

MBE 生长高电阻率 GaAs 基 InAlAs 组分渐变缓冲层

高宏玲[†] 王宝强 朱战平 李成基 段瑞飞 曾一平

(中国科学院半导体研究所材料中心, 北京 100083)

摘要: 研究了用分子束外延(MBE)方法,在 SI-GaAs 衬底上不同低温生长的台阶式组分渐变 InAlAs 缓冲层结构. 用原子力显微镜(AFM)观测表面形貌,生长温度为 340℃时,外延层表面粗糙度为 1.79nm.用 Van der Pauw 方法研究了材料的电学特性,室温电阻率 $\rho = 2.6 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$. (电学性能测试表明 200V 电压间距 1mm 时,漏电流仅为 0.3 μA). 高分辨 X 射线测试样品显示为良好的层状结构,晶体质量随生长逐渐变好. 首次用变温 Hall 测试研究多层 InAlAs 缓冲层材料内部的载流子传输机制,并用热激电流谱(TSC)分析了其高阻机制.

关键词: MBE; 低温缓冲层; MM-HEMT; Hall 测试

PACC: 6855; 7280E; 7220

中图分类号: O782

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0200-04

1 引言

GaAs 基 InAlAs/InGaAs MM-HEMT (metamorphic HEMT)在高频、噪声、功率性能方面具有与 InP 基 HEMT 相同的优异性能^[1],又克服了 InP 衬底机械性能较差,价格昂贵,尺寸偏小,不利于集成等缺点,得到了广泛的应用. GaAs 基 MM-HEMT 由于衬底和有源区之间存在着 3.8%的晶格失配,缓冲层的引入尤为重要. 作为缓冲层主要有两个作用:一方面,补偿了衬底和有源区之间的晶格失配;另一方面可以过滤位错. 就此人们提出多种缓冲层结构,例如 InGaAs, InAlAs, InGaP, InAlGaAs, AlGaAsSb^[2,3]等. 其中 InAlAs 缓冲层由于具有较大的带隙,绝缘性能相对较高等优点得到了广泛的应用. 在生长过程中,由于 In-As 和 Al-As 的键能长度不同,在低温生长过程中很容易形成 As 的微观团簇,而当温度高于 400℃时又易形成三维生长,使多层结构的晶体质量较差. 所以生长温度是影响 InAlAs 缓冲层质量的主要因素^[4]. GaAs 基 MM-HEMT 材料衬底漏电的问题一直困扰其应用,这其中主要是缓冲层漏电,因而用实验的方法得到高阻的缓冲层对于实际应用非常有意义.

本文研究了不同低温条件下,生长的台阶式渐变 In 组分的多层 InAlAs 缓冲层,用 Van der Pauw 法测量样品的电性能,利用高分辨 X 射线衍射,原子力显微镜表征了材料的晶体质量. 首次用标准变

温 Hall 测试分析了 InAlAs 缓冲层内部的载流子传播机制,及用热激电流谱(TCS)分析其高阻机制.

2 实验

采用固源 EPI-II 型 MBE 系统,在半绝缘 GaAs (001)衬底上生长如图 1 所示的台阶式渐变 In 组分的 InAlAs 缓冲层结构,生长速率为 1.1mm/h. 从下到上各层 In 组分依次改变 10%,最上层 In 组分为与 InP 匹配 $x \sim 0.52$ 的 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 层. 在生长之前要在 580℃去除 GaAs 衬底的氧化层,并在上面生长约 150nm 的 GaAs 缓冲层,以获得平整表面,然后开始生长 InAlAs 缓冲层,整个生长过程由反射高能电子衍射(RHEED)监控. 样品 a、b、c 生长的温度分别为 380℃、340℃、290℃. 生长结束立即升温至 500℃,进行炉内退火 5min. 所得外延层的结晶学性质用高分辨 X 射线双晶衍射来表征,所用仪器为日本理学(Rigaku)SLX-1AL 型双晶 X 射线衍射

100nm $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$
100nm $\text{In}_{0.40}\text{Al}_{0.60}\text{As}$
100nm $\text{In}_{0.30}\text{Al}_{0.70}\text{As}$
100nm $\text{In}_{0.20}\text{Al}_{0.80}\text{As}$
100nm $\text{In}_{0.10}\text{Al}_{0.90}\text{As}$
SI GaAs substrate

图 1 InAlAs 缓冲层结构图

Fig. 1 Schematic of step-graded InAlAs buffer

[†] 通信作者. Email: hlgao@red.semi.ac.cn

2006-11-15 收到,2006-12-15 定稿

仪,用 Nano-III 型原子力显微镜观测了表面形貌,用 Van der Pauw 法测量了外延层的电学性质.

3 结果与讨论

表 1 给出了用 Van der Pauw 法测量样品的实验结果,从中可以看出在 340°C 下生长的 b 样品其电阻率达到了 $2.6 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$,高于其他样品,从制作器件的角度来讲,较高的缓冲层电阻可以避免由于缓冲层漏电所引起的旁路效应^[5],这在实际应用时非常重要.其背景电子浓度为 $5.319 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$,相对于其他温度的样品低了两个数量级,迁移率较高.通过实验寻求适当的生长温度,降低了背景电子浓度、提高了迁移率.在研究 LT-GaAs 缓冲层时,多用低温生长高温退火的方法实现外延层的高阻.在以前的研究中多用炉外快速热退火(RTA)的方法达到此目,但是在实际材料生长过程中,从保证材料质量角度来讲,炉内退火更可行.我们利用炉内退火的方法,使所生长的缓冲层实现了高阻.为了进一步验证所生长的缓冲层的表面漏电情况,对 340°C 下生长的 b 样品作了表面击穿实验.表面探针间距 1mm 条件下,随着所加电压的升高,伏安特性(I-V)曲线呈线性.在加 200V 电压时,漏电流仅有 0.3 μA ,远远小于实际 MM-HEMT 材料应用时所要求的 10 μA ,表明是优质的高阻 InAlAs 缓冲层结构.

表 1 样品 a, b, c 的 Hall 测试结果及 AFM 表面粗糙程度 (RMS)

Table 1 Hall measurement and mean roughness of samples a, b, c

样品	生长温度 /°C	电阻率 /($\Omega \cdot \text{cm}$)	霍尔因子	载流子浓度 / cm^{-3}	迁移率 /($\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$)	RMS /nm
a	380	2.2×10^4	0.9972	2.083×10^{11}	1215	2.71
b	340	2.6×10^4	0.9946	5.319×10^{10}	4522	1.79
c	290	2.4×10^3	0.9867	1.053×10^{12}	2475	6.22

图 2 给出了样品 b 的原子力显微镜 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 图,分析其表面粗糙度为 1.79nm.从图像可以看出 b 样品表面较平整且出现了典型的表面张力弛豫引起的 cross-hatch 结构^[6].为了进一步研究 b 样品中各层的具体情况,也给出其高分辨 X 射线三轴 (004) ω - 2θ 衍射曲线图,从中可以看出多层 InAlAs 缓冲层的每一层都有明显的衍射峰,衍射峰的宽度逐渐变窄,晶体质量随生长逐渐变好,最上层的衍射峰较强,而且衍射峰的半峰宽度相对较窄,这说明在多层缓冲层的表面晶体质量较好,由于异质外延所引起的晶格失配的应力得到了释放,表现为 AFM 图表面粗糙度很低.

同时,我们也首次用变温 Hall 测试研究了多层

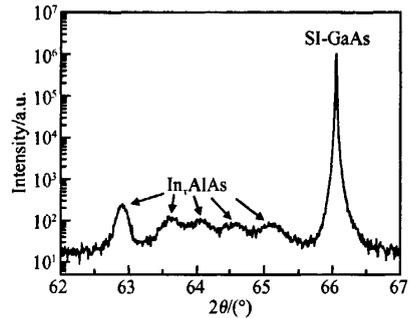
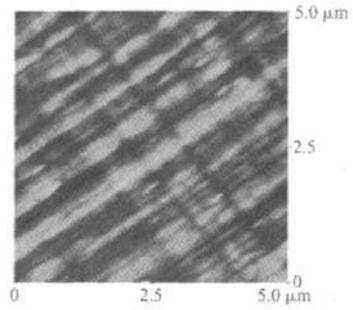


图 2 样品 b 的 AFM 形貌图及高分辨 X 射线三轴 (004) ω - 2θ 衍射曲线

Fig.2 AFM surface morphology and high-resolution trip-axis ω - 2θ scans of sample b

