

# 液相外延生长的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 Al 组分分布及少子扩散长度的研究

刘宏勋 陈焜兮 虞丽生

(北京大学物理系)

1982年3月4日收到

## 提 要

用液相外延生长了不同  $x$  值 0.2—0.8 的 P 型和 N 型  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。用 X 光能谱法测量了厚度  $10\mu\text{m}$  范围内的 Al 组分分布,发现在厚度为  $5\mu\text{m}$  以内 Al 组分基本上是均匀的,而在  $5\mu\text{m}$  以外随着厚度的增加对于高 Al 样品  $x$  值是增高的,而对于较低 Al 组分样品  $x$  值降低。用 EBIC 方法测量了电子和空穴的扩散长度。得到在掺杂杂质浓度相同的条件下电子的扩散长度随 Al 组分  $x$  值的增加而减小,空穴的扩散长度则不随 Al 组分的变化而变化。

III-V 族化合物半导体材料 GaAs 和固溶体  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  在光电子器件领域内得到了广泛的应用,已成为制备 DH 激光器,发光二极管,太阳能电池等必不可少的材料。近十年来对 GaAs 材料的电学和光学性质已做了大量的全面的研究。这对于光电子器件的设计和制造以及性能的提高发挥了很大的指导作用。但是对于固溶体  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料的物理性质的研究近几年来才有一些报道。了解液相外延生长的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层的 Al 组分的均匀性,载流子的扩散长度,寿命,晶体缺陷,荧光效率以及它们和生长工艺条件的关系,对于上述光电子器件,特别是可见光半导体激光器和集成光波导的设计和制备都有重要的意义<sup>[1-3]</sup>。

我们用液相外延法生长了  $x$  值为 0.1—0.9 范围的 P 型及 N 型  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。用无标样 X 光能谱法<sup>[4]</sup>测量了厚度约为  $10\mu\text{m}$  的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的 Al 组分分布。用扫描电子显微镜电子束感生电流法<sup>[5,7]</sup>测定了少数载流子的扩散长度。对于后者的实验结果尚未见文献报道。

在掺  $\text{Te}(\sim 10^{18}\text{cm}^{-3})$  GaAs 衬底上用典型的水平滑动式液相外延法依次生长 N 型  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  掺  $\text{Te}(\sim 10^{18}\text{cm}^{-3})$ 、P 型  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  掺  $\text{Ge}(\sim 10^{18}\text{cm}^{-3})$  和 P 型 GaAs 掺  $\text{Ge}(\sim 10^{18}\text{cm}^{-3})$  欧姆接触是按制备 DH 激光器的常规方法制成。

用 S-550 型扫描电子显微镜及 EDAX-9100 能谱仪测定 Al 组分的纵向(即垂直于界面方向)分布。电子束  $E_0 = 25\text{keV}$  垂直入射;出射角  $38^\circ$ 。电子束在样品解理面上的位置由束偏压控制。电子束沿垂直于界面方向,每移动  $1-2\mu\text{m}$  记一次能谱计数。这种方法,由于电子束作用范围  $\sim 1\mu\text{m}$  故不适于精确测量界面附近  $\sim 1\mu\text{m}$  以内的组分分布。

图 2 是各种  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  样品的  $x$  值分布的测量结果。表明大多数样品在  $5\mu\text{m}$  的厚

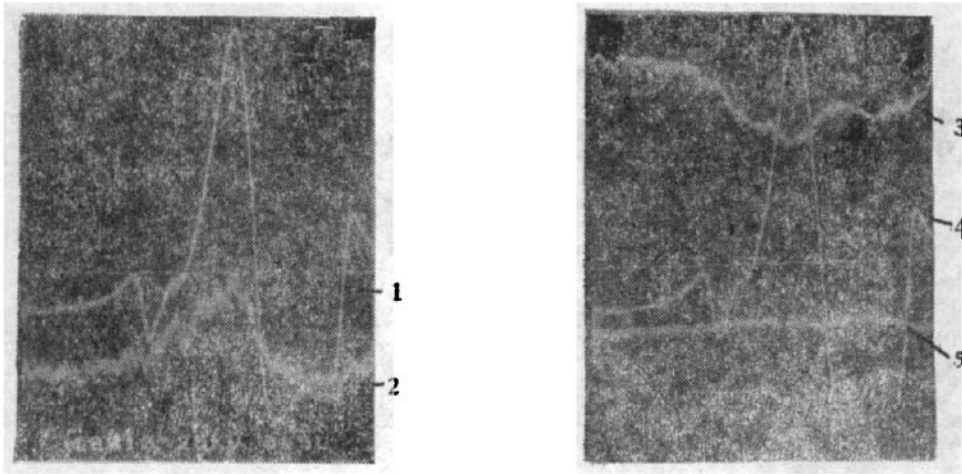


图1  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  解理面二次电子信号强度及 Al、Ga、As X-射线光谱分布  
1.二次电子信号, 2.Al X射线分布, 3.Ga X射线分布, 4.二次电子信号强度, 5.As X射线分布

度以内  $x$  值分布大体上是均匀的. 还表明  $x$  值低于 0.5 的各曲线在大于  $5\mu\text{m}$  时随着生长厚度的增加 Al 组份出现下降趋势, 当  $x$  值高于 0.6 时则出现相反的情形. 实验结果还表明测得的 Al 组份全部低于按相图计算的理论值, 并且  $x$  值越小这种差别愈显著.

