

# GaN 基双波长发光二极管电致发光谱特性研究<sup>\*</sup>

顾晓玲 郭 霞<sup>†</sup> 梁 庭 林巧明 郭 晶 吴 迪 徐丽华 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 1 月 19 日收到, 2007 年 1 月 31 日收到修改稿)

通过同时调节同一有源区内不同阱层和垒层的 In 组分, 制备了 GaN 基单有源区蓝、绿光双波长发光二极管(LED). 实现了 20 mA 下蓝、绿光同时发射. 实验发现随注入电流由 10 mA 增大到 60 mA, 电致发光(EL)谱中绿光峰强度相对于蓝光峰强度不断增强, 峰值波长蓝移也更加明显. 同时考虑极化效应和载流子不均匀分布的影响, 通过对一维薛定谔方程、稳态速率方程和泊松方程的联立自治求解, 分析了测试电流下蓝、绿光 EL 谱峰值波长和功率的变化情况, 发现理论结果与实验结果有很好地符合.

关键词: 极化, 载流子不均匀分布, 双波长

PACC: 7865P, 7850G, 7730

## 1. 引 言

近年来, 随着材料生长和器件制备技术的不断进步, LED 的研究和应用得到了飞速发展<sup>[1-5]</sup>, 以 III-V 族化合物为基础的白光 LED 进入了实用化阶段. 目前白光 LED 的制备方法主要有: 利用蓝光 LED 和可以被蓝光激发的黄色荧光粉结合组成白光 LED; 利用蓝、黄两色 LED 组合成的两基色白光 LED 和利用红、绿、蓝三色 LED 组合形成的三基色白光 LED<sup>[6,7]</sup>. 相比蓝光 LED 的制备, 这些混合制备方法增加了工艺步骤, 提高了成本. 为此文献 [8,9] 中通过调整同一有源区内不同量子阱的宽度, 实现了单芯片双波长同时发射, 获得了单芯片白光 LED. Qi 等<sup>[10]</sup>通过调节同一有源区不同量子阱的 In 组分制备了单有源区双波长 LED. 但是该文中, 在标准工作电流 20 mA 下, 利用 EL 谱测试没有观察到双波长, 只有在大电流下才获得了蓝绿光同时发光. Dalmasso 等<sup>[9]</sup>虽然得到了 20 mA 下双波长同时发射, 但随电流增大后两发光峰的峰值波长和光功率的变化, 没有给出详细的解释.

我们不仅调节了同一有源区内不同阱层的 In 组分, 势垒层也不同于文献 [10] 所述全部采用 GaN

材料, 而是在蓝光阱和绿光阱间采用  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  作势垒层. 这种结构降低了载流子在输运过程中需要跨越的势垒高度, 实现了 20 mA 下蓝、绿光的同时发射. 同时观察到随注入电流由 10 mA 增大到 60 mA, EL 谱中绿光峰功率相对于蓝光峰功率不断加强, 并不断发生蓝移. 考虑极化效应和载流子的不均匀分布的影响, 模拟计算了系统的一维薛定谔方程、稳态速率方程和泊松方程. 分析了测试电流下蓝、绿光 EL 谱峰值波长和功率的变化情况, 发现理论结果与实验结果有很好地符合.

## 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  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 随后生长三个绿光量子阱和一个蓝光量子阱, 绿光发光阱势垒层 In 组分为 0.3, 势垒层为 GaN, 蓝光发光阱势垒层 In 组分为 0.2, 势垒层为  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ , 采用这种结构降低了载流子输运过程中需要跨越的势垒, 有利于载流子在不同阱间的均匀分布. 随后生长一层 10 nm 厚 GaN 和 1500 nm 厚掺杂浓度为  $5 \times$

<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)和国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA03A121)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: guo@bjut.edu.cn

$10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的 p 型 GaN. 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. 实验结果与分析

