

新型 AlGaInP 系发光二极管饱和特性 与寿命的研究*

马莉 沈光地[†] 陈依新 蒋文静 郭伟玲 徐晨 高志远

(北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

(2013年9月30日收到; 2013年10月22日收到修改稿)

针对 AlGaInP 系发光二极管 (LED) 电极阻挡出光、衬底吸收、全反射角小导致器件出光效率低、热积累大、饱和特性差等问题, 提出了一种具有复合电流输运增透窗口层、复合 DBR 反射镜和电流阻挡层结构的新型 LED, 并测试了其饱和特性和寿命. 电流分布模拟显示: 新型 LED 电极下仅存在极小的无效电流; 实验结果表明新型 LED 出光效率高, 饱和电流大, 饱和电流时光强约为常规 LED 的 3 倍, 光电性能明显提升. 器件饱和特性和老化实验研究显示: 新型 LED 寿命长达 17.8×10^4 h, 器件内部发热量低, 具有高饱和特性和高可靠性, 适合在大电流大功率下工作.

关键词: 电流阻挡层, 饱和特性, 寿命

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

DOI: 10.7498/aps.63.037201

1 引言

自从 1962 年第一只红光发光二极管 (LED) 诞生以来, 经过几十年的研究, LED 已经有了很大的发展. 与普通光源相比, LED 具有功耗低、亮度高、寿命长、响应速度快等特点, 被广泛应用于显示和照明领域: 如交通信号灯、背光源、全彩显示和通用照明等^[1,2]. LED 在某些产品中的应用, 如全天候 LED 电视, 要求 LED 尺寸小, 但能在大电流大功率下工作, 因此对 LED 的热特性要求很高. LED 的基本原理是将电能转化为光能, 同时伴随着热能的产生与散发. 一般情况下, 一部分注入的电子空穴对在有源区发生辐射复合, 发出光子, 另一部分由于材料晶格缺陷、泄露电流等发生非辐射复合, 转变成热能而浪费掉. 此外, 对于 AlGaInP 系 LED 而言, GaP 窗口层与空气折射率相差较大导致的全反射、电极阻挡、衬底吸收等原因, 使得有源区产生的光子不能全部射出 LED 体外, 最终转化为热能. 发热不仅会降低 LED 最终的电光转换效率, 而且对

其工作特性具有严重的影响^[3-6].

针对上述问题, 学术界曾提出很多解决方法, 如采用 DBR 反射镜^[7,8], 对 LED 表面进行粗化^[9,10], 采用透明衬底 (TS)GaP^[11,12] 等. 然而, 一个重要的影响 LED 出光效率的因素, 即电极阻挡出光缺乏有效解决方案. LED 工作时, 注入电流在 LED 电极正下方所占比例较大, 但该部分注入电流所产生的光子因被电极阻挡或吸收无法射出 LED 体外, 在内部转变为热导致器件升温, 形成无效电流, 严重影响了 LED 的光电性能. 对此, 国外有人曾利用二次外延或离子注入在 LED 上限制层与电流扩展层之间制作电流阻挡层^[13], 以上方法能够阻挡电流从电极直接向下输运, 但其工艺复杂、设备昂贵、成本高、成品率低. 本文提出将复合电流输运增透窗口层、复合 DBR 反射镜和电流阻挡层相结合的工艺, 制备出新型 LED. 通过仿真与实验测量分析, 发现新型 LED 具有更大的光强输出、更优的饱和特性和寿命, 器件出光多, 发热少, 整体光电性能得到明显提高, 适合在大电流大功率下工作.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11204009) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: gdshen@bjut.edu.cn

2 新型LED理论分析与制备

2.1 LED 电流-光强饱和分析

我们知道, 半导体材料中, 载流子分布在能带中不同能量的量子态上, 对于能量为 E 的一个量子态, 其被电子占据的概率遵从费米分布, 分布函数^[14]

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_0 T}\right)}, \quad (1)$$

其中, E_F 为费米能级. 对于非平衡状态, 如注入电流, 则平衡费米能级由电子与空穴的准费米能级 E_{Fn} 与 E_{Fp} 取代. 由(1)式分析, 费米分布函数 $f(E)$ 与温度 T 的关系如图 1 所示.