InAlAs 缓冲层(典型样品 b)的载流子传输机制.图 3 给出样品 b 的迁移率随温度变化的曲线,可以看出迁移率先是随着温度的升高而升高,达到某一最大值后再随温度的升高而下降.对于一般的非掺杂半导体材料,在所测试的温度范围内,起主导作用的散射机制是晶格振动引起的散射,此时迁移率随温度的升高而降低.对于我们所制备的 InAlAs 缓冲层结构在室温附近以下,出现了随温度迁移率升高的反常现象,认为是由于在此温度区域内,电离杂质

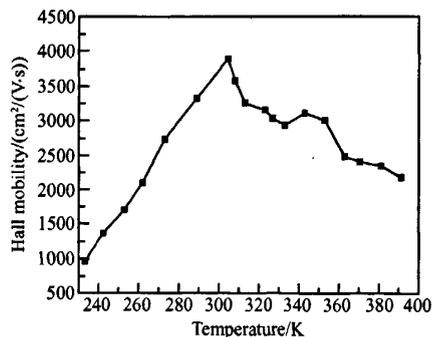


图 3 样品 b 迁移率随温度变化的曲线

Fig.3 Electron mobility as a function of temperature for sample b

散射起主导作用. 因为当电离杂质散射为主时, 迁移率将随温度升高而升高, 其原因在于电子的速度随温度而加大, 不再受到电离杂质产生的库仑场的作用^[7]. 在我们所生长的样品中充当电离杂质散射中心的是在低温生长过程中形成的 As 的反位缺陷. 在室温以上, 则以晶格振动散射为主, 因此随着温度的升高, InAlAs 外延层的迁移率下降.

在研究 LT-GaAs 高阻机制时, 主要提出了深能级模型和 As 微观析出两种模型来解释^[8], 对于同是 III-V 族低温生长的 InAlAs 缓冲层, 由于其多层结构的复杂性, 还没有一种确定机制来解释其高阻性能, 本文用热激电流谱探讨其高阻机制.

图 4 给出了各样品热激电流谱测试结果, 图中也给出了作为参考的 SI-GaAs 衬底的热激电流曲线. 由于外延层与衬底相比较薄, 在测试过程中不可避免地会反映衬底的深能级状态, 所以在考虑外延层能级的同时必须排除衬底能级的影响. 从图中可以看出, 除去与衬底相同的峰位, 样品 a、b、c 外延层均出现了 T_1 峰, 所对应的能级深度经计算为 1.96eV. 样品 c 还出现了 T_2 、 T_3 峰. 其原因在于 c 样品中低温富 As 条件下, 形成大量的 As_{In} 或者 As_{Al} 反位缺陷^[8], 在带间形成多个能级. 但是从 Hall 测量的角度看, c 样品并没有表现出更高的电阻率, 可见利用深能级模型并不能解释 InAlAs 缓冲层高阻机制. 分析其原因认为是由于多层 InAlAs 缓冲层结构, 不同于人们以前所研究的单层 LT-GaAs 同质外延缓冲层, 每一层由于 In 组分的变化在各层之间都存在着晶格失配. 在生长过程中不可避免地会形成大量的失配位错, 位错聚集并一直向上层延伸, 就充当了导电的通道, 所以正如 c 样品所示, 多层 InAlAs 缓冲层低温生长时电阻率不会像 LT-GaAs 缓冲层那样升高^[8], 晶体质量反而由于低温而变差. 同时表面粗糙也不利于制作 MM-HEMT 材料. 而 b 样品在 340°C 的低温和过量 As 的条件下

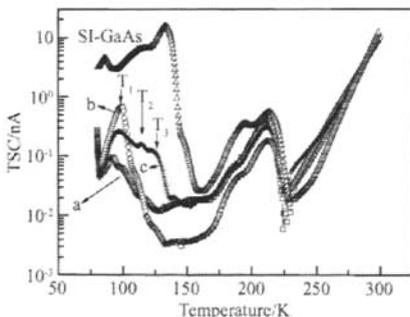


图 4 样品 a、b、c 的热激电流谱

Fig. 4 Thermally stimulated current (TSC) spectra of samples

生长时, 过量的 As 在退火过程中会形成大量富 As 的析出物, 这些析出物充当一个嵌入式的 Schottky 势垒, 形状如同一个球形耗尽区一样, 从而引起样品 b 中的载流子浓度降低和电阻升高. 所以 As 的析出以及适量的位错综合作用是实现高阻的主要机制.

