

# 表面 InGaN 厚度对 GaN 基发光二极管特性的影响<sup>\*</sup>

顾晓玲 郭 霞<sup>†</sup> 吴 迪 李一博 沈光地

(北京工业大学 北京市光电子技术实验室 北京 100022)

(2007 年 4 月 10 日收到 2007 年 6 月 18 日收到修改稿)

通过调整 GaN 基发光二极管(LED)表面 InGaN 层的厚度,发现在 20 mA 电流驱动下 LED 器件的正向压降有明显差距.本文考虑了极化效应的影响,通过求解 InGaN/GaN 三角形势阱内二维空穴气浓度以及空穴隧穿概率的变化,求得了表面 InGaN 层厚度不同时器件正向压降的变化趋势,发现理论结果与实验结果有很好的吻合.同时得到了获得最低正向压降的表面 InGaN 厚度.

关键词:极化,二维空穴气,隧穿概率

PACC:7865P,7850G,7730

## 1. 引 言

近年来,GaN 基 LED 的研究和应用得到了飞速发展<sup>[1-5]</sup>.其中 p 型 GaN 层广泛采用 Mg 注入,由于 Mg 的离化浓度较小,致使 p 型欧姆接触电阻较大,因此器件在 20 mA 电流驱动下仍然具有较高的工作电压.基于此,Chang 等<sup>[6]</sup>在 LED 表面生长一层 InGaN,通过调整厚度和 In 组分,提高了器件表面空穴浓度,降低了正向压降.Gessmann 等<sup>[7,8]</sup>也从理论上对表面 InGaN 能够降低欧姆接触压降的现象进行了研究,分析了表面 InGaN 层和 GaN 层界面处的二维空穴气在降低欧姆接触电压的作用,提出了要形成二维空穴气表面 InGaN 层必须厚于某一临界厚度.本文考虑了极化效应的影响,通过求解 InGaN/GaN 三角形势阱内二维空穴气浓度以及空穴隧穿概率的变化,发现当 InGaN 厚度为临界厚度时,正向压降并不能得到最低值,而是在表面 InGaN 层厚度略厚于临界厚度时取得.本研究制备了表面 InGaN 层厚度不同的器件,发现理论结果与实验结果在变化趋势上有很好的吻合.

## 2. 器件结构

实验中所用样品是通过金属有机物化学气相淀

积在(0001)蓝宝石衬底上生长而成.首先在蓝宝石衬底上生长 2000 nm 的 GaN 缓冲层,其上淀积 4000 nm 厚的 n 型 GaN,掺杂浓度为  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,随后生长量子阱区,势垒层 In 组分为 0.3,势垒层为 GaN,然后生长一层 10 nm 厚 GaN 和 1500 nm 厚掺杂浓度为  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的 p 型 GaN,最后生长一层 In 组分为 0.2 的 InGaN,不同样品厚度分别为 3, 3.7, 6, 16 和 20 nm.外延生长完成后,经光刻,反应耦合等离子体刻蚀,溅射金属电极,制备成尺寸为  $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$  的发光器件.

## 3. 理论基础

III-V 族化合物材料有很强的自发极化和压电极化效应<sup>[5,9]</sup>.根据 Christmas 等<sup>[9]</sup>提出的耦合法,求解方程为

$$F_{\text{coup}}^{(n)} = \frac{A^{(n)} \sum_q f^{(q)} C^{(q)} / B^{(q)} - C^{(n)} \sum_q f^{(q)} A^{(q)} / B^{(q)}}{B^{(n)} \sum_q f^{(q)} C^{(q)} / B^{(q)}} \quad (1)$$

$$A = 2l_0(C_{13}e_{33} - C_{33}e_{31}) - C_{33}P^{\text{SP}}, \quad (2)$$

$$B = C_{33}\epsilon_{33} + e_{33}^2, \quad (3)$$

$$C = C_{33}, \quad (4)$$

(1)-(4)式中, $F_{\text{coup}}^{(n)}$ 为第 n 层的极化电场强度,取外

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划(批准号:2006CB604902),国家自然科学基金(批准号:60506012),国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA03A121)和北京市优秀人才强教计划(批准号:20051D0501502)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: guo@bjut.edu.cn

延生长方向为正方向。 $l_0$  为晶格失配度,  $C_{13}$ ,  $C_{33}$  为弹性常数,  $e_{31}$ ,  $e_{33}$  为压电常数,  $\epsilon_{33}$  为介电常数,  $P^{SP}$  为自发极化强度,  $l^{(q)}$  为第  $q$  层厚度。

