

文章编号: 1000-7032(2011)10-1051-06

## 电极结构对 AlGaInP-LED 阵列电流分布的影响

尹 悦<sup>1,2</sup>, 梁静秋<sup>1</sup>, 梁中翥<sup>1</sup>, 王维彪<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 以 AlGaInP-LED 外延片为基片, 设计了分辨率为  $320 \times 240$ 、像素尺寸为  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  的微型 LED 阵列。针对目前 LED 阵列普遍存在的电流分布不均匀的问题, 建立了内部电流分布模型, 研究了电极结构、电极尺寸及电极间距等不同因素对 LED 电流分布造成的影响。在单条形电极结构的基础上进行优化, 综合考虑不透明电极的遮光效应等因素得到三条形电极结构为最优的电极结构, 该电极结构的 LED 有源层均匀发光面积比未经优化的单条形电极提高了 65.02%, 比双条形电极提高 25.63%, 有效提高了微型 LED 阵列的出光效率, 对改善 LED 芯片发光均匀性具有参考意义。

**关键词:** 电极结构; AlGaInP-LED; 电流分布; 三条形电极

中图分类号: TN312.8

PACS: 85.60.Jb

PACC: 7280E; 7865K

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20113210.1051

### 1 引 言

LED 具有发光效率高、耗电量小、寿命长、发热量低、体积小、环保节能等诸多优点<sup>[1]</sup>, 在很多领域有着广泛且持续增长的应用, 如 LCD 背光源、投影仪、手电筒、汽车头灯/尾灯和普通照明等<sup>[2-3]</sup>。近年来, 人们开始重视微型 LED 阵列的研究。自 1998 年德国亚琛工业大学采用湿法腐蚀在 AlGaInP 发光芯片上制作发光二极管阵列的初步研究以来, LED 阵列的研究取得了突破性进展<sup>[4]</sup>。近几年, 微型 LED 阵列的研究更是取得了飞快的发展。微型 LED 阵列采用 MEMS 工艺技术, 可以将像素的大小控制在微米量级, 在分辨率方面潜力很大。由于它是自发光器件, 发光亮度可达  $1\ 200 \text{ cd/m}^2$  以上, 在对比度方面, 暗点部分不参与发光, 可以得到 900:1 的高对比度。除此之外, 微型 LED 阵列还具有工作电压低、响应速度快、性能稳定可靠、工作温度范围宽、适应恶劣环境能力强等优点<sup>[5-7]</sup>。目前, 微型 LED 阵列在医疗、微显示以及通讯网络中的应用可行性已得到论证<sup>[8-9]</sup>。这种微型芯片广阔的应用前景对

LED 的发光效率也提出了更高的要求。

量子效率是 LED 特性中与发光效率相关的重要参数, 它反映注入载流子复合产生光量子的效率<sup>[10]</sup>。目前 LED 的内量子效率可以达到 90% 以上, 而外量子效率受芯片结构、窗口层的厚度、电极形状、芯片尺寸等诸多因素的限制, 改进和提高并不显著。其中电极的形状直接决定了芯片电流分布的均匀性, 进而影响芯片的出光效率<sup>[11]</sup>。目前普通单芯片 LED 通常采用最为常见的不透明的圆形电极结构, 其电流主要集中在圆形电极正下方的部分区域, 而电极到有源区的距离有限, 当电流还未横向扩展充分时就已经到达有源区, 即有源区中发光的区域主要集中在电极下方的部分有源区, 这就是所谓的电流拥挤效应<sup>[12-13]</sup>。这将导致 LED 发光效率降低、发热不均匀、使用寿命下降等问题。对于微型 LED 阵列其像素尺寸小、集成度高, 电流拥挤效应对其产生的影响更为显著。因此, 优化 LED 阵列的电极结构, 减小电流拥挤效应, 对于提高 LED 阵列的性能非常重要。

本文基于 Markus-Christian Amann 等人提出

收稿日期: 2011-06-20; 修订日期: 2011-07-13

基金项目: 吉林省科技发展项目(20100351)资助项目

作者简介: 尹悦(1988-), 女, 湖北潜江人, 主要从事 LED 微显示集成阵列芯片的研制。

E-mail: yinyue19880218@hotmail.com, Tel: (0431) 86176902

\*: 通讯联系人; E-mail: wangwbcn@163.com, Tel: (0431) 86176920

的模型近似计算了边长 100 μm 左右的 LED 内部的电流密度分布,讨论了电极结构及其尺寸对电流分布的影响,并提出了一种新型的便于矩阵寻址的三条形电极结构,有效的改善了 LED 内部电流分布不均匀的问题,提高了 LED 阵列的发光效率,对微型 LED 阵列芯片在显示与照明等领域的应用具有重要意义和参考价值。

## 2 器件结构

本文所研究的 LED 阵列是以 AlGaInP DH-LED 外延片为基片制作的。AlGaInP 四元系材料是制作高亮度 LED 的较理想材料,与 GaAs 衬底晶格完全匹配,具有较宽的直接禁带 (1.90 ~ 2.30 eV),能够制作从红光 (650 nm) 到绿光 (555 nm) 波段的高亮度 LED<sup>[13]</sup>。

外延片结构如图 1 所示,由上至下分别是 p-GaP、p-i-n AlGaInP、DBR 和 GaAs。最上层的 p-GaP 有两个作用:一是作为器件的透光窗口层,获得更高的外量子效率;二是作为电流注入的扩散层。电流注入该层后可以向四周扩散至 AlGaInP 层,该层的厚度为 5 ~ 6 μm。p-i-n AlGaInP 是 LED 的核心结构。i-AlGaInP 层是有源区,有源区两侧的 p-AlGaInP 层和 n-AlGaInP 层分别是空穴和电子的限制层,可以约束少数载流子并提高 LED 的量子效率<sup>[14]</sup>。DBR(分布式布拉格反射光栅)是由交替的低反射率层和高反射率层组成的,各层光学厚度为发光波长的 1/4<sup>[15]</sup>。引入 DBR 层是为了使射向衬底的光被反射回上表面,提高器件效率。最底层是外延片的衬底,材料是 (100) 晶面偏向 (011) 的 n-GaAs。

外延片设计了像素为 320 × 240 的 LED 阵列,单个像素尺寸为 100 μm × 100 μm。芯片上电

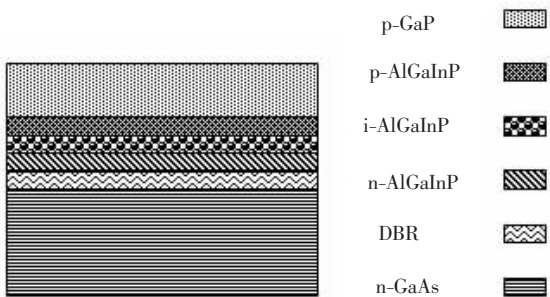


图 1 AlGaInP-LED 外延片层次结构

Fig.1 Schematic illustration of the epitaxial semiconductor multilayer of AlGaInP-LED

