

# 用于 POF 的高性能共振腔发光二极管\*

李建军<sup>†</sup> 杨 臻 韩 军 邓 军 邹德恕 康玉柱 丁 亮 沈光地

(北京工业大学北京光电子技术实验室, 北京 100124)

(2008 年 12 月 28 日收到 2009 年 1 月 16 日收到修改稿)

提出用 AlGaAs 材料为 n 型下 DBR, AlGaInP 材料为 p 型上 DBR, GaInP/AlGaInP 多量子阱为有源区来制备 650 nm 波长的共振腔发光二极管(RCLED). 用传输矩阵法对器件的结构进行了理论设计, 并制备了 RCLED 和普通 LED 两种结构. 测试结果表明, RCLED 有更高的发光效率, 是普通 LED 的近 1.3 倍, 当注入电流从 3 mA 增加到 30 mA 时, RCLED 的峰值波长只变化了 1 nm, 而普通 LED 的波长则变化了 7 nm, 且 RCLED 的光谱半宽窄, 远场发散角小.

关键词: 发光二极管, 共振腔, 金属有机物化学气相淀积

PACC: 4280S, 7865K, 8115H

## 1. 引 言

塑料光纤(plastic optical fiber, POF)具有抗挠曲、直径大、抗辐射和价格低等一系列优点, 因此 POF 是短程光通信的理想媒介<sup>[1]</sup>. 当前, 基于 POF 的短程光通信的普及对低价格高性能的光源提出了迫切的要求. 半导体激光器的特性好但成本高<sup>[2]</sup>, 而普通半导体发光二极管(light emitting diodes, LED)虽然便宜但带宽小、光纤耦合效率低, 共振腔发光二极管(resonant cavity light emitting diode, RCLED)是在性价比方面介于半导体激光器和半导体发光二极管之间的一个很好的折衷<sup>[3]</sup>. 特别是输出波长为 650nm 的 RCLED, 对应于 POF 的低损耗波段, 是短程光通信的理想光源<sup>[4]</sup>.

RCLED 由三个基本部分组成: 高反射率的下反射镜、中等反射率的上反射镜和包含发光有源区的共振腔. 650 nm RCLED 的有源区为 GaInP/AlGaInP 多量子阱结构, 上下反射镜普遍采用 AlGaAs DBR<sup>[4,5]</sup>. 以 AlGaAs DBR 作为 650 nm RCLED 的 p 型上反射镜存在以下问题: 1) 在上 DBR 和共振腔的界面处, V 族元素完全切变, 不利于空穴的注入<sup>[6]</sup>, 需要对材料的组分进行仔细地设计; 2) 由于 AlGaAs 材料不易获得高的 p 型掺杂, 在 p 型 DBR 的顶层需生长一层可高掺杂的 GaAs 作为欧姆接触层, 但 GaAs 对 650

nm 的光有着强烈的吸收, 势必降低器件的发光效率. 本文以 AlGaInP 材料为上 DBR, GaP 材料为欧姆接触层, 制备了可用于 POF 的 RCLED.

## 2. 器件设计

图 1 给出了 RCLED 的结构示意图, 共振腔位于 n 型下 DBR 和 p 型上 DBR 之间, 由共振腔内的 MQW 有源区产生的光子在上下 DBR 间反射共振, 经波长选择后的光透过低反射率的上 DBR 从出光孔出射. 为了得到波长为 650 nm 的光输出, 有源区采用了 GaInP( $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 多量子阱结构. 从光学设计角度讲, 要求 n 型下 DBR 的反射率尽可能高, p 型上 DBR 的反射率则在中等程度即可. 由于与 ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/( $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 材料相比,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  材料可获得更高的折射率差, 使得在相同 DBR 对数下 AlGaAs 材料更易获得高的反射率, 因此我们选用  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$  材料为下 DBR, 上 DBR 则选用 ( $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}$ )<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/ $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  材料, 这样, 既满足了器件对 DBR 反射率的光学要求, 又避免了用 AlGaAs 材料为 p 型上 DBR 时由于 V 族元素完全切变而引入的空穴注入问题. p 型 DBR 上的 GaP 层起着欧姆接触的作用, 而 GaP 上的 ITO 则起着电流扩展的作用.