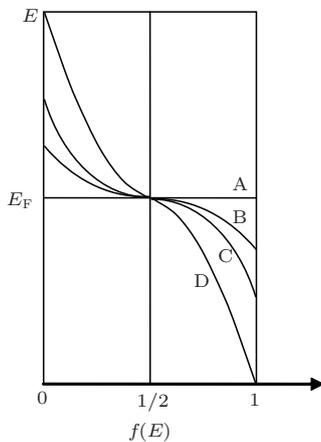


图1 $f(E)$ 与 T 的关系曲线图(曲线 A, B, C, D 分别代表温度 T 逐渐增加的 $f(E)$ 曲线)

由图 1 看出, 随着温度 T 的增加, 电子在能量空间 E 中的分布范围变宽; 电子本身平均能量也随着 T 的升高而增加, 导致其向能级更高的位置分布. LED 工作时内部发热增加, 温度 T 升高, 电子

分布范围变宽, 对于一定注入电流下的 LED, 注入电子数目不变, 因此单位 k 空间的注入电子数目变少, 电子浓度降低, 价带中空穴情况亦然^[15]. 辐射复合概率 $R = rnp$, 载流子浓度降低使得辐射复合概率 R 大大下降, 同时带间光子吸收概率上升, 泄漏电流增加, 载流子通过杂质缺陷复合概率增加, 更多的注入电能转化为热能, 进而推动温度继续上升, 形成恶性循环, 最终器件光强输出达到饱和, 而后光强随电流增加反而降低, 光电性能迅速恶化.

2.2 器件设计与制备

由上述分析可知, AlGaInP 系 LED 的电极阻挡出光、GaAs 衬底吸光、GaP 窗口层与空气折射率差形成的全反射临界角等因素均导致其出光效率低, 器件热积累高, 饱和特性差. 对此, 我们提出一种新型 LED 器件结构, 该结构在常规 LED 基础上引入电流阻挡层、复合 DBR 反射镜和复合电流输运增透窗口层. 阻挡层为绝缘薄膜, 阻挡电流向电极正下方注入, 使电流向电极四周扩展, 电极下不发光; 复合 DBR 是将两种不同的 DBR 叠在一起, 使更多的射向衬底的光子反射到出光面发射到体外, 减少衬底吸收; 复合电流输运增透窗口层由薄 GaP 与高导电增透薄膜组成, 可使电流均匀分布, 增强电流扩展, 增加光出射的临界角, 提高可透光区域的透射率^[16].

AlGaInP 系 LED 衬底为 GaAs, 外延片采用 MOCVD 生长. 新型 LED 外延结构包括 DBR 复合反射镜(15 对光学厚度为 $\lambda/4$ 的 $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/AlAs$ 和 15 对光学厚度大于 $\lambda/4$ 的 $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/AlAs$ 组成)、n 型限制层、多量子阱有源区、p 型限制层、薄 GaP 窗口层. 器件制备过程如下:

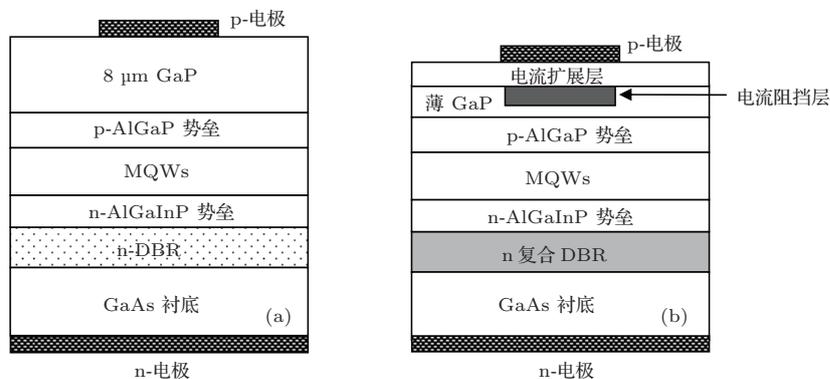


图2 新型 LED 与常规 LED 剖面图 (a) 常规 LED; (b) 新型 LED

首先, 在薄 GaP 上制作电流阻挡层, 并生长一层透明导电薄膜 (折射率 n 约为 1.7, 厚度为 $3\lambda/4n$); 然后, 在 LED 上制备 p 型 AuZnAu 电极, 将衬底减薄到 200 μm ; 接着制备 n 型 AuGeNi/Au 电极, 将做好电极的器件在氮气环境下快速退火; 最后进行划片压焊, 芯片尺寸为 8 mil (200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$). 为了进行对比, 我们制备了相同尺寸的新型和常规 LED, 两者器件结构如图 2 所示.

3 仿真与测试结果分析

为了直观地看出电流阻挡层的作用, 采用二维器件模拟软件对器件电流密度分布进行了仿真对比. 电极直径为 90 μm , 电流阻挡层直径设计为 82 μm . 图 3 为两种结构 LED 器件有源区电流密度分布剖面曲线图. 图中看出, 二者的电流密度均随电流扩展长度的增加而减小, 由于新型 LED 电流不从电极下方注入, 因此在靠近电极边缘处电流密度很大, 向电极下方急剧减小, 向电极外较快减小, 但在器件边缘处, 其电流密度仍远高于常规 LED, 且此处的高注入电流密度所产生的光不会被电极阻挡, 与常规 LED 相比, 新型 LED 有效阻挡了电极下方电流的注入和光的产生.

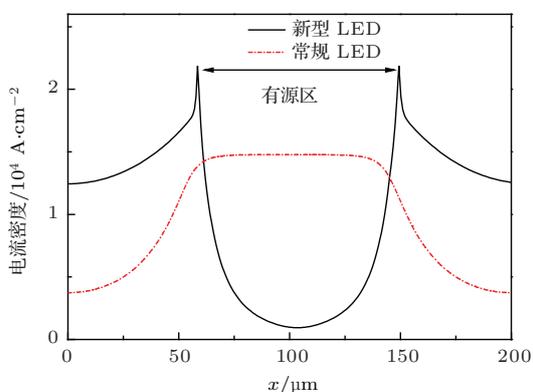


图 3 新型 LED 与常规 LED 电流分布模拟

图 4 为新型 LED 与常规 LED 的 I - V 特性图, 新型 LED 的电压无明显增加, 说明新型器件结构没有明显增加 LED 的串联电阻, 二者因串联电阻所产生的焦耳热也几乎相等. 图 5 (a) 和 (b) 为分别为两者裸芯的光强-电流曲线图及光功率-电流曲线图. 图 5 (a) 中可以看到新型 LED 相对于常规 LED 存在很大优势. 首先, 在 20 mA 工作电流下, 两者的光强分别为 70.9 mcd 和 148.5 mcd, 新

型 LED 光强约为常规 LED 的 2 倍. 这主要归功于新型 LED 的电流控制和高出光效率. 由于电流方向的改变, 使得电极下方电流非常小, 尽管发光的有源区面积小于常规 LED, 但其可透光部分的量子阱的发光效率大大提高, 且复合电流输运增透窗口层和复合 DBR 同时增加了新型 LED 的出光率, 因而发光强度远大于常规 LED. 其次, 随着电流的增加, 新型 LED 光强增加更快, 二者饱和电流分别为 75 mA 和 110 mA, 饱和电流下的光强分别为

