

AlGaN 基 PIN 光电探测器的模型与模拟 *

张春福 郝 跃 张金凤 龚 欣

(西安电子科技大学微电子所 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

摘要: 在漂移扩散方程的基础上建立了 AlGaN p-i-n 光电探测器的物理模型,分析了多种结构 AlGaN p-i-n 光电探测器的光谱响应,并讨论了 AlGaN/GaN 异质结界面极化效应对太阳盲区 p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN 倒置异质结结构 p-i-n 光电探测器 (inverted heterostructure photodetectors, IHPs) UV/Solar 选择比(280nm 与 320nm 响应度之比)的影响. 结果表明:优化 p 层是提高器件光谱响应的有效途径;为获得较高的 UV/Solar 选择比,光伏模式(零偏压)为太阳盲区 p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN IHPs 的最佳工作模式;在光伏模式下考虑极化效应影响时,Ga 面 p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN IHPs 器件的 UV/Solar 选择比可达 750,与 Tarsa 等人报道的三个量级的实验结果基本一致.

关键词: pin 光电探测器; 光谱响应; 太阳盲区; UV/solar 选择比; 极化效应

PACC: 7280E; 7820; 7730

中图分类号: TN364+.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)08-1610-06

1 引言

作为第三代半导体材料的 GaN 属直接带隙半导体,具有禁带宽度大、电子饱和速度高、介电常数小等优点. 优越的物理化学稳定性使其可以在苛刻的条件下工作,适合制备多种器件^[1~2]. 特别是其三元合金 AlGa_xN_{1-x},随 Al 组分的变化禁带宽度在 3.4~6.2eV 之间连续变化,对应波长范围为 200~365nm,是制作紫外探测器的理想材料之一. AlGa_xN_{1-x} 基紫外探测器能有效地探测、跟踪释放大量紫外线的目标,可用于空载、舰载、地面探测预警系统,还可用于空间紫外通信、臭氧层监测等领域. 由于 GaN 及其合金的优越性质及其在紫外探测器应用的广泛前景,使 AlGa_xN_{1-x} 基宽禁带半导体紫外探测器成为研究热点之一^[3~6].

为了应用于太阳盲区(200~300nm)^[7],Al 组分为 33% 的 AlGa_{0.33}N_{0.67} 基紫外探测器(吸收边在 300nm 左右)引起了人们的特别关注^[8,9]. 由于现阶段高 Al 组分、高质量、高有效掺杂的 p 型 AlGa_xN_{1-x} 相对较难获得,Tarsa 等人^[9]给出了 p-GaN/i-AlGa_xN_{1-x}/n-GaN 倒置探测结构,这种结构用窄带的 GaN 材料代替高 Al 组分的透射窗口,降低了对工艺的要求,是取得真正太阳盲区的捷径之一.

Pulfrey 等人^[10]首先建立了 GaN p-i-n 同质结光电探测器模型,Poochinda 等人^[11]对 GaN 和 InGa_xN_{1-x} p-i-n 及 n-i-n 光电探测器进行了模拟和讨论. 本文中,我们在漂移扩散方程的基础上建立了 AlGa_xN_{1-x} 基 pin 紫外探测器的物理模型,对多种同质结及异质结结构的 p-i-n 光电探测器的光谱响应进行了研究. 并在此模型的基础上特别讨论了含 Al 组分 33% 的 p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN 倒置探测结构的光谱响应曲线. 结果表明:在 AlGa_xN_{1-x} 基 p-i-n 紫外探测器中,p 层极大影响着探测器的性能,对 p 层进行优化是提高探测器光谱响应的最有效途径之一. 光伏模式下,在 p-GaN/i-AlGa_xN_{1-x}/n-GaN 倒置探测结构中若考虑极化效应的影响,器件的 UV/Solar 选择比(280nm 与 320nm 的光谱响应之比)达 750,

是取得真正太阳盲区的捷径之一.

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号:51327020301)

张春福 男,1979 年出生,博士研究生,主要研究方向为 GaN 材料及器件. E-mail: zhangchunfu@126.com

郝 跃 男,1958 年出生,教授,博士生导师,主要研究方向为超深亚微米 VLSI 可靠性、理论与设计方法,新型宽禁带半导体器件与关键技术,以及系统集成(SOC)设计与设计方法学等.

