

AlGaInP LED 电极形状的优化^{*}

张俊兵¹⁾ 林岳明²⁾ 柏 林²⁾ 曾祥华^{1)†}

1) 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) 扬州华夏集成光电有限公司, 扬州 225009)

(2008 年 1 月 1 日收到, 2008 年 2 月 21 日收到修改稿)

利用有限元法模拟研究四元 AlGaInP LED 电极形状对电流扩展层 GaP 中电流分布的影响, 通过优化电极形状获得较为均匀分布的电流, 以此提高芯片的出光效率和提升产品品质. 在 MATLAB 计算平台上建立 3D 载流子运输模型及芯片顶面的光出射模型, 比较了传统圆形、十字形、箭形、花形及万字形电极等五种电极形状, 研究发现万字形电极的芯片顶面出光效率最高. 进而对其条形电极的宽度进行进一步优化, 可获得的出光效率为传统圆形电极的 2.7 倍, 能够为实际生产提供一定的理论指导.

关键词: 出光效率, 电极形状, 电流扩展, 有限元法

PACC: 7280E, 7360D, 7865K, 4225B

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, 因而具有广泛的应用市场, 如汽车、背光源、交通灯、大屏幕显示、军事等领域, 并随着其技术的不断发展与成熟, LED 有望成为新型的第四代照明光源^[1,2]. 虽然 LED 的发光效率已经超过日光灯和白炽灯, 但其发光效率还是低于钠灯, 仍不能达到人们想要的程度, 究其原因, 是其效率由内部量子效率和外部量子效率共同决定. 随着半导体技术的高速发展, 内部量子效率能达到 90% 以上; 而外部量子效率的提高并不显著, 受到诸多因素的影响, 例如 LED 的结构、电极的形状、材料的选择、窗口层(电流扩展层)的厚度等等, 成为制约 LED 发光效率提高的主导因素. 而其中电极的形状和 LED 光提取效率的关系尤为突出, 直接决定了 LED 的出光效率. 传统的 LED 电极采用的是不透明的金属材料(如 Au)或金属合金, 当电压加到电极上时, 电流主要集中在电极下方的部分区域, 而电极到有源区的距离是有限的(通常为 7—50 μm), 当电流还没来得及横向扩展多远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^[3,4]. 适当增大窗口层的厚度来提高电流扩展分布的均匀性是必要的, 但考虑到工艺条件和成本, 其厚度又不可能很大, 于是, 怎样改进电极的形状以提高光提取率就变得日益紧迫. 同时, 相对于其他提高 LED 亮度的方法(如表面粗化、衬底剥离、键合、高反射膜等)而言, 对芯片的电极形状进行优化的方法是最值得去研究一下. 因为该方法具有如下的几个方面的特点: 操作简单, 在生产过程中不需要增加特别的工艺步骤; 不需要购买专业设备, 实施容易; 而且, 在生产成本相同的情况下就可以提高产品的性能.

本文先后提到五种形状的电极: 传统圆形、十字形、箭形、花形、万字形电极, 并对不同形状电极的出光效率逐一地进行分析与阐述. 对最为常见的传统圆形电极进行逐步优化后, 获得优化形状各异的四种电极形式, 芯片的出光效率不断地得到不同程度的提高, 最终得到出光效率相对较高的万字形电极, 并对其条形电极进行优化, 以进一步提高芯片的出光效率. 目前, 生产中采用的电极形式主要是传统圆形电极, 少部分公司的高性能产品采用了十字形电极、箭形、花形等形状电极, 但据我们了解并没有看到万字形电极这方面的相关报道. 此外, 相对于 GaN 基 LED 来说, 关于四元 AlGaInP LED 芯片的电

^{*} 江苏省科技项目(批准号: BG2007026)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xhzheng@yzu.edu.cn

极形状优化这方面的文献报道比较缺乏,而相关文献提到的电极形式往往也只是最为常见的圆形电极.为此,结合多年从事在LED业界工程师的工作经验对理论计算模型进行简化,建立LED芯片的电流电压分布和光出射两个主要模型,采用工程软件MATLAB自行编写程序来模拟计算LED芯片中电流的扩展分布情况,研究了上述五种不同形状电极的出光效率,并对出光效率最高的电极进行进一步优化,最终优化得到出光效率较高的电极形状及其参数,为实际生产提供一定的理论指导.

2. 计算模型与方法

四元LED的结构形式多种多样,但其基本结构主要组成为顶部电极、电流扩展层(窗口层)、有源层(如同质结、单异质结、双异质结或多维量子井结构(MQW))、衬底层(有的含有DBR)、底部电极这几个部分组成^[5,6].图1为AlGaInP MQW LED结构示意图,此结构中电流扩展层GaP的厚度在生产中一般为7—20 μm ,是目前生产中主要使用的结构形式.本文芯片采用的具体参数如下^[7]:1) GaP掺杂浓度为 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^{-3}$,空穴迁移率为 $40 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$;2) GaAs掺杂浓度为 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^{-3}$,电子迁移率为 $1300 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$;3) GaP的折射率为3.4,芯片外部环氧树脂的折射率为1.5;4) GaP厚度20 μm ,GaAs厚度为250 μm ;5) 内部量子效率为100%;6) 芯片大小为 $304.8 \mu\text{m} \times 304.8 \mu\text{m}$.



图1 AlGaInP MQW LED 结构

芯片整体呈电中性,满足泊松方程

$$\nabla^2 V = 0. \quad (1)$$

计算采用有限差分法和逐步超松弛迭代法,非电极区的边界条件采用第二类边界条件 $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$.考虑到主要是电流扩展层对电流分布起着决定性影响,所

以,模拟计算时只考虑了电流扩展层GaP层和衬底GaAs层中电压电流分布情况,二者之间的衔接条件为电流密度相等.

电流密度与电场关系为

$$J = qvN = q\mu EN, \quad (2)$$

其中, q 是电荷量, v 是载流子的漂移速度, μ 是电子或空穴的迁移率, E 为电场强度, N 为施主或受主掺杂浓度.主要是考虑到芯片的结构及参数,在电流扩展层中漂移电流起主导作用,相比之下扩散电流完全可以忽略.

同时,根据能量守恒定律,光强正比于电流密度的平方

$$I \propto J^2. \quad (3)$$

光从一介质进入另一种介质会发生折射和反射,只有部分能量能够透射出来,遵循菲涅耳原理:

$$r_s = (\cos i - \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 i}) / (\cos i + \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 i}), \quad (4)$$

$$r_p = (n_{21}^2 \cos i - \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 i}) / (n_{21}^2 \cos i + \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 i}), \quad (5)$$

$$R_s = |r_s|^2, \quad (6)$$

$$R_p = |r_p|^2, \quad (7)$$

$$T_s = 1 - R_s, \quad (8)$$

$$T_p = 1 - R_p, \quad (9)$$

$$T = \frac{1}{2}(T_s + T_p), \quad (10)$$

式中, $n_{21} = n_2/n_1$, r_s , r_p 分别表示S,P光的振幅反射率, i 为入射角, R_s , R_p , T_s , T_p 分别为S光、P光的光强的反射率和透射率, T 为总光强透射率.

光从光密介质进入光疏介质当入射角大于一定角度时会发生全反射,相应地有个临界角,所以,单个发光点能够出射的光成一锥体,如图 $\chi(a)$ 所示.光从有源层出射时需要考虑不同区域光出射不同的情况,图 $\chi(b)$ 为芯片纵切面的光出射分析图.从中图可以看出, AB , $A'B'$ 之间点出射的光被电极部分遮挡; $A'A$ 之间点出射的光被电极完全遮挡; BC , $B'C'$ 之间点出射的光可以全部出射,没有任何遮挡; CD , $C'D'$ 之间的点出射的光同样不能完全出射,主要是受到芯片边界的影响,我们称之为边缘效应.所以,整个有源区可以分为四个部分:被电极完全遮挡的区域、被电极部分遮挡的区域、没有任何遮挡的区域、具有边缘效应的区域,四个部分分别对应于图 $\chi(c)$ 中 A , B (C), D , E 区域^[8-11].

