

AlGaIn 基 p-i-n 光电探测器负响应现象研究

刘福浩^{1,3}, 许金通^{1,2}, 刘飞^{1,3}, 王立伟^{1,3}, 张燕^{1,2}, 李向阳^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083

3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:对 AlGaIn 基 p-i-n 光电探测器的负光电响应特性进行研究, 从实验上证实了器件中 p 型接触电极的肖特基特性是导致该现象的主导因素. 不同偏压下的响应光谱表明, 这些 AlGaIn 光伏器件中存在较为明显的光导响应特性. 光照和暗背景条件下的 $C-f$ 曲线验证了器件中的持续光电导特性, 而高铝组分铝镓氮材料内存在的大量缺陷被认为是该现象的起因. 系统地研究了 AlGaIn 基 p-i-n 光电探测器存在的负响应现象及其微观机理, 为铝镓氮基日盲器件光电性能的优化提供了重要参考依据.

关键词:光电探测器; 负响应; 持续光电导

中图分类号: TN312+.4 **文献标识码:** A

Negative photoresponse of AlGaIn-based p-i-n photodetector

LIU Fu-Hao^{1,3}, XU Jin-Tong^{1,2}, LIU Fei^{1,3}, WANG Li-Wei^{1,3}, ZHANG Yan^{1,2}, LI Xiang-Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The negative photoresponse characteristics in AlGaIn-based p-i-n photodetector have been studied in this paper. The Schottky contact behavior of p electrode was confirmed to be responsible for this phenomenon. The abnormal photoconductor characteristic was observed in AlGaIn photovoltage device under different biases. The persistent photoconductivity characteristic was verified with the capacitance-frequencies experiment under both illumination and dark conditions. The large amount of defects in AlGaIn material are considered to be the source of this phenomenon. This paper has systematically studied the abnormal photoresponse behavior and its microscopic mechanism in AlGaIn-based p-i-n photodetector, which provides an important foundation for the further optimization of this kind of devices.

Key words: photodetector, negative photoresponse, persistent photoconductivity

PACS: 85.60.Gz

引言

近年来, AlGaIn 基光电探测器因其在火焰探测、导弹预警、化学检测和短距离空间光通信等领域具有重大的应用前景^[1-3] 而受到广泛关注. 日光中 240~280 nm 波段的光线, 由于被地球上空的臭氧层吸收, 该波段称为日盲波段, 工作于这个波段的光电探测器被称为日盲探测器^[4]. 目前, 文献中报道

的 AlGaIn 基日盲探测器的量子效率可以达到 68%^[5]. 然而, 日盲器件的响应光谱中有时会有存在负光电响应, 尤其是当负响应与正响应峰值可以比拟的时候, 将会严重影响器件的实际应用^[6]. 对于负光电响应的起源, 有些文献将其归结于 p 接触电极的肖特基接触特性, 同时 p-GaN 与 p-AlGaIn 之间的异质结也被认为会对负响应有贡献^[6-8]. 本文研究了 AlGaIn 基 p-i-n 光电探测器的负响应现象, 证实

收稿日期: 2013-03-05, 修回日期: 2014-05-29

Received date: 2013-03-05, revised date: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61204134, 61106097); 浙江省科技计划项目(2012C33057)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61204134, 61106097), Science and Technology Planning Programme of Zhejiang Province (2012C33057)

作者简介 (Biography): 刘福浩(1987-), 男, 山东临清人, 博士研究生, 主要从事 GaN 基光电探测器件研究. E-mail: liufuhao@mail.ustc.edu.cn

了器件 p 型电极的肖特基特征是这种现象的主导因素;进一步的实验表明,该器件存在较为明显的光导特性.

