光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021070104

# 基于氮化镓单晶的垂直 p-i-n 二极管性能研究

张　敏[1,2]，金浩妮[2,3]，万　飞[2]，宗　平[2]，白　煜[1,2]*

（西安交通大学 1. 机械工程学院，西安 710000；
2. 纳米科学与工程技术学院(苏州)，江苏 苏州 215123；3. 材料科学与工程学院，西安 710000）

**摘　要：** 利用高质量自支撑 GaN 衬底，通过外延方法制备了垂直结构的 GaN 基 p-i-n 型二极管结构。通过对材料结构、杂质浓度分布以及对器件整流特性的研究，探究了影响垂直结构器件特性的关键因素。结果表明，在同质外延的制备过程中，衬底表面的粗糙程度将使制备的环形结构具有不规则形状，这种不规则电极对垂直结构器件的性能将产生不利影响；此外，多种杂质在界面处聚集，进而形成平面漏电通道，是降低器件耐压值的主要因素。

**关键词：** GaN；p-i-n；垂直结构；反向漏电

**中图分类号：** TN364　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0620－04

## Study on Vertical GaN p-i-n Diode Based on Free-standing GaN Substrates

ZHANG Min[1,2], JIN Haoni[2,3], WAN Fei[2], ZONG Ping[2], BAI Yu[1,2]

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an 710000, CHN;
2. School of Nanoscience and Engineering Technology (Suzhou), Suzhou 215123, CHN;
3. School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, CHN)

**Abstract:** A GaN-based p-i-n diode with vertical structure was fabricated with epitaxial method by using high quality free-standing GaN substrate. Based on studing the material structure, impurity concentration and current-voltage characteristics, the key factors affecting the performance of the vertical structure device were analyzed. Experimental results indicate that the roughness of the surface will cause the irregular shape of the annular structure, which plats a negative effect on the ohmic contact and performance of the vertical structure device. In addition, during the growth process, a variety of impurities will gather at the interface and form a planar leakage channel, which will dominantly limit the performance of the device.

**Key words:** GaN substrates; p-i-n; vertical structure; leakage current

## 0　引言

宽禁带半导体材料氮化镓(GaN)因具有禁带宽度大、饱和电子漂移速度高、临界击穿电场大、化学性质稳定等特点，一直是高压、高温、高频功率电子器件应用领域的研究热点[1]。近年来，垂直结构 GaN 基高功率器件，因具有更好的可扩展性、更高的电流密度和击穿电压以及更低的陷阱密度，而引起广泛研究。特别是随着 GaN 材料生长过程中各种应力和缺陷控制技术的发展，位错密度大幅降低(达到 $10^4$～$10^6$ $cm^{-2}$)，这为获得具有更高频率特性和更高功率的垂直结构 GaN 基功率器件提供了新的研发机遇[2-4]。作为 GaN 基功率器件基础的 p-i-n 结构是大多数半导体器件的基本组成部分，例如用于开关应用的发光二极管(LED)、激光器、二极管和 MOSFET。其电学击穿性能主要依赖于两个方面：一是 UID GaN 漂移层的厚度和掺杂浓度，二是制备工艺。优化方向主要包括表面钝化层和电极终

**收稿日期：**2021－07－01.
**基金项目：**国家自然科学基金项目(22005237)；江苏省自然科学基金项目(BK20191188，BK20190221)；江苏省引智项目(BX2020032).
* **通信作者：**白　煜

端保护结构。然而，目前的相关研究还主要集中在横向结构。少数利用垂直结构制备的相关器件，也由于衬底较高的位错密度以及杂质缺陷浓度，性能远低于横向结构器件[5-6]。

鉴于此，本文通过同质外延方法，在低位错密度 GaN 衬底上制备垂直 p-i-n 结构，同时通过制备不同尺寸的圆形有源区，探究垂直结构器件的性能以及材料物性对器件性能的影响。