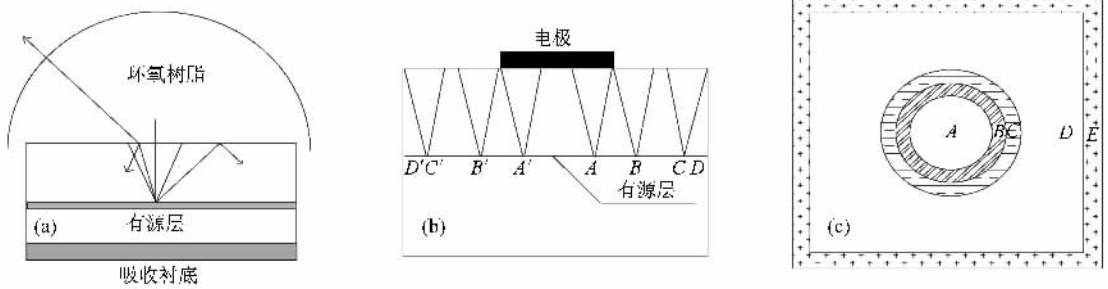


图 2 光在有源层出射分析图 (a)最大临界角;(b)芯片纵切面;(c)芯片横切面

3. 结果与讨论

如果整个芯片在有源层的电流分布是均匀的,且没有任何遮挡,就是考虑到芯片的边缘效应,整个芯片的出光效率(顶面出光效率)与单个点光的出光效率(4.1233%)也几乎是相等的。但实际情况不仅具有电流拥挤效应,同时,还有不透明电极的遮挡,

电流分布并不均匀。所以,优化电极不仅要通过改变电极形状来获得较为均匀分布的电流来提高芯片的出光效率^[8],而且,还要考虑到不透明电极的遮挡作用会降低出光效率,在二者之间进行折中,最终,获得较佳的出光效率。模拟计算的主要参数如下:1)顶端电极电压为 2.2 V,底部电极电压为 0 V;2)电极形状的中间圆形电极的直径为 100 μm(业界固定值),其周围的条形电极的宽度为 24.8816 μm;3)

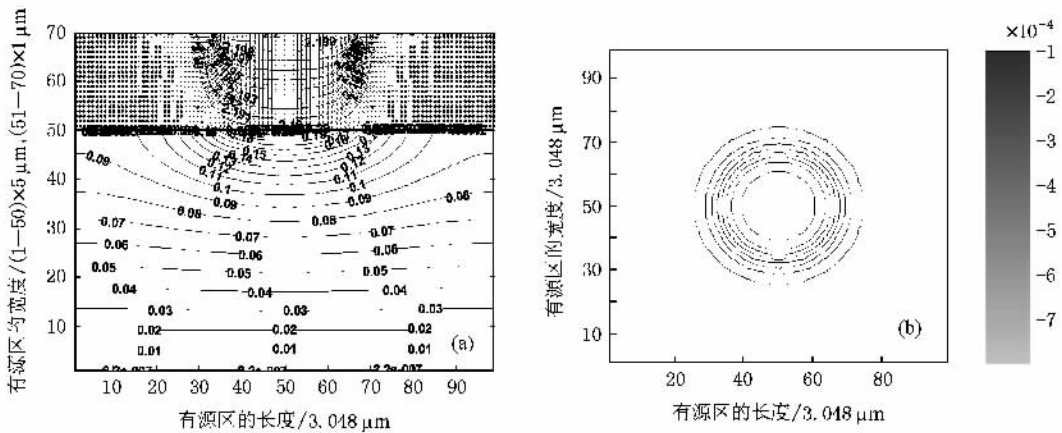


图 3 圆形电极下电流及电压的分布图 (a)纵切面的电流及电压;(b)横切面的电流

芯片的网格划分,GaP 厚度为 20 格,GaAs 厚度为 50 格,芯片的长度和宽度都为 100 格,即整个芯片划分为 70 × 100 × 100。

经模拟计算得到圆形电极芯片电流及电压的分布情况,其纵切面的电流及电压的分布如图 3(a),而电流在横切面有源层顶层的分布如图 3(b);在此基础上进一步计算出该种电极形状芯片的出光效率为 0.7951%,仅是单个点光源的出光效率 4.1233% 的 19.28%,出光效率比较低。从图 3(a)可以看出电压的分布和电流的扩展趋势,电流主要集中在电极正下方的有源区部分区域,即所谓的电流拥挤效应,横向扩展比较小,电流分布很不均匀。同

