

一种减小 GaN 基肖特基结构紫外 探测器暗电流的方法*

周 梅¹⁾ 常清英¹⁾ 赵德刚^{2)†}

1) 中国农业大学应用物理系, 北京 100083)

2) 中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2007 年 6 月 26 日收到, 2007 年 11 月 19 日收到修改稿)

提出了一种减小 GaN 肖特基结构紫外探测器暗电流的方法. 该方法是在普通的 GaN 肖特基结构的表面增加一层薄的 p-GaN. 模拟计算结果表明, 该层 p-GaN 能增加肖特基势垒高度, 从而减小了器件的暗电流, 提高了器件性能. 进一步的计算还发现, 对于 p 型载流子浓度较高的情况下, 只需要很薄的一层 p-GaN 就能显著增加肖特基势垒高度, 对于 p 型载流子浓度较低的情况下, 则需要较厚的一层 p-GaN 才能有较好的肖特基势垒高度增加效果.

关键词: GaN, 肖特基结构, 紫外探测器, 暗电流

PACC: 7850G, 7280E

1. 引 言

作为第三代半导体——Ⅲ族氮化物的一种重要的光电子器件, GaN 紫外探测器具有灵敏度高、抗干扰能力强, 在宇宙飞船、火灾监测、导弹预警等领域有重要的应用价值, 受到人们的关注. 我们知道, 评价探测器的性能有多种方法和参数. 对于普通的光伏型探测器, 除了量子效率以外, 器件的暗电流也是一个非常重要的参数, 它直接影响到器件的噪声, 降低器件的暗电流从而可以极大提高探测器的性能^[1]. 时至今日, 在 GaN 紫外探测器的研究方面, 国际上不仅先后研制出金属-半导体-金属(MSM)结构、肖特基结构、p-i-n 结构等多种结构的单元器件, 而且还研制出较大规模的 GaN 紫外探测器焦平面阵列, 取得了很好的进展^[2-8]. 在器件研制过程中, 人们发现材料质量和器件工艺对器件性能有重要的影响, 在如何降低器件的暗电流方面, 更多的也是从材料和工艺的角度进行研究. 然而, 器件结构的选择和优化对于器件性能的提高也是非常重要的, 在某些情况下器件结构的合理选择可以在一定程度上弥补材料质量和工艺技术的不足. 可是从文献报道看,

GaN 基紫外探测器的制备大多是采用传统的器件结构, 很少有通过器件结构的改进去提高器件性能的.

肖特基结构是一种常用的器件结构, 在微电子和光电子器件领域中都有广泛的应用. 肖特基结构的紫外探测器的研究也有很多报道^[9], 而且由肖特基结构衍生出来的 MSM 结构也具有平面工艺等很多独特的优点. 与 p-i-n 结构相比, 肖特基结构也有不可忽视的弱点: 肖特基探测器的暗电流要大于 p-i-n 结构器件的暗电流^[1], 这在一定程度上限制了肖特基结构紫外探测器的进一步发展. 为了促进肖特基器件的应用和发展, 必须要采取措施进一步降低器件的暗电流.

本文提出了一种降低 GaN 肖特基结构紫外探测器暗电流的方法. 该方法是在普通的 GaN 肖特基结构紫外探测器上外加一层薄的 p 型 GaN 层. 模拟计算表明, 该 p-GaN 层能增加肖特基势垒高度, 从而降低了器件的暗电流. 进一步的计算还发现, 对于浓度较高的 p-GaN, 只需要很薄的一层就能显著增加肖特基势垒高度, 对于浓度较低的 p-GaN, 则需要适当增加厚度才能有较好的肖特基势垒高度增加效果.