极(p 电极)为不透明的条形电极,下电极(n 电极)为面电极,图 2 为 LED 阵列中单个像素的结构图,图中电极结构为未经优化的单条形电极。

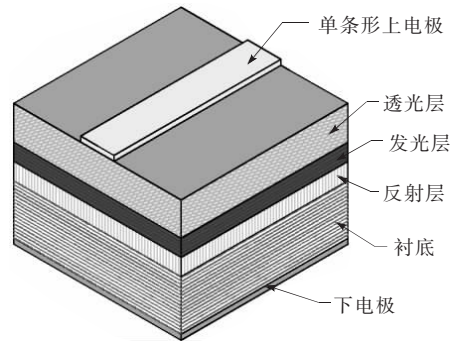


图 2 LED 阵列单个像素结构图

Fig.2 Structure of single pixel in LED array

## 3 理论模型

由于 LED 阵列与激光二极管阵列的结构相似,它的注入电流密度的分布可采用 Markus-Christian Amann 等<sup>[16]</sup>提出的激光二极管的电流分布模型来进行近似计算。由于本文设计的 LED 阵列中所有像素的尺寸都相同,所以只要分析单个 LED 的注入电流即可。为了分析方便,将 LED 的结构简化为如图 3 所示的形式。图中  $a$  表示 LED 的宽度,  $a = 100 \mu\text{m}$ ;  $w_i$  表示条形电极的宽度;  $T$  表示电流扩散层 p-GaP 的厚度;  $I_i$  表示注入电流的强度。金属和半导体之间(M-S)的欧姆接触电阻率用  $\rho_c$  表示, p-GaP 层的电阻率和厚度分别用  $\rho$  和  $T$  表示。一般情况下  $\rho_c \ll \rho T/2$ , 故接触电阻可忽略不计。假定电流注入 LED 上电极后金属和半导体之间的接触区域是一个电流注入区。由于 p-AlGaInP 层的厚度与 p-GaP 层相比非常薄,  $T, x_i$  和  $w_i$  成为影响注入电流空间分布的主要因素。  $J(x)$  表示有源层横向电流密度分布,  $x$  取值区间为  $[-\frac{a}{2}, \frac{a}{2}]$ ,  $J(x)$  描述了电流注入上

电极后,电流密度在宽度为  $[-\frac{a}{2}, \frac{a}{2}]$  区域内的横向扩散效应。  $J(x)$  可以用式(1)表示<sup>[16]</sup>:

$$J(x) = \frac{2}{\pi L} \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{w_i} \arctan \left\{ \frac{\sinh(\pi w_i / 4T)}{\cosh[\pi(x - x_i) / 2T]} \right\}, \quad (1)$$

式中  $L$  代表上电极的长度,也代表单个 LED 的长度。文中设计的电极结构均以像素的中心线为轴

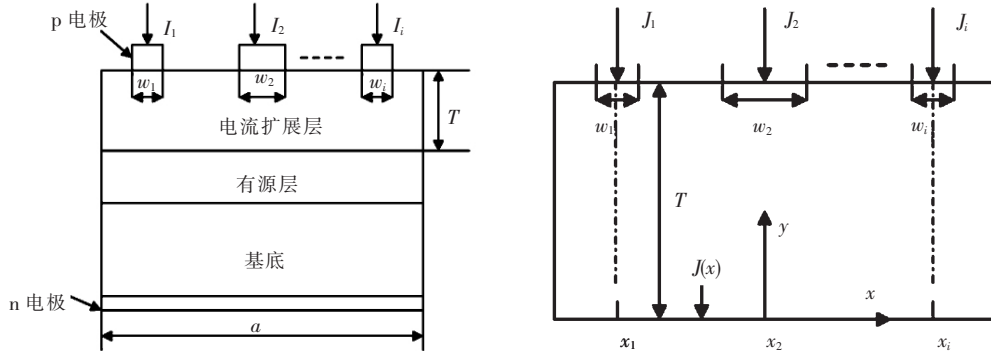


图 3 注入电流的 LED 的简化模型

Fig. 3 Simple structure of LED model with injecting current

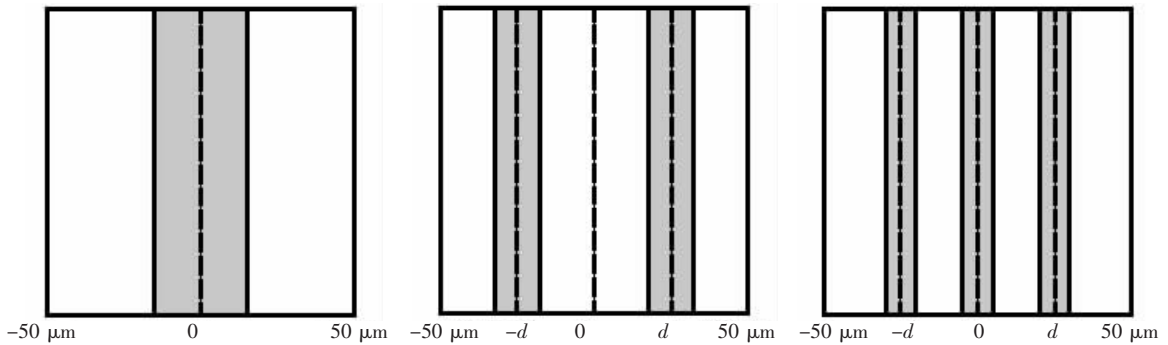


图 4 三种电极结构俯视图 (a) 单条形电极; (b) 双条形电极; (c) 三条形电极。

Fig. 4 Top view of the three different structures of top electrode, (a) One-strip electrode; (b) Bi-strip electrode; (c) Tri-strip electrode.