时,在此区域电流密度最大,自然发光强度最大,但此区域出射的光绝大部分会被正上方的不透明电极所遮挡,所以,出光效率比较低。图 3(b)为有源层顶层的电流密度等位线图(图中所表示的电流数值是相对值),从中可以看出有源区顶层中靠近电极投影区的那部分的电压梯度变化很快,即电流密度变化很快,而在边缘区域基本上没有太大的变化;同时,电流等位线都是呈圆环状分布,形象地展示了圆形电极电流的扩展分布情况。

从图 3(b)可以看出在有源层顶层的四个直角区的电流比较小,自然这些区域的光线也比较暗,为了克服该缺点,在传统圆形电极的基础上添加向芯

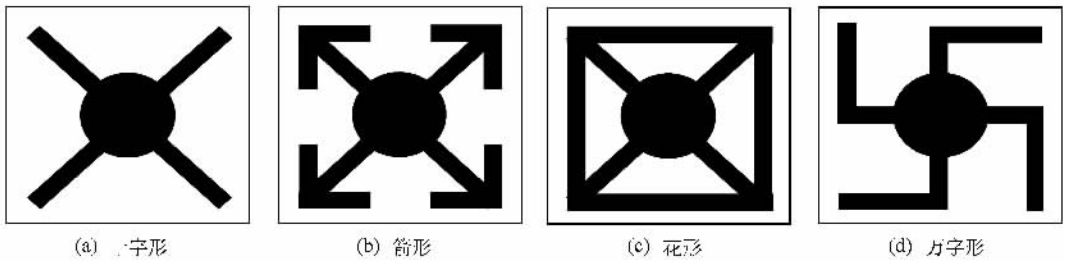


图4 优化后的各种电极形状 (a)十字形;(b)箭形;(c)花形;(d)万字形

片四直角区延伸条形电极(长度为 $109.9457 \mu\text{m}$)称之为十字形电极,其顶视图如图4(a).经模拟计算得到该形状电极的有源层顶层电流密度分布如图5(a),其出光效率为 1.1499% ,比传统圆形电极的出光效率 0.7951% 提高了 44.62% .效率提高的主要原因:一方面,该形状电极可以使得电流较好地扩展到芯片的四个直角区,比传统圆形电极的电流分布要更为均匀;另一方面,电流均匀分布增加的出光量超过了电极面积增加引起的减少量.

虽然十字形电极的出光效率比传统圆形电极有了很大程度上的提高,但从图5(a)可以看出在靠近芯片的边缘区域的电流仍然比较小,电流分布还不够均匀,所以在十字形电极的条形电极的两侧沿芯

片边缘方向各加一条形电极(长度为 $83.9755 \mu\text{m}$),称之为箭形电极,其顶视图及有源层顶层电流密度分布情况分别如图4(b)和图5(b)所示.该形状电极芯片的出光效率为 1.3942% ,比十字形电极的出光效率 1.1499% 提高了 21.25% ,比传统圆形电极的出光效率 0.7951% 提高了 75.35% .

由前面可知,箭形电极的出光效率比十字形电极又上升了一步,主要还是由于电流分布更为均匀的贡献.从图5(b)可以看出在芯片边缘区域的两个条形电极之间的电流还是比较小的,为此将边缘区域的两个条形电极直接连接起来,该电极称之为花形电极,其顶视图如图4(c).同时,芯片边缘与中心圆形电极之间的电流也可获得更为均匀的

