

文章编号: 2095-4980(2013)04-0536-05

## 高电子迁移率晶体管材料结构的制备及分析

王雪敏<sup>a,b</sup>, 阎大伟<sup>a,b</sup>, 沈昌乐<sup>a,b</sup>, 赵妍<sup>a,b</sup>, 黎维华<sup>a,b</sup>, 周民杰<sup>a,b</sup>, 罗跃川<sup>a,b</sup>,  
彭丽萍<sup>a,b</sup>, 吴卫东<sup>a,b</sup>, 唐永建<sup>a,b</sup>

(中国工程物理研究院 a.激光聚变研究中心; b.太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 针对高电子迁移率晶体管(HEMT)器件, 分析了双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT的结构组成, 基于固源分子束外延方法制备了双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT的缓冲层、沟道层、平面掺杂层和隔离层等多层材料结构。采用X-ray射线衍射、透射电镜研究了多层材料的结构。范德堡霍尔测试结果表明, HEMT的2DEG测试浓度为 $1.82 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , 电子迁移率大于 $6520 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

**关键词:** 高电子迁移率晶体管; 多层结构; 双 $\delta$ 掺杂

中图分类号: TN304.07

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0536

## Preparation and analysis of HEMT materials structure

WANG Xue-min<sup>a,b</sup>, YAN Da-wei<sup>a,b</sup>, SHEN Chang-le<sup>a,b</sup>, ZHAO Yan<sup>a,b</sup>, LI Wei-hua<sup>a,b</sup>, ZHOU Min-jie<sup>a,b</sup>,  
LUO Yue-chuan<sup>a,b</sup>, PENG Li-ping<sup>a,b</sup>, WU Wei-dong<sup>a,b</sup>, TANG Yong-jian<sup>a,b</sup>

(a. Research Center of Laser Fusion; b. Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** The study of High Electron Mobility Transistor(HEMT) devices is very important in many fields and is also of great significance for promoting the application of terahertz. In this paper, the structure of a double  $\delta$ -doped GaAs HEMT has been analyzed. Multi-layer structure of a double  $\delta$ -doped GaAs HEMT, which contains the buffer layer, the channel layer, the planar doped layer, the isolation layer and so on, is prepared by molecular beam epitaxy. The multi-layer structure has been studied using X-ray diffraction and transmission electron microscopy. Results of the Hall measurement indicate that the sheet density and mobility of 2DEG are  $1.82 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  and above  $6520 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively.

**Key words:** High Electron Mobility Transistor; multi-layer; double  $\delta$ -doped

太赫兹波是指频率为0.1 THz~10 THz(1 THz= $10^{12}$  Hz), 波长为3 mm~30  $\mu\text{m}$ 范围内的电磁波, 位于毫米波与红外光之间的电磁辐射区域。它在电磁频谱中的特殊位置及其独有的穿透性、安全性、宽带性、瞬态性、相干性等特点使其在成像、医学诊断、环境科学、信息、军事安全及基础物理研究领域有着广阔的应用前景和应用价值<sup>[1]</sup>。随着太赫兹技术在各领域, 特别是在医学成像、空间探测等领域中应用的深入开展, 对于相关器件性能的要求也越来越高<sup>[2-3]</sup>, 比如高电子迁移率晶体管(HEMT)器件的温度特性、噪声特性等。

早在1960年, Anderson等人就预言了异质结界面存在电子积累<sup>[4]</sup>。1969年, Easki和Tsu等人提出了在禁带宽度不同的异质结结构中, 离化的施主和自由电子是分离的, 即电子离开施主母体, 由宽带隙材料一侧进入窄带隙材料一侧。这种分离减少了母体对电子的库仑作用, 提高了电子迁移率。1978年, Dingle等人在调制掺杂的异质材料中观察到了载流子迁移率增高的现象。随后, 在调制掺杂GaAs/n-AlGaAs单异质结结构的实验中, 证明了异质界面存在着具有二维行为的电子气(2DEG), 而且有高的迁移率。1980年, 日本富士通公司研发出了一种新调制掺杂GaAs-AlGaAs异质结构场效应管, 即高电子迁移率晶体管(HEMT)<sup>[5]</sup>。目前, 国际上对于HEMT的研制已经到了很高的水平<sup>[6]</sup>。国内对HEMT的研究相对较晚, 但是发展速度很快。1998年, 中电集团十三所研制了国内第1个以PHEMT为有源器件的宽带低噪声MMIC(Microwave Monolithic Integrated Circuits), 在8 GHz~12 GHz频带内, 增益为17.4 dB~19.5 dB, 噪声系数为1.84 dB~2.20 dB。南京电子器件研究所的邱凯、谢自立等人研制的PHEMT器件, 采用 $0.5 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的 $\pi$ 型结构, 获得很好的直流特性和微波特性: 在12 GHz下, 噪声系数 $NF \leq 1.0 \text{ dB}$ ,

$G_a \geq 10$  dB, 室温至77 K时器件特性没有出现明显的源漏电流坍塌现象。中科院半导体所的曹昕等人采用固源分子束外延方法制备的PHEMT微结构材料, 对隔离层厚度、掺杂浓度及沟道结构进行了优化, 并分别对硅 $\delta$ 掺杂后扩散、分凝问题, InGaAs沟道中In的分凝问题和异质结界面平整化问题进行了研究, 最终2DEG浓度随材料结构的不同分布在 $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \sim 4.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 之间, 室温下载流子迁移率在 $5\,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \sim 6\,500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间<sup>[7]</sup>。李拂晓等人利用POSES软件数值求解了材料结构和器件性能之间的关系, 并根据分析结果优化了器件的结构设计, 得到 $0.25 \mu\text{m}$  GaAs PHEMT器件的性能参数为: 跨导 $g_m=440 \text{ mS/mm}$ 、截止频率 $f_T=50 \text{ GHz}$ 、最大振荡频率 $f_{\text{max}} > 80 \text{ GHz}$ 。

到目前为止, 国内也能够得到较高迁移率及二维电子气密度的外延片, 但总体材料质量比国外要落后, 即在材料的大面积杂质均匀性、重复性、完整性及表面质量等方面还需进一步研究。更重要的是, 要将HEMT的性能扩展到太赫兹波频段( $>0.34 \text{ THz}$ ), 目前还遇到很多问题, 也是迫切需要解决的问题。本文采用固源分子束外延方法制备了HEMT多层材料结构, 采用X-ray射线衍射、透射电镜和霍尔测试等方法研究了相应的性能, 为HEMT的器件化奠定了基础。

## 1 HEMT的结构组成

典型的双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT原理结构如图1所示。由图1中可以看出, 双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT由缓冲层、沟道层、平面掺杂层和隔离层、势垒层、刻蚀阻挡层和刻蚀缓冲层、帽层等组成。1) 缓冲层: 为减少衬底对器件性能的影响, 需要先生长一层缓冲层。外延生长的缓冲层结晶质量比衬底有很大的提高, 可有效降低衬底表面缺陷对后续生长的影响, 也可以降低由于晶格失配产生的缺陷, 提高外延材料的质量。即先在衬底上生长一层约 $500 \text{ nm}$ 的GaAs, 然后生长15个周期的GaAs/AlGaAs超晶格层, 最后生长一层约 $20 \text{ nm}$ 的AlGaAs。2) 沟道层: 它是二维电子气的运输层, 要求具有高的电子迁移率, 使器件可工作于高频率, 并且与隔离层有较大的导带不连续性, 可有效限制电子。InGaAs可以很好满足沟道层的要求, 且性能随着In组分的提高而大幅提高, 但是, 由于晶格失配的影响, In组分和厚度有最佳值: In组分约为0.22, 厚度约为 $12 \text{ nm}$ 。3) 平面掺杂层和隔离层: 平面掺杂层的作用是为沟道提供自由电子, 而隔离层则起到了将电子与施主隔离的作用。相应结构有多种, 本文采用双平面掺杂层和隔离层的结构, 即在沟道上下都进行了平面掺杂和隔离。一方面为了提高沟道内的二维电子气浓度, 使器件具有较高的电流控制能力; 另一方面可以提高材料生长的稳定性, 使掺杂浓度更加精确可控, 其厚度为 $4 \text{ nm}$ 。4) 势垒层: 势垒层与栅电极形成Schottky势垒, 用于控制沟道内电子的运输, 其厚度参数十分重要。对于HEMT器件, 一般工作在耗尽型模式。在设计势垒层时要综合考虑多种因素, 使Schottky势垒的边界与二维电子气浓度的边界相重叠。若AlGaAs势垒层不掺杂, 则满足此要求的势垒层厚度要达到数百纳米, 通过精确控制轻掺杂可将其厚度降低到十几到几十纳米之间。HEMT势垒层的厚度一般为 $20 \text{ nm}$ , 掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。5) 帽层: HEMT的源漏电极要与材料形成欧姆接触, 并尽可能减小与材料的接触电阻。在GaAs基HEMT材料的最上层需要制作一层重掺杂的GaAs。一般来说掺杂浓度越高, 形成的欧姆接触便越好, 受限于材料生长技术与GaAs本身的特性, 掺杂浓度一般不会超过 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。对于制作HEMT器件, 掺杂浓度达到 $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 量级即可满足工艺要求, 帽层的掺杂浓度为 $6.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。最后确定HEMT的材料结构如表1所示。

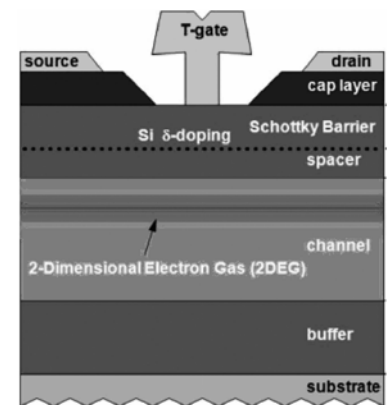


Fig.1 Structure of HEMT  
图1 HEMT的原理结构

表1 HEMT的材料结构参数

Table1 Structural parameters of HEMT

	materials	thickness/nm	doped density/cm <sup>-3</sup>
cap	GaAs	40	$6.0 \times 10^{18}$
etching bar	AlAs	1	$1.0 \times 10^{18}$
etching barrier	GaAs	5	—
Schottky barrier	$\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	20	$5.0 \times 10^{17}$
Si $\delta$ -doping	Si	—	$3.5 \times 10^{12}$
insulating layer	$\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	4	—
channel	$\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	12	—
plane	$\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	4	—
doping layer	Si	—	$1.0 \times 10^{12}$
buffer3	$\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	20	—
buffer2	$\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ superlattice	210	—
buffer1	GaAs	500	—
substrate	S.I GaAs	—	—

## 2 实验

双 $\delta$ 掺杂 GaAs HEMT 多层材料结构(表 1 所示)在固源分子束外延设备上生长完成。半绝缘 GaAs(100)单晶片(4 英寸)经过 400 °C 低温预处理后传进生长室, As 炉裂解区温度为 850 °C, 在 As 气氛保护下完成氧化膜脱附, 脱附温度 580 °C。经过优化之后, 采用 GaAs 的生长速率为 700 nm/h, V/III 束流比为 15, 在 570 °C 的生长条件下完成双 $\delta$ 掺杂 GaAs HEMT 多层材料结构的生长。生长后的样品分别进行了光学表面形貌、X-ray 衍射、透射电镜和电学性能测量。范德堡霍尔测试时, 将外延片解理成 1 cm×1 cm 的正方形样品, 然后, 在样品正面 4 个端角直接涂 In 做电极, 样品的电极均为等腰三角形, 长度不超过样品边长的 1/10。

## 3 结果及讨论

### 3.1 表面形貌

双 $\delta$ 掺杂 GaAs HEMT 多层材料结构表面的光学显微照片如图 2 所示。从图中可以看出, HEMT 材料结构制备完成以后, 表面非常光滑, 说明双 $\delta$ 掺杂 GaAs HEMT 材料表面质量比较好。



Fig.2 Multi-layer surface topography of HEMT  
图 2 HEMT 多层材料结构表面形貌

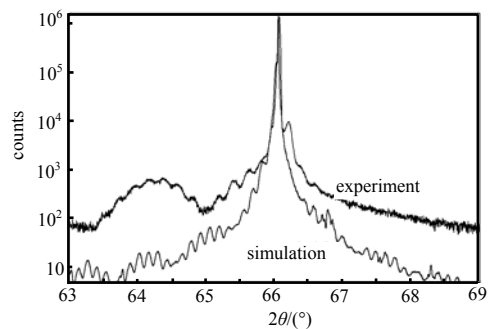
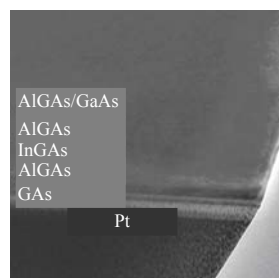


Fig.3 Multi-layer XRD of HEMT  
图 3 HEMT 多层材料结构的 XRD

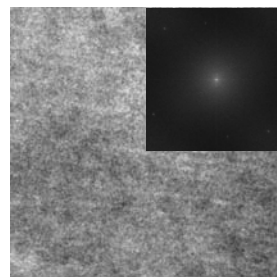
### 3.2 材料结构

图 3 所示是双 $\delta$ 掺杂 GaAs HEMT 多层材料结构的 X-ray 衍射图和模拟结果对比。从图中可以看出, 衍射峰的线宽较窄, 表明在生长方向的成分梯度很小, 界面质量良好<sup>[8]</sup>。

图 4(a)所示是双 $\delta$ 掺杂 GaAs HEMT 多层材料结构的透射电镜图, 图 4(b)是 15 个周期的  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$  超晶格缓冲层。从图中可以看出界面非常清晰、陡峭, 多周期的质量均匀, 这与 XRD 所得的结果一致。



(a) multi-layer



(b)  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$  superlattice buffer

Fig.4 TEM of HEMT  
图 4 HEMT 的透射电镜图

### 3.3 电学性能

双 $\delta$ 掺杂 GaAs HEMT 多层材料结构的范德堡霍尔测试结果如表 2 所示, 测试时温度为 300 K。双 $\delta$ 掺杂 GaAs HEMT 帽层厚度为 40 nm, 相对于 AlGaAs 势垒层较厚, 帽层中重掺杂形成的大量载流子可能越过势垒而影响对沟道内 2DEG 的浓度和迁移率的测量, 即帽层重掺杂对整体电性能的

表 2 HEMT 多层材料样品的霍尔测试结果

Table 2 Results of van der Pauw Hall test for HEMT

No.	square resistance/ $\Omega$	$\mu_n/(\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	$N_s/\text{cm}^{-2}$
1	527.1	6 550	$1.81\times 10^{12}$
2	523.8	6 520	$1.83\times 10^{12}$
3	522.2	6 540	$1.83\times 10^{12}$
average	524.4	6 537	$1.82\times 10^{12}$

影响不能忽略,但范德堡霍尔测试可以给出平均结果。自洽法能够较好地计算出异质界面载流子的运动,而对于双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT,其Al含量较低, $\Delta E_c$ 较小,界面处势阱中2DEG只有2个能级,可采用Daniel Delagebeaudeuf和Nuyen T.Linh的理论模型<sup>[9]</sup>。在势阱中的电场应满足泊松方程:

$$\frac{d\varepsilon(z)}{dz} \approx -\frac{q}{\xi_1} n(z) \quad (1)$$

式中: $n(z)$ 为自由电子密度; $\xi_1$ 为宽带材料的介电常数。假设GaAs中本底掺杂浓度很小,可以忽略,根据边界条件:

$$z=0, \quad \varepsilon(z)=\varepsilon_{i1} \quad (2)$$

式中 $\varepsilon_{i1}$ 为势阱中界面处的电场。在势阱内对式(2)积分,可以得到:

$$\xi_2 \varepsilon_{i1} \approx q n_s \quad (3)$$

式中: $\xi_2$ 为窄带材料的介电常数; $n_s$ 为沟道中总的自由电子密度。只考虑势阱中的2个最低子能带占有电子,总电子密度为:

$$n_s = \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2 q} \log[(1+e^{(q/kT)(E_F-E_0)})(1+e^{(q/kT)(E_F-E_1)})] = \sqrt{2q\xi_2 N_D V_{20} + q^2 N_D^2 d_i^2} - q N_D d_i \quad (4)$$

式中: $m^*$ 为电子有效质量; $N_D$ 为AlGaAs中的掺杂浓度; $d_i$ 为空间隔离层厚度。在三角势阱近似中有:

$$E_n = \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left( \frac{3}{2} \pi q \varepsilon_{i1} \right)^{2/3} \left( n + \frac{3}{4} \right)^{2/3} \quad (5)$$

根据式(4)和式(5),可以得到:

$$E_0 \approx \gamma_0 (n_s)^{2/3}, \quad E_1 \approx \gamma_1 (n_s)^{2/3} \quad (6)$$

式中 $\gamma_0$ 和 $\gamma_1$ 分别为 $2.5 \times 10^{12}$ 和 $3.2 \times 10^{12}$ <sup>[10]</sup>。联立式(4)和式(6),代入AlGaAs中的掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,空间隔离层厚度为4 nm, $\Delta E_c=0.24 \text{ eV}$ 时,得出:2DEG浓度约为 $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ,比表2中2DEG测试浓度 $1.82 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 相对较小。这可能是由于帽层掺杂浓度较高( $6.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ),影响了范德堡霍尔测试的精确性,表2中2DEG测试浓度是平均结果。另外,从表2还可以看出,整个沟道的电子迁移率大于 $6520 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,具有较高的电子迁移率。

