

分子束外延低温生长 GaAs 缓冲层及性能研究

梁基本 孔梅影 王占国 朱战萍

段维新 王春艳 张学渊 曾一平

中国科学院半导体研究所, 半导体材料科学实验室, 北京 100083

(1992年7月15日收到; 1992年10月15日收到修改稿)

用国产分子束外延设备(N型), 在低温(200—300℃)下生长了GaAs, AlGaAs 和 GaAs-AlGaAs 超晶格。本文着重提出对在低温生长 GaAs 缓冲层上生长优质 GaAs 有源层, 尤其对缺陷和杂质很敏感的高电子迁移率晶体管结构材料进行研究。

EEACC: 0510D, 2520D, 2560, 2350

近几年来低温生长 GaAs(LT-GaAs)作为缓冲层引起了人们广泛的兴趣^[1-3], 主要是由于它具有高电阻率、高击穿电场和无光敏效应等优异的特性, 且在这种材料上可生长高质量的 GaAs 有源层。目前在 LEC SI-GaAs 衬底上制作的 GaAs MESFET 及其数字电路和模拟电路, 存在背栅效应、旁栅效应及光敏效应等有害影响, 因此人们在衬底和有源层之间加上缓冲层进行研究, 采用未掺杂 GaAs 层, AlGaAs 层或 GaAs-AlGaAs 超晶格等作缓冲层, 以消除上述有害影响, 但结果都不理想。1988 年 F. W. Smith^[4]等采用分子束外延低温(200—300℃)生长 GaAs 作缓冲层(LTBL), 然后在正常生长温度下生长 MESFET 结构材料, 消除了背栅效应, 旁栅效应及光敏效应, 并改善了输出电压和击穿电压。Delaney 采用 LTBL 研制出 GaAs SCFL 分频器, 最大时钟频率达 22GHz。然而 Lin^[5]和 Brown^[6]等在 LTBL 上生长的 HEMT 和 PHEMT 结构材料, 发现了一些有害影响, 主要是由于从 LT-GaAs 中的缺陷扩散到对缺陷敏感的二维电子气区而引起的。Melloch^[7]等在 LTBL 上生长出高迁移率二维电子气, 但所设计的缓冲层结构是在 LT-GaAs 上加上 1 微米厚未掺杂 GaAs 作过渡层, 显然这样厚的过渡层和在半绝缘的 GaAs 上生长 1 微米厚的未掺杂 GaAs 作缓冲层一样, 对研制出的器件或电路也会产生旁栅效应。此外 LT-GaAs 和 LT-AlGaAs 还可作为隔离层应用在光电子集成电路。本文研究分子束外延低温生长 GaAs, AlGaAs 和 GaAs-AlGaAs 超晶格及其特性, 着重介绍在 LTBL 上生长出优质 HEMT 材料。

我们用国产分子束外延设备(N型)在低温下生长 GaAs, AlGaAs 和 GaAs-AlGaAs 超晶格。Ga, Al, As 为国产高纯源材料, Si 为高纯单晶材料, 衬底为半绝缘 GaAs 片, 经有机溶剂去油后, 在 48℃下的 $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 5 : 1 : 1$ 溶液腐蚀 2 分钟, 去离子水冲洗, 干氮吹干, 然后将衬底用 In 粘在 Mo 托上, 装进 MBE 系统, 在传递室 300℃除气半小

时再送进生长室。首先将衬底在 600℃下去除氧化层,然后在正常生长温度下(580℃)进行生长,生长速率为 1μm/h。整个生长过程用反射高能电子衍射仪(RHEED)进行监控。这时可观察到衍射图象再构线出现,表明材料表面平整。然后将衬底温度降至 250℃再进行生长,这时 As/Ga 比不变,仍在 As 稳条件下,观察衍射图象,则再构线消失,但衍射图象仍为条状保持 1×1 表面结构,表明外延层为单晶结构。这可从生长后的样品用双晶 X 射线衍射测量进一步确定为单晶结构。低温生长 GaAs 层后将衬底温度升高至 600℃进行退火,再进行 GaAs 生长,则再构线再次出现,即表面结构从 1×1 转变成 2×4,并可进行 RHEED 强度振荡测量,表明材料晶体结构完善,且表面平整。为了进一步研究低生长的温度范围对材料的影响,我们将衬底温度降至 150℃以下进行生长,则 GaAs 外延层可能变为多晶,这可从衍射图象来判断。而将衬底温度升至 400℃以上,则 GaAs 外延层的电阻率大大降低。因此本文所讨论的样品,衬底温度范围为 200—300℃之间。

