

研究简报

关于 GaAs 的低迁移率问题

周炳林 陈正秀

(中国科学院上海冶金研究所)

1984年3月12日收到

提 要

测量了5个不掺杂 LPE-GaAs 样品的电子迁移率温度关系,发现不同样品的诸曲线有互相交叉的现象,只用离化杂质散射一种非本征机制难于解释它. 因此,假设未知散射中心 (mobility killer) 的存在看来是必要的. 由于被研究的样品的纯度已相当高, Stringfellow 等人^[1]所假设的杂质中心元胞势散射可以忽略不计. 分析了光照对 77K 温度下电子浓度和迁移率的影响,认为未知散射中心可能是样品微观不均匀性造成的空间电荷区.

一、引 言

GaAs 及有关化合物的室温低迁移率问题已研究多年了. 1962 年 Weisberg 等人^[2]研究了 GaAs 和 InP 体材料的低迁移率问题,认为必须引入一种未知散射中心 (mobility killer) 方能加以说明. 其本质则可能是样品微观不均匀性造成的局部空间电荷区. 以后, Conwell 等人^[3]对它作了进一步的理论分析. 得出空间电荷散射迁移率 μ_{sc} 的表达式如下:

$$\mu_{sc} = 2.4 \times 10^9 / [N_{sc} \cdot Q(Tm^*/m_0)^{\frac{1}{2}}], \quad (1)$$

式中 N_{sc} 为空间电荷中心浓度, Q 为散射截面. 这个模型在相当长时间内被广泛用于说明许多化合物半导体的低迁移率现象. 1980 年 Stringfellow 等人^[1]研究了光照对 GaAs 和 $Al_xGa_{1-x}As$ 的迁移率的影响,并且认为空间电荷散射的光效应可利用“太阳电池模型”作定量的估算. 所谓“太阳电池模型”,即把空间电荷区看作样品内局部太阳电池的结区,光照产生的光生电动势将引起结区的收缩. 由于实验值比太阳电池模型的理论估算值小得多,因此他们认为,空间电荷散射的假设应当抛弃. 他们认为,迁移率的降低更可能来自受主杂质碳的短程势散射,即中心元胞势散射. 1981 年, Walukiewicz 等人^[4]只考虑了离化杂质散射一种非本征机制,由变分法计算得到了某几个 GaAs 样品迁移率温度关系的理论曲线,与实验曲线很相符. 因而他们断定,未知散射中心只是一个人为的假定.

本文目的在于对 GaAs 的低迁移率问题作进一步的考察,即通过对不掺杂 LPE-GaAs 的迁移率温度关系以及光照影响等测量和分析,对未知散射中心的存在问题以及可能的物理本质提出我们的看法.

二、实验方法

实验所用的样品是生长在半绝缘掺铬衬底上的不掺杂 LPE-GaAs。外延层厚度为 $3.7\text{--}5.7\mu\text{m}$, 电子浓度 $n = 3.40 \times 10^{14}\text{--}1.52 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, 迁移率 $\mu_n(77\text{K}) = 6.5 \times 10^4\text{--}10.4 \times 10^4\text{cm}^2/\text{Vb}$ 。用范德堡法进行测量, 样品腐蚀成十字草形状, 接触电极用黑纸遮光以防止光伏效应对测量结果的干扰。测量电流为 $0.05\text{--}0.50\text{mA}$, 磁场强度 4000Gs 。表 1 列出了样品相邻两组臂间的电阻比 R_1/R_2 以及补偿度 θ , $\theta = N_A/N_D$ 。后者由 77K 迁移率值, 根据 Wolfe 经验曲线^[5]求得。由表 1 可见, 所有样品的 R_1/R_2 值均小于 2, 说明样品的宏观不均匀性是相当小的。光霍耳测量用 750W 卤钨灯作光源, 经 WDF 型反射式单色仪分光, 得到波长为 $8750\text{\AA}$ 的近单色光, 光强为 $3.9 \times 10^{14}\text{photons}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。样品放在具有石英窗口的连续流致冷剂式的低温恒温器中, 调节致冷剂流量以及加热电流可使样品温

表 1 不掺杂 LPE-GaAs 在范德堡法测量中相邻两组臂的电阻比以及补偿度

样品编号	79-24	80-51	82-22	82-12	82-13
电阻比 R_1/R_2	1.02—1.03	1.02—1.06	1.79—1.54	1.46—1.99	1.06—1.09
补偿度(θ)	0.52	0.64	0.24	0.70	0.25

度处于 $77\text{--}300\text{K}$ 之间的任意温度, 用 702 型精密温度控制器控温可使温度稳定在 $\pm 1\text{K}$ 。用 CGR-1-500 型碳玻璃电阻温度计测温。

三、实验结果和讨论

图 1 画出了 5 个不掺杂 LPE-GaAs 样品的迁移率温度关系。可以看出, 不同样品的诸曲线间有互相交叉的现象。样品 80-51 和 82-13 在 300K 附近相交, 82-12 和 82-22 也是这样, 而 82-12 和 82-13 在 200K 附近便相交。如果只存在一种非本征散射, 即离化杂质散射, 则离化杂质含量不同的样品诸曲线应有平行关系, 不可能相交, 因此只有假设另一种非本征散射, 即未知散射中心存在才能解释上述实验结果。关于这一点, 我们以样品 82-13 为例作一些半定量分析。图 2 表示 82-13 样品的迁移率温度关系实验曲线以及 5 种散射机制所确定的迁移率温度关系理论曲线。其中极性光学波散射迁移率 μ_{po} , 压电散射迁移率 μ_{pe} 和畸变势散射迁移率 μ_{dp} 属于本征散射; 离化杂质散射迁移率 μ_i 和空间电荷散射迁移率 μ_{sc} 属于非本征散射。我们用下述方法求 μ_i 。根据 77K 迁移率由 Wolfe 经验曲线得到总离化杂质浓度, 再根据 Brooks-Herring 公式算出 μ_i 。结果表明, 298K 时, 由三种本征散射所决定的迁移率(即理论极限值)为 $9394\text{cm}^2/\text{Vb}$, 而加上离化杂质散射后迁移率为 $9273\text{cm}^2/\text{Vb}$, 如图 2 中实心圆点所示。该温度下实验测量值仅 $6560\text{cm}^2/\text{Vb}$, 计算值高于实验值 41% 。因此, 有理由认为样品中还存在着另一种散射中心。Weisberg 等人^[6]在 GaAs 和 InP 体材料中曾经发现过它们。我们的工作表明, 在纯度相当高的 LPE 材料中还可能存在这类中心。

Stringfellow 等人^[1]认为, 这类中心的物理本质应是受主杂质碳的短程势散射, 并且他

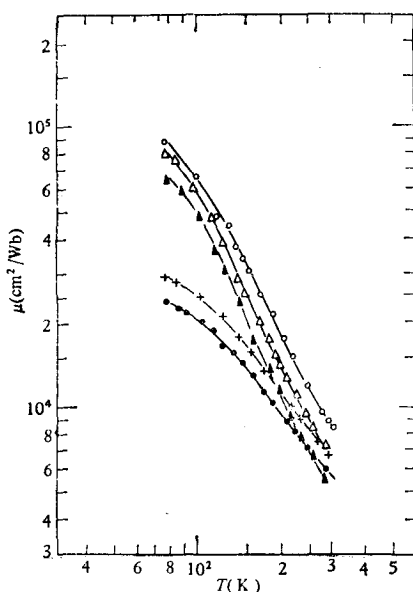


图 1

○ 为 79-24; △ 为 80-51;
● 为 82-22; ▲ 为 82-12;
+ 为 82-13

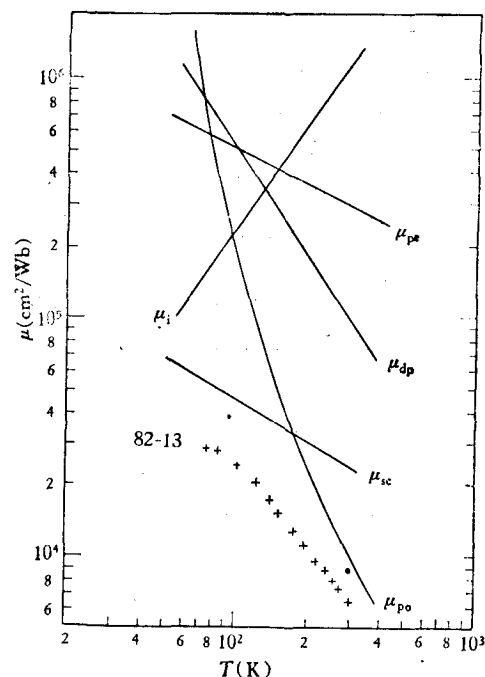


图 2

们对于这类散射对 GaAs 迁移率的影响作了理论计算,结果如图 3 所示。由图 3 可见,当样品的电子浓度 $n = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时,短程势散射将对室温迁移率有可观的影响。他们研究的样品 $n > 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 因此这种看法有一定的合理性。但是我们的样品电子浓度都在 10^{14}cm^{-3} 数量级。由图 3 可知,短程势散射对室温迁移率的影响是完全可以忽略不计的。因此,对于引起低迁移率的未知散射中心还必须作进一步的研究。我们对 77K 电子浓度和迁移率的光照影响做了测量,结果列于表 2。表中 $\Delta n/n$ 和 $\Delta \mu/\mu$ 分别表示光

表 2 77K 温度下光照对不掺杂 LPE-GaAs 电子浓度和迁移率的影响

样品编号	外延层厚度 (μm)	300K		77K	
		n (cm^{-3})	μ (cm^2/Vb)	$\frac{\Delta n}{n}$	$\frac{\Delta \mu}{\mu}$
82-12	5.7	3.40×10^{14}	5.40×10^3	0.036	0.063
80-41	3.7	1.52×10^{15}	6.10×10^3	0.008	0.031
W82-31	5.3	3.97×10^{14}	5.39×10^3	0.016	0.038
81-86	4.4	3.91×10^{14}	8.04×10^3	0.038	0
82-39	6.6	1.72×10^{14}	7.09×10^3	0.071	0.009

照时电子浓度和迁移率的相对增量。另外,也列出了样品室温电子浓度和迁移率。可以看出,室温低迁移率和 $\Delta \mu/\mu$ 之间存在着一定的联系,即室温迁移率愈低, $\Delta \mu/\mu$ 愈大。图 4 表示 $(\Delta \mu/\mu)_{77\text{K}}$ 对 $\mu_{300\text{K}}$ 的依赖关系。如果我们把光照时 77K 迁移率的增加归之为空间电荷区收缩的结果,那末可以认为,引起室温低迁移率的未知散射中心是空间电荷散射。应当指出,迁移率的增加也可能来自光生载流子对离化杂质的屏蔽效应。Paesler 等

人^[7]研究了 GaAs 中的这种效应,得到关系式 $\Delta\mu_i/\mu_i = c_3(\Delta n/n)$, c_3 是与样品载流子浓度和温度有关的参量. 设温度为 77K, $n = 10^{15}\text{cm}^{-3}$, $c_3 \approx 0.2$. 因此,即使对这个效应作过高的估计,认为迁移率完全由离化杂质散射决定,迁移率的相对增量仍小于 8×10^{-3} , 小于实验值很多. 综上所述,我们的实验结果是对空间电荷散射模型有力的支持.

最后,我们对于 Stringfellow 等人所提出的对空间电荷模型的责难作简短的评论. 我们认为,他们提出的太阳电池模型有值得商榷之处. 对于空间电荷区宽度 W ,他们用单边突变结来描述

$$W = [2\epsilon_s(V_{bi} + V)/q(N_D - N_A)]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中 V 为光电压; V_{bi} 为自建电压. 实际上,空间电荷区往往由晶体内部局部高阻或反型等不均匀性造成,用 p-n 结的空间电荷区公式来描述才是合理的. 它的表达式为

$$W_n = [2\epsilon_s(V_{bi} + V) \cdot \Delta N_{AA}^- / q(N_D - N_A)(N_D - N_A + \Delta N_{AA}^-)]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中 W_n 为晶体正常区贡献的空间电荷区宽度; ΔN_{AA}^- 为高阻或反型区所贡献的空间电荷区内离化深受主的增加量. 这里为具体起见,假设由于局部深受主富集或浅施主浓度

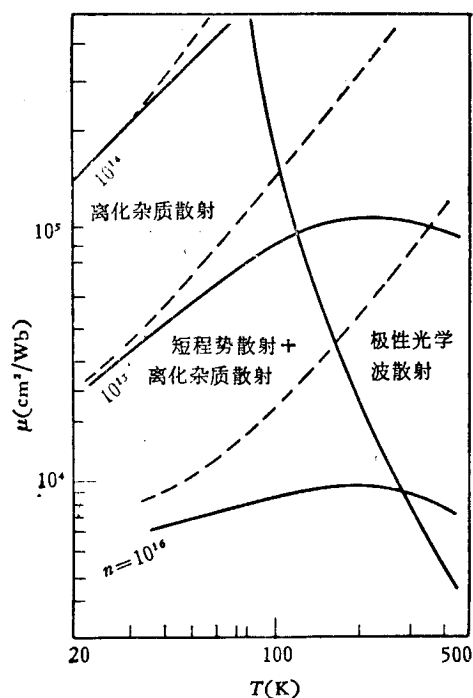


图3 虚线为离化杂质散射迁移率,假设 $\frac{(N_D + N_A)}{(N_D - N_A)} = 3$; 实线为离化杂质散射加短程势散射的组合迁移率

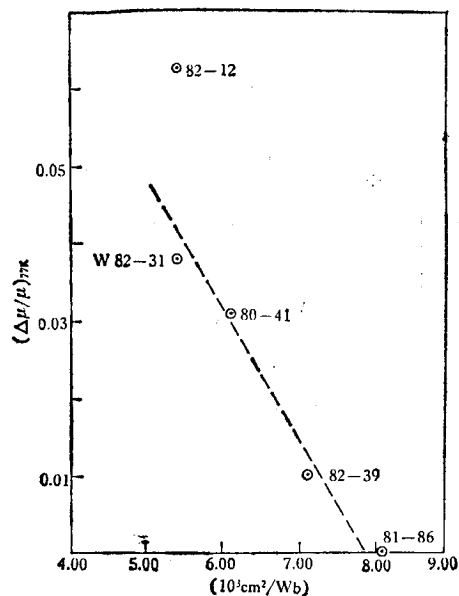


图 4

涨落造成了高阻区或反型区. 在高阻区或反型区内部则有电中性条件

$$N_D - N_A - N_{AA}^- = p - n \approx 0.$$

由(2)和(3)式可知:

$$W_n/W = \left(\frac{\Delta N_{AA}^-}{N_D - N_A + \Delta N_{AA}^-} \right)^{\frac{1}{2}} < 1. \quad (4)$$

当 $\Delta N_{AA}^- \ll N_D - N_A$ 时, 我们有 $W_n \ll W_0$. 光照时只有 W_n 的收缩才对降低空间电荷散射截面有贡献. 虽然, 这种贡献要比 Stringfellow 等人设想的要小得多. 因此并不存在太阳电池模型和光照下迁移率增量的实验结果的矛盾.

四、结 论

测量了 5 个不掺杂 LPE-GaAs 样品的电子迁移率温度关系, 发现不同样品的诸曲线间有互相交叉的现象, 不可能只用离化杂质散射一种非本征机制来解释. 因此, 存在着另一种非本征机制即未知散射中心的假设看来是合理的. 对一个典型样品作各种散射机制的半定量分析也证实了这一点. 由于样品的纯度已相当高, Stringfellow 等人提出的杂质短程势散射(中心元胞势散射)已经可以忽略不计. 实验发现, 光照时 77K 迁移率的增量和室温低迁移率之间存在着确定的联系, 由此认为, 未知散射中心可能是样品微观不均匀性造成的空间电荷区. 最后, 对 Stringfellow 等人提出的太阳能电池模型作了简短的评论.

本所 GaAs 液相外延组提供了测试样品, 邹元熾教授一直对本工作给予指导和关心, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- [1] G. B. Stringfellow and H. Künzel, *J. Appl. Phys.*, **51** (1980), 3254.
- [2] L. R. Weisberg, *J. Appl. Phys.*, **33**(1962), 1817.
- [3] E. M. Conwell and M. O. Vassell, *Phys. Rev.*, **166** (1968), 797.
- [4] W. Walnkiewicz, J. Lagowski and H. C. Gatos, *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 5853.
- [5] G. E. Stillman and C. M. Wolfe, *Thin Solid Films*, **31**(1976), 69.
- [6] L. R. Weisberg and J. Blanc, *Proc. Int. Conf. Semicond.*, Prague, (1960), 940.
- [7] M. A. Paesler and H. J. Qneisser, *Phys. Rev.*, **17**(1978), 2625.

ON THE LOW MOBILITY OF GaAs

ZHOU BING-LIN CHEN ZHENG-XIU

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

ABSTRACT

The temperature dependence of electron mobility on 5 undoped LPE-GaAs samples has been measured. It was found that the experimental curves cross each other and this is difficult to explain by only one extrinsic scattering mechanism (ionized impurity scattering). Therefore, it's necessary to assume another extrinsic scattering mechanism, so called mobility killer. Because the samples we used are rather pure, the central-cell scattering suggested by Stringfellow et al. can certainly be neglected. The effect of illumination on the electron concentration and mobility at 77 K has been studied and it is considered that the nature of mobility killer is probably the space-charge region caused by the microscopic inhomogeneities in samples.