而且它还直接影响到仪器和器件的工作寿命问题. 国外在 70 和 80 年代曾在此方面作过了初步的研究^[1-4], 而国内还没有这方面的报道. 在各种辐照条件下, 材料和器件发生了哪些变化以及如何改进其抗辐照性能是人们所感兴趣的主要问题.

目前, 1—3 μm 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. 室温短波光伏器件除了具有光伏探测器的性能高、响应时间短、无需偏置电流等特点外, 并具有封装简便、性能稳定、无需制冷、使用方便等优点. 在响应波段 1.58—1.64 μm 内探测率优于 $3.0 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 量子效率达 70%, 成为实用化的性能良好的空间用探测器. 因而研究 1—3 μm 室温短波 HgCdTe 光伏器件的 γ 辐射效应就更加具有现实意义.

对于大组分的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.6$) $\text{n}^+\text{-on-p}$ 光伏器件用变频导纳谱研究了 γ 辐照对器件中的深能级缺陷的影响, 观察到 γ 辐照在碲镉汞中引入的深能级的变化. 并且根据辐照前后深能级的有关参数, 估算了辐照对器件优值参数 $R_0 A$ 的影响.

* 国防科技预研基金(批准号: 11.3.2②)和国家自然科学基金(批准号: 19805014)资助的课题.

2 基本理论

2.1 导纳谱

对于包含深能级的 n^+-on-p 结, 其电导

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

其中 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. 其中

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

这里, g 是陷阱基态简并因子等于 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, 亦即高频结电容.

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

其中 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

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

因此总的结电容

$$C = C_0 + C_T.$$

假定 P 和 C_0 对温度仅有微弱依赖关系. 那么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, $C = C_0 + (N_T / P) C_0$, 即电容随温度的增量

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

N_t / P_0 由(5)或(6)式决定, 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 有 $T^{3/2}$ 关系, 以 $T^2 \omega^{-1} - 1/kT$ 作图就可得出其激活能 $\Delta E = E_t - E_v$.

2.2 优值参数 $R_0 A$

一般热噪声极限的光伏型 HgCdTe 红外探测器的波段探测率

$$D_{\lambda(th)}^* = \frac{\eta \lambda q}{hc} \sqrt{\frac{R_0 A}{4 kT}}. \quad (7)$$

$R_0 A$ 通常称为光伏型探测器的优值.

对于室温短波 HgCdTe 光伏器件, 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^[5], 当 $d \gg L_e$ 时

$$(R_0 A)_D = \frac{(kT)^{\frac{1}{2}}}{q^2 n_i^2} N_a \left(\frac{\tau_e}{\mu_e} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

假定 $\tau_0 \equiv \tau_{n_0} \equiv \tau_{p_0}$, 在 $V=0$ 时, $f(b)=1$. 这时

$$(R_0 A)_{gr} = \frac{V_b \tau_0}{q n_i W}. \quad (9)$$

其中 n_i 是本征载流子浓度, μ_e 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_e 主要由 Shockley-Read 复合决定^[6,7].

$$\tau_e \equiv \tau_{S-R} \equiv \frac{\tau_{p_0}(n_0 + n_1 + \Delta) + \tau_{n_0}(p_0 + p_1 + \Delta)}{(n_0 + p_0 + \Delta)} \quad (10)$$

$$\tau_{p_0} = [\sigma_p \langle v_p \rangle N_T]^{-1}, \quad (11)$$

因而总的 $R_0 A$ 为

$$R_0 A \equiv ((R_0 A)^{-1} + (R_0 A)^{-1})^{-1}. \quad (12)$$

3 实 验

以改进的固体区溶法生长, 组分 $x=0.6$ 的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体作为器件 p 型衬底材料, 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 n 型区, 再经电极工艺及划片制得 n^+ -on-p 型光伏探测器. B 离子注入能量为 150 keV, 注入剂量 $6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

γ 辐照实验是在中国科学院上海原子核研究所进行. γ 辐照采用的源是 Co^{60} , 其放射性活度为 $7.4 \times 10^{14} \text{ Bq}$. 其辐照剂量是 10^4 Gy , 剂量率是 10^4 Gy/h , 辐照后放置 15 天后在 -1.0 V 偏压下测量其变频导纳谱. 辐照前后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—300 K, 测量频率分别为 500 kHz, 300 kHz, 100 kHz, 50 kHz 和 30 kHz, 实验是在复旦大学表面物理国家重点实验室进行.

