

AlGaInP 大功率发光二极管发光效率与结温的关系*

陈依新[†] 沈光地 高志远 郭伟玲 张光沉 韩军 朱彦旭

(北京工业大学北京市光电子技术实验室, 北京 100124)

(2010年10月7日收到; 2011年1月8日收到修改稿)

目前, AlGaInP 大功率发光二极管(LED)存在的主要问题是电流工作时发热严重, 主要是由于电流扩展不均匀、出光面电极对光子的阻挡和吸收以及器件材料与空气折射率之间的差距引起的全反射现象, 这些因素造成大功率 LED 出光受到限制、发光效率低、亮度不高. 提出了一种复合电流扩展层和复合分布式布拉格反射层(DBR)的新型结构 LED, 使得注入电流在有源区充分地扩散, 同时提高了常规单 DBR 对光子的反射率. 结果显示, 这种新型结构 LED 比常规结构 LED 的性能得到了很大的提升, 350 mA 注入电流下两者的输出光功率分别为 49.48 和 17 mW(未封装). 同时, 对器件发热进行了量化测试, 分析了 LED 发光效率与结温的关系, 在 350 mA 注入电流下新型结构 LED 与常规结构 LED 的流明效率的比值与结温升的比值保持一致, 通过减少内部发热, 控制结温可以大大提高 LED 的发光效率.

关键词: 复合电流扩展层, 复合分布式布拉格反射层, 出光效率, 结温

PACS: 72.80.Ey, 82.45.Qr, 74.62.Dh, 73.20.At

1. 引言

随着发光二极管(LED)材料的研究以及器件制备工艺的日趋成熟, LED 作为一种半导体照明器件已经在相当广泛的领域中得到应用, 包括指示灯、交通信号灯、汽车车灯、大屏幕显示、液晶显示背光源, 甚至日常照明领域等等. 随着应用的深入, 对 LED 亮度和发光效率的要求也在逐渐提高, 因此, 大功率高亮度 LED 的研究越来越受到人们的重视^[1,2]. 大功率 LED 具有电流承受能力强、亮度高、功率大等优点, 应用领域将相当广泛, 更适用于大面积显示、交通信号灯、汽车车灯、日常照明等等. 目前, 采用 AlGaInP 作为发光材料的红黄光系列大功率 LED 有着接近 100% 的内量子效率, 但是由于电流扩展不均匀、出光面电极对光子的阻挡和吸收、分布式布拉格反射层(DBR)总反射率低以及材料与空气折射率之间的差别引起的全反射现象等原因, 导致出光效率很低, 大大降低了器件的性能, 同时也限制了其应用领域^[3-7]. 大功率器件的尺寸一般比较大, 通常周期为 0.5—1 mm, 压焊点一般只

有一个或者两个, 因此, 无论是 GaAs 衬底的正装结构还是转移衬底的薄膜型倒装结构的大功率 LED 都存在出光面电流扩展不均匀的问题^[8,9]. 本文在 GaAs 衬底正装结构的大功率 LED 上引入复合电流扩展层结构, 由高掺杂薄 GaP 层与氧化铟锡(ITO)导电光增透层相结合, 大大提高了电流扩展能力, 提高了光提取效率和发光强度, 而薄 GaP 层的引入, 大大降低了金属有机物化学气相沉积(MOCVD)的生长时间和源材料的消耗; 另外, 复合 DBR 由两部分组成, 一部分用于反射近垂直入射的光子, 另一部分用于反射偏斜入射的光子, 扩大了反射角, 同时也增加了发射率, 从而提高了光提取效率^[10,11]. 带有复合电流扩展层和复合 DBR 的新型结构 LED 具有比常规结构 LED 更大的流明效率. 本文还分析了发光效率与结温的关系, 在 350 mA 工作电流下, 新型结构 LED 与常规结构 LED 的流明效率的比值与结温升的比值保持一致. 通过进一步研究可知, 限制大功率 LED 光强提高的主要因素是光提取效率低使得器件内部产生大量的热, 从而导致器件温度升高, 进一步限制了光提取效率, 继而形成一个恶性循环.