对称分布,且同一像素上的各条形电极宽度相同,如图 4 所示为三种电极结构的俯视图。

### 4 结果与讨论

根据上面提到的电流分布模型,设计电极结构及尺寸并对其进行模拟。将式(1)简化为:

$$J(x) = \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{W_i} \arctan \left\{ \frac{\sinh(\pi w_i/4T)}{\cosh[\pi(x-x_i)/2T]} \right\}, \quad (2)$$

假定注入电流为  $I$ ,则三种电极结构的有源层电流密度分布函数可分别用式(3)、(4)、(5)表示:

$$J(x) = \frac{I}{w} \arctan \left[ \frac{\sinh(\pi w/4T)}{\cosh(\pi x/2T)} \right], \quad (3)$$

$$J(x) = \frac{I}{2w} \left\{ \arctan \frac{\sinh(\pi w/4T)}{\cosh[\pi(x-d)/2T]} + \arctan \frac{\sinh(\pi w/4T)}{\cosh[\pi(x+d)/2T]} \right\}, \quad (4)$$

$$J(x) = \frac{I}{3w} \left\{ \arctan \frac{\sinh(\pi w/4T)}{\cosh[\pi(x-d)/2T]} + \arctan \frac{\sinh(\pi w/4T)}{\cosh[\pi x/2T]} + \arctan \frac{\sinh(\pi w/4T)}{\cosh[\pi(x+d)/2T]} \right\}, \quad (5)$$

式中  $d$  代表电极与像素中心线之间的距离。

根据设计的像素尺寸和外延片结构,  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $T = 6 \mu\text{m}$ ,并假定  $I = 20 \text{ mA}$ 。经模拟计算得出有源区的电流分布。将有源区横向电流密度  $J(x) \in \left[ \frac{1}{2}J(x)_{\max}, J(x)_{\max} \right]$  的区域定义为均匀发光区域,区域宽度以  $W_H$  表示。

图 5 所示为上电极为单条形电极时有源区的电流分布。以  $w = 10 \mu\text{m}$  为例,电流密度在有源区中心即  $x = 0$  处达到峰值  $J(x)_{\max} = 2.086 \text{ mA} \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 。根据之前的定义,令

$$J(x) = \frac{1}{2}J(x)_{\max} = 1.043 \text{ mA} \cdot \mu\text{m}^{-2}, \quad (6)$$

得到  $x_1 = -6.71 \mu\text{m}$ ,  $x_2 = 6.71 \mu\text{m}$ ,即  $W_H = 13.42 \mu\text{m}$ 。同理,当电极宽度为  $20 \mu\text{m}$  和  $25 \mu\text{m}$  时,  $W_H$  分别为  $21.08 \mu\text{m}$  和  $25.54 \mu\text{m}$ 。由此可得,随着电极宽度的增大,有源层的发光区域明显增宽,但并非等比增加。总体而言,当 LED 的上电极为单条形电极时,  $W_H$  较小。由于电流还没有充分的横向扩展,就已经到达有源层,所以有源层中的发光区域主要集中在电极正下方的部分区

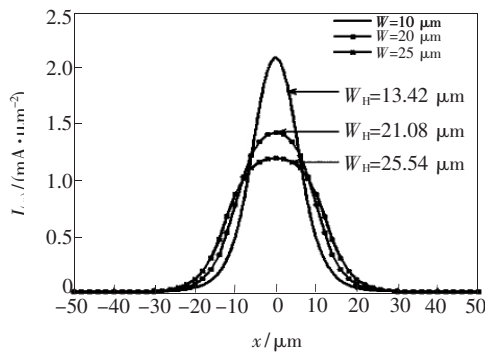


图 5 上电极为单条形电极时有源区的电流分布

Fig. 5 Current density distribution on the active layer with one-strip electrode as top electrode

域造成严重的电流拥挤效应,影响发光效率和发光均匀性。

单条形电极远不能满足微型 LED 阵列对均匀出光的要求。对电极结构进行改进,单条形电极变为双条形电极,分别改变电极宽度和间距对电流分布进行模拟,图 6 所示为双条形电极结构的有源层电流分布。