4 结果与讨论

4.1 辐照前

在 -1.0 V 偏压下测量了频率分别为 500 kHz, 300 kHz, 100 kHz, 50 kHz 和 30 kHz 时的导纳谱, 图 1 给出了 $x=0.6$ 室温光伏器件辐照前不同频率下电导和电容随温度变化曲线. 可以看出, 随着频率的变化, 电导都有一个峰值. 读取各个电导处温度值, 对 $T^2 \omega^{-1} - 1/kT$ 作图, 见图 2, 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 (2) 式来近似计算俘获截面, 在 $170 \text{ K} < T < 225 \text{ K}$ 范围内得到其俘获截面为 $2.9 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$.

测量 77 K 和 300 K 下此器件的霍尔系数, 得到其 77 K 和 300 K 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(5)式得出缺陷密度 $N_t = 6.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

由导纳谱给出了 $\text{p-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 中的多子俘获, 即空穴俘获密度、能级和俘获截面.

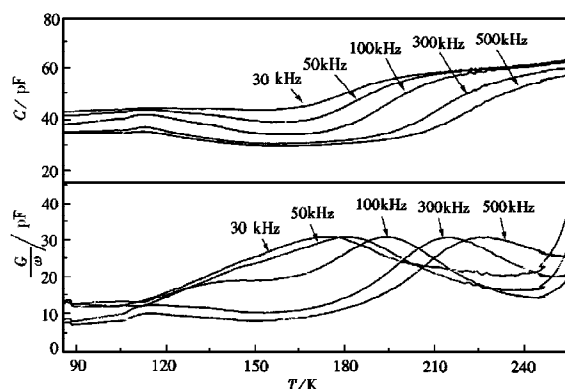


图1 不同频率下 $\text{Hg}_{0.4}\text{Cd}_{0.6}\text{Te}$ 光伏器件辐照前 -1 V 偏压的电导、电容-温度特性

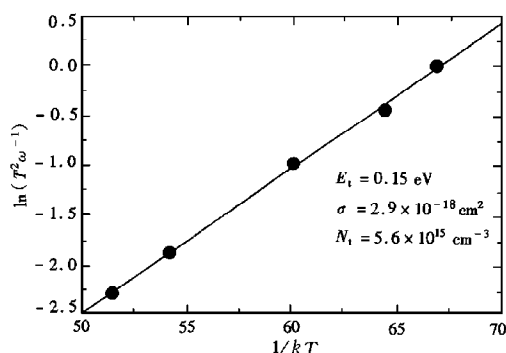


图2 由图1电导峰值决定的辐照前器件中的陷阱激活能的关系图

在计算激活能 ΔE 时, 曾假设俘获截面 σ_p 与温度无关. 这是基于当俘获截面为 $10^{-15} \sim 10^{-18} \text{ cm}^2$ 时, 缺陷是中性的, 与温度无关; 如果实验测得俘获截面是 $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{ cm}^2$, 对应于一个吸引中心, 此时 $\sigma_p \propto T^{-n}$; 同样, 如果俘获截面是 $10^{-22} \sim 10^{-18} \text{ cm}^2$, 则对应于一个排斥中心, 此时 $\sigma = \sigma_\infty \exp(E_\sigma/kT)$, 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.

1981 年 Polla 等^[8] 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 Sarusi 等^[9] 也报道了 MOCVD 生长材料中的缺陷激活能为 0.14 eV . 这与以上测量结果是一致的, 说明这种缺陷不随材料生长方法和组分而变, 我们初步认为是 Hg 空位或与之相关的复合缺陷.

4.2 辐照后

器件经过剂量为 10^4 Gy 的 γ 辐照后, 再在 -1.0 V 偏压下测量其变频导纳谱, 测量过程与前述相同. 图 3 是辐照后器件不同频率下电导和电容随温度变化曲线. 同样读取各个电导处温度值, 对 $T^2 \omega^{-1} - 1/kT$ 作图 (见图 4), 得出此时其缺陷激活能 $\Delta E = 0.19 \pm 0.01 \text{ eV}$, 用上述同样的方法计算得出其俘获截面为 $2.2 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 、缺陷密度 $N_t' = 4.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

由以上结果可以看出, 10^4 Gy 的 γ 辐照使原来器件中的深能级缺陷消失, 而又产生了一个新的深能级缺陷; 也可能是辐照后器件中的缺陷能级位置发生了移动, 能级变得更深. 并且其俘获截面 σ 增大了一个数量级, 而缺陷密度基本上没有变化.