* 中国农业大学青年教师科研启动基金(批准号 2006007)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: dqzhao@red.semi.ac.cn

2. 模拟计算所采用的器件结构及参数

图 1(a) 是普通的 GaN 肖特基结构探测器示意图, 包括一层欧姆接触层 n^+ -GaN 和一层肖特基接触的 i -GaN (n^- -GaN) 层. 图 1(b) 是本文提出的外加 p -GaN 层的 GaN 肖特基结构探测器示意图, 除了在 i -GaN 层上面外加了一层薄的 p -GaN 层外, 其他结构参数都和普通肖特基结构一致. 在本文的模拟计算中, i -GaN 层的厚度固定为 $0.45 \mu\text{m}$, 载流子浓度固定为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, n^+ -GaN 层的载流子浓度都固定为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, i -GaN 与金属之间所形成的肖特基势垒高度为 1.05eV . 我们采用美国宾州大学提供的 AMPS (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures) 软件对器件性能进行模拟计算^[10], 该软件通过数值求解泊松方程和连续性方程得到器件的物理性质. 与常见的一些同类软件相比, AMPS 软件增加了很多模型, 比如考虑了在金属-半导体接触方面热电子发射过程和表面复合、考虑了各种杂质和缺陷的分布情况等等, 可以更准确地反映器件的性质^[10], 是一个对半导体器件特别是光伏器件进行性质分析的有力工具^[11]. 在模拟计算过程

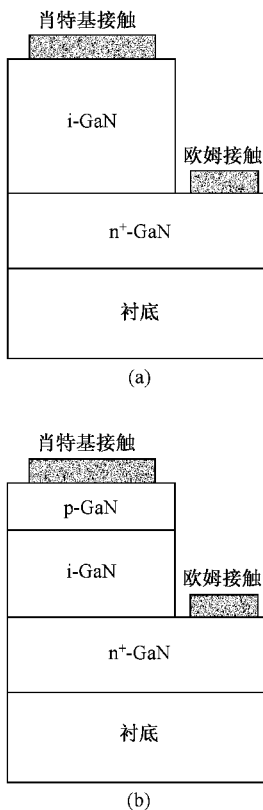


图 1 GaN 肖特基结构器件示意图 (a) 普通结构, (b) 外加 p -GaN 层结构

中, 我们主要研究 p -GaN 层的浓度、厚度等参数对肖特基势垒高度和器件暗电流的影响.

3. 模拟计算结果及讨论

在本文的模拟计算中, 不仅证明了外加 p -GaN 层能够增加肖特基势垒高度, 从而有效地降低了 GaN 肖特基结构紫外探测器的暗电流, 而且还研究了 p -GaN 层的厚度、浓度对肖特基势垒高度增强的效果以及对器件暗电流的影响, 对 p -GaN 层进行了优化设计.

3.1. 外加 p -GaN 层对器件暗电流的影响

我们通过模拟计算, 首先比较了外加 p -GaN 层与普通肖特基结构的 I - V 特性的差别, 然后再对势垒高度的变化进行了研究. 这里的 p -GaN 的载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 厚度为 120nm .

图 2 为普通 GaN 肖特基结构紫外探测器和外加 p -GaN 后器件的 I - V 特性, 图中实线表示普通结构器件的 I - V 特性, 虚线表示外加 p -GaN 层后器件的 I - V 特性. 显然, 在负偏压下, 普通结构器件的暗电流显然高于外加 p -GaN 层后器件的暗电流. 以 -5V 偏压为例, 普通结构的暗电流密度为 $3.28 \times 10^{-8} \text{mA/cm}^2$, 而此时外加 p -GaN 层后器件的暗电流密度为 $9.53 \times 10^{-11} \text{mA/cm}^2$. 为了进一步研究减小器件暗电流的机理, 我们对能带结构进行了计算. 图 3 为普通 GaN 肖特基结构紫外探测器和外加 p -GaN 层后器件的导带结构. 从图 3 可以看出, 普通结构的肖特基势垒高度 $q\Phi_0 = 1.05 \text{eV}$, 而外加 p -GaN 层后器件的肖特基势垒高度 $q\Phi_1 \approx 1.62 \text{eV}$, 势垒高度明显增加了. 我们知道, 器件的暗电流与势垒高度的变化呈指数式关系^[1], 势垒高度稍有增加, 暗电流就会有明显下降. 本文提出的外加 p -GaN 层的方法可以增加肖特基势垒高度^[12, 13], 从而明显降低器件的暗电流, 改善器件的特性.

对于势垒高度增加的原理, 我们大致可以作如下理解: 在没有外加 p -GaN 层时, 肖特基结内建电场的方向是从 i -GaN (n^- -GaN) 指向金属电极. 当在金属电极与 i -GaN 之间外加一层薄的 p -GaN 之后, p -GaN 和 i -GaN 之间会形成一个内建电场, 其方向和未加 p -GaN 时的肖特基结内建电场方向一致, 使得内建电场强度增加. 这对于 i -GaN 一边的电子, 则需要越过更高的势垒才能达到金属, 对于金属一边的

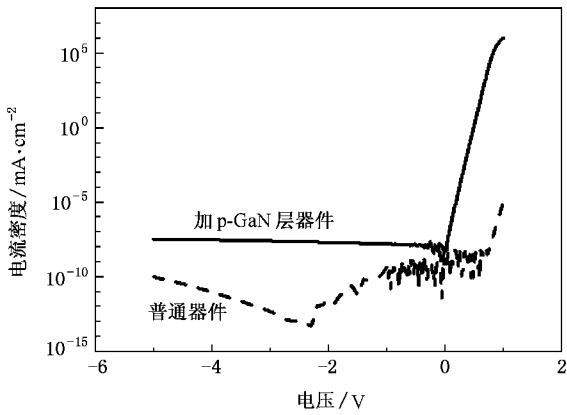


图 2 外加厚度为 120 nm 的 p-GaN 层与普通肖特基结构的器件 I-V 特性比较 p-GaN 的载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

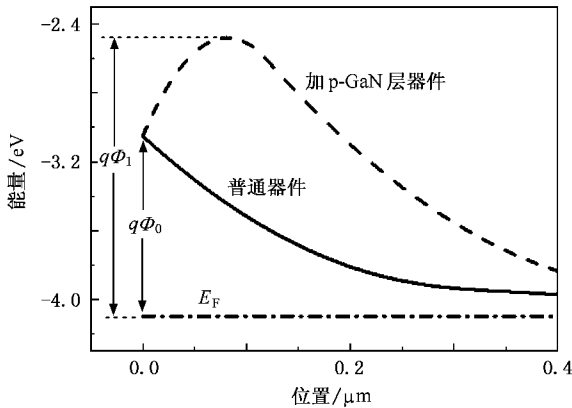


图 3 外加 120 nm 厚的 p-GaN 层器件与普通器件的导带结构 p-GaN 载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

电子同样如此. 这样, 肖特基结的势垒高度增加了, 也将导致器件的暗电流进一步下降. 这里需要强调的是, 肖特基势垒高度增强型探测器与 p-i-n 结构探测器有明显的区别, 肖特基势垒高度增强层 p-GaN 必须完全耗尽, 而 p-i-n 结构中 p-GaN 层必须是欧姆接触而且不能完全耗尽.

3.2. 肖特基势垒高度增强层 p-GaN 的厚度、浓度等参数对器件暗电流的影响

我们研究了肖特基势垒高度增强层 p-GaN 的厚度、浓度等参数对器件暗电流的影响. 这对 p-GaN 层的设计具有指导意义.

首先研究了当 p-GaN 层的载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时厚度对器件暗电流的影响. 图 4 为厚度为 0, 20, 50, 100, 120 nm 时器件的 I-V 特性, 其中外

加 p-GaN 层厚度为零时就是普通的肖特基结构器件. 从图 4 可以看出: 当 p-GaN 厚度为 20 nm 时, 暗电流变化不大. 当 p-GaN 厚度为 50 nm 时, 暗电流有微弱的下降. 当 p-GaN 厚度增加到 100 nm 时, 暗电流有明显的降低, 器件性能得到改善. 当 p-GaN 厚度继续增加到 120 nm 时, 暗电流将继续显著下降, 器件性能也相应得到进一步改善, 此时体现出 p-GaN 层对减小器件暗电流的效果.

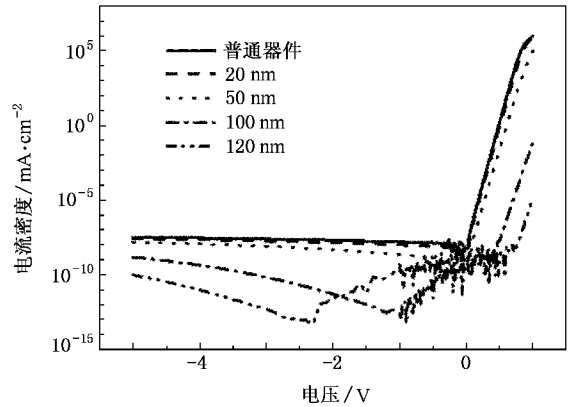


图 4 p-GaN 载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 外加不同厚度的 p-GaN 层器件的 I-V 特性

为了研究 p-GaN 层厚度的增加使器件暗电流减小的物理机制, 我们研究了相应的能带结构变化. 图 5 为不同 p-GaN 层厚度器件的导带结构示意图. 从图中可以看出: 当 p-GaN 厚度为 20 nm 时, 肖特基势垒高度与普通结构相差不大, 对应器件的暗电流变化也不是太大. 当 p-GaN 厚度为 50 nm 时, 肖特基势垒高度有少许增加, 器件的暗电流也有少许下降. 当 p-GaN 层厚度增加到 100 nm 时, 肖特基势垒高度有明显的增加, 此时对应的器件暗电流也有明显的下降. 当 p-GaN 层厚度继续增加到 120 nm 时, 肖特基势垒高度有更显著的增加, 由于器件的暗电流与肖特基势垒高度的变化呈指数关系^[1], 此时对应的器件暗电流也有更显著的下降. 这说明适当增加 p-GaN 层厚度, 能更有效地增加肖特基势垒高度, 也就能更明显地降低器件的暗电流.

我们按照同样的方法, 研究了当 p-GaN 的载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时器件暗电流随 p-GaN 层厚度的变化规律. 图 6 是 p-GaN 层厚度为 0, 20, 30, 50 nm 时器件的 I-V 特性, 其中外加 p-GaN 层厚度为零时就是普通的肖特基结构器件. 从图 6 可以看出: 当 p-GaN 层厚度为 20 nm 时, 器件暗电流有微弱的下

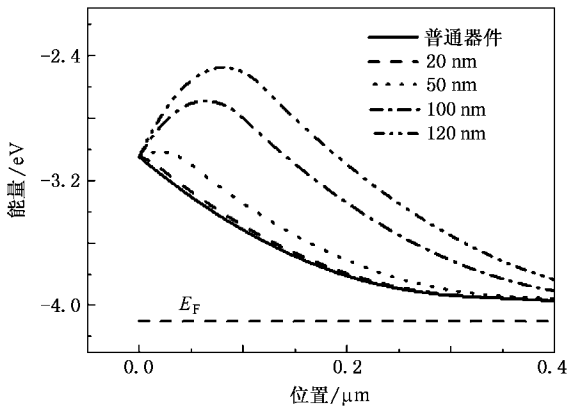


图 5 p-GaN 载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,外加不同厚度 p-GaN 层器件的导带结构

降.当 p-GaN 层厚度增加到 30 nm 时,器件暗电流就有显著的下降.当 p-GaN 层厚度增加到 50 nm 时,器件暗电流急剧下降.与 p-GaN 的载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时的结果类似,适当增加 p-GaN 层厚度,就能得到更低的暗电流.

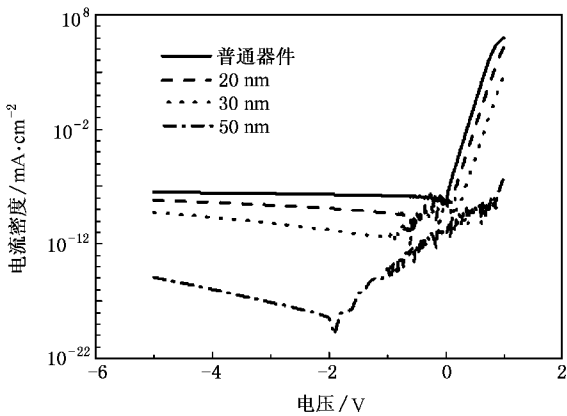


图 6 p-GaN 载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,不同厚度的 p-GaN 层器件的 I-V 特性

图 7 是当 p-GaN 层载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,不同 p-GaN 层厚度器件的导带结构示意图.从图 7 可以看出:当 p-GaN 厚度为 20 nm 时,肖特基势垒高度比普通结构有少许增加,对应的器件暗电流也有少许下降.当 p-GaN 厚度增加到 30 nm 时,肖特基势垒高度有显著增加,对应的器件暗电流也有显著下降.当 p-GaN 层厚度增加到 50 nm 时,肖特基势垒高度急剧增加,此时对应的器件暗电流也急剧下降.我们的结果再次表明,适当增加 p-GaN 层厚度,能够更有效地增加肖特基势垒高度,也就能更明显地降

低器件的暗电流.

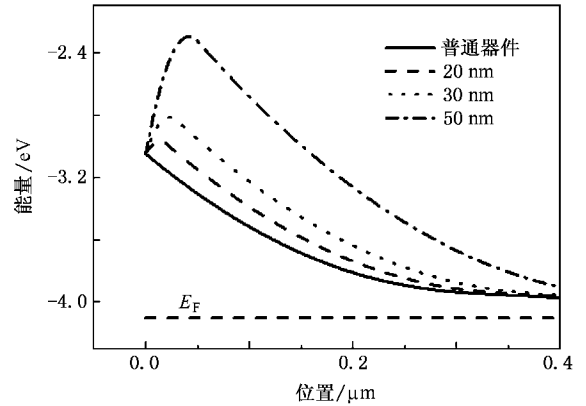


图 7 p-GaN 载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,不同厚度的 p-GaN 层器件的导带结构

图 4 和图 7 的结果使我们注意到如下一个现象:当 p-GaN 层载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,需要采取较厚的 p-GaN 层才会有较好的肖特基势垒高度增加效果,才能导致器件暗电流有明显的降低,当 p-GaN 载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,较薄的 p-GaN 层就会有显著的肖特基势垒高度增加效果,就会导致器件暗电流显著下降.为了更好地观察这个现象,我们研究了在 -5 V 偏压下器件的暗电流密度与 p-GaN 层厚度的关系(图 8).图 8 中的实心方块表示 p-GaN 层的载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,在 -5 V 偏压下器件的暗电流密度与 p-GaN 层厚度的关系,而空心圆点表示 p-GaN 层的载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,在 -5 V 偏压下器件的暗电流密度与 p-GaN 层厚度的关系.我们从图 8 可以看出:当 p-GaN 层的载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,p-GaN 层厚度为 100 nm 左右时,器件暗电流才会有明显的下降;而当 p-GaN

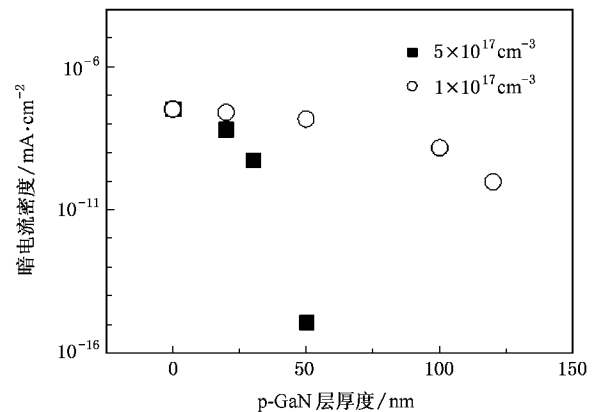


图 8 在 -5 V 偏压下器件的暗电流密度与 p-GaN 层厚度的关系

层的载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, p-GaN 层厚度为 30 nm 左右时,器件暗电流就已经有非常显著的下降.

外加 p-GaN 层降低器件暗电流的原理主要基于 p-GaN 和 i-GaN(n^- -GaN)之间的内建电场方向和肖特基结内建电场方向一致,导致肖特基势垒高度增加,从而使器件的暗电流减小.当 p-GaN 层载流子浓度较高时,在同样厚度的情况下,p-GaN 与 i-GaN 之间的内建电场会更强,从而使得肖特基势垒高度增加也会更多,器件的暗电流下降也会更明显.从本文的研究结果看,如果 p-GaN 载流子浓度不是很高,可以采取增加厚度的方法弥补载流子浓度的不足,同样也会达到较好的减小器件暗电流的效果.

4. 结 论

本文提出了一种减小 GaN 肖特基结构紫外探测器暗电流的方法.该方法是在普通的 GaN 肖特基结构的表面增加一层薄的 p-GaN.模拟计算结果表明,该层 p-GaN 能增加肖特基势垒高度,从而减小器件的暗电流,提高器件的性能.进一步的计算还发现,对于浓度较高的 p-GaN,只需要很薄的一层就能显著增加肖特基势垒高度,对于浓度较低的 p-GaN,则需要适当增加厚度以弥补载流子浓度的不足,才能较好增加肖特基势垒高度,更有效地降低器件暗电流.

- [1] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices* (2nd ed) (New York : John Wiley & Sons)
- [2] Carrano J C , Grudowski P A , Eiting C J , Dupuis R D , Campbell J C 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 1992
- [3] Carrano J C , Li T , Brown D L , Grudowski P A , Eiting C J , Dupuis R D , Campbell J C 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2405
- [4] Chen Q , Yang J W , Osinsky A , Gangopadhyay S , Lim B , Anwar M Z , Khan M A , Kuksenkov D , Temkin H 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 2277
- [5] Katz O , Garber V , Meyler B , Bahir G , Salzman J 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 347
- [6] Osinsky A , Gangopadhyay S , Gaska R , Williams B , Khan M A , Kuksenkov D , Temkin H 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2334
- [7] Xu G Y , Salvador A , Kim W , Fan Z , Lu C , Tang H , Morkoc H , Smith G , Estes M , Goldenberg B , Yang W , Krishnankutty S 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2154
- [8] McClintock R , Mayes K , Yasan A , Shiell D , Kung P , Razeghi M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 011117
- [9] He Z , Kang Y , Tang Y W , Li X , Fang J X 2006 *Chin. Phys.* **15** 1325
- [10] Zhou M , Zuo S H , Zhao D G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5513 (in Chinese) [周 梅、左淑华、赵德刚 2007 物理学报 **56** 5513]
- [11] Hu Z H , Liao X B , Diao H W , Xia C F , Xu L , Zeng X B , Hao H Y , Kong G L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2302 (in Chinese) [胡志华、廖显伯、刁宏伟、夏朝凤、许 玲、曾湘波、郝会颖、孔光临 2005 物理学报 **54** 2302]
- [12] Corwell C R , Sare J C , Sze S M 1965 *Trans. Met. Soc. AIME* **23** 478
- [13] Shannan J M 1976 *Solid-State Electron.* **19** 537

A new method to reduce the dark current of GaN based Schottky barrier ultraviolet photodetector *

Zhou Mei¹⁾ Chang Qing-Ying¹⁾ Zhao De-Gang^{2)†}

¹⁾ Department of Applied Physics, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

²⁾ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 26 June 2007 ; revised manuscript received 19 November 2007)

Abstract

A new method to reduce the dark current of GaN based Schottky barrier ultraviolet photodetector is proposed. In comparison with conventional i-GaN/n⁺-GaN structure, an additional thin p-GaN cap layer is introduced on the i-GaN (n⁻-GaN) in the new structure. The simulation results showed that the additional layer makes the dark current to decrease in the photodetector due to the increase of the Schottky barrier height. The effects of thickness and carrier concentration of p-GaN layer on the dark current of the photodetector were also studied. It is suggested that the dark current of the new structure device could be better reduced by employing p-GaN with higher carrier concentration as the cap layer.

Keywords : GaN, Schottky structure, ultraviolet photodetector, dark current

PACC : 7850G, 7280E

* Project supported by the Scientific Research Foundation for the Young Scholars of China Agriculture University (Grant No. 2006007).

† Corresponding author. E-mail : dgzhao@red.semi.ac.cn