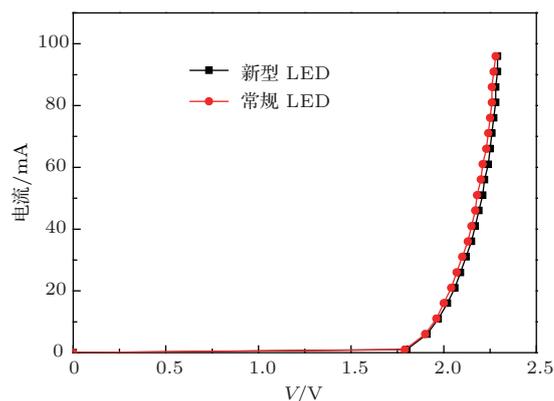


图 4 新型 LED 与常规 LED I - V 曲线图

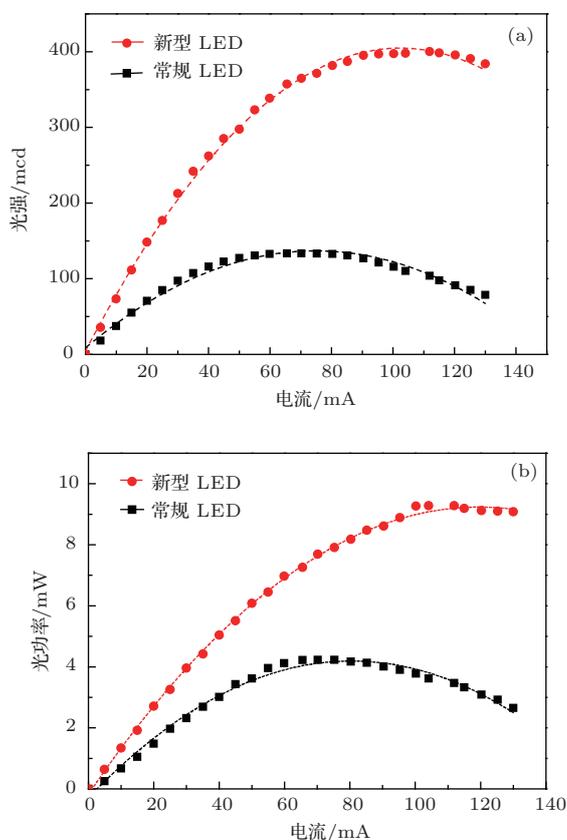


图 5 (a) 新型 LED 与常规 LED 光强-电流曲线图; (b) 新型 LED 与常规 LED 光功率-电流曲线图

133.5 mcd和400.1 mcd, 新型LED饱和电流光强约为常规LED的3倍. 产生上述现象的原因如下: LED饱和电流与器件发热有关, 由 $I-V$ 曲线推算两种LED的焦耳热几乎相同, 而新型LED的结构设计使得器件出光效率增加, 因此器件内部热量积累小, 温度随电流增加相对较少, 饱和电流更大; 由于温升较少, 对辐射复合概率影响较小, 所以相比20 mA工作电流, 饱和电流下光强增加更多. 图5(b)为采用积分球测量的光功率-电流变化曲线, 图中可看出, 20 mA工作电流下, 新型LED的光功率约为常规LED的1.8倍, 饱和电流下约为2.2倍, 两者增幅均小于光强增幅, 这主要是由于新型LED的薄GaP窗口层降低了器件的侧壁出光效率, 但该新型设计同时节约了器件外延生长的时间和成本. 以上分析表明新型LED成本低, 发光效率高, 小电流下具有大光强输出, 更适在大电流大功率下工作.