# 1　器件制备与测试

## 1.1　GaN 基垂直 p-i-n 结构制备工艺

本实验以氢化物气相外延方法（HVPE）生长的低位错密度（$\sim 10^5$ $cm^{-2}$）n 型 GaN 单晶为衬底，通过金属有机化学气相沉积（MOCVD）方法同质外延生长 UID GaN 层、$p^-$-GaN 层和 $p^+$-GaN 层。器件各层厚度和掺杂浓度如图 1 所示。有源区电极结构为圆形，直径分别为 50，100 和 150 μm，终端保护结构为场板结构。

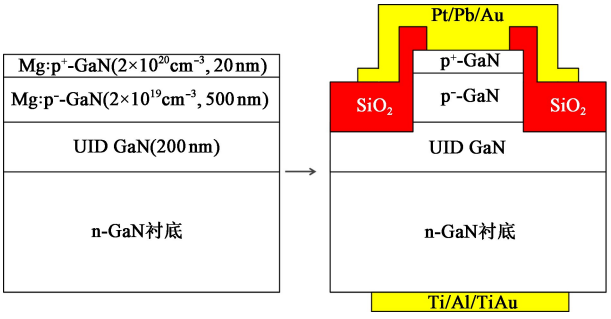
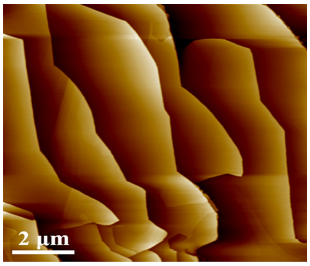



图 1　制备的垂直 GaN p-i-n 二极管结构示意图

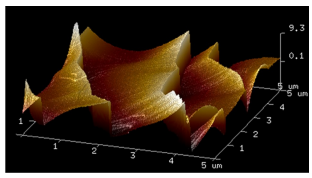
## 1.2　垂直结构材料性质分析

### 1.2.1　表面形貌

首先，利用原子力显微镜（AFM）对器件表面形貌进行测试，结果如图 2，可见 p 型 GaN 层表面并没有出现 MOCVD 经典的台阶流生长模式，表面粗糙度最高达到 3 nm。表面粗糙度将造成局域的电场增加，同时对电极的制备工艺造成影响，进而影响器件整流特性。




（a）　10 μm×10 μm

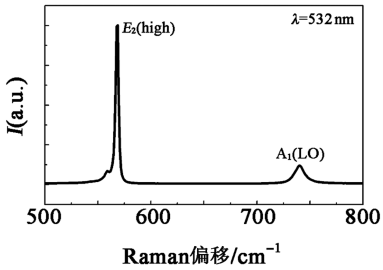


（b）　5 μm×5 μm 三维图

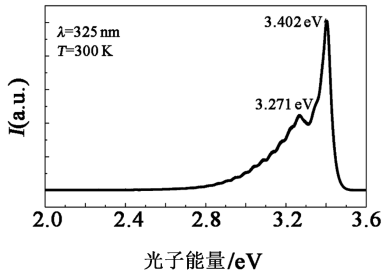
图 2　p-i-n 样品 AFM 表面相貌图

### 1.2.2　光学特性

为了探究垂直结构器件中的材料结构特性，首先利用拉曼（Raman）光谱和光致发光（PL）光谱对样品的光学性质进行表征，结果如图 3 所示。由图 3(a)可知，应力相关的 $E_2$(high)峰位于 567.6 $cm^{-1}$，表明样品中几乎不存在应力。图 3(b)中，带边发光峰位于 3.402 eV 处，该结果表明材料基本处于非应力状态，与 Raman 测试结果一致；位于 3.271 eV 处的发光峰，主要来源于掺杂的 Mg 在 GaN 中形成受主中心，该缺陷能级相关的施主-受主对由复合跃迁引起；除此之外，并没有出现其他与缺陷相关的发光峰，表明材料具有较高的晶体质量和较低的载流子捕获缺陷能级。