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA03A121)和国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB604902)资助的课题.

[†] E-mail: cheniyixin_410@emails.bjtu.edu.cn

2. 电流扩展层及反射层分析

2.1. 由 GaP 与 ITO 形成复合电流扩展层

运用电流分布模式,并且假设 p 型电极注入的电流平均分布,且电流密度为 J_0 , 对 ITO 与 GaP 的电流输运进行了计算和比较. 电流分布模式如下:

$$J_r = \frac{J_0}{1 + \frac{r}{l}}, \quad (1)$$

式中 r 是离开电极的距离, l 是电流扩散长度,

$$l = \left(\frac{\sigma d m k_B T}{J_0 e} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

这里 k_B 是玻尔兹曼常数; m 是 p-n 结的理想因子, 对于 III-V 族的复合半导体, 通常取 $m = 2$; d 和 σ 分别是电流扩展层的厚度和电导率^[12].

在本文实验中,高导电 ITO 与高掺杂 GaP 的载流子浓度分别为 $n_{\text{ITO}} = 2.4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 和 $n_{\text{GaP}} = 1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率分别为 $\mu_{\text{ITO}} = 35 \text{ cm} \cdot \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 和 $\mu_{\text{GaP}} = 62 \text{ cm} \cdot \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. 如图 1 所示, $3\lambda/4$ (λ 为 LED 的发射波长) 光学厚度的 ITO 的电流输运能力与 $30 \mu\text{m}$ 的 GaP 相当, 在离开电极边缘 $100 \mu\text{m}$ 处, $3\lambda/4$ 光学厚度的 ITO 的相对电流 J_r/J_0 达到 63%, $\lambda/4$ 光学厚度的 ITO 将达到 47%, 两者相差 16%. 为了减少 GaP 的厚度, 可采用减少生长时间的办法, 这同时也降低了生长难度. 本文采用了 500 nm 高掺杂 (掺杂浓度 $p > 1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 的 GaP 层和 $3\lambda/4$ 光学厚度的 ITO 相结合形成一种复合的电流扩展层, 大大增强了电流扩展能力^[13].

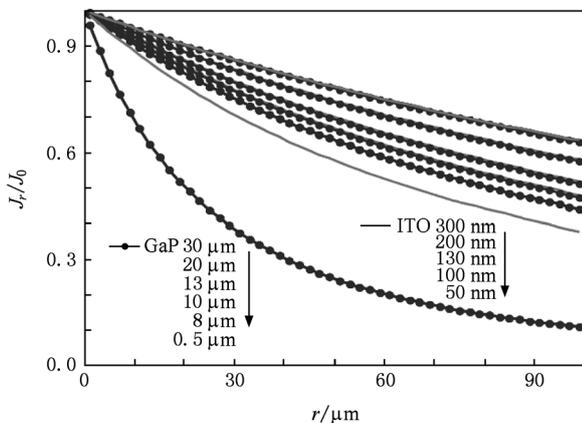


图 1 不同厚度下 ITO 和 GaP 导电薄膜的电流扩展

对于普通的 LED, 通常是利用 MOCVD 生长厚度大于 $8 \mu\text{m}$ 的 GaP 电流扩展层. 这样虽然可以实现高的掺杂 ($p > 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 增强电流扩展, 但是这种方法的生长时间长, 源材料消耗大; 而且 GaP 的折射率 n_1 与空气折射率 n_2 差距很大, 体内产生的光子一部分发射到体外, 一部分被反射回去. 当光垂直入射时, 透射系数由下式给出:

$$T = \frac{4n_r}{(1 + n_r)^2},$$

其中 n_r 为两种材料的折射率之比,

$$n_r = n_1/n_2. \quad (3)$$

根据 Snell 定律, 当光的入射角大于临界角 θ_c 时, 就会导致光的全反射. $\theta_c = \arcsin \frac{1}{n}$, 其中 n 是半导体材料的折射率. 考虑了全反射, 再假设体内产生的光子在空间各个角度上均匀分布且随机地偏振, 对所有的角度进行累加后得到的 LED 上表面总的光透射系数 \bar{T} 可表示为

$$\begin{aligned} \bar{T} &\cong \frac{(\sin \theta_c)^2}{2} T \\ &= \frac{2}{n_r(1 + n_r)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