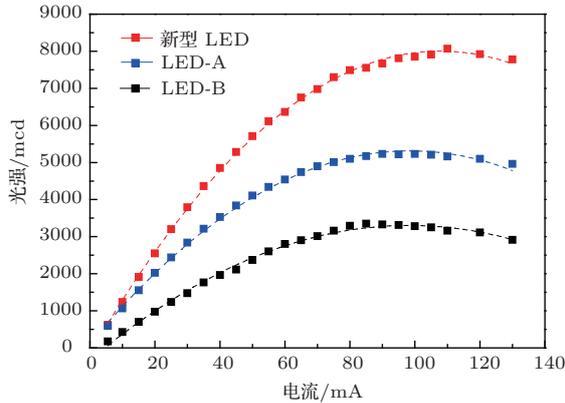


图6 新型LED, LED-A和LED-B光强-电流饱和特性图

为了进一步比较新型LED的性能, 我们将其与两家国内和国际著名公司的LED产品进行了封装对比. LED-A是某著名国际公司尺寸为9 mil的LED, 制备工艺为常规工艺加ITO透明导电薄膜; LED-B是某著名国内公司尺寸为9 mil的常规工艺LED, 三种LED封装工艺完全相同. 图6为三者光强-电流饱和特性图, 新型LED, LED-A和LED-B的饱和电流分别为110 mA, 90 mA, 85 mA, 饱和电流下的光强分别为8070 mcd, 5230 mcd和3350 mcd. 假定三种LED结构中杂质电离和本征电离与温度的关系相同, 则图6表示的是注入载流子引起的辐射复合发光被吸收导致发热以及非辐射复合发热对器件性能影响的问题. LED-A和LED-B电极下存在较大的无效电流, 衬底吸收大, 出光效率低, 因此随着电流增加, 二者器件内部温升较大,

能带中载流子热分布变宽, 复合概率下降, 饱和电流和输出光强低; 新型LED结构中的电流阻挡层、复合DBR衬底和复合电流运输增透窗口层使得器件电极下无电流注入, 出射概率高, 发热和热量积累少, 器件温升较小, 因而具有更好的饱和特性和更大的输出光强.

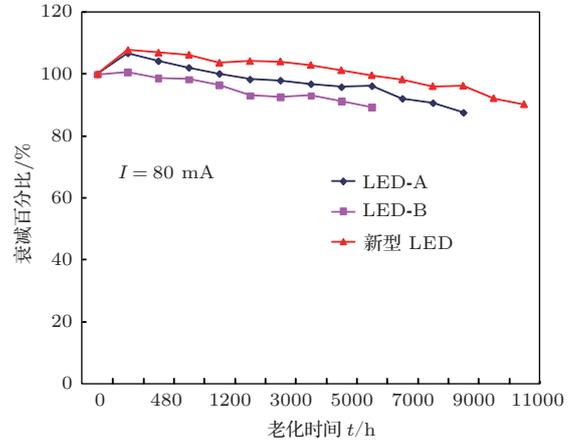


图7 新型LED, LED-A和LED-B亮度衰减随时间变化

在室温25 °C下, 对以上三种LED进行以大电流加速老化试验, 老化电流为80 mA, 每隔一定时间测试光强, 设定初始光强为100%, 取光强衰减到90%时计算器件寿命. 光强随时间变化曲线如图7所示, 新型LED, LED-A, LED-B分别在老化时间为11120 h, 8240 h, 5645 h时光强衰减到90%. LED以电流 I 为应力的加速老化试验外推器件寿命时常采用艾伦模型, LED寿命和电流的关系式为

$$t = t_0(I/I_0)^{-n}, \quad (2)$$

式中, t_0 为指定电流 I_0 下的寿命; t 为老化测试电流 I 下的寿命; n 为经验常数. 取经验常数 n 为2, 外推出在20 mA, 室温25 °C时LED-A和LED-B寿命分别为 13.2×10^4 h, 9×10^4 h, 而新型LED寿命长达 17.8×10^4 h, 可见新型LED在工艺上设计合理, 具有很好的可靠性, 这正体现了新型LED低发热、高出光的优良器件设计与工作特性.

4 结 论

本文针对AlGaInP系LED电极阻挡出光、衬底吸收、全反射角小导致器件出光效率低、热积累大、饱和特性差等问题, 提出一种结合了电流阻挡层、电流运输增透窗口层和复合DBR反射镜的新

型LED结构. 对新型LED和常规LED内部的电流分布模拟和实验结果表明, 新型LED电极下无效电流极小, 发热低, 出光效率高, 光电性能明显提升. 器件饱和特性和老化实验的研究表明, 新型LED器件内部发热量低, 具有高饱和特性和高可靠性, 适合在大电流大功率下工作, 更能满足小尺寸超高亮度LED的需求.

参考文献

- [1] Lee Y J, Tseng H C, Kuo H C, Wang S C, Chang C W, Hsu T C, Yang Y L, Hsieh M H, Jou M J, Lee B J 2005 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17** 1041
- [2] Windisch R, Rooman C, Meinschmidt S, Kiesel P, Zipperer D, Dohler G H, Drtta B, Kuijk M, Borghs G, Heremans P 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2315
- [3] Yamakoshi S, Hasegawa O, Hamaguchi H, Abe M, Yamaoka T 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 627
- [4] Chitnis A, Sun J, Mandavilli V, Pachipulusu R, Wu S, Gaevski M, Adivarahan V, Zhang J P, Khan M A, Sarua A, Kubal M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3491
- [5] Cao X A, LeBoeuf S F, Rowland L B, Yan C H, Liu H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3614
- [6] Pavei M, Manfredi M, Salviati G, Armani N, Rossi F, Meneghesso G, Levada S, Zanoni E, Du S, Eliashevich I 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3403
- [7] Chang S J, Chang C S, Su Y K 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 1822184
- [8] Sugawara H, Itaya K, Hatakoshi G 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** 619526198
- [9] 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]
- [10] Yan L J, Sheu J K, Wen W C, Liao T F, Tsai M J, Chang C S 2008 *IEEE Photon. Techn. Lett.* **20** 1724
- [11] Hoffer G E, Vanderwater D A, DeFevre D C 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 8032805
- [12] Chang S J, Sheu J K, Su Y K 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 419924202
- [13] Sugawara H, Ishikawa M, Yoshihiro N, Nishikawa Y, Naritsuka S 1991 *U. S. Patent* 5 048 035[1991-09-10]
- [14] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2008 *The Physics of Semiconductor* (Beijing: National Defense Industry Press) p70 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋升 2008 半导体物理学 (北京电子工业出版社) 第70页]
- [15] Schubert E F 2006 *Light-emitting diodes* (Cambridge University Press) p54
- [16] Chen Y X, Shen G D, Gao Z Y, Guo W L, Zhang G C, Han J, Zhu Y X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087206 (in Chinese)[陈依新, 沈光地, 高志远, 郭伟玲, 张光沉, 韩军, 朱彦旭 2011 物理学报 **60** 087206]

Investigation of the saturation characteristic and lifetime of the novel AlGaInP lightemitting diodes*

Ma Li Shen Guang-Di[†] Chen Yi-Xin Jiang Wen-Jing Guo Wei-Ling
Xu Chen Gao Zhi-Yuan

(Key Laboratory of Opto-electronics Technology of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 30 September 2013; revised manuscript received 22 October 2013)

Abstract

Absorption of substrates, small angle for total reflection, and heat generated by photon blocking of electrode, all can lead to saturation and performance degradation of AlGaInP light emitting diodes(LEDs). In this paper, a novel LED composed of compound current spreading layer, compound DBR reflectors, and current blocking layer, is proposed, the saturation characteristic and lifetime are also tested. Simulation results show that there is only tiny invalid photocurrent through the electrode in the novel LEDs. Experimental results indicate that the novel LEDs have higher extraction efficiency and better saturation characteristics. Saturation current of the novel LEDs is as high as 110 mA, and the light intensity is enhanced by treble at saturation current as compared to the conventional LEDs. The accelerated aging test shows that the lifetime of the novel LEDs is as long as 17.8×10^4 hours, which means the novel LEDs have high reliability and can be used with high current.

Keywords: current blocking layer, saturation characteristic, lifetime

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

DOI: 10.7498/aps.63.037201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.11204009).

[†] Corresponding author. E-mail: gdshen@bjut.edu.cn