

文章编号: 1000-7032(2012)12-1368-05

# 量子阱数量变化对 InGaN/AlGaN LED 的影响

宋晶晶, 张运炎, 赵芳, 郑树文, 范广涵\*

(华南师范大学 光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631)

**摘要:**采用软件理论分析的方法分析了 InGaN/AlGaN 量子阱数量变化对发光二极管内量子效率、电子空穴浓度分布、载流子溢出产生的影响。分析结果表明:量子阱的个数不是越多越好,LED 的光学性质和量子阱的个数并不成线性关系。量子阱个数太少时,电流溢出现象较明显;而当量子阱个数太多时,极化现象明显,且会造成材料浪费。因此应根据工作电流选择合适的量子阱个数。

**关 键 词:**量子阱数量; 数值模拟; InGaN/AlGaN 发光二极管; 大功率**中图分类号:** 047      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3788/fgxb20123312.1368

## Effect of The Number of Quantum Wells on InGaN/AlGaN LED

SONG Jing-jing, ZHANG Yun-yan, ZHAO Fang, ZHENG Shu-wen, FAN Guan-han\*

(Institute of Opto-Electronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

\* Corresponding Author, E-mail: gfan@scnu.edu.cn

**Abstract:** The optical properties of the InGaN/AlGaN light-emitting diodes (LEDs) with varied quantum well (QW) numbers are studied numerically. The simulated results show that the single quantum-well (SQW) structure has the best optical performance with small current less than 100 mA. However, the 9-QWs structure obtains higher output power and IQE than other structures when the current is larger than 700 mA, and the efficiency droop is dropped markedly from 14.10% to 5.15% at 700 mA comparing with that of the SQW structure. Therefore, 9-QWs is the optimized structure for high-power LEDs. It can be explained as follows: (1) The 9-QWs structure acquires higher capacity of carrier confinement due to the smaller band bending effect and the effective hole potential barrier heights formed by the electron block layer (EBL). (2) When the QW number is less than 9, the lower capacity of carrier confinement and lower radiative recombination rate in the active region reduce the performance of the device, though the turn-on voltage is lower. (3) When the QW number is more than 9, the structure shows higher peak internal quantum efficiency (IQE) and less serious efficiency droop compared with 9-QW structure. However, the smaller IQE and larger band bending effect make it worse for a high power structure.

**Key words:** number of quantum well; numerical simulate; InGaN/AlGaN LED; high power

收稿日期: 2012-09-03; 修订日期: 2012-09-19

基金项目: 省部产学研结合引导项目(2009B090300338, 2010B090400192); 省战略性新兴产业专项资金 LED 产业项目(2010A081002005); 国家自然科学基金(61176043)资助项目

作者简介: 宋晶晶(1987-), 女, 河南周口人, 主要从事光电子材料与器件的研究。

E-mail: 632103093@qq.com

## 1 引言

近年来, III族氮化基 LED 以其低损耗、无污染、坚固耐震、寿命长以及元件体积小等优势而被广泛研究<sup>[1-2]</sup>, 这种固态照明源有望取代现今照明设备成为新一代照明元件。然而, 随着正向电流的逐渐增大, LED 的量子效率大幅下降, 即通常所指的 Efficiency droop 现象, 严重阻碍了 LED 在大功率器件方面的进一步发展。长期以来, 很多学者对此现象进行了大量研究, 提出了一系列的影响机制, 如载流子溢出<sup>[3]</sup>、空穴注入效率<sup>[4]</sup>、极化场<sup>[5-6]</sup>、俄歇复合<sup>[7-8]</sup>和热效应<sup>[9]</sup>等。尤其是对具有浅量子阱的 LED, 为了得到短波长, 就必须降低 In 的含量来增加禁带宽度<sup>[10]</sup>, 但这样就更容易产生载流子溢出进而加剧 Efficiency droop 现象。Y. K. Kuo 等<sup>[11-12]</sup>提出用 AlGaN 代替 GaN 作为垒层, 这样不仅改善了最后一个 AlGaN 垒层与 AlGaN 电子阻挡层之间的晶格失配现象, 使得极化电荷减少、电子阻挡层的能带弯曲减小, 从而降低价带对空穴的势垒高度, 使得空穴容易到达活化层; 并且由于 AlGaN 的禁带宽度大于 GaN, 从而增加了量子阱的阱深, 改善了载流子溢出现象。