表面 InGaN 厚度不同, 极化电场强度也相应不同。对于足够强的极化电场强度或足够厚的 InGaN 层, 在表面 InGaN 层和 GaN 层的界面处, 将产生二维空穴气。对于统一的费米能级, 根据半导体的能带理论可知

$$e\Phi_B + ed_{\text{InGaN}}\epsilon_{\text{tot}} + (E_I - E_V) + (E_F - E_1) = 0, \quad (5)$$

$$e\Phi_B = E_g^{\text{InGaN}} - e(\phi_M - \chi_{\text{InGaN}}), \quad (6)$$

$$\epsilon_{\text{tot}} = F_{\text{coup}}^{\text{InGaN}} + \frac{e\rho_{2\text{DHG}}}{\epsilon_{\text{InGaN}}\epsilon_0}, \quad (7)$$

其中,  $e$  为电子电荷,  $\Phi_B$  为肖特基势垒高度,  $d_{\text{InGaN}}$  为表面 InGaN 层厚度,  $\epsilon_{\text{tot}}$  为 InGaN 层的总电场强度, 包括极化电场强度和由二维空穴气产生的电场强度,  $E_1$  为三角形势阱内的空穴基态能级,  $E_V$  为 InGaN 与 GaN 界面处的价带位置,  $E_F$  为费米能级。方程 (5) 中等号右侧第 4 项, 根据文献 [7] 分析由费米-狄拉克分布求解。

对于三角形势阱内的空穴基态能级, 采用一维泊松方程和薛定谔方程联立来自洽求解, 系统的薛定谔方程为

$$-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m^*} \varphi(x) + V(x)\varphi(x) = E\varphi(x), \quad (8)$$

其中  $E$  为能量,  $\varphi(x)$  为波函数,  $V(x)$  为势能,  $\hbar$  为普朗克常数除以  $2\pi$ ,  $m^*$  为空穴有效质量。

一维泊松方程为

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_r(x)\epsilon_0} = -\frac{e[\sum \alpha(z_q)\delta(z-z_q) + N_D(x) - n(x)]}{\epsilon_r(x)\epsilon_0}, \quad (9)$$

其中  $\phi(x)$  为静电势,  $\epsilon_r(x)$  为材料介电常数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\alpha(z_q)$  为表面 InGaN 层和 GaN 层界面处的空穴面电荷密度<sup>[10]</sup>,  $N_D(x)$  为离子化施主浓度,  $n(x)$  为电子密度分布。

由于 p 型欧姆接触对费米能级的钉扎, 空穴在输运过程中, 需要克服表面三角形势垒的阻挡。根据文策尔-克喇未-布里渊法 (WKB) 近似, 对于三角形势垒, 空穴的隧穿概率为

$$T = \exp\left(-\frac{4\Phi_B^{3/2}\sqrt{2m^*}}{3eh|\epsilon_{\text{tot}}|}\right). \quad (10)$$

## 4. 结果与讨论

当表面 InGaN 层达到一定厚度时, 在表面 InGaN 层和 GaN 层界面处的三角形势阱内将产生二维空穴气。考虑极化电场的影响后, 首先计算了二维空穴气浓度随表面 InGaN 层厚度的变化, 如图 1 所示。当表面 InGaN 层较薄时, 在界面三角形势阱内没有形成二维空穴气; 当表面 InGaN 层厚度达到某一值时, 二维空穴气产生, 此后随表面 InGaN 层厚度增加二维空穴气浓度不断增加。根据 (5)~(7) 式, 取二维空穴气密度为零, 计算得到产生二维空穴气的表面 InGaN 层临界厚度为 3.7 nm, 即图 1 中曲线与横轴相交处的 InGaN 层厚度。

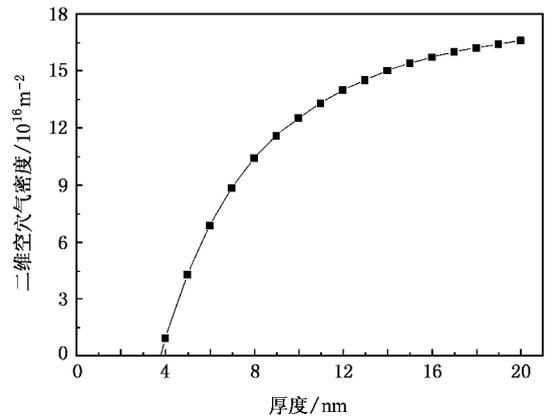


图 1 二维空穴气密度随表面 InGaN 层厚度的变化

在 p 型欧姆接触中, 空穴主要以隧穿的方式由金属穿过半导体三角形势垒, 根据 WKB 近似, 求得了空穴隧穿概率随表面 InGaN 层厚度的变化关系, 如图 2 所示。随表面 InGaN 层变厚, 隧穿概率的对数值随表面 InGaN 层变厚而线性减小。从图中可见, 当表面 InGaN 层厚度由 4 nm 增加到 20 nm, 空穴隧穿概率  $T$  由  $10^{-14}$  下降为  $10^{-59}$ 。