DBR 的反射率可由传输矩阵法求得<sup>[7]</sup>. 当光入

\* 北京市教育委员会科技计划面上项目(批准号: KM200810005002)和北京市属市管高等学校人才强教计划资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn

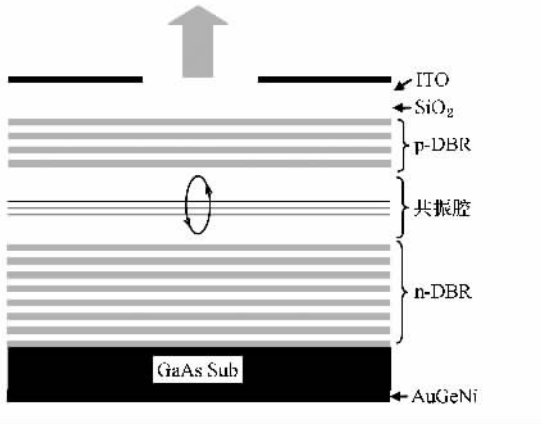


图 1 RCLED 结构示意图

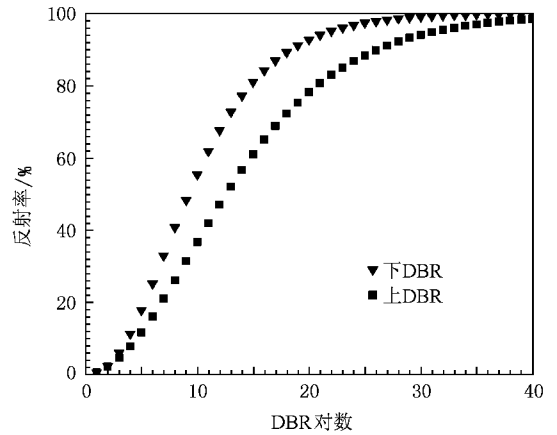


图 2 反射率与 DBR 对数的关系

射到多层介质膜材料上时,其反射率可表示为

$$R = \left| \frac{Y_0 M_{11} + Y_0 Y_s M_{12} - M_{21} - Y_s M_{22}}{Y_0 M_{11} + Y_0 Y_s M_{12} + M_{21} + Y_s M_{22}} \right|^2, \quad (1)$$

其中,  $Y_0 = n_0 y_0$  和  $Y_s = n_s y_0$  分别是入射介质和衬底的光学导纳,  $n_0$  和  $n_s$  分别是入射介质和衬底材料的折射率,  $y_0$  是自由空间的光学导纳,  $M_{ij}$  是  $2 \times 2$  矩阵  $M$  的矩阵元,

$$M = \prod_i M_i, \quad (2)$$

其中  $M_i$  是将光场在第  $i$  层介质两个边界处的电场和磁场联系起来的特征矩阵,假设第  $i$  层介质的折射率是均匀的,则

$$M_i = \begin{vmatrix} \cos \delta & j(\frac{y_0 n}{y_0 n_s}) \sin \delta \\ j y_0 n \sin \delta & \cos \delta \end{vmatrix}, \quad (3)$$

且

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n h \cos \theta, \quad (4)$$

其中  $n$ ,  $h$  分别是第  $i$  层材料的折射率和厚度,  $\lambda$  是光在真空中的波长,  $\theta$  是光在第  $i$  层的入射角,对于垂直入射光,  $\theta = 0$ .

图 2 给出了当波长为 650 nm 的光从  $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P$  材料垂直入射到上、下 DBR 时,用上述传输矩阵法得到的反射率随 DBR 对数变化关系的模拟结果,模拟过程中各材料折射率的选取见文献 [8—10].由图可见,反射率随 DBR 对数的增加而增加,由于  $(Al_{0.3}Ga_{0.7})_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P$  DBR 材料的折射率差比  $Al_{0.5}Ga_{0.5}As/AlAs$  DBR 材料的折射率差小,因此在相同的 DBR 对数下,  $Al_{0.5}Ga_{0.5}As/AlAs$  DBR 可获得更高的反射率.本文中为上、下 DBR 的对数分别设为 34 对和 15 对,对应的反射率分别为 99.56% 和 60.98%.