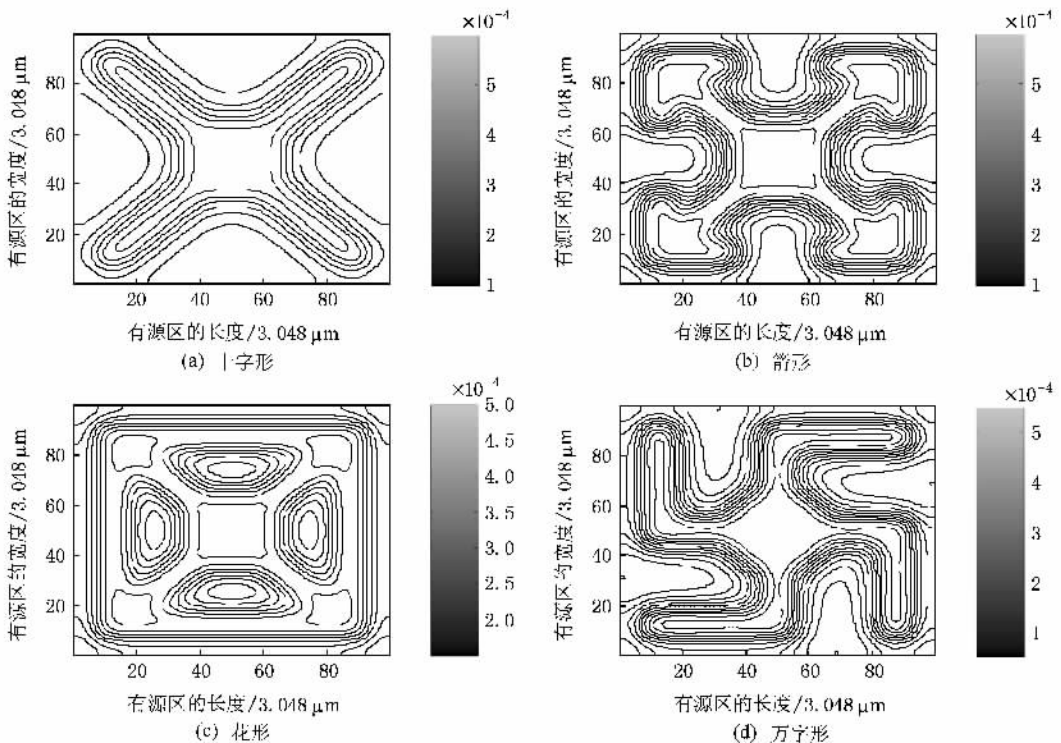


图5 各种优化电极下有源层顶层电流密度等位线图

扩展,使得整个芯片的电流分布更为均匀,其有源层顶层电流密度分布如图 5(c)所示.该电极形状芯片的出光效率为 1.4398%,比箭形电极 1.3942% 提高了 3.27%,比传统圆形的出光效率 0.7951% 提高了 81.08%,出光效率在箭形电极基础上又得到了一定的提高.

比较前面优化的三种形状电极,花形电极的出光效率最高,但其电极面积也最大,被电极遮挡光量也是最多的.要获得更高的出光效率不仅要求整个电极的面积比花形电极的小,而且,又能够使得电流分布相对均匀,由此,我们想到了万字形电极(横向、纵向条形电极长度分别为 $127.5184 \mu\text{m}$, $77.7551 \mu\text{m}$),其顶视图和有源层顶层电流密度分布情况分别如图 4(d)、图 5(d)所示.经计算其出光效率为 1.4956%,又比花形电极 1.4398% 提高了 3.88%,比传统圆形电极 0.7951% 提高了 88.1%,所以说,万字形电极是前面五种形状电极中出光效率最高的.

考虑到电极面积的大小直接影响到遮光量的多少,进而影响到整体的出光效率,所以,我们进一步研究条形电极宽度对万字形电极出光效率的影响,以便确定一较佳宽度以获得更高的出光效率.图 6 为不同条形电极宽度下万字形电极的出光效率,从中可以看出万字形电极出光效率最高点在条形电极宽度为 $6.2204 \mu\text{m}$ 左右,达到了 2.1177%.

4. 结 论

本文利用有限元方法模拟来研究四元 AlGaInP LED 电极形状对电流扩展层 GaP 中的电流分布以及

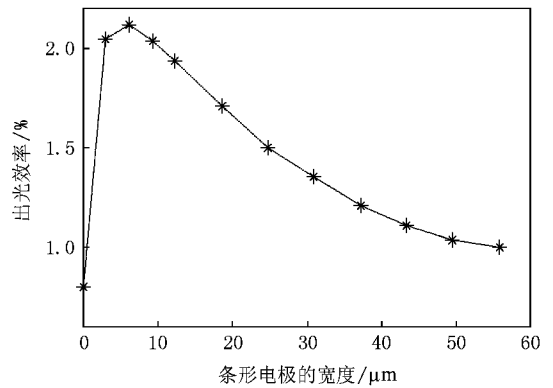


图 6 不同条形电极宽度下万字形电极的出光效率

芯片的出光效率的影响.在同等条件下,对照传统圆形电极、十字形电极、箭形电极、花形电极及万字形电极等五种电极形状,发现万字形电极的电流扩展最为均匀,其出光效率最高.由于电极面积的大小直接影响到遮光量的多少,影响到整体的出光效率,所以,我们进一步研究了万字形电极的条形电极宽度与芯片出光效率的关系.优化结果表明出光效率最高时的条形电极宽度为 $6.2204 \mu\text{m}$ 左右,其出光效率可达到了 2.2117%,是传统圆形电极出光效率 0.7951% 的 2.6634 倍,提高了近 1.7 倍.由此可见,不仅电极的形状对出光效率有影响,而且其条形电极的宽度也会影响光的输出,因此,优化电极可以在一定程度上提高芯片的出光效率.本文所建立的模型与实际还有一定差别,只能给出定性结果,实际情况需要通过工艺流片进行验证,这一工作正在进行之中.

- [1] Tsao J Y 2002 *Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination* (New York: OIDA) p2
- [2] Streubel K, Linder N, Wirth R, Jaeger A 2002 *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* **8** 321
- [3] Guo X, Schubea E Y 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 4191
- [4] Malyutenko V K, Malyutenko O Y, Podoltsev A D, Kucheryavaya I N 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 4228
- [5] Sugawara H, Ishikawa M, Hatakoshi G 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 1010
- [6] Chang S J, Chang C S, Su Y K, Chang P T, Wu Y R, Huang K H, Chen T P 1997 *IEEE Proceedings-Optoelectronics* **144** 405
- [7] Chi G C, Su Y K, Jou M J, Hung W C 1994 *J. Appl. Phys.* **76**

2603

- [8] Zhang J M, Zou D S, Xu C, Gu X L, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6003 (in Chinese) [张剑铭、邹德恕、徐晨、顾晓玲、沈光地 2007 物理学报 **56** 6003]
- [9] Deng Y L, Liao C J, Liu S H, Fan G H, Wen S S 2002 *Chinese Journal of Luminescence* **23** 254 (in Chinese) [邓云龙、廖常俊、刘颂豪、范广涵、文尚胜 2002 发光学报 **23** 254]
- [10] Vanderwater D A, Tan I H, Höfler G E, Kish F A 1997 *Proceedings of the IEEE* **85** 1753
- [11] Wiesloch G J, Heilbronn G K 1997 *United States Patent No.* 5698865

Optimization of the electrode shape of AlGaInP LED^{*}

Zhang Jun-Bing¹⁾ Lin Yue-Ming²⁾ Bo Lin²⁾ Zeng Xiang-Hua^{1)†}

1)(*College of Physics & Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*)

2)(*Yangzhou Huaxia Integrated OE System Co., Ltd., Yangzhou 225009, China*)

(Received 1 January 2008 ; revised manuscript received 21 February 2008)

Abstract

The distribution of current diffusion of the quaternary AlGaInP LED has been simulated by finite element method to study the effect of electrode shape on the current spreading layer GaP. By comparing traditional circular-shape with cross-shape, arrow-shape, floriated-shape and gammadion-shape electrodes, we found that the electrode shape has an important effect on the output efficiency of light, and the light extraction efficiency of gammadion electrode is the highest. As the area of the whole electrode has an effect on the output efficiency, by optimizing the width of the electrode, the light extraction efficiency will be upgraded. For the gammadion electrode, when the width equals to $6.2204 \mu\text{m}$, its light extraction efficiency is the highest, which is more than twice that of the traditional round electrode's.

Keywords : output efficiency of light, electrode shape, current spreading, finite element method

PACC : 7280E, 7360D, 7865K, 4225B

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No :BG2007026).

[†] Corresponding author. E-mail : xhzeng@yzu.edu.cn