

# 复合分布式布拉格反射镜结构 AlGaInP 发光二极管

郑元宇, 吴超瑜, 林峰, 伍明跃, 周启伦, 李水清

三安光电科技有限公司, 福建 厦门 361009

**摘要** 采用金属有机化学气相沉积系统外延了具有三个不同反射中心波长的 AlAs/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As 复合分布式布拉格反射镜(DBR),利用透射电镜、X射线衍射仪表征其结构、厚度和组分,利用白光反射谱表征其反射谱强度和带宽。结果表明:该复合 DBR 比常规 DBR 和两个反射中心波长复合 DBR 具有更高的反射谱强度和更宽的带宽。利用该复合 DBR 制备了 AlGaInP 发光二极管(LED),尺寸 6.0 mil×6.0 mil(1 mil=0.0254 mm),并在 20 mA 测试电流下测得其输出光功率为 3.54 mW,发光效率为 17.26 lm/W,外量子效率为 8.77%,相比常规 DBR 制备 LED 输出光功率提高 35.1%,相比两个反射中心波长复合 DBR 制备 LED 输出光功率提高 11.3%。说明具有三个反射中心波长的复合 DBR 更大幅度地提升了 AlGaInP 发光二极管的出光效率。

**关键词** 光学器件; AlGaInP; 复合分布式布拉格反射镜; 输出光功率; 外量子效率

**中图分类号** TN315 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.052301

## AlGaInP Light Emitting Diode with Coupled Distributed Bragg Reflector Structure

Zheng Yuanyu, Wu Chaoyu, Lin Feng, Wu Mingyue, Zhou Qilun, Li Shuiqing

San'an Optoelectronics Co. Ltd., Xiamen, Fujian 361009, China

**Abstract** An AlAs/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As coupled distributed Bragg reflector (DBR) with three different reflection center wavelengths is fabricated by the metal-organic chemical vapor deposition system. The transmission electron microscopy and X-ray diffractometer are used to characterize the structure, thickness, and composition. The white light reflectance spectroscopy is used to characterize the intensity and bandwidth of the reflection spectrum. The result shows that coupled DBR has higher reflectance spectrum intensity and wider bandwidth compared to conventional DBR and coupled DBR with two reflection center wavelengths. AlGaInP light emitting diode (LED) with coupled DBR is prepared, and the size is 6.0 mil×6.0 mil (1 mil=0.0254 mm). Under the measuring current of 20 mA, the output optical power is 3.54 mW, the luminous efficiency is 17.26 lm/W, and the external quantum efficiency is 8.77%. The output power of LED is 35.1% higher than that of conventional DBR, and 11.3% higher than that of the coupled DBR with two reflection center wavelengths. It shows that the coupled DBR with three reflection center wavelengths can remarkably increase the light extraction efficiency of an AlGaInP LED.

**Key words** optical devices; AlGaInP; coupled distributed Bragg reflector; output optical power; external quantum efficiency

**OCIS codes** 230.3670; 160.6000; 330.1720

## 1 引言

四元合金材料(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 作为有源区制备的发光二极管(LED)具有较高的内量子效率,且与 GaAs 衬底晶格完全匹配,是制备 LED 的优选材料<sup>[1-6]</sup>。目前影响 AlGaInP LED 性能的主要因素是外量子效率低,人们已研究各种方法提升 AlGaInP 发光二极管的外量子效率,如采用分布式布拉格反射镜(DBR)、倒装结构、透明衬底、表面粗化、倒金字塔等<sup>[7-8]</sup>。其中,采用 DBR 反射层,即在有源区与衬底之间生长由两

**收稿日期:** 2016-11-21; **收到修改稿日期:** 2016-12-29

**基金项目:** 国家重点研发计划战略性先进电子材料重点专项(2016FYB0400600)

**作者简介:** 郑元宇(1986—),男,硕士,高级工程师,主要从事 AlGaInP 系 LED 方面的研究。

E-mail: yzhenngxmu@126.com

种折射率高低不同的材料组成的周期性结构,每层厚度为 $\lambda/4n$ ( $\lambda$ 为反射中心波长, $n$ 为对应波长的折射率),可以将垂直射向衬底的光反射回去,减少GaAs衬底的光吸收,提高出光效率。采用复合DBR,即由不同反射中心波长组合而成的结构,解决了传统DBR对大倾角入射光反射率小的问题,能够进一步提升出光效率。在复合DBR的研究中,已报道较多的是采用两个不同反射中心波长的复合DBR<sup>[9-11]</sup>,这些结构虽然能反射出一定倾角的光,但未能充分地反射出更大倾角的光。为了能更充分地把发射到衬底的光反射出去,减少衬底吸收,更大幅度提升AlGaInP LED的出光效率,本文在此基础上进一步研究三个不同反射中心波长组合而成的复合DBR。