随表面 InGaN 层厚度的增加, 三角形势阱内二维空穴气逐渐产生并不断增加, 但空穴的隧穿概率却随着表面 InGaN 层增厚而不断减小。进入有源区的空穴数目多少是这两方面共同作用的结果。图 3 为归一化的进入有源区的空穴数目随表面 InGaN 层厚度的变化关系, 纵坐标为进入有源区的空穴数目的对数值, 归一化参数为 4 nm 时隧穿进有源区的空穴数目, 右上方小图为直角坐标下, 表面 InGaN 厚度由 3.7 nm 增至 5.0 nm 时, 进入有源区的空穴数目

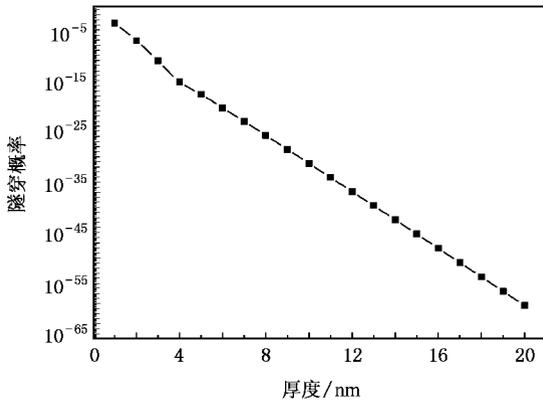


图2 空穴隧穿概率随表面 InGaN 层厚度的变化

的变化曲线.从图中可见,表面 InGaN 厚度不同,进入有源区的空穴数目有较大的差异.当表面 InGaN 为 3.9 nm 时,进入有源区的空穴数目达到最大值.虽然表面 InGaN 层厚度为临界厚度 3.7 nm 时,三角形势阱内已经产生二维空穴气,而且从图 1 中看到,随表面 InGaN 层变厚,三角形势阱内二维空穴态密度不断增加.但从图 2 中我们看到随表面 InGaN 层厚度增加,空穴的隧穿概率变小.由这两方面共同决定的进入有源区的空穴数目最大值并没有在临界厚度时取得.

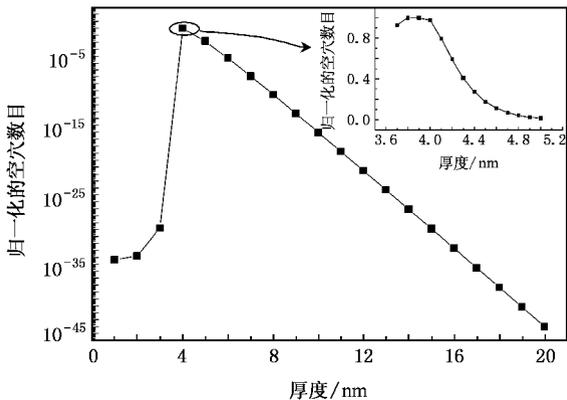


图3 隧穿进有源区的空穴数目随表面 InGaN 厚度的变化

由图 3 可知,在相同电压下,进入有源区的空穴数目即电流强度随表面 InGaN 层厚度不同变化较大.同样为了得到相同的电流强度,表面 InGaN 层厚度不同正向压降也不相同.图 4 为理论计算和实验得到的相同电流强度下,正向压降随表面 InGaN 层厚度的变化关系.圆点为测试数据,实线为模拟结果.从图 4 中可见,表面 InGaN 层厚度不同,正向压降变化剧烈,最低值在 InGaN 层厚度为 3.9 nm 处取

得.当 InGaN 层厚度小于此值时,随表面 InGaN 层厚度增加,测试数据和模拟数据均不断减小.这是因为当 InGaN 层厚度小于临界厚度时,表面 InGaN/GaN 界面处三角形势阱内没有形成二维空穴气,而空穴由金属隧穿进 InGaN 层要求 InGaN 层的价带内必须有相应的空的空穴能级. InGaN 层越薄,极化效应导致的 InGaN 层能带倾斜量越小,根据(5)~(7)式计算可知,就需要有更大的正向压降使表面 InGaN 层价带内形成空穴能级,因此在这一段变化区域,正向压降会随 InGaN 层变薄而增大.当 InGaN 层厚度大于此值时,随表面 InGaN 层厚度增加,测试数据和模拟数据均有不断增大的趋势,这是因为随 InGaN 层厚度增加,空穴隧穿概率变小所致.但是从图中我们还可以看到,测试数据增大速率明显快于模拟数据.这是因为随表面 InGaN 层厚度增加,缺陷也相应增加,InGaN 层表面出现许多 N 空位,与其内的 Mg 掺杂产生自补偿效应,降低了表面 InGaN 层中的空穴浓度<sup>[11]</sup>.此外,Chang 等<sup>[6]</sup>认为是由于表面 InGaN 层变厚,发生弛豫造成的结果. Kumakura 等<sup>[12]</sup>认为是由于生长厚度变厚,表面粗糙度增加,使电流扩展变差所造成.

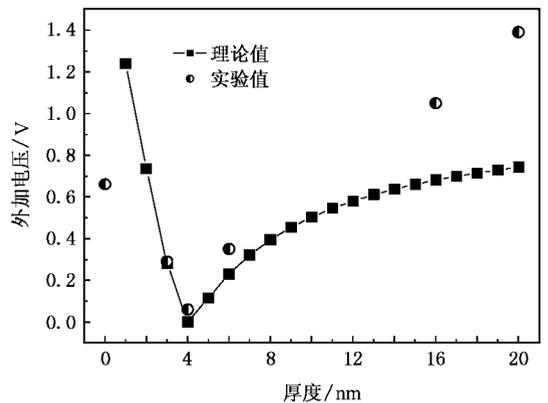


图4 外加电压随表面 InGaN 厚度的变化

## 5. 结 论

通过调整 GaN 基 LED 表面 InGaN 层的厚度,发现在 20 mA 电流驱动下,LED 器件的正向压降有明显差距.本文考虑了极化效应的影响,通过求解 InGaN/GaN 三角形势阱内二维空穴气浓度以及空穴隧穿概率的变化,求得了表面 InGaN 层厚度不同时正向压降的变化趋势,发现理论结果与实验结果有很好的吻合.并得到了获得最低压降的表面 InGaN 厚度.

- [ 1 ] Sheu J K , Chang S J , Kuo C H , Su Y K , Wu L W , Lin Y C , Lai W C , Tsai J M , Chi G C , Wu R K 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 18
- [ 2 ] Chen C H , Chang S J , Su Y K , Sheu J K , Chen J F , Kuo C H , Lin Y C 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 2532
- [ 3 ] Ozden I , Makarona E , Nurmikko A , Takeuchi T , Krames M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2532
- [ 4 ] Li Y , Zheng R S , Feng Y C , Liu S H , Niu H B 2006 *Chin. Phys.* **15** 702
- [ 5 ] Shao J P , Hu H , Guo W P , Wang L , Luo Y , Sun C Z , Hao Z B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3905 ( in Chinese ) [ 邵嘉平、胡 卉、郭文平、汪 莱、罗 毅、孙长征、郝智彪 2005 物理学报 **54** 3905 ]
- [ 6 ] Chang S J , Chen C H , Chang P C , Su Y K , Chen P C , Jhou Y D , Hung H , Wang S M , Huang B R 2003 *IEEE Transactions on Electron Devices.* **50** 2567
- [ 7 ] Gessmann T , Graff J W , Li Y L , Waldron E L , Schubert E F 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 3740
- [ 8 ] Gessmann T , Li Y L , Waldron E L , Graff J W , Schubert E F , Sheu J K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 986
- [ 9 ] Christmas M E U , Andreev A D , Faux D A 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 073522
- [ 10 ] Li J M , Lu Y W , Li D B , Han X X , Zhu Q S , Liu X L , Wang Z G 2004 *J. Vac. Sci. Technol. B* **22** 2568
- [ 11 ] Kumakura K , Makimoto T , Kobayashi N 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 3370
- [ 12 ] Hsueh K P , Hsin Y M , Sheu J K 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 026106

## Dependence of properties of GaN-based light emitting diodes on the surface InGaN thickness \*

Gu Xiao-Ling Guo Xia<sup>†</sup> Wu Di Li Yi-Bo Shen Guang-Di

( Beijing Photoelectronics Technology Laboratory , Beijing University of Technology , Beijing 100022 , China )

( Received 10 April 2007 ; revised manuscript received 18 June 2007 )

### Abstract

GaN-based light emitting diodes ( LEDs ) with InGaN as the capping layer was designed in our experiment. The forward voltage at the typical driving current of 20 mA was obviously changed by adjusting the thickness of the InGaN layer. We were concerned with the effect of polarization and solved the concentration and the tunneling probability of the two dimensional hole in the triangular potential well at the surface InGaN/GaN interface and obtained the minimal forward voltage. The calculation results were consistent with the experimental data.

**Keywords :** polarization , two dimension hole concentration , tunneling probability

**PACC :** 7865P , 7850G , 7730

\*Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2006CB604902 ) , the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60506012 ) , the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 2006AA03A121 ) and the Program for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing , China ( Grant No. 20051D0501502 ) .

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : guo@bjut.edu.cn