

# 半绝缘 GaAs 衬底中 AB 微缺陷对 MESFET 器件性能的影响\*

徐岳生<sup>1</sup> 付生辉<sup>1</sup> 刘彩池<sup>1</sup> 王海云<sup>1</sup> 魏 欣<sup>1</sup> 郝景臣<sup>2</sup>

(1 河北工业大学, 天津 300130)

(2 中国电子科技集团公司第 13 所, 石家庄 050051)

**摘要:** 研究了 LEC 法生长 SF GaAs 衬底上的 AB 微缺陷对相应的 MESFET 器件性能(跨导、饱和漏电流、夹断电压)的影响. 用 AB 腐蚀液显示 AB 微缺陷(AB-EPD:  $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$  量级), 用 KOH 腐蚀液显示位错(EPD:  $10^4 \text{ cm}^{-2}$  量级), 发现衬底上的 AB 微缺陷对器件性能及均匀性有显著影响. 随着 AB-EPD 的增大, 跨导、饱和漏电流变小, 夹断电压的绝对值也变小. 利用扫描光致发光光谱(PL mapping) 对衬底质量进行了测量, 结果表明衬底参数好的样品, PL 参数好, 相应器件的参数也好, 从而有可能制作出良好的器件.

**关键词:** LEC SF GaAs; 位错; AB-EPD; 跨导; 饱和漏电流; 夹断电压

**PACC:** 8160C; 6170W

**中图分类号:** TN304. 2<sup>+</sup> 3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)01-0072-06

## 1 引言

GaAs 晶体是一种电学性能优越的 III-V 族化合物半导体材料, 以其为衬底制作的半导体器件和集成电路, 由于具有信息处理速度快等优点而受到青睐, 成为近年来的研究热点. 以液封直拉半绝缘 GaAs 为衬底的金属半导体场效应晶体管(MESFET) 器件被超大规模集成电路和单片微波集成电路广泛采用, 因此研究 GaAs 衬底材料质量与器件性能的关系, 对 GaAs 集成电路和相关器件的设计及制造是非常必要的. 其中对衬底材料中微缺陷的研究日趋深入. 1981 年何宏家等人<sup>[1]</sup>认为在掺 Te 单晶中存在层错、小位错环和微沉淀物等缺陷. 微缺陷主要是层错、层错环、双弧小环和黑白瓣缺陷. 1992 年陈诺夫<sup>[2]</sup>提出了超声 AB 腐蚀法, 不但能清晰地显示出 GaAs 晶片中的位错, 还可以显示出微缺陷. 1992 年 Schlossmacher 等人<sup>[3]</sup>研究了 GaAs 中的位错和沉淀. 2003 年本文作者<sup>[4]</sup>研究了位错和微缺陷之间的关

系, 认为二者有强烈的相互作用, 位错吸附微缺陷, 微缺陷缀饰位错. 虽然有一些文献指出衬底上的位错及其分布对诸如 MESFET 旁栅效应<sup>[5]</sup>夹断电压、漏电流<sup>[6]</sup>有影响, 但关于微缺陷对器件性能影响的报道较少. Yamamoto 等<sup>[7]</sup>首次报道了 LEC SF GaAs 中类似 As 沉淀的微缺陷显著影响外延型 FET 器件的电学性能, 而位错对其没有影响. 本文进一步研究了 AB 微缺陷对注入型 GaAs MESFET 器件性能的影响, 从而得出其对器件参数影响的一些规律.

## 2 实验

在 LEC 法生长的 75mm SF GaAs 晶片上分别制作 MESFET 器件. 按如图 1 所示位置测量其跨导( $g_m$ )、饱和漏电流( $I_{dss}$ )和夹断电压( $V_p$ ). 然后经过腐蚀, 再测量 AB 微缺陷密度和位错密度. 沿  $\bar{1}10$ ,  $0\bar{1}0$ ,  $\bar{1}\bar{1}0$  方向取点, 测量点之间的间隔为  $D/5$ , 即 15mm; 位错密度用熔融 KOH 显示; 微缺陷用 AB 腐蚀液<sup>[2,8]</sup>显示, 并用中国电子科技集团公司

\*国家自然科学基金(批准号: 60276009), 中国人民解放军总装备部预研资金(批准号: 00JS02-2-1QT4501)和河北省自然科学基金(批准号: 599033)资助项目

徐岳生 男, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体材料晶体生长和缺陷工程研究.