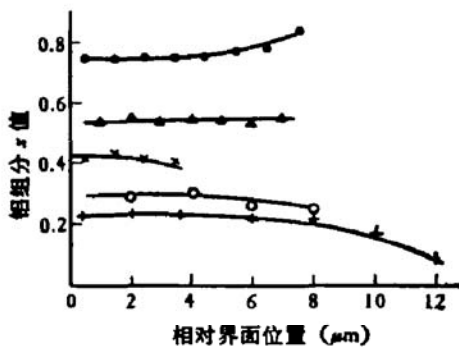


图2 不同  $x$  值样品的 Al 组分分布

按 Panish 等根据 Al-Ga-As 三元相图计算的数据<sup>[6]</sup> 我们做了平衡时的 Al 分凝系数同生长母液中 Al 组分及生长温度的关系曲线. 可以看到有三个特性. (1) Al 的分凝系数  $k$  远大于 1. (2) 随着生长温度的下降  $k$  增大. (3)  $k$  随液相中 Al 组分的增加显著降低. 因而, 由于特性 (1) 的作用在外延生长过程中液相中的 Al 组分会不断降低, 从而使生长层产生 Al 组分下降的趋势. 但是与此同时由于生长是降温生长过程, 随着温度的不断降低  $k$  增大, 并且, 由于液相中 Al 组分下降同样使  $k$  增大, 这就是  $k$  的 (2)(3) 特性, 它们将使生长层中 Al 组分产生上升的趋势. 这三个因素的相互制约就得到了固相中的 Al 组分分布. 在  $x$  值比较低时特性 (1) 占了主导地位, 因而在生长一定厚度之后, 固相中的 Al 组分开始下降. 在  $x$  值比较高的情况, 分凝系数  $k$  显著降低, 它大大地减弱了特性 (1) 的作用, 从而特性 (2)(3) 就成了 Al 分布的主要因素. 使固相生长层在生长一定的厚度之后 Al 组分上升. 不难得出在三因素相当时就可以获得 Al 组分均匀的生长层. 至于实际生长层中 Al 组分比按相图计算的 Al 组分低是由于相图反映的是平衡状态的数据. 而实际生长则是动力学过程.

我们根据 A. M. Sekela 及 T. Fuyuku<sup>[5,7]</sup> 提出的分析和方法用扫描电镜电子束感生电流测量了  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  P-N 结两侧的少数载流子的扩散长度. 所得到的典型的电子束感生电流  $I$  和电子束离势垒的距离  $l$  的关系曲线. 如图 3 所示.

可以看到在势垒两边  $\ln I-l$  曲线有一个基本上是呈直线的区域. 由于束斑作用直径

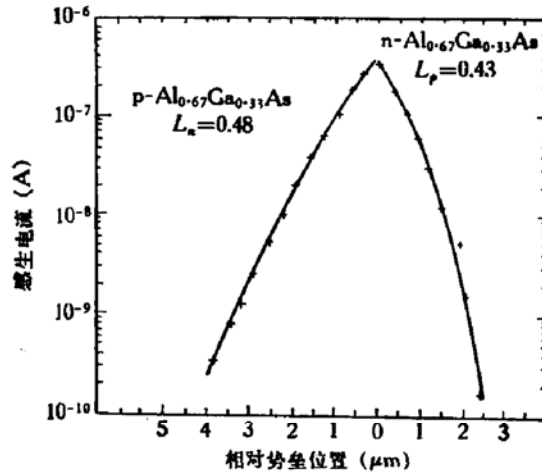


图 3 电子束感生电流相对势垒距离的典型曲线

$\sim 1\mu\text{m}$  所以在势垒附近  $1\mu\text{m}$  的附近不同程度的偏离直线。其原因 A. M. Sekela<sup>[5]</sup> 已做了详尽的分析。另外，除去个别样品外大部分样品的势垒位置与形貌象显示的 P- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  与 N- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的界面位置是一致的。说明晶体生长条件是比较理想的。没有明显的回熔。

