

掺 In 对反型 AlGaAs/GaAs 异质界面质量的改善及其应用

尚勋忠 王文冲 郭丽伟 吴曙东 牛萍娟 黄 纪 周均铭

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要: 研究了 AlGaAs 层掺 1% 的 In 对 AlGaAs/GaAs 量子阱光致发光谱的半峰宽的影响。25K 的光致发光结果表明, In 作为表面活化剂能有效改善 AlGaAs/GaAs 异质界面的粗糙度。将此方法应用到反型 AlGaAs/GaAs 高电子迁移率晶体管(HEMT)材料结构中, Hall 测量表明该方法能有效提高反型 HEMT 的电学性能。

关键词: 量子阱; 高电子迁移率晶体管; 界面粗糙度; 光致发光; 表面活化剂

PACC: 7340; 7855E; 7360F

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)09-1128-04

1 引言

AlGaAs/GaAs 异质结构广泛应用于微电子和光电子器件^[1], 特别是高电子迁移率晶体管(HEMT)。在调制掺杂正型 AlGaAs/GaAs HEMT 结构中, 掺杂的 AlGaAs 层生长在 GaAs 沟道之上, 由于离化电荷的存在干扰了栅极和漏极之间的电场分布, 提高了载流子隧穿的几率, 从而降低了器件击穿电压。而在反型 AlGaAs/GaAs HEMT 结构中, 掺杂 AlGaAs 层生长在 GaAs 之下, 所有离化电荷在反型异质界面下面, 使得离化电荷产生的不良效应得到抑制^[2], 并在器件制作过程中可直接在二维电子气(2DEG)沟道上形成欧姆接触, 简化了栅极开槽的工艺^[3]。但是, 相对于正型 AlGaAs/GaAs HEMT 结构而言, 反型 AlGaAs/GaAs HEMT 结构的性能有所降低, 其主要原因是由于 Al 原子活性强, 迁移长度短, 从而导致反型 AlGaAs/GaAs 异质界面在原子水平上更粗糙, 耦合更多的杂质, 掺杂原子 Si 通过界面偏析或扩散到 2DEG 沟道里更多^[4]。尽管反型 AlGaAs/GaAs HEMT 结构在器件制作上更容易, 但由于其粗糙的异质界面而使其实用化

受到限制。在实际的许多器件中常含有反型 AlGaAs/GaAs 异质结, 该结构的界面质量直接决定器件的性能, 所以提高 Al 原子的迁移长度来改善反型 AlGaAs/GaAs 异质界面的质量具有十分重要的应用价值。改善界面质量的方法主要有生长 AlGaAs 后中断生长, 提高 AlGaAs 层的生长温度和降低 AlGaAs 层生长速率, 降低 As 压和用迁移率增强外延生长等^[5,6]。本文采用加入少量 In 到 AlGaAs 层中, 通过比较 AlGaAs/GaAs 线宽来研究掺 In 对反型 AlGaAs/GaAs 异质界面粗糙度的影响以及应用到反型 AlGaAs/GaAs HEMT 中对其电学性能的影响。该方法不仅新颖, 而且效果明显, 为反型 AlGaAs/GaAs 异质结构的应用开辟了新的途径。

2 实验

实验所用样品是用 V80H MBE 系统在(001)方向的 GaAs 衬底上生长的。一组样品 A, B, C 是如图 1 所示的 AlGaAs/GaAs 量子阱结构, 样品 A 是对比样品, 采用传统生长方法, 生长 AlGaAs 层时既不中断, 也不掺 In; 样品 B 在生长反型 GaAs/Al-