对于大功率 LED 来说, 量子阱个数的选择也是非常重要的。David 等<sup>[13]</sup>在 2008 年提出使用多量子阱结构可以使电子注入到较多的量子阱内, 减少载流子泄露, 此外还能减小活性区载流子的密度, 减小 Auger 复合率。然而随着量子阱个数的增加, 阵层和垒层之间的应力累积会造成晶体质量下降; 同时考虑到阵层和垒层的生长温度不同, 也会造成量子阱的晶体质量随着个数的增加而下降, 从而影响器件的性能<sup>[14-15]</sup>。而且, 由于 GaN 基材料中空穴的有效质量较大, 迁移率较低, 再加上电子阻挡层对空穴有一定的阻挡作用, 所以只有靠近 p 型层的最后一个阱对辐射复合有较大的作用<sup>[14,16]</sup>。近期, Jih Yuan Chang 等<sup>[17]</sup>使用 APSYS 软件研究了 InGaN/(In)GaN 量子阱个数对器件性能的影响, 结果表明 5 个量子阱是比较合适的。然而, 关于量子阱数量对器件的影响机理和最优个数的选择目前尚有争议。因此, 为了使 InGaN/AlGaN 器件在大功率时有更好的性能, 进一步研究量子阱数量变化对器件性能的影响是很必要的。

本文用 APSYS (Advanced physical models of semiconductor devices) 模拟量子阱数量变化对 InGaN/AlGaN LED 性能的影响, 研究了器件在大功率下的光学特性以及内在的物理机理。结果表明: 量子阱的个数不是越多越好, LED 的光学性质和量子阱的个数并不成线性关系。量子阱个数太少时, 电流溢出现象较明显; 而当量子阱个数太多时, 极化现象明显, 且会造成材料浪费。因此, 应根据工作电流选择合适的量子阱个数。

## 2 器件结构

本文的器件结构和部分参数参照文献[12], 选取了优化后的结构参数。器件的工作温度为 300 K, 器件的外量子效率取值为 0.78, 其他参数参照文献[18]。选用的器件面积为 1 mm × 1 mm, 器件结构从下到上依次为: c 面蓝宝石衬底, 50 nm 厚的非掺杂 GaN, 4.5 μm 厚的 n-GaN (n 型掺杂浓度为  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 活性层, 20 nm 厚的 p-Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N 电子阻挡层 (p 型掺杂浓度为  $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 最后是 0.2 μm 的 p-GaN 层 (p 型掺杂浓度为  $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )。选取 In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N 和 Al<sub>0.08</sub>Ga<sub>0.92</sub>N 作为活性层阱层和垒层的材料, 阵层厚度均为 2.2 nm, 垒层厚度均为 15 nm。

## 3 结果与讨论

不同量子阱个数的 InGaN/AlGaN LED 的 I-V 特性如图 1 所示。随着量子阱个数的增加, 器件的开启电压有上升的趋势。这是因为当量子阱个数增加时, 器件的串联电阻值随着量子阱总厚度的增加而增大, 使得开启电压逐渐上升; 另一个可能的原因是: 随着量子阱个数的增加, 应力不断积

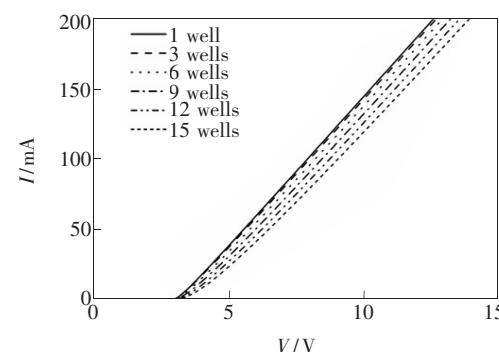


图 1 不同量子阱个数的 LED 器件的 I-V 特性图

Fig. 1 I-V performance curves of the InGaN/AlGaN LEDs with various QW numbers

累,三角形势垒的个数也不断增加,对器件的开启电压造成了影响。

图2为不同量子阱个数的器件的功率和内量子效率随电流的变化图。可以看出,随着电流的增大,量子阱个数越多,器件的功率越大;而当电流增加到700 mA时,9阱的功率相对较大。这与IEQ随电流的变化趋势是一致的。单量子阱LED器件有着最大的内量子效率峰值和最大的内量子

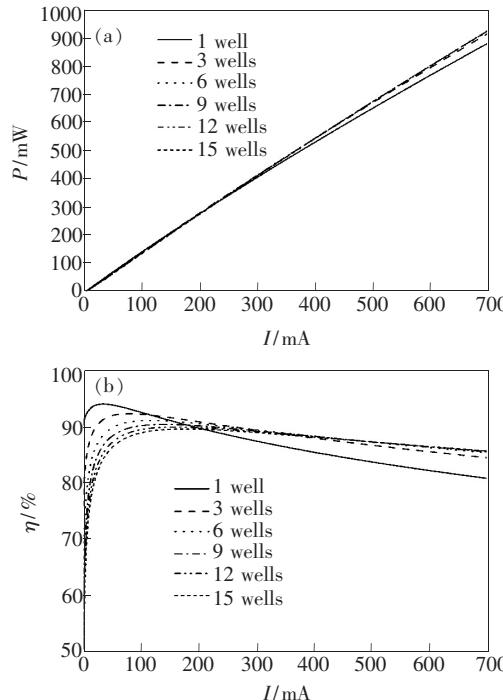


图2 不同量子阱个数的器件的功率特性和内量子效率

Fig. 2 Output power and IQE as a function of injection current for the InGaN/AlGaN LEDs with various QW numbers

效率下降率(14.10%),而15阱LED器件有着最小的内量子效率峰值和最小的内量子效率下降率(4.14%)。与3阱、6阱、9阱、12阱的内量子效率下降率8.50%,6.33%,5.15%和4.80%相比,15阱器件的Efficiency droop现象最不明显。但9阱却有着较12阱和15阱更大的IEQ峰值,同时从图中也可以看出,当量子阱数量增加到一定程度后,功率和内量子效率随着量子阱个数的增加而变化的趋势不明显,所以综合考虑,9阱是电流 $>700$  mA时器件的最佳量子阱个数。

图3是具有不同量子阱个数的器件的能带图。由图中可以看出,在单量子阱结构器件中,量子阱区的费米能级与邻近的垒的能带的距离最近,为383 meV,小于其他器件。这说明,在单量子阱器件中,量子阱对电子的束缚能力较弱,由于电子具有较小的有效质量和较高的迁移率,电子可以轻易地越过电子阻挡层所形成的势垒,到达p区和空穴发生复合,减小了空穴浓度和注入效率。同时,随着量子阱个数的增加,EBL的价带与费米能级之间的距离越近(I:353 meV; II:345 meV; III:334 meV; IV:327 meV; V:321 meV; VI:317 meV),这说明量子阱数量越多,EBL对空穴的阻挡作用越小,空穴更容易到达量子阱区与电子复合。由于空穴有着与电子相反的特性,使得较多的空穴注入到量子阱中比较困难,且在III-V族外延生长过程中,空穴掺杂较困难,因此活性区空穴的浓度对器件的光效的影响较大。而当量子

