

p-GaN 层厚度对 GaN 基 p-i-n 结构紫外探测器性能的影响*

周 梅¹⁾ 赵德刚^{2)†}

1) 中国农业大学理学院应用物理系, 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 10 月 17 日收到, 2007 年 12 月 27 日收到修改稿)

研究了 p-GaN 层厚度对 GaN 基 pin 结构紫外探测器性能的影响. 模拟计算表明, 较厚的 p-GaN 层会减小器件的量子效率, 然而同时也会减小器件的暗电流. 较薄的 p-GaN 层会增加器件的量子效率, 但是同时也增加了器件的暗电流. 进一步的分析表明, 金属和 p-GaN 之间的结电场是出现这种现象的根本原因. 在实际的器件设计中, 应该根据实际需要选择 p 型层的厚度.

关键词: GaN, 紫外探测器, 量子效率, 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 基紫外探测器具有可见光盲、量子效率高、可零偏压工作、耐高温、抗腐蚀等优点, 在火箭跟踪、大气监测、火情告警等领域有广泛的应用前景. 经过多年的努力, 人们不仅先后研制出 MSM(金属-半导体-金属)结构、肖特基结构、p-i-n 结构等多种结构的 GaN 基紫外探测器单元器件, 而且还研制出紫外焦平面阵列, 并且已经实现成像^[1-8]. 在众多的器件结构中, 从理想的器件物理来说, p-i-n 结构是最好的结构, 应该具有最好的性能^[9], 但是实际情况并非完全如此. 一般都认为是 p-GaN 质量不高、欧姆接触不好所致. 其实, 器件结构参数的设计也是非常重要的, 合理的结构参数也能在一定程度上使器件性能达到最优. 但是, 从目前的文献来看, 大多也是集中在材料性能的改善以及对器件性能的分析上, 很少专门去讨论 p-i-n 结构参数的设计. 而且人们在不断改善 p-GaN 质量和欧姆接触的时候, 很少有文献从器件物理上讨论其机理, 这在一定程度上阻碍了器件的发展.

本文主要讨论了 p-GaN 的厚度对 p-i-n 结构 GaN 紫外探测器性能的影响. 模拟计算发现, 增加 p-

GaN 层厚度会降低器件的量子效率, 但是也会减小器件的暗电流, 而减小 p-GaN 层厚度会增加器件的量子效率, 但是也会增加器件的暗电流. 我们通过能带结构的分析, 发现金属和 p-GaN 之间的结电场是造成这种现象的根本原因. 我们的研究表明: 在欧姆接触不好的情况下, 要根据实际需要设计 p-GaN 的厚度, 如果希望器件的量子效率较高, 则选择较薄的 p-GaN 层, 如果希望器件的暗电流很小, 则选择较厚的 p-GaN 层.

2. 模拟计算所采用的器件结构示意图及结构参数

图 1 是用于本文模拟的 p-i-n 结构 GaN 紫外探测器结构示意图, 包括 n⁺-GaN 层、i-GaN 层(弱 n 型)和 p-GaN 层. 在本文的模拟计算中, i-GaN 层的厚度固定为 0.45 μm, 载流子浓度固定为 1 × 10¹⁶ cm⁻³, n⁺-GaN 层的载流子浓度都固定为 5 × 10¹⁸ cm⁻³, p-GaN 层的载流子浓度固定为 1 × 10¹⁷ cm⁻³. 考虑到实际情况中良好的 p 型欧姆接触很难实现, 我们假设 p-GaN 与金属之间存在一定的势垒, 其势垒高度为 0.7 eV. 我们采用美国宾州大学提供的 AMPS 软件对器件性能进行模拟计算^[10, 11], 该软件通过求解泊松方程和连续性方程, 能够对半导体器件的特性进行

* 国家自然科学基金(批准号: 60776047)和中国农业大学青年教师科研启动基金(基金批准号: 2006007)资助的课题.

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

准确分析,尤其是对半导体光伏特性分析的有力工具.在模拟计算过程中,我们主要研究 p-GaN 层的厚度对 p-i-n 结构探测器性能的影响.

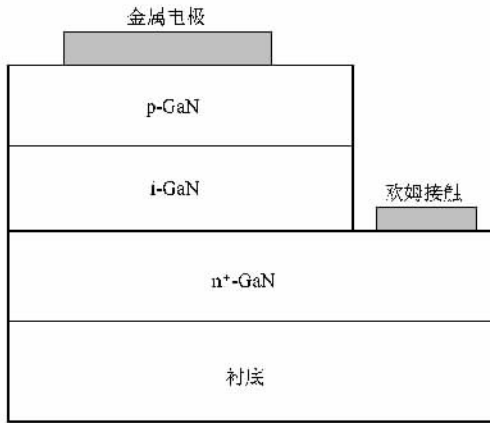


图 1 模拟计算中所采用的 GaN 基 p-i-n 结构紫外探测器示意图

3. 结果和讨论

本文通过模拟计算,不仅研究了 p-GaN 层厚度对探测器的量子效率的影响,而且研究了 p-GaN 层厚度对器件的暗电流的影响,并通过能带结构的计算,分析了背后的物理机理,对器件的设计和制备有一定的指导作用.

我们首先研究了 p-GaN 层厚度对 GaN p-i-n 结构紫外探测器量子效率的影响.图 2 表示的是不同 p-GaN 层厚度下模拟计算得到的器件响应光谱,其中曲线 a, b, c, d, e 分别代表 p-GaN 层的厚度分别为 20, 100, 180, 300, 500 nm 时器件的响应光谱.我们可以清楚地看到, p-GaN 厚度对器件的量子效率影响很大.当 p-GaN 层厚度为 20 nm 时,不仅在带边附近量子效率高,而且在更短波长时,器件也表现出较高的量子效率,当入射光波长变短时,器件的量子效率下降得并不是很明显.当 p-GaN 层厚度增加到 100 nm 时,不仅在带边附近量子效率降低,而且在更短波长时,器件的量子效率降得更低,器件的量子效率随波长变短,下降的程度加剧.当 p-GaN 层厚度进一步增加是,趋势同样如此.特别是当 p-GaN 层厚度增加到 500 nm 时,在带边附近量子效率较低,而且在波长为 250 nm 左右时器件的量子效率几乎降低到接近于 0.要制备出具有较高量子效率的紫外探测器,最好尽量采取厚度较小的 p-GaN 层.

为了理解 p-GaN 层厚度对器件的量子效率影响的机理,我们对其能带结构进行了分析.图 3 为模拟

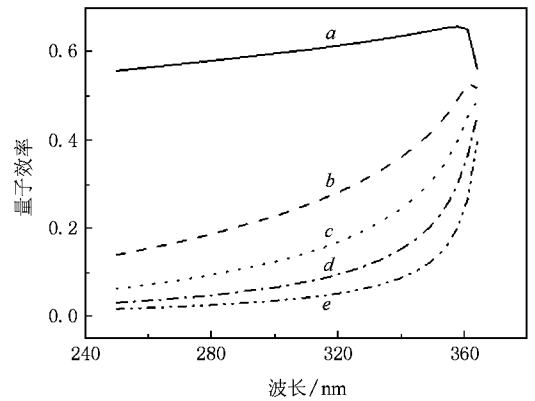


图 2 不同 p-GaN 厚度下 p-i-n 结构紫外探测器的响应光谱(曲线 a, b, c, d, e 代表器件中 p-GaN 的厚度分别为 20, 100, 180, 300, 500 nm)

计算得到的不同 p-GaN 层厚度下 p-i-n 结构 GaN 紫外探测器的导带结构图,其中曲线 a, b, c, d, e 分别代表 p-GaN 层的厚度分别为 20, 100, 180, 300, 500 nm 时器件的导带结构.我们可以看出这几条曲线之间有很大的差别.当 p-GaN 层厚度为 20 nm 时,如曲线 a 所示,导带在 p-GaN, i-GaN 区的能带都是向同一个方向弯曲,意味着这两个区域的电场方向一致^[9].当 p-GaN 层厚度增加到 100 nm 时,导带结构则明显不同,如图中曲线 b 所示,导带在 p-GaN, i-GaN 区的能带弯曲的方向却不一致了,意味着这两个区域的内建电场方向相反.当 p-GaN 层厚度进一步增加时,导带在 p-GaN, i-GaN 区的能带弯曲的方向还是不一致,但是 p-GaN 的内建电场强度更大,和 i-GaN 区的电场差别也更大.

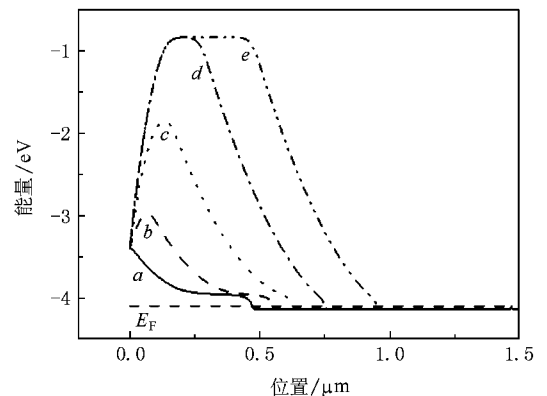


图 3 不同 p-GaN 厚度下 p-i-n 结构紫外探测器的导带结构示意图(曲线 a, b, c, d, e 代表器件中 p-GaN 的厚度分别为 20, 100, 180, 300, 500 nm)

为了更好的说明这种能带的差别对器件的量子效率的影响机理,我们以 p-GaN 层厚度为 180 nm 的

情况下为例进行了分析.图4为 p-GaN 层厚度为 180 nm 时的器件的能带结构图(包括导带、价带、费米能级等).如图所示,当入射光照到器件上时,一部分光被 p-GaN 层吸收,从而产生的光电流为 I_2 ,另外一部分光被 i-GaN 层吸收,从而产生的光电流为 I_1 .由于这两层的内建电场方向相反,这两层吸收光所产生的光生载流子运动的方向也正好相反.在图4中,i-GaN 层吸收所产生的光电流 I_1 是从右到左,而 p-GaN 层吸收所产生的光电流 I_2 是从左到右,这两层形成的光电流的方向也是相反的,那么器件总的光电流实际上是这两层半导体产生的光电流之差 $I_1 - I_2$.我们很容易就判断出:当 p-GaN 厚度越大时,这一层所形成的光电流 I_2 也就越大,和 i-GaN 层所产生的光电流 I_1 差别也越大,那么整个探测器的光电流 $I_1 - I_2$ 反而会减小.所以随着 p-GaN 厚度增加时,器件的量子效率减小.另一方面,当入射光的波长较长时,大量的光子能够透过 p-GaN 层而被 i-GaN 层所吸收,此时 i-GaN 所形成的光电流 I_1 相对较大,而 p-GaN 层的光电流 I_2 相对较小,这样总的器件光电流 $I_1 - I_2$ 也较大.当入射光的波长较短时,吸收系数也变大,那么透入深度变小,很多光子被 p-GaN 层所吸收,而能透过 p-GaN 层被 i-GaN 层所吸收的光子数变少,此时 i-GaN 层所产生的光电流 I_1 也变小,而由于大量的光子被 p-GaN 层吸收,这一层所形成的光电流 I_2 相对减小的并不大,这样总的器件光电流 $I_1 - I_2$ 减小.我们此时也很容易看出,p-GaN 层的厚度越大,在短波长范围时,所形成的光电流也越大,这样器件的总的光电流会变得更小.所以随着波长减小,p-GaN 层厚度更大的器件的量子效率会下降得更明显.从上述分析结果和模拟计算结果来看,要得到较高量子效率的 p-i-n 结构紫外探测器,最好采用厚度较薄的 p-GaN 层.

我们还研究了 p-GaN 层厚度对器件的暗电流的影响.如图5是模拟计算得到的不同 p-GaN 厚度下探测器的 $I-V$ 特性曲线,其中曲线 a, b, c, d, e 分别代表 p-GaN 层的厚度分别为 20, 100, 180, 300, 500 nm 时器件的 $I-V$ 特性.可以看出,当 p-GaN 层厚度为 20 nm 时,器件的暗电流比较大,当 p-GaN 层厚度增加到 100 nm 时,器件的暗电流明显减小,当 p-GaN 层厚度进一步增加,特别是增加到 300 nm 以上时,器件的暗电流呈现急剧减小的趋势.我们知道,探测器的暗电流是一个重要指标,暗电流越小,噪声也就越

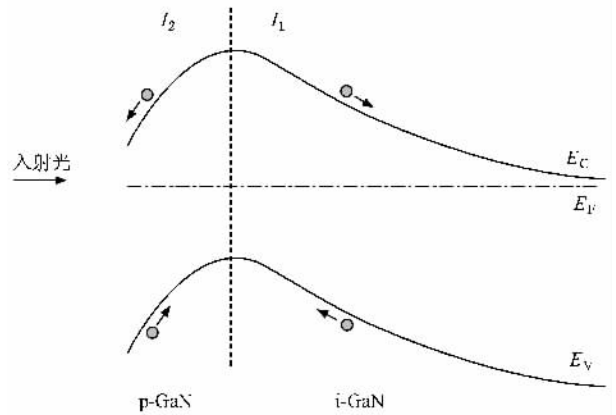


图4 p-GaN 层厚度为 180 nm 时 p-i-n 结构探测器的光电流组成示意图

小,从而意味着比探测率越大,器件性能也就越好.从我们的模拟计算中可以看出,增加 p-GaN 层的厚度,可以显著减小器件的暗电流.从这个角度来说,增加 p-GaN 层厚度,可以改善器件的性能.

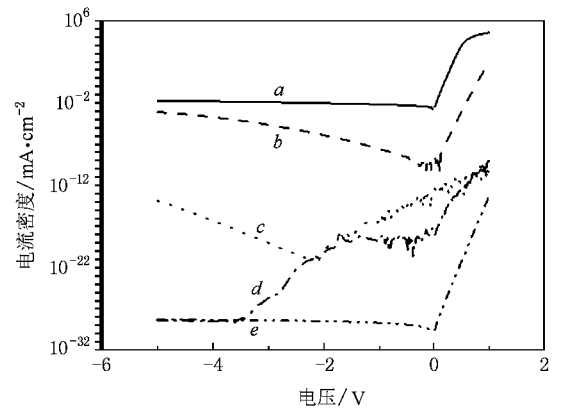


图5 不同 p-GaN 厚度下 p-i-n 结构紫外探测器的 $I-V$ 特性(曲线 a, b, c, d, e 代表器件中 p-GaN 的厚度分别为 20, 100, 180, 300, 500 nm)

我们还是结合能带结构图将 p-GaN 层厚度对器件暗电流影响的机理进行了分析.图6是从图3中选择了 p-GaN 层厚度分别为 20 nm, 180 nm, 500 nm 时的导带结构图,我们针对图6进行了载流子的运输过程分析.如图6所示,可以看出,当 p-GaN 层厚度为 20 nm 时,p-GaN 层在金属和 i-GaN 层之间的作用下,p-GaN 层完全耗尽,这样载流子的运输机理和常规的 p-i-n 结构器件有很大差别,这样金属的电子越多,p-GaN 层和 i-GaN 层的势垒到达 n^+ -GaN 区,这样一来器件类似于肖特基器件的运输机理,暗电流比较大.当 p-GaN 层厚度增加到 180 nm 时,此时 p-GaN 层仍然处于完全耗尽的状态(图3的能带结构

也验证了这一点),在反向偏压下,p-GaN 层没有足够的电子运输到 n^+ -GaN 区,那么还是由金属的电子越过 p-GaN 层、i-GaN 层来运输到 n^+ -GaN 层,但是和 p-GaN 层厚度为 20 nm 时相比,金属的电子需要越过的势垒高度增加了很多^[12,13],这样器件的暗电流减小了.但是,当 p-GaN 层厚度进一步增加到 500 nm 时,此时 p-GaN 层没有完全耗尽,在反向偏压下 p-GaN 的电子能够漂移到 n^+ -GaN 层,由于 p-GaN 层的电子属于少数,而电子在金属属于多数,这样器件的暗电流进一步下降很多.实际上,p-GaN 层厚度为 500 nm 时的器件也就属于正常的 p-i-n 结构了,运输机理也完全发生根本改变,器件的暗电流由 p-GaN 层的电子和 n^+ -GaN 层的空穴的漂移电流组成^[9],所以器件的暗电流急剧下降.根据图 3、图 6 也可以看出,要使得器件的暗电流减小,必须保证 p-GaN 层不能完全耗尽,那么则需要提高 p-GaN 层的浓度或者厚度.如果在 p-GaN 层浓度不够高的情

况下,可以适当的增加 p-GaN 层的厚度,以期得到暗电流较小的器件.

我们从模拟计算结果来看,我们可以看到一个有趣的现象:p-GaN 层厚度对器件的量子效率和暗电流的影响是相反的,当 p-GaN 层厚度增加时,虽然器件的量子效率下降了,但是同时却减小了器件的暗电流.我们希望高性能的探测器不仅量子效率高,而且同时暗电流小.我们从图 3 的导带结构图来看,实质上是 p-GaN 和金属之间存在一个肖特基的结电场,这个结电场的存在,不仅导致器件的光电流减小,而且耗尽了一部分 p-GaN 层的自由载流子.如果这个肖特基结效果不是很强,是一个比较好的欧姆接触,那么就不会有上述现象存在,从这个角度来说,做好 p 型欧姆接触对于提高 p-i-n 结构的器件性能还是很重要的.如果欧姆接触不是很理想,那么就可以根据实际需要,选择合适厚度的 p-GaN 层.

4. 结 论

我们研究了 p-GaN 层厚度对 p-i-n 结构 GaN 紫外探测器性能的影响.模拟计算发现:当 p-GaN 厚度增加时,器件的量子效率下降,但是同时器件的暗电流也减小,当 p-GaN 层厚度减小时,器件的量子效率增加,但是同时器件的暗电流也增加了,p-GaN 层厚度对器件的量子效率和暗电流的影响是相反的,可以根据实际需要选择合适的厚度进行设计.我们同时也发现,做好 p-GaN 的欧姆接触对于同时改善量子效率和暗电流特性是非常重要的.

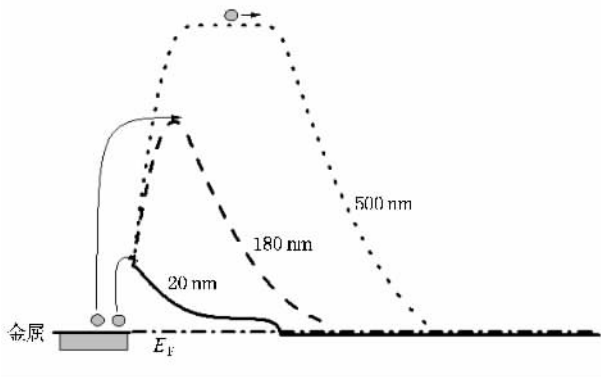


图 6 p-GaN 层厚度分别为 20, 180, 500 nm 时 p-i-n 结构探测器的导带结构和载流子运输过程示意图

[1] Carrano J C, Grudowski P A, Eiting C J, Dupuis R D, Campbell J C 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 1992
 [2] 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
 [3] 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
 [4] Katz O, Garber V, Meyler B, Bahir G, Salzman J 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 347
 [5] Osinsky A, Gangopadhyay S, Gaska R, Williams B, Khan M A, Kuksenkov D, Temkin H 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2334
 [6] Xu G Y, Salvador A, Kim W, Fan Z, Lu C, Tang H, Morkoc H, Smith G, Estes M, Goldenberg B, Yang W, Krishnakutty S 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2154

[7] McClintock R, Mayes K, Yasan A, Shiell D, Kung P, Razeghi M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 011117
 [8] He Z, Kang Y, Tang Y W, Li X, Fang J X 2006 *Chin. Physics* **15** 1325
 [9] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices* 2nd Edition (New York: John Wiley & Sons)
 [10] The freeware program 'AMPS-1D' is supplied by the Electronic Materials and Processing Research Laboratory of Penn State University, USA.
 [11] 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
 [12] Corwell C R, Sare J C, Sze S M 1965 *Trans. Met. Soc. AIME* **23** 478
 [13] Shannan J M 1976 *Solid-State Electronics* **19** 537

Effect of p-GaN layer thickness on the performance of p-i-n structure GaN ultraviolet photodetectors^{*}

Zhou Mei¹⁾ Zhao De-Gang^{2)†}

¹⁾ *Department of 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 17 October 2007; revised manuscript received 27 December 2007)

Abstract

We investigated the influence of thickness of p-GaN layer on the performance of p-i-n structure GaN ultraviolet photodetector. Through the simulation calculation, it was found that both the quantum efficiency and dark current of device decrease when employing thicker p-GaN layer, while both the quantum efficiency and dark current increase with decreasing thickness of p-GaN layer. It is suggested that the Schottky contact junction between the metal and p-GaN may be responsible for the incompatible effect. We have to make a suitable choice of the thickness of p-GaN in the device design according to the application requirement.

Keywords: GaN, ultraviolet photodetector, quantum efficiency, dark current

PACC: 7850G, 7280E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60776047) and the Scientific Research Foundation for the Young Scholars of China Agriculture University (Grant No. 2006007).

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