1 实验

1.1 实验材料

AlGa_{0.35}N 基 p-i-n 光电探测器结构如图 1 所示. 外延薄膜采用低压 MOCVD 法在双抛蓝宝石衬底(0001)面生长. 材料生长过程为在低温(550 °C)下生长 30 nm AlN 成核层,然后在高温(1 050 °C)下生长 300 nm AlN 缓冲层,之后再生长 15 个周期的 Al_{0.65}Ga_{0.35}N/AlN (5 nm/5 nm) 超晶格层来释放应力. 在生长器件结构之前,先淀积一层 150 nm i-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 层,以提高后续薄膜的生长质量. 器件结构为 p-i-n 结构,先生长 500 nm Si 掺杂的 n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 层,然后再生长 200 nm 非故意掺杂 Al_{0.45}Ga_{0.55}N 层和 20 nm 的 p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N 层,最后,淀积 50 nm 的 p-GaN 层以改善电极接触性能. 在整个生长过程中三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAl)与氨气(NH₃)分别作为 Ga、Al、N 的供应气源,载气是氢气(H₂). 当生长结束,整片材料在 N₂ 氛围 850 °C 条件下退火 20 min,以激活 p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N 和 p-GaN 层中的受主.

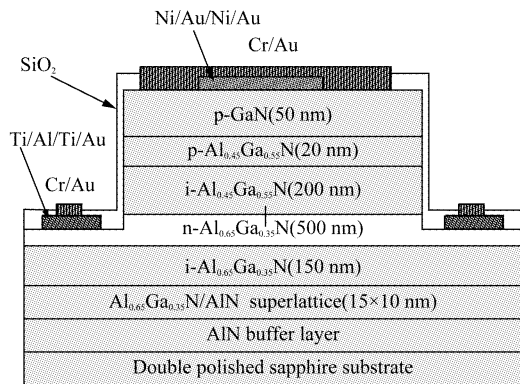


图 1 AlGa_{0.35}N 基 p-i-n 光电探测器结构示意图
Fig. 1 Schematic cross section of the AlGa_{0.35}N-based p-i-n photodetector

1.2 器件制备及测试方法

器件制作过程如下:首先在 p 层上淀积 Ni/Au/Ni/Au (20 nm/20 nm/20 nm/20 nm),在空气氛围中 550 °C 退火 3 min 以形成欧姆接触;通过 ICP (感应耦合等离子体)刻蚀在材料上定义出 300 μm × 300 μm 的方形台面,并刻蚀到 n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 层;在 n 层上生长 Ti/Al (30 nm/50 nm),然后在氮气氛

围 750 °C 条件下退火 30 s 以形成欧姆接触;在器件表面通过磁控溅射方法生长 300 nm SiO₂ 层作为钝化层;最终生长 Cr/Au (30 nm/300 nm) 作为加厚电极,方便器件焊接测试. 制备器件时,由于特殊工艺的要求,器件的 p-GaN 10% 表面覆盖了 p 欧姆接触电极,10% 表面覆盖了加厚电极(Cr/Au).

响应光谱测试中采用氙灯作为紫外光源,氙灯出射的光束经单色仪分光后,照射到铝镓氮器件上. 光电流通过 SR570 低噪声电流前置放大器放大后,输出到 VC98 Victor 万用表,整个测试系统由计算机自动控制和采集. 电容-频率(C-f)特性曲线由计算机控制的 HP 4275A Multi-Frequency LCR 测试仪采集.

2 结果及讨论

2.1 不同面积加厚电极器件的负响应研究

器件的典型响应光谱如图 2 所示. 在图 2 中可以看出器件的响应光谱具有 257 nm、282 nm 和 345 nm 三个峰值,中间的峰值与两侧的峰值符号相反. 器件设计响应光谱峰值在 280 nm 左右,因此设定 282 nm 处的响应峰值符号为正,另外两个响应峰值符号为负.

