

# 新型全方位反射铝镓铟磷薄膜发光二极管\*

张剑铭 邹德恕 刘思南 徐 晨 沈光地

(北京工业大学北京市光电子技术实验室,北京 100022)

(2006 年 7 月 15 日收到,2006 年 9 月 14 日收到修改稿)

提出了一种新型全方位反射铝镓铟磷 (AlGaInP) 薄膜发光二极管 (LED) 的结构和制作工艺,在这个结构里应用了低折射率的介质和高反射率的金属联合作为反光镜.用金锡合金 (80Au20Sn,重量比)作为焊料把带有反光镜的 AlGaInP LED 外延片倒装键合到 GaAs 基板上 (RS-LED),去掉外延片 GaAs 衬底,把被 GaAs 衬底吸收的光反射出去.通过与常规 AlGaInP 吸收衬底 LED (AS-LED) 和带有 DBR 的 AlGaInP 吸收衬底 LED (AS-LED (DBR)) 电、光特性的比较,证明新型全方位反射 AlGaInP 薄膜 LED 结构能极大提高亮度和效率.正向电流 20 mA 时,RS-LED 的光输出功率和流明效率分别是 AS-LED 的 3.2 倍和 2.2 倍,是 AS-LED (DBR) 的 2 倍和 1.5 倍.RS-LED (20 mA 下峰值波长 627 nm) 的轴向光强达到 194.3 mcd,是 AS-LED (20 mA 下峰值波长 624 nm) 轴向光强的 2.8 倍,是 AS-LED (DBR) (20 mA 下峰值波长 623 nm) 轴向光强的 1.6 倍.

关键词:铝镓铟磷,薄膜发光管,全方位反射镜,发光强度

PACC:7280E,7360F,7865K,7360D

## 1. 引言

与 GaAs 衬底晶格匹配的  $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$  材料具有很宽的直接带隙(当  $x < 0.53$  时为直接带隙材料,禁带宽度 1.9—2.3 eV),覆盖了 560 nm 到 650 nm 范围的可见光波长,是制备红色到绿色波段 LED 的优良材料<sup>[1]</sup>.自从 AlGaInP 红色、黄色发光二极管在 1990 年代的早期出现,和稍后的 GaN 蓝色、绿色和白色发光二极管的研发,这些发光二极管已在很多高效固态照明领域上有广泛的用途,例如全色彩屏幕显示器、汽车用灯、背光源、交通信号灯、景观及日常照明等<sup>[2]</sup>.典型的具有电流扩展层的 AlGaInP LED 结构如图 1 所示<sup>[3,4]</sup>.近年来,人们在外延生长技术上取得了很大进步,提高了发光管的亮度.然而,由于 GaAs 吸收衬底 (AS) 的局限性——吸收可见光,使得有源层射向衬底的光线和上表面反射下来的光线全被衬底吸收,降低了 LED 的外量子效率.分布布拉格反射镜 (DBR) 首先被应用在有源层和 GaAs 衬底之间<sup>[5,6]</sup>,它能把一部分射向 GaAs 衬底的光线向上反射,增大了外量子效率.但是生长布拉格反射镜只是部分地解决了问题,这是因为布拉格

反射镜只反射接近法向入射的光线,其他远离法向入射的光线绝大部分都被 GaAs 衬底吸收.另外一种方法是用透明衬底 (TS) GaP 来取代 GaAs 吸收衬底<sup>[7-10]</sup>.然而,TS AlGaInP LED 的制作工艺很复杂,因此,很难大批量和低成本生产.



图 1 常规 AlGaInP LED 结构示意图

## 2. 结构与制作

本文提出了一种新型的全方位反射 AlGaInP 薄膜发光二极管结构,在这个结构里应用了低折射率的介质  $SiO_2$  和高反射率的金属 Au 联合作为反光

\*北京市人才强教计划项目(批准号:05002015200504)和北京市科委高效高亮度单芯片半导体照明器件的研发与产业化(批准号: D0404003040221)资助的课题.

