

文章编号: 1007-2780(2013)05-0726-06

AlGaInP-LED 微阵列单元侧反射对出光效率的影响

包兴臻^{1,2}, 梁静秋¹, 梁中翥¹, 田 超^{1,2}, 秦余欣¹, 王维彪^{1*}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: LED 微阵列器件具有体积小、分辨率高、寿命长及耗能低等突出特点。出光效率是该器件的一项重要参数, 文中对以 AlGaInP 外延片为基片的 LED 微阵列器件的出光效率进行了理论及实验研究。器件的像素周期设计为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, 发光单元间的上隔离沟槽宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 、深度为 $25\ \mu\text{m}$, 将在 $600 \sim 650\ \text{nm}$ 波段具有高反射率的均匀掺单晶硅纳米颗粒的聚酰亚胺作为复合材料来填充上隔离沟槽, 将侧面出射的光反射到上表面, 实现了相邻两个发光单元之间的光学和电学隔离。分析计算表明, 通过填充硅纳米颗粒/聚酰亚胺复合膜材料, 使每个发光单元侧面出射光的 16.695% 反射回窗口层, 提高了出光效率。这项研究将有助于提高 LED 微阵列器件的出光效率。

关 键 词: 聚酰亚胺复合膜; 出光效率; 反射率; 微阵列

中图分类号: TN312⁺.8

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132805.0726

Effect of AlGaInP-LED Arrays Units Side-Reflection on Light Output Efficiency

BAO Xing-zhen^{1,2}, LIANG Jing-qiu¹, LIANG Zhong-zhu¹,

TIAN Chao^{1,2}, QING Yu-xin¹, WANG Wei-biao^{1*}

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: LED micro-arrays apparatus has many outstanding characteristics, such as small bulk, high resolving power, long life, low wear out power and so on. Lighting output efficiency is an important parameter. The text made theoretic and experiment study for LED micro-arrays apparatus on AlGaInP wafer. The arrays apparatus image sizes is $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$. Etching upper isolating groove with the deep width ratio was $25\ \mu\text{m} : 20\ \mu\text{m}$ between adjacent light-emitting unit. Then filling the groove with mixed Si granule that has high reflect to $600 \sim 650\ \text{nm}$ wave band into polyurethane. This hybrid materials can reflect lateral light to above surface, not only improve light efficiency of micro arrays apparatus, but also realize light and electric seclusion of two adjacent light-emitting unit. Theoretical calculation indicate that the multiple film can reflect each light-emitting unit the light of side-wall 16.695% to window layer, it improves lighting output efficiency availably. The study administers to the improvement of lighting output efficiency for LED micro-arrays apparatus.

Key words: polyimide composite film; light output efficiency; reflectivity; micro-arrays

收稿日期: 2013-04-22; 修订日期: 2013-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61274122); 吉林省科技发展项目(No. 20100351, 20120323)

作者简介: 包兴臻(1987—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事微型 LED 阵列器件的制作研究。

通信联系人, E-mail: wangwbwt@126.com

1 引言

LED以其发光效率高、耗电量小、寿命长、发热低、体积小、环保节能等诸多优点,已被广泛应用于全彩屏显示、状态指示、标志照明、信号显示、液晶显示器的背光源和汽车尾灯及车内照明等领域^[1]。随着科技的发展和社会的进步,LED在已有应用领域的需求不断增长,同时新技术的使用也使得LED有了更大的发展空间。

LED微阵列器件作为一种新型显示和照明器件,在通信、军事、卫星定位、情报系统、掌中电脑、野外作业、刑事、消防、医疗、个人信息系统、仪器仪表、航空航天及娱乐等领域有着十分广泛的应用,国际上许多研究团队已经对其进行了研究和开发。1998年德国亚琛工业大学采用湿法腐蚀方法在AlGaInP发光芯片上进行了发光二极管阵列的初步研究制作^[2]。2001年,美国堪萨斯州立大学的研究小组研制出具有InGaIn/GaN量子阱结构、像素直径为12 μm 的 10×10 蓝色LED阵列^[3]。2004年,英国斯特拉思克莱德大学的研究团队用干法刻蚀技术制作出 128×96 蓝色GaN-LED微显示器^[4]。

近几年,LED微阵列器件的研究发展更加迅速,人们已经验证了其作为微显示器件及通讯网络中的光开关的可行性^[5-6]。2008年,英国帝国大学V Poher等人研制了紫外、蓝色和绿色3种 64×64 微型LED阵列,用于二维神经细胞的刺激模拟^[7]。2009年,美国陆军研究实验室的Narresh Das等人制作了 64×64 的中波红外LED阵列,并成功将其与像素数相同的Si-COMS驱动阵列集成^[8]。2010年,英国帝国大学的研究小组将LED阵列应用于神经网络的模拟刺激实验。

近几年国内也已经开展了LED阵列器件的研究,并将其运用于照明、显示等行业,但与国外LED阵列显示器件相比,技术还不够成熟,制作的器件效果有一定差距。更倾向于大屏显示制作,微型制作相对较少。传统的制作LED微阵列器件的方法是将多个单管LED芯片排列在基座上,然后引线、封装。本课题组进行了以AlGaInP外延片为基片的集成LED微阵列器件的设计及以MOEMS技术为基础的集成制作工艺研究^[9-10],与传统工艺相比,提高了器件的一致性和制作效率,更适用于批量制作。

在研究中我们发现,为实现光学和电学隔离所进行的隔离沟槽填充会增加发光单元的侧面出光,从而影响器件发光效率。本文在前期研究的基础上,对像素阵列周期为 100×100 的集成LED微阵列器件发光单元侧面出光情况进行了分析,并对抑制侧面出光的方法进行了研究。

2 AlGaInP-LED微阵列器件设计

AlGaInP四元系材料是制作高亮度LED的理想材料,与GaAs衬底晶格的匹配度很高,具有很宽的直接禁带(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^[11]。

如图1所示,外延片结构从上至下分别为p-GaP、p-i-n AlGaInP、DBR和GaAs层。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;二是用来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,该层的厚度是6~12 μm 。p-i-n AlGaInP是该LED外延片的核心结构。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,用来约束少数载流子并提高LED的量子效率^[12]。DBR(分布式布拉格反射光栅)是由交替的高低反射率材料制成,各层光学厚度为发光波长的 $1/4$ ^[13]。引入DBR层是为了将射向衬底的光反射到上表面,减少衬底吸收,提高器件出光效率。最底层是衬底层,材料是(100)晶面偏向(011)的n-GaAs。

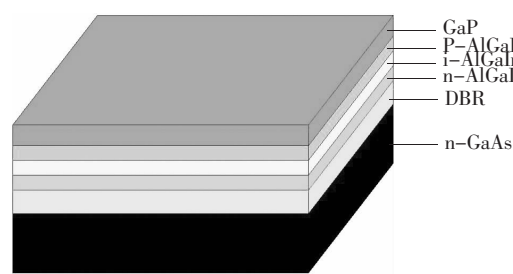


图1 AlGaInP-LED外延片结构

Fig. 1 Structure of AlGaInP-LED chip

用此外延片设计制作像素尺寸为 320×240 的集成LED微阵列器件,阵列周期及发光单元的尺寸如图2所示。

图2中,发光单元的面积 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$,沟槽的宽度为 $20 \mu\text{m}$ 。外延片最上层p-GaP层与p-i-n AlGaInP有源层的厚度之和在8~12 μm 之

间,取厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 来研究侧面的发光问题,因此发光单元侧面光线可以出射的面积为 $80\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 。每个发光单元有 4 个侧面,则侧面光线出射的总面积为 $4 \times 80\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 。而发光单元正面光出射的面积为 $80\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$,发光单元侧面光出射的面积为正面出光面积的 50%。

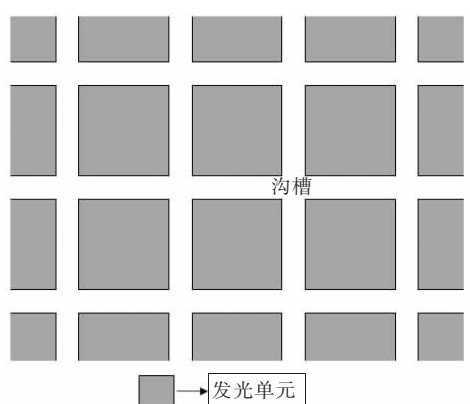


图 2 发光单元及隔离沟槽尺寸

Fig. 2 Isolated groove sizes of luminescence cell

为方便电极的制作及实现发光单元之间的光学和电学隔离,需要对隔离沟槽进行填充。可以选取不透明的绝缘介质来填充沟槽,但会使侧面出射的大部分光被吸收。虽然阻止了侧面发光对信号的干扰,但却大大降低了发光单元的出光效率。因此,需要对沟槽填充材料进行研究。

3 AlGaInP-LED 微阵列器件出光效率的理论计算

光从一种介质进入另一种介质发生折射和反射都遵从菲涅尔原理。光在从光密介质入射到光疏介质时,会发生全反射,发生全反射的临界角为 $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ 。式中 n_2 为光疏介质折射率, n_1 为光密

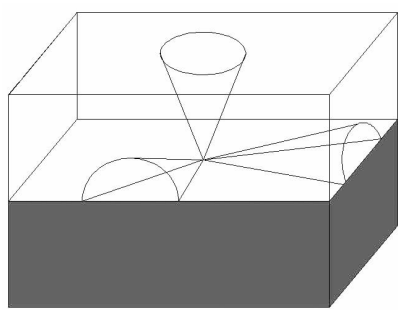


图 3 发光点在侧面和顶面的出射状况

Fig. 3 Light transmit distributing of luminescence cell on side and top face

介质折射率。有源层的光线出射如图 3 所示^[14]。

如图 3,有源层任何一点发出的光在到达顶面或侧面时均呈一圆锥状,在锥状之内光束都能从界面出射,在锥状之外的光线由于发生全反射,重新被反射回窗口层。发生全反射的光一部分直接到达 DBR 层,另一部分到达侧壁。我们希望到达侧壁的光全部被反射到窗口层出射,以便提高发光单元的光输出效率。下面进行简单的定量分析。

P-GaP 窗口层的折射率为 3.4。在填充沟槽之前,光线从窗口层进入空气层时发生全反射 $\sin\theta_c = \frac{1}{n_1} = \frac{1}{3.4} = 0.294$,因此临界角 $\theta_c \approx 18^\circ$ 。由有源层任何一点出射而到达每个侧面的光都会发生反射和透射,发光单元内部的光线错综复杂,到达侧面的光斑面积最大为 $S_1 = \frac{\pi (x \tan\theta_c)^2}{2}$ ($0 \leq x \leq 80$) 式中, x 为发光点到侧面的距离。

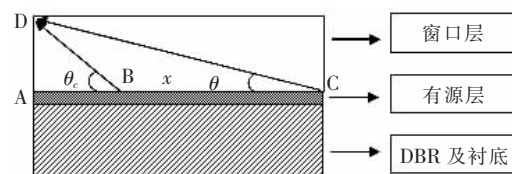


图 4 竖直横切面内光线的出射分析

Fig. 4 Light transmit analysis in cross section

为便于分析,我们在此简化模型,研究一个横切面内光线的传播路径。以从有源层 AC 发出,到达左侧面 AD 的光线为研究对象,如图 4 所示。分析得到,从有源层的 BC 段任何一点发出的光到达左侧面,其入射角均小于临界角,因此不能发生全反射;而由 AB 段发出的光则部分发生全反射,部分透射到隔离沟槽中。计算得到 $AB = 30.769$,在三角形 ACD 中,能够发生全反射的光线面积只占 $3/8$,其他 3 个侧面亦如此,由于临界角是一定的,因此我们提出通过在沟槽内填充对该波段具有高反射率的介质来提高出光效率。

4 沟槽填充材料的选取

本器件制作的上隔离沟槽的宽度和深度分别为 $20\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$,在选择沟槽填充材料时除考虑其电学、光学特性外,还需对材料的成型工艺及力学特性加以分析,聚酰亚胺 (PI) 以其耐高温、长期使用温度范围宽、无明显熔点、高绝缘性能、介

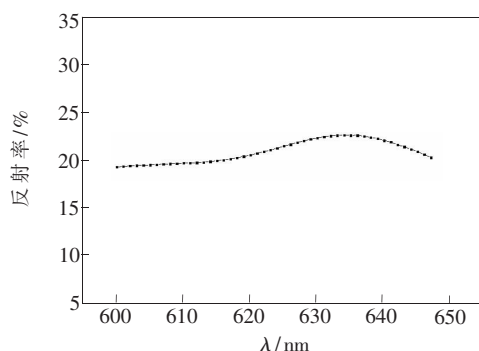


图 7 分光光度计测得膜系在 600~650 nm 的反射率.

Fig. 7 Reflectivity between 600 ~ 650 nm measured by spectrophotometer

曲线,如图 7 所示。

测量得出膜系在 600~650 nm 附近的反射率为 20%~25%。取发光主波长 625 nm 附近的反射率 21.516%,计算得到 Si 在该波段的折射率为 3.766 2。通过式(3)可以计算出固化后的 PI 折射率为 $n_2 = 1.744 5$ 。表明固化后的 PI 的折射率很低,接近 K9 玻璃的折射率,对 600~650 nm 波段的光透明度很高。有源层射向侧面的光线在 GaP 和 PI 界面发生全反射的临界角为 $\theta_c \approx 30^\circ$,临界角变大,从而导致侧面光透射量增大。由于沟槽的填充是保证后续的电极制作及防止相邻发光单元之间产生光学和电学串扰的必要过程,而单纯用 PI 来填充沟槽不仅不能有效避免光学串扰,且会降低器件的出光效率。因此,对填充材料进行优化显得很有必要。

4.3 PI/硅纳米颗粒组合膜反射率的计算

Harris, Macleod 等人根据 Maxwell-Garnett, Bragg 和 Pippard 和 Lorentz-Lorenz 提出的极化理论,导出适用于柱状晶体组成的介质薄膜的方程^[16]。

$$n_f^2 = \frac{(1-P)n_v^4 + (1+P)n_s^2 n_v^2}{(1+P)n_v^2 + (1-P)n_s^2} \quad (4)$$

式中 n_f 为组合薄膜的折射率, n_s 为固体材料的折射率(柱状体的,常假定是体材料的值), n_v 为薄膜中空隙材料的折射率(在真空中此值为 1), P 为堆积(填充、聚集)密度。

按照该理论模型,把 PI 当成空隙材料,用柱状体的硅纳米颗粒与 PI 可形成介质薄膜。 P 可以认为是硅纳米颗粒的填充密度。这样 P 值的改变则引起组合膜折射率的改变。 P 值的改变可

以通过硅纳米颗粒的堆积模型来控制。

由 $R = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2$ 可以看出,反射率 R 在 $1 \rightarrow \infty$ 是递增函数,因此要想反射率 R 最大,只要式(4)取最大值即可。设置 P 从 0~1 取值,每隔 0.001 运算一次,用 Matlab 软件模拟 n_f 随 P 的变化曲线如图 8 所示。

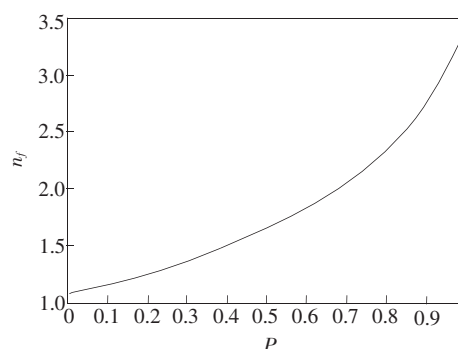


图 8 n_f 随 P 的变化曲线

Fig. 8 Curves of n_f follow P transformation

从图 8 可知,随 P 值的增加, n_f 的值也增大,无限接近于无空隙材料时固体材料的折射率,即接近硅的折射率。但这是一种理想情况。如果设想硅的纳米颗粒是完全相同的球,若将其规则堆积使得堆积比率最大,则其堆积方式有两种。一种是面心立方(fcc)结构,另一种是六角密堆积(hcp)结构,对于这两种结构,其总体积中被球占据的体积比率都是 0.74。除此之外,无论是规则还是不规则的堆积结构,都不可能得到比 fcc 和 hcp 更密的堆积。

按照最大堆积密度,取 P 为 0.74,则通过式(4)可以得出组合膜在最大堆积密度下的折射率为: $n_f = 2.381 78$ 。

通过式 $R = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2$ 计算得反射率 $R_f = 16.695\%$ 。

4.4 PI/硅纳米颗粒组合膜对器件出光效率的影响

如图 9 所示, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别代表不填充介质,填充 PI 和填充组合膜介质后光线到达侧面在 GaP 与介质界面发生全反射时的临界角。 S_1, S_2, S_3 分别代表任一发光点发出的光线到达侧面空气层、填充 PI 层和填充组合膜介质层时能从侧面出射光束的面积,其中 $S_x = \frac{\pi (x \tan \theta_x)^2}{2} (0 \leq x \leq 80)$ 。

