

文章编号: 0253-2239(2009)12-3409-04

肖特基型氮化镓紫外光电探测器性能

赵 曼¹ 李 健² 王晓娟¹ 周脉鱼¹ 鲍金河¹ 谷 峰¹

(¹ 空军航空大学特种专业系, 吉林 长春 130000; ² 吉林市计量科技研究所, 吉林 吉林 132013)

摘要 最小标准模型(MSM)结构的光电探测器主要分为光导型和肖特基型两种。制备得到了肖特基型的氮化镓(GaN) MSM 结构紫外光电探测器,采用这种结构的器件主要是因为其暗电流低、响应时间快、响应度大、寄生电容小等优点。MSM 形状的叉指电极是通过传统的紫外光刻和湿法刻蚀得到的,并采用 Au 作为金属电极。得到的肖特基型 GaN 紫外光电探测器的暗电流在 1 V 偏压下为 3.5 nA,器件在 1 V 偏压下的最大响应度值出现在 362 nm 处,大小为 0.12 A/W,器件的上升时间小于 10 ns,下降时间为 210 ns。并对器件响应时间的影响因素进行了深入的分析。

关键词 探测器;氮化镓;紫外;肖特基

中图分类号 O472 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092912.3409

The Properties of GaN Schottky Photodetectors

Zhao Man¹ Li Jian² Wang Xiaojuan¹ Zhou Maiyu¹ Bao Jinhe¹ Gu Feng¹

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

Abstract The minimum standard model (MSM) structured photodetectors includes photoconductive type and Schottky type. Schottky GaN MSM photodetectors have been made due to its excellent properties of low dark current, high speed, large responsivity, small parasitic capacitance. MSM structured electrodes were fabricated by using conventional ultraviolet (UV) lithography and wet etching, and Au were used as the metal electrodes. The dark current of the fabricated Schottky GaN UV photodetectors was 3.5 nA at 1 V bias voltage. The maximum responsivity of the device was 0.12 A/W at 362 nm under 1 V bias voltage. The rise time of the device was no more than 10 ns, and the fall time was 210 ns. The influencing factor of the response time has been investigated deeply.

Key words detector; GaN; ultraviolet; Schottky

1 引 言

目前,氮化镓(GaN)是最炙手可热的半导体光电探测器材料之一^[1~4]。由于 GaN 紫外探测器具有可见光盲、量子效率高、可在室温下工作、耐高温性和耐化学腐蚀性好、抗辐照能力强等优点,在宇宙飞船、火灾监测、紫外通信等领域有重要的应用价值^[5,6]。GaN 基紫外光探测器在军事上最直接的应用是导弹发射探测。在导弹的高速长距离飞行中,对信号强度、信号的波长选择要求很高,GaN 基紫外探测器制作成的二维成像阵列就可满足这一要求^[7]。而众多类型的探测器中,肖特基势垒探测器制作简单,不存在高温扩散过程,光响应速度较快。

肖特基型探测器是所有结构中响应最平直的,响应时间在纳秒数量级,其缺点是受电阻电容(RC)时间常数限制。而最小标准模型(MSM)结构的肖特基型紫外光电探测器由于响应带宽大、噪声小、暗电流低,所以非常适合制作太阳盲探测器和高速率器件^[8~14]。

1997 年 L. B. Flannery 等^[15]用分子束外延(MBE)方法生长的 P 型 GaN 膜制成了叉指式 MSM 紫外光电探测器,探测器在 364 nm (3.402 eV)处有一个尖锐的吸收峰,推测是由自激发产生的。2000 年美国东北大学的 M. Razeghi 小组^[16]用金属有机化学气相沉积(MOCVD)的方法在

收稿日期: 2009-03-03; 收到修改稿日期: 2009-04-28

作者简介: 赵 曼(1982—),女,硕士,主要从事 GaN 紫外光电探测器方面的研究。E-mail: zhaoman1982@126.com

蓝宝石衬底上生长了一层 GaN 薄膜,并以此薄膜第一次制作了肖特基型 MSM 紫外光电探测器。该探测器光响应度为 84 A/W,其原因可能是空穴俘获引起的增益机制的存在,光响应随实际偏压的增加而迅速地增加。目前人们对 GaN 紫外光电探测器的研究还处在基础研究阶段。本文通过金属有机气相沉积的方法制备高质量的 GaN 薄膜,在此基础上制备 MSM 结构的肖特基型 GaN 紫外光电探测器,并对其性能进行了深入的研究和分析。

2 实 验

2.1 肖特基型 MSM 结构探测器工作原理

MSM 结构光电探测器的示意图(以本实验结构图为例)如图 1 所示,在半导体顶部的叉指包括肖特基接触和欧姆接触。由于欧姆型器件的响应时间长、暗电流大等缺点,所以普遍采用肖特基型的器件。另外选择 MSM 结构,是因为其避免了欧姆接触的问题,其侧向平面的结构电容小,符合大带宽、低噪声性能的要求。在电极上加偏置电压时,相当于两个背靠背的肖特基,一个正向偏置与一个反向偏置。偏压较小时两个结的耗尽区宽度小于金属电极的指间距,随偏压的增大,反偏结的耗尽区将变厚而正偏结的耗尽区变薄,当电压达到穿透电压时,两个结的耗尽区将相遇,进一步加大电压,正偏结的耗尽区消失,器件内部达到完全反偏。光响应和量子效率随偏压增加而增加,直到偏压使器件全部反偏时,量子效率增加变缓并逐渐达到饱和。

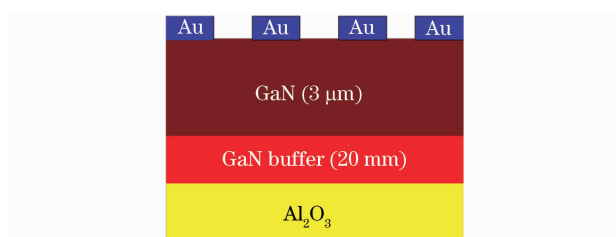


图 1 MSM 结构光电探测器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the MSM structured photodetector

2.2 器件制备

样品是通过金属有机化学气相沉积的方法在蓝宝石衬底上生长六方相的 GaN 薄膜,使用三甲基镓(TMGa)和氨气(NH₃)作为镓源和氮源,载气为氢气(H₂)。具体实验过程如下:衬底入炉后先在 1423 K 的 H₂ 气下烘烤 20 min 以除去表面吸附的杂质,然后在衬底温度为 843 K 条件下生长 20 nm 厚左右的 GaN 缓冲层,再升温至 1373 K 生长 GaN 外

延,外延的厚度约为 3 μm。之后采用传统的紫外曝光和湿法刻蚀的方法制备 MSM 结构的叉指电极形状。选择 Au 作为金属电极,电极的具体形状参数为指宽 10 μm,指长为 200 μm,间隔为 10 μm。

选用光源为 150 W 的氙灯,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 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中心波长为 266 nm,脉冲宽度为 10 ns 的 Nd:YAG 激光器作为光源,该脉冲光照射到探测器上,通过负载电阻提取电压信号,通过取样积分器得到探测器的光信号波形,进而得到该紫外光电探测器的响应时间。*I-V* 特性曲线通过半导体特性分析仪(Keithley 4200)测量得到,而材料的透射谱则由扫描分光光度计(Shimadzu UV-3101)测量得到。

2.3 结果与讨论

对于应用于紫外光电探测的样品,其透射率尤为重要,关系到器件的响应起始点、对比度、吸收的强度等方面。从图 2 中可以很容易看到,样品在 365~750 nm 的平均透射率在 85% 以上,而且样品的截止边较为陡直,这对提高器件响应度的紫外与可见的抑制比、抑制噪声电流等起到了至关重要的作用。

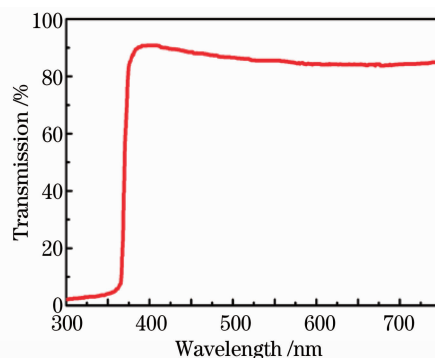


图 2 GaN 外延膜的透射谱

Fig. 2 Spectrum of GaN epitaxy film

对制得的 GaN 紫外光电探测器样品进行无光照的 *I-V* 特性测试,也就是测量器件的暗电流。图 3 显示,在 1 V 偏压下,得到的器件的暗电流为 3.5 nA,这虽然大于国外报道的皮安量级,但与大多数探测器件相比已经是很小了。由于目前 GaN 材料的生长还不是很完善,所以认为器件较小的暗电流主要是与具有高电阻的样品有关。为了进一步表征器件的光照 *I-V* 特性,测试了在光照为 365 nm 波段的 *I-V* 特性曲线。如图 3 所示器件的光生电流是暗电流的 4 次方量级,

说明器件具有较好的光响应特性,并且暗电流造成的噪声对器件的性能影响较小。

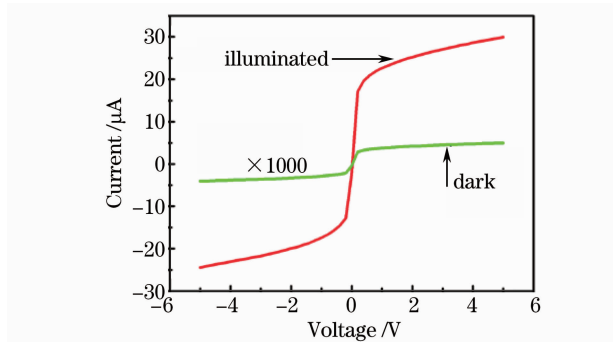


图3 365 nm 波长光照射下和无光照条件下的 GaN 光电探测器的 $I-V$ 曲线

Fig. 3 $I-V$ curves of the GaN photodetector illuminated under 365 nm and without illumination

对 GaN 紫外光电探测器进行了光响应的测量。图 4 是在 1 V 偏压下 MSM 结构的肖特基型的光谱测试结果。器件在 362 nm 附近的响应度达到了最高值,为 0.12 A/W。但当波长从 362 nm 增大到 425 nm 时,光响应度下降了约几个数量级,而在带隙以下的光响应主要来自于禁带内的能级的跃迁,即由 GaN 薄膜本身的缺陷和杂质引起的。

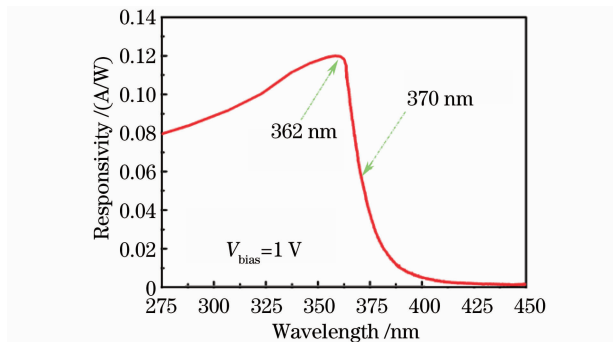


图4 1 V 偏压下 GaN 光电探测器的光响应图谱

Fig. 4 Responsive spectra of the GaN photodetector at 1 V bias

探测器响应峰值和外加偏压之间的关系如图 5 所示,当外加偏压从 1 V 增加到 15 V 时,光响应迅速增加,但大于 15 V 时,光响应增加缓慢,这种饱和现象可以用叉指电极的工作原理来解释。随着偏压的不断增大,电极两边的耗尽层一边减少,一边增加,但两边的耗尽层宽度的总和是不断变大的,直至电极两边的耗尽层相互接触。随着偏压增加,响应度之所以呈现饱和状态,主要是因为耗尽层的宽度总和没有增加,但总是一边的耗尽层宽度不断增加,一边的耗尽层宽度不断地减少,直至一边的耗尽层的宽度和电极的间距相当,同时另一边的耗尽层的

宽度为零。当电压再接着不断地增加时,器件就有被击穿的可能。图 5 插图中响应度与光源功率的关系说明,由于器件的厚度与吸收系数是一定的,随着光源功率的增加,响应度也会出现饱和现象。

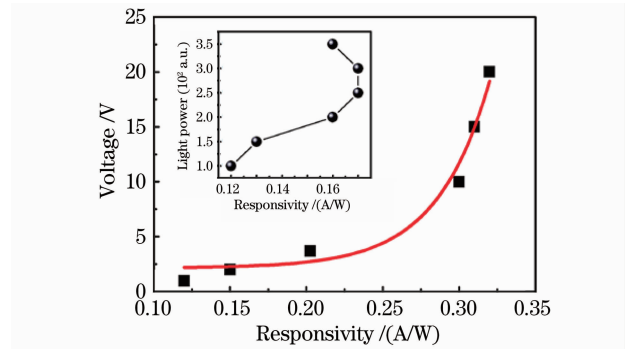


图5 器件的响应峰值和外加偏压之间的关系曲线, 插图为响应峰值与光功率的关系曲线

Fig. 5 Relationship of the peak responsivity and the applied bias of the device, and the inset shows the relationship of the peak responsivity and the light power

图 6 为 GaN 紫外探测器 1 V 偏压下的光响应时间图谱,是对响应时间进行二次相 e 指数拟合得到的。器件的上升时间受到脉冲宽度的限制,约为 10 ns,下降时间约为 210 ns,所以器件的响应时间为 220 ns。为了检验响应时间是否存在饱和现象,观察了不同偏压与响应时间的关系,如图 7 所示。可以看到随着偏压的增加,响应时间也出现了一定的饱和现象,当耗尽层宽度一定的情况下,对电子空穴对的扫走能力达到了极限值,所以响应时间也会出现一定的饱和值。

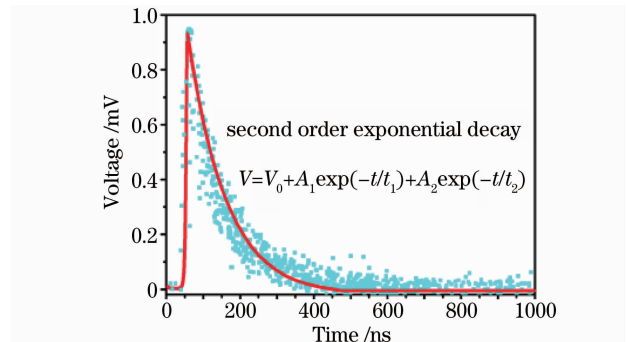


图6 GaN 光电探测器 1V 偏压下的时间响应图谱

Fig. 6 Time response spectra of the GaN photodetector at 1 V bias

上升时间大体与激光器的脉冲宽度相近,因此器件的上升时间主要由激光器的脉冲宽度决定。显然电子的渡越时间对下降时间的影响可忽略不计。那么对于器件的下降时间,可能的影响原因主要有

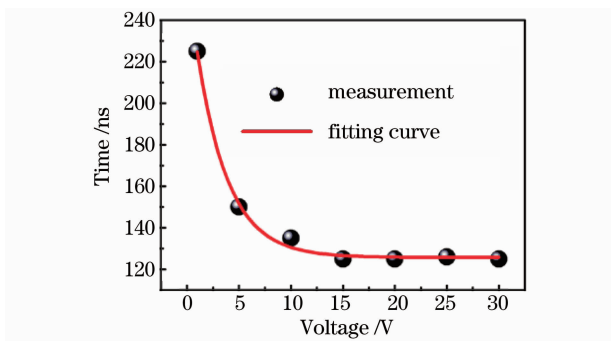


图 7 GaN 探测器的响应时间与偏压的关系

Fig. 7 Response time dependent the applied bias of the GaN photodetector

两点:器件本身的质量即是否存在大量空穴的俘获缺陷,造成大的增益;RC 时间常数的限制。由于实验条件的限制,无法实验验证器件中是否存在大量的空穴俘获缺陷,但由于器件是肖特基型的,并且峰值小于无增益时的理论值,所以可判断空穴缺陷不是其主要影响因素。图 8 为信号电阻与响应时间的关系图。可见随着信号电阻的不断增大,响应时间呈线性增加,说明 RC 时间常数对器件下降时间的影响占主导因素。

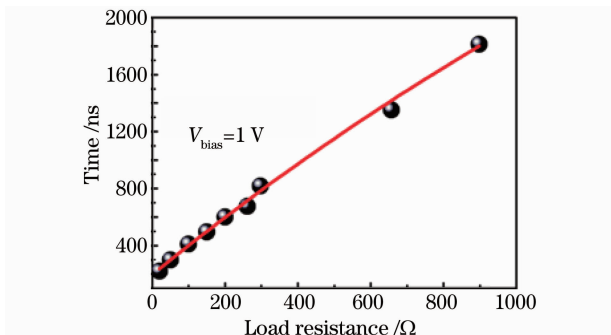


图 8 1 V 偏压下器件的响应时间与信号电阻的关系

Fig. 8 Response time dependent signal resistor of the device at 1 V bias

3 结 论

在蓝宝石衬底上采用 MOCVD 方法制备了高质量的 GaN 薄膜,在此基础上采用传统的紫外光刻和湿法刻蚀的方法制得梳状 MSM 结构的紫外光电探测器件。得到的肖特基型 GaN 紫外光电探测器的暗电流在 1 V 偏压下为 3.5 nA,器件在 1 V 偏压下的最大响应度值出现在 362 nm 处,大小为 0.12 A/W,器件的上升时间小于 10 ns,下降时间为 210 ns。深入分析了器件的响应时间来源,认为下降时间主要是由 RC 时间常数决定的。

参 考 文 献

- Li Xue. GaN UV photodetectors[J]. *Infrared*, 2004, (5): 23~27
李 雪. GaN 基紫外探测器[J]. 红外, 2004, (5): 23~27
- Kuang Hai, Liu Junlin, Cheng Haiying *et al.*. Effect of transferred anserferred submount materials on properties of GaN-based LED chips grown on Si substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 143~145
邝 海,刘军林,程海英等. 转移基板材质对 Si 衬底 GaN 基 LED 芯片性能的影响[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 143~145
- 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
- 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
- I. Ferguson, C. A. Tran, R. F. Karlicer *et al.*. GaN and AlGaIn metal-semiconductor-metal photoconductors[J]. *Material Science and Engineering B*, 1997, **50**(1): 311~314
- 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
- Li Huirui. Newly developed ultraviolet detectors and their application[J]. *Optoelectronic Technology*, 2000, **21**(1): 45~51
李慧蕊. 新型紫外探测器及其应用[J]. 光电技术, 2000, **21**(1): 45~51
- D. Walker, E. Monroy, P. Kung *et al.*. High-speed, low-noise metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors based on GaN[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(5): 762~764
- J. C. Carrano, T. Li, P. A. Grudowski *et al.*. High quantum efficiency metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors fabricated on single-crystal GaN epitaxial layers[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(23): 1980~1981
- P. Kung, D. Walker, P. Sandvik *et al.*. Schottky MSM photodetectors on GaN films grown on sapphire by lateral epitaxial overgrowth[C]. *SPIE*, 1999, **3629**: 223~229
- T. Li, D. J. H. Lambert, A. L. Beck *et al.*. Low noise solar-blind Al_xGa_{1-x}N based metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors[J]. *J. Electron Materials*, 2001, **30**(7): 872~877
- B. Yang, D. J. H. Lambert, T. Li *et al.*. High-performance back-illuminated solar-blind AlGaIn metal-semiconductor-metal photodetectors[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(22): 1866~1867
- A. Soltani, H. A. Barkad, M. Mattallah *et al.*. 193 nm deep-ultraviolet solar-blind cubic boron nitride based photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(5): 053501
- J. C. Carrano, P. A. Grudowski, C. J. Eiting *et al.*. Very low dark current metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors fabricated on single-crystal GaN epitaxial layers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(15): 1992~1994
- L. B. Flannery, I. Harrison, D. E. Lacklison *et al.*. Fabrication and characterization of p-type GaN metal-semiconductor-metal ultraviolet photoconductors grown by MBE [J]. *Materials Science and Engineering B*, 1997, **50**(1): 307~310
- M. Razeghi, P. Sandvik, P. Kung *et al.*. Lateral epitaxial overgrowth of GaN on sapphire and silicon substrates for ultraviolet photodetector applications[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2000, **74**(1): 107~112