镜.它不但具有很高的发光强度和高的发光效率,而且很容易批量生产.我们采用金属有机物化学气相沉积技术(MOCVD)在GaAs衬底上外延出“p面向上”的AlGaInP LED多量子阱(MQW)结构,如图2所



图2 AlGaInP 薄膜 LED 外延结构

示.LED 外延结构包括 n-GaAs 缓冲层, n-InGaP 腐蚀停层, n-GaAs 欧姆接触层, n-电流扩展层, n-AlGaInP 下限制层, 未掺杂 (Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P MQW 有源区, p-AlGaInP 上限制层和 p-GaP 窗口层, p-GaAs 欧姆接触层.本新型全方位反射 AlGaInP 薄膜 LED 的制作工艺如下,在 p-GaAs 欧姆接触层上首先沉积非导电透明介质层 SiO<sub>2</sub>,刻蚀出网格做为导电通道,随后沉积欧姆接触金属 AuZnAu,剥离使之保留网格处 AuZnAu.通过导电通道与 p-GaAs 形成欧姆接触,然后再沉积高反射率的金属 Au.非导电透明介质 SiO<sub>2</sub> 可以避免在形成欧姆接触的退火工艺时高反射率金属和 AlGaInP LED 层互扩散,而且和高反射率金属联合作为新型全方位反射 AlGaInP 薄膜 LED 结构中的反光镜.对波长大于 590 nm 的光有

> 90% 的反射率),其对可见光波长范围的反射率如图3所示,以代替外延生长的 DBR 反光镜,解决 DBR 反光镜的角带宽有限的问题,提供全方位反射(不受限于近法线入射的光),提高发光强度.随后把带有反光镜的外延片以倒装方式即“p面向下”叠置于沉积有金锡合金焊料的 GaAs 基板上,通过石墨夹具用金属键合技术熔合连接在一起.键合后,用化学选择性腐蚀或等离子刻蚀技术把 n-GaAs 衬底和 n-GaInP 腐蚀停层去掉,留下外延结构薄膜,称之为薄膜发光二极管(thin-film LED).在 n-GaAs 欧姆接触层沉积 AuGeNi,光刻出圆形电极,在 GaAs 基板底部沉积平面电极 TiAu,形成上下垂直电极如图4.最后锯片解理形成 300 × 300 μm 的单个管芯,称之为反光镜基板(RS)LED.

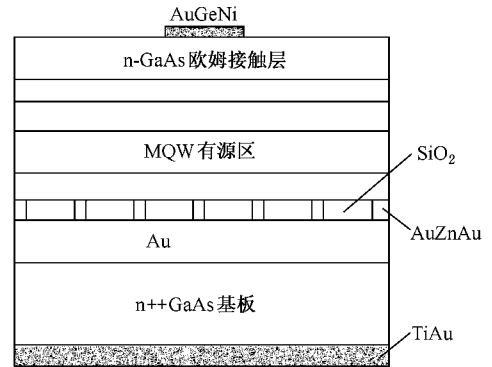


图4 新型全方位反射 AlGaInP 薄膜 LED 结构示意图

### 3. 结果与讨论

我们用相同结构的外延片制作两组样品,一组是用常规工艺制作的 p 面出光的带有吸收衬底的发光二极管,称之为 AS-LED,一组是用新型全方位反射 AlGaInP 薄膜 LED 的新工艺制作 n 面发光的发光二极管,称之为 RS-LED.然后再用常规工艺制作一组带有 DBR 外延结构的 p 面出光的发光二极管,称之为 AS-LED(DBR).制作完成的 LED 芯片用校准的 Si 光电探测器积分球来测试光输出功率、流明效率和主波长,轴向光强用 LED 光强分布测试仪来测试,这里用来进行光电测试的芯片都是压焊好没有用环氧树脂封装的裸芯片.

首先,我们在正向电流 20 mA 下测量了这三组芯片的光谱分布,结果如图5所示.RS-LED 芯片主波长为 618.8 nm,峰值波长为 627 nm,半宽为 12.9 nm;AS-LED 芯片主波长为 616.3 nm,峰值波长为 624