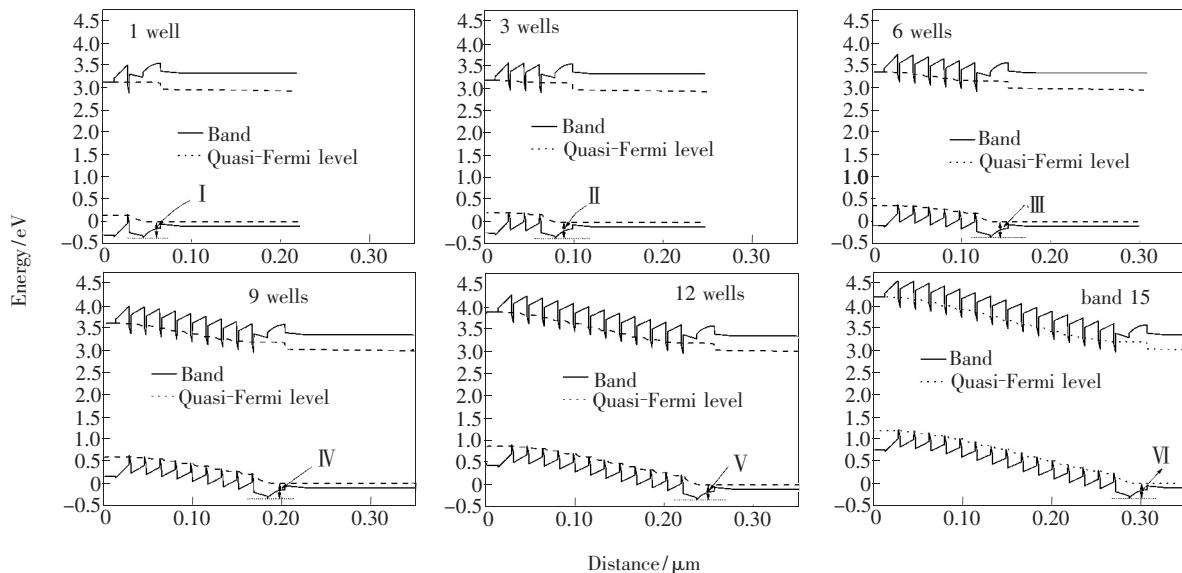


图3 不同量子阱个数的LED器件的能带图

Fig. 3 Energy band diagrams of the InGaN/AlGaN LEDs with various QW numbers at 700 mA

阱个数多于 9 时, 能带倾斜严重, 虽然空穴可以被很好地限制在量子阱区, 但是电子溢出严重, 影响器件的性能。这与图 4 中不同量子阱个数的器件在大电流(700 mA)下载流子浓度图是一致的。从图 4 中可以看出, 单量子阱结构器件的 p 型层中的电子浓度最高, 电子溢出现象最为明显。而 9 阵器件中, 空穴均匀地注入到各个量子阱中, 电子和空穴的浓度分布均匀, p 型层中的电子浓度

最低, 电子溢出现象最不明显。

对于大电流(700 mA)下载流子复合率来说, 如图 5 所示, 9 阵器件的总复合率最大。这是因为量子阱个数增多可以使电子注入到较多的量子阱中, 减小活性区载流子密度, 从而减轻俄歇复合效应, 使得辐射复合效率增加。而当阱的个数继续增加时, 极化的积累导致电子与空穴波函数的重叠减少, 复合率下降。