（a）　Raman 光谱图




（b）　PL 光谱图

图 3　p-i-n 样品光学表征结果

### 1.2.3　杂质浓度分布

同质外延生长的 GaN 样品再生长界面的杂质分布对器件的性能将产生较大影响，为了探究样品界面处杂质的分布情况，利用二次离子质谱（SIMS）对样品开展了杂质浓度测试，结果如图 4 所示。外延层界面处 Mg，Si，C，O，H 元素均出现了浓度突然

增大的现象。沿着外延层生长的方向，在 p-GaN 层中 Si，O 和 C 的浓度分别逐渐降低，与此相反，Mg 和 H 的曲线变化呈相反的趋势，浓度逐渐升高。

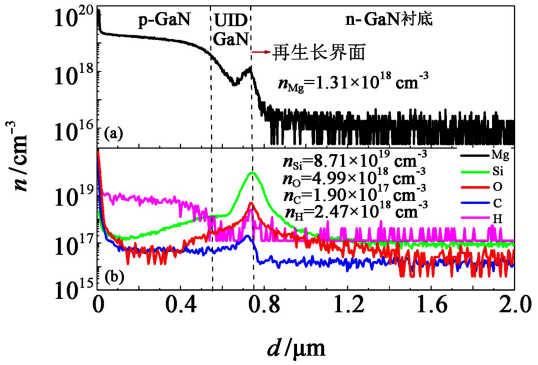



图 4 p-i-n 样品的 SIMS 结果。(a)Mg 元素沿深度方向的浓度分布曲线；(b)Si，O，C 和 H 杂质元素沿深度方向的浓度曲线

UID GaN 层生长中，Si，C 和 O 杂质与材料的生长过程和生长环境密切相关。在外延生长加热过程中，杂质元素更易于在表面聚集或捕获，进而使浓度升高[7]。而在界面处浓度突然升高，主要由刻蚀工艺造成的衬底材料粗糙度增加引起[8]。这一结果与 AFM 测试的结果一致。Mg 元素在 UID GaN 层中出现，则主要是由于生长过程中 p-GaN 层中的 Mg 向该层扩散引起[9]。同样地，界面处 Mg 浓度的突然升高和表面粗糙度有关。H 元素主要来自于载气、有机 Ga 源和 $NH_3$。在 UID GaN 层中，H 由于扩散势垒高，在界面处浓度增加不显著。而在 p-GaN 层中，Mg 和 H 之间形成了 Mg－H 复合物，出现氢钝化现象，因此在各层中具有相似的变化趋势[10]。由上述测试结果发现，利用该生长和加工工艺将在再生长界面处引入一个由杂质引起的、厚度约为 62 nm 的导电层。该导电层的存在，将减小器件中的耗尽层宽度，进而影响器件的整流特性。

### 1.3 垂直型 p-i-n 二极管电学测试结果分析

#### 1.3.1 正向 *I-V* 曲线

首先对器件的正向开启性质进行了表征，直径为 50 μm 的器件正向 *I-V* 曲线如图 5 所示。当 $V_{on}$ 为 4 V 时，电流密度约为 $3.8\times10^{-4}$ A/cm$^{-2}$，器件的开启电压远大于 GaN 的禁带宽度值，整流效果并不理想。通常正向开启电压较低的主要影响因素为 p-GaN 表面金属电极和 GaN 表面之间不良的欧姆接触工艺[11]。因此，通过对器件表面进行观察，发现金属电极层与 $SiO_2$ 接触的地方均出现一些小气泡结构，图 5 插图为显微镜拍摄到的器件表面照片，图中鼓起的小泡使得器件边缘并没有形成场板结构，反而使得金属电极的边缘形成了不规则形状，这种不规则的电极将对开启电压造成不利影响。这些小气泡的出现，一方面与电极制备工艺相关，另一方与材料表面的平整度也密切相关。

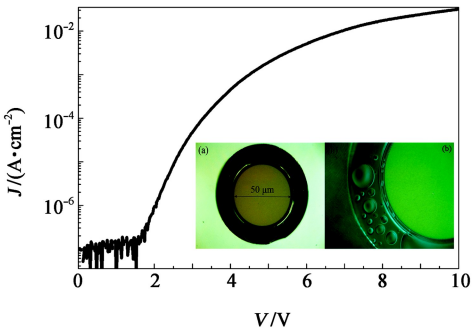



图 5 器件正向 *I-V* 曲线。插图为 p-i-n 二极管显微镜照片及其边缘放大图

#### 1.3.2 反向 *I-V* 曲线

对器件的反向击穿特性进行了测量，反向 *I-V* 曲线如图 6 所示。器件的最大击穿电压并非随着电极直径的增加而增加。100 μm 直径器件的击穿电压最大，约为 340 V。依据其 *I-V* 曲线分析得，其漏电流主要与位错诱导的隧道效应相关[12]。尽管单晶 GaN 衬底具有较低的位错密度，但是在外延生长过程中外延层中的位错密度有所增加。此外，尽管场板尺寸的增加会提高垂直结构器件的耐压特性，然而增加的电极面积会增加位错对器件漏电的影响几率。因此，选择正确的场板尺寸，也是器件性能提高的重要因素。在器件制备过程中，ICP 刻蚀产生的侧壁损伤同样可以造成漏电流增大，但是并非主要原因。随着反向电压的增大，直径为 150 μm 的 p-i-n 二极管电流密度先减小到 $10^{-5}$ A/cm$^2$，然后逐渐增大至 $10^{-1}$ A/cm$^2$，表明器件在发生击穿之前，电流密度的增大主要是由陷阱辅助的雪崩效应引起的[6]。

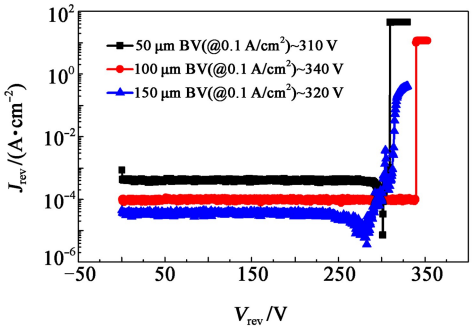



图 6 器件的反向 *I-V* 曲线

通过将 GaN p-i-n 二极管的物性与电学结果结合进行分析，得出击穿电压较低的原因主要：1）器件表面粗糙度很大，在表面尖峰区域形成局域化增强的电场，使得器件的漏电流突然变大，发生击穿；2）不规则的电极边缘容易导致电场集中效应；3）二次外延生长界面处由于杂质元素的聚集，造成载流子浓度升高，形成平面漏电通道，同时耗尽层宽度减小，由此造成击穿电压的降低。

## 2　结论

利用外延方法在低位错单晶 GaN 衬底上生长 p 型 GaN 外延层，制备了不同场板尺寸的垂直 GaN p-i-n 二极管结构，器件最高反向击穿电压约为 −340 V。通过对器件制备工艺、材料物性和电学性能进行初步探索，重点分析了器件表面粗糙度、漂移层厚度和掺杂浓度对垂直结构器件性能的影响，为高质量 GaN 基垂直功率器件的制备提供了重要参考依据。

**参考文献：**


[1] 梁志斌，张齐轩，许朝军，等. 基于银纳米薄膜欧姆接触的高波长选择性紫外探测器研究[J]. 半导体光电，2020，41(1)：67-70.
Liang Z B，Zhang Q X，Xu Z J，et al. High wavelength-selective ultraviolet detector based on Ag-nanofilm ohmic contact[J]. Semicon. Optoelec.，2020，41，207(1)：67-70.

[2] Armstrong A M，Allerman A A，Fischer A J，et al. High voltage and high current density vertical GaN power diodes [J]. Electron. Lett.，2016，52(13)：1170-1171.

[3] Gu H，Hu C，Wang J L，et al. Vertical GaN Schottky barrier diodes on Ge-doped free-standing GaN substrates[J]. J. Alloy Compd.，2019，780：476-481.

[4] Sarker P，Kelly F P，Landi M，et al. Design of selective-area growth compatible fully-vertical GaN p-i-n diodes with dielectric vertical sidewall appended edge termination schemes [J]. Semicond. Sci. Tech.，2021，36(3)：035204.

[5] Qi M，Nomoto K，Zhu M D，et al. High breakdown single-crystal GaN p-n diodes by molecular beam epitaxy[J]. Appl. Phys. Lett.，2015，107(23)：287.

[6] Cho Y J，Hu Z Y，Nomoto K，et al. Single-crystal N-polar GaN p-n diodes by plasma-assisted molecular beam epitaxy [J]. Appl. Phys. Lett.，2017，110(25)：R10024.

[7] Lee W，Ryou J H，Yoo D，et al. Optimization of Fe doping at the regrowth interface of GaN for applications to Ⅲ-nitride-based heterostructure field-effect transistors[J]. Appl. Phys. Lett.，2007，90(9)：1389.

[8] Ryou J H，Liu J P，Zhang Y，et al. Surface treatment on the growth surface of semi-insulating GaN bulk substrate for Ⅲ-nitride heterostructure field-effect transistors [J]. Physica Status Solidi，2010，5(6)：1849-1851.

[9] Hu Z Y，Nomoto K，Qi M，et al. 1.1 kV vertical GaN p-n diodes with p-GaN regrown by molecular beam epitaxy[J]. IEEE Electron. Device Lett.，2017，38(8)：1071-1074.

[10] Chen Y D，Wu H L，Yue G L，et al. Analysis on the enhanced hole concentration in p-type GaN grown by indium-surfactant-assisted Mg delta doping[J]. Physica Status Solidi B，2015，252(5)：1109-1115.

[11] Nomoto K，Hatakeyama Y，Katayose H，et al. Over 1.0 kV GaN p-n junction diodes on free-standing GaN substrates[J]. Physica Status Solidi A，2011，208(7)：1535-1537.

[12] Shan L W，Liu Z Y，Lin M P，et al. Electrical analyses of GaN PIN diodes grown on patterned sapphire substrates[J]. J. Vac. Sci. Technol. B，2017，35(5)：052203.



**作者简介：**

**张　敏**（1984－），女，吉林长春人，博士，博士后，主要从事 GaN 单晶生长及功率器件研究；

**白　煜**（1980－），男，陕西西安人，博士，博士后，主要研究方向为功能型半导体薄膜材料与器件。


（上接第 619 页）


[10] 张雷博，侯　云，周　炜，等. 锰钴镍氧薄膜热敏型多元红外探测器研制[J]. 红外与毫米波学报，2014，33(4)：359-363.
Zhang Leibo，Hou Yun，Zhou Wei，et al. Development of bolometer detector array made of Mn-Co-Ni-O thin films[J]. J. Infrared and Millimeter Waves，2014，33(4)：359-363.

[11] 周　炜，欧阳程，吴　敬，等. 锰钴镍氧浸没式探测器制备及性能[J]. 红外与毫米波学报，2015，34(2)：161-165.
Zhou Wei，Ouyang Cheng，Wu Jing，et al. Fabrication and performance of Mn-Co-Ni-O thin film infrared detector[J]. J. Infrared and Millimeter Waves，2015，34(2)：161-165.

[12] Shivaprasad K，Sumesh V Shobha，et al. Infrared detectors based on thin film thermistor of ternary Mn-Ni-Co-O on micro-machined thermal isolation structure[J]. Sensors & Actuators A：Physical，2009，153(1)：69-75.

[13] Zerov V Y，Malyarov V G. Heat-sensitive materials for uncooled microbolometer arrays[J]. J. of Optical Technol.，2001，68(12)：939-948.



**作者简介：**

**刘福浩**（1987－），男，博士，副研究员，研究方向为半导体光电探测器。