## 4 结论

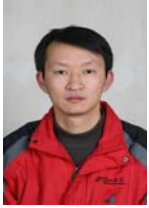
通过对双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT结构组成进行分析,获得了双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT的缓冲层、沟道层、平面掺杂层和隔离层等结构参数。采用固源分子束外延方法技术制备了双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT多层结构材料。X-ray射线衍射和透射电镜分析结果表明,双 $\delta$ 掺杂GaAs HEMT多层结构材料在生长方向的分成分度很小,界面质量良好。范德堡霍尔测试结果表明,HEMT的2DEG测试浓度为 $1.82 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ,电子迁移率大于 $6520 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这为HEMT的器件化奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] Masayoshi Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature photonics, 2007,1(1):97-105.
- [2] Lorene A Samoska. An Overview of Solid-State Integrated Circuit Amplifiers in the Submillimeter-Wave and THz Regime[J]. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):9-24.
- [3] Kruppa W,Boos J B,Bennett B R. InAs HEMT narrowband amplifier with ultra-low power dissipation[J]. Electronics Letters, 2006,42(12):688-690.
- [4] Anderson R. Electron micro-probe analysis and scanning electron microscopy[J]. IBM J Res. and Develop, 1960(3):283-286.
- [5] Mimura T,Hiyamizu S. Enhancement-mode high electron mobility transistors for logic applications[J]. Jap. J. Appl. Phys., 1980(19):22-26.
- [6] Griffith Z,Ha W,Chen P,et al. A 206-294 GHz 3 stage amplifier in 35 nm InP mHEMT using a thin-film microstrip environment[C]// 2010 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.. Anaheim,CA:[s.n.], 2010:57-60.
- [7] 曹昕,曾一平,孔梅影,等. MBE生长的高质量AlGaAs/InGaAs双 $\delta$ 掺杂PHEMT结构的材料[J]. 半导体学报, 2000,21(9):934-936. (CAO Xin,Zeng Yiping,Kong Meiyong,et al. High Quality AlGaAs/InGaAs Double  $\delta$  Doped Pseudomorphic HEMTs Grown by MBE[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2000,21(9):934-936.)

- [ 8 ] Liu F Q,Zhang Q S,Zhang Y Z,et al. Growth and characterization of InGaAs/InAlAs quantum cascades lasers[J]. Solid-State Electronics, 2001,45(10):1831-1835.
- [ 9 ] Dingle R. Electron mobility in modulation-doped semiconductor heteojunction supperlattices[J]. Appl. Phys. Lett., 1978, 31(6):665-669.
- [10] 虞丽生. 半导体异质结物理[M]. 北京:科学出版社, 2006. (YU Lisheng. Physics of semiconductor heterojunction[M]. Beijing: Science Press, 2006.)

#### 作者简介:



王雪敏(1975-), 男, 四川省泸州市人, 博士, 副研究员, 研究方向为新型多功能薄膜材料、光电器件等方面的应用和研究工作.email:wangxuemin75@sina.com.

(上接第 521 页)

- [ 5 ] 龚建伟,熊光明. Visual C ++ /Turbo C 串口通信编程实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. (GONG Jianwei,XIONG Guangming. Visual C++/Turbo C serial communication programming practice[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007.)
- [ 6 ] 上海三井真空设备有限公司. 溅射离子泵电源控制仪说明书[Z]. 2005. (Shanghai Sanjing Vacuum Equipment Co., Ltd. Ion pump controller instruction[Z]. 2005.)
- [ 7 ] 英国 Hitek power 公司. HiTek 电源控制器说明书[Z]. 2009. (The British Hitek power company. Hitek power controller instruction[Z]. 2009.)

#### 作者简介:



张德敏(1981-), 女, 重庆市人, 硕士, 主要研究方向为加速度控制技术.email:zhangdemin99@163.com.

王汉斌(1983-), 男, 山东省青州市人, 副研究员, 主要从事高亮度电子源技术研究.

单李军(1979-), 男, 河南省濮阳市人, 助理研究员, 从事高压技术研究.

肖德鑫(1982-), 男, 贵阳市人, 助理研究员, 从事高压技术研究.