

掺 Fe 高阻 GaN 缓冲层特性及其对 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管器件的影响研究

王凯 邢艳辉 韩军 赵康康 郭立建 于保宁 邓旭光 范亚明 张宝顺

Growths of Fe-doped GaN high-resistivity buffer layers for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor devices

Wang Kai Xing Yan-Hui Han Jun Zhao Kang-Kang Guo Li-Jian Yu Bao-Ning Deng Xu-Guang Fan Ya-Ming Zhang Bao-Shun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 016802 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.016802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.016802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Ti/TiO<sub>2</sub> 包覆 ZnO: Tb 纳米纤维的光学性质

Optical properties of Ti/TiO<sub>2</sub> capped Tb<sup>3+</sup>-doped ZnO nanofibers

物理学报.2014, 63(18): 186801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.186801>

钯和铂金属在石墨烯表面不同生长机理第一性原理研究

Density functional study on the different behaviors of Pd and Pt coating on graphene

物理学报.2014, 63(17): 176802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.176802>

高剂量 As 离子注入对高阻 Si 电学特性的影响

Influence of high dose As ion implantation on electrical properties of high resistivity silicon

物理学报.2014, 63(13): 136803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.136803>

掺 He 钛膜中 He 泡的演化研究

Study of the evolution of helium bubbles in helium-containing titanium films

物理学报.2012, 61(22): 226802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.226802>

溅射制备 GeNb 共掺杂窄光学带隙和低电阻率的 TiO<sub>2</sub> 薄膜

Ge and Nb co-doped TiO<sub>2</sub> films with narrow band gap and low resistivity prepared by sputtering

物理学报.2012, 61(20): 206803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206803>

# 掺Fe高阻GaN缓冲层特性及其对AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管器件的影响研究\*

王凯<sup>1)</sup> 邢艳辉<sup>1)†</sup> 韩军<sup>1)</sup> 赵康康<sup>1)</sup> 郭立建<sup>1)</sup> 于保宁<sup>1)</sup> 邓旭光<sup>2)</sup>  
范亚明<sup>2)</sup> 张宝顺<sup>2)</sup>

1) (北京工业大学电子信息与控制工程学院, 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

2) (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 纳米器件与应用重点实验室, 苏州 215123)

(2015年7月8日收到; 2015年10月14日收到修改稿)

利用金属有机物化学气相沉积技术在蓝宝石衬底上制备了掺Fe高阻GaN以及AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管(HEMT)结构. 对 $\text{Cp}_2\text{Fe}$ 流量不同的高阻GaN特性进行了研究. 研究表明, Fe杂质在GaN材料中引入的 $\text{Fe}^{3+/2+}$ 深受主能级能够补偿背景载流子浓度从而实现高阻, Fe杂质在GaN材料中引入更多起受主作用的刃位错, 也在一定程度上补偿了背景载流子浓度. 在一定范围内, GaN材料方块电阻随 $\text{Cp}_2\text{Fe}$ 流量增加而增加,  $\text{Cp}_2\text{Fe}$ 流量为100 sccm (1 sccm = 1 mL/min)时, 方块电阻增加不再明显; 另外增加 $\text{Cp}_2\text{Fe}$ 流量也会导致材料质量下降, 表面更加粗糙. 因此, 优选 $\text{Cp}_2\text{Fe}$ 流量为75 sccm, 相应方块电阻高达 $1 \times 10^{10} \Omega/\square$ , 外延了不同掺Fe层厚度的AlGaN/GaN HEMT结构, 并制备成器件. HEMT器件均具有良好的夹断以及栅控特性, 并且增加掺Fe层厚度使得HEMT器件的击穿电压提高了39.3%, 同时对器件的转移特性影响较小.

**关键词:** 高阻GaN, Fe掺杂, 高电子迁移率晶体管, 金属有机化合物化学气相沉积

**PACS:** 68.55.Ln, 68.55.ag, 81.15.Gh

**DOI:** 10.7498/aps.65.016802

## 1 引言

近年来, GaN基高电子迁移率晶体管(high electron mobility transistor, HEMT)由于其高的击穿电压、高的二维电子气浓度以及高的迁移率受到人们的广泛关注<sup>[1-6]</sup>. 虽然目前已有商业化的产品, 但是仍存在许多问题有待解决, 比如, AlGaN/GaN HEMT中存在的缓冲层漏电问题, 会对器件夹断特性以及耐压特性产生不利影响<sup>[7]</sup>, 目前主要是采用背势垒结构<sup>[8]</sup>、超晶格缓冲层结构<sup>[9]</sup>以及高阻缓冲层<sup>[10]</sup>等方法降低缓冲层漏电.

