

界面电偶极子对 GaN/AlGaIn/GaN 光电探测器 紫外/太阳光选择比的影响^{*}

张春福 郝 跃 游海龙 张金凤 周小伟

(西安电子科技大学微电子学研究所, 宽禁带材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2004 年 12 月 16 日收到 2005 年 3 月 14 日收到修改稿)

在 GaN/AlGaIn/GaN 倒置异质结光电二极管 (IHP) 中, 存在于 AlGaIn/GaN 异质结界面处强烈的极化效应对器件的紫外/太阳光 (UV/Solar) 选择比产生了重要的影响. 将极化效应总的影响分为两部分: 电偶极子和极化项, 在建立的 GaN/AlGaIn/GaN 结构 IHP 模型的基础上, 对电偶极子对器件 UV/Solar 选择比的影响进行了分析. 分析结果表明, 只有在考虑电偶极子的影响时, 光电探测器的 UV/Solar 选择比在 10^3 数量级左右, 与实验结果符合较好. 因此, 在 IHP 中必须考虑电偶极子的影响.

关键词: 紫外/太阳光选择比, 太阳盲区探测器, 极化, 电偶极子

PACC: 7280E, 7820, 7730

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. 其优越的物理化学稳定性使其可以在苛刻的条件下工作, 适于制备多种器件^[1,2]. 其三元合金 AlGaIn 随 Al 组分的变化禁带宽度在 3.4—6.2 eV 之间连续变化, 对应波长范围为 200—365 nm, 覆盖了整个太阳盲区 (200—300 nm)^[3], 是制作紫外探测器的理想材料. 特别是 Al 组分含量在 33% 以上的 AlGaIn 材料, 其吸收边在 300 nm 以下, 适于制作太阳盲区探测器^[4].

但是, 随着 Al 组分的增高掺杂效率降低^[5], 同时 Mg 掺杂计量的增加也会使薄膜质量下降^[6], 限制了高掺杂浓度的 p 型和 n 型材料的制备. 这对于 p-n 和 p-i-n (i 为本征层) 太阳盲区探测器表现得更加突出, 因为太阳盲区探测器需要厚的、高掺杂、高 Al 组分的接触层. 另外, 为了增加响应度需设置透射窗口, 在光到达有效吸收层前减小对光的吸收, 这需要 Al 组分含量进一步增加, 工艺实现变得更加困难. 为了降低对高 Al 组分、高掺杂、大厚度 p 型及 n 型层的要求, 简化生长条件, Tarsa 等^[7]制备和报道

了 p-GaN/i-AlGaIn/n-GaN 倒置异质结光电二极管 (inverted heterostructure photodiode, IHP). 在此结构中用一个窄带的 p-GaN 和 n-GaN 作为欧姆接触层, 用高 Al 组分的 AlGaIn 作为有效吸收层, 从而避免了较厚的、高 Al 组分、高有效掺杂材料的制备.

对于 IHP, 由于接触层 (光必须通过接触层才能到达有效本征层) 的禁带宽度比有效层小, 能量小于本征层禁带宽度而大于窄带层禁带宽度的光子会在窄带接触层中激发载流子. 如果在接触层中激发的载流子到达有效本征层就会对光电流有贡献, 从而使光电二极管对紫外/太阳光 (UV/Solar) 的选择性变差. 幸运的是在 IHP 中, 异质结界面处存在的能带偏移 ΔE_c 和 ΔE_v 对来自接触层的少子形成势垒, 而且界面处存在的强烈的极化效应可以增加由于能带断续而形成的势垒^[8], 增强了对来自 p 区和 n 区的少数载流子的阻碍作用, 提高了器件的 UV/Solar 选择比.

在异质结界面存在着电偶极子, 而一些异质结构中可忽略界面电偶极子的存在^[9], 但在 GaN IHP 异质结中界面电偶极子的作用是否可以忽略? 本文将极化效应对器件的作用分为两部分: 极化项和电偶极子项, 并在建立的 IHP 模型的基础上进行了分析. 结果表明: 当考虑电偶极子的影响时, 器件的

^{*} 国家重点基础研究发展规划 (批准号 51327020301) 资助的课题.

UV/Solar 选择比(280 nm 光谱响应度与 320 nm 光谱响应度之比)提高了近一个数量级,此时总的 UV/Solar选择比在 10^3 数量级左右,与 Tarsa 等的实验结果相符较好.因此在 IHP 中,AlGaIn/GaN 界面处不应忽略电偶极子的存在.

2. 器件模型与原理

极化效应是 GaN 材料重要的性质.当不考虑自发极化和压电极化时,泊松方程为

$$\begin{aligned}\nabla^2 \phi &= -\frac{\rho}{\epsilon} \\ &= -\frac{q}{\epsilon}[N_D^+ - N_A^- + N_t^+ - N_t^- + p - n],\end{aligned}\tag{1a}$$

式中 N_D^+ , N_A^- , N_t^+ 和 N_t^- 分别是离化施主密度、离化受主密度、离化施主陷阱密度和离化受主陷阱密度.在 AlGaIn/GaN 界面存在着强烈的极化效应,产生了极化电荷.当考虑异质结界面存在的自发极化和压电极化的影响时,泊松方程为

$$\begin{aligned}\nabla^2 \phi &= -\frac{\rho}{\epsilon} \\ &= -\frac{q}{\epsilon}[N_D^+ - N_A^- + N_t^+ - N_t^- + p - n] \\ &\quad - \frac{1}{\epsilon}[\rho_{bp} + \rho_{bs}],\end{aligned}\tag{1b}$$

式中 ρ_{bp} 和 ρ_{bs} 为存在极化效应时产生的压电极化电荷密度和自发极化电荷密度.由于极化效应的存在,改变了异质结界面两侧的势能函数.我们用 $V^*(z)$ 代表异质结界面处总的势能,如图 1 所示,势能 $V^*(z)$ 可表示为^[10]

$$\begin{aligned}V_z^*(z) &= E_s(z) + \Delta E_g(z) + \Delta E_c u(z) \\ &\quad - e\phi(z) + V_{xc}(z) + V_{IM}(z) + V_{dB}(z)\end{aligned}\tag{2a}$$

式中, $E_s(z)$ 是导带边缘能量; $u(z)$ 是单位阶跃函数 ΔE_c 是两侧台阶高度; $\Delta E_g(z)$ 是由于应力而使能带发生的形变; $\phi(z)$ 包括了电荷的影响; $V_{xc}(z)$, $V_{IM}(z)$ 和 $V_{dB}(z)$ 分别代表电荷相关势、镜像势和摇摆带.由于 $V_{xc}(z)$, $V_{IM}(z)$, $V_{dB}(z)$ 与 ΔE_c , $\phi(z)$ 相比要小得多,因此将它们忽略,同时不考虑 $\Delta E_g(z)$ 和 $E_s(z)$,这样 (2a) 式改写为

$$V^*(z) = \Delta E_c u(z) - e\phi(z).\tag{2b}$$

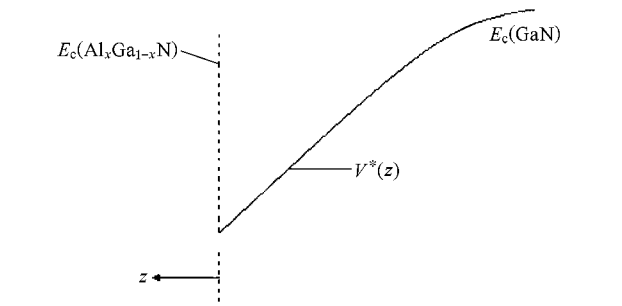


图 1 在 AlGaIn/GaN 异质界面处的势阱

当界面没有电荷存在时,通过界面的电势 ϕ 是连续的.然而,在 AlGaIn/GaN 异质结界面处存在着电偶极子,它对电势产生了影响,如图 2 所示.

由于电偶极子的存在而引起 $\phi(z)$ 的变化可表示为^[10]

$$\Delta \phi = \frac{\sigma d}{\epsilon_0},\tag{3}$$

式中, σ 为层电荷密度, d 为层间距离.我们可以将电势的改变 $\Delta \phi$ 归结为能带的变化,从而消除电势的不连续,

$$e\Delta \phi + \Delta E_c = \Delta E'_c.\tag{4}$$

我们这样处理,保持了电势 ϕ 的连续性而不会在使

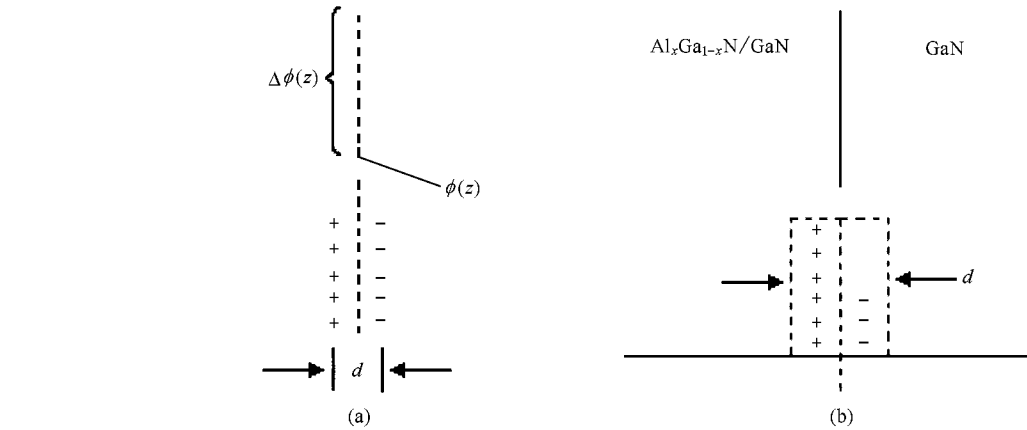


图 2 电偶极子 (a)两种材料界面处的偶极子 (b)AlGaIn/GaN 异质界面处的偶极子

用软件时引入其他的问题.

由上述讨论可知,在异质结结构中,能带的变化一部分由亲和势 $\chi(z)$ 的不同引起,电偶极子和极化电荷的存在对于能带的偏移也有一部分贡献.现改写方程(2b)如下:

$$V^*(z) = \Delta E_c u(z) - e\phi_n(z) + V_{\text{DIPOLE}}(z) - eu_p(z). \quad (5)$$

与方程(2b)相比,方程(5)增加了两项: $V_{\text{DIPOLE}}(z)$ 和 $-eu_p(z)$, 这两项分别为电偶极子项和极化项引起的势能变化量($u_p(z)$ 为极化项产生的电势).应当注意,在方程(5)中 $-\phi_n$ 与方程(2b)相比多了下标 n , 它的值是由方程(1a)给出,而不是由方程(1b)给出.这样我们就把极化效应对能带偏移总的影响归结为电偶极子项和极化项的作用.由方程(4)可知,根据极化的情况不同,电偶极子的存在可以减小或增加 ΔE_c . 在 AlGaIn/GaN 异质结中,极化效应特别强烈,如非故意掺杂时产生的二维电子气(2DEG)密度可达 10^{13} cm^{-2} 以上,远大于其他 III-V 族材料^[11], 电偶极子的存在势必对器件的一些性能产生影响.电偶极子之间的距离 d 很小,约为 0.5 nm ^[10]. 由于电偶极子之间的距离 d 小于所处理问题中的其余尺度,在 Silvaco 软件模拟中如果网格步长大于电偶极子之间的距离 d , 电偶极子的影响将被忽略,而对于所处理问题的其他方面影响不大.这样通过改变网格之间的距离我们可以考虑和排除电偶极子的影响.下面通过这种方法研究电偶极子和极化电荷势对于 IHP 器件的 UV/Solar 选择比的影响.

3. 结果及讨论

显然,极化效应与晶体生长方向有关.如果材料沿 [0001] 方向生长,那么材料是 Ga 面的;如果材料沿 $[000\bar{1}]$ 生长,那么材料就是 N 面的.对于生长在 Ga 面 GaN 上的 AlGaIn 材料,其处于拉伸应力下,此时压电极化和自发极化方向相同^[11]. 如用金属有机物气相淀积方法生长的 GaN 材料总是 Ga 面的.本文中,我们所模拟的器件假定都是生长在 Ga 面材料上.

本文所采用器件结构如图 3 所示,各层参数如下: p 区中空穴浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 $t_p = 0.20 \mu\text{m}$; i 区中电子浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 $t_i = 0.25 \mu\text{m}$; n 区中电子浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 $t_n = 1.05 \mu\text{m}$. 光束由 p 区上侧垂直入射,电子和空穴结合寿

命为 200 ps ^[12].

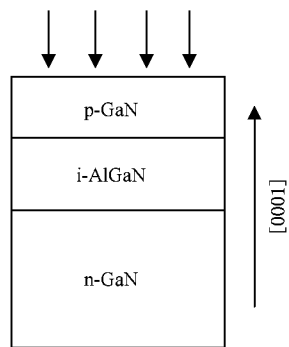


图 3 p-GaN/i-AlGaIn/n-GaN 的 p-i-n 光电二极管结构示意图

首先讨论不考虑极化效应影响时的结果.因为 GaN 材料的吸收系数很大(在 10^5 cm^{-1} 数量级),所以窄带的存在对于器件的光谱响应度有着重要的影响.在 $300\text{--}365 \text{ nm}$ 的波长范围内,入射光主要被顶部的窄带 p 型层和底部的窄带 n 型层所吸收.吸收后,在窄带中产生的光生少子会越过 IHP 的两个异质结势垒 p/i 和 i/n,对光电流有贡献.这样,IHP 在 $300\text{--}365 \text{ nm}$ 的波长范围内对光的响应比较大,器件的 UV/Solar 的选择比则相对较低,只有一个数量级左右,如图 4 所示.

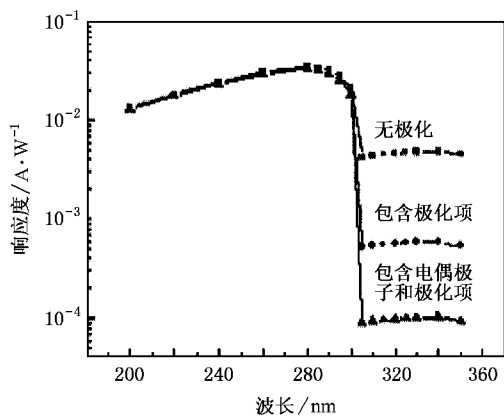


图 4 p-GaN/i-AlGaIn/n-GaN 的 p-i-n 光电二极管的光谱响应

接着讨论存在极化效应的情况.在器件结构为 p-GaN/i- $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ /n-GaN 的 IHP 中,存在两个异质结,即 p-GaN/i- $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ 异质结和 i- $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ /n-GaN 异质结.由于 IHP 器件结构的对称性,极化效应也应该是对称的,即在 p/i 界面和 i/p 界面极化电荷的大小应该相等,只不过符号相反.这样在 p-GaN/i-AlGaIn 界面将存在二维空穴气(2DHG).但由于近期有研究^[13,14]指出,表面施主态是非掺杂 AlGaIn/GaN

异质结 2DEG 电子和 AlGaIn 层顶部存在的正电荷的来源,而且现在还没有关于 IHP 中 2DHG 的相关报道,因此假定表面施主态在 IHP 中仍然存在.这样,由于表面施主态的存在极化电荷将被补偿,也就不会形成 2DHG.根据上述讨论,现将 p/i 异质结界面的极化电荷设为零,只考虑 i/n 异质结界面的极化效应.由文献 [11] 本文设 i/n 异质结界面的极化电荷密度约为 $\sigma = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.极化效应对 IHP 光谱响应的影响同样反映在图 4 中.如果只考虑极化项的影响(不考虑电偶极子项的影响),器件的 UV/Solar 选择比相对于完全不考虑极化效应时明显增加一个数量级左右.当又把电偶极子的影响考虑在内时,器件的 UV/Solar 选择比又提高了近一个数量级. Tarsa 的实验结果得到器件的 UV/Solar 选择比在 10^3 数量级左右,只有将电偶极子的影响考虑在内才与其相符较好.因此,在 AlGaIn/GaN 异质结构中,由于强烈

极化效应的存在,不能忽略界面处电偶极子的存在.

