

研究简报

半绝缘 GaAs 中的深能级

周炳林 陈正秀

(中国科学院上海冶金研究所)

1984年1月10日收到

在 180—500 K 温度范围测量了不掺杂半绝缘 GaAs 晶体的电阻率和霍耳系数。按结果可把样品分为两类：（一）高阻样品，激活能为 0.71—0.64 eV，由 EL2 能级决定；（二）中阻样品，激活能为 0.43 eV 和 0.37 eV，由 EL5 和 EL6 能级决定，这与 Martin 等报道的结果有所不同。热处理实验进一步证实了我们的分析。

一、引言

不掺杂半绝缘 GaAs 晶体是极有前途的微波和光集成电路衬底材料。它之所以能获得半绝缘性质，是由于晶体中存在着非有意引入的深能级 EL2。但是，GaAs 体生长材料中通常有多种深能级存在。因此，能动地控制晶体中深能级的品种和浓度是制备高质量的半绝缘材料的关键之一。Martin 等^[1]测量了一系列不掺杂半绝缘 GaAs 样品的霍耳系数温度关系，得到表观激活能分别为 ~0.75 eV 和 ~0.38 eV 两类样品。他们认为这两类样品都是由 EL2 能级决定的，其它深能级的作用可以忽略。本文将讨论我所用 Bridgman 法和 LEC 法生长的不掺杂半绝缘 GaAs 晶体的霍耳效应测量结果。对于中阻样品，与 Martin 等的分析有所不同。

二、实验结果和讨论

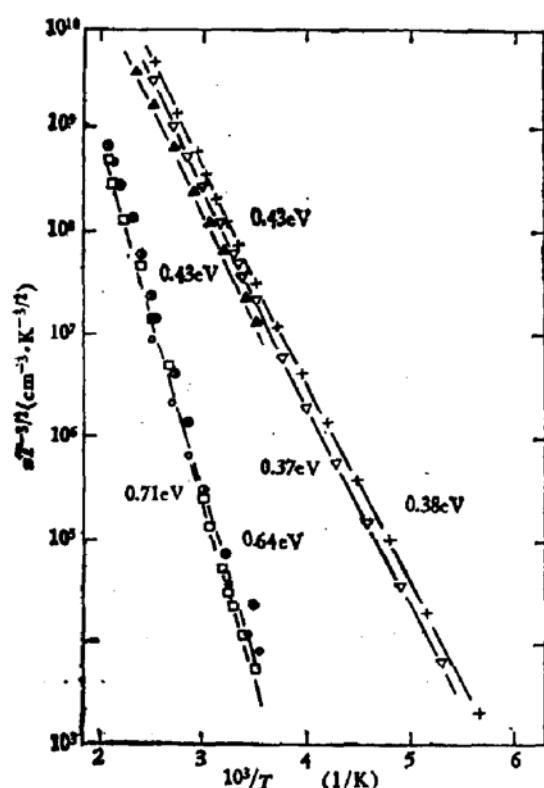
一些不掺杂半绝缘 GaAs 样品的霍耳效应测量结果列于表 1。

一般地说，分析半绝缘样品的霍耳数据需要采用混合导电的表达式。但是由表 1 第 2 列可知，所有样品 400 K 下的 $1/qR_H$ 值都大于或接近于 10^{11} cm^{-3} ，而该温度下本征载流子浓度仅为 $8 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ，因此满足 $n \gg p$ 的条件，这时混合导电的表达式可简化为一种载流子导电的表达式，即 $1/qR_H = n$ 和 $\mu_H = r_H \mu_n$ ，式中 r_H 为散射因子， μ_H 为霍耳迁移率。由表 1 可见，按照 400 K 时电子浓度的大小，可把样品分为 $n \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 和 $n \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 两类。表中第 3 类样品 300 K 时 $n \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ，可以推断 400 K 时 n 值也是 $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ （参看后面图 1），因此也属于第 2 类。下面我们分别称之为高阻样品和中阻样品。

高阻样品的激活能分别为 0.71、0.71、0.64 eV 等，虽然数值有些分散。但是我们认为它们都是由 EL2 能级决定的。我们注意到，在用瞬态电容和光电容研究 GaAs 晶体中的

表 1 不掺杂半绝缘 GaAs 的霍尔效应测量结果

材 料	$(qR_H)^{-1}$ (400K) (cm ⁻³)	μ_H (400K) (cm ² /v.s)	$\ln(R_H T^{3/2})^{-1} \sim \frac{1}{T}$ 的斜率 (eV)
A ₁ , LEC	2.21×10^{11}	2.27×10^3	0.71
A ₂ , LEC	1.28×10^{11}	2.03×10^3	0.71
A ₃ , LEC	7.45×10^{10}	2.55×10^3	0.64
B ₁ , LEC	3.33×10^{13}	4.65×10^3	0.43
B ₂ , Bridgman	2.43×10^{13}	4.67×10^3	0.43
B ₃ , LEC	1.49×10^{13} (300K)	8.80×10^2 (300K)	0.43
B ₄ , LEC	2.73×10^{11}	6.79×10^3	0.37
B ₅ , Bridgman	2.27×10^{11}	7.11×10^3	0.38
C ₁ , LEC	2.17×10^{11}	2.74×10^3	0.37

图 1 不掺杂半绝缘 GaAs 的 $nT^{-3/2} - 1/T$ 图
○ A₁, □ A₂, ○ A₃+B₁, ▽ B₂, ▲ B₄

EL2 能级时, 也曾经得到 0.79、0.70、0.66 eV 等分散的数据^[2]。根据 Martin 等的分析, 分散的原因可能来自晶体的不均匀性。这种不均匀性同时也导致样品的低迁移率值(见表 1 第 3 列)。两类样品的($nT^{-3/2}$)-

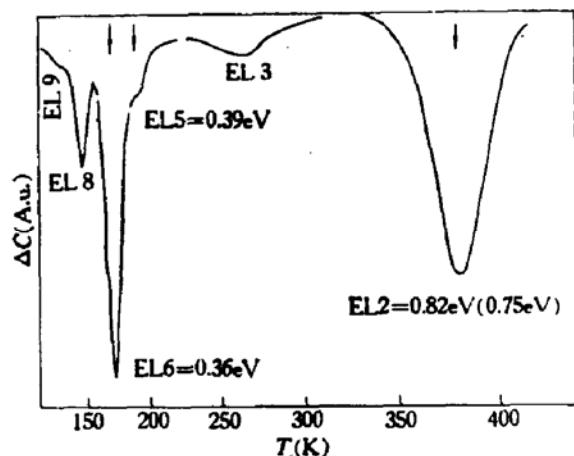


图 2 不掺杂 n 型 GaAs 体材料的 DLTS 谱

$\frac{1}{T}$ 曲线可见图 1。

中阻样品的激活能为 0.43 eV, 其中两个样品 B₁、B₂ 在 $T < 260$ K 时出现 0.37 eV 的激活能。Martin 等也得到过一系列中阻样品, 但激活能相当分散, 粗略地说, 是在 0.38 eV 左右。他们认为, 产生这个激活能的可能性有两个: (一) EL2 能级, 激活能为 0.75 eV。但是当样品满足 $n \ll (N_A - N_D)$ 的特殊条件时, 载流子的激发服从双分子规律, 因而得到表观激活能 0.75/2 eV; (二) 其它中等深度的能级, 考虑到激活能的分散, 可能是 EL5, EL6,

EL3 和 EL11 等。根据下述理由,他们倾向于第一种可能性:如果是其它能级起作用,便不会得到那样低的迁移率值;并且,深能级瞬态谱(DLTS)和光电流瞬态谱(PITS)测量表明,只有 EL2 能级才在一系列样品中重复出现,且有较高的浓度。看来,我们的样品与他们有所不同。如表 1 所示,中阻样品的迁移率并不低。另外,我们也对 GaAs 晶体作了 DLTS 和 PITS 测量,结果表明,除了 EL2 能级以外,EL5 和 EL6 能级也重复出现,且有较高的浓度。图 2 给出了一个不掺杂 GaAs 体材料样品的 DLTS 谱。可见 EL5 和 EL6 能级有较高的浓度。应当说明的是,由于 EL5 和 EL6 能级的激活能比 EL2 小得多,即使浓度低于 EL2,也可能在室温附近对载流子浓度作出主要贡献。下面以样品 B₄ 为例加以说明。由表 1,400K 时 $n = 1.49 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 假设激活能 0.43 eV 由 EL5 所产生,则费米能级位置可表示为

$$E_c - E_F = 0.43 - kT \ln \left[\frac{[\text{EL5}]}{N_A - N_D} - 1 \right]. \quad (1)$$