非故意掺杂GaN一般表现为n型, 因此为了实现高阻GaN, 需要通过引入受主能级来补偿这些

电子, 通常可以通过引入较高的穿透位错以及引入受主杂质来实现. 采用金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)外延生长时, 可以通过改变成核层的生长参数<sup>[11]</sup>, 例如改变生长压力、载气类型等, 在GaN层中引入位错, 这些位错可以补偿GaN层中的背景载流子, 从而实现高阻; 还可以通过掺杂Fe<sup>[12]</sup>, Mg<sup>[13]</sup>, C<sup>[14]</sup>等受主杂质来补偿背景载流子以实现高阻. 然而, 较高的位错密度会直接或间接地对器件产生不利的影 响. Mg杂质的激活能较高, 需要掺杂较高浓度的Mg来补偿背景载流子, 从而导致晶体质量恶化, 并且Mg掺杂存在“记忆效应”, C掺杂虽然不存在“记忆效应”, 但是要在低压低温条件下才有利于C杂质的掺入, 这种生长条件会导致GaN外延材料结晶质量下降. Fe掺杂的激活效

\* 国家自然科学基金(批准号: 61204011, 11204009, 61574011)、北京市自然科学基金(批准号: 4142005)和北京市教委能力提升项目(批准号: PXM2014\_014204\_07\_000018)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xingyanhui@bjut.edu.cn

率远高于Mg, 不需要过高的掺杂浓度, 因此本文采用Fe 作为受主杂质, 对GaN 薄膜进行掺杂从而形成高阻, 主要研究了Cp<sub>2</sub>Fe 流量对高阻GaN 材料的影响以及掺Fe 层厚度对HEMT 器件的影响.

## 2 实 验

所有样品均在美国Veeco 公司生产的D180 型MOCVD 设备上生长. 采用2 in (1 in = 2.54 cm) C 面(0001) 蓝宝石衬底, 以三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)、二茂铁(Cp<sub>2</sub>Fe) 和氨气(NH<sub>3</sub>) 分别作为Ga 源、Al 源、Fe 源(Ga, Al, Fe 源纯度均为99.9999%) 和N 源(纯度为99.999%), 生长过程中以H<sub>2</sub> 作为载气. 在1050 °C 下对衬底进行3 min 的表面预处理后降温到480 °C, 然后高压下生长约30 nm 厚的成核层, 再升温到980 °C 生长30 min 掺Fe 的GaN (GaN:Fe) 外延层, 最后再生长60 min 非掺杂GaN(u-GaN) 外延层. 样品A1, A2, A3 均在这种条件下生长, 不同的是Cp<sub>2</sub>Fe 流量, 分别为50, 75, 100 sccm (1 sccm = 1 mL/min). 样品A 未进行掺Fe, 作为对照.

随后采用优化的Cp<sub>2</sub>Fe 流量生长HEMT 结构, 生长过程如下: 在高温(1050 °C) 下对衬底进行预处理后降温到480 °C, 然后高压下生长约30 nm 厚的成核层, 再升温到980 °C 生长GaN:Fe 层, 接着生长u-GaN 外延层, 随后生长1.5 nm 的AlN 插入层, 最后外延30 nm 的Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N 势垒层. 样品B1, B2, B3 均采用这种结构且GaN 层总厚度一致, 不同的是GaN:Fe 层和u-GaN 层的厚度, 具体如表1 所列.

表1 HEMT 结构样品GaN:Fe 层和u-GaN 层的生长时间

Table 1. Growth time of GaN:Fe and u-GaN of HEMT structure.

样品	GaN:Fe 层的生长时间/ min	u-GaN 层的生长时间/ min
B1	30	110
B2	60	80
B3	90	50

样品的摇摆曲线采用Bruker D8 Discover 高分辨X 射线衍射仪(HR-XRD) 测得. 通过Hall 测试以及传输线矩阵法对样品的方块电阻进行测试(A 样品采用Hall 测试方法, A1, A2, A3 样品采用传输线矩阵法). 样品的表面形貌则通过Veeco Dimension

3100 原子力显微镜(AFM) 测试得到. 样品的室温光致发光(PL) 谱测试采用波长为325 nm 的HeCd 激光器作为激发源.

## 3 结果与讨论

### 3.1 掺杂源Cp<sub>2</sub>Fe 流量对材料特性的影响

图1 为XRD 测试的(002) 和(102) 面峰值半高宽(FWHM) 随Cp<sub>2</sub>Fe 流量的变化. 从图1 可以看到, 未掺Fe 的样品的(002) 和(102) 面FWHM 分别为260 和355 arcsec, 在Cp<sub>2</sub>Fe 流量为50 sccm 时, (002) 和(102) 面FWHM 分别为273 和410 arcsec, 表明在Cp<sub>2</sub>Fe 流量较低时对材料的晶体质量影响较小. 当进一步增加Cp<sub>2</sub>Fe 流量, 样品的(002) 和(102) 面FWHM 明显变宽, 这主要是由于随着Cp<sub>2</sub>Fe 流量的增加, 有更多的Ga 原子位置被Fe 原子占据, 使得材料晶格被破坏, 材料质量下降. 在晶粒度相同的情况下, 样品的FWHM 主要反映材料的位错信息, 并且(002) 面的FWHM 主要反映了材料的螺位错信息, 而(102) 面FWHM 主要与材料的刃位错有关<sup>[15,16]</sup>. 从图1 还可以比较看到, 随Cp<sub>2</sub>Fe 流量的增加, 样品的(102) 面的FWHM 比(002) 面的FWHM 增加更加迅速, 表明掺入Fe 会在材料中引入更多的刃位错. 这是由于在材料生长过程中, Fe 杂质的掺入使得Ga 原子的表面迁移率下降<sup>[17]</sup>, 导致GaN 生长模式由二维(2D) 生长转变为三维(3D) 生长, 3D 生长形成的岛在合并时会在接口处产生额外的刃位错<sup>[18]</sup>, 使得(102) 面的FWHM 增加更为迅速. 同时, 由于GaN 生长模式由2D 生长转变为3D 生长, 这也使得材料表面变得更加粗糙. 图2 为样品A, A1, A2, A3 的AFM 图, 扫描区域为5 μm × 5 μm. 从图2 可以看到, 样品A,

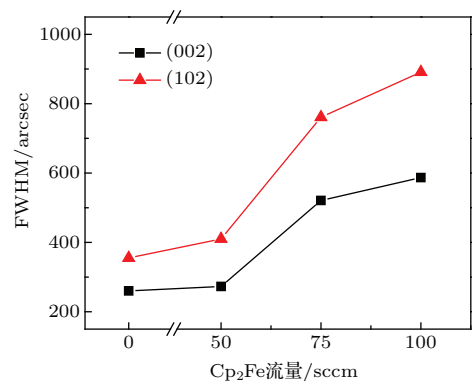


图1 XRD 测试的FWHM 与Cp<sub>2</sub>Fe 流量的关系  
Fig. 1. FWHM of XRD as a function of Cp<sub>2</sub>Fe flow rate.