2005-01-21 收到,2005-03-22 定稿

©2005 中国电子学会

与 Tarsa 等人三个量级的实验结果相符较好;为获得较高的 UV/Solar 选择比,光伏模式为 GaN/Al_{0.33}Ga_{0.67}N/GaN 倒置异质结光电探测器最佳工作模式.

2 器件物理模型

首先,在 GaN 及其合金 AlGaIn 性质的基础上建立基本器件模型,该模型由漂移扩散方程描述.

2.1 禁带宽度

AlGaIn 材料的禁带宽度 E_g (AlGaIn) 和 Al 组分的摩尔比 x 的关系定义如下:

$$E_g(\text{AlGaIn}) = xE_g(\text{AlN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - bx(1-x) \quad (1)$$

其中 GaN 的禁带宽度 $E_g(\text{GaN}) = 3.42\text{eV}$; AlN 的禁带宽度 $E_g(\text{AlN}) = 6.13\text{eV}$; 参数 $b = 1.0\text{eV}^{[12,13]}$.

对于异质结结构,导带偏移是一个重要的参数.本文中我们定义 GaN/AlGaIn 异质界面的导带偏移为^[13]:

$$E_c = 0.7 \left[E_g(\text{AlGaIn}) - E_g(\text{GaN}) \right] \quad (2)$$

相应的导带和价带的态密度有效质量表示为 Al 组分摩尔比 x 的函数^[12]:

$$\begin{aligned} m_c &= 0.228 + (0.314 - 0.228)x \\ m_v &= 0.295 + (0.417 - 0.295)x \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 吸收系数和折射率

GaN 及其合金是直接带隙半导体材料,吸收系数可表示为^[10]:

$$\alpha = \alpha_0 (E - E_g(\text{AlGaIn})) \quad (4)$$

其中 E 为入射光子的能量; $E_g(\text{AlGaIn})$ 为 AlGaIn 材料的禁带宽度;我们取系数 α_0 的值为 $7.32\mu\text{m}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1/2}$.

我们假定 GaN 及其合金为非磁性媒质,则其折射率可表示为 $n = \sqrt{\epsilon}$, 其中 ϵ 为介电常数.这样折射率可表示如下:

$$n^2 = \epsilon = 1 + \frac{A}{E_0 - E^2} \quad (5)$$

其中 $A = 385$; $E_0 = 9\text{eV}^{[14]}$.

2.3 复合系数

由于 GaN 及其合金 AlGaIn 是直接带隙半导

体,价带与导带之间的直接复合是起主导作用的复合机理^[15],因此我们主要考虑直接复合.电子和空穴的净复合率可表示为^[16]

$$U_d = R - G = r(np - n_i^2) \quad (6)$$

其中 n 为电子浓度; p 为空穴浓度; n_i 为本征载流子浓度; r 为电子-空穴复合几率,取 $r = 3 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{s}^{[17]}$.

2.4 迁移率

电子和空穴的迁移率与温度、电场、掺杂浓度和材料质量有关,这里我们采用 Caughey-Thomas 的低场迁移率模型,表示为掺杂浓度和温度的函数^[12]:

$$\mu(N, T) = \mu_i + \frac{\mu_2 \left(\frac{T}{300}\right)^{-\mu_1}}{1 + \left(\frac{T}{300}\right)^{\left(\frac{N}{N_{\text{crit}}}\right)}} \quad (7)$$

Bunea 等人根据文献报道的数据对参数 $\mu_1, \mu_2, \dots, N_{\text{crit}}$ 进行了拟和,得到下列各值^[17]:

电子:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 15\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}, \mu_2 = 1800\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}, \mu_3 = -3.04, \\ \mu_4 &= -2.55, \mu_5 = 0.66, N_{\text{crit}} = 8 \times 10^{16}\text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

空穴:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 0.14\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}, \mu_2 = 880\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}, \mu_3 = -1.5, \\ \mu_4 &= 0, \mu_5 = 0.67, N_{\text{crit}} = 5.5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

3 模拟结果及分析

本文使用的器件仿真工具是二维器件模拟器 ATLAS^[12],所采用的基本模拟结构如下:顶部为 p 型掺杂区,浓度为 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,厚度 $t_p = 0.20\mu\text{m}$;中间为本征区, n 型背景浓度为 $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$,厚度为 $t_i = 0.3\mu\text{m}$;底部为 n 型掺杂区,掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,厚度为 $t_n = 1.0\mu\text{m}$.光线由 p 型区顶部垂直入射;电子和空穴的结合寿命为 $200\text{ps}^{[11]}$.

对于 p-i-n 光电探测器,其有效吸收区主要是在本征区,但在距离本征区一个扩散长度范围内的光生载流子对光电流也有所贡献,因此改变 p 型区和本征层厚度可以改变器件的光谱响应.图 1 所示为光伏模式下(工作于零偏)的光谱响应曲线,随着 p 型层厚度的减小和 i 型层厚度的增加,器件的光谱响应度随之增加.但是对于 GaN 基光电二极管, p 型层和 i 型层对器件的光谱响应的不同影响程度是不同

的.本征 i 型层主要影响波长靠近截止边时器件的响应度,而 p 型层对于器件的影响却大得多,在波长小于吸收截止边的很长波段范围内对器件光谱响应

的同时,考虑到随着 i 层厚度的增加,器件的频率响应将降低,因此在下面的讨论中我们取本征区 i 区的厚度为 $0.3\mu\text{m}$,同时 p 区厚度保持在 $0.2\mu\text{m}$.除上面所说的减小 p 层厚度外,增加 p 层中 Al 组分的含量,形成透射窗口也是提高器件光谱响应的重要途径之一. p-AlGa_{0.33}N_{0.67} 异质结结构与 GaN 同质结相比,除了用 p-AlGa_{0.33}N 代替原来的 p-GaN 外,其他与上面的 GaN 同质结结构相同.如图 2 所示, p 型层中 Al 组分的增加对器件光谱响应的影响同本征 i 层厚度增加类似,主要提高靠近截止边处的光谱响应度.同时,由于 p 型层中 Al 组分的增加,激发 p 层中的电子所需光子最小能量增加,光谱响应峰值向短波长稍有偏移.同时要注意随着窗口 p 区 Al 组分的增加,晶格失配加大,掺杂效率降低,对工艺要求会变得更加苛刻.

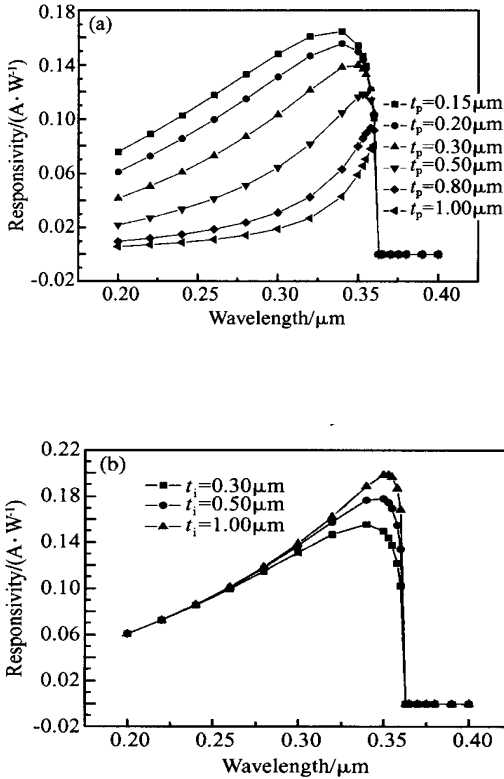


图 1 光伏模式下 p-GaN/i-GaN/n-GaN p-i-n 光电探测器的光谱响应 (a) p 型层厚度对探测器光谱响应的影响, $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$, t_p 变化; (b) 本征层厚度对探测器光谱响应的影响, $t_p = 0.2\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$, t_i 变化

Fig. 1 Unbiased spectral responsivity curves for p-GaN/i-GaN/n-GaN p-i-n photodetectors (a) Effect of t_p on responsivity curves of p-i-n photodetectors $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$, t_p varied; (b) Effect of t_i on responsivity curves of p-i-n photodetectors $t_p = 0.2\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$, t_i varied

都有影响.这主要是由于 GaN 材料的吸收系数很高,量级达 10^5cm^{-1} ,入射光很容易在 p 型层中吸收.当 p 层厚度增加时, p 层中的光生载流子离本征区相对更远,在扩散到本征区前结合的几率更大,从而降低了 GaN 基光电探测器的响应度.为了增加器件的光谱响应度,在保证 i 层一定厚度的基础上,对 p 层进行一定的优化应该是最有效的途径.不同的研究者基于获得外延层材料的难易程度和结构对性能影响等方面的不同考虑,对 p, i 层的厚度选择有所不同^[3-5],典型值为 $0.1 \sim 0.8\mu\text{m}$ 厚的 i-GaN 层和 $0.2\mu\text{m}$ 厚的 p-GaN 层.在保证较高光谱响应度

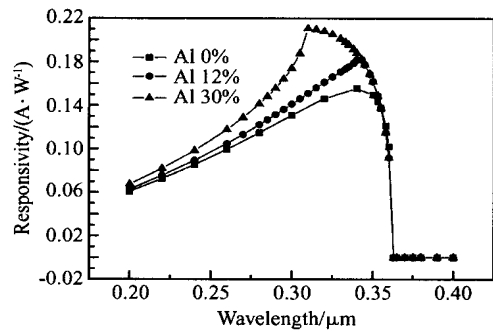


图 2 光伏模式下 p 层 Al 组分的含量对 p-AlGa_{0.33}N/i-GaN/n-GaN p-i-n 光电探测器光谱响应的影响 $t_p = 0.2\mu\text{m}$, $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$

Fig. 2 Effect of Al mole fraction in p-AlGa_{0.33}N layer on unbiased spectral responsivity of p-AlGa_{0.33}N/i-GaN/n-GaN p-i-n photodetectors $t_p = 0.2\mu\text{m}$, $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$

由于“太阳盲区”的存在及大气层中因均匀散射而呈现的背景条件,研制探测波段在 $200 \sim 300\text{nm}$ 之间的紫外探测器在军事及民用领域有着重要的意义. $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ 的吸收截止边在 300nm 左右,因此含 Al 组分大于 33% 的 AlGa_{0.33}N 材料,引起了人们的广泛关注.提高 p 层和 i 层中 Al 组分含量,对太阳盲区 p-AlGa_{0.33}N/i-AlGa_{0.33}N/n-GaN p-i-n 探测器进行模拟,同样采取上面各层的典型厚度.图 3 为不考虑极化效应时的光谱响应(对于极化效应的影响下面将有介绍).可以看到,随着 Al 组分的增高,吸收截止边逐渐向短波段方向移动,进入太阳盲区.对于光电探测器,器件响应选择比(响应波段光谱响应与

截止波段光谱响应之比)是其重要的参数之一. 我们看到图 3 中,随着 Al 组分的增加,器件选择比先变小然后增大. 这是由于上部材料的 Al 组分含量较高,波长较长的光子入射到下层的 n 型 GaN 层,所激发出的载流子越过 i-AlGa_{0.33}N/n-GaN 势垒,对光电流有贡献,使器件的选择比变差. 但随着 Al 组分的增加,i-AlGa_{0.33}N/n-GaN 之间的势垒也相应增加,对来自窄带区的载流子跨越势垒需要更多的能量,波长较长的光子对光电流的贡献相对减小,器件选择比因此又有所增加. 在下面的讨论中将看到,如果将极化效应考虑在内,器件的 UV/ Solar 选择比将会进一步增大.

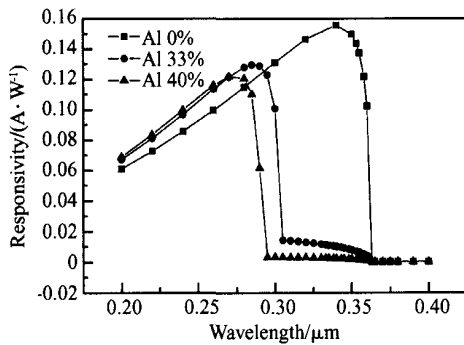


图 3 光伏模式下 p-AlGa_{0.33}N/i-AlGa_{0.33}N/n-GaN 光电探测器的光谱响应曲线 $t_p = 0.2\mu\text{m}$, $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$ 不考虑极化效应, p 层与 i 层 Al 组份含量相同

Fig. 3 Unbiased spectral response curves for p-AlGa_{0.33}N/i-AlGa_{0.33}N/n-GaN photodetectors without polarization $t_p = 0.2\mu\text{m}$, $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$

由上述的模拟及分析可知,为提高光谱响应,在一般的 AlGa_{0.33}N p-i-n 光电二极管结构中,总希望 p 型层所含 Al 组份尽量得高,厚度尽量得薄,尽量避免 p 型层对入射光的吸收. 但对于 AlGa_{0.33}N 材料,Al 组分的增加使晶格及热膨胀失配加大导致裂痕产生,限制了生长在 GaN/蓝宝石衬底上 AlGa_{0.33}N 的厚度. 同时,随着 Al 组分的增加,Mg 的掺杂效率也会降低,高 Al 组分、高掺杂效率的 p 型材料较难获得. 为了获得真正的太阳盲区,采用降低对高 Al 组分、高掺杂 p 型及 n 型层的要求,简化生长条件的措施. Tarsa 等人介绍了 p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN 倒置结构^[9],其光谱响应如图 4 所示. 与传统的结构相比,在这种倒置结构中,由于顶层 GaN 材料的禁带宽度比本征区 i 层材料的禁带宽度小,因此 p 层的厚度的影响变得更加重要. 如图 4(a) 中所示随着 p 层厚度的变化光谱响应度急剧变化. 如果保持 p 层

厚度为 $0.2\mu\text{m}$ 不变,光谱响应将变得很小,峰值只有 0.037A/W 左右. 如果要得到比较高的光谱响应就必须降低 p 层的厚度, Tarsa 等人建议此种结构中 p 层厚度不能大于 30nm . 图 4(a) 中,当 p 层厚度为 30nm 时峰值响应可达 0.134A/W ,已经取得比较满意的结果. 下面我们取 p 层厚度为 30nm 研究极化效应对此种结构的影响和负偏压下的光谱响应曲线变化.

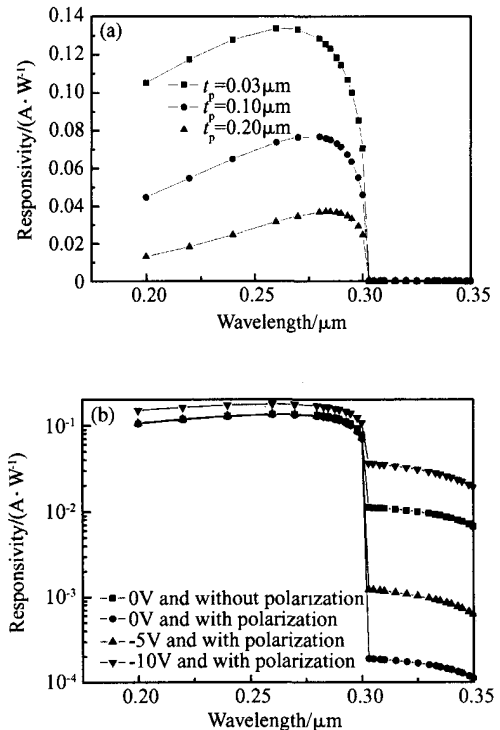


图 4 p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN p-i-n 光电探测器的光谱响应曲线 (a) 光伏模式下 p 型层厚度对探测器光谱响应的影响 $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$, t_p 变化,考虑极化效应; (b) 极化效应的影响及负偏置时的光谱响应 $t_p = 0.03\mu\text{m}$, $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$

Fig. 4 Spectral responsivity curves for p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN p-i-n photodetectors (a) Effect of t_p on responsivity of p-i-n photodetectors $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$, t_p varied; (b) Unbiased spectral responsivity without polarization and with polarization and biased spectral responsivity for p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN p-i-n photodetectors $t_p = 0.03\mu\text{m}$, $t_i = 0.3\mu\text{m}$, $t_n = 1\mu\text{m}$

由于窄带 GaN 材料的存在,较长波长的光子在 Al_{0.33}Ga_{0.67}N 本征层两边 GaN 窄带材料中激发的电子会越过异质结势垒,使波长在 300nm 到 365nm 之间的光谱响应仍然较大,破坏了器件的 UV/ Solar 选择比(此种结构中定义为 280nm 与 320nm 响应

度之比). 在 $p\text{-GaN}/i\text{-Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}/n\text{-GaN}$ 倒置结构中, AlGaN/GaN 材料之间存在着能带偏移, 其形成的势垒能阻碍来自窄带区的少数载流子, 有助于改善 UV/ Solar 选择比. 但即使将此考虑在内, 光伏模式下 (零偏压) UV/ Solar 选择比也只有一个量级左右, 如图 4 (b) 中所示. 幸运的是在 AlGaN/GaN 界面存在着强烈的极化效应, 能进一步增加对来自窄带区少数载流子的势垒作用, 提高 UV/ Solar 选择比. 我们考虑 Ga 面材料 (此时处于拉伸状态的 AlGaN , 自发极化和压电极化平行), 且只有 $i\text{-AlGaN}/n\text{-GaN}$ 界面存在极化电荷 (施主态可能会补偿 $p\text{-GaN}/i\text{-AlGaN}$ 界面的极化电荷^[18]) 的情况, 并设极化电荷密度为 $= 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ^[13]. 由图 4 (b) 可以看到, 光伏模式下当考虑极化效应时, 探测器的响应度在太阳盲区 (300nm 以下) 变化不大, 但光的 UV/ Solar 选择性却大大提高. 此时, 器件的 UV/ Solar 选择比大约为 750, 接近三个数量级, 比不考虑极化效应时提高近两个数量级. 在 Tarsa 的报道中^[9], 实验所得 MOCVD 生长的前置入射 $p\text{-GaN}/i\text{-AlGaN}/n\text{-GaN}$ 光电探测器 UV/ Solar 选择比 (280nm 与 320nm 响应度之比) 大约也为三个数量级. 因此, 在异质结构中, 极化效应对器件的性能可产生重要的影响, 只有考虑极化效应才与实验结果一致. 另外, 本文对 $p\text{-GaN}/i\text{-Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}/n\text{-GaN}$ 倒置结构在负偏压 (光电二极管模式) 进行了讨论. 如图 4 (b) 所示, 随着所加负偏压的增大, 在短波长 (300nm 以下) 的响应相对增加不大, 但在长波段光生载流子更容易越过势垒, 对光电流的贡献加大, 甚至随着所加偏压的增加, 在 300nm 以上的光谱响应度超过了零偏压下不考虑极化时的情况 (图中 -10V 偏压), 器件 UV/ Solar 选择比大大降低. 因此, 对于 $p\text{-GaN}/i\text{-AlGaN}/n\text{-GaN}$ 结构, 为保证获得比较高的 UV/ Solar 选择比, 光伏模式是最佳选择; 当工作于光电二极管模式时, 所加偏压不应过大.

4 结论

本文建立了 AlGaN 基 $p\text{-i-n}$ 结构探测器的物理模型, 并对其光谱响应和极化效应的影响进行了分析, 得到的结论如下:

(1) 增加本征层厚度和减小 p 型层厚度都可增加器件的响应度, 但 p 层对于器件光谱响应的影响更大, 这是由于 GaN 材料的吸收系数很大的缘故.

(2) 由于 p 型层对于器件的影响较大, 所以在保证本征层厚度的前提下, 减小 p 型层厚度和增加 p 型层中的 Al 组分是提高探测器光谱响应的最有效手段.

(3) 由于现阶段获得高 Al 组分、高有效掺杂的 p 型 AlGaN 材料相对困难, 模拟显示 $p\text{-GaN}/i\text{-Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}/n\text{-GaN}$ 倒置探测结构是实现真正太阳盲区、避免复杂工艺的有效结构.

(4) 在 $p\text{-GaN}/i\text{-Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}/n\text{-GaN}$ 倒置探测结构中, 极化效应扮演着重要的角色. 考虑极化效应时, UV/ Solar 选择比相对于不考虑极化效应时提高了近两个数量级, 这与 Tarsa 等人的实验结果基本一致.

(5) 在 $p\text{-GaN}/i\text{-AlGaN}/n\text{-GaN}$ 倒置探测结构中, 随所加负偏压增加, 光生载流子更易跨过势垒, 器件的 UV/ Solar 选择比降低. 因此工作在光伏模式时, 器件的选择性更好.

参考文献

- [1] Shur M S, Gaska R, Bykhovski A. GaN-based electronic devices. *Solid-State Electron*, 1999, 43(8): 1451
- [2] Liang Chunguang, Zhang Ji. GaN——dawn of 3rd generation semiconductors. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(2): 89 (in Chinese) [梁春广, 张冀. GaN——第三代半导体的曙光. *半导体学报*, 1999, 20(2): 89]
- [3] Walker D, Saxler A, Kung P, et al. Visible blind GaN $p\text{-i-n}$ photodiodes. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(25): 3303
- [4] Xu G Y, Salvador A, Kim W, et al. High speed, low noise ultraviolet photodetectors based on GaN $p\text{-i-n}$ and $\text{AlGaN}(p)\text{-GaN}(i)\text{-GaN}(n)$ structures. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(15): 2154
- [5] Van Hove J M, Hickman R, Klassen J J, et al. Ultraviolet-sensitive visible-blind GaN photodiodes fabricated by molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(17): 2282
- [6] Wang Jun, Zhao Degang, Liu Zongshun, et al. GaN Schottky barrier ultraviolet detector. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(6): 711 (in Chinese) [王俊, 赵德刚, 刘宗顺, 等. GaN 基肖特基结构紫外探测器. *半导体学报*, 2004, 25(6): 711]
- [7] Razeghi M, Rogalski A. AlGaIn ultraviolet detectors. *Proc SPIE*, 1999: 275
- [8] Parsh G, Keller S, Kozodoy P, et al. High-performance (Al, Ga)N-based solar-blind ultraviolet $p\text{-i-n}$ detectors on laterally epitaxially overgrown GaN. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(2): 247
- [9] Tarsa E J, Kozodoy P, Ibbetson J, et al. Solar-blind AlGaIn-based inverted heterostructure photodiodes. *Appl Phys Lett*,

- 2000,77(3):316
- [10] Pulfrey D L, Nener B D. Suggestion for the development of GaN-based photodiodes. *Solid-State Electron*, 1998, 42(9): 1731
- [11] Poochinda S, Chen T C, Stoebe T G, et al. Simulation of GaN and InGaN p-i-n and n-i-n photo-devices. *J Cryst Growth*, 2004, 261:336
- [12] Atlas User's manual, silvaco International, 2002
- [13] Ambacher O, Foutz B, Smart J, et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures. *J Appl Phys*, 2000, 87:334
- [14] Perlín P, Gorczyca I. Pressure studies of gallium nitride: crystal growth and fundamental electronic properties. *Phys Rev B*, 1992, 45:13307
- [15] Khan M A, Kuznia J N, Olson D T, et al. High-responsivity photoconductive ultraviolet sensors based on insulating single-crystal GaN epilayer. *Appl Phys Lett*, 1992, 60(23):2917
- [16] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. *Semiconductors physics*. Beijing: National Defence Press, 1994 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋升, 等. 半导体物理学. 北京: 国防工业出版社, 1994]
- [17] Bunea G E, Dunham S T, Moustakas T D. Modeling of a GaN based static induction transistor. *MRS Int J Nitride Semicon* 4SI, 1999, G6:41
- [18] Ibbetson J P, Fini P T, Ness K D, et al. Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 250

Model and Simulation of GaN Based PIN Photodetectors *

Zhang Chunfu, Hao Yue, Zhang Jinfeng, and Gong Xin

(Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The physical model of the AlGaIn based p-i-n photodetector is built on the base of the coupled drift-diffusion equation. Spectral responsivity curves of various AlGaIn p-i-n photodetectors and the influence of polarization at the interface of AlGaIn/GaN heterostructure on the UV/ solar rejection ratios of p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN inverted heterostructure photodetectors (IHPs) are analyzed. The results show that the p-type layer imposes an important influence on the spectra responsivity of the AlGaIn based p-i-n photodetectors, and the optimization of the p type layer is an effective method of significantly improving the spectra responsivity. In order to get high UV/ solar rejection ratios, the solar-blind IHPs should work best on the unbiased condition. When the polarization is considered with zero bias, the UV/ solar rejection ratios of Ga-faced solar-blind p-GaN/i-Al_{0.33}Ga_{0.67}N/n-GaN IHPs are 750, which meets the Tarsa's experiment result of about three orders of magnitude.

Key words: p-i-n photodetector; spectral responsivity; solar-blind; UV/ solar rejection ratios; polarization

PACC: 7280E; 7820; 7730

Article ID: 0253-4177(2005)08-1610-06

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 51327020301)

Zhang Chunfu male, was born in 1979, PhD candidate. His main research interest is GaN based materials and devices. Email: zhangchunfu@126.com

Hao Yue male, was born in 1958, professor, advisor of PhD candidates. His primary research interests include theory and design methodology of submicro VLSI reliability, new type wide band semiconductors and their key technologies, as well as SOC design methodology.

Received 21 January 2005, revised manuscript received 22 March 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics