

背入射 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}/\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ 异质结 p-i-n 太阳光盲紫外探测器

成彩晶^{1,†} 丁嘉欣¹ 张向锋¹ 赵鸿燕¹ 鲁正雄¹ 司俊杰¹ 孙维国¹ 桑立雯² 张国义²

(1 中国空空导弹研究院, 洛阳 471009)

(2 北京大学物理系, 北京 100871)

摘要: 在蓝宝石上用 MOCVD 生长的材料制备了背入射 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}/\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ 异质结 p-i-n 太阳光盲紫外探测器. 从器件的正向 I - V 特性曲线计算了理想因子 n 与串联电阻 R_s 分别为 3 和 93Ω . 器件在零偏压下 275nm 峰值波长处的外量子效率与探测率分别为 9% 和 $4.98 \times 10^{11} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$, 分析表明 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ 窗口层在 275nm 波长处的透过率仅为 15.7%, 是器件外量子效率和探测率偏低的原因之一.

关键词: 太阳光盲紫外探测器; 理想因子; 串联电阻; 外量子效率; 探测率

EEACC: 7230

中图分类号: TN36

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)03-0566-04

1 引言

紫外探测技术是继红外和激光探测技术之后发展起来的又一军民两用光电探测技术. 现代光电对抗装备的一个显著特点是向光的全波长和全天候发展, 紫外线是光电对抗威胁频段之一. 紫外探测器在军事上主要应用于紫外制导、紫外预警、干扰和通信等方面. 由紫外与红外组成的双色探测器具有较强的抗干扰能力. 紫外探测器工作波段距离红外波段较远, 目标及干扰在两个波段内的辐射差异较大, 在实际的系统应用中具有较强的抗干扰能力, 在地空、空空导弹等战术武器系统中具有良好的应用前景. 紫外探测器在民用方面可用于火灾监控、汽车发动机监测、石油工业和环境污染的监测等, 具有广阔的应用前景^[1]. 随着 GaN 基蓝光、绿光发光二极管和蓝光激光器相继研制成功, 缓冲层技术的采用和 p 型掺杂技术的突破, 全世界掀起了研究 AlGa_xN 紫外探测器的热潮. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料具备以下几个方面的优点: 随 Al 组分变化, 带隙从 365nm ($x = 0$) 到 200nm ($x = 1$) 可调, 覆盖了地球上大气臭氧层吸收的主要窗口 $240 \sim 290\text{nm}$, 不需要滤光系统就能制作成太阳光盲紫外探测器^[2,3]. 在苛刻的物理和化学环境中具有很高的稳定性, 具有耐高温抗辐射的特性.

目前国外已报道了 AlGa_xN p-i-n 320×256 太阳光盲焦平面阵列探测器^[4,5], 国内 AlGa_xN p-i-n 单元探测器已有报道^[6], 线列和阵列焦平面还处于摸索阶段.

背入射 AlGa_xN p-i-n 紫外探测器能在低偏或零偏压下工作, 有很高的阻抗, 有利于与 Si 读出电路互连制造成焦平面探测器. 本文介绍用 MOCVD 生长的背入射 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}/\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ 异质结 p-i-n 太阳光盲

紫外探测器的制备, 及其 I - V 特性分析, 零偏外量子效率的测试以及探测率的计算, 并分析了外量子效率和探测率偏低的原因.

2 实验

背入射 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}/\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ 异质结 p-i-n 紫外探测器结构示意图如图 1 所示. 材料生长过程如下, 在单面抛光的蓝宝石衬底上低温生长一层 AlN (20nm) 缓冲层, 接着生长一层 AlN (300nm), 再生长 10 个周期的 AlN/ $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ (5nm/5nm) 超晶格, 然后生长一层未掺杂的 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ (80nm), 最后生长 p-i-n 结构: 掺 Si 的 n- $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ (290nm), 非掺杂的 i- $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ (200nm), 掺 Mg 的 p- $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ (50nm), 为帮助形成 p 型欧姆接触, 覆盖一层掺 Mg 的 p-GaN (200nm). 氮气环境下, 在 1000°C 的高温下快

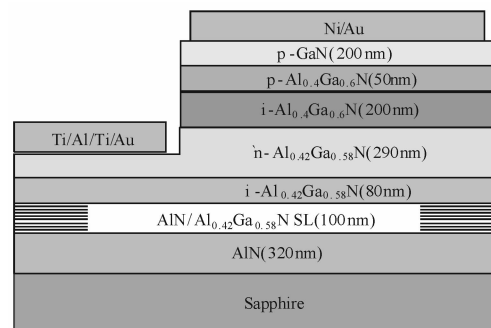


图 1 背入射 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}/\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ 异质结 p-i-n 太阳光盲紫外探测器结构的剖面图

Fig. 1 Cross-sectional schematic diagram of the back-illuminated $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ p-i-n photodetector device structure

† 通信作者. Email: yunengw@yahoo.com.cn

2007-08-14 收到, 2007-09-13 定稿

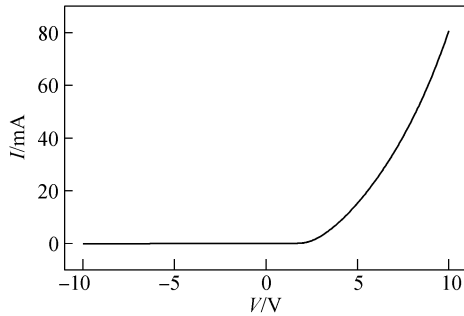


图 2 Al_{0.42}Ga_{0.58}N/Al_{0.40}Ga_{0.60}N 异质结 p-i-n 探测器的 I - V 特性
Fig.2 I - V characteristics of Al_{0.42}Ga_{0.58}N/Al_{0.40}Ga_{0.60}N heterojunction p-i-n photodiode

速退火 30s, 以激活 p 型层的 Mg 原子. 器件制作工艺如下: 先用有机溶剂除去样品表面的有机物和无机物等脏物, 然后由 ICP 刻蚀出光敏面台面, 光敏面台面是半径为 0.54mm 的圆; 再以沸腾的王水除去样品表面的本征氧化层, 然后制作 n-AlGa_{0.58}N 欧姆接触电极 (Ti/Al/Ti/Au), n 型欧姆电极是与光敏面同圆心的圆环, 其内半径和外半径分别为 0.55 和 0.85mm; 接着制作 p-GaN 欧姆接触电极 (Ni/Au), p 型欧姆电极是与光敏面同圆心的圆, 在光敏面的台面上, 半径为 0.50mm; 最后将蓝宝石衬底背面抛光.

实验中测试了器件的 I - V 特性曲线, 所用测试设备是 Suss 半导体参数分析仪. 器件的光谱响应测试所用光源是功率为 350W 的氙灯, 测试系统的调制频率为 600Hz, 器件与一个负载电阻串联形成一个回路, 通过负载电阻取得光电流信号, 用一个标准的 Si 紫外探测器对测试系统进行了校准.

3 结果与分析

Al_{0.42}Ga_{0.58}N/Al_{0.40}Ga_{0.60}N p-i-n 的 I - V 特性曲线如图 2 所示, 在 2V 反偏时暗电流为 20nA. 从 I - V 特性可以计算器件的理想因子 n 和串联电阻 R_s , 理想因子一般用来评价器件结的质量, 而串联电阻可以检验电极欧姆接触的好坏, 假如串联电阻大, 会使 RC 时间常数增大, 从而增加器件的响应时间, 降低器件的响应速度.

理想因子可以从下面方程求出^[7]:

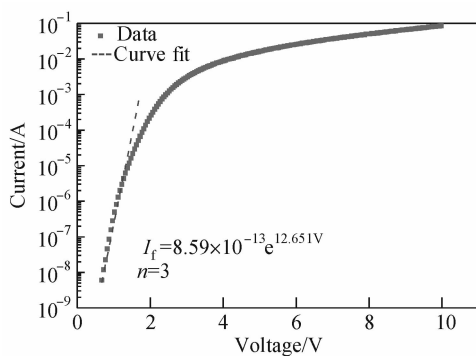


图 3 在低正向偏压下 I - V 数据取对数的指数拟合
Fig.3 Log plot of I - V data at low forward bias with exponential fit

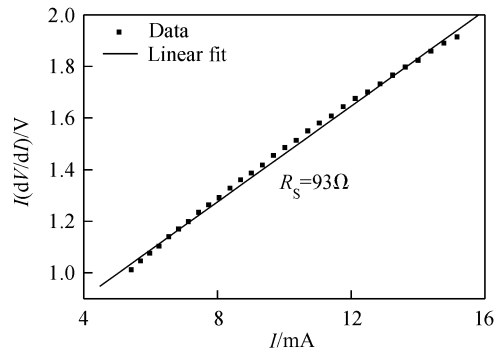


图 4 Al_{0.42}Ga_{0.58}N/Al_{0.40}Ga_{0.60}N 异质结 p-i-n 探测器的 $I(dV/dI)$ 与 I 关系曲线

Fig.4 $I(dV/dI)$ versus I of Al_{0.42}Ga_{0.58}N/Al_{0.40}Ga_{0.60}N heterojunction p-i-n photodiode

$$I_f \approx \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (1)$$

其中 I_f 是正向电流; V 是电压; T 是温度; q 是电子电荷; k 是 Boltzmann 常数. 方程(1)是一个直线方程, 在 0.7~1.05V 范围内, 串联电阻可以忽略, 求得 $n = 3$, 如图 3 所示. n 值一般在 1 和 2 之间, 如果 n 趋近于 1, 器件主要是扩散电流控制, 如果 n 趋近于 2, 器件主要是复合电流控制, 但是我们的值 $n = 3$ 超出 1 和 2 之外, 表明有其他电流传输机制对其有贡献. 在 III 族氮化物中, 这个非理想情况可能是隧道电流引起的^[7].

从图 3 中可以看出, 当正向偏压较大时, I - V 曲线不再是直线, 这是由串联电阻 R_s 引起的. 正向电流较大时, R_s 不可忽略, 由以下方程求串联电阻 R_s ^[8].

$$I_f \frac{dV}{dI_f} = R_s I_f + \frac{nkT}{q} \quad (2)$$

这是一个直线方程, 按照这个方程处理作图, 在较大偏压下, 3.5~5V, 通过线性拟合, 直线的斜率可求出串联电阻 R_s , 如图 4 所示, 求得 $R_s \approx 93\Omega$.

Al_{0.42}Ga_{0.58}N/Al_{0.40}Ga_{0.60}N 异质结 p-i-n 探测器在零偏压下, 在峰值波长 275nm 处的外量子效率为 9%, 如图 5 所示. 零偏峰值响应率 R_λ 为 20mA/W, 截止波长为 285nm. 从图 5 可以看出, 器件在 360nm 处也有响应, 这是由于 p-GaN 与 Ni/Au 未形成很好的欧姆接触所致.

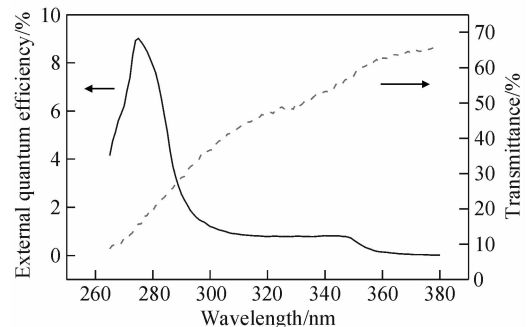


图 5 Al_{0.42}Ga_{0.58}N/Al_{0.40}Ga_{0.60}N 异质结 p-i-n 探测器在零偏压下的外量子效率(左轴)和 Al_{0.42}Ga_{0.58}N 窗口层的透过率曲线(右轴)

Fig.5 External quantum efficiency of the back-illuminated Al_{0.42}Ga_{0.58}N/Al_{0.40}Ga_{0.60}N heterojunction p-i-n photodiode at zero-bias voltage and transmittance of Al_{0.42}Ga_{0.58}N window layer

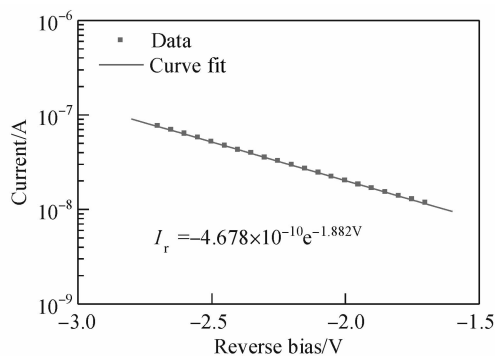


图 6 在低反向偏压下 I - V 数据的绝对值取对数的指数拟合

Fig. 6 Log plot of the absolute value of I - V data at low reverse bias with exponential fit

背入射 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ p-i-n 紫外探测器工作电压接近于零偏时,有利于与 Si 读出电路互连,而且在零偏下可以取得较大的探测率.因为器件在零偏时的暗电流低, I - V 测试分析系统在零偏附近较小电流测量有偏差,因此对 I - V 曲线的正反向分别采用指数拟合的方法进行曲线拟合^[9].正向偏压的 I - V 曲线指数拟合如图 3 所示,反向偏压的 I - V 曲线指数拟合如图 6 所示,反向偏压指数拟合所取范围是 1.7~2.7V.把 I - V 曲线的正反向指数方程按如下方程组合在一起:

$$I = a(e^{bV} - 1) + c(e^{dV} - 1) \quad (3)$$

系数 a 和 b 从反向偏压指数拟合方程中得到, $a = -4.678 \times 10^{-10} \text{ A}$, $b = -1.882 \text{ V}^{-1}$; 系数 c 和 d 从正向偏压指数拟合方程中得到, $c = 8.59 \times 10^{-13} \text{ A}$, $d = 12.651 \text{ V}^{-1}$.零偏微分电阻 R_0 可从以下方程得到

$$\frac{1}{R_0} = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0} \quad (4)$$

求得 $R_0 = 1/(ab + cd) = 1.122 \times 10^9 \Omega$.因为 AlGaN 紫外探测器工作在太阳光盲区,背景辐射是非常低的,可以认为器件的主要噪声是热噪声,探测率 D^* 可由以下方程求得:

$$D^* = R_\lambda \left(\frac{R_0 A}{4kT} \right)^{1/2} \quad (5)$$

其中 R_λ 是零偏峰值响应率; A 是光敏面面积.器件的光敏面直径为 $540 \mu\text{m}$, 这样可以得到 $R_0 A = 1.0 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 在 300K 温度下,275nm 波长处器件的探测率 D^* 为 $4.98 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$.

器件的外量子效率和探测率偏低,为了分析其中原因,我们测试了 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ 窗口层的紫外透过率曲线.把同一样品的另一部分用 ICP 进行刻蚀,将样品上面的 p-GaN, p-AlGaN 和 i-AlGaN 刻蚀掉,衬底蓝宝石背面抛光,然后测试了透过率曲线,如图 5 所示. ICP 刻蚀过的 $\text{n-Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ 表面可能会减小透过波段部分

的透过率.图中可以看出, $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ 窗口层在 275nm 波长处的透过率仅为 15.7%,这是限制器件外量子效率和探测率的主要原因之一.如果窗口层的透过率能达到 60% 以上,则器件在 275nm 波长处的外量子效率可提高到 34% 以上.因此在设计器件结构时, p-i-n 窗口层 AlGaN 的 Al 组分应比 i 层的多高出一些,以保证窗口层的透过率在器件的响应波段达到 60% 以上,从而会提高器件的外量子效率和探测率.

4 结论

在蓝宝石上用 MOCVD 技术生长的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 制备了背入射 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}/\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ 异质结 p-i-n 太阳光盲紫外探测器.器件在 2V 反偏时暗电流为 20nA, 从 I - V 特性曲线计算了理想因子 n 与串联电阻 R_s 分别为 3 和 93Ω . 在零偏压下 275nm 峰值波长处的响应率为 20 mA/W , 截止波长为 285nm. 器件在零偏峰值波长处的外量子效率与探测率分别为 9% 和 $4.98 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$. 分析表明 $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ 窗口层在 275nm 波长处仅 15.7% 的透过率是器件外量子效率和探测率偏低的原因之一.

参考文献

- [1] Razeghi M, Rogalski A. Semiconductor ultraviolet detectors. J Appl Phys, 1996, 79: 7433
- [2] Walker D, Zhang X, Saxler A, et al. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1$) ultraviolet photodetectors grown on sapphire by metal-organic chemical-vapor deposition. Appl Phys Lett, 1997, 70: 949
- [3] Walker D, Kumar V, Mi K, et al. Solar-blind AlGaN photodiodes with very low cutoff wavelength. Appl Phys Lett, 2000, 76: 403
- [4] Long J P, Varadarajan S, Matthews J, et al. UV detectors and focal plane array imagers based on AlGaN p-i-n photodiodes. Opto-Electronics Review, 2002, 10: 251
- [5] McClintock R, Mayes K, Yasan A, et al. 320×256 solar-blind focal plane arrays based on $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Appl Phys Lett, 2005, 86: 011117
- [6] Chen Liang, You Da, Tang Yingwen, et al. Fabrication and characterization of backside-illuminated GaN/AlGaN p-i-n ultraviolet detector. Laser & Infrared, 2006, 36: 1036 (in Chinese) [陈亮, 游达, 汤英文, 等. 背照射 GaN/AlGaN p-i-n 紫外探测器的制备与性能. 激光与红外, 2006, 36: 1036]
- [7] Mayes K, Yasan A, McClintock R, et al. High-power 280nm AlGaIn light-emitting diodes based on an asymmetric single-quantum well. Appl Phys Lett, 2004, 84: 1046
- [8] Collins C J, Li T, Beck A L, et al. Improved device performance using a semi-transparent p-contact AlGaIn/GaN heterojunction positive-intrinsic-negative photodiode. Appl Phys Lett, 1999, 75: 2138
- [9] Collins C J, Li T, Lambert D J H, et al. Selective regrowth of AlGaIn p-i-n photodiodes. Appl Phys Lett, 2000, 77: 2810

A Back-Illuminated $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}/\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ Heterojunction p-i-n Solar-Blind UV Photodetector

Cheng Caijing^{1,†}, Ding Jiabin¹, Zhang Xiangfeng¹, Zhao Hongyan¹, Lu Zhengxiong¹,
Si Junjie¹, Sun Weiguo¹, Sang Liwen², and Zhang Guoyi²

(¹ China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

(² Department of Physics, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract: Back-illuminated $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}/\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ heterojunction p-i-n solar-blind UV photodetectors grown on sapphire by metal organic chemical vapor deposition are fabricated. An ideality factor of $n = 3$ and a series resistance of $R_s = 93\Omega$ are obtained from the forward current-voltage curve of the device. The external quantum efficiency and detectivity at a peak wavelength of 275nm at zero-bias voltage are 9% and $4.98 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, respectively. Mere 15.7% of the spectral transmittance of the $\text{Al}_{0.42}\text{-Ga}_{0.58}\text{N}$ window layer at 275nm results in the low external quantum efficiency and detectivity.

Key words: solar-blind UV photodetector; ideality factor; series resistance; photoresponse; detectivity

EEACC: 7230

Article ID: 0253-4177(2008)03-0566-04

[†] Corresponding author. Email: yunengw@yahoo.com.cn

Received 14 August 2007, revised manuscript received 13 September 2007