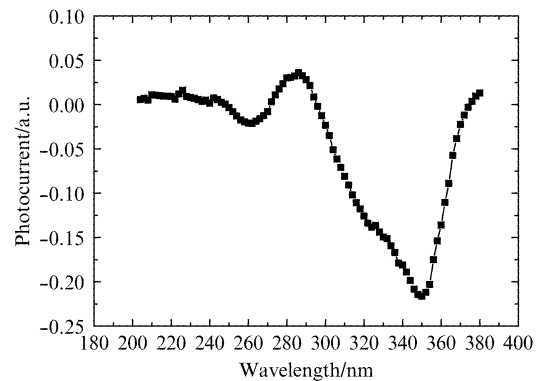


图 2 零偏压下 AlGa_{0.35}N 基 p-i-n 器件的响应光谱
Fig. 2 Photoreponse spectrum of AlGa_{0.35}N based p-i-n photodetector at zero bias

国际上一些研究小组也曾经报道过 AlGa_{0.35}N 器件负响应现象^[6-8]. 一般认为在 p-AlGa_{0.35}N 表面制作欧姆接触电极比较困难,所制备的电极会与 AlGa_{0.35}N 表面形成肖特基接触,而肖特基接触势垒的内建电场与 p-i-n 结的内建电场方向相反,因此在肖特基势垒处产生的光电流方向与 p-i-n 结内产生的光电流相反,导致 AlGa_{0.35}N 器件产生了负响应现象^[7],并未给出该结论的直接证据^[7]. 如果加厚电极(Cr/Au)与

p-GaN 形成肖特基接触,通过改变加厚电极的面积将改变肖特基接触电极的面积,最终将导致光电响应的变化.为此,本实验设计了光敏元面积相同、加厚电极面积逐渐变大的一组器件(共 3 个)来验证 p 型肖特基接触电极对光电响应的影响.

不同加厚电极面积的器件响应光谱如图 3 所示.从图 3 可以看出,345 nm 处的响应幅值随着加厚电极面积的增大而增大,而其它两处峰值的响应幅值并未有明显变化.这一组器件光敏面与 n 电极面积相同,只有加厚电极面积不同.器件在 282 nm 处的正向响应幅值基本相同,表明这一组器件的材料均匀性较为良好,在 345 nm 处负响应幅值的差别不是来源于材料的差异,而是来源于加厚电极面积的变化.由此可以得出,器件的负向响应是由加厚电极导致的肖特基接触特性产生.器件在 257 nm 处有另外一个较小的负响应峰,而 n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 的吸收边 250 nm,所以 257 nm 处的负响应峰可能来源于 n 接触电极处的肖特基接触.

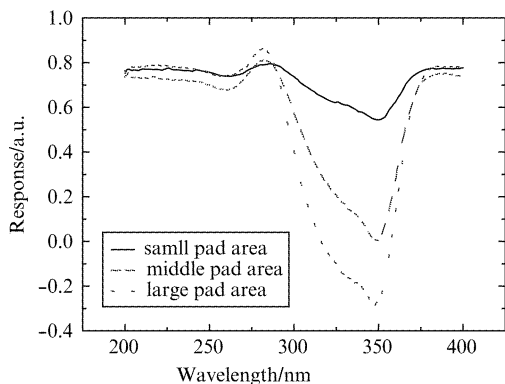


图 3 不同加厚电极面积器件响应光谱
Fig. 3 Photoreponse spectrum of AlGaIn based p-i-n photodetector with different pad areas

2.2 器件能带结构图

AlGaIn 基 p-i-n 器件的能带结构如图 4 所示. p-GaN 处的金半接触与 n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 处的金半接触,都容易产生肖特基接触.两者的内建电场方向在能带图中都是由左指向右,p-i 结的内建电场方向由右指向左.在图中,p-GaN 与 p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N 之间,i-Al_{0.45}Ga_{0.55}N 与 n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 之间均会形成同型异质结,然而根据异质结理论计算,两处的势垒宽度非常小,与肖特基势垒宽度相比可以忽略,在该位置产生的光电流也可忽略^[9].因此,器件中形成的光电流可以由下式表示:

$$I = -I_1 + I_2 - I_3 \quad (1)$$

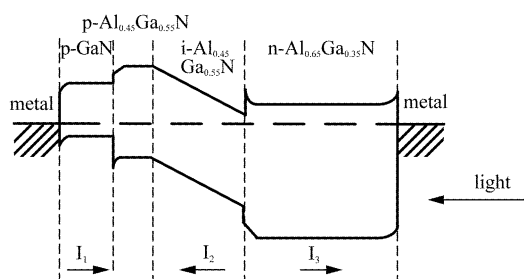


图 4 AlGaIn 基 p-i-n 器件的能带图
Fig. 4 Band diagram of AlGaIn based p-i-n device

其中, I 表示流过器件的总光电流, I_1 表示 p 表面肖特基接触产生的光电流, I_2 表示 p-i-n 结内产生的光电流, I_3 表示 n 表面肖特基接触产生的光电流.当光从背面(蓝宝石衬底面)入射时,日盲紫外中较短的部分紫外光(波长小于 260 nm)被 n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 层吸收,无法入射到 i 区, I_1 和 I_2 为零,此时的光电流为 I_3 ,符号为负,这对应于 257 nm 左右的负响应峰;当波长增加(波长位于 260 ~ 290 nm 之间),光线可以入射到 i 区,形成光电流 I_2 ,这对应于 280 nm 左右的正响应峰;当波长继续增加(波长大于 290 nm),使得光线不能被 n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N、i-Al_{0.45}Ga_{0.55}N 和 p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N 层吸收,而只能被 p-GaN 层吸收时,产生光电流 I_1 ,这对应于 345 nm 处的负向响应峰.

2.3 不同偏压下器件的响应光谱

为了系统地研究肖特基电极对器件光电响应的影响,本文研究了不同偏压下器件的响应光谱特性,实验结果如图 5 所示.零偏压下器件的响应光谱,已经在上文讨论过.当施加偏压时,器件的响应光谱与零偏时的响应光谱有明显区别.当偏压较大时,器件响应光谱中只有一个峰值,没有零偏时的负响应现象;器件的峰值响应幅值强度依赖于所施加偏压. AlGaIn p-i-n 结耗尽区在反向偏压下会扩大,满足如下公式^[10]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - V)} \quad (2)$$

其中, ϵ_s 是 AlGaIn 介电常数, q 是电子电荷量, N_A 对应 p 区空穴浓度, N_D 对应 i 区电子浓度, V_{bi} 是无外加偏压时器件内建电场, V 是外加电场.由式(2)可知,器件在反偏电压下耗尽区展宽,光响应增大,但不是线性增大,而器件在正向偏压下耗尽区会减小,同时流过较大的暗电流.由图 5 可知,响应峰值(在 290 nm 左右)与施加偏压呈线性相关,表明此时光响应不是由耗尽区的展宽引起,可能是由器件的光

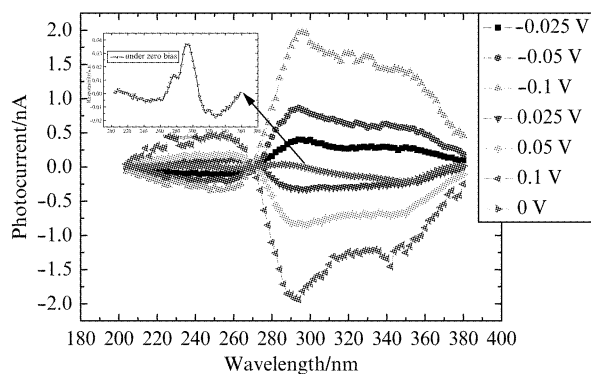


图5 不同偏压下器件响应光谱
Fig. 5 Photoresponse of AlGaN photodetector at different biases

电导响应引起的。

器件的等效模型如图6所示。由于 AlGaN 材料中位错密度较高,导致结区的漏电流在小偏压下已经很大^[8],这等效为 p-i-n 结并联一个较小的电阻 R_{sh} 。两接触端的肖特基结与 p-i-n 结相同,会产生较大的电流,结特性在外加偏压下退化,可以等效为一个串联电阻 R_1 。中性区电阻为 R_2 , p 区掺杂浓度比 n 区小一个数量级,因此认为中性区电阻 R_2 主要由 p 区电阻构成。当器件施加偏压时,结区泄漏电流较大,结区的等效电阻减小,一部分压降会降落在中性区电阻上,导致了光电导效应的产生。

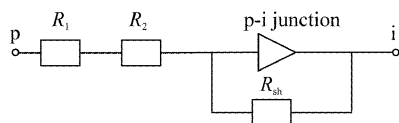


图6 p-i 结等效电路图
Fig. 6 Equivalent circuit of p-i junction

测试时,器件中电流在去掉光照后缓慢变小,这与 GaN 基光导器件的持续光电导现象符合^[11]。同时,响应光谱在短波区域(波长小于 270 nm)幅值随波长增加逐渐减小,是由于在该波段光生电流极其微弱,而测试扫描间隔时间较短,上次光照时被陷阱捕获的载流子逐渐释放,与过剩载流子复合,回路中的电导减小,电流因此减小。

2.4 器件的电容频率测试

电容频率测试($C-f$ 测试)时,器件外加偏压 0.1 V,频率扫描范围从 1 KHz 到 10 MHz。首先测试无光照时器件的 $C-f$ 曲线,记为 1-off;然后测试在氙灯光照下器件的 $C-f$ 曲线,记为 1-on;将氙灯关掉,5 min 之后再测试器件 $C-f$ 曲线,记为 2-off;5 h 后再

次测试无光照时 $C-f$ 曲线,记为 3-off。从图7可以看出,不同条件下测试的 $C-f$ 曲线可以明显分为两组,有光照时与去掉光照 5 min 后的 $C-f$ 曲线基本相同,另外两种情况的曲线近似相同。这表明施加光照对器件的电容特性产生了一定影响,并且在光照去掉很短的时间内,该特性还继续存在。结合上文分析,在外加偏压下,器件表现出光导响应的特征。一般认为,宽禁带半导体器件的持续光电导现象,是由于材料中存在的深能级陷阱会俘获光生载流子,这些非平衡载流子缓慢释放^[12],改变了器件的电容。当去掉光照 5 h 后,被捕获的大部分载流子已被释放,3-off 曲线已就恢复到 1-off 曲线(加光照之前的状态)。

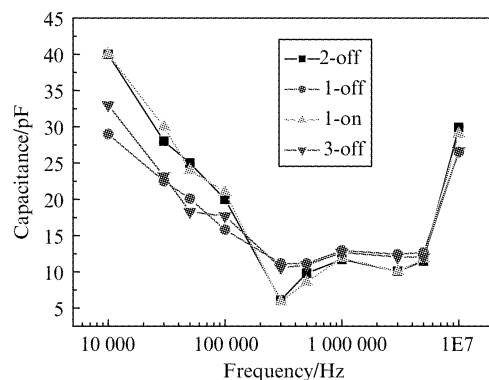


图7 AlGaN 基 p-i-n 器件的电容频率曲线
Fig. 7 $C-f$ curves of AlGaN based p-i-n photodetector

由以上实验可知,AlGaN 基 p-i-n 探测器的负响应现象来源于电极的肖特基接触。负响应现象会抵消部分正向光电流,甚至会超过正向光电流,使得器件不能正常工作。因此,必须抑制该现象的产生,主要通过提高接触材料的载流子浓度^[6]、选择合适的金属膜系,降低肖特基势垒高度、及优化退火等欧姆接触制作工艺条件等三个途径。