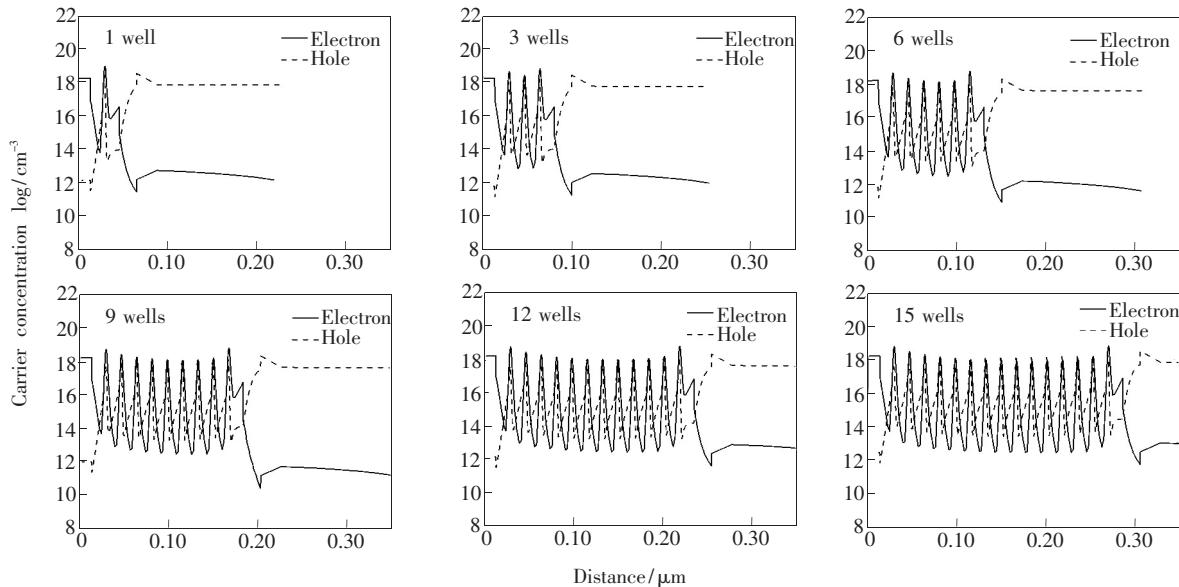


图 4 不同量子阱个数的 LED 器件的载流子浓度

Fig. 4 Carrier concentrations of the InGaN/AlGaN LEDs with various QW numbers at 700 mA

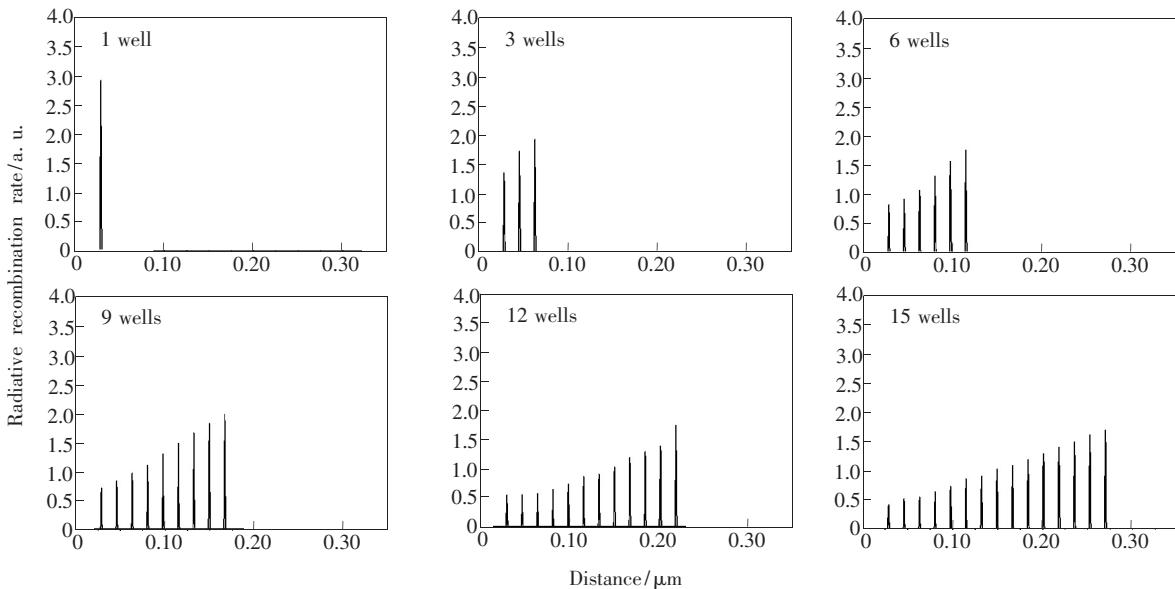


图 5 不同量子阱个数的器件的复合率

Fig. 5 Radiative recombination rate of the InGaN/AlGaN LEDs with various QW numbers at 700 mA