2004-01-03 收到, 2004-03-09 定稿

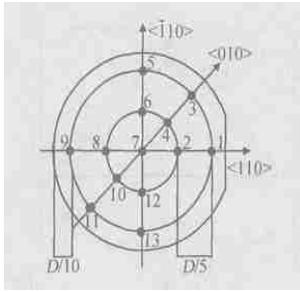


图 1 晶片测量点的位置

Fig.1 Measuring points' positions

第 46 所开发研制的 AB 微缺陷计算机定量测试系

统测量密度. 进而从中挑出位错密度大致相同, 而 AB 微缺陷密度相差很大的两个片子 A 和 B, 以达到排除位错的干扰, 单独研究 AB 微缺陷对器件性能影响的目的. PL mapping 扫描使用美国 Bio-Rad 公司的 RPM2000 型 PL mapping 扫描光谱仪.

### 3 结果

图 2, 3, 4 分别表示样品 A 和 B 的 AB 微缺陷分布和各电学参数分布的对比 (考虑到对称性, 试验仅对第一象限的点 1 ~ 7 进行了测量). 起始点表示晶片圆心, 其余表示相对圆心的距离, 对应数值表示 AB 微缺陷的测量值.

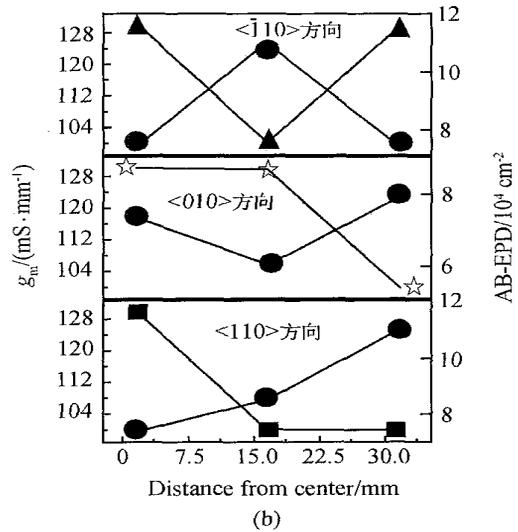
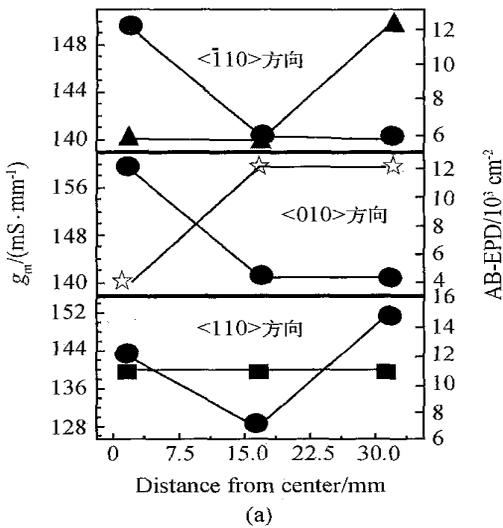


图 2 样品 A(a)和 B(b)的  $g_m$  和 AB 微缺陷分布

Fig. 2 Distribution of  $g_m$  and AB microdefects of samples A(a) and B(b)

