

一种新型 GaN 基肖特基结构紫外探测器^{*}

周 梅¹⁾ 左淑华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)

(2006 年 12 月 28 日收到, 2007 年 2 月 1 日收到修改稿)

提出了一种新型 GaN 基肖特基结构紫外探测器. 该结构在常规的 GaN 肖特基结构紫外探测器上外加了一层禁带宽度更大的 n 型 AlGaIn 层. 模拟计算结果表明: 与常规器件结构相比, 该结构能有效地减小表面复合的影响, 提高了器件的量子效率. 进一步地研究结果还表明: 采取较薄、载流子浓度较高的 AlGaIn 层更有利于提高这种新结构器件的量子效率.

关键词: GaN, 肖特基结构, 紫外探测器, AlGaIn

PACC: 7850G, 7280E

1. 引 言

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、紫外线辐射计量等领域有重要的应用价值, 受到人们的极大关注. 经过多年的发展, 不仅研制出 MSM 结构、肖特基结构、pin 结构等多种结构的 GaN 基紫外探测器单元器件^[1-6], 而且还研制成功 320×256 的太阳盲紫外探测器焦平面阵列^[7], 取得了长足的进步. 材料质量对 GaN 基光电子器件起着至关重要的作用, GaN 基紫外探测器的发展同样如此, 人们更多地把目标集中在提高材料质量方面来改善 GaN 紫外探测器的器件性能. 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. 在某种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的不足. 从文献报道来看, GaN 基紫外探测器的制备都是采用传统器件结构, 只是在结构参数上、器件工艺上进行过优化和研究, 并没有结构上的突破.

肖特基结构具有势垒高度高、回避 p 型等优点, 是 GaN 基紫外探测器的一种常用结构^[8], 但是肖特基结构也有一个非常明显的缺点: 受表面态影响严重^[9]. 表面态由很多深能级组成, 可以加剧光生电

子-空穴对的复合, 从而降低器件的量子效率. 要消除表面态是非常困难的, 从而在一定程度上制约了肖特基结构器件的发展.

本文针对常规的肖特基结构探测器的弱点, 提出了一种新型的 GaN 基肖特基结构紫外探测器. 该结构在普通的 iGaN/nGaN 肖特基结构上外加一层很薄的禁带宽度更大的弱 n 型 AlGaIn 层, 变成了 iAlGaIn/iGaN/nGaN 结构, 这样当光子能量为 GaN 带边附近的入射光照射到器件时, 入射光能透过 AlGaIn 层而被 GaN 层吸收, 这样量子效率就容易就主要受 AlGaIn/GaN 异质界面态的影响. 众所周知, 在一般情况下, 界面态密度远远低于表面态密度, 从而减少了光生载流子的复合, 提高了量子效率. AlGaIn 层扮演了相当于窗口层的角色. 模拟计算的结果表明: 带有 AlGaIn 窗口层的 GaN 基肖特基结构紫外探测器的量子效率的确得到了提高.

2. 模拟计算所采用的器件结构示意图及结构参数

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 层, 图 1(b) 是带有 n 型 AlGaIn 窗口层的 GaN 肖特基结构探测器示意图, 除了在 i-GaN 层上

^{*} 中国农业大学青年教师启动基金(基金号 2006007)资助的课题.

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

面外加了一层薄的 AlGaIn 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^+ -GaIn 层的载流子浓度都固定为 $5 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$,GaIn 与金属之间所形成的肖特基势垒高度为 $1.05\ \text{eV}$.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],这是一个对光伏特性分析的有力工具^[11].在模拟计算过程中,我们主要研究 AlGaIn(这里假定 Al 组分约为 15%,吸收边大约为 330nm 处)窗口层的参数对新器件性能的影响^[12].

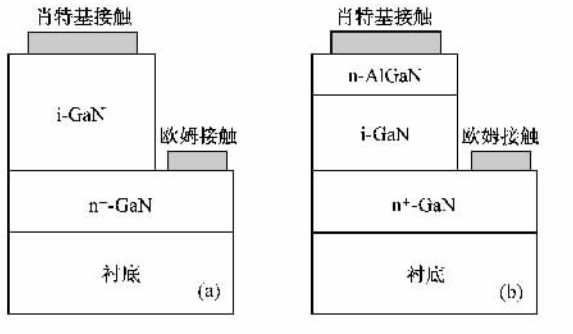


图 1 GaIn 肖特基结构器件示意图 (a)普通结构 (b)新型结构

3. 模拟计算结果与讨论

在本文的模拟计算中,我们不仅证明了带有 n 型 AlGaIn 窗口层的肖特基结构紫外探测器的确能提高器件的量子效率,而且还研究了 AlGaIn 窗口层的厚度、浓度对新结构器件性能的影响,对新结构中 AlGaIn 窗口层进行了优化设计.

3.1. 新结构与普通结构器件的性能比较

在普通肖特基结构紫外探测器中,表面态所引起的表面复合导致了器件的量子效率降低,我们比较了不同的表面复合速率下,新结构与普通结构器件性能的差别.

图 2(a)(b)(c)分别为表面复合速率为 $1 \times 10^5\ \text{cm/s}$, $1 \times 10^7\ \text{cm/s}$, $1 \times 10^{10}\ \text{cm/s}$ 时新结构、普通结构 GaIn 紫外探测器的响应光谱,这里 n 型 AlGaIn 层的厚度为 20 nm,载流子浓度为 $1 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$.可以看出,当表面复合速率为 $1 \times 10^5\ \text{cm/s}$ 时,新结构、普通结构器件的量子效率差别不是很大,而且量子效率随波长的变化很小,响应光谱很平,当表面复合速率为 $1 \times 10^7\ \text{cm/s}$ 时,新结构的优势就体现出来了,无

论在长波、还是在短波,新结构的量子效率都高于普通结构,但是两者的响应光谱在短波处都有所下降;当表面复合速率为 $1 \times 10^5\ \text{cm/s}$ 时,新结构与普通结构之间的差别就更大,新结构器件的量子效率明显高于普通结构的探测器,在 330 nm—360 nm 范围内,新结构器件的优势尤其明显,量子效率明显高于普通结构,但是两者的响应光谱在短波处下降得更加厉害.

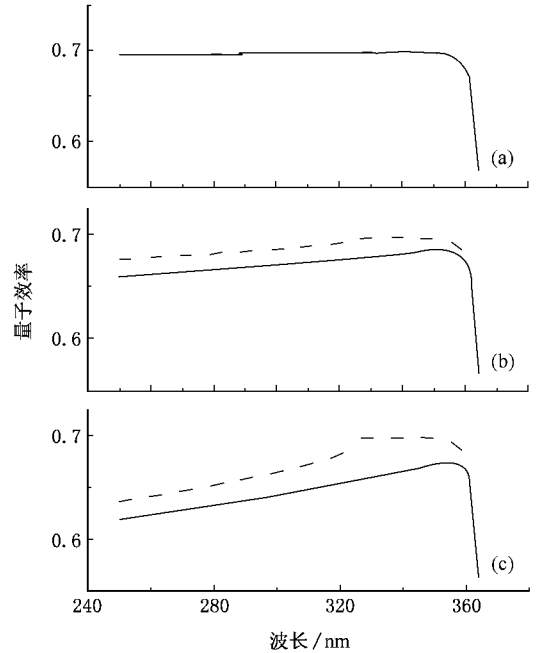


图 2 新型结构与普通结构的响应光谱 (a)表面复合速率为 $1 \times 10^5\ \text{cm/s}$ (b)表面复合速率为 $1 \times 10^7\ \text{cm/s}$ (c)表面复合速率为 $1 \times 10^{10}\ \text{cm/s}$ (实线表示普通结构器件的响应光谱,虚线表示新结构器件的响应光谱)

在肖特基结构探测器中,表面复合对器件的量子效率有很大的影响,尤其是当入射光的透入深度很浅时,表面复合的影响尤其严重^[9].当表面复合速率比较高时,当入射光波长变短,那么吸收增加,透入深度变小,那么受到表面复合的影响就增加,量子效率下降,所以,当表面复合速率增加时,我们可以看到图 2 中的探测器响应光谱在短波处出现下降的趋势,而且表面复合速率越大,下降得越厉害.另外一方面,在表面复合速率比较高的情况下,当入射光波长在 GaIn 带边附近时,大部分光子都能透过 AlGaIn 窗口层被 i-GaN 层吸收,这时主要受到 AlGaIn/GaIn 界面态的影响,而一般情况下界面态比表面态密度低很多,所以在这个波段范围内,新结构器件的量子效率比普通结构的量子效率要高;当入

射光波长小于 330 nm(达到 AlGaIn 层的吸收边以上)时, AlGaIn 层也开始产生吸收,但是与普通结构相比,在这个波长范围内 AlGaIn 层的吸收系数小于 GaN 层,透入深度大于普通结构,这样受表面态的影响也小于普通结构,所以量子效率仍然高于普通结构.总体来说,与普通结构相比,外加 AlGaIn 窗口层的 GaN 基肖特基结构紫外探测器性能得到了提高.

3.2. AlGaIn 窗口层厚度对新结构器件性能的影响

虽然与普通结构相比,带有 AlGaIn 窗口层的新结构 GaN 紫外探测器具有明显的优势,但是 AlGaIn 窗口层的参数选择对于器件性能也应该有一定的影响,得到一个最佳的参数,对于器件的制备具有重要的指导意义.

我们对不同厚度的 AlGaIn 层对器件性能的影响进行了模拟计算,这里假定器件表面的复合速率为 1×10^{10} cm/s, AlGaIn 层载流子为 1×10^{16} cm⁻³.如图 3 为普通结构紫外探测器响应光谱以及 AlGaIn 窗口层厚度分别为 10 nm, 20 nm, 50 nm 的新结构紫外探测器的响应光谱.可以看出:无论 AlGaIn 层厚度如何,新结构器件的量子效率都比普通结构器件高,再次证明了新结构的优势.然而,我们还可以看到:在 330—360 nm 波段范围内, AlGaIn 层厚度对新结构器件性能的影响并不大,但是当入射光波长小于 330 nm 时, AlGaIn 厚度为 10 nm 时的新器件量子效率最高,而 AlGaIn 厚度为 50 nm 时器件量子效率最低.随着 AlGaIn 厚度增加,新结构器件量子效率降低.

对于肖特基结构、pin 结构等光伏型半导体探测

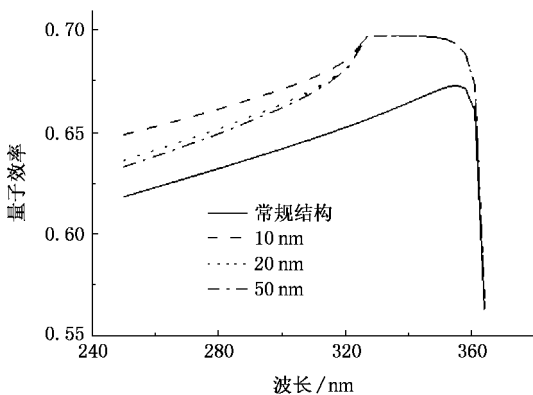


图 3 普通结构 GaN 紫外探测器和 AlGaIn 层厚度分别为 10 nm, 20 nm, 50 nm 时新型结构的响应光谱(图中实线表示普通结构的响应光谱,虚线表示新结构器件在 AlGaIn 层不同厚度的情况下的响应光谱)

器来说,光生电子-空穴对的分离是影响器件量子效率的重要因素,光生载流子分离得越多,探测器的量子效率越高.对于这种新型 GaN 基肖特基结构紫外探测器来说,当入射光能量大于 AlGaIn 带宽(对于本文来说,入射光波长小于 330 nm 的范围)时,一部分光子被 AlGaIn 层吸收,另外一部分光子被 GaN 层吸收,这两部分光吸收所产生的光生电子-空穴对都对光电流有贡献.当 AlGaIn 层很薄时,大部分光子都能被 GaN 层吸收,这样透入深度较浅,很多光生电子-空穴对都能被耗尽区强大的电场所分离而形成光电流,这样容易形成较高的量子效率.而当 AlGaIn 层较厚时,由于对于同一光子能量来说, AlGaIn 的吸收系数没有 GaN 大,很多光子也被 GaN 层所吸收,但是由于光生载流子所产生的区域远离电场区,不能及时地被电场分离而又重新复合,这样降低了探测器的量子效率.所以,适当的选择更薄的 AlGaIn 作为窗口层,可以得到量子效率更高的 GaN 紫外探测器.当然,这一层也不能太薄,否则就容易受到 AlGaIn 层表面复合的影响,就失去新结构的意义了.

3.3. AlGaIn 窗口层的载流子浓度对器件性能的影响

电场强度和电场分布对于肖特基结构探测器的性能有重要作用,而 AlGaIn 窗口层的载流子浓度将对新结构器件的电场会产生影响,从而也会影响器件的量子效率.

我们固定 AlGaIn 层厚度为 20 nm,器件表面复合速率为 1×10^{10} cm/s 的情况下,对于不同 AlGaIn 层的载流子浓度下器件性能进行了研究.如图 4 为 AlGaIn 层载流子浓度分别为 1×10^{16} cm⁻³, 1×10^{17} cm⁻³, 5×10^{17} cm⁻³ 的新结构器件响应光谱.可以看出:在 330—360 nm 的入射光波长范围内,新结

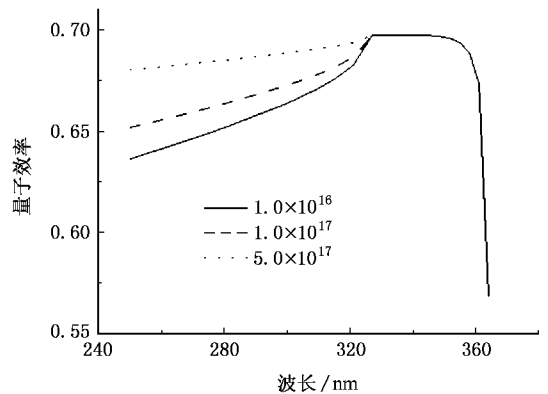


图 4 AlGaIn 层载流子浓度分别为 1×10^{16} cm⁻³, 1×10^{17} cm⁻³, 5×10^{17} cm⁻³ 的新结构器件响应光谱(其 AlGaIn 层厚度固定为 20 nm)

构器件的量子效率并不依赖于 AlGaIn 层的载流子浓度的变化,而在入射光波长小于 330 nm 的范围内, AlGaIn 层载流子浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时器件量子效率最低,而 AlGaIn 层载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时器件量子效率最高,随着 AlGaIn 层载流子浓度的增加,在短波处器件量子效率增加。

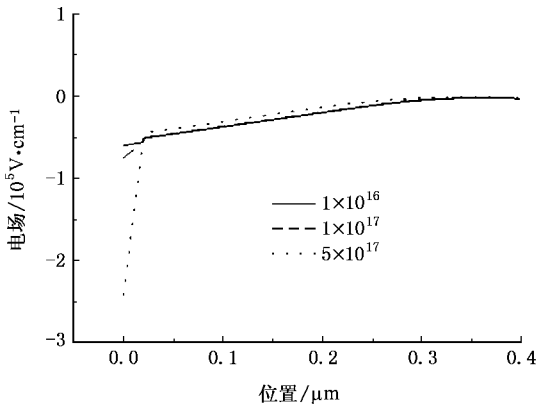


图 5 AlGaIn 层载流子浓度分别为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的新结构器件电场分布示意图

为了进一步探讨 AlGaIn 层载流子浓度对器件性能的影响机理,我们对新结构器件的电场强度分布进行了计算,如图 5 为不同 AlGaIn 层载流子浓度下器件的电场强度分布示意图。可以看出:在 GaN 层中,电场强度差别很小,而在 AlGaIn 层中,载流子浓度对电场强度影响较大,随着载流子浓度的增加,AlGaIn 层的电场强度也增加。我们知道,电场强度对

于光生载流子的空间分离有重要影响,电场强度越大,越有利于光生电子-空穴对的分离,从而能提高器件的量子效率。当波长在 330—360 nm 范围时,入射光能透过 AlGaIn 层而被 GaN 层吸收,而 GaN 层的电场分布在不同载流子浓度情况下差别不大,所以器件的量子效率在这个波段范围内随载流子浓度的增加变化很小。而当波长小于 330 nm 时,入射光很大一部分被 AlGaIn 层吸收,而 AlGaIn 层的电场强度随载流子浓度变化很大,载流子浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时 AlGaIn 层内电场强度最弱,而载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时 AlGaIn 层内电场强度最强,也最能及时地把光生载流子进行空间分离,从而器件的量子效率也最高。当然,我们也可以预测,如果 AlGaIn 层载流子浓度过高,会导致 AlGaIn 层就不能完全耗尽或者 GaN 层电场强度太弱,器件的量子效率反而会下降。因此,选择具有适当较高的载流子浓度 AlGaIn 层能得到更高量子效率的器件。

4. 结 论

本文针对传统的肖特基结构探测器的弱点,提出了一种外加 n 型 AlGaIn 层作窗口层的新型 GaN 基肖特基结构紫外探测器。模拟计算结果表明:该结构能减弱表面复合对肖特基结构紫外探测器的影响,明显的提高了器件的量子效率。模拟计算结果还表明,选择较薄、载流子浓度较高的 AlGaIn 层作窗口层,可以更进一步提高新结构器件的量子效率。

- [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, Krishnankutty 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] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices* 2nd Edition (New York, John Wiley & Sons)
- [9] He Z, Kang Y, Tang Y W, Li X, Fang J X 2006 *Chin. Physics* **15** 1325
- [10] For AMPS-1D please see <http://www.empnl.psu.edu/amps>
- [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、廖彦伯、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] Lee S R, Wright A F, Crawford M H, Petersen G A, Han J, Biefeld R M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3344



A new Schottky barrier structure of GaN-based ultraviolet photodetector^{*}

Zhou Mei¹⁾ Zuo Shu-Hua¹⁾ Zhao De-Gang^{2)†}

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

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

(Received 28 December 2006 ; revised manuscript received 1 February 2007)

Abstract

A new GaN-based ultraviolet photodetector with Schottky barrier structure is proposed. Compared with the conventional $i\text{-GaN}/n^+\text{-GaN}$ structure, there is an additional thin $n\text{-AlGaIn}$ cap layer on the $i\text{-GaN}$ in the new structure. The simulation result demonstrates that the new structure leads to an increased quantum efficiency in GaN photodetection, since the negative effect of surface states on the photodetector is reduced in the new structure. In addition, it is suggested that the performance of device with the new structure could be further improved by employing an even thinner AlGaIn cap layer with higher carrier concentration.

Keywords : GaN, Schottky structure, ultraviolet photodetector, AlGaIn

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