由图 6 可以看出,当电极结构变成双条形电极时, $W_H$  明显变大。图 6(a) 为电极宽度  $W$  一定、两条形电极之间的距离改变时的有源层电流分布曲线。当两条形电极的间距很小时, $W_H$  随着间距的增大而变大。但当电极间距超过某一值时  $x=0$  附近的电流密度会低于  $J(x)_{\max}$ ,即像素的中心区域属于非均匀发光区。若电极间距继续增大,中心非均匀发光区域变大, $W_H$  随之减小。由此可知, $W_H$  会随着两条形电极的间距的增大先增大后减小,即有源层的电流分布均匀性先增强后减弱。对于不同宽度的电极结构,电极间距均存在某一合适的值使有源层的均匀发光面积达到最大。由图 6(b) 中的曲线看出,当电极间距一定时,电极宽度越宽,电流分布越均匀,这与单条形电极结构时得到的结论是一致的。

在双条形电极的基础上再增加一条电极,得到三条形电极结构。同样分别改变电极宽度和间距进行模拟计算,得到的结果如图 7 所示。通过比较分析得到与单条形电极和双条形电极结构相同的结论。

实际情况中 LED 阵列出光效率的提高不仅要考虑有源区的电流分布均匀性还必须考虑不透明电极对光的遮挡效应,电极越宽,遮挡的区域越大,出光效率也会越低。

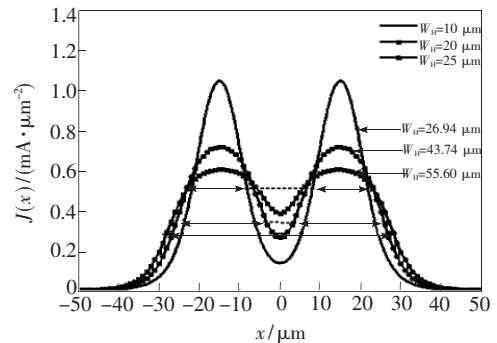
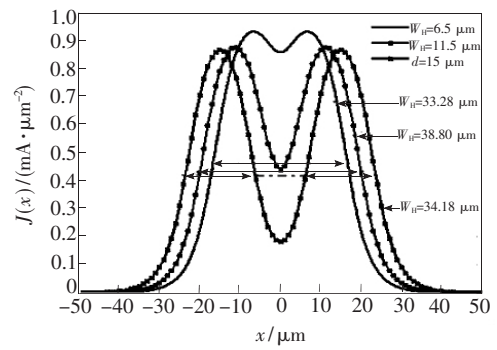


图 6 上电极为双条形电极时有源区的电流分布,(a)  $w=15 \mu\text{m}$ ,  $d$  改变时有源区的电流分布,当  $d=11.5 \mu\text{m}$  时,  $W_H$  最大;(b)  $d=15 \mu\text{m}$ ,  $w$  改变时有源区的电流分布,当  $w=25 \mu\text{m}$  时,  $W_H$  最大。

Fig. 6 Current density distribution on the active layer with bi-strip electrode as top electrode (a)  $w=15 \mu\text{m}$ , Current density distribution on the active layer when  $d$  changes.  $W_H$  reaches the maximum value when  $d=11.5 \mu\text{m}$ ; (b)  $d=15 \mu\text{m}$ , Current density distribution on the active layer when  $w$  changes.  $W_H$  reaches the maximum value when  $w=25 \mu\text{m}$ .

图 8 所示为电极遮光面积一定时,三种电极结构下有源区的电流分布。对于单条形、双条形和三条形电极结构,电极宽度分别为 30, 15, 10  $\mu\text{m}$ , 遮光面积均为  $300 \mu\text{m}^2$ 。双条形电极和三条形电极结构中的  $d$  分别为 11.5  $\mu\text{m}$  和 18.5  $\mu\text{m}$ 。三种电极结构的均匀发光区域宽度  $W_H$  分别为 30.3, 39.8, 50  $\mu\text{m}$ 。双条形电极的  $W_H$  比单条形电极增加了 31.35%; 三条形电极的  $W_H$  比单条形电极增加了 65.02%, 比双条形电极增加了 25.63%。因为三种电极结构的遮光面积相同,而有源层的均匀发光面积直接影响 LED 的出光效率,所以具有三条形电极结构的 LED 阵列在发光特性上具有明显的优势。