在此基础上, 我们应用 340°C 生长的缓冲层制备了 MM-HEMT 材料, 其室温迁移率为 $9660\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 对应电子面密度为 $1.66 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$, 77K 下的迁移率为 $45500\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 对应电子面密度为 $1.57 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$.

4 结论

本文研究了用分子束外延法在 SI-GaAs 衬底上不同低温生长的台阶式组分渐变 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 缓冲层结构. 用原子力显微镜观测表面形貌, 生长温度为 340°C 时, 外延层表面粗糙度为 1.79nm. 用 Van der Pauw 方法研究了材料的电学特性, 室温电阻率 $\rho = 2.6 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$. 电学性能测试, 200V 电压间距 1mm 时, 漏电流仅为 0.3 μA . 高分辨 XRD 测试为良好的层状结构, 晶体质量随生长逐渐变好. 首次用变温度 Hall 测试研究了材料内部的载流子传输机制, 得出材料在室温附近达到了迁移率的最大值, 在此温度以下, 以电离施主和受主中心散射为主; 在此温度以上, 以晶格振动散射为主. 热激电流谱分析 InAlAs 缓冲层材料的高阻机制表明: 深能级并不是形成高阻的主要机制, 而位错和 As 微观析出的综合作用才是影响其高阻的决定因素.

参考文献

- [1] Shinohara K, Yamashita Y, Hikosaka K, et al. Ultra-short T-shaped gate fabrication technique for InP based HEMTs with high f and their MMIC applications. 23rd GaAs IC Symposium Digest, 2001; 252
- [2] Mazzer M, Romanato F, Drigo A, et al. Mechanisms of strain relaxation in III-V semiconductors heterostructures. J Cryst Growth, 1993, 126(1); 125
- [3] Yuan K, Radhakrishnan K. Growth and characterization of compositionally graded InGaP layers on GaAs substrate by solid-source molecular beam epitaxy. J Cryst Growth, 2002, 243; 288
- [4] Yousif M Y A, Nur O, Willander M, et al. Direct assessment of relaxation and defect propagation in different as-grown and in situ post-growth annealed step-graded SiGe/Si buffer layers. Solid State Electron, 2001, 45; 1869
- [5] Metzger R A, Brown A S, Stanchina W E, et al. Growth and characterization of low temperature AlInAs. J Cryst Growth, 1991, 111; 445
- [6] Chauveau J M, Cordier Y, Kim H J, et al. Interplay between relaxation, surface morphology and composition modulation in InAlAs graded buffer layers. J Cryst Growth, 2003, 251; 112

- [7] Sapoval B. Physics of semiconductors. New York, Springer & Verlag, 1995
- [8] Gupta S, Whitaker J F, Mourou G A, et al. Ultrafast carrier dynamics in III-V semiconductors grown by molecular beam epitaxy at very low temperatures. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28: 2464

High Resistivity Step-Graded InAlAs/GaAs Metamorphic Buffer Layers Grown by Molecular Beam Epitaxy in Low Temperature

Gao Hongling[†], Wang Baoqiang, Zhu Zhanping, Li Chengji, Duan Ruifei, and Zeng Yiping

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: High resistivity step-graded InAlAs/GaAs metamorphic buffer has been achieved on (001) Si-GaAs substrate by MBE in low temperature. The resistivity is $\rho = 2.6 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ in room temperature, when the growth temperature is 340°C. Surface morphology is observed by atomic force microscopy with RMS of 1.79nm. Furthermore, the ω -2 θ scan using triple-axis X-ray diffraction shows that the sample has better crystalline quality. The electron transport properties of the buffer layers were investigated through variable temperature Hall measurements for the first time. The high resistivity mechanism was investigated by thermally stimulated current (TSC). The carrier concentrations and Hall mobilities of the InAlAs/InGaAs/GaAs MM-HEMT structure on low temperature step graded InAlAs metamorphic buffer layers grown in optimized conditions are high quality.

Key words: MBE; low temperature buffer layers; MM-HEMT; variable temperature Hall measurements

PACC: 6855; 7280E; 7220

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0200-04

[†] Corresponding author. Email: hlgao@red.semi.ac.cn

Received 15 November 2006, revised manuscript received 15 December 2006