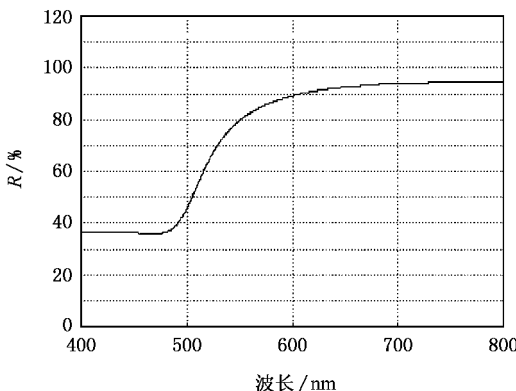


图3 金在可见光波长范围(400—700 nm)里的反射率

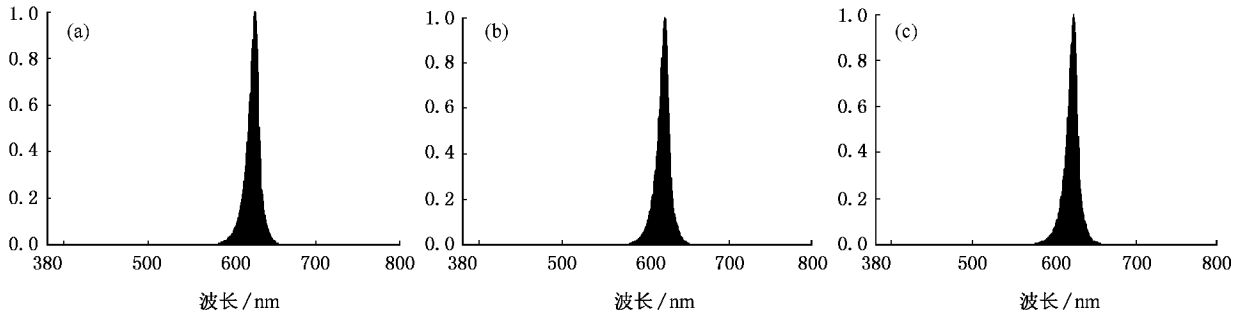


图 5 三组芯片的光谱分布 (a)RS-LED (b)AS-LED (c)AS-LED(DBR)

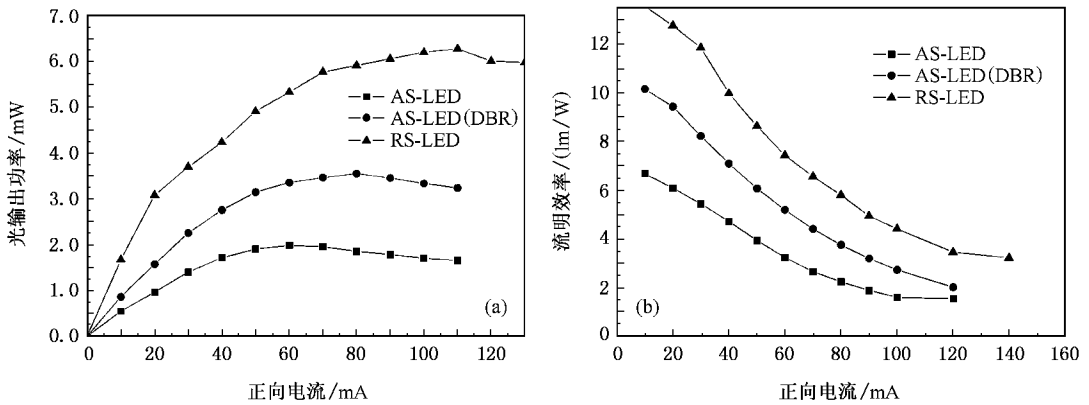


图 6 三组芯片的光功率和流明效率与注入电流的关系

nm,半宽为 13.1 nm,AS-LED(DBR)芯片主波长为 615.6 nm,峰值波长为 623 nm,半宽为 13.1 nm.

然后,我们测量了 LED 芯片的光输出功率和流明效率与注入电流的关系,结果如图 6 所示.从图 6 可以看出,RS-LED 的光输出功率和流明效率远大于 AS-LED 的光输出功率和流明效率,也大于 AS-LED(DBR)的光输出功率和流明效率.正向电流 20 mA 时,RS-LED 的光输出功率和流明效率分别是 AS-LED 的 3.2 倍和 2.2 倍,是 AS-LED(DBR)的 2 倍和 1.5 倍.小电流注入时随电流增加三种芯片光输出功率线性增大,随着注入电流的增大光输出功率增加减缓,直到出现最大饱和输出功率,然后电流再增大时,输出光功率开始下降.不过 RS-LED 芯片的饱和电流大于 AS-LED(DBR)和 AS-LED 的饱和电流.我们认为,这是因为 AS-LED(DBR)和 AS-LED 芯片里很多光子提取不出来,在芯片内部被半导体和 GaAs 衬底吸收,产生热;再加上由于 p-GaP 窗口层不容易高浓度掺杂,电阻率大,大电流下,将会产生大量的焦耳热,所以大量的热使有源区温度上升,禁带宽度减小和载流子分布变宽,光子吸收、载流子泄

露和非辐射复合增强,热量进一步增加,造成恶性循环,引起内量子效率强烈降低,流明效率降低,光输出功率饱和.而 RS-LED 结构里使用了高反射率的介质-金属反光镜,其有源区发射的光子能极大地被提取出来,减少了光子损耗,同时倒装后热量通过基板易于散热,降低了芯片内部产生的热,导致芯片温升减慢,有源区载流子泄露减少,光输出功率饱和和电流大.所以 RS-LED 芯片能极大地提高光输出功率,饱和电流比前两者偏大.

图 7 是我们测量的 LED 芯片的轴向光强和注入电流的关系,从图 7 可以看出 RS-LED 的轴向光强远大于 AS-LED 的轴向光强,也大于 AS-LED(DBR)的轴向光强.正向电流 20 mA 时,RS-LED 的轴向光强达到 194.3 mcd,是 AS-LED 轴向光强的 2.8 倍,是 AS-LED(DBR)轴向光强的 1.6 倍.为进一步提高 RS-LED 的性能,我们把出光表面粗化,可以提高 30%的光提取效率.所以 RS-LED 芯片有优异的性能,也再次证明新型全方位反射 AlGaInP 薄膜 LED 的结构具有极大的优越性.

图 8 是这三组芯片的电流-电压特性曲线.在正

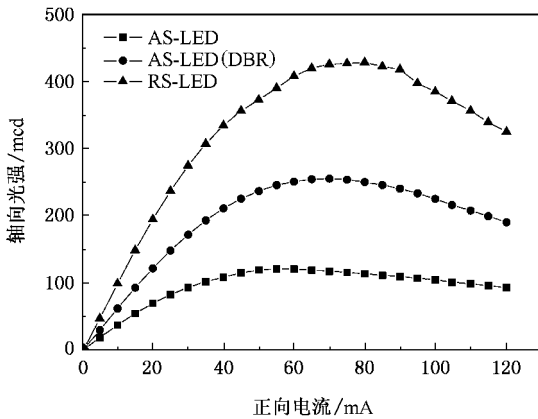


图 7 轴向光强和正向电流的关系

向电流 20 mA 下,RS-LED 芯片的正向电压是 2.74 V,而作为对比的 AS-LED 和 AS-LED(DBR)芯片正向电压分别是 2.03 V 和 2.34 V.这与结构中使用网格作为导电通路有关,网格的导电通路占整个网格的面积越小,接触电阻越大,正向电压也越大,但对反光镜来说反光效果越好,这需要一个折中的考虑.同时也清楚地说明我们还需要优化制作工艺和优化 n-欧姆接触层,期望能使新型全方位反射 AlGaInP 薄膜 LED 的正向电压降低以至接近 2 V 或 2 V 以下.

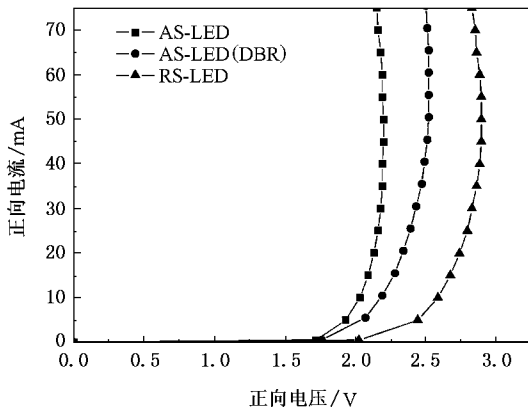


图 8 三组芯片的 I-V 特性

图 9 是在正向电流 20 mA 下,RS-LED 芯片(未封装)的光强空间分布测试图.从图可以看出,裸芯片的半强度角( $\theta_{1/2}$ )为  $110.2^\circ$ .

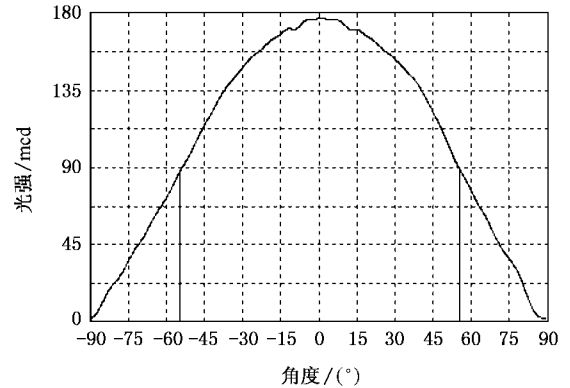


图 9 RS-LED 芯片光强的空间分布测试图

## 4. 结 论

本文提出了一种新型全方位反射高效率 AlGaInP 薄膜 LED 的结构和制作工艺,在这个结构里应用了低折射率的介质和高反射率的金属联合作为反光镜.通过与常规 AlGaInP 吸收衬底 LED(AS-LED)和带有 DBR 的 AlGaInP 吸收衬底 LED(AS-LED(DBR))电、光特性的比较,证明新型全方位反射 AlGaInP 薄膜 LED 结构能极大提高光的亮度和效率.正向电流 20 mA 时,RS-LED 的光功率和流明效率分别是 AS-LED 光功率的 3.2 倍和 2.2 倍,是 AS-LED(DBR)功率的 2 倍和 1.5 倍. RS-LED(20 mA 下峰值波长 627 nm)的轴向光强达到 194.3 mcd,是 AS-LED(20 mA 下峰值波长 624 nm)轴向光强的 2.8 倍,是 AS-LED(DBR)(20 mA 下峰值波长 623 nm)轴向光强的 1.6 倍.

感谢北京市光电子技术实验室的韩金茹、刘莹等老师和苏珍珍、张小佳等工作人员在器件制备方面的帮助.

- [1] Liu L, Fan G H, Liao C J, Cao M D, Chen G C, Chen L H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1264 (in Chinese)[刘 鲁、范广涵、廖常俊、曹明德、陈贵楚、陈练辉 2003 物理学报 **52** 1264]
- [2] Wayne. Jan, Tzer Perng Chen, Chih Sung Chang 2004 *Proc. of SPIE* **5366** 62
- [3] Kuo C P, Fletcher R M, Osentowski T D, Lardizablal M C, Craford M G 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 2937

- [4] Sugawara H, Ishikawa M, Hatakoshi G 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 1010
- [5] Chang S J, Chang C S, Su Y K, Chang P T, Wu Y R, Huang K H, Chen T P 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 182
- [6] Sugawara H, Itaya K, Hatakoshi G 1994 *J. Appl. Phys.* **33** 6195
- [7] Chang S J, Sheu J K, Su Y K, Jou M J, Chi G C 1996 *Jpn. Appl. Phys. Lett.* **35** 4199

- [ 8 ] Hoffer G E , Vanderwater D A , DeFevere D C , Kish F A , Camras M D , Steranka F M , Tan I H 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 803
- [ 9 ] Sheu J K , Su Y K , Chang S J , Jou M J , Chi G C 1998 *Proc. Inst. Elect. Eng. -Optoelectron.* **145** 248
- [ 10 ] Kish F A , Vanderwater D A , DeFevere D C , Steigerwald D A , Hoffer G E , Park K G , Steranka F M 1996 *Electron. Lett.* **32** 132

## A novel AlGaInP thin-film light emitting diode with omni directional reflector<sup>\*</sup>

Zhang Jian-Ming Zou De-Shu Liu Si-Nan Xu Chen Shen Guang-Di

( Beijing Optoelectronic Technology Laboratory , Beijing University of Technology , Beijing 100022 , China )

( Received 15 July 2006 ; revised manuscript received 14 September 2006 )

### Abstract

A novel AlGaInP thin-film light emitting diode ( LED ) with omni directional reflector structure was proposed , the corresponding fabrication process was developed. This reflector is realized by the combination of a low-refractive-index dielectric layer and a high reflectivity metal layer. The AlGaInP LED layers with dielectric-metal reflector is invertedly bonded to the GaAs submount by using 80Au-20Sn ( wt% ) alloy as a solder ( Reflector-Submount , RS-LED ) , and then GaAs substrate is removed. The light that would otherwise be absorbed by the GaAs substrate is reflected by the high reflectivity dielectric-metal reflector. The optical and electrical characteristics of the RS-LED are presented and compared with the conventional AlGaInP absorbing substrate ( AS ) LED and AlGaInP absorbing substrate LED with distributed Bragg reflectors ( DBR ). A great improvement in the brightness and efficiency is observed. It is shown that the light output and lumen efficiency from the RS-LED at forward current 20 mA exceed those of AS-LED by about a factor of 2.2 and 1.2 , respectively , and  $\sim 2 \times$  the light output of AS-LED ( DBR ) and  $\sim 1.5 \times$  the lumen efficiency of AS-LED ( DBR ) were achieved. 194.3 mcd luminous intensity from the RS-LED ( at 20 mA , peak wavelength 627 nm ) could be obtained under 20 mA injection , which is 2.8 and 1.6 times higher in luminous intensity than the AS-LED ( at 20 mA , peak wavelength 624 nm ) and AS-LED ( DBR ) ( at 20 mA , peak wavelength 623 nm ) , respectively.

**Keywords :** AlGaInP , thin-film LED , omni directional reflector , luminous intensity

**PACC :** 7280E , 7360F , 7865K , 7360D

<sup>\*</sup> Project supported by the Talent Promoting Education Beijing , China ( Grant No. 05002015200504 ) the Beijing Committee of Science and Technology , China ( Grant No. D0404003040221 ).