在 AlGaInP 系 LED 中, 通过取 GaP 的折射率 $n_1 = 3.4$, 空气折射率 $n_2 = 1$, 计算后可以得出 $T = 70\%$. 然而, 由 $\theta_c = 17.1^\circ$ 得出 $\bar{T} = 3.0\%$, 大部分的光因为全反射而不能透射^[14].

利用热蒸发生长的 ITO 是一种透明的导电薄膜, 其方块电阻大约为 8Ω , 对于可见光频段的光子透过率大于 90% , 载流子浓度达到 $10^{20} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. 因此, 将这种导电薄膜用作 LED 的窗口层, 既增强了器件的电流扩展能力, 同时也对光子起到增透的作用. 当 ITO 的光学厚度为 $\lambda/2$ 时, 没有干涉效果; 当厚度为 $\lambda/4$ 或者 $3\lambda/4$ 时, 对应着较低的反射率. 本次实验中, 采用 $3\lambda/4$ 光学厚度的 ITO 薄膜, 其厚度约为 300 nm . 经测量, 在复合电流扩展层中, 由于存在符合增透原理的增透作用, T 由原来的 70% 逐渐增加, 总的光透射系数 $\bar{T} > 3.0\%$.

2.2. 复合 DBR 的设计

将两种不同结构的 DBR 叠在一起以得到更宽的反射角, 每一种结构的 DBR 都对应一个反射角. 一种是光学厚度为 $\lambda/4$ 的 15 对 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}/\text{AlAs}$, 用于反射垂直入射的光子; 另外一种是光学厚度大于 $\lambda/4$ 的 15 对 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}/\text{AlAs}$, 用于反射斜入射

的光子. 测试结果显示, 对应于最大的反射率, 复合 DBR 的反射角达到 35° , 而常规单 DBR 的反射角仅为 17° , 前者是后者的两倍左右.

与单 DBR 相比, 复合 DBR 的宽反射角能够使

得更多的光子从出光面发射到体外, 图 2 是带有复合 DBR 的 LED 的白光反射谱. 从图 2 可以明显看出, 复合 DBR 的反射谱的谱宽为 36.4 nm , 而单 DBR 的谱宽通常只有 15 nm .

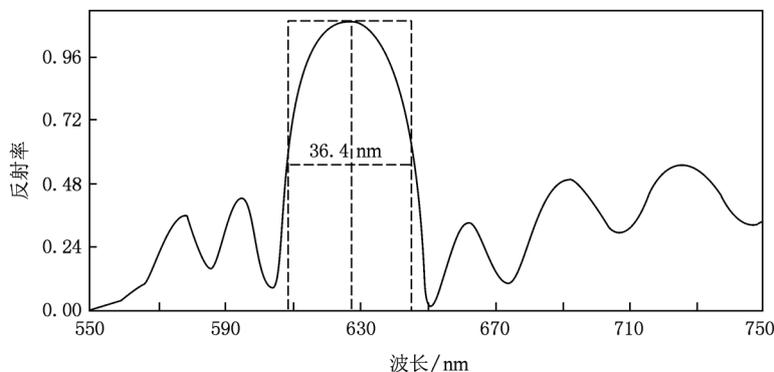


图 2 复合 DBR 的白光反射谱

3. LED 器件结构与制备工艺

AlGaInP 系 LED 外延片采用 MOCVD 外延生长, 衬底为掺 Si 的 GaAs 晶体, $\langle 100 \rangle$ 方向偏 $\langle 111 \rangle$ 方向 2° . 带有复合电流扩展层和复合 DBR 的新型结构 LED 如图 3(a) 所示, 图 3(b) 为常规结构 LED. 新型结构 LED 和常规结构 LED 的相同部分是在 350 nm GaAs 衬底上有一个厚度为 $0.22 \mu\text{m}$ 的 Si 掺杂 GaAs 缓冲层, 一个厚度为 $0.325 \mu\text{m}$ 的 Si

掺杂 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 下限制层, 一个 $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})\text{In}_{0.5}\text{P}/(\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9})\text{In}_{0.5}\text{P}$ 多量子阱结构的有源区, 一个厚度为 $1.025 \mu\text{m}$ 的 Mg 掺杂 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})\text{In}_{0.5}\text{P}/(\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6})\text{In}_{0.5}\text{P}$ 上限制层, 其掺杂浓度为 $p = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 常规结构 LED 带有单 DBR, 电流扩展层是厚度为 $8 \mu\text{m}$ 的 GaP. 新型结构 LED 生长了复合 DBR, 同时, 外延生长的电流扩展层是厚度为 500 nm 的 GaP, 通过后工艺在 GaP 表面制备了厚度为 300 nm 的 ITO 导电光增透层, 既增加了电流的扩展, 同时提高了光提取效率.

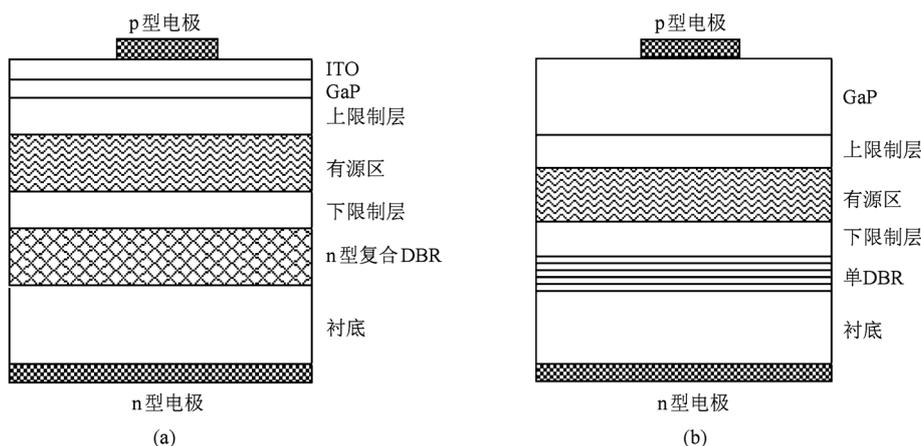


图 3 两种 LED 的结构示意图 (a) 新型结构, (b) 常规结构

LED 器件的制备工艺流程并不复杂. 首先, 厚度为 300 nm 的 ITO 薄膜通过热蒸发的方式生长在新型结构 LED 的外延片上; 然后, 在两种结构 LED

上分别制备 p 型 Au-Zn-Au 电极, 将衬底减薄到 $200 \mu\text{m}$; 接着, 分别制备 n 型 Au-Ge-Ni 电极. 由于是大功率器件, 周期为 1 mm , 所以 p 型电极采用了双压

焊点,电极图形如图4所示.将做好电极的器件在氮气环境下快速退火30 s,然后切割成单个管芯.将没有用环氧树脂封装的管芯固定在管座上进行测试分析.常温下LED的流明效率、光功率以及主波长的测试是利用远方公司生产的PMS-50增强型紫外-可见-近红外光谱分析系统完成的.

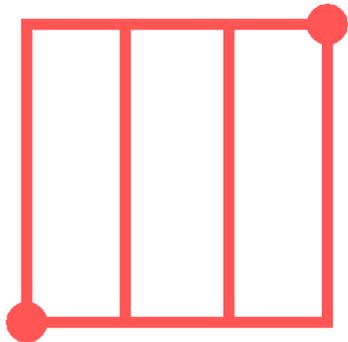


图4 大功率LED的p型电极形状

4. 结果及分析

将新型结构与常规结构的两种LED进行光电特性的测试分析,图5是两种LED的流明效率随电流的变化关系.测试结果显示:在相同的工作电流下,新型结构LED的流明效率远大于常规结构LED.当工作电流为200 mA时,流明效率分别为13.39和4.75 lm/W.随着电流的增加,器件内产生了大量的热,造成温度升高,流明效率降低.当工作电流为350 mA时,两种结构LED的流明效率分别降至10.85和4.05 lm/W;当工作电流为700 mA时,两种结构LED的流明效率分别降至5.55和2.58 lm/W.显然,随着工作电流的增加,新型结构LED内部发热比常规LED内部发热要低得多.

图6是两种结构LED的输出光功率随电流的变化关系,其结果与流明效率的结果具有一致性,在相同的工作电流下,新型结构LED的输出光功率大于常规结构LED.当注入电流为350 mA时,两者的光功率分别为49.98和17 mW.随着注入电流的增加,两种结构LED的光功率都呈现增加的趋势,但是,新型结构LED的输出光功率的增加幅度要大得多.这主要是由于相同注入电流的条件下新型结构LED的流明效率大,注入电流在有源区转换成光子后大部分能够发射到体外,不能发射到体外而在体内发热的光子相应地减少了.

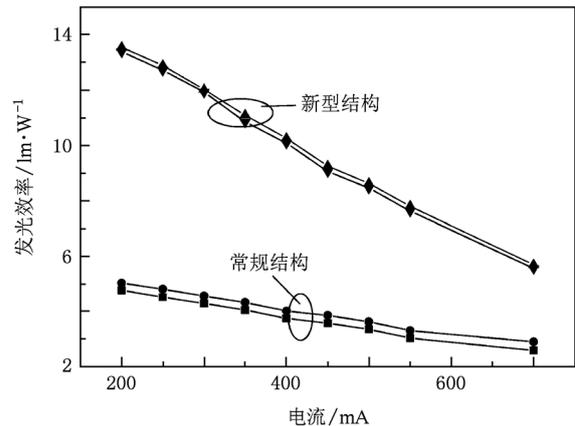


图5 两种结构LED的流明效率随工作电流的变化

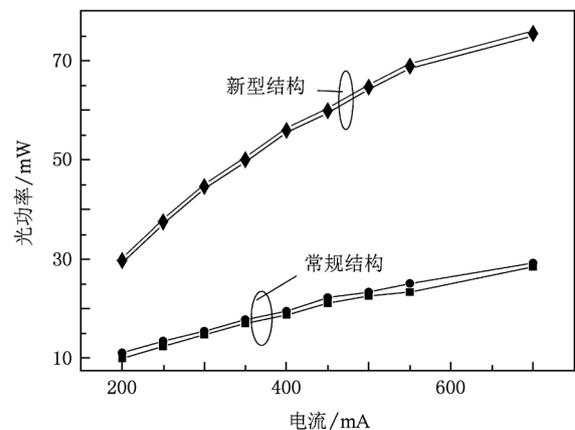


图6 两种结构LED的输出光功率随注入电流的变化

我们分析了LED的发射波长随电流的变化,随着注入电流的增加,LED发射波长产生红移现象,表明了器件内部热量的产生.图7是两种结构LED的主波长随电流的变化关系.从图7可以看出:当电流较小时,两种结构LED的主波长相差不大;当电流为200 mA时,新型结构LED和常规结构LED的主波长分别为622.7和622.8 nm;随着电流的增加,两种结构LED都出现了不同程度的红移,但是常规结构的LED红移较大,两者波长的差距越来越大;当电流为350 mA时,两种结构LED的主波长分别为623.6和624.1 nm,相差0.5 nm;当电流为700 mA时,两种结构LED的主波长分别为625.3和626.6 nm,相差1.3 nm.产生上述现象的主要原因如下:当电流增加时,大量光子不能发射到体外,在体内产生了热,导致器件升温,禁带宽度变窄,使波长红移.新型结构LED比常规结构LED内部发热少得多,因而其主波长随电流增加产生的红移也相

应地减小.

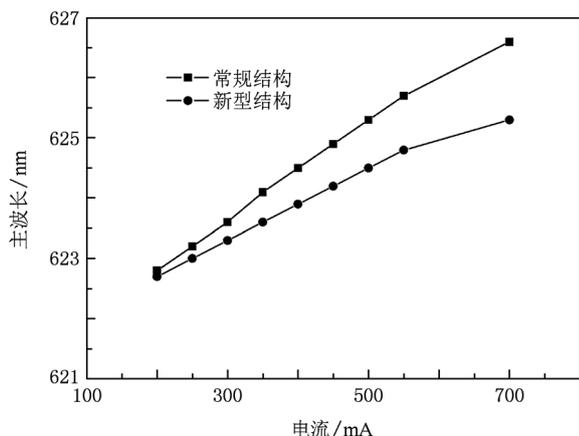


图7 两种结构 LED 的主波长随电流的变化

为了进一步量化两种结构 LED 的发热程度,我们测量了 350 mA 工作电流下器件的结温升. 本文采用的方法是快速转换技术 (fast-switch techniques), 这种方法的优势是当器件停止工作时能立即显示出 LED 的结温升^[15]. 当 LED 注入电流时, 有源区内由于热的产生会导致温度升高, 这时热响应图会显示出结温升. 如图 8 所示, 从最开始的若干微秒结温逐渐升高, 若干分钟后达到稳定. 在实验过程中, 用于测试的两种结构 LED 采用完全相同的封装形式, 并使用同一台测试系统在相同的条件下进行测试, 这样就排除了其他散热条件可能带来的结温升. 因此, 本文中的测试结果仅仅反映了 LED 发光效率的不同而带来了不同的结温升. 结果显示, 当注入电流为 350 mA 时, 常规结构 LED 的结温升达到 20 °C, 平均为新型结构 LED 结温升的 3 倍以上, 与两者流明效率以及输出光功率有着一致的比例关系. 这进一步说明, 器件内部热的产生是限制 LED 输出性能提高的主要因素, 提高 LED 的发光效率对于提高大功率 LED 的亮度至关重要.

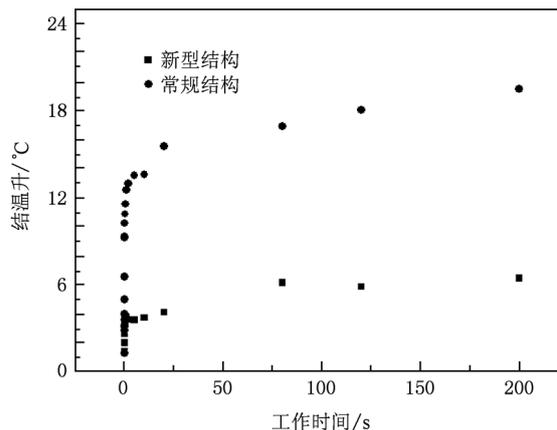


图8 两种结构 LED 在注入电流为 350 mA 时的结温升

5. 结 论

本文分析了 AlGaInP 大功率 LED 出光受到限制、发光效率不高的主要原因. 提出并制备了一种带有复合电流扩展层和复合 DBR 结构的新型器件, 使得从电极注入的电流在有源区充分地扩散, 同时提高了 DBR 发光层对光子的反射率. 研究表明, 这种新型结构 LED 与常规结构 LED 相比, 整体性能得到了很大的提升, 在 350 mA 注入电流下, 两者裸芯的光功率分别为 17 和 49.48 mW. 同时, 对器件产生的热进行了量化, 测试得到 350 mA 注入电流下两者的结温升分别为 20 和 6.5 °C. 分析了 AlGaInP 大功率 LED 发光效率与结温的关系, 新型结构 LED 与常规结构 LED 的流明效率的比值以及输出功率的比值与结温升的比值保持一致, 说明通过减少内部发热和控制结温可以大大提高 LED 的发光效率和输出功率.

感谢北京工业大学北京市光电子技术实验室的刘莹、韩金茹、朱文祥、李慧敏、吴文容、刘娜等工作人员对本文实验工作的支持和帮助.