以上三种电极结构中,当上电极为三条形电极且电极间距为某一合适的定值时,有源层的均匀发光面积达到最大值。

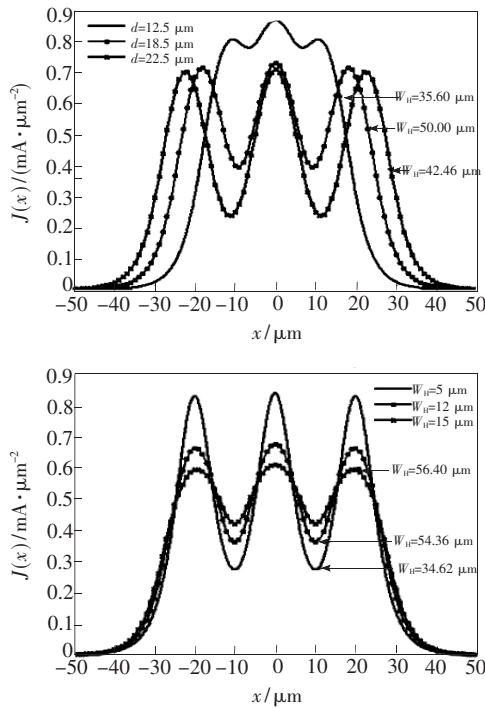


图 7 上电极为三条形电极时有源区的电流分布 (a)  $w = 10 \mu\text{m}$   $d$  改变时有源区的电流分布, 当  $d = 18.5 \mu\text{m}$  时,  $W_H$  最大; (b)  $d = 15 \mu\text{m}$ ,  $w$  改变时有源区的电流分布, 当  $w = 15 \mu\text{m}$  时,  $W_H$  最大。

Fig. 7 Current density distribution on the active layer with tri-strip electrode as top electrode (a)  $w = 10 \mu\text{m}$ , Current density distribution on the active layer when  $d$  changes.  $W_H$  reaches the maximum value when  $d = 18.5 \mu\text{m}$ ; (b)  $d = 15 \mu\text{m}$ , Current density distribution on the active layer when  $w$  changes.  $W_H$  reaches the maximum value when  $w = 15 \mu\text{m}$ .

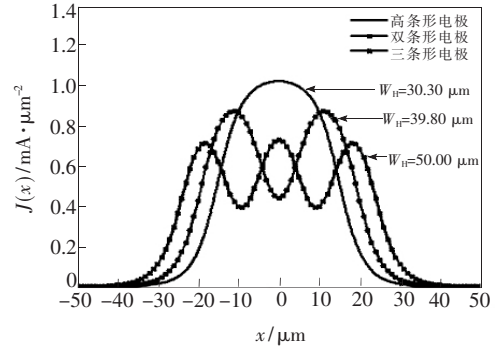


图 8 遮光面积一定时, 三种电极结构下有源区的电流分布。  
Fig. 8 Current density distribution on the active layer with three different structures of top electrode when the light shading area is constant

## 5 结 论

针对微型 LED 阵列, 设计了便于矩阵寻址的电极结构并对其进行了优化, 根据 Markus-Christian Amann 等人提出的理论模型, 利用 MATLAB 对有源层的电流分布进行模拟计算。综合考虑不透明电极的遮光效应等因素, 确定三条形电极结构为最优的电极结构, 当电极的间距为某一合适的值时有源层的电流分布均匀性最好, 且电极宽度越宽, 电流分布越均匀。优化的三条形电极结构的微型 LED 阵列的均匀发光面积比未经优化的单条形电极结构提高了 65.02%, 比双条形电极结构提高了 25.63%。优化后的电极结构明显提高了微型 LED 阵列的发光效率, 改善了 LED 芯片的发光均匀性。