尚勋忠 1972 年出生, 博士研究生, 研究方向是半导体材料和器件。

2003-08-18 收到, 2003-11-21 定稿

©2004 中国电子学会

GaAs 界面时,采用中断生长 1min 这一传统的改善界面质量的方法;样品 C 不同于样品 A 的是生长 AlGaAs 时掺入少于 1% 的 In。这组样品的设计目的是通过比较量子阱的低温光致发生线宽来研究掺 In 对反型 AlGaAs/GaAs 异质界面粗糙度的影响。另一组样品 D, E, F 是如图 2 所示的反型 HEMT 结构, Si 平面掺杂水平一样, 样品 D 是作为对比样品的普通反型 AlGaAs/GaAs HEMT 结构, 样品 E 不同于样品 D 的是 AlGaAs 层掺少于 1% 的 In, 通过比较样品 D, E 的电学性能来研究掺 In 对反型界面质量的改善。样品 F 在样品 E 的基础上增加隔离层的厚度, 目的是联合传统的提高 HEMT 性能的方法, 进一步提高反型 HEMT 的电学性能。GaAs 的生长速率为 500nm/h, Al 组分由反射式高能电子衍射(RHEED)振荡决定, In 组分由其生长速率与 In 炉温度的关系曲线外推得到。样品 A, B, C 生长完后, 放置于由液 He 致冷并可变温的样品室中进行光致发光谱测试, 激发光源是波长为 632.8nm 的 He-Ne 激光器。样品 D, E, F 生长完之后分别在室温和 77K 下进行普通的 Hall 测量。

5nm GaAs	5nm GaAs	5nm GaAs
100nm AlGaAs	100nm AlGaAs	100nm In _{0.01} AlGaAs
1.5nm GaAs	1.5nm GaAs	1.5n1.5nm GaAs
50nm AlGaAs	Interruption	50nm In _{0.01} AlGaAs
2.5nm GaAs	50nm AlGaAs	2.5nm GaAs
50nm AlGaAs	2.5nm GaAs	50nm Al _{0.01} GaAs
5nm GaAs	Interruption	5nm GaAs
100nm AlGaAs	50nm AlGaAs	100nm Al _{0.01} GaAs
500nm GaAs buffer	5nm GaAs	500nm GaAs buffer
GaAs substrate	Interruption	GaAs substrate
Sample A	100nm AlGaAs	Sample C
	500nm GaAs buffer	
	GaAs substrate	
	Sample B	

图 1 AlGaAs/GaAs MQWs 样品结构示意图

Fig. 1 Schematic of AlGaAs/GaAs MQWs

300nm GaAs	300nm GaAs	300nm GaAs
20nm AlGaAs	20nm In _{0.01} AlGaAs	30nm In _{0.01} AlGaAs
Si δ-doping	Si δ-doping	Si δ-doping
50nm AlGaAs	50nm In _{0.01} AlGaAs	50nm In _{0.01} AlGaAs
500nm GaAs buffer	500nm GaAs buffer	500nm GaAs buffer
GaAs substrate	GaAs substrate	GaAs substrate
Sample D	Sample E	Sample F

图 2 反型 GaAs/AlGaAs HEMTs 样品结构示意图

Fig. 2 Schematic of inverted AlGaAs/GaAs HEMT

3 结果与讨论

图 3 给出了样品 A, B, C 在 25K 时的 PL 谱。所有 PL 谱都是单峰, 说明界面上生长的小岛的径向尺寸比激子半径(15nm)小^[7], 但是对同样阱宽的 PL 来说, 强度按 B, A, C 的顺序增加, 半峰宽(FWHM)按 A, B, C 的顺序减少。生长反型 AlGaAs/GaAs 界面时中断能改善界面的粗糙度, 但降低了光致发光效率; 而生长 AlGaAs 时掺 In 能同时减小 FWHM 和提高光致发光效率。阱宽为 5nm 的