## 4 结 论

通过对不同量子阱个数的 InGaN/AlGaN LED 的功率、内量子效率、载流子浓度以及复合率等可以看出,在 700 mA 的工作电流下,9 阵的功率和复合率最大。这是因为随着阱个数的增加,可以使电子注入到较多的量子阱中,减小活性区载流子的密度,从而减轻俄歇复合效应。而当

阱的个数增加时,由于极化的积累,使得能带弯曲和载流子泄露现象严重,导致器件性能下降;此外,增加量子阱数量,在外延生长时不仅浪费原材料,还会增加量子阱的生长难度,难以制备高质量的量子阱。因此,对于 InGaN/AlGaN LED 器件,当电流 > 700 mA 时,9 个量子阱是最佳的选择。这与文献[15]中的实验数据是一致的。

## 参 考 文 献:

- [1] Chen G C, Fan G H. Study on long-wavelength optical phonons in hexagonal InAlGaN crystals [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(8):808-811 (in English).
- [2] He T, Chen Y, Li H, et al. Optimization of two-step AlN buffer of *a*-plane GaN films grown on *r*-plane sapphire by MOCVD [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(4):363-367 (in English).
- [3] Kim M H, Schubert M F, Dai Q, et al. Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(18):183507-1-3.
- [4] Rozhansky I V, Zakheim D A. Analysis of the causes of the decrease in the electroluminescence efficiency of AlGaN light-emitting-diode heterostructures at high pumping density [J]. *Semiconductors*, 2006, 40(7):839-845.
- [5] Kunzer M, Leancu C C, Maier M, et al. Well width dependent luminescence characteristics of UV-violet emitting GaInN QW LED structures [J]. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2008, 5(6):2170-2172.
- [6] Reed M L, Readering E D, Moe C G, et al. Benefits of negative polarization charge in n-InGaN on p-GaN single heterostructure light emitting diode with p-side down [J]. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2009, 6(2):585-588.
- [7] Bulashevich K A, Karpov S Y. Is Auger recombination responsible for the efficiency rollover in III-nitride light-emitting diodes? [J]. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2008, 5(6):2066-2069.
- [8] Hader J, Moloney J V, Pasenow B, et al. On the importance of radiative and Auger losses in GaN-based quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(26):261103-1-3.
- [9] Efremov A A, Bochkareva N I, Gorbunov R I, et al. Effect of the joule heating on the quantum efficiency and choice of thermal conditions for high-power blue InGaN/GaN LEDs [J]. *Semiconductors*, 2006, 40(5):605-610.
- [10] Xing B, Cao W Y, Du W M. Temperature dependent PL of InGaN/GaN multiple quantum wells with variable content of In [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(6):864-869 (in Chinese).
- [11] Chang J Y, Tsai M C, Kuo Y K. Advantages of blue InGaN light-emitting diodes with AlGaN barriers [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(9):1368-1370.
- [12] Zhang Y Y, Yao G R. Performance enhancement of blue light-emitting diodes with AlGaN barriers and a special designed electron-blocking layer [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, 110(9):093104-1-3.
- [13] David A, Grundmann M J, Kaeding J F, et al. Carrier distribution in (0001) InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(5):053502-1-3.
- [14] Wang T, Nakagawa D, Wang J, et al. Photoluminescence investigation of InGaN/GaN single quantum well and multiple quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(24):3571-3573.
- [15] Kim D J, Moon Y T, Song K M, et al. Structural and optical properties of InGaN/GaN multiple quantum wells: The effect of the number of InGaN/GaN pairs [J]. *Cryst. Growth*, 2000, 221(4):368-372.
- [16] Liu J P, Ryou J H, Dupuis R D, et al. Barrier effect on hole transport and carrier distribution in InGaN/GaN multiple quantum well visible light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(2):021102-1-3.
- [17] Chang J Y, Kuo Y K, Tsai M C. Correlation of barrier material and quantum-well number for InGaN/(In)GaN blue light-emitting diodes [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2011, 208(3):729-734.
- [18] Vurgaftman I, Meyer J R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors [J]. *Appl. Phys.*, 2003, 94(6):3675-3679.