4. 结 论

由于 IHP 中存在着 AlGaIn/GaN 的异质结结构,因此在异质结界面强烈的极化效应对器件的 UV/Solar 选择比有着重要的影响.本文将极化效应对器件总的影响分为两部分:极化项和电偶极子项.分析发现,在 IHP 的 AlGaIn/GaN 异质结结构中,电偶极子的影响不可忽略.如果只考虑极化项的影响,UV/Solar 选择比在 10^2 数量级左右,如果再加上电偶极子的影响,UV/Solar 选择比可增加近一个数量级. 10^3 数量级左右的 UV/Solar 选择比与 Tarsa 实验结果相符较好.因此,在考虑 AlGaIn/GaN 的异质结构时,必须考虑电偶极子的影响.

[1] Shur M S , Gaska R , Bykhovski A 1999 *Solid State Electron.* **43** 1451

[2] Zhang D H , Liu Y Y , Zhang D J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1800 (in Chinese) [张德恒、刘云燕、张德骏 2001 物理学报 **50** 1800]

[3] Razeghi M , Rogalski A 1997 *Proc. SPIE* **2999** 275

[4] Parsh G , Keller S , Kozodoy P *et al* 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 247

[5] Jain S C , Willander M , Narayan J *et al* 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 965

[6] Feng Q , Wang F X , Hao Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3587 (in Chinese) [冯 倩、王峰祥、郝 跃 2004 物理学报 **53** 3587]

[7] Tarsa E J , Kozodoy P , Ibbetson J *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 316

[8] Parish G 2001 *Ph. D. Dissertation* (California : University of California Santa Barbara) p93

[9] Stormer H L , Dingle R , Gossard A C *et al* 1979 *Solid-State Comm.* **29** 705

[10] Freeman J C 2003 *Technical Memorandum* (Ohio : NASA) TM 211983

[11] Ambacher O , Foutz B , Smart J *et al* 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 334

[12] Poochinda K , Chen T C , Stoebe T G *et al* 2004 *J. Cryst. Growth* **261** 336

[13] Smorchkova I P , Elsass C R , Ibbetson J P *et al* 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 4520

[14] Ibbetson J P , Fini P T , Ness K D *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 250

Influence of interface dipoles on the UV/Solar rejection ratios of GaN/AlGa_N/GaN photodetectors^{*}

Zhang Chun-Fu Hao Yue You Hai-Long Zhang Jin-Feng Zhou Xiao-Wei

(*Microelectronics Institute , Key Laboratory for Wide Band-gap Semiconductor Materials and*

Devices of Ministry of Education , Xidian University , Xi'an 710071 ,China)

(Received 16 December 2004 ; revised manuscript received 14 March 2005)

Abstract

In the inverted heterostructure photodiodes(IHPs), the strong polarization effect at the interface of the AlGa_N/Ga_N heterostructure influences UV/Solar rejection ratios of this type of structure. In this paper , the total effect of polarization is divided into two parts : the polarization and dipole terms. Based on the model of Ga_N/AlGa_N/Ga_N IHPs , the influence of dipoles on the UV/Solar rejection ratios is analyzed. The results show that when dipoles are considered , UV/Solar rejection ratios of photodetectors are about three orders of magnitude , which agree with the experiment of Tarsa. The influence of dipoles should be considered in the IHPs.

Keywords : UV/Solar rejection ratios , solar-blind photodetector , polarization , dipole

PACC : 7280E , 7820 , 7730

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