

# He<sup>+</sup>、N<sup>+</sup>注入 GaN 的背散射和电学特性研究

周生强<sup>1</sup>, 姚淑德<sup>1,2</sup>, 焦升贤<sup>1</sup>, 孙长春<sup>1</sup>, 孙 昌<sup>1</sup>

(1. 北京大学 技术物理系, 北京 100871; 2. 北京大学 重离子物理研究所, 北京 100871)

**摘要:**采用背散射/沟道(RBS/channeling)技术分析了 GaN 的物理性质和结晶品质。研究了 He<sup>+</sup>、N<sup>+</sup>注入所引起的 GaN 的电阻变化与退火温度的关系。在不同温度下,氮气保护退火30 min,用 Hall 法测量电阻率。测量结果表明:GaN 的电阻率增大 7~8 个数量级。在 200~400 °C 下退火,电阻率变化最大。经高温(600~700 °C)退火后,电阻率仍比注入前大 3~4 个数量级。

**关键词:** GaN; 离子注入; 背散射/沟道; 电阻率; 辐照损伤

**中图分类号:** TN204      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2003)01-0028-03

## RBS Study on GaN Implanted With He<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>

ZHOU Sheng-qiang<sup>1</sup>, YAO Shu-de<sup>1,2</sup>,

JIAO Sheng-xian<sup>1</sup>, SUN Chang-chun<sup>1</sup>, SUN Chang<sup>1</sup>

(1. Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The structure and crystal quality of GaN are studied using Rutherford backscattering spectrometry (RBS) and channeling. The samples are grown on sapphire substrate by metalorganic vapor-phase epitaxy. The He<sup>+</sup>, N<sup>+</sup> implantation with different ion energy and post-implantation annealing are investigated. 7~8 orders increasing of resistivity is observed by Hall measurements after specific temperature annealing, and the optimized annealing temperature is about 200 and 400 °C for He<sup>+</sup> and N<sup>+</sup>, respectively. After 600~700 °C annealing, the resistivity is still very high, and radiation damages is found by RBS/channeling.

**Key words:** GaN; ion implantation; RBS/channeling; resistivity; radiation damage

新型光电材料 GaN 具有迁移率高、击穿电场高、热活化效率低和发射波长覆盖可见光到紫外等特点,广泛应用于高温、大功率电子学器件和蓝光、紫外波段的光学器件。通常,采用金属有机化学气相沉积法在蓝宝石衬底上直接生长的 GaN 晶体为 n 型半导体。针对不同的应

用,采用离子注入改性手段可改善 GaN 晶体的电学、光学特性。研究表明:注入金属或稀土元素离子可改善 GaN 的发光特性;Mg<sup>+</sup>/P<sup>+</sup>离子一起注入并经高温快速退火,可实现从 n 型到 p 型的转变<sup>[1]</sup>。在 GaN 中注入 H<sup>+</sup>离子,经氮气保护退火,可将其电阻率提高 3 个数量级<sup>[2]</sup>,

收稿日期:2001-07-02;修回日期:2001-09-03

作者简介:周生强(1976—),男,山东郓城人,在读硕士研究生,粒子物理与核物理专业

其他离子注入 GaN 的详情参见文献[3]和[4]。

本工作用 He<sup>+</sup>、N<sup>+</sup>注入 n 型未掺杂 GaN, 在不同温度氮气保护下退火 30 min, 测量退火前后的电阻率, 以研究 He<sup>+</sup>、N<sup>+</sup>注入 GaN 的背散射谱和电学特性。

### 1 实验

GaN 样品为在蓝宝石衬底上生长的六方结构未掺杂 n 型 GaN, 编号分别为 # 1194、# 1269。离子注入前, 室温下用 Hall 法测量其电阻率、载流子浓度及迁移率。结果列于表 1。

表 1 离子注入前 GaN 的电学特性

样品编号	电阻率/ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	载流子浓度/ $\text{cm}^{-3}$	迁移率/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )
# 1194	2.88	$1.13 \times 10^{17}$	19.3
# 1269	1.85	$3.53 \times 10^{17}$	9.5

#### 1.1 背散射/ 沟道(RBS/ channeling) 实验

RBS/ channeling 实验在北京大学技术物理系  $2 \times 1.7 \text{ MV}$  静电加速器的专用背散射束线上进行。入射 He<sup>2+</sup> 能量为 2.023 MeV, 探测器为 Au-Si 面垒型半导体探测器, 探测散射角为 165°。在以上实验条件下测量随机背散射谱和沟道谱。

#### 1.2 离子注入和电阻率测量

离子注入在中国科学院半导体研究所的 LC-4 型高能离子注入机上进行。注入时, 离子束流方向与样品法线方向成 10° 角。注入前, 用 TRIM 程序模拟注入离子的射程和分布, 根据模拟结果确定注入方案(表 2)。

采用多能量注入, 以使注入离子均匀分布在样品中; 先注入高能离子, 再注入低能离子, 以避免注入离子的相互影响。

首先测量注入后样品的电阻率, 在 N<sub>2</sub> 气保护下(温度高于 550 °C 时, GaN 中的元素 N 开始逃逸) 经不同温度退火处理后, 分别测量其电阻率。

表 2 He<sup>+</sup> 和 N<sup>+</sup> 离子的注入能量和注量

注入离子 编号	能量/ keV	射程/ nm	注量/ $\text{cm}^{-2}$	平均浓度/ $\text{cm}^{-3}$
He <sup>+</sup> # 1194	35	283.2	$1.5 \times 10^{13}$	$0.8 \times 10^{18}$
	60	427.0	$1.5 \times 10^{13}$	
	90	581.3	$2.0 \times 10^{13}$	
	120	746.1	$2.0 \times 10^{13}$	
N <sup>+</sup> # 1269	60	85.7	$1.0 \times 10^{14}$	$1.0 \times 10^{19}$
	180	246.0	$2.2 \times 10^{14}$	
	450	538.2	$3.2 \times 10^{14}$	

注: 平均浓度以原子个数计

### 2 结果与讨论

#### 2.1 RBS/ channeling 实验结果

RBS/ channeling 实验结果示于图 1。用 RUMP 程序计算出沟道谱与随机谱在表面峰附近区间的计数之比  $\text{min} = 1.3\%$ , 表明 GaN 的结晶品质很好, 近乎为完美晶体。

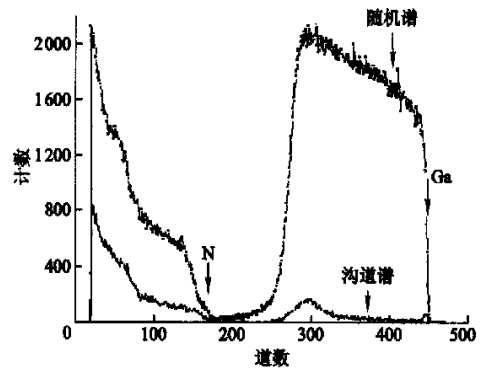


图 1 离子注入前 GaN 的沟道谱和随机谱比较

Fig. 1 Comparison of aligned and random RBS spectra of as-grown GaN # 1194 样品

#### 2.2 离子注入后的电阻率变化

离子注入后, # 1194、# 1269 样品的电阻率分别为  $4.75 \times 10^7$  和  $4.19 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ , 均比注入前提高约 7~8 个量级。图 2 为对两块样品分别注入 He<sup>+</sup> 和 N<sup>+</sup> 后与注入前的电阻率之比  $f$  随退火温度的变化。常规 Hall 法无法测量高阻样品的载流子浓度和迁移率, 因此, 无法

对离子注入前后载流子浓度和迁移率的变化作出比较。

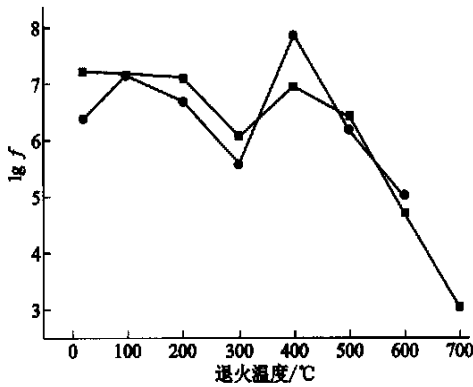


图2 He<sup>+</sup>和N<sup>+</sup>注入引起的Ga<sub>2</sub>N电阻率变化与退火温度的关系

Fig. 2 Resistivity vs annealing temperature for He<sup>+</sup>, N<sup>+</sup> implanted GaN

—He<sup>+</sup>注入, #1194 样品; —N<sup>+</sup>注入, #1296 样品

由图2可见:注入He<sup>+</sup>和N<sup>+</sup>后,随退火温度升高,电阻率先是增大或不变;当温度升到200时,电阻率开始下降,300时为极小值;升到400(这一温度随注量和元素各异<sup>[3]</sup>)时,电阻率达极大值;温度继续升高,电阻率下降。

离子注入后,GaN电阻率的变化通常被认为是注入造成的损伤导致了深能级的出现,补偿了原有的载流子,退火效应又减少了载流子跃迁,从而使电阻率升高;当退火温度高于特定温度后,注入损伤基本上得以恢复,损伤造成的深能级已消失,样品的导电性能提高。损伤造成的深能级可以通过样品的拉曼(Raman)散射测量进行研究,有关内容将另行报道。

### 2.3 离子注入造成的损伤

离子注入Ga<sub>2</sub>N产生高电阻率有两种机制:离子轰击产生缺陷和形成化学键。对缺陷造成的高阻,当退火温度达到一定值时,缺陷开始恢复,电阻率相应下降;化学键造成的高阻经一般的退火处理不易消除。为此,经700退火后,再次测量样品的沟道谱。图3为#1194样品注入前后沟道谱的比较, $\rho_{\min} = 4.4\%$ ,与注入前的 $\rho_{\min} = 1.3\%$ 相比,变化不大,但损伤并

未完全恢复。这些数据无法判断He<sup>+</sup>和N<sup>+</sup>注入Ga<sub>2</sub>N产生高阻的机制。

另外,由图3可知:注入造成的损伤集中在样品的近表面,但表2所列数据表明注入离子基本上平均分布在样品中。这是一个值得注意的现象,这可能是由于注入过程中的动态退火所致,对此还需进一步研究。

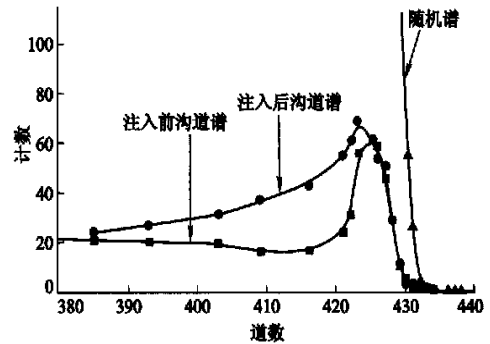


图3 He<sup>+</sup>注入Ga<sub>2</sub>N前后的沟道谱和随机谱

Fig. 3 Comparison of aligned RBS spectra of unimplanted and He<sup>+</sup> implanted GaN #1194 样品

## 3 结论

He<sup>+</sup>、N<sup>+</sup>离子注入Ga<sub>2</sub>N后,经适当温度退火,可有效提高电阻率达7~8个数量级;经高温(600~700)退火,电阻率仍比注入前高3~4个数量级。背散射/沟道研究表明:注入造成的损伤未完全恢复,产生高电阻率的机制有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Pearton SJ, Vartuli CB, Zolper JC, et al. Ion Implantation Doping and Isolation of GaN[J]. Appl Phys Lett, 1995, 67(10): 1435~1437.
- [2] 姚淑德,孟兆祥,周生强,等. 新型光电材料Ga<sub>2</sub>N的离子束辐照改性与结构分析[J]. 原子能科学技术, 2000, 34(增刊): 41~44.
- [3] Cao XA, Sinh RK, Pearton SJ, et al. Ultra High Temperature Rapid Thermal Annealing of GaN[J]. Mat Sci Semi Processing, 1998, 1: 267~270.
- [4] Pearton SJ, Abernathy SR, Wilson RG, et al. Effects of Hydrogen Implantation Into GaN[J]. Nucl Instrum Methods, 1999, B-147: 171~174.