高铝组分 AlGaN 材料的高位错密度产生了大量的深能级俘获中心,导致了 p-i-n 器件中的 p 型层(p-GaN 和 p-AlGaN 层)容易表现出较为明显的光导器件特征。光导效应使得光响应变大,但是由于存在持续光电导效应而使得器件无法进行使用。因此,减小 AlGaN 材料中的位错密度,提高材料质量,可以有效抑制该现象的产生。

另外一方面,基于 AlGaN 基紫外探测器的负响应现象,可以设计一种双色探测器,分别在日盲紫外与可见盲紫外波段进行响应。通过调整 p 层材料与 i 层材料的 Al 组份,可以获得不同的响应峰值。对同

一目标进行双波段同时探测,可以有效采集两波段信息,并对相应信号进行分析融合,提高探测系统的分辨识别能力.

3 结论

研究了 AlGa_N p-i-n 探测器的负响应特性,发现器件在 257 nm 与 345 nm 处的两个负向响应峰分别是由 p-GaN 处的金半接触和 n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 处的金半接触的肖特基特征引起.当施加偏压时,器件表现出光导器件特性,并具有持续光电导现象.测试了加光照时与无光照时器件的 *C-f* 曲线,进一步验证了持续光电导现象的存在.

致谢

实验中所使用的 AlGa_N 材料由中科院半导体研究所赵德刚研究员提供,在实验过程中受到红外器件室乔辉、刘诗嘉、刘向阳、汤亦聃和孙晓宇等人员的大力支持和帮助,作者在此表示衷心的感谢.

References

- [1] LI Xiang-Yang, XU Jin-Tong, TANG Ying-Wen, *et al.* GaN based ultraviolet detectors and its recent development [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李向阳, 许金通, 汤英文, 等. GaN 基紫外探测器及其研究进展. *红外与激光工程*). 2006, **35**(3): 276 - 280.
- [2] Razeghi M, Rofalski A. Semiconductor ultraviolet detectors [J]. *J. Appl. Phys.* 1996, **79**(10): 7433 - 7473.
- [3] Pearton S J, Zolper J C, Shul R J, *et al.* GaN: processing, defects, and devices [J]. *J. Appl. Phys.* 1999, **86**(1): 1 - 78.
- [4] Munoz E, Monroy E, Calle F, *et al.* AlGa_N-based photodetectors for solar UV applications [J]. *Proc. SPIE*, 1999, **3629**: 200 - 210.
- [5] McClintock R, Yasan A, Mayes K, *et al.* High quantum efficiency solar-blind photodetectors [J]. *Proc. SPIE*, 2004, **5359**: 434 - 444.
- [6] Zhao, Zhang S, Jiang D S, *et al.* A study on the spectral response of back-illuminated p-i-n AlGa_N heterojunction ultraviolet photodetector [J]. *J. Appl. Phys.* 2011, **110**: 053701.
- [7] Monroy E, Calle F, Pau J L, *et al.* Analysis and modeling of Al_xGa_{1-x}N-based Schottky barrier photodiodes [J]. *J. Appl. Phys.* **88**(4): 2000.
- [8] Collins C J, Chowdhury U, Wong M M, *et al.* Improved solar-blind detectivity using an Al_xGa_{1-x}N heterojunction p-i-n photodiode [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2002, **80**(20): 3754 - 3756.
- [9] YU Li-Sheng, *Semiconductor Heterojunction Physics* [M]. Beijing: Science Press (虞丽生. 半导体异质结物理, 北京: 科学出版社), 2007.
- [10] Sze S M. *Physics of semiconductor devices* [M] Wiley, New York, 1981.
- [11] Xu J T, You D, Tang Y W, *et al.* Electric-field effects on persistent photoconductivity in undoped n-type epitaxial GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2006, **88**: 072106.
- [12] Cai S, Parish G, Dell J M, *et al.* Contribution of hole trap to persistent photoconductivity in n-type GaN [J]. *J. Appl. Phys.* 2004, **96**(2): 1019.