对低温生长的 GaAs, AlGaAs 和 GaAlAs-GaAs 超晶格(100 Å GaAs/100AlGaAs 五周期)其电阻率测量的结果分别为 $10^6 \Omega\text{cm}$, $10^8 \Omega\text{cm}$ 和 $10^{12} \Omega/\square$ (薄层电阻率)。光致发光测量结果表明这三种低温生长的材料对光照都不敏感。这些结果和文献报道基本上一致。为了进一步探索 LT-GaAs 作为缓冲层在器件和电路中的应用,关键问题是在这种缓冲层上生长出优质 GaAs 有源层。由于 LT-GaAs 是在富 As 和低温下生长的,GaAs 组分偏离了化学计量比,As 量剩余量达 1%—2%,形成 As⁺ 反位,导致深施主浓度 $N_{DD} > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的缺陷。在 600℃以上退火过程中,多余的 As 形成大颗粒的 As 沉淀物,其直径大约为 20—100 Å,浓度为 10^{17} cm^{-3} ,而且几乎均匀分布在 GaAs 外延层中,这是 LT-GaAs 具有高电阻率和无光敏效应的主要成因。但若直接在 LT-GaAs 上生长有源层则正如文献 [4]、[5]指出那样,这些缺陷在生长过程中扩散到有源层而影响其质量。所以若以 LT-GaAs 作缓冲层,则还应加上一过渡层,用来阻挡缺陷从 LT-GaAs 扩散进有源层。显然过渡层不能太厚,以免又引进旁栅等效应,因此过渡层的生长及特性研究对器件和电路的应用是重要的。我们选择 HEMT 结构材料进行研究,因为二维电子气区对缺陷和杂质很敏感,其结构如下:在缓冲层上生长 50 Å 不掺杂 AlGaAs 隔离层,500 Å 掺 Si n 型 AlGaAs 和 150 Å n⁺ GaAs 顶层。设计缓冲层的原则是能消除 HEMT 器件的背栅效应和光敏效应又能保持沟道区的高质量。我们提出缓冲层由 LT-GaAs 层(或低温生长 GaAs-AlGaAs 超晶格),GaAs-AlGaAs 超晶格和 GaAs 层构成。LT-GaAs 层起到消除背栅效应的作用,这在我们的实验和文献报道是一致的;GaAs-AlGaAs 超晶格能隔离 LT-GaAs 层中的缺陷扩散到有源层,我们是这样解释的,多余的 As 在 GaAs 和 AlGaAs 中的位能是不同的,在 GaAs 的位能低于在 AlGaAs 的位能,因此 GaAs-AlGaAs 超晶格对多余的 As 来说如多层次势阱和势垒,从而阻挡缺陷向有源层扩散(详细情况将另文报道)。GaAs 为在合适温度下生长高质量沟道区。图 1 为具有低温缓冲层的 HEMT 结构简图的 HEMT 结构简图。我们连续生长十个样片,并进行

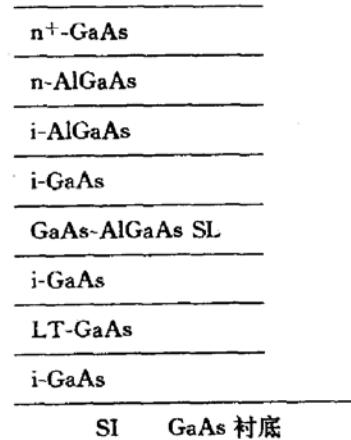


图 1 具有低温缓冲层的 HEMT 结构简图

低温(77K)Hall 测量和光致发光测量. 测量结果为 Hall 迁移率 $\mu_{\text{H}}: 9-10 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 薄层电子浓度 $n_e: 6-8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 光致发光谱半峰宽很窄, 约为 9meV. 这结果和用正常缓冲层即 1 微米厚的 GaAs 作缓冲层的 HEMT 结构材料性能基本上一致, 但消除了背栅和光敏等不良效应(将另文报道), 这表明材料具有优良的电学特性, 光学特性和平整的界面. 这种低温生长 GaAs 层不但可作为一些器件的缓冲层而且可作为隔离层应用于电子器件, 光电子器件和光学互连的三维集成.

结语: 本文介绍用国产 MBE IV 型设备, 低温生长(200—300℃)GaAs, AlGaAs 和 GaAs-AlGaAs 超晶格, 获得高电阻率和无光敏效应的材料, 提出用 LT-GaAs, GaAs-AlGaAs 和 GaAs 构成的低温缓冲层上生长出优质 HEMT 结构材料.

本工作是在林兰英教授指导下进行的, 万寿科作光致发光测量, 王万年作 Hall 测量, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- [1] Workshop on Low Temperature GaAs Buffer Layers, San Francisco, USA, 1990.
- [2] 6th Conf on Molecular Beam Epitaxy, San Diego, USA, 1990.
- [3] 6th Conf on Semi-insulating II-V Materials, Toronto, Canada, 1990.
- [4] F. W. Smith et al., *IEEE Electron Device letters*, 9(2), 77(1988).
- [5] B. J. Lin et al., *IEEE Electron Device*, 37(1), 46(1990).
- [6] A. S. Brown et al., *IEEE Electron Device Letters*, 10(12), 565(1989).
- [7] M. R. Melloch et al., *Appl. Phys. Lett.*, 54(10), 943(1989).

MBE Growth of GaAs Buffer at Low Temperature

Liang Jiben, Kong Meiyin, Wang Zhanguo, Zhu Zhanping,
Duan Weixin, Wang Chunyan, Zhang Xueyuan and Zeng Yiping

Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Semiconductor Material Science Laboratory, Beijing 100083

(Received 15 July 1992; revised manuscript received 15 October 1992)

Abstract

Low temperature growth of GaAs as a buffer layer with resistivity of $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ and optically inactive was grown in a home-made MBE system under arsenic-stable growth conditions at substrate temperatures ranging from 200℃ to 300℃ and at growth rate of $1\mu \text{m/h}$.

The reflected high energy electron diffraction pattern was monitored during growth. Although LT-GaAs layer significantly reduce the sidegating, it can adversely affect the material quality due to the diffusion of defects from LT-GaAs into the active layer.

A medium layer is inserted between the active layer and LT-GaAs layer. GaAs-AlGaAs superlattice is suggested to prevent the defect diffusion. A relatively small photoluminescence linewidth of 9 meV and high Hall mobility of $10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ at 77K indicate the high quality material similar to that of sample without the LTBL.