

MBE 生长轻掺 Si 高迁移率 GaAs 材料的杂质补偿特性研究

牛智川 周增圻 林耀望 李朝勇

(国家光电子工艺中心 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文报道了用 MBE 生长轻掺 Si 高迁移率 GaAs 材料的杂质补偿特性实验研究. 已得到 77K 温度下迁移率为 $16.2 \times 10^4 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的 GaAs 材料. 样品的 Hall 测量结果表明: 在较低的杂质浓度范围 ($1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} < n < 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$) 内, 在大体相同的生长温度 (590°C 左右) 下, 选择适当的生长速率 Gr 会增强对浅受主杂质的抑制作用, 同时也会抑制 Si 的自补偿效应, 减小杂质的补偿度 N_a/N_d 之值, 从而提高 MBE 外延 GaAs 材料的迁移率.

PACC: 6855, 8115G, 6170W

1 引言

高迁移率 GaAs 材料的生长研究是半导体材料研究领域的一个重要课题. 目前国内外用 MBE 技术制备高纯 GaAs 外延材料的研究报道已有很多^[1,2,3], 为获得 N 型 GaAs 大都采取 Si 元素做为掺杂源, 然而 Si 在 GaAs 中的自补偿效应对材料的杂质浓度以及迁移率等电学特性有重要影响. Chai^[4]等观察到当 Ga 和 Si 的束流恒定, 增加 As 束流会使自由电子浓度有所增加, 并且认为这是由于 As 束流的增加抑制了 Si 的自补偿效应. Hwang^[5]等在他们的轻掺杂 Si 的 MBE GaAs 生长实验中也有类似的结果和解释. 但 R. Nottenburg^[6]等的实验报道却认为: 在通常的生长条件下, 当掺杂浓度 $n > 10^{16}$ 时, Si 的自补偿效应对 GaAs 的电学特性影响不大, 当 $n < 10^{15}$ 时, 增加 As 束流对 Si 的自补偿效应未必有明显的抑制作用.

本实验用 MBE 方法, 进行了轻掺杂 Si 的 GaAs 外延生长研究. 通过优化生长条件, 获得了 77K 温度下迁移率为 $16.2 \times 10^4 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的好结果. 本报告则主要通过分析 Hall 测量结果, 讨论了低杂质浓度 ($1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} < n < 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$) 情况下, V / III 束流比以及生长速率 Gr 对 GaAs 杂质补偿特性的影响.

牛智川 男, 1963 年生, 博士, 现从事 III-V 族半导体材料的 MBE 生长及激光器件研究
周增圻 男, 1937 年生, 高级工程师, 现从事 III-V 族半导体材料的 MBE 生长及激光器件研究
林耀望 男, 1937 年生, 副研究员, 现从事 III-V 族半导体材料的 MBE 生长及激光器件研究
1994 年 6 月 20 日收到本文

2 实验及 Hall 测量结果

本实验所使用的 MBE 系统结构及生长研究等将另文详细报道. N 型掺杂源采用直接加热 Si 单晶带的新式源炉. 改变加热功率的控制电压 V_{Si} (mV) 可以改变 Si 的掺杂浓度. 衬底为半绝缘 GaAs(001) 衬底. 外延层通常包含 0.5—1.0 μm 的不掺杂 GaAs 缓冲层, 掺杂层的厚度大于 10 μm . 生长温度 T_{sub} 控制在 590 $^{\circ}\text{C}$ 左右. 在通常的生长条件下, 我们的 MBE 系统背景真空度可以达到 5×10^{-11} mbar, 非掺杂 GaAs 外延层为 P 型. 实验所得到的一系列样品进行了 Hall 测试, 表 1 列出了测量结果以及相应的掺杂条件 V_{Si} , V/III 束流比和生长速率 Gr. n_{77} 为 77K 温度下霍尔电子浓度, μ_{77} 为 77K 温度下霍尔电子迁移率. n_{300} , μ_{300} 为 300K 温度下的霍尔电子浓度和迁移率.

表 1 Hall 测量结果及相应的生长条件

样品号 No.	厚度 (μm)	V_{Si} (mV)	Gr ($\mu\text{m}/\text{h}$)	V/III (Bep)	n_{77} (77K)	μ_{77} (77K)	n_{300} (300K)	μ_{300} (300K)
0411	10.0	2.6	1.04	7.7	3.9×10^{14}	8.71×10^4	2.7×10^{14}	7159
0413	10.0	2.5	1.04	7.7	2.9×10^{14}	9.91×10^4	2.9×10^{14}	7295
0414	10.0	2.6	1.48	7.7	2.6×10^{14}	10.1×10^4	2.4×10^{14}	6745
0415	10.7	2.5	1.48	7.7	1.7×10^{14}	10.5×10^4	1.4×10^{14}	6687
0501	11.8	2.3	1.14	8.5	4.1×10^{14}	10.8×10^4	4.0×10^{14}	7060
0503	12.0	2.0	1.14	8.5	1.8×10^{14}	15.3×10^4	1.4×10^{14}	7088
0504	15.0	1.8	1.04	10.0	6.0×10^{13}	16.2×10^4	5.9×10^{13}	7415
0506	16.0	1.7	1.04	10.0	4.0×10^{13}	16.1×10^4	2.6×10^{13}	7458