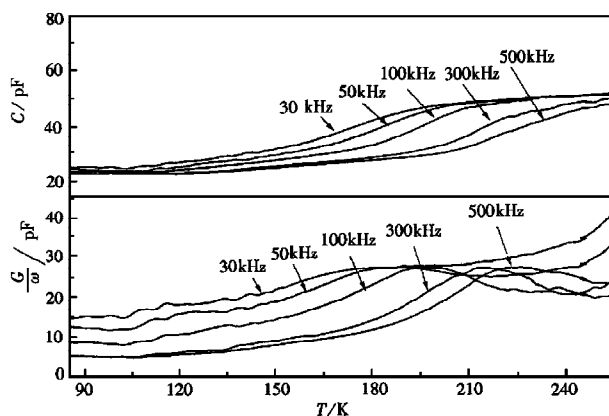


图3 不同频率下 $\text{Hg}_{0.4}\text{Cd}_{0.6}\text{Te}$ 光伏器件辐照后 -1 V 偏压的电导、电容-温度特性

有关 γ 辐照在 Si 和 GaAs 探测器中引入的缺陷近期曾有过报道. 而 γ 辐照在 HgCdTe 探测器中引入缺陷尚未见报道. 这种新产生的缺陷的鉴别还有待于进一步的积累实验数据.

将深能级上述有关参数代入 (7) — (12) 式, 得到室温下辐照前器件的 $R_0 A = 5.6 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 辐照后器件的 $(R_0 A)_F = 9.8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 可见 10^4 Gy 的 γ 辐照使器件的 $R_0 A$ 下降到差不多 $1/6$.

测量器件辐照前后的响应光谱. 辐照前其截止波长为 $1.77 \mu\text{m}$, 经过 10^4 Gy 的 γ 辐照后器件的截止波长为 $1.76 \mu\text{m}$, 基本上没有什么变化. 由 (7) 式可知辐照后器件的探测率下降了 $1/2$ 多.

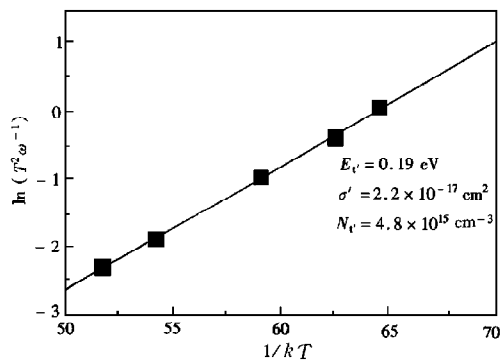


图4 由图3 电导峰值决定的辐照后器件中的陷阱激活能的关系图

5 结 论

对室温短波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.6$) 光伏器件进行了 γ 辐照, 用变频导纳谱研究了 γ 辐照前后 $n^+ - \text{on-p}$ 结中的深能级缺陷. 发现 10^4 Gy 的 γ 辐照使缺陷能级位置从价带上 0.15 eV 变到 0.19 eV, 同时其俘获截面增加了近一个数量级, 而缺陷密度基本上没有变化. γ 辐照引入的这种能级变化最终导致器件的性能 (探测率) 的下降.

- [1] A. H. Kalma, R. A. Cesena, *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, **26**(1979), 4833.
- [2] F. A. Junga, W. W. Anderson, R. B. Emmons, *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, **25**(1978), 1274.
- [3] E. L. Divita, M. J. Holtzman, R. E. Mills *et al.*, *SPIE*, **1108**(1989), 274.
- [4] G. Sarusi, D. Eger, A. Zemel, *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, **37**(1990), 2042.
- [5] A. Rogalski, *Infra. Phys.*, **28**(1988), 139.
- [6] Y. Nemirovsky, D. Rosenfeld, *J. Appl. Phys.*, **63**(1988), 2435.
- [7] D. L. Polla, *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 5182.
- [8] D. L. Polla, C. E. Jones, *J. Appl. Phys.*, **51**(1981), 6233.
- [9] G. Sarusi, A. Zemei, Ariel Sher *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994), 4420.

GAMMA IRRADIATION ON ROOM TEMPERATURE SHORT- WAVELENGTH HgCdTe PHOTOVOLTAIC DEVICE STUDIED BY ADMITTANCE SPECTROSCOPY *

HU XIN-WEN ZHAO JUN LU HUI-QING LI XIANG-YANG FANG JIA-XIONG

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

(Received 7 September 1998; revised manuscript received 13 November 1998)

ABSTRACT

Admittance Spectroscopy (AS) measurements have been performed on n^+ -on-p $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.6$) photodiodes. Before gamma-irradiation, a deep level located 0.15 eV above the valence band is observed, its trap density $N_t = 4.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ with the capture cross section of approximately $2.2 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$, which is probably induced by a compound defect correlated with Hg vacancy. After 10^4 Gy gamma-irradiation, a new trap center located 0.19 eV above the valence band is found, and the pre-irradiation trap level 0.15 eV above the valence band is no longer seen. The trap densities for these two levels are almost the same. This defect level change ultimately makes the device performance deteriorated.

PACC: 6180; 7155; 8530

* Project supported by the National Project Community of Defence Science and Technology (Grant No. 11-3-2②) and by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19805014).