式中 E_c 为导带底能量, [EL5] 表示 EL5 的浓度。由载流子浓度得知 $E_c - E_F = 0.37 \text{ eV}$, 因此 $[\text{EL5}] / (N_A - N_D) = 6.7$ 。在浅能级 N_A, N_D 补偿度较高的条件下,如果

$$N_A - N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3},$$

$$\text{则 } [\text{EL5}] = 6.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3};$$

$$N_A - N_D = 10^{13} \text{ cm}^{-3},$$

$$\text{则 } [\text{EL5}] = 6.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}.$$

可见只需要 $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的 EL5 浓度就能得到 $n \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。由红外吸收法^[3]测量,一般半绝缘 GaAs 中 EL2 的浓度为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 但由图 1 可知,它对载流子浓度的贡献仅为 10^{11} cm^{-3} (400K)。

我们比较了高阻样品和中阻样品的热处理行为,结果如图 3 所示。热处理在氮气氛下进行,温度为 800°C,时间为半小时。由图可见,高阻样品 LSI-22 热处理前后激活能和浓度都不发生变化,和 EL2 能级的热处理行为相符;而中阻样品 LSI-11 和 Z-S-82 热处理后激活能不变,载流子浓度却下降了一个数量级左右。这就清楚地说明了决定中阻样品载流子浓度的并不是 EL2。相反地,EL5 和 EL6 能级热处理后容易被退火掉^[4]。因此,把中阻的起因归之于它们是十分合理的。

总之,和 Martin 等一样,我们在不掺杂半绝缘 GaAs 中发现一类中阻样品,不适宜作为衬底材料。我们的实验结果表明,它们是由于晶体中存在中等深度的能级 EL5 和 EL6 引起的。因此,在晶体生长中抑制这些深能级是制备合格的衬底材料的前提。

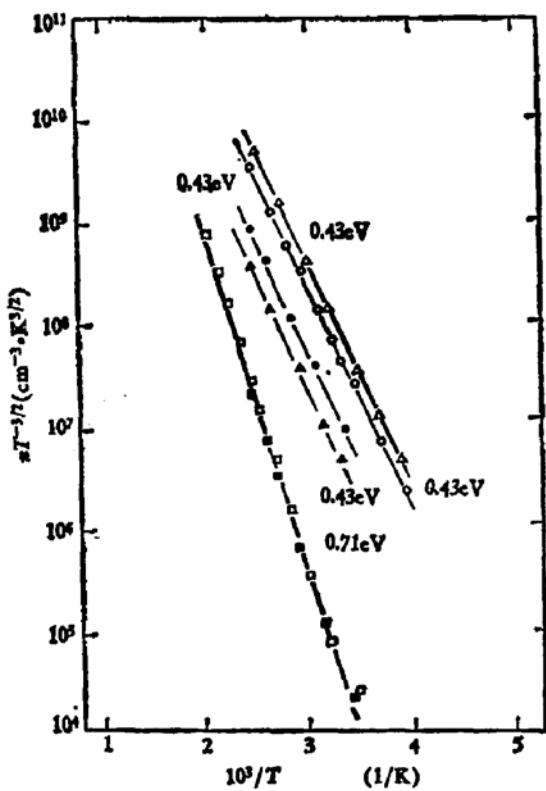


图 3 不掺杂半绝缘 GaAs 样品热处理前后的 $nT^{-3/2} - \frac{1}{T}$ 图

LSI-11	Z-S-82	LSI-22
未退火△	○	□
退火▲	●	■

本工作所用的样品由我所晶体组提供，物理室章熙康同志协助进行了红外吸收测量。胡冰华同志协助进行了深能级瞬态谱测试。钟金权和梁琦同志提供了多种支持和帮助，谨在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] G. M. Martin, J. P. Farges, G. Jacob and J. P. Hallais, *J. Appl. Phys.*, **51**, 2840 (1980).
- [2] Chern I Huang and Sheng S. Li, *Solid-state Electron.*, **16**, 1481 (1973).
- [3] G. M. Martin, *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 747 (1981).
- [4] G. M. Martin, A. Mitonneau and A. Mircea, *Electron. Lett.*, **13**, 191 (1977).

Deep Levels in Semi-Insulating GaAs

Zhou Binglin and Chen Zhengxiu

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

Abstract

Hall measurements were performed at the temperature range from 180 to 500 K on undoped SI-GaAs crystals. Two kinds of samples were obtained, the high-resistivity samples with activation energy of 0.71—0.64 eV, determined by EL2 level and the middle-resistivity samples with two activation energies of 0.43 eV. and 0.37 eV, determined by EL5 and EL6 levels. The identification of deep levels in middle-resistivity samples is different from that reported by Martin *et al.* and the analysis of ours has been proved by the heat-treatment experiments.