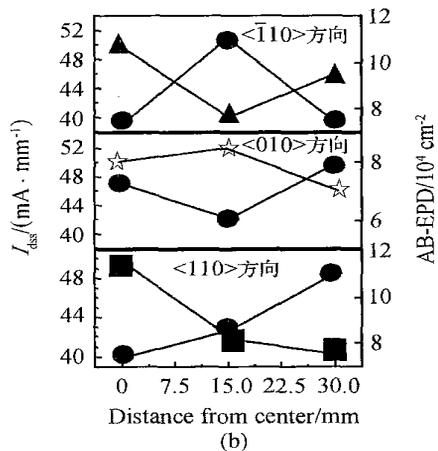
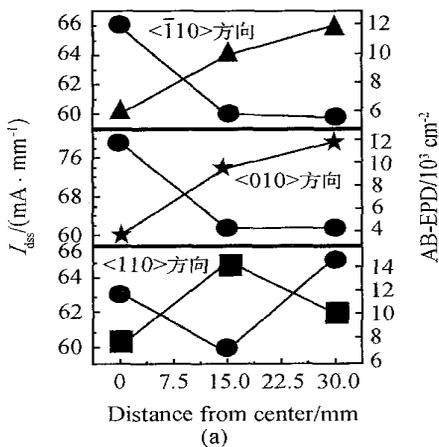


图 3 样品 A(a)和 B(b)的  $I_{dss}$  和 AB 微缺陷分布

Fig. 3 Distribution of  $I_{dss}$  and AB microdefects of samples A(a) and B(b)

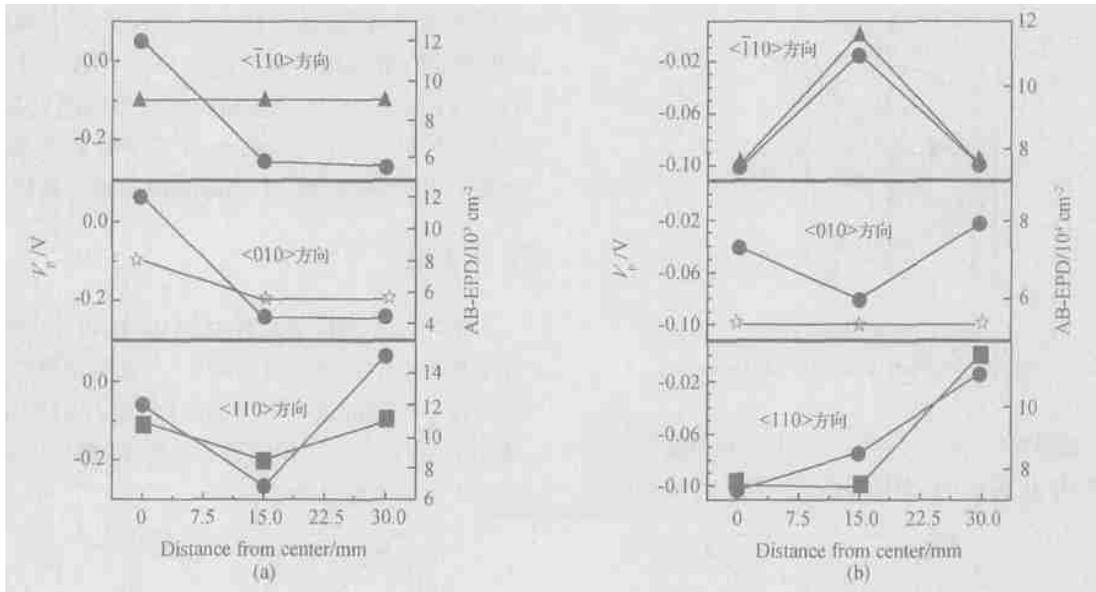


图 4 样品 A(a)和 B(b)的  $V_p$  和 AB 微缺陷分布

Fig. 4 Distribution of  $V_p$  and AB microdefects of samples A(a) and B(b)

由图 2 可知 ,A 和 B 的跨导  $g_m$  的平均值分别为 147 和 113mS/mm.

由图 3 可知 ,A 和 B 的饱和漏电流  $I_{dss}$  的平均值分别为 67 和 45mA/mm.

由图 4 可知 ,A 和 B 的夹断电压  $V_p$  的平均值均为 - 0.1V.

