

黄绿光发光二极管光衰性能研究^{*}

高鹏^{1,2} 冯彦斌² 李维环² 吴超瑜^{1,2} 高文浩^{1,2} 付贤松¹ 宁振动^{2,3**}

(¹ 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津, 300160) (² 天津三安光电有限公司, 天津, 300160)

(³ 厦门大学物理系, 福建, 厦门, 361005)

2018-08-07 收稿, 2018-12-23 收改稿

摘要: AlGaInP 是 GaAs 基 LED 有源区主要材料, 广泛应用于黄绿光至红光波段的 LED。但在短波段尤其是黄绿光波段 (565~575 nm), 因其材料组成较接近间接带隙, 其发光效率和稳定性存在问题。目前黄绿光功率衰减以俄歇复合损耗、非复合辐射中心损耗、载流子损耗为主。所以研究相同生长温度不同阱垒厚度、量子阱相同厚度不同生长温度、P 型掺杂层掺杂浓度对发光光衰的影响。发现较薄的 MQW 阱垒厚度、较高的 MQW 生长温度及 P-space 后端 P 型层前端插入一层 20 nm 厚度、 $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度的高掺杂层三种方案可以改善黄绿光发光二极管光衰性能。

关键词: AlGaInP 发光二极管; 黄绿光; 光衰; 多量子阱

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3819(2019)03-0203-04

DOI: 10.19623/j.cnki.rpsse.2019.03.011

Study on the Degradation of Yellow-green Light-emitting Devices

GAO Peng^{1,2} FENG Yanbin² LI Weihuan² WU Chaoyu^{1,2} GAO Wenhao^{1,2}

FU Xiansong¹ NING Zhendong^{2,3}

(¹ School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300160, CHN)

(² Tianjin Sanan optoelectronics Co., Ltd, Tianjin, 300160, CHN)

(³ Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361005, CHN)

Abstract: AlGaInP was the main material of GaAs-based LED active region and was widely used for LED in yellow-green light to red light. However, in the short wavelength band, especially in the yellow-green band (565~575 nm), its luminous efficiency and stability had some problems because of its material composition close to the indirect bandgap. At present, the yellow-green optical decay was dominated by Auger composite loss, non-composite radiation center loss, and carrier loss. Therefore, the effects of different well/barrier thicknesses at the same growth temperature, different growth temperatures of multiple quantum wells, and the doping concentration of P-type doping layers on luminescence decay were studied. It is found that three ways of thinner MQW barrier thickness, higher MQW growth temperature and inserting a layer of 20 nm thickness, $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ concentration of highly doped layer between P-space layer and P-type layer can improve yellow-green light-emitting diode light decay performance.

Key words: AlGaInP LED; yellow-green; luminous decay; multiple quantum well (MQW)

* 基金项目: 天津市科技支撑、新材料重大专项项目 (17YFZCGX00330, 18ZXCLGX00080)

** 联系作者: E-mail: nzd611@163.com

引言

目前 LED 产业发展迅速,全色系 LED 产品均得到广泛的应用,但是不同波段的光色研究程度相差较大,比如 GaN 基的蓝光 LED 和 GaAs 基的红光 LED,其发光效率和稳定性均得到了很好的优化^[1-2]。然而黄绿光 LED 产品各项性能仍需进一步研究优化^[3]。黄绿光 LED 的发光波长(565~575 nm)介于 InGaN 材料体系和 AlGaInP 材料体系之间^[4],两种材料体系的理论发光效率都比较低。目前工业生产主要还是用 AlGaInP 材料体系来进行外延生长。因用于黄绿光 LED 的 AlGaInP 材料其带隙非常接近间接带隙,其俄歇复合概率增加,且生长时需要高的 Al 含量,在生长过程中容易引入氧元素等杂质,导致晶体质量变差,这些杂质成为非辐射复合中心使 LED 器件的光功率衰减,可靠性降低;同时由于黄绿光多量子阱(Multiple quantum well, MQW)的稳定性较其他波段偏差,载流子的损耗对光衰减影响程度加大^[5-9]。针对黄绿光的光衰问题,国内外采用的主要方法有以下几种:第一是在量子阱与 P-AlInP 层之间插入 Al 组分更高的 AlInP 材料,降低载流子溢流现象改善光衰问题^[10];第二是在 N-AlInP 层与量子阱之间插入不对称谐振隧道层或超晶格结构层,以期望提高器件的内量子效率然后降低光衰^[11]。这些方法虽然可以改善光衰问题,但由于结构复杂,并不适用大批量生产中。本文针对目前器件发光功率衰减比较常见的俄歇复合损耗、非复合辐射中心损耗、载流子损耗三种损耗方式,通过对黄绿光波段多量子阱波长和生长速率一致的前提下进行三种光衰实验又通过调节量子阱 Al 组分,对不同条件下的可靠性进行了分析。

1 实验部分

外延片样本材料均通过 MOCVD 进行制备,设备型号为德国 Aixtron 2800G4,单炉可生长 101.6 mm(4 英寸)片 15 片,使用的 III 族源为 TMAI、TM-Ga、TMIn, V 族源为 AsH₃、PH₃,掺杂源为 (CP)₂Mg、Si₂H₆,载气为高纯 H₂。生长的衬底为 (100)偏<111>15°的 101.6 mm(4 英寸)GaAs 衬底。材料外延生长的整体过程在 720℃ 温度下进行,外延材料结构示意图如图 1 所示,其中多量子阱(MQW)的材料为 (Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_{0.8}Ga_{0.2})_{0.5}In_{0.5}P,通过调节 Al 组分 x 保证波长在目

标范围内(对于本文黄绿光而言 $x \approx 0.34$)。LED 芯片器件工艺为常规氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)量产芯片工艺,并用泰琪 CK-240 寿命老化测试仪进行寿命老化测试,加速老化条件为 85℃,30 mA,时间为 1 000 h。

Layer 9	P ⁻ -GaP contact layer
Layer 8	P-GaP current spreading layer
Layer 7	P-AlInP confinement layer
Layer 6	P-space layer
Layer 5	Well: (Al _x Ga _{1-x}) _{0.5} In _{0.5} P
	Barrier: (Al _{0.8} Ga _{0.2}) _{0.5} In _{0.5} P
Layer 4	N-space layer
Layer 3	N-AlInP confinement layer
Layer 2	DBR layer
Layer 1	N-GaAs buffer layer
Layer 0	N-GaAs substrate

图 1 LED 外延结构示意图

Fig. 1 Epitaxial structure diagram of LED

2 结果与讨论

2.1 不同阱垒厚度

在保证波长在 570 nm、生长速率 0.42 nm/s 的前提下设计不同的多量子阱 MQW 阱垒厚度样品,观察其加速老化后光衰情况。从而研究不同 MQW 阱垒厚度对器件光衰情况的影响。具体设计如表 1 所示。

表 1 不同阱垒厚度实验设计

Tab. 1 Experimental design of different barrier thicknesses

Sample	Growth temperature/℃	Thickness of well and barrier/nm
A	720	25/25
B	720	38/38
C	720	50/50

不同 MQW 阱垒厚度条件老化趋势如图 2 所示,MQW 阱垒厚度最薄的 A 样品光衰度最低,较薄的 MQW 的阱垒厚度,可以减少 MQW 中 Al 的组分,提高量子局限效率,减少俄歇复合发生的几率,增加载流子复合发光几率,增加器件的稳定性^[10]。当 MQW 单对阱和垒厚度小于 25 nm 时,界面切换过于频繁,由于 MOCVD 机台的设备局限性,界面处理能力不足,界面晶格质量偏差,更薄的 MQW 阱垒厚度实验未能进行。以上数据说明减少 MQW 的阱垒厚度可以改善器件老化后光衰情况,

增加器件的稳定性^[12]。该方法简单易行,适用于大规模使用,但是必须严格监控量子阱的生长速率,表面生长速率的波动会对量子阱波长造成较大影响,容易导致芯片报废。

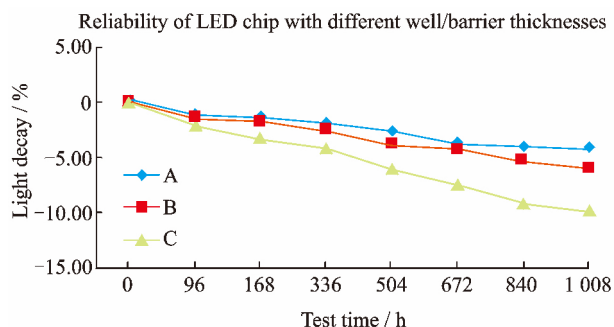


图 2 不同阱垒厚度光衰趋势图

Fig. 2 Tendency chart of light decay with different well/barrier thicknesses

2.2 不同 MQW 生长温度

在保证波长在 570 nm、生长速率 0.42 nm/s 的前提下设计不同的 MQW 生长温度,观察其加速老化后光衰情况,从而研究不同的 MQW 温度对器件光衰情况的影响。具体设计如表 2 所示。

表 2 不同 MQW 生长温度实验设计

Tab. 2 Experimental design of different MQW growth temperatures

Sample	Growth temperature/°C	Thickness of well and barrier/nm
D	700	25/25
E	720	25/25
F	740	25/25

不同生长温度条件老化趋势图如图 3 所示,生长温度最高的 F 样品,老化后光衰度最低。较高的生长温度,可以提高氧原子活性,使其容易与载气 H₂ 原子结合,从而降低生长过程中氧杂质的并入,减少晶格缺陷,提高生长外延层的晶格质量,减少非辐射复合中心复合的几率,增加电子空穴对复合的稳定性,降低老化后光衰的幅度,增加器件的稳定性^[13-14]。但是过高的生长温度会导致外延片边缘波长过长,造成良率损失。

2.3 P 型高掺杂

保证波长在 570 nm、生长速率 0.42 nm/s 的前提下,为确认载流子损耗是否可以通过载流子的补偿来进行改善,设计一个结构在 P-space(layer 6)后端与 P 型限制层(layer 7,掺杂浓度 $9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)

前端插入一层 20 nm 厚度的高掺杂 P 型 AlInP 层,掺杂浓度 $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。同时取正常结构作为参照,观察其加速老化后光衰趋势变化。具体实验设计如表 3 所示。

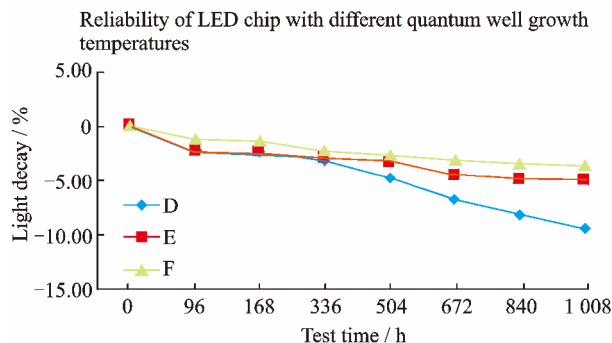


图 3 不同量子阱生长温度光衰趋势图

Fig. 3 Tendency chart of light decay at different quantum well growth temperatures

表 3 加入 P 型高掺杂层实验设计

Tab. 3 Experimental design of inserting P-type heavily doping

Sample	Growth temperature/°C	P-type heavily doping layer
G	720	Inserting P-type heavily doping layer (20 nm, $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)
H	720	Without

在 P 型加入 20 nm 高掺杂层结构老化光衰趋势如图 4 所示。加入 P 型高掺杂层的 G 样品,老化后光衰情况与未加入高掺杂层的 H 样品相比明显有所改善,由光衰变为光增。由于 LED 中空穴的衰减要大于电子的衰减,加入 P 型的高掺杂层后,此层可以借由 Mg 离子的扩散,补充损耗的空穴,将原来的光衰变化为光增,从而控制老化后的光衰情况^[15-16]。该方法是目前最适合量产的方法,最终的芯片性能和良率均满足需求,出货芯粒已经超过五亿颗。

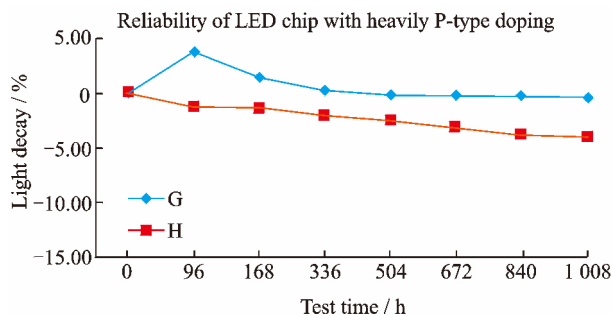


图 4 加入 P 型高掺杂层实验光衰趋势图

Fig. 4 Tendency chart of light decay with heavily P-type doping

3 结 论

通过对黄绿光波段多量子阱在保证波长和生长速率一致的前提下采用以下三种方式改善老化后光衰情况:(1)相同温度不同的生长厚度的条件下光衰情况进行分析;(2)多量子阱相同厚度不同的生长温度条件下光衰情况进行分析;(3)P型掺杂层掺杂浓度变化调整下光衰情况进行分析。发现较薄的MQW阱垒厚度及较高的MQW生长温度均可改善老化后光衰情况,而在P-space后端P型层前端插入一层20 nm厚度、 $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度的高掺杂层,可以将光衰拉向光增,从而控制老化后光衰情况。本文采用的方法对黄绿光光衰有所改善,增加了器件使用稳定性,且容易在量产中推广。

参 考 文 献

- [1] Kuo C P, Fletcher R M, Osentowski T D, et al. High performance AlGaInP visible light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(27): 2937-2939.
- [2] Streubel K, Linder N, Wirth R, et al. High brightness AlGaInP light-emitting diodes[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(2): 321-332.
- [3] Ledentsov N N, Shchukin V A, Lyttikäinen J, et al. Green(In,Ga,Al)P-GaP light-emitting diodes grown on high-index GaAs surfaces[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(18): 181902.
- [4] Shim J I, Han D P, Kim H, et al. Efficiency droop in AlGaInP and GaInN light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(11): 111106.
- [5] Altieri-Weimar P, Jaeger A, Lutz T, et al. Influence of doping on the reliability of AlGaInP LEDs[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2008, 19(1): 338-341.
- [6] Yen C H, Liu Y J, Chen T P, et al. Study of an AlGaInP-based light-emitting diode with a modulation-doped multi-quantum-well (MD-MQW) structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(10): 609-611.
- [7] Chang M H, Das D, Varde P V, et al. Light emitting diodes reliability review[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(5): 762-782.
- [8] Moritz A, Hangleiter A. Optical gain in ordered GaInP/AlGaInP quantum wells[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(24): 3340-3342.
- [9] Su J Y, Wu M C, Chen W B, et al. AlGaInP light-emitting diode with tensile strain barrier reducing layer[J]. IEEE Electron Device Letters, 2003, 24(3): 159-161.
- [10] Chang C S, Su Y K, Chang S J, et al. High-brightness AlGaInP 573-nm light-emitting diode with a chirped multi-quantum barrier[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(1): 77-83.
- [11] Endo K, Kobayashi K, Fujii H, et al. Accelerated aging for AlGaInP visible laser diodes[J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(2): 146-148.
- [12] Zhang Z, Yue S, Wu Y, et al. Low driving voltage blue, green, yellow, red and white organic light-emitting diodes with a simply double light-emitting structure[J]. Optics Express, 2014, 22(2): 1815-1823.
- [13] Chang S J, Chang C S, Su Y K, et al. AlGaInP yellow-green light-emitting diodes with a tensile strain barrier cladding layer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(9): 1199-1201.
- [14] Huang M F, Liu P H, Liu J S, et al. Experimental and numerical study on the optical properties of yellow-green AlGaInP light-emitting diodes[C]. Optoelectronic Materials and Devices II. International Society for Optics and Photonics, 2000, 4078: 595-603.
- [15] Zeng X F, Shei S C, Chang S J. Improving light output power of AlInGaP-based LEDs using GaP nanorods prepared by SILAR method[J]. ECS Solid State Letters, 2013, 2(11): Q79-Q81.
- [16] Meneghini M, Tazzoli A, Mura G, et al. A review on the physical mechanisms that limit the reliability of GaN-based LEDs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(1): 108-118.



高 鹏(GAO Peng) 男,1986年出生于山东省泰安市,汉族,天津工业大学硕士研究生在读,研究方向为高亮黄绿光LED及数码用LED产品。