## 参 考 文 献:

- [1] Yan Xiaosong, Li Wanwan, Liu Ji, et al. A single phase white-light-emitting phosphor suitable for UV-LED excitation [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1): 39-43 (in Chinese).
- [2] Tian Chuanjun, Zhang Xiyan, Zou Jun, et al. Temperature effect on the photoelectric parameter of high-power LED illumination system [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1): 96-100 (in Chinese).
- [3] Deng Honggui, Li Zhijian, Guo Shengwei. Method of gray value correction in LED display screen based on LED electroluminescence response [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1): 145-149 (in Chinese).
- [4] Schineller B, Junas Y, Heuken M, et al. Investigation of process technologies for the fabrication of AlGaInP mesa ultra high brightness light emitting diode [J]. *Materials Science and Engineering*, 1998, B51(1): 34-38.
- [5] Zheng Zhibin, Peng Wanhua. Characteristics and reliability of a ultra bright InGaAlP LED [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays* (液晶与显示), 2001, 16(2): 145-149 (in Chinese).
- [6] Liang Jingqiu. Research advances in micro-LED display devices [J]. *OME Information* (光机电信息), 2010, 27(12): 21-27 (in Chinese).
- [7] Zheng Zhibin. Analysis on the luminous characteristics of InGaAlP LEDs [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Dis-*

- plays (液晶与显示), 2003, **18**(6): 450-453 (in Chinese).
- [ 8 ] Jin S X, Li J, Lin J Y, *et al.* InGaN/GaN quantum well interconnected microdisk light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(20): 3236-3238.
- [ 9 ] Geib K M, Choquette K D, Serkland D K, *et al.* Fabrication and performance of two-dimensional matrix addressable arrays of integrated vertical-cavity lasers and resonant cavity photodetectors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron*, 2002, **8**(4): 943-947.
- [10] Meng Qinju, Liu Haibo, Meng Qinhui. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. Beijing: Science Press, 2005: 253 (in Chinese).
- [11] Lin Yueming, Zhang Junbing, Zeng Xianghua. The simulation of AlGaInP LED's light output efficiency [J]. *Chin. J. Luminescence*. (发光学报), 2009, **30**(2): 201-208 (in Chinese).
- [12] Malyutenko V K, Malyutenko O Y, Podoltsev A D, *et al.* Current crowding in InAsSb light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2001, **79**(25): 4228-4230.
- [13] Wang Guohong, Ma Xiaoyu, Wang Shutang, *et al.* Development of AlGaInP orange light emitting diode [J]. *Semiconductor Technology* (半导体技术), 1988, **23**(4): 10-12 (in Chinese)
- [14] Liang Jingqiu, Li Jia, Wang Weibiao. Design and fabrication of AlGaInP LED array [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays* (液晶与显示), 2006, **21**(6): 604-608 (in Chinese).
- [15] Chang S J, Chang C S, Su Y K, *et al.* Chirped GaAs-AlAs distributed bragg reflectors for high brightness yellow-green light-emitting diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Lett.*, 1997, **9**(2): 182-184.
- [16] Amann M C, Kappeler F. Analytical solution for the lateral current distribution in multiple stripe laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(25): 1710-1712.

## Effects of Electrode Structure on The Current Distribution of AlGaInP-LED Array

YIN Yue<sup>1,2</sup>, LIANG Jing-qiu<sup>1</sup>, LIANG Zhong-zhu<sup>1</sup>, WANG Wei-biao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and  
Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** An array of  $320 \times 240$  micro-LED is designed based on AlGaInP epitaxial wafer. The pixel size is  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ . The optical properties of LED array are affected by the current crowding effect, which is a universal problem in LED array. By simulating the active layer current distribution, effects of some factors including electrode structure, width of electrode and distance between electrodes on the current distribution of LED array are studied. The tri-strip electrode is proposed as an optimized structure of the top electrode. Considering some important details such as the light shading effect, the tri-strip electrode is the best electrode shape comparing with one-strip electrode and bi-strip electrode. The optimized electrode leads to the more uniform current spreading. The uniform lighting area of active layer increase 65.02% and 25.63% than that one strip electrode and bi-strip electrode, respectively. The light emission efficiency of the micro-LED array can be improved.

**Key words:** electrode structure; AlGaInP-LED; current distribution; tri-strip electrode

**CLC number:** TN312.8

**PACS:** 85.60.Jb

**PACC:** 7280E; 7865K

**Document code:** A

**DOI:** 10.3788/fgxb20113210.1051

Received date: 2011-06-20