3 分析与讨论

对比表 1 所列的结果可以看出: V/III 比不变时, 在相等的掺杂条件下, 生长速率 Gr 增大, 则自由载流子浓度 n 相对减少. 事实上, 生长速率的提高是通过提高 Ga 的束流值 (Bep 值) 获得的. 在通常的生长条件下, As 束流要与 Ga 束流保持一定的比例关系, 因此提高生长速率 Ga 和 As 的分压都要提高. 如果这时 V_{Si} 不变, 则与低的 Gr 相比, 作为掺杂源的 Si 原子相对于 Ga 和 As 原子的份额就要减少, 从而导致了掺杂浓度的降低, n 减小. 但需要指出的是, 在生长系统背景真空度一定的前提下 (即系统本底杂质浓度一定), 适当地提高生长速率可以在一定范围内抑制本底杂质浓度. 对我们的 MBE 系统非掺杂外延 GaAs 呈 P 型, 因此较高的生长速率有利于抑制受主杂质.

从表 1 还可以看出, 提高生长速率对室温迁移率产生了不利影响, 这可能是由于在较高的生长速率下, 外延层的晶体缺陷相对增多, 而室温下载流子受到的散射主要来自晶格的振动, 晶格缺陷增多势必导致迁移率的下降. 由此看来, 生长速率对 GaAs 的掺杂特性和晶体的完整性都有影响. 高迁移率外延 GaAs 材料既要求低的杂质浓度, 也要求好的晶体完整性, 因此选择恰当的 Gr 是非常重要的. 本实验通过比较认为 Gr 控制在 1—1.5 ($\mu\text{m}/\text{h}$) 的范围内较好.

此外, 对比低温 77K 和室温 300K 的 Hall 载流子浓度可以发现: 室温载流子浓度 n_{300} 总是小于低温浓度 n_{77} , 这一现象似可以解释为: 在较高的温度下, 受主杂质比施主杂质更多地被离化了, 使得自由电子浓度下降. 这种两类杂质离化率不同的现象应该与杂质的具体种类和含量相关, 这有待进一步研究.

除了生长速率对杂质的影响外, 为了直观地了解 V/III 束流比及生长速率 Gr 对杂质补偿特性的作用. 我们绘制了不同的掺杂条件下 (即 V_{Si} 取不同的值), 低温 (77K) 的 Hall 载

流子浓度 n 的变化关系曲线, 如图 1 所示: 横座标表示 V_{Si} (线性) 值, 纵坐标表示 n (常用对数) 值. 从图 1 所示的三条曲线可以得出两点结论:

1) 在相同的生长速率下, 当 V/III 比恒定时, Hall 电子浓度 n 随 V_{Si} 线性变化;

2) 在相同的生长速率下, 当 V_{Si} 不变时, 小范围提高 V/III 比 (7.0—10.0) 并未相应地提高 n 之值. 这个结论与文献 [6] 的报道相符合. 即在低的掺杂浓度范围 ($n < 1 \times 10^{15}$) 内改变 As 压使 V/III 比提高, 对于 Si 的自补偿效应和 C 等受主杂质的抑制作用并不明显.

从总体上来说, 在相同的掺杂条件下, 获得尽量高的自由载流子浓度的本质是减小了总的杂质补偿度 N_a/N_d , 这就使得进一步降低总杂质浓度的余地大大增加, 从而可以进一步提高材料的迁移率.

我们知道, 材料的施主杂质、受主杂质浓度与迁移率之间存在一定的关系, 如果忽略低温时晶格散射对迁移率的影响, 则根据 Brooks-Herring 公式 [7], 将这一关系表示为下式:

$$\mu = \frac{3.28 \times 10^{15} (m_0/m^*)^{1/2} \epsilon_0 T^{3/2}}{(2N_a + n) \{ \ln(b + 1) - b/(b + 1) \}} \quad (1)$$

其中: $b = 1.29 \times 10^{14} (m^*/m_0) \epsilon_0 T^2 / n^*$, $n^* = n + (n + N_a)(N_d - N_a - n) / N_d$, ϵ_0 是介电常数.

上式中假设 $n = N_d - N_a$ 可以成立, 那么由 (1) 式, 并结合 Hall 测量结果 N_h, μ 就可以估算出外延材料的施主浓度 N_d 和受主浓度 N_a 的大小从而得到杂质补偿度 N_a/N_d 值. 根据 N. Benzaquen [8] 等的理论计算结果, 我们绘制了 GaAs 的 77K 温度下 Hall 载流子浓度 n (对数坐标) 与迁移率 μ (线性坐标) 的理论关系曲线. 如图 2 所示: 每一条实线相应于不同的 N_a/N_d 补偿度值, 所标的点为本实验的实测值.