图 1 为实验测得的双波长 LED EL 谱强度随电流的变化情况, 其中蓝光发光峰功率为归一化参数. 随虚线所示方向, 外加正向电流依次为 10 mA, 20 mA, 30 mA, 40 mA, 50 mA, 60 mA. 从图中可见, 在所有的测试电流下均得到了蓝绿光同时发射, 并且随电流增大, 两发光峰的 EL 谱强度呈现非线性变化. 绿光发光峰强度相对于蓝光峰不断增强, 在 60 mA 时, 绿光发光峰已占绝对优势. III-V 族化合物材料有很强的自发极化和压电极化特性<sup>[11-14]</sup>, 极化电场导致的量子限制斯塔克效应会使器件在不同正向工作电流下呈现不同的波长移动特性. 由图 1 可见, 随电流增大, 绿光发光峰峰值波长持续蓝移, 而蓝光发光峰峰值波长基本不变.

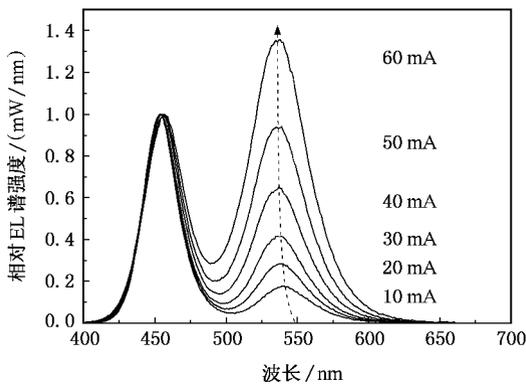


图 1 双波长 LED EL 谱强度随电流的变化

两发光峰的 EL 谱强度和 EL 谱峰值波长随电流的变化将导致 LED 色度坐标发生移动, 这种变化在国际照明委员会 (CIE 1931) 色品图上标出, 如图 2 所示, 图中黑色方框表示等能白点 (1/3, 1/3), 箭头所指的方向为电流增大的方向. 由图 2 可见, 双色 LED 的色度变化对电流的变化有很强的依赖性.

为了更明确地解释双波长 LED 的色度坐标随电流的变化规律, 我们考虑极化效应和载流子的不均匀分布影响, 通过对一维薛定谔方程、泊松方程和稳态速率方程的联立自治求解, 对器件的 EL 谱特性随注入电流的变化进行了分析.

极化电场导致量子限制斯塔克效应, 致使能带

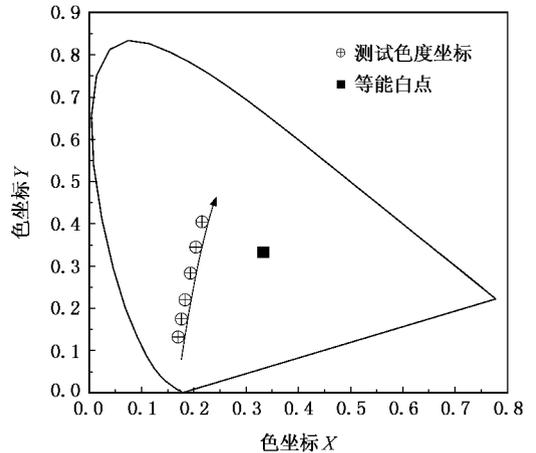


图 2 双色 LED 色度坐标随注入电流的变化

倾斜, 势阱变深, 量子限制作用加强, 特别是对于高有效质量、低迁移率的重空穴, 这种限制作用更加明显. 因此  $Q_i$  等<sup>[10]</sup> 只有在增大电流, 电子和空穴的空间分离对极化电场产生较大的屏蔽作用后, 才获得了双波长同时发射. 考虑自发极化和压电极化后, 首先计算了量子阱内极化产生的电场强度, 根据 Christmas 等<sup>[12]</sup> 提出的耦合法, 求解了实验中有源区的能带变化, 如图 3 所示. 通过在蓝光阱和绿光阱间采用  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  作势垒层, 降低了载流子在输运过程中需要跨越的势垒高度, 特别对于重空穴, 使它在小电流时就能够进入绿光阱与其中的电子复合发光. 因此, 在所有的测试电流下, 我们均获得了双波长同时发射.

