

电流主动导引结构倒装 AlGaInP LED

李川川 关宝璐 郝聪霞 郭 霞

(北京工业大学电子信息与控制工程学院光子器件研究实验室, 北京 100124)

摘要 设计并制备了一种带有电流导引结构的新型倒装 AlGaInP LED。实验结果表明,在 20 mA 直流电流注入下,器件的电压为 2.19 V,输出光功率与普通倒装器件相比提高了 17.33%。通过电流导引结构,使得器件注入电流被主动引导到电极以外部分,有效增大了上电极以外部分有源区中用于发光的有效载流子数目的比例,同时减轻了电流密度过大现象,大大提高了器件的出光效率。

关键词 光电子学; AlGaInP LED; 倒装; 电流导引; 电流密度分布

中图分类号 TN2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0723004

Flip-Chip AlGaInP LEDs with Current-Guiding Structure

Li Chuanchuan Guan Baolu Hao Congxia Guo Xia

(*Photonic Device Research Laboratory, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

Abstract A new flip-chip AlGaInP LED with current-guiding structure is designed. Experimental results show that the output optical power increases by 17.33% than that of the ordinary flip-chip AlGaInP LED with a voltage of 2.19 V at the injection current of 20 mA. Through the current-guiding structure, the injection current of device is actively guided outside of the electrodes, effectively increasing the effective carrier number for luminescence in the active area outside the electrode, while reducing the current crowding phenomenon. This greatly improves the optical efficiency of the device.

Key words optoelectronics; AlGaInP LED; flip-chip; current-guiding; current density distribution

OCIS codes 230.3670; 230.4000

1 引 言

AlGaInP 四元化合物半导体材料在 580 ~ 650 nm 光波段范围是直接带隙,金属有机化学气相淀积(MOCVD)生长制备的 LED 发光效率高,在大屏幕彩色显示、交通指示和室内室外标记等领域已得到广泛应用^[1]。尽管 AlGaInP LED 的内量子效率接近 100%,但其提取效率仍旧很低,通常人们认为这主要是由于半导体材料和空气的折射率差大,向上发出的光受到表面全内反射效应的限制,只有其中一小部分光才能出射到表面,而向下发射的光却几乎全部被 GaAs 衬底吸收。表面粗化^[2~7]、表

面微纳结构^[8]等技术的应用缓解了全内反射限制的问题,使光子有更多机会从芯片表面出射,而带有反光镜结构的倒装 LED 将向下发射的光反射到出光表面,在改善器件热特性的同时,也大大提高了器件的外量子效率^[9~13]。

然而,根据 LED 工作原理,一对电子空穴对产生一个光子,电子空穴数目多的地方产生的光子数目也多,通常电极下面的载流子数目最多,产生的光子大部分被不透明的电极挡住或吸收而不能发射出器件表面,因此大大限制了器件的外量子效率。只有漂移或者扩散到电极以外的少部分载流子对光输

收稿日期: 2012-01-10; **收到修改稿日期**: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(60908012)和北京市教委项目(KM201010005030)资助课题。

作者简介: 李川川(1984—),女,硕士研究生,主要从事 LED 结构设计等方面的研究。

E-mail: beryl1025@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 郭 霞(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事半导体光电子器件及物理机理等方面的研究。

E-mail: guo@bjut.edu.cn

出才有贡献,我们将分布在电极以外的载流子称为有效载流子。因此,如何实现对载流子分布的调控,从而大大提高 LED 有效载流子数目是提高光输出功率的关键。

本文提出了一种新型电流导引结构的倒装 AlGaInP LED,通过调整电阻横向分布的方式来引导电极以下部分的电流向电极以外部分输运。该结构有效地调整注入电流分布,并大大提高了有效载流子数目,从而可以提高器件的输出光功率和外量子效率。

2 实 验

本实验样品是在 n-GaAs 衬底上采用 MOCVD 外延生长得到,其普通倒装和电流导引 LED 器件结构示意图如图 1 所示。在 n 型 GaAs 缓冲层上先生长 InGaP 腐蚀停层,用于 GaAs 衬底的去除,再生长 n 型 120 nm 厚的 Si 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 欧姆接触层,随后在 $(\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 多量子阱(MQW)有源区的两边分别生长 p 型和 n 型的 AlInP 载流子限制层,掺杂浓度分别为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 和 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,最后,表面生长 4 μm 厚的 p 型 GaP 窗口层。在同一外延片上取下 2 个 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的样品,其中样品 1 作为对比的普通倒装 LED 结构,样品 2 制备带有电流导引结构的倒装 LED 结构。在样品 2 表面 p-GaP 上溅射 50 nm Au/Zn/Au 欧姆接触电极,对其光刻并腐蚀出宽度为 100 μm ,周期为 200 μm 的周期条纹结构。然后,和样品 1

共同在 p-GaP 表面上依次溅射 300 nm 的氧化铟锡 (ITO)电流扩展层、Au 反光层、金属阻挡层 Ti 和 1 μm 的金属键合层 Au。将样品 1 和样品 2 有厚 Au 的表面分别与有 Ti/Au 的重掺杂 Si 衬底表面对准后放在自制的夹具中,然后一起放在 N_2 流量为 3 L/min 的高温炉中进行共晶键合,键合温度为 260 $^\circ\text{C}$,时间为 1 h。键合完成后,采用两步湿法腐蚀的方法去除 GaAs 衬底与 InGaP 腐蚀停层^[14],露出 n 型欧姆接触层 GaAs,并在 n-GaAs 上溅射 Au/Ge/Ni/Au n 型欧姆接触电极,光刻并腐蚀出直径为 100 μm 的圆形电极。经过合金和划片,尺寸为 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$,并直接压焊在金属管座上进行电学和光学测试。

3 结果及分析

图 2 为普通倒装和电流导引结构 LED 在室温直流(DC)模式下的正向 $I-V$ 关系曲线,由图 2 可知,在 20 mA 的注入电流下,普通倒装和电流导引结构 LED 的工作电压分别为 2.3 V 和 2.19 V,后者的电压比前者下降了 0.11 V,这可能是由于 Au 比 ITO 电导率更小造成的。此外,由于前者的串联电阻较大,导致对数坐标下,电流曲线较早地偏离理想曲线。从图 2 插图中反向 $I-V$ 关系曲线可以看出,在 $0 \sim -10 \text{ V}$ 的反向电压下,二者的反向漏电流基本相似,但随着反向电压的增加,电流导引结构 LED 的反向漏电流更小。

图 3 为室温直流模式下,两种结构的光功率随注入电流的变化关系曲线,在 20 mA 注入电流下,

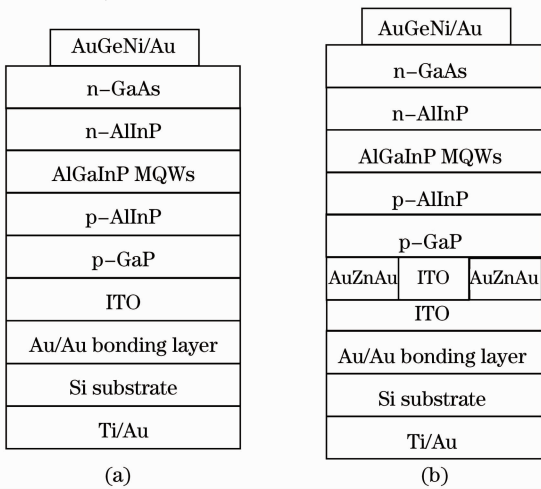


图 1 AlGaInP LED 的器件截面结构示意图。(a)样品 1: 普通倒装结构;(b)样品 2:电流导引结构

Fig. 1 Schematic of the AlGaInP LED devices. (a) Sample 1: ordinary flip-chip structure; (b) sample 2: current-guiding structure

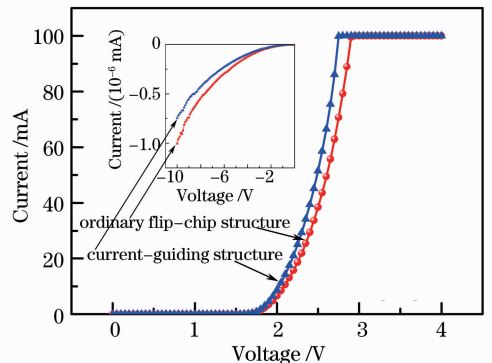


图 2 室温直流模式下,普通倒装(样品 1)和电流导引结构(样品 2)LED 的正向 $I-V$ 关系曲线,插图为两个样品的反向 $I-V$ 关系曲线

Fig. 2 Current versus voltage of the ordinary flip-chip structure (sample 1) and the current-guiding structure (sample 2) at the room temperature and DC mode. Inset is the reverse $I-V$ curves

光功率分别为 1.61 mW 和 1.889 mW, 电流导引结构 LED 的光功率比普通结构的光功率提高了 17.33%。四元化合物半导体对热非常敏感, 波长红移是发热的重要标志。插图是室温直流下, 器件的峰值波长随注入电流的变化关系, 20 mA 下, 普通倒装结构和电流导引结构 LED 的峰值波长分别为 635.2 nm 和 635.6 nm, 当注入电流从 1 mA 增加到 120 mA 时, 二者的峰值波长分别红移了 7 nm 和 6.2 nm, 这进一步验证了普通倒装 LED 结构的串联电阻较大。

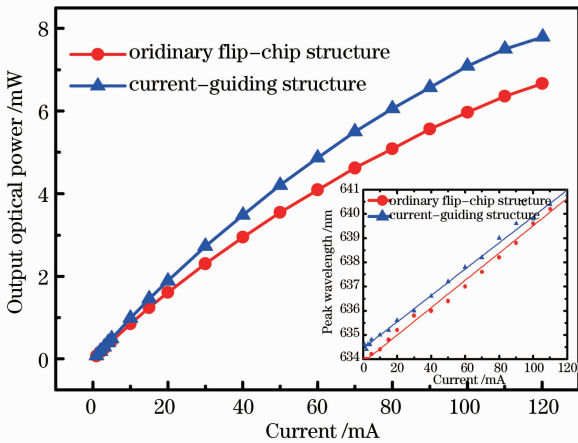


图3 室温直流下, 普通倒装(样品1)和电流导引结构(样品2)LED的光功率随注入电流的变化关系, 插图为二者的峰值波长随注入电流的变化关系

Fig. 3 Output power versus current of the ordinary flip-chip structure (sample 1) and the current-guiding structure (sample 2) at room temperature and DC mode. Inset is the peak wavelength versus current

为了进一步解释电流导引结构带来的光功率提高和热特性改善, 对两种器件在有源区位置的电流密度分布进行了模拟计算。定义 n 电极和 p 电极的偏压分别是 V_0 和 0, 为了获得相同的电流注入, 由图 2 测试结果得到的在 20 mA 电流注入下 V_0 分别为 2.3 V 和 2.19 V。根据微分形式的欧姆定律和电子空穴的连续性方程推导出泊松方程:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0, \quad (1)$$

式中 σ 为电导率, V 为电势。由(1)式可计算出芯片中电场和电流密度的分布情况^[15]。由于实际器件是左右对称的, 为简单起见, 只考虑右半边电流的分布情况。图 4 为在室温 20 mA 下, 按电流导引结构倒装 LED 的电流密度最大值归一化后, 两种器件在有源区位置的电流密度分布与电极边缘距离的模拟结果。从图中可以看出, 虽然两种样品有源区的电流密度的衰减趋势相同, 随着到电极边缘距离的增

大, 电流密度急速下降, 在距离电极边缘 60 μm 左右处, 电流密度下降约为 0, 但是在距离电极边缘 60 μm 内, 电流导引结构电流密度要高于普通倒装结构 LED。把电流密度按照面积积分, 得到电流导引结构倒装 LED 分布在电极以外的电流高出普通倒装 LED 的 17.78%, 这主要是因为电流导引结构中 ITO 的电阻率 ($3 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$) 大于普通倒装结构中金的电阻率 ($2.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$), 相当于电流导引结构在电极以下部分比普通倒装结构多了一个纵向串联电阻 ΔR , 从而有效调整电流分布。因此, 通过图 4 的模拟结果可以得到, 电流导引结构在电极以外分布的注入载流子数要比普通倒装结构高出约 18%, 从而实现了电流导引结构比普通倒装结构光功率提高 17%。此外, 如果进一步增加 ΔR 值, 即在电流导引结构中进一步使用具有高电阻率的非金属介质, 那么器件中的有效载流子数目将会进一步增加, 最终实现具有更高性能的器件。

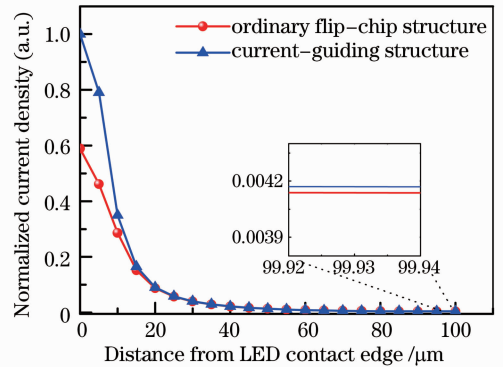


图4 相同注入电流, 普通倒装结构(样品1)和电流导引结构(样品2)LED有源区中心的电流密度分布

Fig. 4 Current density distribution of the active region for the ordinary flip-chip structure (sample 1) and the current-guiding structure (sample 2) LED at the same injection current

在同样的电流注入下, 电流导引结构由于分散了电流分布, 从而降低了电极以下部分的电流密度, 进而减弱了电流密度过大及其引起的发热现象, 这也进一步解释了电流导引结构比普通倒装结构峰值波长红移量小的原因。

4 结 论

本文设计并制备了电流导引结构 AlGaInP LED, 并对其光电特性进行了详细的测试和分析。与普通结构的倒装 LED 相比, 在 20 mA 注入电流下, 其工作电压下降了 0.11 V, 光功率提高了

17.33%。结合理论模拟结果,电流导引结构有效改变了横向电阻分布,大大增加了注入电极外有效载流子数目。同时,降低了电流密度过大的效应,大大提高了器件的输出光功率和减小峰值波长红移。

参 考 文 献

- 1 K. Strenbel, N. Linder, R. Wirth *et al.*. High brightness AlGaInP light-emitting diodes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(2): 321~332
- 2 Liu Sinan, Zhou Deshu, Zhang Jianming *et al.*. Enhancement of extraction efficiency of red LED via surface roughening [J]. *Research & Progress of SSE*, 2008, **28**(2): 245~247
刘思南, 邹德恕, 张剑铭等. 表面粗化提高红光 LED 的光提取效率 [J]. *固体电子学研究与进展*, 2008, **28**(2): 245~247
- 3 Li Hui, Li Peixian, Shi Huifang *et al.*. Enhancement of extraction efficiency of green LED via surface roughening [J]. *Electronic Sci. & Technol.*, 2010, **23**(6): 25~28
李 慧, 李培咸, 史会芳等. 表面粗化提高绿光 LED 的光提取效率 [J]. *电子科技*, 2010, **23**(6): 25~28
- 4 Liu Pingping, Wu Rui, Wu Shengli *et al.*. Enhancement of light extraction from LED by surface roughness using polystyrene spheres as dry etching mask [J]. *Semiconductor Technology*, 2010, **35**(3): 260~263
刘婷婷, 武 锐, 武胜利等. 聚苯乙烯球掩膜干法粗化提高 LED 发光效率 [J]. *半导体技术*, 2010, **35**(3): 260~263
- 5 Zhou Yinhua, Tang Yingwen, Rao Jianping *et al.*. Improvement for extraction efficiency of vertical GaN-based LED on Si substrate by photo-enhanced wet etching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 252~255
周印华, 汤英文, 饶建平等. 光增强湿法刻蚀提高 Si 衬底垂直结构 GaN 基 LED 的出光效率 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 252~255
- 6 Y. Qin, X. Guo, W. J. Jiang *et al.*. Light extraction analysis of AlGaInP based LED with surface texture [C]. *SPIE*, 2009, **7635**: 763505
- 7 P. W. Huang, Y. C. S. Wu. Improved performance of AlGaInP LEDs by a periodic GaP-dish mirror array [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(19): 1441~1443
- 8 S. C. Hsu, D. S. Wu, X. H. Zheng. Power-enhanced ITO omnidirectional reflective AlGaInP LEDs by two-dimensional wavelike surface texturing [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2008, **23**(10): 105013
- 9 R. H. Horng, D. S. Wu, S. C. Wei *et al.*. AlGaInP light-emitting diodes with mirror substrates fabricated by wafer bonding [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(20): 3054~3056
- 10 S. K. Kim, H. D. Song, H. S. Ee *et al.*. Metal mirror assisting light extraction from patterned AlGaInP light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(10): 101102
- 11 Zhong Guangming, Du Xiaoqian, Tian Jian. GaN-based flip-chip simulation and analysis of the light extraction efficiency of the LED chip [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2011, **32**(8): 773~778
钟广明, 杜晓倩, 田 健. GaN 基倒装焊 LED 芯片的光提取效率模拟与分析 [J]. *发光学报*, 2011, **32**(8): 773~778
- 12 Niu Pingjuan, Li Yanling, Liu Hongwei *et al.*. Application of thermosonic flip chip bonding on fabricating high-power GaN-based LED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(9): 43~46
牛萍娟, 李艳玲, 刘宏伟等. 热超声倒装焊在制作大功率 GaN 基 LED 中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(9): 43~46
- 13 Su Liwei, You Da, Cheng Haiying *et al.*. Characterization of high-power GaN-based green LED on Si substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1066~1069
苏丽伟, 游 达, 程海英等. Si 衬底功率型 GaN 基绿光 LED 性能 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1066~1069
- 14 C. C. Li, B. L. Guan, D. X. Chuai *et al.*. Removing GaAs substrate by nitric acid solution [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2010, **28**(3): 635~637
- 15 R. M. Perks, A. Porch, D. V. Morgan. Theoretical and experimental analysis of current spreading in AlGaInP light emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(8): 083109

栏目编辑: 韩 峰