首先,采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术分别外延了单反射中心波长常规DBR、两个反射中心波长复合DBR和三个反射中心波长复合DBR,利用透射电镜(TEM)、X射线衍射仪(XRD)表征结构、厚度和组分,利用白光反射谱表征反射谱强度和带宽。再在三种不同结构的DBR上外延出红光LED,制作成尺寸为 $6.0\text{ mil}\times 6.0\text{ mil}$ ( $1\text{ mil}=0.0254\text{ mm}$ )的芯片,研究不同结构DBR对AlGaInP红光LED光电性能的影响。

## 2 DBR设计与制备

DBR材料选取高反射率AlAs/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As组合,实验设计了三种总对数相同、结构不同的DBR。样品1是常规DBR,反射中心波长为630 nm,DBR对数为34对;样品2是复合DBR,反射中心波长为630,680 nm,对数分别为17对和17对;样品3是复合DBR,反射中心波长为630,680,730 nm,对数分别为17对、10对和7对。每层厚度的设计可以根据理论公式 $H=\lambda/4n$ 计算得出,其中 $H$ 为厚度, $\lambda$ 为反射中心波长, $n$ 为对应波长的折射率,630 nm波长对应的AlAs折射率为3.14,Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As的折射率为3.52。

采用MOCVD系统制备DBR以及AlGaInP红光LED,以高纯氢气(H<sub>2</sub>)作为载气,以三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)、三甲基铟(TMIIn)、砷烷(AsH<sub>3</sub>)、磷烷(PH<sub>3</sub>)分别作为Ga、Al、In、As、P源,用乙硅烷(Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)、二茂镁(Cp<sub>2</sub>Mg)分别作为N、P型掺杂剂。具体方法如下:在GaAs衬底上,首先通入AsH<sub>3</sub>,温度渐变7 min内上升至700 °C,并稳定在700 °C保持2 min,反应室压力设定为60 Torr(1 Torr=133.322 Pa),对GaAs表面进行脱氧;然后在GaAs衬底上生长不同结构的AlAs/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As DBR层,通入Si作为掺杂剂;接着在DBR层上生长N包层,材料选取N-Al<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P,在N包层上生长有源层,材料选取(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P多量子阱(MQW);在有源层上生长P包层,材料选取P-Al<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P,通入Mg作为掺杂剂,最后在P包层上生长电流扩展层GaP。图1为制备的DBR和LED结构示意图。

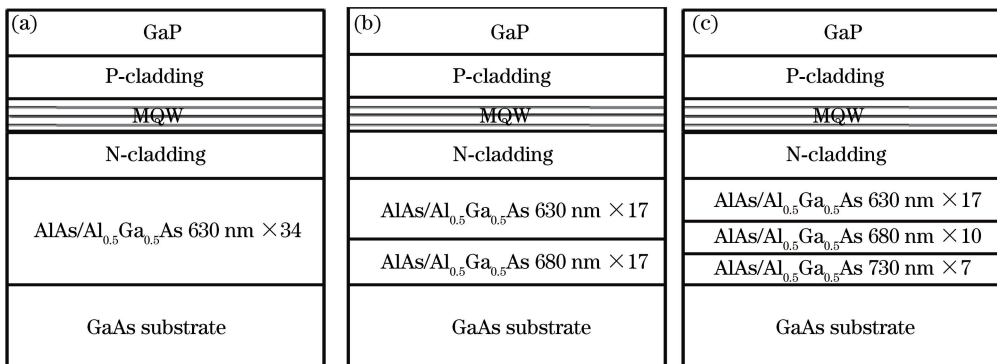


图1 (a)样品1、(b)样品2和(c)样品3制备的LED结构示意图

Fig. 1 Structure sketch maps of LED fabricated by (a) sample 1, (b) sample 2 and (c) sample 3

## 3 结果与讨论

### 3.1 复合DBR结构和反射谱分析

图2是样品3的横截面TEM图。从图中可以清晰地看出DBR各层结构及厚度,层与层之间的界面清晰,说明外延的晶格质量较好。表1给出了理论计算、TEM测量、XRD拟合出的厚度,可以看到TEM测量的厚度与理论计算结果基本一致。

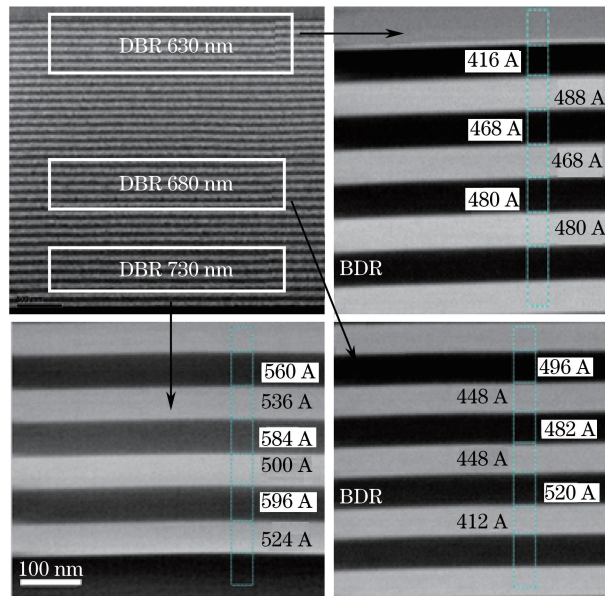


图 2 样品 3 横截面 TEM 图

Fig. 2 Cross section TEM image of sample 3

为了分析样品的晶体质量及 AlGaAs 的组分和厚度,测试了三种样品的 XRD 谱,并结合衍射峰的拟合和动力学理论模拟出样品 1 的 XRD 图,如图 3 所示。图 3 中除了能够清楚地看到各样品的 GaAs 衬底峰,还可以看到多级卫星峰,这说明 DBR 的界面清晰,周期均匀,具有较好的晶格质量。根据拟合结果得出 AlGaAs 中 Al 的组分为 0.49,样品 1 单波反射的常规 DBR 中,AlAs 厚度约为 49 nm,AlGaAs 厚度约为 45 nm,与理论计算和 TEM 测试结果基本一致。

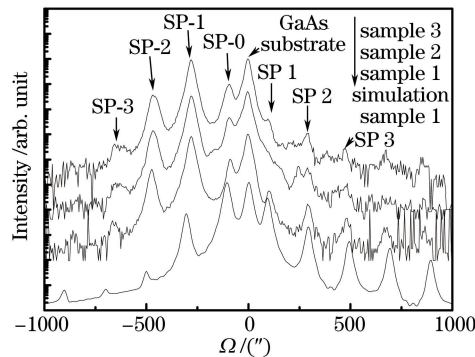


图 3 三种 DBR 的 XRD 曲线图和样品 1 的拟合曲线图

Fig. 3 XRD curves of three DBRs and fitting curve of sample 1

表 1 三个样品的理论计算厚度、TEM 测量厚度、XRD 拟合厚度

Table 1 Theoretical thickness, TEM thickness, XRD fitting thickness of three samples

Reflection wavelength /nm	Thickness (theoretical) /nm		Thickness (TEM) /nm		Thickness (XRD) /nm	
	AlAs/Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	AlAs/Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	AlAs/Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	AlAs/Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	AlAs/Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	AlAs/Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As
630	50.16	44.74	48.8	45.1	49/45	
680	54.14	48.3	49.9	43.6		
730	58.12	51.85	58	52		

采用 Accent 公司的 RPM 2000 测试系统,在室温下测量了三种 DBR 的白光反射谱,结果如图 4 所示,图中纵坐标为反射光所产生光电流的强度。样品 1 的 DBR 反射波长为 634.3 nm,带宽为 38.7 nm;样品 2 的主反射中心波长为 635.7 nm,带宽为 45.2 nm,除了主反射峰外,在 630~710 nm 范围内都有反射峰和较高的反射率;样品 3 的主反射波长为 636.1 nm,带宽为 48.1 nm,与样品 1 和样品 2 相比反射强度更强;除了主反射峰外,在 630~750 nm 范围内都有反射峰,且与样品 2 相比具有更高的反射率,这说明样品 3 这种结

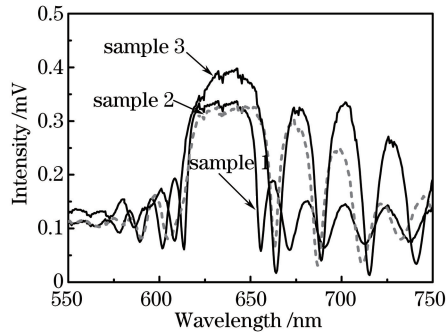


图 4 三种 DBR 的白光反射谱

Fig. 4 White light reflective spectra of three DBRs

构的复合 DBR 具有更高的反射强度和更宽的反射带宽。

### 3.2 AlGaInP 红光 LED 光电性能分析

采用这三种结构的 DBR 外延得到了 AlGaInP 红光 LED, 制备成尺寸为  $6.0 \text{ mil} \times 6.0 \text{ mil}$  的芯片, 并测试其轴向光强、输出光功率、电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 曲线和发光角度。图 5 是分别用 20 mA 测试电流测得的三种 LED 的轴向光强, 样品 1 制备 LED 的轴向光强为 120.5 mcd, 主波长为 622.5 nm (峰波长为 630.5 nm); 样品 2 制备 LED 的轴向光强为 125.4 mcd, 主波长为 622.3 nm (峰波长为 630.1 nm); 样品 3 制备 LED 的轴向光强为 128.8 mcd, 主波长为 622.0 nm (峰波长为 629.8 nm), 数据显示三个 LED 的轴向光强相差较小。本实验设计样品 2 和样品 3 反射主波长 630 nm 的 DBR 对数仅 17 对, 比样品 1 的 34 对少一半, 但是制备的 LED 的轴向光强相差较小, 这主要是因为样品 1 在 DBR 对数逐渐增加至 17 对的情况下, 反射率开始趋于饱和状态, 即使对数再增加至 34 对, 反射率仅从 95% 提升至 97%, 对轴向光强贡献较小<sup>[12]</sup>。反而采用复合 DBR 的样品 2 和样品 3 时, 轴向光强亮度变亮 4.1% 和 6.9%, 这主要是因为轴向光强是在芯片未封装且轴向  $15^\circ$  范围内测试, 复合 DBR 对该范围内的反射光有贡献。

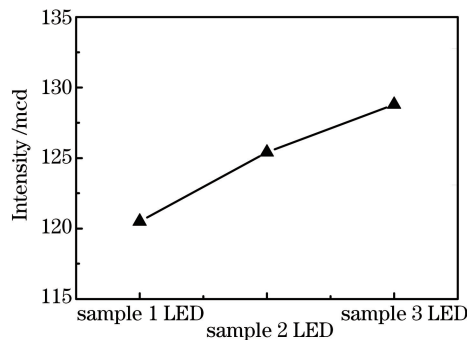


图 5 三种 DBR 制备的 LED 的轴向光强

Fig. 5 Axial intensity of LEDs fabricated by three DBRs

图 6(a) 为采用 IS 机台 (型号: CAS140CT-156) 测试的三种 LED 的输出光功率随电流变化趋势图。测试电流为 20 mA 下, 测得样品 1 制备 LED 的输出光功率为 2.62 mW, 光效为 13.45 lm/W, 外量子效率为 6.44%; 样品 2 制备 LED 的输出光功率为 3.18 mW, 光效为 16.36 lm/W, 外量子效率为 7.76%, 与样品 1 制备 LED 相比, 输出光功率得到提升; 样品 3 制备 LED 的输出光功率为 3.54 mW, 光效为 17.26 lm/W, 外量子效率为 8.77%, 与样品 1 制备 LED 相比, 输出光功率提升了 35.1%, 外量子效率提升 2.33%, 与样品 2 制备 LED 相比, 输出光功率提升 11.3%, 外量子效率提升 1.01%。测试电流为 20 mA 条件下测得三个 LED 的各项光电参数如表 2 所示。输出光功率是在整个立体空间内用积分球测量, 因而输出光功率大幅度提升能更好地说明复合 DBR 对光提取效率的改善作用。样品 3 制备 LED 比样品 2 制备 LED 提升幅度更大, 进一步说明采用三个反射中心波长的复合 DBR 对大角度方向的反射率更高, 更有利于 LED 亮度提升。本实验制备的 LED 与马莉等<sup>[9]</sup>报道的 LED (尺寸为  $8.0 \text{ mil} \times 8.0 \text{ mil}$ , 输出光功率为 3 mW, 外量子效率为 5.8%) 相比, 性能更优。

随着电流上升,LED 的输出光功率逐渐增加,当测试电流增加到 95 mA 时,输出光功率达到饱和,样品 1、样品 2 和样品 3 制备 LED 的最大功率分别为 9.19,10.35,11.96 mW,可见样品 3 制备 LED 的输出光功率最高。三种结构 DBR 制备的 LED 的饱和电流一致,均为 95 mA,这说明采用复合 DBR 不会对 LED 器件电学性能产生影响。

表 2 20 mA 测试电流下测得 LED 的光电参数

Table 2 Photoelectric parameters of LEDs under measuring current of 20 mA

LED	Luminous intensity /mcd	Output optical power /mW	Optical efficiency /(lm/W)	External quantum efficiency /%
Sample 1 LED	120.5	2.62	13.45	6.44
Sample 2 LED	125.4	3.18	16.36	7.76
Sample 3 LED	128.8	3.54	17.26	8.77

图 6(b)为三种 LED 的  $I$ - $V$  特性曲线图,在 20 mA 的测试电流下,样品 1~3 的电压分别为 2.03,2.04,2.01 V,三种结构 DBR 制备 LED 的  $I$ - $V$  曲线特性基本一致,说明复合 DBR 没有增加 LED 的串联电阻,不会对器件电学性能产生较大的影响。

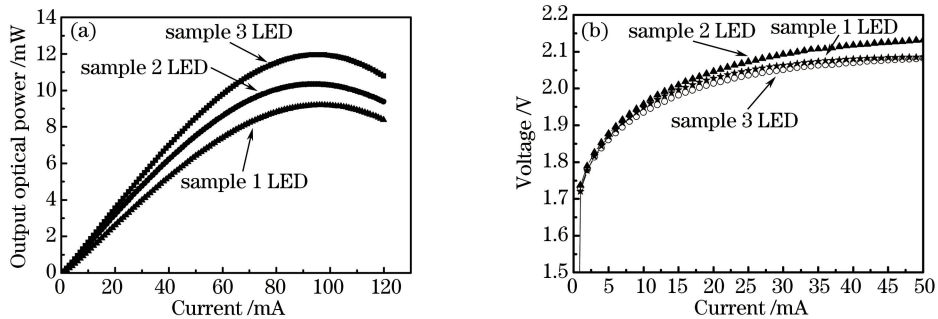
图 6 (a) LED 的光功率-电流曲线;(b) LED 的  $I$ - $V$  曲线Fig. 6 (a) Output optical power-current curves of LED; (b)  $I$ - $V$  curves of LED

图 7 为三种 DBR 制备 LED 的发光角。样品 1~3 制备 LED 的发光角分别为  $109.27^\circ$ 、 $119.37^\circ$  和  $128.36^\circ$ ,可见复合 DBR 制备 LED 的发光角度更大,样品 3 制备 LED 的发光角比样品 2 制备 LED 更大,说明采用三个反射中心波长的 DBR 能够反射出更大入射角的光。

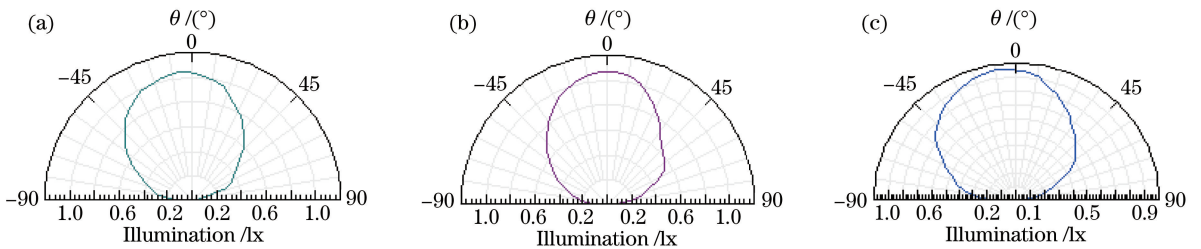


图 7 (a)样品 1、(b)样品 2 和(c)样品 3 制备 LED 的发光角

Fig. 7 Radiant angles of LEDs fabricated by (a) sample 1, (b) sample 2 and (c) sample 3

## 4 结 论

设计了以  $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  组合为材料、具有三个反射中心波长的复合 DBR 结构,TEM 和 XRD 结果显示该复合 DBR 具有良好的外延结构和晶格质量,白光反射谱显示该复合 DBR 具有更高的反射强度和更宽的带宽。采用该结构的复合 DBR 外延了  $\text{AlGaInP}$  红光 LED,并制备成  $6.0\text{ mil}\times 6.0\text{ mil}$  的小尺寸芯片,在 20 mA 测试电流下测得 LED 的输出光功率为 3.54 mW,光效为 17.26 lm/W,外量子效率为 8.77%,相比常规 DBR 制备 LED 来说,输出光功率提升 35.1%,外量子效率提升 2.33%;相比两个反射中心波长复合 DBR 制备 LED 来说,光输出功率提升了 11.3%,外量子效率提升 1.01%。数据说明采用三个反射中心波长的复合 DBR 制备的 LED 的反射效率更高,即该复合 DBR 更大幅度地提升了  $\text{AlGaInP}$  LED 的出光效率。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Yixin, Shen Guangdi, Meng Lili, *et al.* Improved extraction efficiency of AlGaInP light emitting diodes by nano-scale surface roughness[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(10): 1452-1454.  
陈依新, 沈光地, 孟丽丽, 等. AlGaInP 系 LED 的表面纳米级粗化以及光提取效率提高[J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22(10): 1452-1454.
- [2] Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Shang Jun, *et al.* A dimming method for RGB LED based on three channels' PWM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0223001.  
宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0223001.
- [3] Moon H C, Digantac D, Varde P V, *et al.* Light emitting diodes reliability review[J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52(5): 762-782.
- [4] Ryu H S, Min J P, Oh S K, *et al.* Vertical-injection AlGaInP LEDs with n-AlGaInP nanopillars fabricated by self-assembled ITO-based nanodots[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, 10(1): 356.
- [5] Han Jun, Li Jianjun, Deng Jun, *et al.* High bright AlGaInP red light LED[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(2): 171-173.  
韩军, 李建军, 邓军, 等. 高亮度 AlGaInP 红光发光二极管[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(2): 171-173.
- [6] Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Chen Congying, *et al.* Research on color mixing based on RGBW-LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0923004.  
宋鹏程, 文尚胜, 陈颖聪. 基于 RGBW 四色 LED 的混光研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0923004.
- [7] Kuo D M, Wang S J, Uang K M, *et al.* Enhanced light output of AlGaInP light emitting diodes using an indium-zinc oxide transparent conduction layer and electroplated metal substrate[J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(1): 012101.
- [8] Zhang Yonghui, Guo Weiling, Qin Yuan, *et al.* Effects of ITO on properties of novel AlGaInP red LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2402-2405.  
张勇辉, 郭伟玲, 秦园, 等. ITO 对新型 AlGaInP 红光 LED 特性的影响[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2402-2405.
- [9] Ma Li, Shen Guangdi, Chen Yixin, *et al.* Investigation of the saturation characteristic and lifetime of the novel AlGaInP light emitting diodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(3): 037201.  
马莉, 沈光地, 陈依新, 等. 新型 AlGaInP 系发光二极管饱和特性与寿命的研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(3): 037201.
- [10] Han Jun, Li Jianjun, Deng Jun, *et al.* Wide reflected angle DBR red light LED[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(4): 456-458.  
韩军, 李建军, 邓军, 等. 宽反射角 DBR 红光发光二极管[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(4): 456-458.
- [11] Yu Xiaodong, Han Jun, Li Jianjun, *et al.* High brightness AlGaInP LED with coupled distributed Bragg reflector[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(1): 100-103.  
于晓东, 韩军, 李建军, 等. 复合布拉格反射镜高亮度 AlGaInP 发光二极管[J]. *半导体学报*, 2007, 28(1): 100-103.
- [12] Cao Mingde. Studies of DBR in high-brightness AlGaInP LED[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2002.  
曹明得. 用于高亮度发光二极管的布拉格发射器研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2002.