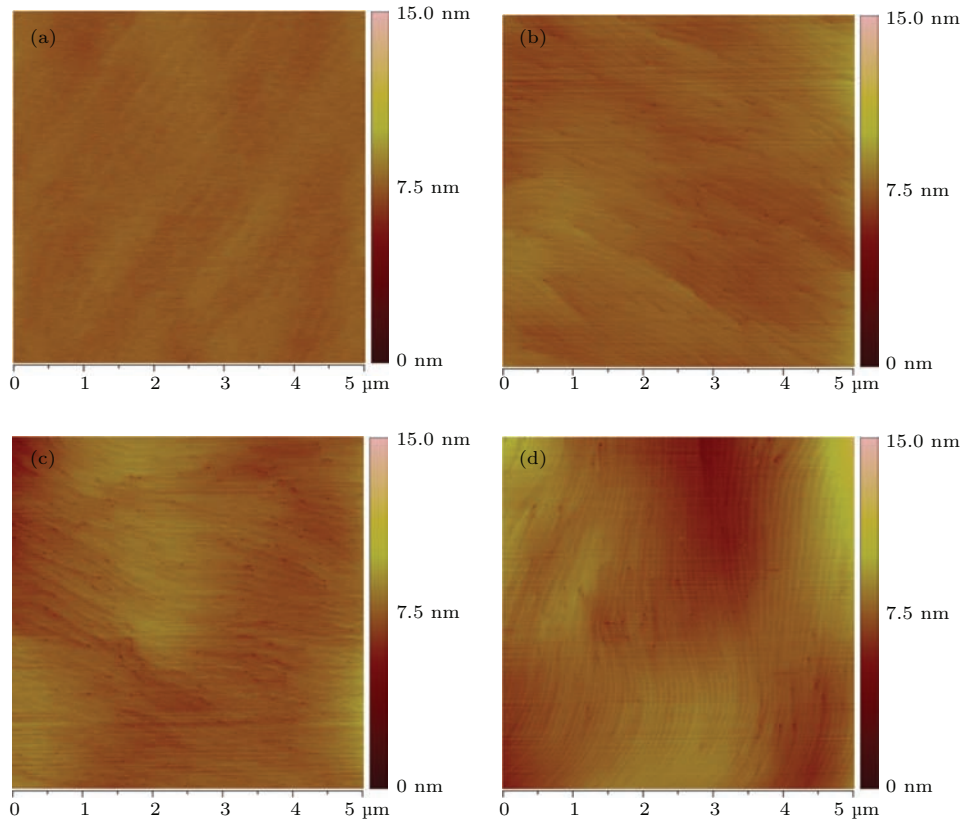


图2 (网刊彩色) 实验样品的AFM图 (a) 样品A; (b) 样品A1; (c) 样品A2; (d) 样品A3

Fig. 2. (color online) AFM images of the samples: (a) Sample A; (b) sample A1; (c) sample A2; (d) sample A3.

A1, A2, A3均呈台阶流生长模式, 相应的表面粗糙度分别为0.206, 0.393, 0.548, 0.927 nm, 表明随着Cp<sub>2</sub>Fe流量的增加, GaN层表面粗糙度呈上升趋势, 这与Heikman等<sup>[19]</sup>的研究结果一致.

图3为样品方块电阻随Cp<sub>2</sub>Fe流量的变化. 从图3可以看到, 样品的方块电阻随Cp<sub>2</sub>Fe流量增加而增加, 未掺Fe的样品方块电阻仅为10<sup>3</sup>数量级, Cp<sub>2</sub>Fe流量为50 sccm时GaN层方块电阻为10<sup>4</sup>数量级, 当Cp<sub>2</sub>Fe流量增加到75 sccm时, GaN层方块电阻可达到10<sup>10</sup>数量级, 继续增加Cp<sub>2</sub>Fe流量, GaN方块电阻增加不再明显. 一般情况下, 由于蓝宝石衬底表面的O原子扩散到GaN层中作为施主杂质<sup>[20]</sup>, 使得非故意掺杂的GaN呈n型, 而Fe杂质在GaN中作为Fe<sup>3+/2+</sup>深受主能级<sup>[21]</sup>, 能够补偿GaN材料存在的背景载流子, 从而增加材料的电阻. 此外, XRD结果显示增加Cp<sub>2</sub>Fe流量使得(102)面的FWHM增加更加明显, 表明增加Cp<sub>2</sub>Fe流量使得材料引入更多的刃位错, 而刃位错在材料中起受主作用<sup>[22]</sup>, 因而会补偿背景载流子浓度, 也起到增加材料电阻的作用. 但是掺入过多的Fe杂质可能导致产生自补偿效应, 使得补偿效率下降,

因而Cp<sub>2</sub>Fe流量增加到100 sccm时未能明显提高GaN材料的方块电阻.

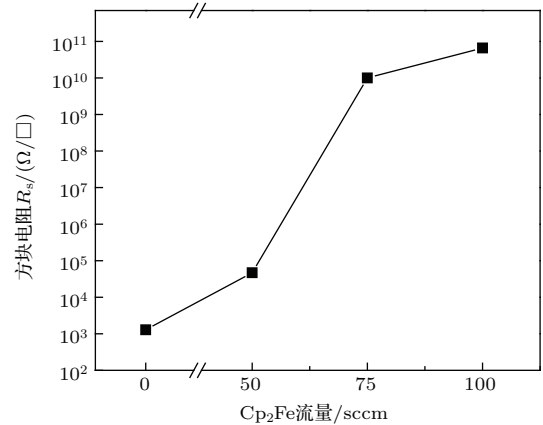


图3 样品方块电阻与Cp<sub>2</sub>Fe流量的关系

Fig. 3. The Sheet resistance of the samples as a function of Cp<sub>2</sub>Fe flow rate.