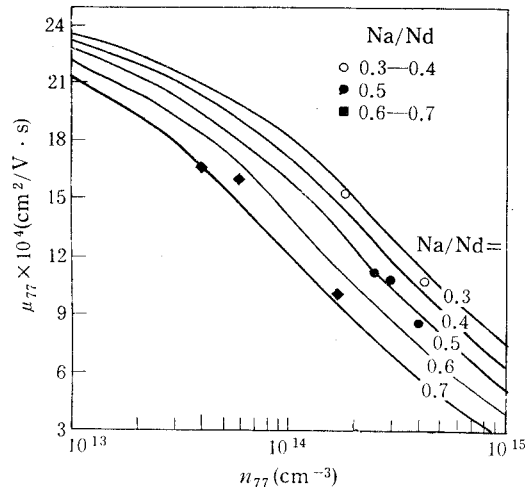


图 2 $\mu_{77}(77K)$ 随 n_{77} 的变化关系 (实线为理论值)

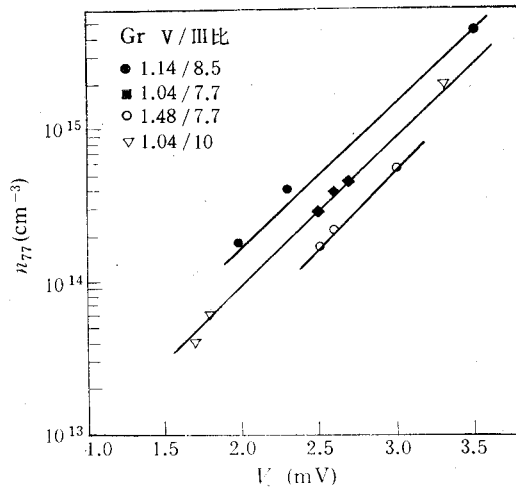


图 1 n_{77} 随 V_{Si} 的变化曲线

图 2 反映出了在不同的补偿度下, 迁移率随载流子浓度的变化规律. 显然, 尽量降低杂质浓度可以获得较高的迁移率; 更为重要的是, 在相等的杂质浓度下, 保持较低的补偿度, 使降低杂质浓度的余地更大, 也可以获得更高的迁移率. 本实验已经获得了低温 77K 迁移率为 $1.62 \times 10^5 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 的目前国内最好结果. 但从图 2 所示的本实验最好结果点其补偿度值已位于较高的区域. 由于受到实验时间有限等客观条件的限制, 本实验目前只进行到已报道的阶段. 进一步提高迁移率还需认真系统地研究其它生长参数如: 生长温度 T_G 等, 以及各个重要生长参数之间的相互制约关系对杂质补偿特性和迁移率的影响.

4 结论

综上所述,我们用 MBE 技术成功地生长出了 77K 下迁移率为 $16.2 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 的高质量 GaAs 外延材料. 通过研究与分析 MBE 生长实验和 Hall 测量结果,认为在轻掺 Si 杂质浓度下 ($n < 10^{15} \text{cm}^{-3}$), 小范围提高 V/III 束流比对 Si 的自补偿效应和受主杂质的抑制作用不明显,但适当地增大生长速率可以抑制受主杂质浓度和 Si 的自补偿效应,这使得材料的总杂质补偿度 N_a/N_d 减小,从而能够进一步降低杂质浓度,提高外延 GaAs 的迁移率.

参 考 文 献

- [1] C. R. Stanley, M. C. Holland *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1991, **58**:478.
- [2] N. Chand, R. C. Miller *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1988, **52**:1712.
- [3] J. E. Cunningham, T. H. Chiu *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1988, **53**:1285.
- [4] Y. G. Chai, R. Chow *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1981, **39**:800.
- [5] J. C. M. Hwang, H. Temkin *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1983, **42**:66.
- [6] R. Nottenburg, H. J. Buhlmann *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1983, **44**:71.
- [7] G. E. Stillman, C. M. Wolfe, Thin Solid Films, 1976, **31**:69.
- [8] M. Benzaquen, K. Mazuruk *et al.*, J. Elec. Mater., 1987, **16**:111.

Impurity Compensation Effects on Lightly Si-Doped GaAs Grown by MBE

Niu Zhichuan, Zhou Zenqi, Lin Yaowang and Li Chaoyong

*(National Research Center for Optoelectronic Technology, Institute
of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Received 20 June 1994

Abstract An experimental study of compensation effects on lightly Si-doped high mobility GaAs grown by MBE has been carried out by Hall mobility and carrier concentration measurements. The mobility at 77K of GaAs has been reached as high as $16.2 \times 10^4 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. In the low doping range ($n < 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$), the N_a/N_d values decrease and electron mobilities increase with increase Gr at growth temperature of 590°C, this may be related to the reduced incorporation of compensating acceptors and Si autocompensation effects.

PACC: 6855, 8115G, 6170W