

# 高量子效率前照式 GaN 基 p-i-n 结构紫外探测器

游 达<sup>1,†</sup> 汤英文<sup>1</sup> 赵德刚<sup>2</sup> 许金通<sup>1</sup> 徐运华<sup>1</sup> 龚海梅<sup>1</sup>

(1 中国科学院上海技术物理所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 研究了  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$  异质结 p-i-n 结构可见盲紫外探测器的制备与性能. p 区采用 Al 组分含量为 0.1 的  $\text{AlGaIn}$  外延材料形成窗口层, 使 340~365nm 波段的紫外光可以直接透过 p 区到达 i 区并被吸收, 有效提高了这个波段的响应率与量子效率. 并且研究了不同 p 区  $\text{AlGaIn}$  外延层厚度对探测器性能的影响, 制备了两种不同 p 区厚度 (0.1 $\mu\text{m}$  和 0.15 $\mu\text{m}$ ) 的器件, 测试结果表明, p 区的厚度对 200~340nm 波段光吸收的量子效率影响较大, 而 i 区的晶体质量的提高可以有效提高 340~365nm 波段光吸收的量子效率. 并且当 p 区  $\text{AlGaIn}$  厚度为 0.15 $\mu\text{m}$  时, 器件的峰值响应率达到 0.214A/W, 在考虑表面反射时外量子效率高达 85.6%, 接近理论极限, 并且在零偏压时暗电流密度为 3.16nA/cm<sup>2</sup>, 表明器件具有非常高的信噪比.

**关键词:** p-i-n;  $\text{AlGaIn}$ ; 量子效率; 响应光谱

**PACC:** 7240; 7340M

**中图分类号:** TN23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)05-0896-04

## 1 引言

随着晶体生长技术的发展, GaN 材料已经受到世界各国科学家的极大重视, 由于 GaN 材料的宽禁带、低介电常数、耐高温、耐腐蚀、抗辐射等特性, 非常适合制作抗辐射、高频、大功率和高密度集成的电子器件<sup>[1]</sup>. 在光电探测器件方面, GaN 材料有着优良的性能, 首先 GaN 不吸收可见光, 制成的紫外探测器可以做到可见光盲, 不需要滤光系统, 而且不需要做成浅结, 这样可以大大提高量子效率. 另外 GaN 的抗辐射能力很强, 可以在探索宇宙奥秘方面发挥作用. 并且 GaN 基紫外探测器在宇宙飞船、火箭羽烟探测、火灾监测等领域中有重要的应用价值<sup>[2]</sup>, 世界上许多国家已经研制出多种结构的 GaN 基紫外探测器, 如光电导型<sup>[3,4]</sup>、p-n 结型<sup>[5]</sup>、p-i-n 型<sup>[6~8]</sup>、p-n 型<sup>[9]</sup>. 为了获得高速响应的光电探测器, 常采用 p-i-n 结构, 即在 pn 结中间插入一层具有一定厚度的、高阻率的本征层, 大部分入射光都在此层吸收. 1998 年, Yang<sup>[10]</sup> 等人首先研制出 p-i-n 结构的  $\text{AlGaIn}$  紫外探测器, 响应波长在 227~364nm 之间可调节, 外量子效率达 0.15 左右. 2002 年, Morkoc 等人比较了多种结构的 GaN 紫外探测器的特性.

本文介绍在单面抛光的蓝宝石衬底(0001)面上采用低压 MOVCD 方法依次生长 p-i-n 的外延结

构, 通过双晶摇摆曲线和透射光谱对材料进行了测试, 并以此结构来制备紫外器件, 测试了该结构器件的暗电流, 响应光谱等性能, 最后将器件的性能与材料质量联系在一起解释器件的量子效率大幅度提高的原因.

## 2 实验

GaN 基 p-i-n 紫外探测器的结构如图 1 所示. 具体制备过程是: 用低压 (1.013  $\times 10^4$  Pa) MOCVD 法在蓝宝石(0001)衬底上生长六方相 GaN, 使用的镓源为三甲基镓(TMGa), 氮源为高纯氨气( $\text{NH}_3$ ), 铝源为三甲基铝(TMAI), 载气为氢气( $\text{H}_2$ ). 首先在 550  $^\circ\text{C}$  生长一层低温 AlN 缓冲层(buffer), 厚度约为 20nm, 接着在 1100  $^\circ\text{C}$  生长高掺杂 n 型 GaN 外延层, 厚度约为 2.5 $\mu\text{m}$ , 掺杂浓度为  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ; 接着生长本征 GaN 外延层, 厚度约为 0.4 $\mu\text{m}$ , 电子浓度为  $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 然后再生长 p 型  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ , 激活后空穴浓度为  $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ <sup>[11]</sup>. 器件工艺采用标准的族器件工艺流程, p 层采用电子束蒸发 Ni/Au 做电极, 厚度为 240nm/240nm, 然后在空气中 550  $^\circ\text{C}$  退火 2min 形成欧姆接触. 然后刻蚀到 n 层, 光敏元的面积为 0.3mm<sup>2</sup>, 然后在光敏元上用磁控溅射法生长  $\text{SiO}_2$  钝化膜, n 层采用电子束蒸发 Ti/Al 做电极, 然后在 600  $^\circ\text{C}$  退火 1min 形成欧姆接触<sup>[13]</sup>.

† 通信作者. Email: youdaizy@163.com

2005-08-22 收到, 2005-12-29 定稿

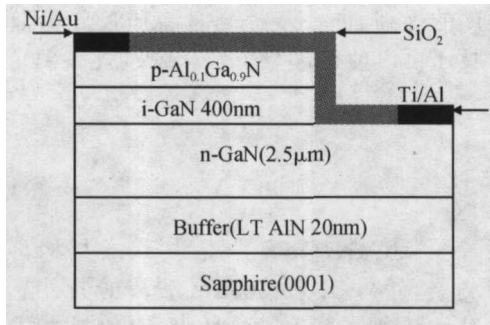


图 1 GaN 基 p-i-n 紫外探测器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the GaN p-i-n ultraviolet detector

为了评价外延材料的质量和光学特性,采用 Philips 公司生产的 X'pert-MRD 高分辨 X 衍射仪测量了外延材料的双晶摇摆曲线,并用 Keithly236 测试仪测量了该紫外探测器的  $I-V$  特性. 响应光谱测量的测试系统使用的光源为 300W 的氙灯,氙灯发出的光经过调制直接进入单色仪,然后照射到探测器上. 探测器出来的电流信号通过 Stanford 830 锁相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定标做图来获得响应光谱.

### 3 结果与分析

图 2 给出了不同 p 层 AlGaIn 厚度外延材料的双晶摇摆曲线的测试结果. 从图 2 双晶摇摆曲线的测试结果可以看出,当 p 层的厚度为 0.1 $\mu$ m 时,AlGaIn 的 FWHM 为 211.9, GaN 的 FWHM 为

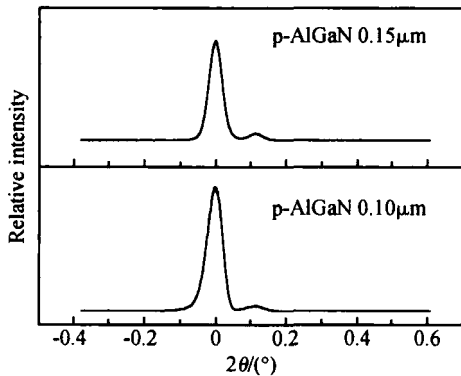


图 2 不同 p 层 AlGaIn 厚度的 p-i-n 结构外延材料的双晶摇摆曲线

Fig. 2 Rocking curves of the p-i-n epitaxials material with different p-AlGaIn thicknesses

171.0 ;p 层的厚度增加到 0.15 $\mu$ m 时,AlGaIn 和 GaN 的 FWHM 分别减小到 156.1 和 157.3 . 可以看出,随着 p 层 AlGaIn 的厚度的增加,AlGaIn 的单晶质量得到了大幅度的提高,几乎与下面 GaN 的质

量相媲美,但是 GaN 的质量与单层 GaN 的质量相比还是有有一定的下降<sup>[1,3]</sup>,这与多层外延材料中的位错和应变的相互作用的结果是一致的.

图 3 给出了 p 层厚度分别为 0.1 $\mu$ m 和 0.15 $\mu$ m 时器件的  $I-V$  曲线. 由图可以看出,经过 SiO<sub>2</sub> 钝化后,在零偏压时器件的动态电阻相差不大,都在 1.1  $\times 10^{11}$  左右,而随着反向偏压的增加,反向漏电流随之增大,但 p 层 AlGaIn 厚度 0.15 $\mu$ m 的器件的反向漏电流比厚度为 0.1 $\mu$ m 的器件明显小两个数量级左右. 并且,当 p 层的厚度为 0.15 $\mu$ m 时,器件的串联电阻为 440.7  $\Omega$ ,远小于 p 层厚度为 0.1 $\mu$ m 的器件的串联电阻 1670  $\Omega$ ,可以看出,由于顶层 AlGaIn 质量的提高和厚度的增加可以有效地减小器件的反向漏电流和串联电阻,这与 Hznzaz<sup>[14]</sup> 所分析的结果是一致的,表明材料质量的提高和缺陷的减少可以有效地提高器件的电学性能.

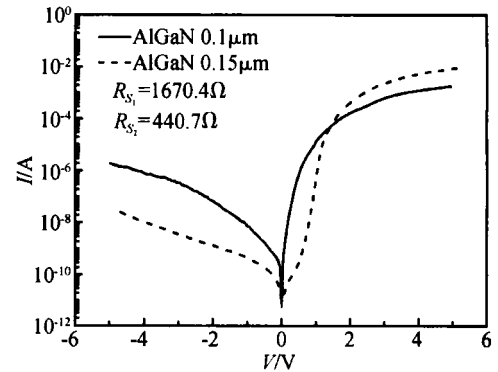


图 3 不同 p 层厚度 AlGaIn 的 p-i-n 结构紫外探测器的  $I-V$  曲线

Fig. 3  $I-V$  curves of the p-i-n ultraviolet detectors with different p-AlGaIn thicknesses

图 4 给出了 p 层 AlGaIn 分别为 0.1 $\mu$ m 和 0.15 $\mu$ m 时器件的响应光谱. 从图中可以看出,当 p 层的厚度为 0.1 $\mu$ m 时,在 200 ~ 340nm 波段内的响应率大于 p 层厚度为 0.15 $\mu$ m 的器件,200 ~ 340nm 波段的光绝大部分在 p 层被吸收,因此这个波段的量子效率和响应率主要取决于 p 层 AlGaIn 的厚度,只有在距离耗尽区几个扩散长度内的光生载流子才可以扩散到耗尽区,通过内建电场扫出,形成光电流,因此当 p 层的厚度较薄的时候,耗尽区就越靠近表面<sup>[15,16]</sup>,通过计算表明,当 p 层 AlGaIn 厚度为 0.1 $\mu$ m 时,节深距离表面只有 60nm 左右,200 ~ 340nm 这个波段的光的吸收深度大约在 100nm 左右,因此有相当大的一部分光会直接进入耗尽区从而被吸收. 当 p 层的厚度为 0.15 $\mu$ m 时,节深距离表面为 120nm,因此,200 ~ 340nm 波段的光大部分被 p 区 AlGaIn 吸收了,只有在耗尽区外几个扩散长度内光生载流子才能被收集.

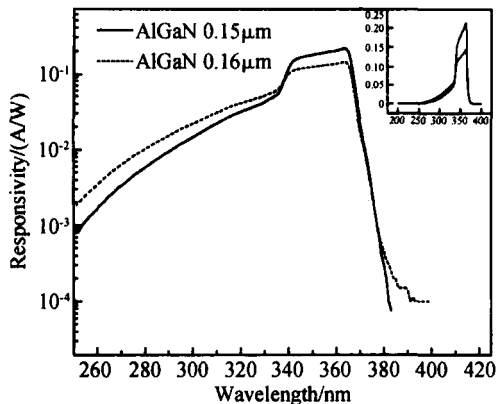


图 4 不同 p 层 AlGaN 厚度的 p-i-n 结构器件在零偏压下的响应光谱(插图为线形坐标下结果)

Fig. 4 Spectral response of the p-i-n ultraviolet detectors with different p-AlGaN thicknesses The inset of the figure is the measurement with the lineal scale.

但是,在 340~365nm 这个波段内,p 层厚度为 0.15 $\mu\text{m}$  的器件的响应率就大于厚度为 0.1 $\mu\text{m}$  的器件.这是由于在这个波段内时,光可以穿过表面 p 层 AlGaN 直接到达 i 层被吸收,因此在这种情况下量子效率就只与 i 层的厚度和晶体质量有密切的关系.从双晶衍射的结果来看,p 区厚度为 0.15 $\mu\text{m}$  样品中的 i-GaN 的 HWHM 比 p 层厚度为 0.1 $\mu\text{m}$  样品中 i-GaN 要小,因此 p 层厚度为 0.15 $\mu\text{m}$  的样品吸收区的 GaN 晶体质量较高,内部位错密度低,响应光谱的测试的结果也表明在 i 层厚度一致的情况下,i 层晶体质量高的器件的量子效率得到了较大幅度的提高,表明吸收区 i-GaN 的晶体质量与器件的响应率和量子效率是密切相关的.

当入射光满足  $h\nu > E_g$  时,紫外探测器的响应率公式为:  $R = \frac{q \cdot g}{hc}$ ,其中 R 为理论响应率; q 为电子电量;  $\lambda$  为入射光波长; h 为普朗克常数; c 为真空中光速;  $\eta$  为内量子效率,即每个入射光子产生电子空穴对的数目; g 为增益因子,即每复合一个光生电子空穴对在电极间经过的载流子数目.由上式可以看出,当波长为 365nm,内部量子效率和增益因子都为 1 时,器件的理论响应率为 0.294A/W,考虑到表面有 15% 的光反射时理论响应率为 0.250A/W<sup>[17]</sup>,而我们制备的 p 层厚度为 0.1 和 0.15 $\mu\text{m}$  的器件零偏压下在 363nm 时峰值响应率分别为 0.144 和 0.214A/W,因此在考虑表面光反射时对应外部量子效率分别为 57.6% 和 85.6%,忽略光反射时的外部量子效率分别为 49.0% 和 72.7%,因此 p 层厚度为 0.15 $\mu\text{m}$  器件的外部量子效率已经接近理论值.

综上所述,随着 p 层 AlGaN 和 i 层 GaN 的质量的提高使得紫外器件的响应率和量子效率都得到

了大幅度的提高,进一步提高材料质量和蒸镀表面抗反射膜还可以使外部量子效率继续提高到理论极限.

## 4 结论

制备了 AlGaN/GaN 异质结 p-i-n 结构可见盲紫外探测器,使得 340~365nm 波段的紫外光可以直接透过 p 区到达 i 区并被吸收,有效提高了这个波段的响应率与量子效率.研究了不同 p 区 AlGaN 外延层厚度对探测器性能的影响,测试结果表明,p 区的厚度及 i 区的晶体质量对器件的峰值响应有很大的影响.当 p 区 AlGaN 厚度为 0.15 $\mu\text{m}$  时,由于外延材料质量的提高,使得器件零偏压下峰值响应率达到 0.214A/W,在考虑表面反射时外量子效率高达 85.6%,接近理论值,且在零偏时暗电流密度为 3.16nA/cm<sup>2</sup>,表明器件具有非常高的信噪比.

## 参考文献

- [1] Strite S, Morkoc H. GaN, AlN, and InN: A review. *J Vac Sci Technol B*, 1992, 10(10): 1237
- [2] Razeghi M, Rogalski A. Semiconductor ultraviolet detectors. *J Appl Phys*, 1996, 79(10): 7433
- [3] Khan M A, Kuznia J N, Olson D T, et al. High-responsivity photoconductive ultraviolet sensors based on insulating single-crystal GaN epilayers. *Appl Phys Lett*, 1992, 60(23): 2917
- [4] Stevens K S, Kinniburgh M, Beresford R. Photoconductive ultraviolet sensor using Mg-doped GaN on Si(111). *Appl Phys Lett*, 1995, 66(25): 3518
- [5] Chen Q, Khan M A, Sun C J, et al. Visible-blind ultraviolet photodetectors based on GaN p-n junctions. *Electron Lett*, 1995, 31(20): 1781
- [6] Parish G, Keller S, Kozodoy P, et al. High-performance (Al, Ga) N-based solar-blind ultraviolet p-i-n detectors on laterally epitaxially overgrown GaN. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(2): 247
- [7] Monroy E, Hamilton M, Walker D, et al. High-quality visible-blind AlGaIn p-i-n photodiodes. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(8): 1171
- [8] Zhang Chunfu, Hao Yue, Zhang Jinpeng, et al. Model and simulation of GaN based PIN photodetectors. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(8): 1610 (in Chinese) [张春福,郝跃,张金凤,等. AlGaIn 基 PIN 光电探测器的模型与模拟. *半导体学报*, 2005, 26(8): 1610]
- [9] Osinsky A, Gangopadhyay S, Gaska R, et al. Low noise p-n GaN ultraviolet photodetectors. *Appl Phys Lett*, 1999, 71(16): 231
- [10] Yang W, Nohova T, Krishnankutty S, et al. Back-illuminated GaN/AlGaIn heterojunction photodiodes with high quantum efficiency and low noise. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(8): 1086
- [11] Morkoc H, Carlo A D, Cingolani R, et al. GaN-based modulation doped FETs and UV detectors. *Solid-State Electron*, 2002(46): 157
- [12] Yasan A, McClintock R, Darish S, et al. Future of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N materials and device technology for ultraviolet photodetectors. *SPIE*, 2002(4650): 199

- [13] Liu Q Z, Lau S S. A review of the metal-GaN contact technology. *Solid-State Electron*, 1998, 42(5) : 677
- [14] Hznzaz M, Bouhdada A, Gibart P, et al. Impact of the defects on the electrical and optical properties of AlGaIn ultraviolet photodetectors. *J Appl Phys*, 2002, 92(1) : 13
- [15] Li T, Carrano J C, Campbell J C, et al. Analysis of external quantum efficiencies of GaN homojunction p-i-n ultraviolet photodetectors. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, 36(8) : 1203
- [16] Smith G, Estes M J, Dang T, et al. Megahertz bandwidth Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/ GaN-based pin detectors. *SPIE*, 1998, 3287 : 198
- [17] Hickman R, Van Hove J M, Chow P P, et al. GaN PN junction issues and developments. *Solid-State Electron*, 2000, 44 : 377

## Characteristics of a Front-Illuminated Visible-Blind UV Photodetector Based on GaN p-i-n Photodiodes with High Quantum Efficiency

You Da<sup>1,†</sup>, Tang Yingwen<sup>1</sup>, Zhao Degang<sup>2</sup>, Xu Jintong<sup>1</sup>, Xu Yunhua<sup>1</sup>, and Gong Haimei<sup>1</sup>

(1 *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

(2 *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract :** Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/ GaN hetero-epitaxial front-illuminated visible-blind UV photodetectors with very high external quantum efficiency are fabricated and characterized. Light between 340 ~ 365nm can be absorbed by i-layer by penetrating the p-AlGaIn layer, so the quantum efficiency can be greatly enhanced. Then the effect of the p-AlGaIn thickness on the characteristics of the detector is investigated, and two devices with different p-AlGaIn thicknesses (0.1μm, 0.15μm) are fabricated. The measurements show that the p-AlGaIn thickness can only affect the responsivity of 200 ~ 340nm light, and the quality of the i-GaN layer can greatly affect the responsivity of 340 ~ 365nm light. The device with 0.15μm thick p-AlGaIn has much higher quantum efficiency in the 340 ~ 365nm range, and the zero-bias peak responsivity is about 0.214A/W at 365nm, corresponding to an external quantum efficiency of 85.6%. Moreover, this device exhibits a low dark current density of 3.16nA/cm<sup>2</sup> at zero-bias, which indicates that the device has a very high SNR.

**Key words :** p-i-n; AlGaIn; quantum efficiency; response spectrum

**PACC :** 7240; 7340M

**Article ID :** 0253-4177(2006)05-0896-04

† Corresponding author. Email : youdaizy @163.com

Received 22 August 2005, revised manuscript received 29 December 2005