

图形衬底参数对 LED 发光效率的影响

黄鸿勇¹ 郭志友¹ 叶国光² 梁伏波²

(¹ 华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广东 广州 530631)
(² 广东银雨芯片半导体有限公司, 广东 江门 529020)

摘要 以蓝宝石(Al_2O_3)为衬底材料,通过软件设计和模拟,研究了图形衬底(PS)的图案选择、图形原胞尺寸和图形原胞间距大小 3 个参数对 LED 出光效率的影响。研究表明,原胞半径为 $1.25\ \mu\text{m}$,原胞间距为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的半球型结构是最优化的图形衬底结构;并且采用湿法刻蚀技术,制备了该结构的 LED 芯片,测试得到该种 LED 芯片出光效率较之普通 LED 芯片提高了 33%。分析了 PS 技术改善 LED 出光效率的根源在于改善了芯片质量,提高了芯片的内量子效率。

关键词 薄膜;LED;图形衬底;发光效率;原胞;半球型结构

中图分类号 TS102.54 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.s100416

Influence of Patterned Substrate Parameters on Luminous Efficiency of LED

Huang Hongyong¹ Guo Zhiyou¹ Ye Guoguang² Liang Fubo²

(¹ Institute of Opto-Electronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 530631, China
² Neo-Semiconductor Photonics Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong 529020, China)

Abstract Using sapphire (Al_2O_3) as the substrate, the influence of the parameters of patterned substrate (PS) such as pattern choice, radius and gap of primitive cell on LED efficiency is studied by software design and simulation. The results indicate that the patterned substrate structure — a hemisphere structure whose radius and gap are $1.25\ \mu\text{m}$ and $0.5\ \mu\text{m}$ respectively is the optimal structure. Then the LED of this kind of structure is gotten by means of wet etching, and its efficiency increases by 33% compared with normal LED. The reason why the PS technology can increase LED efficiency is analysed, which is that it can improve the chip quality and increase internal quantum efficiency.

Key words thin films; LED; patterned substrate; luminous efficiency; primitive cell; hemisphere structure

OCIS codes 310.0310; 310.6870; 220.4610

1 引 言

GaN 基 LED 的内量子效率已经达到 $70\% \sim 80\%$ ^[1],但是外量子效率却还是很不理想。LED 研发人员采用各种方式来增加外量子效率,比如倒装芯片,倒金字塔结构,镀膜以及表面粗化^[2~5],但是外量子效率增加还不是很让人满意。近期图形衬底(PS)技术问世以后,赢得许多 LED 研究人员的研究热情,

并得到了可喜的发展^[6]。

PS 技术可以提高 LED 的出光效率,但其提高效率的原因尚不清楚。有人认为是 PS 结构使得应力释放,导致介电电场减弱,提升了芯片的内量子效率^[7];也有人认为是 PS 技术提高了外量子效率,因为图形衬底的微图形阵列使得反射光线在衬底底面更容易漫反射^[8]。

收稿日期: 2011-03-02; 收到修改稿日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(60877069)和广东省科技攻关项目资助课题。

作者简介: 黄鸿勇(1985—),男,硕士研究生,主要从事发光材料及器件等方面的研究。E-mail: hhy_2635102@163.com

导师简介: 郭志友(1959—),男,教授级工程师,主要从事光电器件及其应用等方面的研究。E-mail: guozy@scnu.edu.cn

(通信联系人)

本文从图形衬底的图形研究着手,研究可制成的一般图像对 LED 出光效率的影响,选取了效率最高的半球型结构;再对原胞的尺寸和原胞的间距大小对 LED 出光效率的影响进行了研究,得到最优化的该结构原胞;最后还根据所得研究结果制成了大功率 LED 芯片,和普通芯片结构的 LED 芯片对比,本文研制的 LED 芯片的出光效率相对提高 33%。

2 图形衬底原胞结构设计

经过设计图形衬底结构,LED 的芯片结构如图 1 所示,与一般芯片不同在于蓝宝石衬底是采用有固定形状、大小和间距的图形阵列组成。

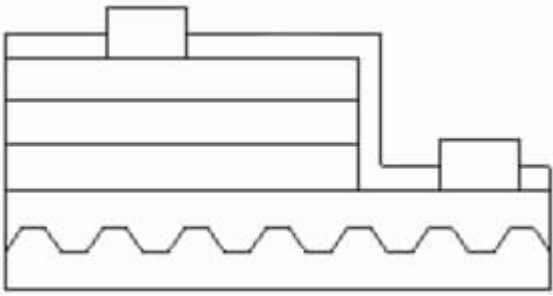


图 1 图形衬底型 LED 芯片结构

Fig. 1 Structure of patterned substrate LED chip

2.1 类型设计

根据软件和电脑性能的要求,设定衬底的尺寸为 $0.0425\text{ mm} \times 0.0425\text{ mm}$,厚度为 0.04 mm ;芯片的尺寸为 $0.0425\text{ mm} \times 0.0425\text{ mm}$,厚度为 0.01 mm ;并设计一尺寸相同的普通 LED 作对比。以下是设计出来的 5 种图形衬底原胞模型:1)圆锥型 LED 设计:圆锥形的半径为 $1.25\text{ }\mu\text{m}$,原胞间距 $2.5\text{ }\mu\text{m}$,角度为 40° [9]。2)半球型 LED 设计:半球半径为 $1.25\text{ }\mu\text{m}$ 。3)圆柱型 LED 设计:圆柱半径为 $1.25\text{ }\mu\text{m}$,高度为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 。4)子弹头型 LED 设计:子弹的半径为 $1.25\text{ }\mu\text{m}$,高度 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。5)形台型 LED 设计:底面半径为 $1.25\text{ }\mu\text{m}$,顶面半径为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,角度也为 40° 。

2.2 材料参数设定

衬底材料采用 Al_2O_3 (折射率为 1.62)^[10],芯片材料采用 GaN (折射率为 2.3)^[11]。芯片出光光线设定为 $0.5462\text{ }\mu\text{m}$ 波长的蓝光,此为软件的默认波长。接收面尺寸设定为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,厚度为 0.01 mm ,距离衬底与芯片的界面为 1 mm ,基本实现无限大的接收效果。但值得注意的是,研究中没有设定衬底以下装置和芯片以上部件,所以出光时相当部分光线从上部意外的部位出射,所以出光效率只是上部接收板接收得到,相比之下是小很多的。

然而考虑到研究目的,对此可以忽略,因为整个研究都是在此基础上对比研究分析的。

2.3 性能研究

主要通过软件的光线追踪,模拟出各类型 LED 的配光曲线和光效等性能参数。考虑到电脑对软件的支持能力和除普通型 LED 的光源面的因素,初步设定芯片的表面光源总光能量为 1.71 W ,场角分布为 Lambertian 发光场型。经研究得到不同形状的图形原胞结构对应的出光效率如表 1 所示。

表 1 不同图形原胞的出光效率

Table 1 Luminous efficacies of LED with different primitive cells

Kind of LED	Luminous efficacies /%
Normal LED	44.750
Conical LED	39.454
Hemisphere LED	42.565
Cylinder LED	34.930
J-cam LED	42.868
Trapezoid LED	37.682

2.4 分析与小结

从表 1 可以清楚的看出各种 LED 的出光效率,带有图形衬底的 LED 中,子弹头型 LED 和半球型 LED 的出光效率明显高于其他型图形衬底的 LED 的出光效率。这一点可以从它们原胞结构对光线的折射和反射分析,由于这两种结构的光线在 LED 芯片内部形成的光程远远比其他 3 种图形衬底结构的 LED 形成的光程少,减少了光线在芯片内部的吸收,使光线尽可能的出射到芯片外部,获得高的提取效率。另外出光效率最高的竟然是没有图像沉底的普通 LED,同样是因为平面反射减少了光线在芯片内部的光程,进而减少了光的损耗。由此可以判定图形衬底对 LED 的外量子效率是减小的。同时可以选取出光效率高的两种 LED 作进一步研究。

3 原胞大小研究与设计

考虑到两种 LED 出光效率相当,为了研究的方便,在此选取半球型的图形衬底原胞做进一步研究。结合现今半导体制备技术的最小物理尺寸,在原胞间距不改变的情况下设计原胞半径在 $0.5 \sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 之间,每隔 $0.25\text{ }\mu\text{m}$ 设计一个原胞。

软件模拟数据分析如图 2 所示,当原胞半径在 $1.25\text{ }\mu\text{m}$ 时,LED 的出光效率最高,为 42.565% 。

4 原胞间隔研究与设计

对上面选定的原胞作进一步研究,同样结合现

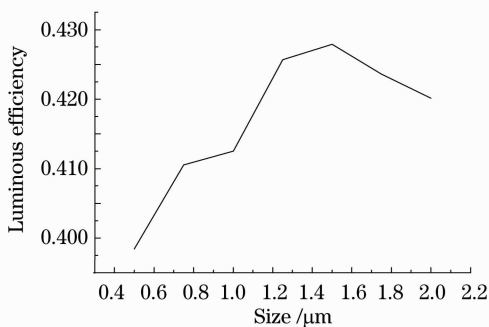


图2 原胞半径大小与 LED 出光效率的关系

Fig. 2 Relation between the cell radius and the luminous efficacies

今半导体制备技术的最小物理尺寸,在原胞大小不改变的情况下设计原胞间距在 $0.5 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 之间,每隔 $1 \mu\text{m}$ 设计一个原胞间距。

软件模拟数据分析如图 3 所示,原胞间距在 $0.5 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 时,LED 的出光效率呈递减趋势,间距为 $0.5 \mu\text{m}$ 时,其出光效率最高,其值为 43.154% 。

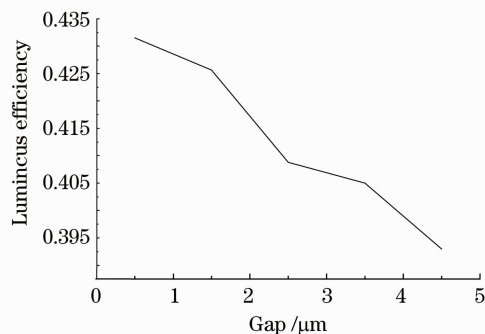


图3 原胞间距大小与 LED 出光效率的关系

Fig. 3 Relation diagram between the cell gap and the luminous efficacies

5 PS 提高 LED 效率根源研究

实验所选用的衬底是蓝宝石衬底,在生长之前,使用普通光刻,二元光学器件(BOE)和高温热酸浸泡的湿法腐蚀相结合的方式。普通光刻的光刻板的制作通过电子束曝光完成,设计模型如下:半球型原胞直径 $D_0 = 2.5 \mu\text{m}$,原胞间距 $d_0 = 500 \text{ nm}$ 。如图 4 所示,实际制成图像衬底的原胞直径 $D_1 = (2.38 \pm 2) \mu\text{m}$,原胞间距 $d_1 = (600 \pm 150) \text{ nm}$ 。因为湿法刻蚀时间控制的原因使得设计和实际的出现误差,此误差均在研究过程中可忽略。经过测试,可以得到此次设计研究的带有半球型图像衬底的 LED 相比同条件下普通 LED 的光强分布示意图如图 5 所示。可以得到半球型 LED 的出光效率比普通 LED 的出光效率相对提高 33% 。

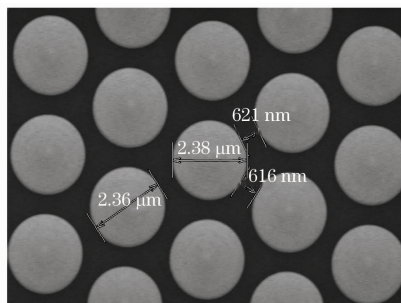


图4 图形衬底制备实物扫描示意图

Fig. 4 Scanned diagram of prepared object of patterned substrate

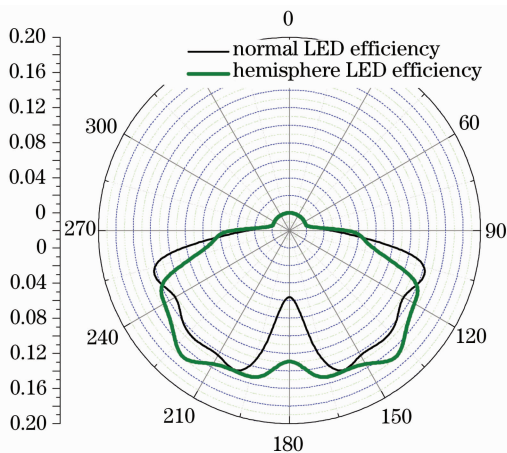


图5 PS 型 LED 和普通 LED 光强分布示意图

Fig. 5 Polar light intensity distribution plots of PS-LED and normal LED

如图 6 所示,可以看出图形衬底有利于芯片的生长,减少芯片应力,促使介电电场的减弱,提高芯片的生长质量。由此可见,图形衬底型 LED 在实际制作测试中出光效率高于普通 LED,结合上面的软件模拟和分析可以判定图形衬底对 LED 的量子效率的提高是在于提高其内量子效率。

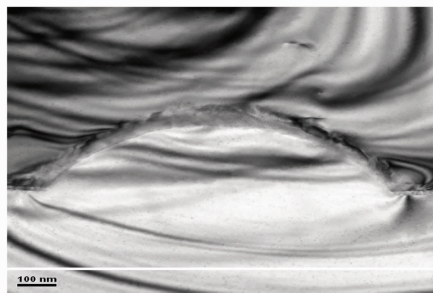


图6 芯片的衬底周边局部实物图

Fig. 6 Surrounding of the object of patterned substrate

6 结 论

本文利用蓝宝石衬底制备图形衬底,图形衬底

的原胞形状、大小和间距 3 个因素为研究突破口,研制出半球型、半径为 $1.25 \mu\text{m}$ 、间距为 $0.5 \mu\text{m}$ 的图形衬底原胞。并通过湿法刻蚀工艺制备该参数下的 LED 芯片,经过对比,该结构的 LED 芯片比相同条件下普通 LED 芯片的出光效率高 33%。由软件模拟和实验制备的结果作对比分析出 PS 技术提高出光效率的根源在于减少位错密度,改善了芯片生长质量,提高了 LED 芯片的内量子效率。

参 考 文 献

- 1 N. Sharma, P. Thomas, D. Tricker *et al.*. Chemical mapping and formation of V-defects in InGaN multiple quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(9): 1274~1276
- 2 Liu Zhiqiang, Wang Liangchen, Ying Xiaoyan *et al.*. Surface roughening with sapphire microlens arrays in flip-chip GaN-based LEDs[J]. *Chin. J. Semicond.*, 2007, **28**(s1): 496~502
刘志强, 王良臣, 伊晓燕等. 倒装 GaN 基发光二极管阵列微透镜的粗化技术[J]. *半导体学报*, 2007, **28**(s1): 496~502
- 3 M. R. Krames, M. Ochiai-Holcomb, G. E. Hoffer *et al.*. High-power truncated-pyramid AlxGa1-x0.5In0.5PyGaP light-emitting diodes exhibiting 50% external quantum efficiency[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**: 2365~2367
- 4 S. H. Tu, C. J. Lan, S. H. Wang *et al.*. InGaN gallium nitride light-emitting diodes with reflective electrode pads and textured gallium-doped ZnO contact layer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**: 133504~133506
- 5 P. Muhlshlegel. Resonant optical antennas[J]. *Science*, 2005, **308**(5728): 1607~1609
- 6 Suthan Kissinger, Seong-Muk Jeong, Seok-Hyo Yun *et al.*. Enhancement in emission angle of the blue LED chip fabricated on lens patterned sapphire (0 0 0 1)[J]. *Solid-State Electronics*, 2010, **54**(5): 509~515
- 7 Y. S. Choi, S. J. Kim. Sapphire substrate-transferred nitride-based light-emitting diode fabricated by sapphire wet etching technique [J]. *Solid-State Electronics*, 2006, **50** (9-10): 1522~1528
- 8 Jiang Yang, Luo Yi, Wang Lai *et al.*. Influence of pillar- and hole-patterned sapphire substrates on MOVPE grown GaN bulk and LED structures [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58** (5): 3468~3473
江 洋, 罗 毅, 汪 莱等. 柱状与孔状图形衬底对 MOVPE 生长 GaN 体材料及 LED 器件的影响[J]. *物理学报*, 2009, **58**(5): 3468~3473
- 9 Hongyong Huang, Zhiyou Guo, Jurgen Ye *et al.*. Using anti-membrane and TIP to improve power LEDs quantum efficiency [C]. Guangzhou: IEEE Conferences Advance in Optoelectronics and Micro/Nano Optics 2010, 2010
- 10 W. K. Wang, D. S. Wu, S. H. Lin *et al.*. Efficiency improvement of near-ultraviolet InGaN LEDs using patterned sapphire sub-strates [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2005, **41**(11): 41~46
- 11 W. K. Wang, D. S. Wu, S. H. Lin *et al.*. Growth and characterization of InGaN-based light-emitting diodes on patterned sapphire substrates[J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2008, **69**(2-3): 714~718