为了更清楚地看出 AB-EPD 与各器件参数之间的关系,我们利用图 2,3 和 4,得出了两个样品 AB-EPD 与各参数的关系,如图 5,6,7 所示.由图 5 可以明显看出,AB-EPD 低,则  $g_m$  高;AB-EPD 高,则  $g_m$  低.并且,图中可以明显地呈现出几个区域:(1) a 段左端区域:AB-EPD 从  $4.4 \times 10^3/cm^2$  到  $5.9 \times 10^3/cm^2$ ,  $g_m$  从 160mS/mm 下降到 140mS/mm ;(2) a 段:AB-EPD 从  $5.9 \times 10^3/cm^2$  到  $7.3 \times 10^4/cm^2$ ,  $g_m$  从 140mS/mm 下降到 130mS/mm,  $g_m$  变化很小;(3) a 段和 b 段之间区域:AB-EPD 从  $7.3 \times 10^4/cm^2$  到  $7.9 \times 10^4/cm^2$ ,  $g_m$  从 130mS/mm 迅速下降到 100mS/mm,变化迅速;(4) b 段右端区域:AB-EPD 从  $7.9 \times 10^4/cm^2$  到  $1.1 \times 10^5/cm^2$ ,  $g_m$  为 100mS/mm,保持不变.

由图 6 可见,AB-EPD 与饱和漏电流之间呈现相反的分趋势,即 AB-EPD 高时,其饱和漏电流低;AB-EPD 低时,其饱和漏电流高.

由图 7 可见,AB-EPD 与夹断电压之间的关系为,AB-EPD 越高,其夹断电压的绝对值越小(第三个测量

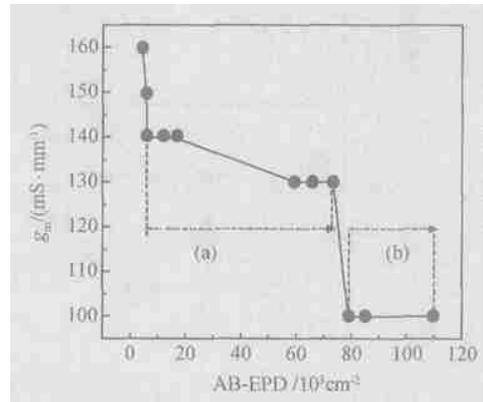


图 5 AB-EPD 对 MESFET 跨导的影响

Fig. 5 Effect of AB-EPD on MESFET's  $g_m$

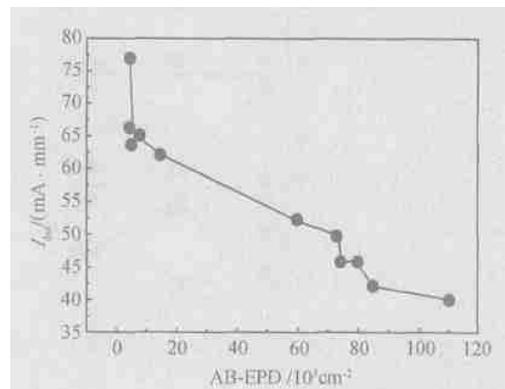


图 6 AB-EPD 对 MESFET 饱和漏电流的影响

Fig. 6 Effect of AB-EPD on MESFET's  $I_{dss}$

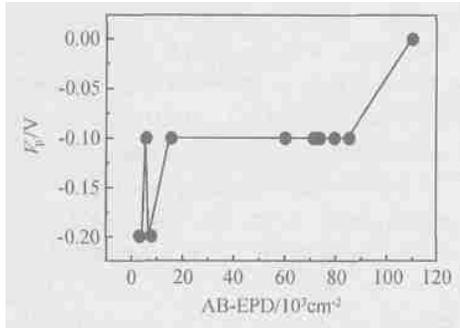


图 7 AB-EPD 对 MESFET 夹断电压的影响  
Fig. 7 Effect of AB-EPD on MESFET's  $V_p$

点不正常的原因可能是测量过程的偏差)。

另一方面由测量可知,两样品的位错密度分别为  $3.7 \times 10^4$  和  $4.3 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ ,相差不大,且分布相

同.平整度小于  $8\mu\text{m}$ ;翘曲度小于  $4.0\mu\text{m}$ ;MESFET 的栅宽为  $50\mu\text{m}$ .然而,跨导  $g_m$  的分布却相差很大,可见 AB 微缺陷影响器件电学性能.

另外,本实验通过对样品进行 PL mapping 测试,将 PL mapping 参数与 AB 微缺陷密度、位错密度以及器件性能(以跨导为例)测试情况列于表 1.

光致发光光谱与处于禁带内的各种杂质和缺陷密切相关,因此通过光致发光谱可获得材料表面和内部的丰富信息. PL mapping 技术可以更系统、更全面地反映材料的内在质量,特别是可以综合反映出电学均匀性、各种缺陷的影响<sup>[9]</sup>.

表 1 说明了材料的衬底参数好,则 PL 谱的强度高、均匀性好,相应的器件参数也好,从而有可能制作出良好的器件与电路.

表 1 PL mapping、常规衬底参数及器件参数的关系

Table 1 Relationship between PL mapping, normal substrate parameters, and device parameters

样品	AB-EPD $/10^4 \text{cm}^{-2}$	位错密度 EPD $/10^4 \text{cm}^{-2}$	跨导			PL mapping	
			$g_m / (\text{mS mm}^{-1})$	标准偏差	相对标准偏差/ %	强度/ mV	不均匀性/ %
A	0.93	3.7	147	10	7	1.093	22.76
B	7.7	4.3	113	14	12	0.744	37.26

### 4 讨论

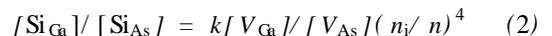
如上所述,AB 微缺陷影响器件电学参数,如跨导、饱和漏电流和夹断电压退火能改善原生 SF GaAs 晶体的电学均匀性这一事实表明,电学不均匀与位错没有直接关系.进一步研究发现,引起 SF GaAs 电学不均匀的主要原因是位错上吸附的微缺陷,而在这些微缺陷中起主要作用的是 As 沉淀.

一方面,在 GaAs MESFET 器件中,我们是通过高浓度离子注入掺杂剂 Si 形成沟道区的.离子注入后,再经过退火工艺,使注入的杂质电激活.注入到半导体晶体内的杂质原子常处于间隙位置,而间隙原子对单晶内的电导是没有贡献的.退火使杂质原子占据晶格点阵位置(称替位),才能变为施主或受主.Si 属于 IV 族元素,它在 GaAs 中是一种特别重要的杂质,具有双性行为.它既能进入 Ga 的晶格位置,表现为施主杂质,又能进入 As 的晶格位置表现为受主杂质<sup>[10]</sup>.Si 原子在这两种状态的比例,被称为激活率,即激活率  $= [\text{Si}_{\text{Ga}} / \text{Si}_{\text{As}}]$ ,它取决于 GaAs 中 Ga 空位浓度和 As 空位浓度的比值.

另一方面, SF GaAs 晶体中普遍含有大量的 As

沉淀,而用 AB 液腐蚀出的 AB 微缺陷已经证明主要就是 As 沉淀<sup>[11,12]</sup>.As 沉淀有两种形态,一种是纯 As 沉淀,另一种是吸杂 As 沉淀.它们不仅在位错线上存在,也存在于无位错区域.As 沉淀密度与晶体的富 As 程度及热过程有关.

受生长环境的影响, SF GaAs 一般富 As,而过量 As 的三种存在形式分别是深施主 EL2、As 沉淀和本征点缺陷(主要指  $\text{As}_i$ )<sup>[13]</sup>,适当条件下这三种形式可进行转化.多余的 As 在晶体生长结束时以  $\text{As}_i$  的形式存在于基体中,随后在冷却过程中,这些多余的 As 因一部分转化成 As 沉淀而减少,从而导致  $\text{As}_i$  的减少,进而  $V_{\text{As}}$  浓度增加,  $V_{\text{Ga}}$  浓度减少.



式中  $k$  是缺陷反应系数.通过(1)和(2)式可以看到  $[\text{Si}_{\text{Ga}} / \text{Si}_{\text{As}}]$  减小,激活率降低.而激活率的降低可导致夹断电压  $|V_p|$  的减小.

饱和漏电流  $I_{\text{dss}}$  在固定栅压下,取决于沟道方块载流子浓度,而沟道方块载流子浓度则主要由注入激活率决定,所以  $I_{\text{dss}}$  随注入激活率的降低而减小.

根据跨导的定义,载流子浓度的减小也必然会

导致跨导的减小.

另外,从器件参数的角度来考虑, MESFET 器件的跨导是表征栅源电压对漏极电流控制作用大小的一个参数,它近似为  $g_m = \frac{I_{ds}}{V_{GS}} / V_{DS}$ . 设想在栅极下有一个 AB 微缺陷. 当栅压负增加,耗尽层到达缓冲层和衬底表面时,如果衬底中没有缺陷,漏源间电流被截断. 但在衬底上有 AB 微缺陷时,那么电流将通过缺陷(假如缺陷或多或少有导电性),即使在栅极下其他部分夹断发生, AB 微缺陷已经能够使电流在漏源间流过. 所以,栅压要比没有 AB 微缺陷时改变得大一些,才能达到预期的效果. 也就是说,栅压对漏极电流的控制减弱了,从而也就导致了跨导的减小;同时,由于上述原因,夹断电压  $V_p$  将更趋于负值,即  $|V_p|$  减小;饱和漏电流  $I_{dss}$  也将减小.

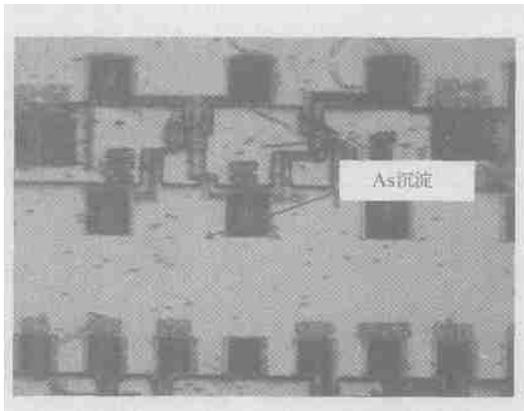


图 8 栅极下的腐蚀坑

Fig. 8 Etch pits under grid electrode

为了进一步确定,我们将上述样品的沟道区域在显微镜下进行观察. 由于 AB 腐蚀液能将栅极和外延层腐蚀掉,所以栅极下边的微缺陷能得以显示,结果如图 8 所示. 可见在栅极确实发现了 AB 腐蚀坑,从而证实了我们的假设.

致谢 本文得到了河北工业大学郎于谦教授的悉心指导,在此表示感谢.

## 参考文献

[ 1 ] He Hongjia, Cao Funian, Fan Tiwen, et al. Investigation of

microdefects and microprecipitates in Te-doped GaAs. Chinese Journal of Semiconductors, 1981, 2(1) : 7 (in Chinese) [何宏家, 曹福年, 范缙文, 等. 掺 Te-GaAs 单晶中微缺陷微沉淀的研究. 半导体学报, 1981, 2(1) : 7]