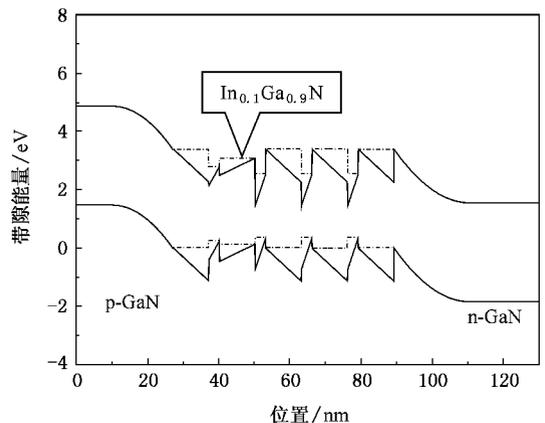


图 3 有源区的能带结构 (点线为没有考虑极化的能带图, 实线为考虑极化后的能带图)

极化电场使有源区内方势阱变成了三角形势阱. 根据一维泊松方程和薛定谔方程的联立自治求解, 获得了能级结构. 对于多电子体系, 系统的薛定

谓方程为

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \varphi(x) + V(x)\varphi(x) = E\varphi(x), \quad (1)$$

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  $2\pi$ ,  $m$  为载流子有效质量.

一维泊松方程为

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} \\ &= -\frac{\rho(x)}{\epsilon_r(x)\epsilon_0} \\ &= -\frac{q\left[\sum \alpha(z_q)\delta(z-z_q) + N_D(x) - n(x)\right]}{\epsilon_r(x)\epsilon_0} \end{aligned} \quad (2)$$

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,  $\alpha(z_q)$  为界面  $q$  处的极化面电荷密度,  $N_D(x)$  为离子化施主浓度,  $n(x)$  为电子密度分布. 对  $\alpha(z_q)$  的求解及其对器件特性的影响, 文献 [15] 已进行了详细论述.

在量子阱内势能  $V(x)$  的表达式为

$$V(x) = E_c(x) + V_{ec}(x) - q\phi(x), \quad (3)$$

其中  $V_{ec}(x)$  为电子间的交换关联能, 本文中根据局域态密度对其近似求解.

通过自洽求解, 可得到各个量子阱内的能级位置和载流子分布, 发现在空穴量子阱内只有重空穴能级, 而无轻空穴能级. 在计算中考虑到重轻空穴的耦合会使重空穴有效质量减小<sup>[16,17]</sup>、能级下降、能级间距变大, 根据文献 [18,19] 的研究, 在进行计算时取基态重空穴能级下降 20%.

根据稳态速率方程的求解, 得到了载流子在各个量子阱内的分布, 以此求得量子阱内单位体积的自发发射速率

$$r_{21} = A_{21}f_c(1-f_v)\rho_{red}, \quad (4)$$

其中  $A_{21}$  为自发发射复合系数,  $f_c$ ,  $f_v$  分别为电子在导带和价带基态能级上的占有概率,  $\rho_{red}$  为折合态密度,  $f_c$ ,  $f_v$  可由下式确定:

$$f_c = \left( \exp\left(\frac{E_2 - E_{Fc}}{k_B T}\right) + 1 \right)^{-1}, \quad (5)$$

$$f_v = \left( \exp\left(\frac{E_1 - E_{Fv}}{k_B T}\right) + 1 \right)^{-1}, \quad (6)$$

其中  $E_2$ ,  $E_1$  为导带和价带基态能级,  $E_{Fc}$ ,  $E_{Fv}$  为导带中电子和价带中空穴的准费米能级.

极化现象导致的量子限制斯塔克效应使 LED 发光峰红移, 而电流注入后电子和空穴对极化电场的屏蔽作用将使发光峰蓝移, 并且这种屏蔽作用会

随电流的增大而增大. 由于电子的有效质量小、迁移率大, 相比重空穴更容易在量子阱间输运, 在小电流时蓝光量子阱内已有相当数量的电子空穴对, 因此随电流增大, 载流子对极化电场屏蔽作用导致的蓝移现象在绿光量子阱内将比蓝光量子阱内更加明显. 同时大电流下热效应产生的红移也将对蓝移现象有一定的抵消. 在实验中发现蓝光发光峰峰值波长移动较小, 所以在本文只给出了实验测量和理论计算所得的绿光峰值波长随注入电流的变化曲线. 如图 4 所示, 方框为实验结果, 点号为计算结果. 从图 4 可见, 绿光峰值波长从 10 mA 到 60 mA 蓝移了 4 nm, 随注入电流增大, 理论上和实验上有一致的变化趋势.