[1] Yen C H, Liu Y J, Huang N Y, Yu K H, Chen T P, Chen L Y, Tsai T H, Lee C Y, Liu W C 2008 *IEEE Photon. Techn. Lett.* **20** 1923

[2] Liu L, Fan G H, Liao C J, Gao 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]

[3] Altieri P, Jaeger A, Windisch R 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 086101

[4] Sugawara H, Itaya K, Hatako S, Geni C 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** 6195

[5] Da X L 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Technology) p107 (in Chinese) [达小丽 2007 博士学位论文 (北京:北京工业大学) 第 107 页]

[6] Chen Y X, Shen G D, Li J J, Han J R, Xu C 2009 *Chin. J. Semicond.* **30** 084009 (in Chinese) [陈依新、沈光地、李建军、韩金茹、徐晨 2009 半导体学报 **30** 084009]

- [7] Windisch R, Rومان C, Meinschmidt C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2315
- [8] Chen Y X, Zheng W H, Chen W, Chen L H, Tang Y D, Shen G D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8083 (in Chinese) [陈依新、郑婉华、陈薇、陈良惠、汤益丹、沈光地 2010 物理学报 **59** 8083]
- [9] Zhang J M, Zou D S, Liu S N, Xu C, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2905 (in Chinese) [张剑铭、邹德恕、刘思南、徐晨、沈光地 2007 物理学报 **56** 2905]
- [10] Han J, Li J J, Deng J, Xing Y H, Yu X D, Lin W Z, Liu Y, Shen G D 2008 *J. Optoelectron. Laser* **19** 456 (in Chinese) [韩军、李建军、邓军、邢燕辉、于晓东、林委之、刘莹、沈光地 2008 光电子·激光 **19** 456]
- [11] Yu X D, Han J, Li J J, Deng J, Lin W Z, Da X L, Chen Y X, Shen G D 2007 *Chin. J. Semicond.* **28** 100 (in Chinese) [于晓东、韩军、李建军、邓军、林委之、达小丽、陈依新、沈光地 2007 半导体学报 **28** 100]
- [12] Zhang K, Zhu F C, Huan H A, Weea T S 2000 *Thin Solid Films* **376** 255
- [13] Zhu Y X 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Technology) p89 (in Chinese) [朱彦旭 2007 博士学位论文 (北京:北京工业大学) 第 89 页]
- [14] Robert F P 2004 *Semiconductor Device Fundamentals* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p262 (in Chinese) [罗伯特 F P 2004 半导体器件基础(中译本)(北京:电子工业出版社) 第 262 页]
- [15] Lee C C 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1706

Relationship between light efficiency and junction temperature of high power AlGaInP light-emitting diode *

Chen Yi-Xin[†] Shen Guang-Di Gao Zhi-Yuan Guo Wei-Ling Zhang Guang-Chen Han Jun Zhu Yan-Xu
(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 7 October 2010; revised manuscript received 8 January 2011)

Abstract

One of the main problems of high power AlGaInP light-emitting diode (LED) is the heat generated seriously at large working current, which is caused by the weak current spreading, the photon blocking and absorbing of p-type or n-type electrode, and the critical reflection at the interface between the device and air. The heat inside can lead to the restriction on light output, and gives rise to low light efficiency and the low luminous intensity. In this paper, we introduce a new LED structure which is composed of compound current spreading layers and compound distribute Bragg reflector (DBR) layers. For the new structure LED, the injected current spreads adequately and the reflectivity is improved by the compound DBR layers. The testing results show that the performance of new structure LED is much better than that of the conventional LED, and that at a working current of 350 mA, the output powers of the two kinds of LEDs (which are unpackaged) are 17 and 49.48 mW respectively. At the same time, the heat testing results show the relationship between LED light efficiency and junction temperature, and the consistence between the junction temperature ratio and the ratio of light efficiency for the two kinds LEDs, which implies that LED light efficiency can be improved by reducing heat generated inside and reducing the junction temperature.

Keywords: compound current spreading layer, compound distributed Bragg reflector layer, light efficiency, junction temperature

PACS: 72.80.Ey, 82.45.Qr, 74.62.Dh, 73.20.At

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA03A121) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB604902).

[†] E-mail: cheniyixin_410@emails.bjtu.edu.cn