

n型 LEC-GaAs 中 E_5 能级的研究

张 芹 王占国 万寿科 林兰英

(中国科学院半导体研究所,北京)

1988年1月25日收到

本文采用 DLTS 及光电容技术对 n 型未掺 LEC-GaAs 材料中的深中心进行了研究。通过对 E_5 能级阈值附近光电离截面谱的温度效应的分析, 提出了此能级向导带的电子发射存在两步光热激发过程的模型, 算出激发态位于导带下 23 meV 处。用多声子过程解释了 E_5 能级光阈值能小于热激活能的现象。

主题词: DLTS, 光电容, LEC-GaAs, 深能级, 光电离截面谱

一、引言

未有意掺杂的 LEC-GaAs 是极有前途的微波集成电路和光电子器件的基础材料。LEC-GaAs 禁带中央的深能级对材料的半绝缘性质及器件的光电性质有很大的影响。本文采用 DLTS 及光电容技术研究了 n 型 LEC-GaAs 中深中心的光电性质。

二、样品制备

n 型 LEC-GaAs 单晶是在高压氩气气氛下, 用脱水氧化硼作液封剂, 高纯镓和砷在单晶炉内石英坩埚中直接合成后原位生长单晶。以 n 型样品为衬底, 液相外延 p⁺ 层(掺 Si)形成 p⁺-n 结, 在 n 面蒸金锗镍, P 面蒸金锌以形成欧姆电极。由 c-v 法测出样品的载流子浓度为 $1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。

三、实验结果及分析

在 20 K 至 360 K 温度范围对样品进行 DLTS 测量, 发现至少有五个电子陷阱和两个空穴陷阱, 各能级的位置、浓度及俘获截面见表 1 所示。由于 E₁ 和 E₅ 能级的俘获系数很大, 要求填充能级的脉冲宽度很小, 一般的测试系统不能满足要求。故采用 D. Stievendar 报道的方法^[1], 利用结区的载流子浓度随相对结面距离的减小而迅速减小的特点, 可用较长脉冲来测量。最后经计算机拟合可获得俘获截面。在实验中, 各能级均未显出明显的俘获截面与温度的依赖关系。

采用初始斜率技术测量样品的光电离截面谱。图 1 是在 77 K, 118 K, 139 K, 164 K 和 201 K 时样品的光电离截面谱。77 K 时 E₄, E₅ 和 E₆ 能级的光电离阈值能量为 0.47

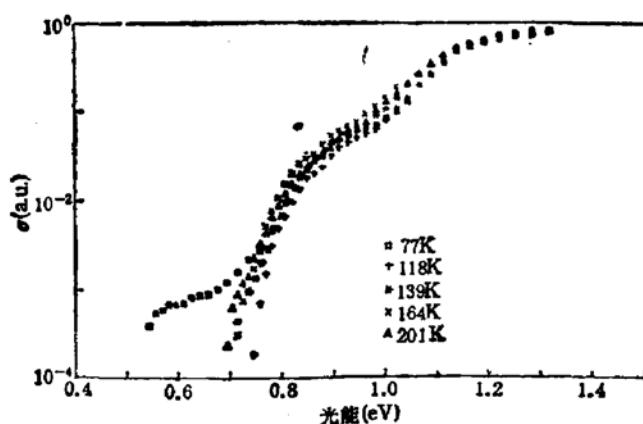


图 1 不同温度下的光电离截面谱

eV, 0.75 eV 和 0.98 eV。在 118 K 以及更高的温度下, 由于热发射加剧, 且 E_5 能级的浓度很小, 所以在仪器的精度内没有测到 E_5 能级的光电离截面。

从图 1 中可明显看出随温度升高, E_5 能级光电离阈值能量向低能方向移动。采用 Lucovsky 模型^[2]和 Grimmeiss 模型^[3]对 E_5 能级的光电离截面进行拟合, 得到 118 K 时, $E_5^0 = 0.74$ eV, 201 K 时, $E_5^0 = 0.69$ eV。

表 1 u-LEC-GaAs 中各深能级的性质

| 能 级 | 热激活能 (eV) | 光阈值能 (eV)(77K) | 能级浓度 (cm ⁻³) | 俘获截面 (cm ⁻²) (测量的温度) |
|-------|---------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| E_1 | $E_c - 0.237$ | | 2.6×10^{14} | 1.2×10^{-13} (151K) |
| E_2 | $E_c - 0.329$ | | 2.5×10^{14} | 2.7×10^{-11} (183K) |
| E_3 | $E_c - 0.397$ | | 6.8×10^{13} | |
| E_4 | $E_c - 0.486$ | $E_c - 0.47$ | 2.1×10^{13} | |
| E_5 | $E_c - 0.803$ | $E_c - 0.75$ | 5.4×10^{14} | 4.7×10^{-14} (347K) |
| E_6 | | $E_c - 0.98$ | | |
| H_1 | $E_g + 0.097$ | | | |
| H_2 | $E_g + 0.370$ | | | |

四、讨 论

1. E_5 能级电子光电离截面温度效应的本质

当温度从 118 K 上升到 201 K, E_5 能级电子光电离截面的阈值能量从 0.74 eV 下降到 0.69 eV, 改变了约 50 meV。

根据 Y. P. Varshni 的公式^[4], GaAs 的禁带宽度在上述温度变化下的改变为 28.5 meV。如果认为 E_5 能级电子光电离阈值能量的温度效应来源于禁带宽度的温度效应, 则光电离阈值变化的上限为 28.5 meV, 50 meV 的光阈值变化不可能仅由禁带宽度的温度效应引起。

杨锡震等计算了有激发态存在时的两步激发过程, 在电子从深能级到导带的发射包含一个通过激发态的光热发射时, 才存在显著的温度效应。^[5]可证明:

$$\frac{S(T)}{S(\infty) - S(T)} = AT^2 \exp(-\Delta H/KT)$$

式中 $S(T)$ 为温度 T 时的光电离截面值, ΔH 为激活能, A 为常数。

图 2 为 $\lambda = 1.675 \mu\text{m}$ 时, $\log \left[\frac{S(T)}{S(\infty) - S(T)} \right] \sim \frac{1}{T}$ 实验值, 实验点可连成一条很好的直线, 说明在 E_s 能级的光跃迁中的确存在两步激发过程, 激发态的激活能为 23 meV。

Baldereshi 和 Lipari^[6] 用有效质量算出最深激发态的激活能为 11 meV, 我们算出激发态的激活能大于 EMT 的上限, 这说明对这个激发态不能采用简单有效质量理论, 而必须考虑到中心原胞势的修正, 因为当一个处于激发态的电子有较大的几率接近中心原胞时, 中心原胞的真实势远大于 EMT 假设中的长程屏蔽库仑势。

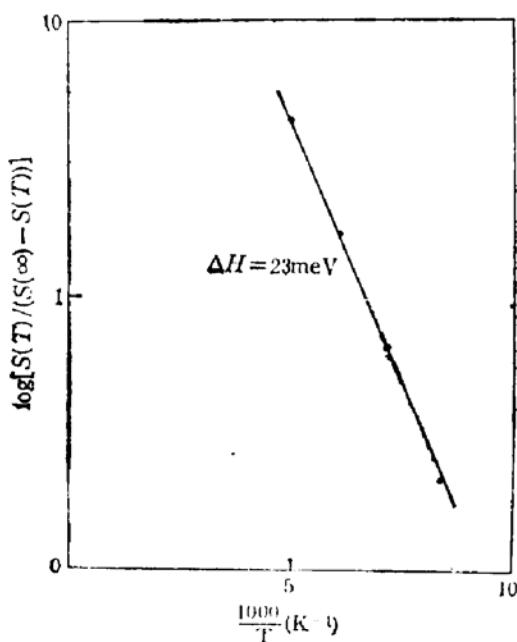


图 2

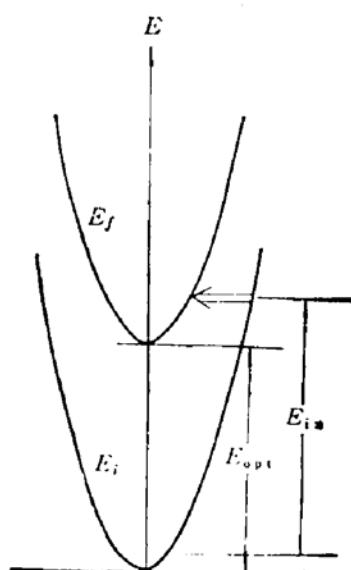


图 3 位形坐标图

2. E_s 能级光阈值能小于热激活能的原因

E_s 能级光阈值能在 77 K 时为 0.75 eV, 热激活能为 0.803 eV, 光阈值能量小于热激活能, 当温度升高, 光阈值能向低能方向漂移, 两者的偏差更大。

这现象可用 N. Kullendorff 等提出的多声子过程来解释^[7]。图 3 为无晶格弛豫时的位形坐标图, 此时无抛物形能带的水平移位, 初终态的振动波函数的交迭积分为零。在实际物理情况下总有微小的水平坐标位移, 抛物线曲率差别及非简谐振动项的存在, 因此使初终态的交迭积分不为零。振动能级的电子占有几率服从波尔兹曼统计分布, 由波尔兹曼分布随温度的变化, 平均振动能也将随温度的升高而升高。由于交迭积分随振动的增加而增加, 从而初态到终态的跃迁将大于跃迁的最低能量且随温度的升高而升高。

热激活能 0.803 eV 是在 323 K 至 357 K 的范围内测量的。我们预料在低温下热激活能将接近于光阈值能, 但随温度的升高, 热激活能将增大, 由细致平衡方程: $e_s^t = gN_s C_s t \exp(-E_s/KT)$ 可估算出在 77 K E_s 能级热发射的时间常数非常大, 这么慢的瞬态

测量在目前的实验条件下无法进行,暂时无法验证上述结论。

3. E_s 能级的识别

E_s 能级的位置与 EL_2 能级很接近, EL_2 能级具有光淬灭现象, 此现象已被广泛用于鉴别 EL_2 能级。实验发现 E_s 能级没有光淬灭现象, 说明该能级不是 EL_2 能级。

除了 EL_2 能级外, 曾报道的位于 GaAs 禁带中央的还有 Mo 能级和 Cr 能级。在质谱分析实验中, 没观察到 Mo 杂质的存在, Cr 杂质的含量却较高。Cr 能级位于导带下 0.82 eV^[4], 其光阈值能级接近 E_s 能级的光阈值能且光阈值能也有温度效应, 但并未引起重视, 尚未见到对其温度效应系统研究的报道。Cr 能级与 E_s 能级的光电离截面谱形状有相似之处但并非完全相同。而 E_s 能级与 Cr 能级俘获截面之区别却非常大。(Cr 能级的俘获截面为 $2.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $T = 347 \text{ K}$ 时)。 E_s 能级的真正起因尚需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] D. Stievenard, J. C. Bourgoin and M. Lannoo, *J. Appl. Phys.*, 55, 1477(1984).
- [2] G. Lucovsky, *Solid State Commu.*, 3, 299(1965).
- [3] H. G. Grimmeiss and L-A. Ledebot, *J. Phys.*, C8, 2615(1975).
- [4] Y. P. Varshni, *Physica*, 34, 149(1967).
- [5] X-Z Yang, L. Samuelson and H. G. Grimmeiss *J. Phys. C.*, 17, 6521(1984).
- [6] Baldereschi A. and Lipari N. O. *Phys. Rev.*, B, 8, 2697(1973).
- [7] Kullendorff N., *J. Appl. Phys.*, 54, 3203(1983).
- [8] G. Vincent, A. Chantre and D. Bois, *J. Appl. Phys.*, 50, 5484(1979).

Study on the E_s Energy Level in N-type LEC-GaAs

Zhang Qian, Wang Zhanguo, Wan Shouke and Lin Lanying

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing, China)

Abstract

Using DLTS and photo-capacitance methods, deep energy level in undoped n-type LEC-GaAs material have been studied. On the basis of the temperature effect of the photoionization cross section spectrum close to the threshold energy for E_s , the model that the two-step photo-thermal excitation behaviour exists in the excitation process for electrons from E_s to the conduction band is suggested. The excited-state position has been determined to be 23 meV below the conduction band.

KEY WORDS: DLTS, Photo-capacitance, LEC-GaAs, Deep level, photoionization cross-section spectrum