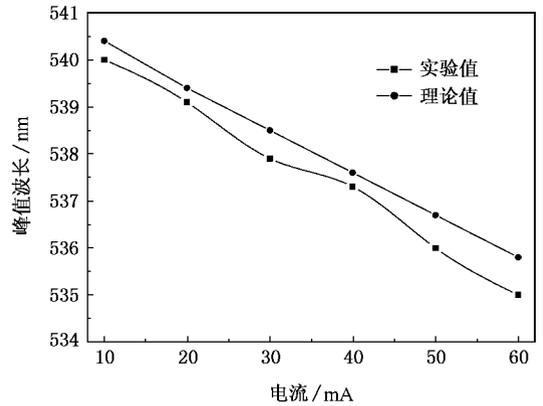


图 4 EL 谱绿光峰峰值波长随注入电流的变化

图 5 为理论计算和实验测得的蓝、绿光 EL 谱功率比值随电流的变化情况. 随电流增大, 蓝绿光功率比值不断减小, 绿光强度相对于蓝光强度不断加强. 这是因为随着载流子在量子阱内增加, 导带中电子和价带中空穴的准费米能级  $E_{Fc}$ ,  $E_{Fv}$  分别向高能方向移动, 电子和空穴在能级上的占据概率分别增加,

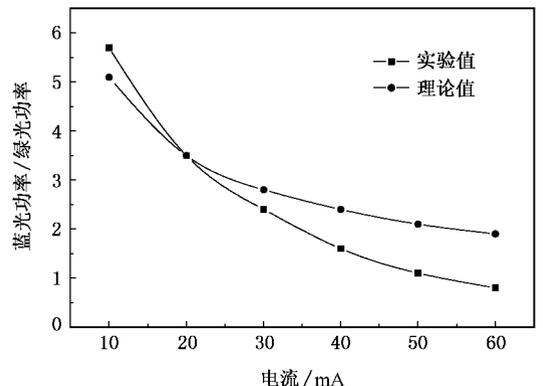


图 5 EL 谱蓝、绿光功率比值随注入电流的变化

但这种变化并不是线性,而是遵从负指数规律,光功率的增加速率将逐渐变小.通过求解速率方程,发现量子阱内载流子呈现不均匀分布,空穴的不均匀性比电子大一个数量级,并且随电流增大,这种不均匀性逐渐减小.当增加电流时,绿光阱内净增加的电子空穴对数大于蓝光阱内增加的数目,因此蓝光功率的增长速率小于绿光的功率增长速率.

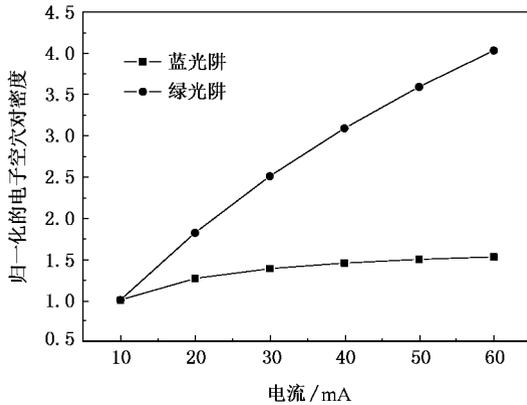


图 6 归一化的电子空穴对密度随注入电流的变化

图 6 为蓝光阱和绿光阱内归一化的电子空穴对

密度,归一化参数分别为蓝光阱和绿光阱在 10 mA 时的电子空穴对密度.从图 6 中可见,从 10 mA 到 60 mA,绿光阱内电子空穴对数上升了 3 倍,相对于蓝光阱的变化要明显的多,因此从视觉变化上看,绿光相对于蓝光不断加强,图 5 中的实验数值和理论计算数据也验证了这一变化.

## 4. 结 论

本文制备了 GaN 基单有源区蓝、绿光双波长 LED.通过同时调节同一有源区内不同阱层和垒层的 In 组分,在标准工作电流 20 mA 下,得到了双波长同时发射.从 10 mA 到 60 mA,随注入电流增大,EL 谱测试中绿光发光峰强度相对于蓝光发光峰强度不断增强,蓝、绿光发光峰强度比从 5.7 下降到 1,绿光峰值波长蓝移了 4 nm,蓝光峰值波长基本不变.我们考虑极化效应和载流子不均匀分布的影响,通过对一维薛定谔方程、稳态速率方程和泊松方程的联立自洽求解,分析了测试电流下蓝、绿光 EL 峰峰值波长和光功率的变化情况,得到了和实验结果相同的结论.

- [ 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 ] Joung K P ,Chang H K ,Seung H P ,Hee D P ,Se Y C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1647
- [ 7 ] Subramanian M ,Frank J P S ,Michael D P 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **8** 333
- [ 8 ] Damilano B ,Grandjean N ,Pernot C ,Massies J 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 918
- [ 9 ] Dalmaso S ,Damilano B ,Pernot C ,Dussaigane A ,Byrne D ,Grandjean N ,Leroux M ,Massies J 2002 *Phys. Stat. Sol.* **192** 139
- [ 10 ] Qi Y D ,Liang H ,Tang W ,Lu Z D ,Lau K M 2004 *Journal of Crystal*

*Growth* **272** 333

- [ 11 ] Ambacher O ,Smart J ,Shealy J R ,Weimann N G ,Chu K ,Murphy M ,Dimitrov R ,Wittmer L ,Stutzmann M ,Rieger W ,Hilsenbeck J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3222
- [ 12 ] Christmas M E U ,Andreev A D ,Faux D A 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 073522
- [ 13 ] Kong Y C ,Zheng Y D ,Chu R M ,Gu S L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1756 ( in Chinese ) [ 孔月婵、郑有 、储荣明、顾书林 2003 物理学报 **52** 1756 ]
- [ 14 ] Kong Y C ,Zheng Y D ,Zhou C H ,Deng Y Z ,Gu S L ,Shen B ,Zhang R Han P ,Jiang R L ,Shi Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2320 ( in Chinese ) [ 孔月婵、郑有 、周春红、邓永桢、顾书林、沈 波、张 荣、韩 平、江若珺、施 毅 2004 物理学报 **53** 2320 ]
- [ 15 ] Li J M ,Lü 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
- [ 16 ] Dosanjh S S ,Bowser E F ,Harris J J 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2142
- [ 17 ] Herman M A ,Bimberg D ,Christen J 1991 *J. Appl. Phys.* **70** 2
- [ 18 ] Tsang L ,Chuang S L 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 2543
- [ 19 ] Tanaka K ,Kotera N ,Nakamura H 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 4071



# The electroluminescence spectra of dual wavelength GaN-based light emitting diodes \*

Gu Xiao-Ling Guo Xia<sup>†</sup> Liang Ting Lin Qiao-Ming Guo Jing Wu Di Xu Li-Hua Shen Guang-Di

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

( Received 19 January 2007 ; revised manuscript received 31 January 2007 )

## Abstract

GaN-based dual-wavelength light emitting diodes ( LEDs ) with different In contents in the wells and barriers was designed and fabricated in our experiment . Electroluminescence of the fabricated LED at the typical driving current of 20 mA has two colors ,blue and green respectively . The ratio of the intensities of the green light to the blue light increases with increasing driving current . At larger current ,the blue shift of the peak wavelength of the green light was greater than that of the blue light . We are also concerned with the effect of polarization and non-uniform carrier distribution in the active region . Using coupled method of simulation ,the calculated data were consistent with the experiment .

**Keywords** : polarization , non-uniform carrier distribution , dual-wavelength

**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 ) ,and the National High Technology Development Program of China( Grant No. 2006AA03A121 ) .

<sup>†</sup> E-mail : guo@bjut.edu.cn