

平面型 GaN p-n 结探测器的制备与性能

包西昌^{1,3}, 张文静^{1,3}, 刘诗嘉^{1,2}, 李超^{1,3}, 李向阳^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法在蓝宝石衬底上制备了 p-GaN 单晶薄膜. 高温 (>1100°C) 处理及未处理样品的双晶摇摆曲线测试表明高于 1150°C 会使材料的晶体质量明显变差, 这为平面型紫外探测器制备中的部分注入激活条件提供了选择依据. 通过 TRIM 软件优化了注入条件, 在选择性注入改型材料上成功制备了平面 GaN p-n 结型光电探测器. 测试结果表明: 室温下的零偏压暗电流密度为 4.7 nA/cm², 而 -5 V 偏压下的暗电流密度则达到了 67 μA/cm². 室温下的峰值响应率 0.065 A/W 出现在 368 nm 处. 在低温下器件的峰值响应明显降低, 80 K 时, 360 nm 处的峰值响应率仅为 0.039 A/W. 禁带宽度、串联电阻、内建电场等是引起探测器响应率随温度降低的原因.

关键词:平面型探测器; GaN; 离子注入; 电流特性; 响应率

中图分类号:TN364+.2 **文献标识码:**A

Fabrication and properties of planar GaN p-n detector

BAO Xi-Chang^{1,3}, ZHANG Wen-Jing^{1,3}, LIU Shi-Jia^{1,2}, LI Chao^{1,3}, LI Xiang-Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai 200083, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The annealing temperature dependence of FWHM of X-ray rocking curves of p-GaN layers grown on sapphire substrate by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) were studied. The results show that the quality of p-GaN became worse at annealing temperature higher than 1150°C. The implantation conditions were simulated by TRIM. The planar GaN p-n detectors were fabricated by Si implantation into p-GaN. The current-voltage (I-V) curve at room temperature shows that the dark current density is 4.7 nA/cm² at zero voltage bias. The peak responsivity is 0.065 A/W and 0.039 A/W at 368 nm at room temperature and 80 K, respectively. It decreases obviously with the decrease of temperature as a result of the changes in bandgap, series resistance, and built-in potential with temperature.

Key words: planar detector; GaN; Ion implantation; I-V characteristics; responsivity

PACS: 42.79.Pw

引言

紫外探测器在军事和民用方面均有重要的应用价值. 被用于生化传感器(臭氧探测、生物药剂探测等)、火焰探测(火警系统、导弹尾焰探测、燃烧引擎控制)、空间光通讯、发光器件校准、紫外成像等方面. 因此, 世界各国把紫外探测技术列为当今研究开发的重点课题. 目前, 主要投入使用的仍然是硅基

紫外光电管和光电倍增管. 前者灵敏度低且还需要附带滤光片, 后者则有体积笨重、易损坏、效率低等缺点, 因此日益发展的宽带隙半导体材料成为人们关注的重点.

宽带隙半导体紫外光探测器主要包括 GaN 基^[1-3]、ZnO^[4]、SiC^[5]紫外光电探测器. 其中 GaN 材料具有优良的热稳定性及化学稳定性、高击穿电压、高热导率及高的电子饱和迁移率, 更重要的是

GaN 基半导体材料具有宽的直接带隙,其室温禁带宽度在 3.4 ~ 6.2 eV 可调,用它制备的探测器对波长大于 365 nm 的光子不敏感,这个性质使它非常适用于在红外及可见光背景下辨别并探测紫外部分,这使得 GaN 基材料成为制备紫外探测器的理想材料之一.目前,p-n、p-i-n、肖特基等光伏 GaN 基紫外探测器都已成功研制,但由于 GaN 基半导体材料是采用绝缘的蓝宝石作为衬底,大部分器件是采用台面成型工艺制备,需要刻蚀掉部分材料来制备 n 型的欧姆接触电极.刻蚀工艺不可避免的引入表面损伤,使表面态密度显著增大,而且台面的侧面钝化工艺困难,这些问题为器件性能的进一步提高带来了难度.传统硅工艺采用离子注入的方法来制备器件,避免了刻蚀损伤,一系列的研究表明,GaN 中注入 Si 离子比较容易获得 n-GaN^[6~8].这些为制备高性能平面型 GaN 基探测器成为可能.

在研究高温退火对 p-GaN 的影响,Si 离子注入条件的选择等基础上,重点报道了 p-GaN 部分区域改型成功制备的平面型 GaN p-n 结型紫外光电探测器及其性能.为今后采用平面工艺制备光伏型宽禁带半导体探测器奠定了基础.

1 实验过程

1.1 材料的制备

实验用的 p-GaN 材料是采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)方法在单抛的 2 英寸(0001)晶向蓝宝石衬底上制备的 p-GaN 单层薄膜.外延层生长之前,首先在蓝宝石衬底上生长一薄的 AlN 缓冲层,然后再生长一层厚度约为 1.5 μm 的 Mg 掺杂的 GaN 层(载流子浓度为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$),其结构与器件示意图如图 1 所示.

1.2 注入与退火条件的选择

器件的结构设计为正照射式,所以要想使入射光尽可能到达结区,必须控制改型材料的厚度,即控

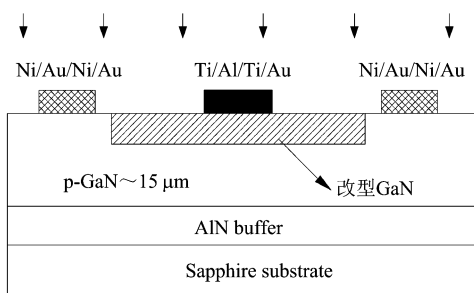


图 1 探测器的侧面结构示意图

Fig. 1 Cross sectional schematic diagram of photo detector

制注入能量.我们首先采用 TRIM 软件对注入条件进行了模拟.图 2 给出了注入能量为 100 keV 时的注入深度模拟的结果.从图中可以看出其注入深度大约为 0.13 μm,这样的深度可以使大部分光不被 n^+ -GaN 吸收而进入结区.为了形成均匀的离子分布,采用了双重叠加注入的方式,注入条件(注入能量/剂量)分别为:50 keV/ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 100 keV/ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

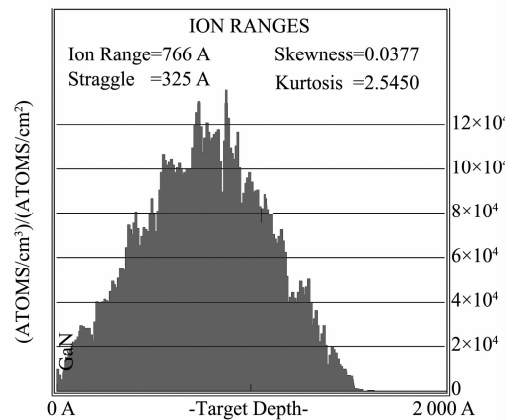


图 2 100 keV 注入能量下离子在 GaN 中的深度分布

Fig. 2 The depth profile of the Si ion in GaN with the implantation energy 100 keV

注入后样品要经过高温退火,但是高温退火会使 p-GaN 的性能变差,通过对高温退火 p-GaN 的晶体质量的研究,可以较好的优化激活退火条件,分别对未退火,1150 °C,5 min 和 1200 °C,2 min N_2 氛围退火的 p-GaN 单晶薄膜进行了双晶摇摆曲线研究,其结果如图 3 所示.未退火样品的半高宽为 369 arcsec,经过 1150 °C,5 min 处理样品的半高宽为 372 arcsec,而经 1200 °C,2 min 退火样品的半高宽则为 388 arcsec,可以看出 1200 °C,2 min 时材料的质量明显变差.而据 Y. Irokawa 等人^[9]的研究结果以及前期的实验经验表明,温度在 1150 °C 和 1200 °C 退火时的激活效率并无多少区别.因此,我们制备平面结器件的激活退火是在 1150 °C,5 min, N_2 氛围下进行的.

1.3 器件的制备与测试

将部分区域改型的材料采用化学溶剂多步清洗后,在稀释的 HCl 水溶液中处理 10 min,高纯 N_2 吹干后,采用电子束蒸发的 Ni/Au/Ni/Au (20 nm/20 nm/20 nm/20 nm) 作为 p 电极,光刻后腐蚀,然后在空气中 550 °C 退火 3 min.电极退火后清洗表面,光刻,n 电极采用电子束蒸发的 Ti/Al/Ti/Au (50 nm/50 nm/30 nm/30 nm).后经 800 °C N_2 氛围中退火 1 min, n、p

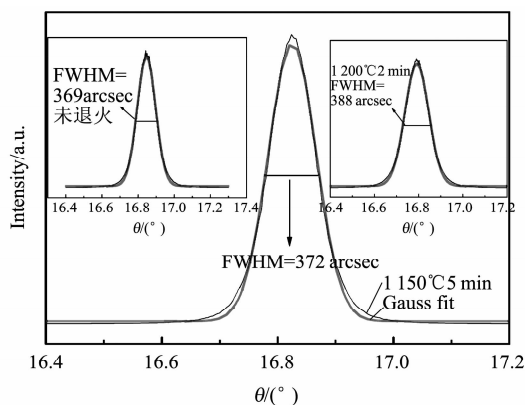


图3 未经高温退火与经过高温退火 p-GaN 的双晶摇摆曲线

Fig.3 X-ray rocking curves of p-GaN with and without high temperature treatment

电极均形成良好的欧姆接触. 探测器的制备工作完成.

紫外光电探测器的 I - V 特性是采用计算机控制的 Keithly 236 上完成的. 测试时样品封装在杜瓦瓶中后又置入暗的金属屏蔽盒, 以减少干扰. 响应光谱测量的测试系统使用的光源功率为 300 W 的氙灯, 氙灯发出的光进入单色仪, 然后照射到探测器上. 探测器出来的电流信号通过放大器转换成电压信号, 最后通过计算机从锁相放大器读数, 并经过紫外硅探测器标定来获得探测器的响应光谱.

2 器件性能分析

图 4 所示为室温下无光照时器件 I - V 曲线, 内插图是器件的电流密度随电压的变化关系. 从图中可以看出器件的开启电压大约为 2.5V. 零偏压下的电流密度仅为 4.7 nA/cm^2 , 随着反向偏压的增加, 暗电流有一个先迅速增大的 a 过程, 然后有增大趋缓的 b 过程, 当反向偏压增大到 5V 时的暗电流密度升至 $67\text{ }\mu\text{A/cm}^2$. 反向电流的变化分为两段, a 段电流随反向偏压增加快速上升是由于 p 区和 n 区一个扩散长度内的少子开始被迅速扫入空间电荷区引起的. b 段电流随电压增加明显变缓并趋于饱和, 但是与一般的器件相比暗电流明显偏大, 主要由以下 3 个原因引起: 1) 制备 p-GaN 过程的掺入的 Mg 杂质很容易与 H 产生络合物, 导致 Mg 的激活能非常高, 使其激活效率非常低. 未激活的 Mg 在 GaN 内作为深能级杂质起到复合中心的作用, 致使器件的漏电较大. 2) GaN 基单晶薄膜一般生长在绝缘的蓝宝石衬底上, 晶格失陪比较大, 较难生长出高质量单晶薄膜, 目前为止相

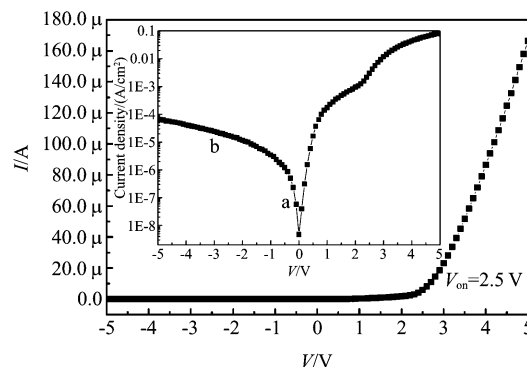


图4 室温下无光照时器件的 I - V 曲线

Fig.4 I - V curve of planar GaN p-n UV detector without illumination at room temperature

对高质量的 p-GaN 单晶薄膜的半高宽为 240 arcsec ^[10], 而从双晶摇摆曲线上可以看出我们采用材料的半高宽为 369 arcsec , 较差的材料质量是暗电流密度较大的原因之一. 3) 带有能量的离子进入半导体衬底, 与衬底中的原子核与电子碰撞而损失能量停下的过程会引入很多晶格损伤与注入杂质在后期退火中不能完全去除与激活. 特别是对于 GaN 基等宽禁带半导体材料, 注入引入的损伤以及高的杂质激活能, 很难在退火过程中完全的激活注入离子及消除晶格损伤. 这些损伤以及未激活杂质在半导体内起到俘获能级的作用, 使暗电流明显的增大.

平面型 GaN p-n 结紫外光电探测器在室温及 80 K 下的响应光谱曲线如图 5 所示. 从图中可以看出, 室温下器件在 368 nm 处的峰值响应率为 0.065 A/W , 而在 80 K 时的峰值响应在 360 nm 处, 其值降至 0.039 A/W . 还可以看到其截止边向短波方向移动, 因为随着温度的降低, GaN 材料的禁带宽度逐渐变大, 这也是器件响应率在低温下变小的原因. 探测器的室温响应率与背照射 p-i-n 探测器相比偏小^[11], 模拟的结果表明结深有 $0.13\text{ }\mu\text{m}$, 部分光在入射到结深之前已被 n^+ -GaN 吸收, 这是引起响应率偏低的主要原因^[11]. 另外, p-GaN 层中的掺杂剂 Mg 的激活能很高, 大部分以深能级杂质的形式存在, 以及离子注入引入部分损伤与杂质等因素导致少子寿命很低, 使器件的响应降低. 而其响应率随温度的降低有明显的减小, 这与以下几个原因有关: 1. 随着温度的降低, GaN 材料的禁带宽度变大, 使其响应率变小. 2. 温度降低, 材料的串联电阻会显著的增大, 使器件的收集信号的能力明显降低. 3. 低温下载流子浓度降低, 从而影响内建电场. 除此之外材料的反射率、少子寿命以及材料的吸收系数等参数随

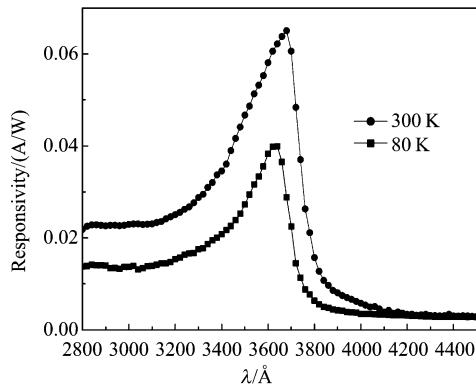


图5 室温及80K,零偏下平面型 GaN p-n 结探测器的响应光谱

Fig. 5 Zero-bias spectral response of planar GaN p-n UV photodiodes measured at room temperature and 80 K

温度的变化也有相应的变化,这些都可能影响材料的响应率.但是哪一项是关键因素或是其它因素引起的,需要进一步的实验以及理论验证.

3 结论

采用 MOCVD 法在蓝宝石 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 衬底上制备的 p-GaN 单晶薄膜材料及通过 SRIM 软件模拟的优化条件、双晶摇摆曲线选择的注入退火条件,利用注入的方法实现了部分 p-GaN 材料改型成 n^+ -GaN. 分别在 p-GaN 和 n^+ -GaN 上制备接触良好的欧姆电极,成功的制备了平面型 GaN p-n 结紫外光电探测器. 测试结果表明:无光照时零偏压下器件的电流密度为 4.7 nA/cm^2 ,制备的紫外探测器在室温下 368 nm 的峰值响应率为 0.065 A/W . 温度降到 80 K 时 360 nm 处的峰值响应率仅为 0.039 A/W ,这一现象由禁带宽度、串联电阻、内建电场等因素引起.

(上接 231 页)

- [7] Shen L, Wu R Q, Pan H, et al. Mechanism of ferromagnetism in nitrogen-doped ZnO: First-principle Calculations [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **78**(7):3306.
- [8] Yu C F, Lin T J, Sun S J, et al. Origin of ferromagnetism in nitrogen embedded ZnO: N thin films [J]. *Phys. D*, 2007, **40**:6497—6500.
- [9] Dev P, Xue Y, Zhang P H, et al. Defect-Induced Intrinsic Magnetism in Wide-Gap III Nitrides [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100** (11):7204.
- [10] Makarova T L, Sundqvist B, Hohne R, et al. Magnetic carbon [J]. *Nature*, 2001, **413**(6857):716—718.
- [11] Coey J M D, Venkatesan M, Fitzgerald C B, et al. Ferromagnetism of a graphite nodule from the Canyon Diablo

REFERENCES

- [1] Malachowski M J. Impact of energy band-gap grading on responsivity of an $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ultraviolet p-n detector [J]. *Solid-State Electronics*, 1998, **42**(6):963—967.
- [2] Parish G, Keller S, Kozodoy P, et al. High-performance (AlGa)N-based solar-blind ultraviolet p-i-n detectors on laterally epitaxially overgrown GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(2):247—249.
- [3] Zhou Y, Ahyi C, Tin C C, et al. Fabrication and device characteristics of Schottky-type bulk GaN-based “visible-blind” ultraviolet photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**:121118.
- [4] Young S J, Ji L W, Chang S J, et al. ZnO-based MIS photodetectors [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **135** (2):529—533.
- [5] Chen X P, Zhu H L, Cai J F, et al. High performance 4H-SiC-based ultraviolet p-i-n photodetector [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**:024505.
- [6] Eiting C J, Grudowski P A, Dupuis R D, et al. Activation studies of low-dose Si implants in gallium nitride [J]. *Appl. Phys. Lett.*, **73**(26):3875—3877.
- [7] James A, Fellows Y K, Yeo M Y, et al. Electrical and Optical Activation Studies of Si-Implanted GaN [J]. *J. Electron. Mater.*, 1999, **34**(8):1157—1164.
- [8] Sheu J K, Tun C J, Tsai M S, et al. n^+ -GaN formed by Si implantation into p-GaN [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91** (4):1845—1848.
- [9] Irokawa Y, Fujishima O, Kachi T, et al. Electrical activation characteristics of silicon-implanted GaN [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**:083505.
- [10] RAN Jun-Xue, WANG Xiao-Liang, HU Guo-Xin, et al. Study on MOCVD-grown Mg-doped GaN by annealing treatment [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (冉军学, 王晓亮, 胡国新, 等. MOCVD 生长 Mg 掺杂 GaN 的退火研究. *半导体学报*), 2005, **26**(3):494—497.
- [11] YOU Da, TANG Ying-Wen, ZHAO De-Gang, et al. Characteristics of a front-illuminated visible-blind UV photodetector based on GaN p-i-n photodiodes with high quantum efficiency [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (游达, 汤英文, 赵德刚, 等. 高量子效率前照式 GaN 基 p-i-n 结构紫外探测器. *半导体学报*), 2005, **27**(5):896—899.
- meteorite [J]. *Nature*, 2002, **420**:156—159.
- [12] Kusakabe K, Maruyama M. Magnetic nanographite [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **67**(9):2406.
- [13] Jones R O, Gunnarsson O. The density functional formalism, its applications and prospects [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1989, **61**:689.
- [14] Perdew J P. Atoms, molecules, solids and surfaces: Applications of the generalized gradient approximation for exchange and correlation [J]. *Phys. Rev. B*, 1992, **46**:6671.
- [15] Perdew J P, Burke K, Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**:3865.