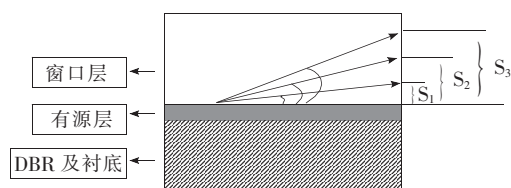


图9 三种情况侧面出光对比分析

Fig.9 Profile light transmit contrast analysis of three complexions

光线到达组合膜与 GaP 的界面时,发生全反射的临界角 $\theta_c \approx 44^\circ$ 。因此,通过前面的计算可知 $\theta_3 > \theta_2 > \theta_1$, $S_3 > S_2 > S_1$ 。填充组合膜与填充 PI 膜相比,全反射临界角变大,能从侧面出射光线面积也变大。但组合膜能将发光单元任一发光点到达每个侧面从面积 $S_x = \frac{\pi (x \tan \theta_x)^2}{2}$, ($0 \leq x \leq 80$) 内出射光束的 16.695% 反射回窗口层之中。通

过 DBR 层和其他反射面将反射回的光反射到窗口层正面。这与填充 PI 膜相比,不但很好地实现了发光单元之间的光学隔离,而且有效利用了侧面出射的光能量,提高了整个器件的出光效率。

5 结 论

对 AlGaInP-LED 微显示阵列的出光效率进行了研究。在考虑光线出射角度和全反射的情况下,通过建立组合膜的模型,将硅纳米颗粒按照 fcc 或 hcp 结构密堆积,间隙材料填充 PI,并固化,理论上可以将发光单元每一发光点到达每个侧面以小于全反射角出射光的 16.695% 反射回窗口层,不仅避免了相邻发光单元之间的光学和电学串扰,而且有效降低了发光单元的出光效率损失。本文从理论上给出了改善 LED 微阵列发光单元出光效率的一种方法,对提高 LED 微阵列器件出光效率具有一定的参考作用。

参 考 文 献:

- [1] TU D W, WU R M, YANG H L, *et al.* Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2008, 16(5):832-838.
- [2] 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*, 1988, B51:34-38.
- [3] Robinson Kevin. Blue LEDs open door to microdisplays [J]. *Photonics Spectra*, 2001, 35:43-44.
- [4] Choin H W, Jeon C W, Dawson M D. Fabrication of matrix-addressable micro-LED arrays based on a novel etch technique [J]. *J. Crystal Growth*, 2004, 268:527-530.
- [5] 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 Electronics*, 2002, 8(4): 943-94.
- [6] Jin S X, Li J, Lin J Y, *et al.* InGaInP/GaN quantum well interconnected micro disk light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2000, 77(20): 3236-3238.
- [7] Poher V, Grossman N, Kennedy G T, *et al.* Micro-LED arrays: A tool for two-dimensional neuron stimulation [J]. *Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, 41:094014(1-9).
- [8] Naresh C, Monica T L, Kimberley A O, *et al.* Flip chip bonding of 68×68 MWIR LED arrays [J]. *IEEE Trans. Adv. Packaging*, 2009, 32(1):9-13.
- [9] 尹悦,梁静秋,梁中翥,等. 一种 LED 阵列微显示器件的设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12):159-164.
- [10] 尹悦,梁静秋,梁中翥,等. 电极结构对 AlGaInP-LED 阵列电流分布的影响 [J]. *发光学报*, 2011, 32(10):59-64.
- [11] 王国宏,马晓宇,王树堂,等. AlGaInP 橙色发光二极管的发展 [J]. *半导体技术*, 1988, 23(4):10-12.
- [12] 梁静秋,李佳,王维彪. AlGaInP-LED 阵列的设计与制作 [J]. *液晶与显示*, 2006, 21(6):604-608.
- [13] 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 Letters*, 1997, 9(2):182-184.
- [14] 林岳明,张俊兵,曾祥华. AlGaInP LED 出光效率的模拟 [J]. *发光学报*, 2009, 30(2):201-208.
- [15] 余怀之. 红外光学材料 [M]. 北京:国防工业出版社,2007:13.
- [16] 钟迪生. 真空镀膜-光学材料的选择与应用 [M]. 沈阳:辽宁大学出版社,2001:26.