- [ 2 ] Chen Nuofu. A new method for revealing defects in GaAs/AlGaAs-ultrasonic aided AB etching. Chinese Journal of Semiconductors, 1992, 13(12) : 764 (in Chinese) [陈诺夫. 显示 GaAs/AlGaAs 缺陷的新方法-超声 AB 腐蚀. 半导体学报, 1992, 13(12) : 764]
- [ 3 ] Schlosmacher P, Urban K. Dislocations and precipitates in gallium arsenide. J Appl Phys, 1992, 71(2) : 620
- [ 4 ] Xu Yuesheng, Zhang Chunling, Liu Caichi, et al. Crystal defects in semi-insulating gallium arsenide. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(7) : 718 (in Chinese) [徐岳生, 张春玲, 刘彩池, 等. 半绝缘砷化镓单晶中的晶体缺陷. 半导体学报, 2003, 24(7) : 718]
- [ 5 ] Wu Ju, He Hongjia, Fan Tiwen, et al. Influence of dislocation in Si GaAs on the MESFETs. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(7) : 558 (in Chinese) [吴巨, 何宏家, 范缙文, 等. 半绝缘 GaAs 衬底中位错对 MESFETs 旁栅效应的影响. 半导体学报, 1997, 18(7) : 558]
- [ 6 ] Dobrilla P, Blakenore J S, McCamant A J, et al. GaAs field-effect transistor properties as influenced by the local concentrations of midgap native donors and dislocation. Appl Phys Lett, 1985, 47(6) : 15 : 602
- [ 7 ] Yamamoto H, Oda O, et al. Microscopic defects in semi-insulating GaAs and their effect on the FET device performance. J Electrochem Soc, 1989, 136(10) : 3098
- [ 8 ] Abrahams M S, Buicchi C J. Etching of dislocations on the low-index faces of GaAs. J Appl Phys, 1965, 36 : 2855
- [ 9 ] Li Guangping, Ru Qionga, Li Jing, et al. Characterization of PL mapping for Si GaAs wafer. Journal of Functional Materials and Devices, 2000, 6(4) : 365 (in Chinese) [李光平, 汝琼娜, 李静, 等. Si-GaAs 晶片的 PL mapping 表征技术. 功能材料与器件学报, 2002, 6(4) : 365]
- [ 10 ] Wang Yangyuan. Introduction of integrated circuit. Beijing: Higher Education Press, 1991 : 564 (in Chinese) [王阳元. 集成电路工艺基础. 北京: 高等教育出版社, 1991 : 564]
- [ 11 ] Chen Nuofu, He Hongjia, Wang Yutian, et al. Stoichiometric defects in semi-insulating GaAs. J Cryst Growth, 1997, 173 : 325
- [ 12 ] Yamada K, Osaka J. Microdefects in dislocation-free liquid-encapsulated Czochralski GaAs. J Appl Phys, 1988, 63(8) : 2609
- [ 13 ] Liu Lifeng, Yang Ruixia, Guo Hui. Study on mechanism of effects on EL2 in GaAs by annealing and quenching. Infrared Technology, 2002, 24(1) : 30 (in Chinese) [刘力锋, 杨瑞霞, 郭惠. 热处理和淬火影响 GaAs 中 EL2 浓度机理的研究. 红外技术, 2002, 24(1) : 30]

## Influence of AB Microdefects in LEC Semi-Insulating GaAs Substrate on Property of MESFET \*

Xu Yuesheng<sup>1</sup>, Fu Shenghui<sup>1</sup>, Liu Caichi<sup>1</sup>, Wang Haiyun<sup>1</sup>,  
Wei Xin<sup>1</sup>, and Hao Jingchen<sup>2</sup>

(1 Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2 No. 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** It is studied that the influence of AB microdefects in semi-insulating GaAs substrate grown by LEC on the property of MESFET devices including transconductance ( $g_m$ ), saturated drain current ( $I_{dss}$ ), and pinch-off voltage ( $V_p$ ). Dislocations and AB microdefects are shown by KOH solution and AB solution respectively, indicating that the average AB EPD ranges from  $10^3$  to  $10^4 \text{ cm}^{-2}$ , while the average EPD is of the order of  $10^4 \text{ cm}^{-2}$ . It shows that AB microdefects have a significant influence on the property of MESFET devices: as AB EPD increases,  $g_m$ ,  $I_{dss}$ , and absolute value of  $V_p$  decreases, respectively. In addition, the substrate quality is studied with PL mapping whose results prove that the sample with better substrate quality has better PL parameters as well as better device parameters.

**Key words:** LEC SF GaAs; dislocation; AB EPD; transconductance; saturated drain current; pinch-off voltage

**PACC:** 8160C; 6170W

**Article ID:** 0253-4177(2005)01-0072-06

---

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60276009), Pre-Research Foundation of Chief Equipment Ministry in the Chinese People's Liberation Army (No. 00JS02-2-1QT4501), and Natural Science Foundation of Hebei Province (No. 599033)

Xu Yuesheng male, professor. He is engaged in research on semiconductor crystal growth and defect project.

Received 3 January 2004, revised manuscript received 9 March 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics