

GaN 基肖特基结构紫外探测器*

王俊 赵德刚 刘宗顺 伍墨 金瑞琴 李娜 段俐宏
张书明 朱建军 杨辉

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

摘要: 在蓝宝石(0001)衬底上采用低压金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法生长GaN外延层结构,以此为材料制作了GaN基肖特基结构紫外探测器。测量了该紫外探测器的暗电流曲线、C-V特性曲线、光响应曲线和响应时间曲线。该紫外探测器在5V偏压时暗电流为0.42nA,在10V偏压时暗电流为38.5nA。在零偏压下,该紫外探测器在250nm~365nm的波长范围内有较高的响应度,峰值响应度在363nm波长处达到0.12A/W,在365nm波长左右有陡峭的截止边;当波长超过紫外探测器的截止波长(365nm左右),探测器的响应度减小了三个数量级以上。该紫外探测器的响应时间小于2μs。

关键词: GaN; 肖特基结构; 紫外探测器; 响应度

PACC: 7240; 7340M

中图分类号: TN304.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)06-0711-04

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 的宽禁带、低介电常数、耐高温性、耐腐蚀性、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^[1]。

在光电探测器件方面, GaN 材料有着优良的性能: (1) 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。(2) 不需要做成浅结, 这样可以大大提高量子效率。(3) GaN 的抗辐射能力很强, 可以在探索宇宙奥秘方面发挥作用。由于 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^[2], 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^[3, 4]、p-n 结型^[5]、p-i-n 型^[6, 7]、p-π-n 型^[8]、肖特基结型^[9, 10]、MSM 型^[11, 12]、异质结型^[13]等。在这些不同结构的紫外探测器中, GaN 基肖特基结构紫外探测器由于有较高的响应度和较快的响应速度而

获得很大的重视。

本文介绍了在蓝宝石(0001)衬底上采用低压 MOCVD 方法生长GaN外延层结构,以此为材料制作了暗电流非常小的肖特基结构紫外探测器,并测量了该紫外探测器的暗电流曲线、C-V 特性曲线、光响应曲线和响应时间曲线。

2 实验

GaN 基肖特基结构紫外探测器的结构如图 1 所示。其具体制备过程是: 用低压(1.013×10^4 Pa) MOCVD 方法在蓝宝石(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(NH₃), 载气为氢气(H₂)。我们首先在 550 ℃ 生长一个低温 GaN 缓冲层(buffer), 厚度约为 20nm, 接着在 1100 ℃ 生长高掺杂 n 型 GaN 外延层, 厚度约为 1μm, 掺杂浓度为 5×10^{18} cm⁻³; 接着生长本征 GaN 外延层, 厚度约为 0.6μm, 电子浓度为 1×10^{17} cm⁻³。

使用反应离子刻蚀(RIE)设备对 GaN 外延片结构进行刻蚀, 刻蚀深度为 0.8μm。对 GaN 进行清洗,

* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号: 2001AA313050)

王俊 男, 1979 年出生, 硕士研究生, 主要从事 GaN 基材料及紫外探测器的研究。

2003-06-31 收到, 2003-08-19 定稿

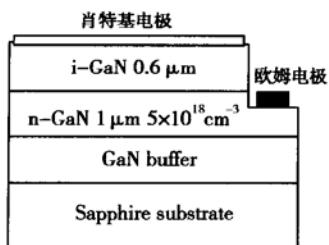


图 1 GaN 基肖特基结构紫外探测器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GaN Schottky barrier ultraviolet detector

使用标准光刻方法,在本征GaN层上制作Ni/Au肖特基透明电极。在本征GaN外延层上先溅射5nm的Ni,再溅射5nm的Au,面积为 0.08mm^2 。在刻蚀后的n型GaN外延层上,溅射Ti/Al/Ti/Au(15nm/250nm/50nm/250nm),面积为 0.01mm^2 ,制作欧姆电极,同时在Ni/Au肖特基透明电极上溅射Ti/Al/Ti/Au作为压焊点。

使用HP4280测试仪测量了该紫外探测器的暗电流和C-V特性。使用图2所示的测试系统,测量得到该紫外探测器的光响应曲线。该测试系统使用的光源为75W的氘灯,氘灯发出的光经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 $2\text{k}\Omega$ 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紫外探测器定标,从而得到GaN基肖特基结构紫外探测器的光响应曲线。响应时间测试系统使用光源为325nm的He-Cd激光器,激光器发出的光经斩波器调制后,由高速响应的Si紫外探测器测量得到光脉冲的上升时间为 $2\mu\text{s}$ 。该脉冲光照射到探测器。探测器接 $2\text{k}\Omega$ 负载电阻,示波器与负载电阻并联,从示波器读出探测器的光信号波形,得到该紫外探测器的响应时间。

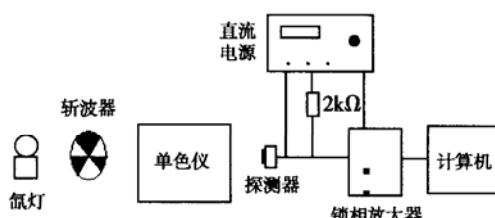


图 2 紫外探测器的光响应测试系统

Fig. 2 A schematic diagram of ultraviolet detector responsivity measurement setup

3 结果与讨论

图3是GaN基肖特基结构紫外探测器的暗电流曲线。室温下,在5V反向偏压时该紫外探测器的暗电流为 0.42nA ,在10V偏压时该紫外探测器的暗电流为 38.5nA 。从图3可以看到它的开启电压约为1.1V。

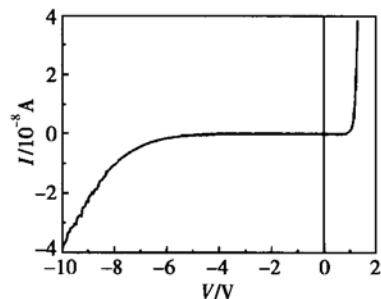


图 3 GaN 基肖特基结构紫外探测器的暗电流曲线

Fig. 3 Dark current vs voltage of GaN Schottky barrier ultraviolet detector

在正向偏压 $V > 3kT/q$ 情况下,根据热电子发射理论,肖特基势垒的I-V特性可以用下列方程来描述:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中 I_s 为饱和电流,且 $I_s = AA^{**} T^2 \exp \frac{-q\Phi_B}{kT}$,其中 A 为管芯面积, Φ_B 为有效势垒高度, n 为理想因子, A^{**} 为 Richardson 常数。 A^{**} 的取值在文献中不尽相同,但是,拟合得到的势垒高度对 A^{**} 的取值并不敏感^[14]。在室温下, A^{**} 的取值增大一倍,势垒高度只增加 0.018eV。在本文的计算中,取其理论计算值 $A^{**} = 26\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$ 。

我们将(1)式变形,得到:

$$IR + \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{I}{I_s} + 1 \right] = V \quad (2)$$

其中 R 为等效电阻。令 $P_1 = \frac{nkT}{q}$, $P_2 = I_s$, $P_3 = R$,对实验数据进行非线性拟合,可以得到 P_1 , P_2 , P_3 的值,再由此得到肖特基接触的势垒高度 Φ_B 和理想因子 n 。

从正向I-V特性可以推算出它的反向饱和电流密度约为 $8.4 \times 10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$, Ni/Au与GaN接触的肖

特基势垒高度为 0.84eV, 理想因子为 1.4.

图 4 是 GaN 基肖特基结构紫外光探测器的 $C-V$ 特性曲线. 在无光照的条件下, HP4280 的测试信号频率为 1MHz. 零偏时, 探测器的结电容为 13.91pF; 在反向偏压为 20V 时, 探测器的结电容为 13.78pF. 如果对测量结果做 $1/C^2-V$ 的关系曲线, 结果显示, 在 20V 反向偏压内近似为一条直线, 这表明本征 GaN 材料比较均匀. 如果负载电阻为 $2k\Omega$, 则零偏时该紫外探测器的 RC 时间为 27.82ns.

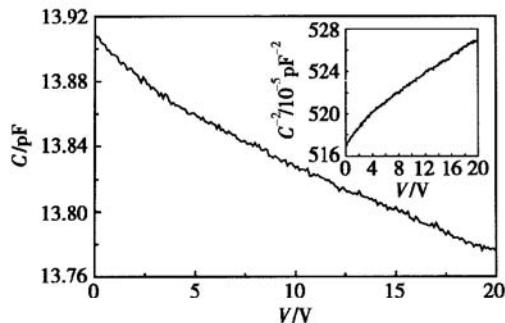


图 4 GaN 基肖特基结构紫外探测器的 $C-V$ 曲线

Fig. 4 $C-V$ curve of GaN Schottky barrier ultraviolet detector

图 5 是 GaN 基肖特基结构紫外光探测器在零偏压下的光响应曲线. 当入射光满足 $h\nu \geq E_g$, 探测器的响应度公式为: $R = \frac{q\lambda}{hc}\eta g^{[2]}$, 其中 q 为电子电量, λ 为入射光波长, h 为普朗克常数, c 为真空中光速, η 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. 从图中可以看到在 250~365nm 区间, 探测器有较高的响应度; 在 363nm 波长处达到最大值 $0.12A/W$, 量子效率为

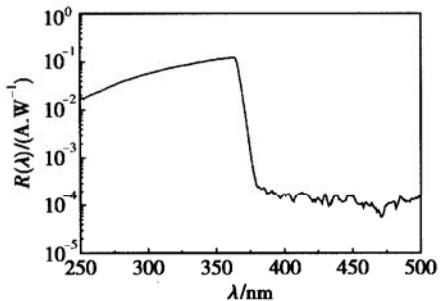


图 5 GaN 基肖特基结构紫外探测器在零偏压下的光响应曲线

Fig. 5 Spectral response of a GaN Schottky barrier ultraviolet detector under 0V bias

42.4%. 当波长超过 GaN 基紫外光探测器的截止波长(365nm 左右), 探测器的响应度减小了三个数量级以上.

图 6 是 GaN 基肖特基结构紫外光探测器在零偏压下的响应时间曲线. 零偏压时, 探测器的 10%~90% 上升时间为 $2\mu s$, 与光脉冲的上升时间相当, 这说明该探测器的实际响应时间小于 $2\mu s$.

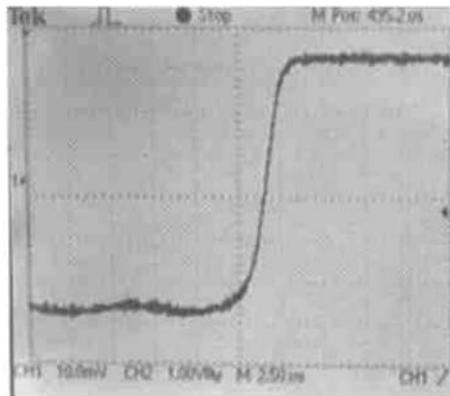


图 6 GaN 基肖特基结构紫外探测器在零偏压, $\lambda=320nm$ 波长处的响应时间曲线

Fig. 6 Response time of GaN Schottky barrier ultraviolet detector under 0V bias and $\lambda= 320nm$

4 结论

我们使用 MOCVD 生长 GaN 外延片结构, 采用 Ni/Au 肖特基透明电极和 Ti/Al/Ti/Au 欧姆电极, 制作了暗电流非常小、响应度很大、响应速度很快的 GaN 基肖特基结构紫外探测器.

致谢 衷心感谢中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室李月霞老师在测量工作中给予的大力帮助.

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. *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-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 AlGaN p-n photodiodes. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(8) : 1171
- [8] Osinsky A, Gangopadhyay S, Gaska R, et al. Low noise p-n GaN ultraviolet photodetectors. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(16) : 23134
- [9] Khan M A, Kuznia J N, Oslon D T, et al. Schottky barrier photodetector based on Mg-doped p-type GaN films. *Appl Phys Lett*, 1993, 63(18) : 2455
- [10] Osinsky A, Gangopadhyay S, Yang J W, et al. Visible-blind GaN Schottky barrier detectors grown on Si(111). *Appl Phys Lett*, 1998, 72(5) : 551
- [11] Carrano J C, Grudowski P A, Eiting C J, et al. Very low dark current metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors fabricated on single crystal GaN epitaxial layers. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(15) : 1992
- [12] Walker D, Monroy E, Kung P, et al. High speed, low-noise metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors based on GaN. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(5) : 762
- [13] Yang W, Nohova T, Krishnankutty S, et al. Back-illuminated GaN/AlGaN heterojunction photodiodes with high quantum efficiency and low noise. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(8) : 1086
- [14] Deelman P W, Bicknell-Tassius R N, Nikishin S, et al. Low-noise GaN Schottky diodes on Si(111) by molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(15) : 2172

GaN Schottky Barrier Ultraviolet Detector^{*}

Wang Jun, Zhao Degang, Liu Zongshun, Wu Mo, Jin Ruiqin, Li Na, Duan Lihong,
Zhang Shuming, Zhu Jianjun and Yang Hui

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A GaN Schottky barrier ultraviolet detector is fabricated using GaN films grown on sapphire substrates. Its dark current, C-V, responsivity, and response time are measured at room temperature. The dark current of the detector is 0.42nA under 5V bias, and 38.5nA under 10V bias. A maximum responsivity of 0.12A/W is achieved under the illumination with $\lambda = 363\text{nm}$ light and 0V bias. It exhibits a typical sharp band-edge cutoff at the wavelength of 365nm, and a high responsivity at the wavelength of 250~365nm. The responsivity of the detector drops by nearly three orders of magnitude across the cutoff wavelength (365nm). Its response time is less than 2μs.

Key words: GaN; Schottky; ultraviolet detector; responsivity

PACC: 7240; 7340M

Article ID: 0253-4177(2004)06-0711-04

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China(No. 2001AA313050)

Wang Jun male, was born in 1975. He is engaged in MOCVD growth of GaN materials and fabrication of GaN-based UV detectors.

Received 31 June 2003, revised manuscript received 19 August 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics