

p-i-n 结构 GaN 光电探测器性能的研究

周脉鱼¹ 周蕾² 郑南¹ 韩宇¹

(¹ 空军航空大学特种专业系, 吉林 长春 130000)
(² 吉林市计量测试技术研究院, 吉林 吉林 132013)

摘要 近年来,可见盲与太阳盲光电探测器在火灾监控、太空通信和导弹尾焰探测等方面的应用引起了越来越多的关注。由于氮化镓(GaN)是直接宽带隙半导体材料,所以成为了在可见区与紫外区的光电器件的首选材料,而 p-i-n 结构的器件因其响应度高、暗电流低、便于集成等优点倍受人们的青睐。采用金属有机气相外延(MOCVD)法制备了 p-i-n 结构的 GaN 紫外光电探测器。在此基础上,采用 N₂ 气氛下热退火处理的方法,提高了 p 型 GaN 层的载流子浓度,从而降低了器件的暗电流。器件在 1 V 偏压下,暗电流仅为 65 pA。器件在 1 V 偏压下的最大响应度值出现在 361 nm 处,大小为 0.92 A/W。

关键词 光学器件;光电探测器;氮化镓;响应度;p-i-n 结构;暗电流

中图分类号 O472 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0117001

Investigation on Properties of p-i-n Structured GaN Photodetectors

Zhou Maiyu¹ Zhou Lei² Zheng Nan¹ Han Yu¹

(¹ Special Service Department, Aviation University of Air Force, Changchun, Jilin 130000, China)
(² Jilin Institute of Metrology Technology, Jilin, Jilin 132013, China)

Abstract Great attention has been received in recent years for the applications of visible-blind and solar-blind photodetectors, such as flame sensing, secure space-to-space communications, and missile plume detection. Due to the direct wide band gap, GaN is an excellent choice for optoelectronic devices in the visible and the ultraviolet (UV) portion of the spectrum. The p-i-n structure is an attractive candidate for an UV photodetector because of its high responsivity, low dark current and the facility in integration. The p-i-n structured GaN photodetectors have been fabricated on sapphire substrates by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) in this paper. Furthermore, the carrier density of p-type GaN layer can be enhanced by thermal treatment in N₂ ambience, which results in reducing dark current. The dark current of the device is only about 65 pA at 1 V bias. The maximum responsivity of the device is 0.92 A/W at 361 nm under 1 V bias.

Key words optical devices; photodetector; GaN; responsivity; p-i-n structure; dark current

OCIS codes 040.5160; 040.5350; 160.6000; 160.1890

1 引 言

紫外探测技术是继红外和激光技术之后发展起来的又一军民两用技术。因为紫外探测器能探测到飞机、火箭和导弹等飞行目标的尾焰或羽焰中的大量紫外辐射,所以在军用方面可以应用于空间防务和报警系统^[1];在民用方面可以应用于火灾监控、太空通信和环境污染的检测等^[2,3],具有广阔的应用前景。由于半导体材料的研究较为成熟^[4~7],因而人们采用半导体作为紫外探测器的制备材料。目前研究最为广泛的是硅基紫外光电二极管。硅基紫外

光电二极管需要附带昂贵的滤光片,并需要在高压下工作,而且体积笨重、效率低、易损坏且成本较高,对实际应用有一定的局限性^[1]。因此,人们开始关注宽带隙的半导体紫外光电探测器。在众多的半导体材料中,GaN 成为了首选,这主要是由其本身突出的性能决定的:1) 直接宽带隙半导体材料,GaN 基的紫外光电探测器,在可见光和红外范围没有响应,这对在红外和可见光背景下探测紫外光有特殊意义。2) GaN 的热导、热稳定性、化学惰性良好,且由于 GaN 抗辐射能力很强,适合制造复杂结构的器

收稿日期:2010-05-07; 收到修改稿日期:2010-07-05

作者简介:周脉鱼(1963—),男,副教授,硕士生导师,主要从事遥感成像技术方面的研究。E-mail:zhoumaiyou@126.com

件。3) 对 GaN 基紫外光电探测器研究已经有了一定的开展^[8~12]。所以 GaN 基紫外光电探测器格外受到人们的青睐。而众多类型的探测器中,光电导型探测器虽然内部增益大,制作简单,但是它需要偏置,暗电流大,且速度慢。肖特基势垒二极管漏电流较大,且其耗尽区较窄,在耗尽区外的光生载流子大部分复合对光电流没有贡献,效率低。而 p-i-n 结构的光电探测器能克服这些困难并有其自身的优点,它的有效区可以做得比较厚,使大部分大于禁带宽度的光子在此区吸收。并且,此结构的探测器还具有暗电流低、输入阻抗高、工作频率大、制作技术与半导体平面工艺相容等优点。

D. Walker 等^[13]报道了采用金属有机气相外延(MOCVD)方法制备的 GaN 基 p-i-n 结构的紫外光电探测器,在 5 V 偏压下响应度小于 0.20 A/W。B. Butun 等^[14]报道了相同结构的 GaN 基紫外光电探测器,器件在 5 V 偏压下,最大响应度为 0.23 A/W。就目前来讲,人们对 GaN 紫外光电探测器的研究还处在基础研究阶段,虽然取得了一定的成果,但还需要进一步的加强。尤其是 p 型掺杂比较困难,制约了响应度的提高。J. Neugebauer 等^[15]从理论上预言了 Mg-H 复合体的存在,在 MOCVD 生长中,存在大量的 H,并且生长的温度比较高,H⁺的形成能比氮空位 V_N 低,更容易形成,从而抑制了 V_N 的产生,提高了 p 型掺杂材料 Mg 的浓度,但同时 Mg 也几乎完全被 H⁺ 所补偿,必须经过再处理才能激活。为此,本文通过 N₂ 气氛下快速退火的方法,得到高质量的 p 型 GaN。并通过 MOCVD 法构建 p-i-n 结构 GaN 薄膜,获得在 1 V 偏压下,响应度达到 0.92 A/W 的紫外光电探测器,高于目前大多数报道的相同结构的 GaN 紫外光电探测响应度。另外,对器件的其他性能也进行了深入的分析。

2 实 验

2.1 GaN 薄膜制备

所用的实验样品是通过 MOCVD 法在蓝宝石衬底上制备的。分别采用三甲基镓(TMGa)和氨气(NH₃)作为镓源和氮源。具体实验过程为:首先在蓝宝石衬底上生长 20 nm 左右的 GaN 缓冲层,然后生长 n 型 GaN 外延,外延的厚度约为 3 μm,其载流子的浓度为 3.1×10¹⁹ cm⁻³。接着生长本征 GaN 外延层,厚度约为 200 nm,其载流子浓度为 2.2×10¹⁶ cm⁻³。之后再生长 Mg 掺杂的 p 型 GaN

层,厚度约为 1.5 μm。在此基础上,对样品进行 1053 K 时 N₂ 气氛下的快速热退火处理,获得的载流子浓度约为 5.4×10¹⁸ cm⁻³。

2.2 器件的制备与测试

在构建的 p-i-n 结构 GaN 薄膜的基础上,通过交流测控溅射的方法制备得到电极薄膜。通过分子抽运真空,溅射腔的背底真空为 5.0×10⁻⁴ Pa。为了获得较好的欧姆接触电极,选用金属 Al 作为电极。Al 膜的厚度为 250 nm,根据经验,Al 膜的厚度控制在 250 nm 左右可以最大限度地透过更多的激发光,可以间接地提高器件内建电场的结效应。由于 Al 的功函数为 5.2 eV, GaN 的电子亲和势为 4.1 eV,能够较容易形成欧姆接触,所以金属 Al 成为了欧姆接触的优选材料,器件的结构如图 1 所示。

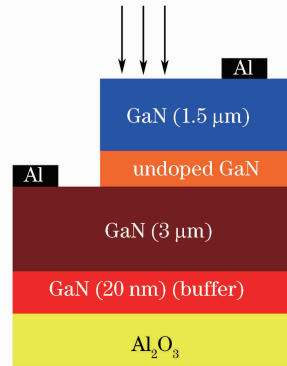


图 1 p-i-n 结构光电探测器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the p-i-n structured photodetector

所选用的光源为 150 W 氙灯,氙灯发出的光经过斩波器调制进入单色仪,然后照射到探测器上,探测器串联一个 50 Ω 的负载电阻,和电源构成回路,通过负载电阻取得的光电流信号,经过 Si 紫外探测器进行标定,从而得到 GaN p-i-n 结构紫外光电探测器的光响应曲线。I-V 特性曲线通过半导体特性分析仪(Keithley 4200)测量得到,而材料的微区光致发光采用 He-Cd 激光器 325 nm 线为激发光源,激发功率为 46 mW,针孔内径为 100 μm。样品的迁移率和载流子浓度则由 Lake Shore's 7700A 系列霍尔效应测量系统测试得到。响应时间测试系统使用的光源为 266 nm 的 Nd:YAG 激光器,激光器的脉冲宽度为 10 ns。

2.3 结果与讨论

对于 p-i-n 结构的 GaN 紫外光电探测器而言,p 型材料的质量是器件性能的瓶颈。这主要是由于 Mg-H 复合体的存在。为此,将制备的样品置于 N₂ 气氛的管式炉中,在 973~1073 K 下快速退火,获得

了不同的 p 型载流子浓度和迁移率,如表 1 所示。退火之所以可以提高空穴的浓度,主要是因为 Mg-H 键在一定温度下即可分解,然后, H 必须被移走(到表面或衬底)或中和掉,否则降温时又会形成 Mg-H 复合物,而在 N₂ 气氛下可以将其带走,并且不易形成对 Mg 的钝化。退火温度为 1053 K 时,空穴的浓度最高。为了进一步对样品的结晶质量进行表征,把 1053 K 快速退火的样品进行了室温光致发光光谱测试,如图 2 所示。样品的发光峰为 3.40 eV,发光峰的半峰全宽仅为 0.058 eV,并且样品没有明显的深能级发光,这说明实验制备的 p 型和 n 型 GaN 层的结晶质量非常好,为制备高性能的 p-i-n 型 GaN 紫外光电探测器提供可能。

表 1 p 型 GaN 不同退火温度的空穴浓度和迁移率

Table 1 Hole concentration and mobility of p-type GaN at different annealing temperatures

| Annealing temperature /K | Hole concentration / (10 ¹⁷ cm ⁻³) | Mobility / [cm ² /(V·s)] |
|--------------------------|---|-------------------------------------|
| 973 | 0.30 | 0.3 |
| 993 | 1.2 | 1.2 |
| 1013 | 5.8 | 3.1 |
| 1033 | 7.8 | 3.0 |
| 1053 | 54 | 5.6 |
| 1073 | 6.9 | 4.1 |

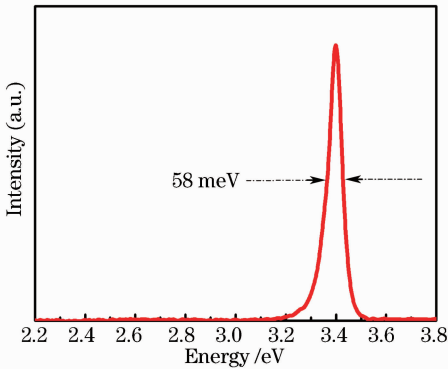


图 2 GaN p-i-n 同质结室温发光光谱

Fig. 2 Photoluminescence spectrum of GaN p-i-n heterojunction at room temperature

图 3 是 GaN p-i-n 同质结的室温吸收光谱。从吸收光谱中可以看到样品在 365 nm 处有一陡峭的吸收边,且吸收边没有拖尾现象。因为 GaN 为直接带隙半导体,通过绘制出 $(\alpha h\nu)^2$ 与光子能量 $h\nu$ 的关系曲线,得到 GaN 薄膜的带隙宽度为 3.4 eV,如图 3 中插图所示。样品单一陡峭的吸收边的位置与光致发光光谱结果一致,进一步说明实验制备的样品具有较好的结晶质量。

图 4 是原生和退火后的 GaN p-i-n 结紫外光电

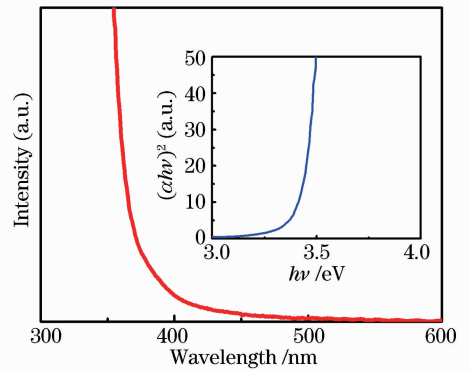


图 3 GaN p-i-n 同质结室温吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectrum of GaN p-i-n heterojunction at room temperature

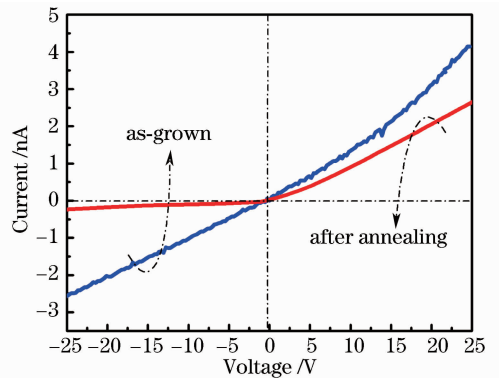


图 4 原生与退火后器件的暗电流曲线

Fig. 4 Dark currents of the as-grown and annealed devices

探测器在暗场条件下的 $I-V$ 特性曲线。退火后器件的整流效应明显比未退火的要强,说明退火后器件的结效应有所增强。从图 4 可看到,当偏压为 1 V 时,器件的暗电流仅为 65 pA。当偏压为 -30 V 时,退火后器件的反响电流仍然没有大于 500 pA,说明器件的表面漏电和边缘漏电都比较小。为了确定器件整流特性的来源,分别做了金属铝和 p 型 GaN, n 型 GaN 的 $I-V$ 特性曲线测试,如图 5 所示。可看到金属铝和 p 型, n 型 GaN 的接触均是良好的欧姆接触,排除了器件的整流效应来自于金属与半导体的接触,只能是器件的 p-i-n 同质结。但同时需要指出的是器件并没有获得良好的具有整流特性的 $I-V$ 曲线,这可能是由于半导体材料接触面的缺陷态造成的。

图 6 是退火后 GaN p-i-n 器件在 1 V 偏压下的光谱响应特性。同时也对原生的 GaN p-i-n 器件进行比较。未经退火器件的最高响应度仅为 0.08 A/W,并且没有陡峭的截止边。而经过退火器件的最大响应度位于 361 nm,达 0.92 A/W,高于

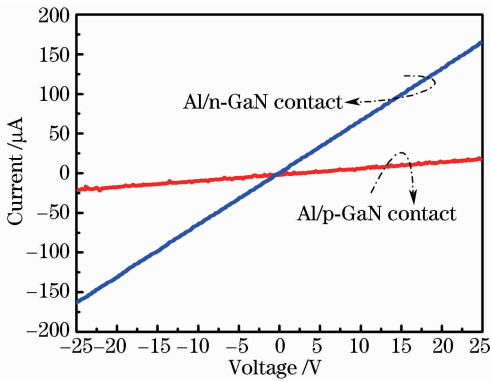


图 5 Al 电极与 p 型, n 型 GaN 的 I-V 特性曲线
Fig. 5 I-V characteristic curves of Al electrodes on the p- and n-type GaN

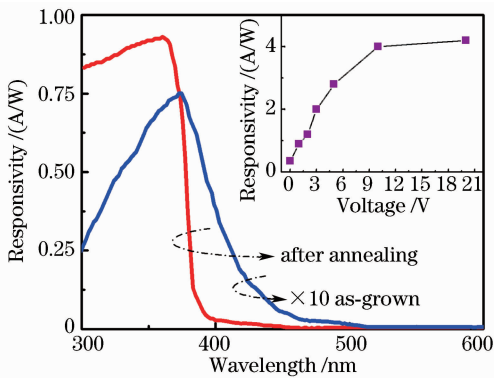


图 6 1 V 偏压下原生与退火后器件的响应度谱线
(插图退火后器件的响应度与偏压关系曲线)

Fig. 6 Responsivity spectra of the as-grown and annealed devices at 1 V bias (the inset is the relationship of the responsivity and applied bias of the annealed device)

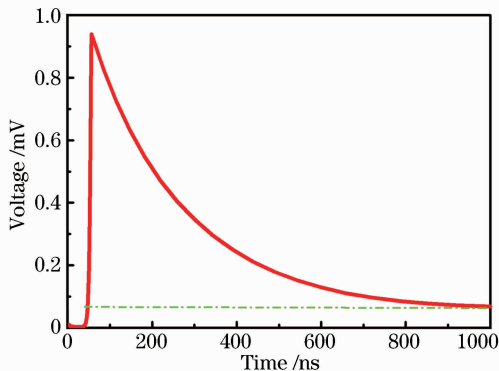


图 7 1 V 偏压下退火后器件的响应时间谱线

Fig. 7 Response time spectrum of the annealed devices at 1 V bias

目前多数报道的 GaN 基 p-i-n 结构紫外光电探测器的响应度^[13,14,16]。在波长短于响应度峰值位置的范围内,器件的响应度衰减得很少,说明器件在短波处仍然具有较高的量子效率,适合可见盲与太阳盲波

段的测试。图 6 的插图为器件的响应度与偏压的关系曲线,在 0 V 偏压下,器件的响应度为 0.35 A/W,对应的量子效率达到了 120%,说明器件中可能存在着增益效应。因此对器件的响应时间进行了测试,如图 7 所示,可看到下降沿有明显的拖尾现象,进一步证明了器件中有光导增益现象。同时说明器件还不是非常理想的光伏型器件,其性能有待进一步提高。

3 结 论

在蓝宝石衬底上采用 MOCVD 法制备了 p-i-n 结构的 GaN 薄膜,在此基础上通过在 N₂ 气氛下退火,提高了 p 型 GaN 薄膜的载流子浓度和迁移率。所制备的 p-i-n 结构的 GaN 紫外光电探测器在 1 V 偏压下,暗电流仅为 65 pA,并且器件在 1 V 偏压下,在 361 nm 处响应度的最大值达到了 0.92 A/W,并通过响应时间的测试证明了器件中存在着一一定的增益效应,还不是理想的光伏型器件。但器件的响应度高于目前大多数报道的相同结构的 GaN 紫外光电探测器的响应度。

参 考 文 献

- 1 M. Razeghi, A. Rogalski. Semiconductor ultraviolet detectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(10):7433~7473
- 2 I. Ferguson, C. A. Tran, R. F. Karlicer *et al.*. GaN and AlGaN metal-semiconductor-metal photoconductors [J]. *Material Science and Engineering B*, 1997, **50**(1):311~314
- 3 S. Averine, Y. C. Chan, Y. L. Lam *et al.*. Evaluation of Schottky contact parameters in metal-semiconductor-metal photodiode structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(2): 274~276
- 4 Zhou Yinhua, Tang Yingwen, Rao Jianping *et al.*. Improvement for extraction efficiency of vertical GaN-based LED on Si substrate by photo-enhanced wet etching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1):252~255
周印华,汤英文,饶建平 等. 光增强湿法刻蚀提高 Si 衬底垂直结构 GaN 基 LED 的出光效率[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1):252~255
- 5 Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7):963~971
罗毅,张贤鹏,王霖 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7):963~971
- 6 Xu Ke, Deng Peizhen, Qiu Rongsheng *et al.*. Epitaxial matching orientations of GaN with bare and nitrated Al₂O₃ (0001) substrates [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(4):369~373
徐科,邓佩珍,邱荣生 等. GaN/Al₂O₃(0001)的匹配机制及氮化的作用[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(4):369~373
- 7 Tong Xinglin, Zhang Qiguang, Hu Shaoliu *et al.*. Pulsed laser two-beam deposition of Mg-doped GaN thin films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):332~336
童杏林,郑启光,胡少六 等. 脉冲激光双光束沉积掺 Mg 的 GaN 薄膜的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):332~336
- 8 D. J. H. Lambert, M. M. Wong, U. Chowdhury *et al.*. Back

- illuminated AlGaIn solar-blind photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(12):1900~1902
- 9 N. Biyikli, T. Kartaloglu, O. Aytur *et al.*. High-speed visible-blind GaN-based indium-tin-oxide Schottky photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(17):2838~2840
- 10 Y. C. Lee, Z. Hssan, M. J. Abdullah *et al.*. Dark current characteristics of thermally treated contacts on GaN-based ultraviolet photodetectors [J]. *Microelectron. Eng.*, 2005, **81**(2):262~267
- 11 J. C. Carrano, T. Li, P. A. Grudowski *et al.*. Low dark current pin ultraviolet photodetectors fabricated on GaN grown by metal organic chemical vapour deposition [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(7):692~694
- 12 B. Yang, T. Li, K. Heng *et al.*. Low dark current GaN avalanche photodiodes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(12):1389~1391
- 13 D. Walker, A. Saxler, P. Kung *et al.*. Visible blind GaN p-i-n photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(25):3303~3305
- 14 B. Butun, T. Tut, E. Ulker *et al.*. High-performance visible-blind GaN-based p-i-n photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(3):033507
- 15 J. Neugebauer, C. G. Van de Walle. Hydrogen in GaN: novel aspects of a common impurity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(24):4452~4456
- 16 M. C. Chen, J. K. Sheu, M. L. Lee *et al.*. Planar GaN p-i-n photodiodes with n⁺-conductive channel formed by Si implantation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(20):203508