图4为样品A1, A2, A3的室温PL谱, 测试范围为330—700 nm. 从图4可以看到, 三个样品在362 nm处均存在较强的带边发射峰, 而且均未出现黄光带. 一般认为黄光带是由导带或浅施主到深能级(施主或受主)间的跃迁引起的, 其中浅施主可能由Si<sub>Ga</sub>, O<sub>N</sub>和C<sub>Ga</sub>等引入, 深能级可能由材料中

固有缺陷(如Ga空位)或者一些其他缺陷引入<sup>[23]</sup>. 在GaN生长过程中掺入Fe杂质, Fe原子会占据Ga原子位置, 但是同时也会补偿材料中存在的Ga空位<sup>[24]</sup>, 因而能够有效抑制黄光带的产生. 图4标出了三个样品带边发射峰的FWHM, 可以看到, 随着Cp<sub>2</sub>Fe流量的增加, FWHM变宽, 表明材料质量下降, 这与XRD结果一致.

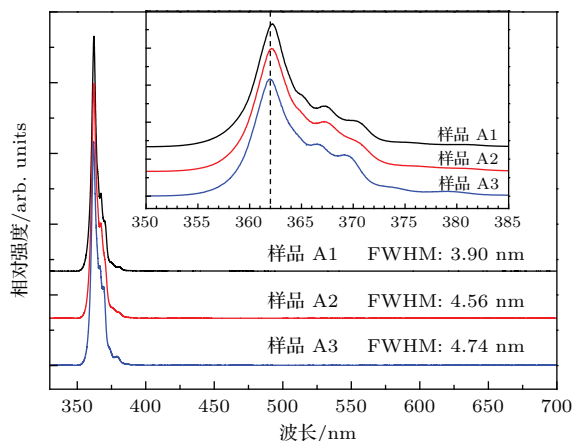


图4 (网刊彩色) 实验样品的常温PL谱

Fig. 4. (color online) PL spectra at RT for the samples.

考虑到掺入过多的Fe杂质会使得材料质量下降, 表面变得更加粗糙, 而且Cp<sub>2</sub>Fe流量增加到75 sccm后, 继续增加Cp<sub>2</sub>Fe流量并不能明显增加GaN材料电阻, 因此选取Cp<sub>2</sub>Fe流量为75 sccm外延HEMT结构.

### 3.2 掺Fe层厚度对HEMT器件的影响

将外延的HEMT结构制备成器件, 制作流程如下: 首先, 采用Ti/Al/Ni/Au 四层金属, 通过电子束蒸发、剥离工艺以及退火实现源漏欧姆接触; 然后, 采用F离子注入进行隔离; 最后, 通过电子束蒸发和剥离工艺, 采用Ni/Au金属作为栅电极<sup>[25]</sup>. 器件结构如图5(a)所示. 器件源漏间距为15 μm, 栅长4 μm, 栅宽100 μm, 栅漏间距为7 μm. 利用线性传输模型计算得到器件的欧姆接触电阻( $R_C$ )为1.21 Ω·mm. 采用C-V测试得到样品B1, B2, B3的二维电子气浓度分别为 $8.84 \times 10^{12}$ ,  $8.57 \times 10^{12}$ ,  $8.51 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Hall测得样品B1, B2, B3的迁移率分别为1550, 1330, 1050  $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ .

图5(b)为样品B1, B2, B3在漏极电压 $V_d = 10 \text{ V}$ 时的转移特性曲线, 插图为转移曲线的切线与横坐标轴( $y = 0$ )的交点, 可以得到样品B1, B2, B3的阈值电压分别为-3.83, -3.56, -3.39 V. 可

以看出三个样品均可实现关断, 且表现出良好的栅控特性. 在相同栅压下, 样品B1, B2, B3的漏极电流呈下降趋势, 可能与相应的二维电子气浓度和迁移率有关, 但是区别并不是特别明显, 表明改变掺Fe层厚度对器件的转移特性影响较小.

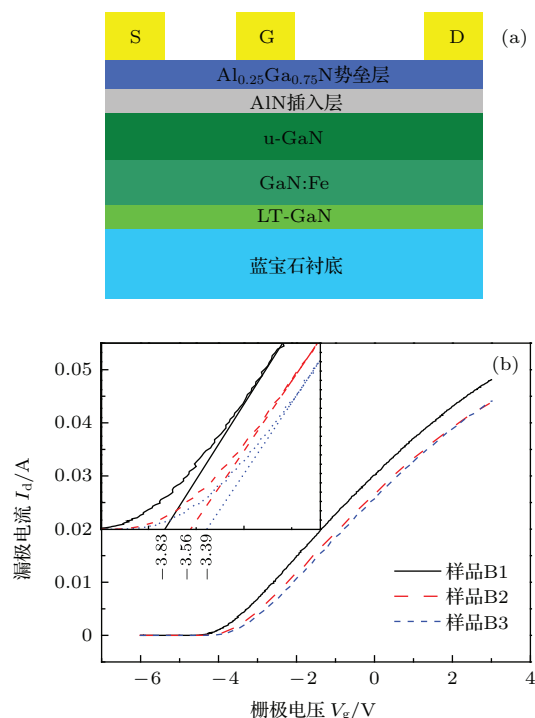


图5 (网刊彩色) (a) 器件结构示意图(图中S, G和D分别代表源极、栅极和漏极) (b) 样品的转移特性曲线( $V_d = 10 \text{ V}$ ), 插图为样品的阈值电压

Fig. 5. (color online) (a) Schematic view of the device structure (S, G and D represent the source, gate and drain, respectively); (b) transfer characteristics curves of the samples ( $V_d = 10 \text{ V}$ ) (inset: threshold voltage of the samples).

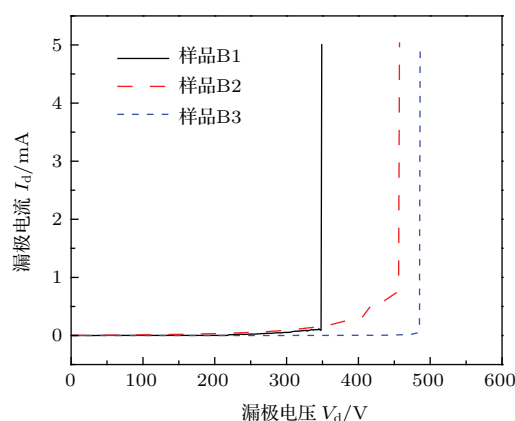


图6 (网刊彩色) 样品在关态( $V_g = -7 \text{ V}$ )下的 $I_d-V_d$ 曲线 Fig. 6. (color online) Off-state ( $V_g = -7 \text{ V}$ )  $I_d-V_d$  curves of the samples.

图6为样品B1, B2, B3在关断状态( $V_g = -7 \text{ V}$ )下 $I_d-V_d$ 曲线图. 从图6可以看出,  $I_d$ 在 $V_d$

达到一定值后突然升高, 此时器件击穿, 样品 B1, B2, B3 的击穿电压分别为 349, 457, 486 V. 可以看出随着掺 Fe 层厚度的增加, 器件的击穿电压提高了 39.3%, 表明增加掺 Fe 层厚度可以有效提高器件的击穿电压.

## 4 结 论

采用 MOCVD 生长掺 Fe 高阻 GaN 材料及 Al-GaN/GaN HEMT 结构, 研究了  $\text{Cp}_2\text{Fe}$  流量对高阻 GaN 材料的影响以及掺 Fe 层厚度对 HEMT 器件性能的影响. 研究结果发现, Fe 作为受主杂质在 GaN 材料中引入的  $\text{Fe}^{3+/2+}$  深受主能级能够补偿背景载流子浓度从而实现高阻, 同时, 掺 Fe 使得材料引入更多的刃位错, 而刃位错在材料中起受主作用, 也在一定程度上补偿了背景载流子浓度. 实验结果还发现掺入 Fe 能够有效抑制黄光带的产生. 电学特性结果表明, 在一定范围内 GaN 材料方块电阻随  $\text{Cp}_2\text{Fe}$  流量增加而增加,  $\text{Cp}_2\text{Fe}$  流量为 100 sccm 时, 方块电阻增加不再明显. 另外增加  $\text{Cp}_2\text{Fe}$  流量也会导致材料质量下降, 表面更加粗糙. 因而优选  $\text{Cp}_2\text{Fe}$  流量为 75 sccm, 相应方块电阻为  $1 \times 10^{10} \Omega/\square$ , 外延了不同掺 Fe 层厚度的 AlGaIn/GaN HEMT 结构. HEMT 器件均具有良好的夹断以及栅控特性, 并且增加掺 Fe 层厚度使得 HEMT 器件的击穿电压提高了 39.3%, 同时对器件的转移特性影响较小.

## 参考文献

- [1] Zhu Y X, Cao W W, Xu C, Deng Y, Zou D S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 117302 (in Chinese) [朱彦旭, 曹伟伟, 徐晨, 邓叶, 邹德恕 2014 物理学报 **63** 117302]
- [2] Duan B X, Yang Y T, Chen J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 227302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂, 陈敬 2012 物理学报 **61** 227302]
- [3] Wang C, Zhang K, He Y L, Zhang X F, Ma X H, Zhang J C, Hao Y 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 128501
- [4] Shrestha N M, Wang Y Y, Li Y, Chang E Y 2015 *Vacuum* **118** 59
- [5] Zhou X Y, Feng Z H, Wang Y G, Gu G D, Song X B, Cai S J 2015 *Chin. Phys. B* **24** 048503
- [6] Cui L, Wang Q, Wang X L, Xiao H L, Wang C M, Jiang L J, Feng C, Yin H B, Gong J M, Li B Q, Wang Z G 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 058501
- [7] Tang C, Xie G, Sheng K 2015 *Microelectron. Reliab.* **55** 347
- [8] Li C, Li Z, Peng D, Ni J, Pan L, Zhang D, Dong X, Kong Y 2015 *Semicond. Sci. Tech.* **30** 035007
- [9] Yanagihara M, Uemoto Y, Ueda T, Tanaka T, Ueda D 2009 *Phys. Status Solidi A* **206** 1221
- [10] Gamarra P, Lacam C, Tordjman M, Spletst Sser J R, Schauwecker B, di Forte-Poisson M 2015 *J. Cryst. Growth* **414** 232
- [11] Luo W, Li L, Li Z, Dong X, Peng D, Zhang D, Xu X 2015 *J. Alloy. Compd.* **633** 494
- [12] Ishiguro T, Yamada A, Kotani J, Nakamura N, Kikkawa T, Watanabe K, Imanishi K 2013 *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 08JB17
- [13] Li M, Wang Y, Wong K, Lau K 2014 *Chin. Phys. B* **23** 038403
- [14] Choi Y C, Shi J, Pophristic M, Spencer M G, Eastman L F 2007 *J. Vac. Sci. Technol. B* **25** 1836
- [15] Moram M A, Vickers M E 2009 *Rep. Prog. Phys.* **72** 036502
- [16] Heying B, Wu X H, Keller S, Li Y, Kapolnek D, Keller B P, DenBaars S P, Speck J S 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 643
- [17] Balmer R S, Soley D E J, Simons A J, Mace J D, Koker L, Jackson P O, Wallis D J, Uren M J, Martin T 2006 *Phys. Stat. Sol.* **3** 1429
- [18] Lu D C, Duan S K 2009 *Fundamental and Application of Metalorganic Vapor Phase Epitaxy* (Beijing: Science Press) p201 (in Chinese) [陆大成, 段树坤 2009 金属有机化合物气相外延基础及应用 (北京: 科学出版社) 第 201 页]
- [19] Heikman S, Keller S, Denbaars S P, Mishra U K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 439
- [20] van Nostrand J E, Solomon J, Saxler A, Xie Q H, Reynolds D C, Look D C 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 8766
- [21] Heitz R, Maxim P, Eckey L, Thurian P, Hoffmann A, Broser I, Pressel K, Meyer B K 1997 *Phys. Rev. B* **55** 4382
- [22] Mita S, Collazo R, Dalmau R, Sitar Z 2007 *Phys. Stat. Sol.* **4** 2260
- [23] Kuriyama K, Mizuki Y, Sano H, Onoue A, Hasegawa M, Sakamoto I 2005 *Solid State Commun.* **135** 99
- [24] Feng Z H, Liu B, Yuan F P, Yin J Y, Liang D, Li X B, Feng Z, Yang K W, Cai S J 2007 *J. Cryst. Growth* **309** 8
- [25] Zhang Z L, Yu G H, Zhang X D, Tan S X, Wu D D, Fu K, Huang W, Cai Y, Zhang B S 2015 *Electron. Lett.* **51** 1201

# Growths of Fe-doped GaN high-resistivity buffer layers for AlGaN/GaN high electron mobility transistor devices\*

Wang Kai<sup>1)</sup> Xing Yan-Hui<sup>1)†</sup> Han Jun<sup>1)</sup> Zhao Kang-Kang<sup>1)</sup> Guo Li-Jian<sup>1)</sup>  
Yu Bao-Ning<sup>1)</sup> Deng Xu-Guang<sup>2)</sup> Fan Ya-Ming<sup>2)</sup> Zhang Bao-Shun<sup>2)</sup>

1) (Key Laboratory of Opto-electronics Technology, Ministry of Education, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

2) (Key Laboratory of Nano Devices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Technology and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

( Received 8 July 2015; revised manuscript received 14 October 2015 )

## Abstract

Fe-doped high-resistivity GaN films and AlGa<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>/GaN high electron mobility transistor (HEMT) structures have been grown on sapphire substrates by metal organic chemical vapor deposition. The lattice quality, surfaces, sheet resistances and luminescent characteristics of Fe-doped high-resistivity GaN with different Cp<sub>2</sub>Fe flow rates are studied. It is found that high resistivity can be obtained by Fe impurity introduced Fe<sup>3+/2+</sup> deep acceptor level in GaN, which compensates for the background carrier concentration. Meanwhile, Fe impurity can introduce more edge dislocations acting as acceptors, which also compensate for the background carrier concentration to some extent. In a certain range, the sheet resistance of GaN material increases with increasing Cp<sub>2</sub>Fe flow rate. When the Cp<sub>2</sub>Fe flow rate is 100 sccm (1 sccm = 1 mL/min), the compensation efficiency decreases due to the self-compensation effect, which leads to the fact that the increase of the sheet resistance of GaN material is not obvious. In addition, the compensation for Fe atom at the vacancy of Ga atom can be explained as the result of suppressing yellow luminescence. Although the lattice quality is marginally affected while the Cp<sub>2</sub>Fe flow rate is 50 sccm, the increase of Cp<sub>2</sub>Fe flow rate will lead to a deterioration in quality due to the damage to the lattice, which is because more Ga atoms are substituted by Fe atoms. Meanwhile, Fe on the GaN surface reduces the surface mobilities of Ga atoms and promotes a transition from two-dimensional to three-dimensional (3D) GaN growth, which is confirmed by atomic force microscope measurements of RMS roughness with increasing Cp<sub>2</sub>Fe flow rate. The island generated by the 3D GaN growth will produce additional edge dislocations during the coalescence, resulting in the increase of the full width at half maximum of the X-ray diffraction rocking curve at the GaN (102) plane faster than that at the GaN (002) plane with increasing Cp<sub>2</sub>Fe flow rate. Therefore, the Cp<sub>2</sub>Fe flow rate of 75 sccm, which makes the sheet resistance of GaN as high as  $1 \times 10^{10} \Omega/\square$ , is used to grow AlGa<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>/GaN HEMT structures with various values of Fe-doped layer thickness, which are processed into devices. All the HEMT devices possess satisfactory turn-off and gate-controlled characteristics. Besides, the increase of Fe-doped layer thickness can improve the breakdown voltage of the HEMT device by 39.3%, without the degradation of the transfer characteristic.

**Keywords:** high-resistivity GaN, Fe-doped, high electron mobility transistor, metal-organic chemical vapor deposition

**PACS:** 68.55.Ln, 68.55.ag, 81.15.Gh

**DOI:** 10.7498/aps.65.016802

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61204011, 11204009, 61574011), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4142005), and the Scientific Research Fund Project of Municipal Education Commission of Beijing, China (Grant No. PXM2014\_014204\_07\_000018).

† Corresponding author. E-mail: [xingyanhui@bjut.edu.cn](mailto:xingyanhui@bjut.edu.cn)