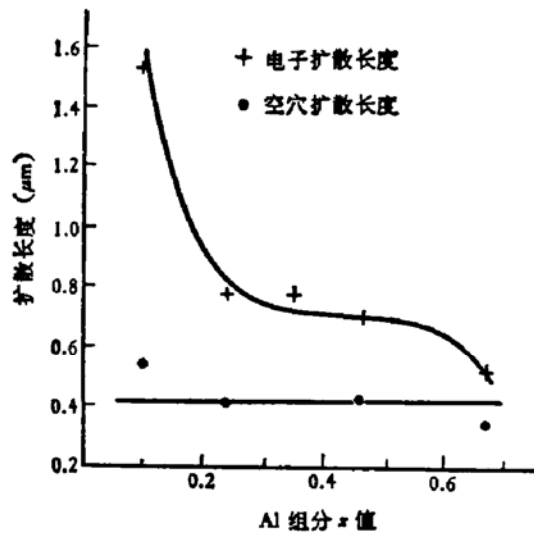


图 4 扩散长度对 Al 组分  $x$  值的变化

图 4 是不同  $x$  值下掺杂相同 ( $10^{17}-10^{18}\text{cm}^{-3}$ ) 少数载流子扩散长度的测量结果，由图 4 可以看出，电子扩散长度比空穴扩散长度大。电子扩散长度随  $x$  值增加而减小(掺杂杂质浓度相同)。空穴扩散长度则不随  $x$  值变化。这个测量结果可以用大家熟悉的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  能带结构加以解释。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  三个导带极小值分别为  $\Gamma$  (直接)、 $L$  (间接) 和  $X$  (间接) 带，电子在三个带中的数量分布由：

$$n = 2.5 \times 10^{19} [(m^\Gamma/m_0)^{3/2} + (m^L/m_0)^{3/2} \exp(-\Delta E^{L-\Gamma}/KT) + (m^X/m_0)^{3/2} \exp(-\Delta E^{X-\Gamma}/KT)] (T/300)^{3/2} \exp[(F_c - E_c)/KT]$$

表示。三个导带中的电子迁移率相差很大。 $\Gamma$  带中电子的迁移率大约是  $L$  带中电子迁移率的 8 倍，是  $X$  带中电子迁移率的 24 倍。因此，三个导带中的电子对电子扩散长度的

贡献差别也就很大。而各带中的电子数分别由它们的有效质量和带隙来确定。两者都是  $x$  值的函数。所以, 当  $x$  值由 0 增大时  $\Gamma$  带上升的比  $L$  和  $X$  带快的很多。所以电子随  $x$  的增大而部分地, 甚至全部的由  $\Gamma$  带转移到  $L$  和  $X$  带上去。电子迁移率变小, 扩散长度也因之减少。

由于  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料的价带顶都在  $K$  空间的原点处, 而不随  $x$  值变化, 所以, 空穴的扩散长度不随  $x$  值的变化而变化是很自然的。

我们的这项工作得到吴自勤、张人佶、钟栋梁、陈淑华、李惠兰、贾丽敏等同志的帮助。在此, 表示感谢。林豪同学也参加了大量的实验工作, 一并致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Hachiro Ljuin and Shum-ichi Gouda *J. Electrochem. Soc.*, **123**, 1109 (1976).
- [2] P. Kordos G. L. Pearson and H. B. Panish *J. Appl. Phys.*, **50**, 6902 (1979)
- [3] P. M. Petroff and R. A. Logan *J. Vac. Sci. Technol.*, **17**, 1113 (1980).
- [4] 张人佶, 葛森林, 吴自勤, 物理学报, **30**, 208 (1981).
- [5] A. M. Sekela, D. L. Feucht and A-G. Milues *Inst. Phys. Conf. Ser.*, No. 24 p. 245 (1975).
- [6] H. C. Casey and M. B. Panish, "Heterostructure Lasers" Part B, p. 71, Academic Press Inc. (1978).
- [7] T. Fuyuku and H. Matsumami *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, 745 (1981).

## Investigation on the Distribution of Al Composition and on the Diffusion Length of the Minority Carriers in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Grown by LPE

Liu Hongxun, Chen Weixi and Yu Lisheng  
(Department of Physics, Beijing University)

### Abstract

The distribution of Al composition in P and N type  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  grown by LPE and having different values of  $x$  (0.2—0.8) has been measured by X-ray energy spectroscopy to a depth of 10  $\mu\text{m}$  from the interface. It has been found that the Al composition up to a depth of 5  $\mu\text{m}$  from interface is almost uniform but that after 5  $\mu\text{m}$ ,  $x$  increases with the increasing thickness for high Al composition, while it decreases for low Al composition. The diffusion lengths of electrons and holes ( $L_n, L_p$ ), measured by EBIC method, have shown that  $L_n$  decreases with the increasing Al composition, but that  $L_p$  is constant for all values of  $x$ .