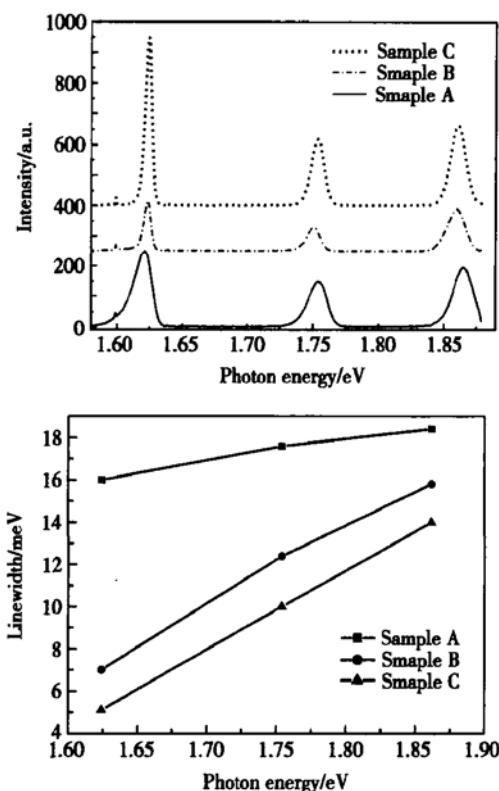


图 3 样品 A, B, C 在 25K 时的光致发光谱

Fig. 3 PL results of samples A, B, C at 25K

PL 谱半峰宽依次是 16, 7, 5.1meV, 由方势阱模型:

$$\Gamma = \delta E_e + \delta E_h = \frac{\eta^2}{2} \times \frac{\pi^2}{L^3} \times \left[\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h} \right] \times \delta L$$

其中 $m_e = 0.067m_0$; $m_h = 0.45m_0$ 。可计算出界面粗糙度分别是 1.48, 0.64, 0.47 个单原子层(ML), 阵宽为 2.5nm 的 PL 谱半宽由于阱太薄, 用这种模型计算带来的误差很大^[8]。MBE 生长的材料结构中, 界面质量由阳离子的迁移情况来决定, 由于 Al 的活性强, 迁移长度短, 中断生长可使 Al 有充分的时间迁移到格点位置, 但界面上耦合的深能级非辐射

复合中心浓度因中断生长而增加,从而导致光致发光效率大大降低。掺 In 对生长 AlGaAs 可起到表面活化剂的作用,其活化机理目前还不是完全清楚,一般由 site-blocking 效应来解释^[9]。由于 In—As 键能(1.52eV)比 Ga—As 键能(2.1eV)或 Al—As 键能(2.7eV)都小,迁移长度更长,In 原子就可以优先迁移到台阶密度大的地方,使得 Al 原子不能在这些地方成键、积聚从而迁移得更远,使反型 AlGaAs/GaAs 异质界面更平滑。

表 1 给出了样品 D, E, F 在室温(RT)和 77K 时的 Hall 测量数据。影响 AlGaAs/GaAs 二维电子气电子迁移率的主要机制有以下八种:(1)声学形变散射;(2)声学压电势散射;(3)极性光学声子散射;

(4)远程电离杂质散射;(5)本底电离杂质散射;(6)合金散射;(7)界面粗糙散射;(8)带间散射。考虑到样品 E 相对于样品 D 只是在 AlGaAs 势垒层中掺少量的 In,并联系掺入少量 In 对 AlGaAs/GaAs 量子阱低温光致发光线宽的改善,可以认为 In 作为表面活化剂改善了反型 AlGaAs/GaAs 异质界面的粗糙度,减少了在 77K 时起主要作用的界面粗糙散射,从而显著提高了电子迁移率^[10],2DEG 的电子密度也因为界面态的减少而有所提高。在此基础上增加隔离层的厚度来减小离化施主的库仑散射可使电学性能进一步提高,说明利用掺 In 和其他传统改善 AlGaAs/GaAs HEMT 性能的方法联合起来,是实现高性能反型 AlGaAs/GaAs HEMT 的有效途径。

表 1 样品 D, E, F 在室温和 77K 时的电学性能

Table 1 Electrical properties of samples D, E, F at room temperature and 77K

Sample	n_s (RT)/cm ⁻²	μ (RT)/(cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)	n_s (77K)/cm ⁻²	μ (77K)/(cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)
D	6.23×10^{11}	4371	4.84×10^{11}	37857
E	8.27×10^{11}	4563	5.87×10^{11}	72862
F	7.63×10^{11}	4632	5.63×10^{11}	80648

4 结论

AlGaAs 层掺少于 1% 的 In 能显著降低 AlGaAs/GaAs 量子阱低温光致发光线宽,说明 In 作为表面活化剂能有效改善 AlGaAs/GaAs 异质界面的质量。将此方法首次应用到反型 AlGaAs/GaAs 高电子迁移率晶体管材料结构中,Hall 测量表明该方法是提高反型 HEMT 电学性能的有效途径。

参考文献

- [1] Wilson L R, Keightley P T, Cockburn J W, et al. Controlling the performance of GaAs-AlGaAs quantum-cascade lasers via barrier height modifications. *Appl Phys Lett*, 2000, 76: 801
- [2] Brown A S, Metzger R A, Henige J A, et al. Effect of Si movement on the electrical properties of inverted AlInAs-GaInAs modulation doped structures. *Appl Phys Lett*, 1991, 59: 3610
- [3] Khler K, Ganser P, Maier M, et al. Modulation doped inverted and normal GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterostructures: influence of Si-segregation on the two-dimensional electron gas. *J Cryst Growth*, 1991, 111: 295
- [4] Pfeiffer L, Schubert E F, West K W, et al. Si dopant migration and the AlGaAs/GaAs inverted interface. *Appl Phys Lett*, 1991, 58: 2258
- [5] Cho N M, Kim D J, Madhukar A, et al. Realization of high mobility in inverted Al_xGa_{1-x}As/GaAs heterojunctions. *Appl Phys Lett*, 1988, 52: 2037
- [6] Noda T, Tanaka M, Sakaki H. Correlation length of interface roughness and its enhancement in molecular beam epitaxy grown GaAs/AlAs quantum wells studied by mobility measurement. *Appl Phys Lett*, 1990, 57: 1651
- [7] Hayakawa T, Suyama T, Takahashi K, et al. Interface disorder in GaAs/AlGaAs quantum wells grown by molecular beam epitaxy at high substrated temperature. *Appl Phys Lett*, 1985, 47: 952
- [8] Basu P K. Theory of optical process in semiconductors. New York: Oxford University Press Inc, 1997
- [9] Morishita Y, Nomura Y, Goto S, et al. Effect of hydrogen on the surface-diffusion length of Ga adatoms during molecular-beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 1995, 67: 2500
- [10] Yang Bin, Cheng Yonghai, Wang Zhanguo, et al. Study on scattering mechanism of GaAs/AlGaAs two-dimensional electron gas (2DEG). *Chinese Journal of Semiconductors*, 1995, 16(4): 248 (in Chinese) [杨斌, 陈涌海, 王占国, 等. GaAs/AlGaAs 二维电子气(2DEG) 散射机理研究. 半导体学报, 1995, 16(4): 248]

Indium Doping to Improve Heterojunction of AlGaAs/GaAs and Its Application

Shang Xunzhong, Wang Wenchong, Guo Liwei, Wu Shudong,
Niu Pingjuan, Huang Qi and Zhou Junming

(Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Effects of In doping on the optical properties of AlGaAs/GaAs quantum wells (QWs) and the electrical properties of inverted AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors (HEMTs) are investigated. It is found that a little In incorporation in AlGaAs layers can decrease the photoluminescence linewidths of AlGaAs/GaAs QWs drastically and a little In doping in AlGaAs layer can significantly increase the electron mobilities of inverted AlGaAs/GaAs HEMTs at 77K. All these results demonstrate that In doping can reduce the interface roughness due to In as a surfactant which can enhance the surface migration of Al adatoms during molecular beam epitaxy.

Key words: quantum wells; high electron mobility transistor; interface roughness; photoluminescence; surfactant

PACC: 7340; 7855E; 7360F

Article ID: 0253-4177(2004)09-1128-04