对于包含多量子阱有源区的谐振腔的设计,则既要考虑载流子的限制,又要考虑有源区与光场的有效耦合.为此,本文选用多量子阱的  $1\lambda$  腔结构,阱的个数为 3,阱和垒的宽度都为 5 nm,阱和垒的材料分别为 GaInP 和  $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P$ .采用打靶法 [11] 模拟了所设计的器件内部沿垂直于出光面方向的光场分布,模拟结果如图 3 所示.由图可见,光场在量子阱有源区处有极大值,从而保证了光电的高效耦合.

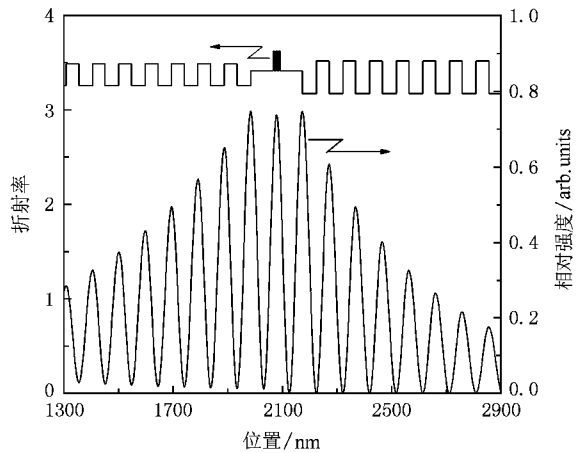


图 3 RCLED 内部光场分布

### 3. 器件制备

首先利用 EMCORE D125 型 MOCVD 系统进行各层材料的外延生长.衬底为 (100) 偏  $111^\circ$  的 n 型 GaAs,载气是经钽管纯化后的高纯氢气;金属有机物源分别为 TMGa, TMAI 和 TMIIn;V 族源为 100%

的  $AsH_3$  和  $PH_3$   $n$  型材料的掺杂源为  $SiH_4$   $p$  型材料的掺杂源为  $Cp_2Mg$  材料的生长温度  $700\text{ }^\circ\text{C}$  衬底托盘的转速为  $1000\text{ r/min}$  ,以保证材料生长的均匀性. 为了进行对比,分别生长了一个 RCLED 和一个普通 LED 样片,普通 LED 与 RCLED 相比的差异仅在于:将 RCLED 的上 DBR 改成了相同厚度的  $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$  材料.

材料生长结束后,进行器件后工艺制备.首先用干法刻蚀将出光孔以外的 GaP 层刻蚀掉,再淀积  $SiO_2$  阻挡层,并将出光孔上的  $SiO_2$  刻蚀掉,之后在片子表面顺序蒸发 ITO、溅射 TiAu 电极,并将出光孔上的 TiAu 刻蚀掉,出光孔的直径为  $85\text{ }\mu\text{m}$ .接着磨抛背面,将片子减薄至  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,再在背面溅射 AuGeNi 电极,并在  $400\text{ }^\circ\text{C}$  下合金退火.最后将片子解理成  $300\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$  的管芯,进行光电特性测试.

### 4. 器件结果

图 4 给出了在不同注入电流下用积分球测得的器件输出的光功率,由图可见,随注入电流的增加,虽然 RCLED 和普通 LED 的输出光功率都增加,但在相同电流下 RCLED 有更高的输出光功率.当注入电流为  $30\text{ mA}$  时,RCLED 和普通 LED 的输出光功率分别为  $0.63\text{ mW}$  和  $0.49\text{ mW}$ ,RCLED 的光功率比普通 LED 的光功率高近  $30\%$ ,可见 RCLED 有更高的效率.

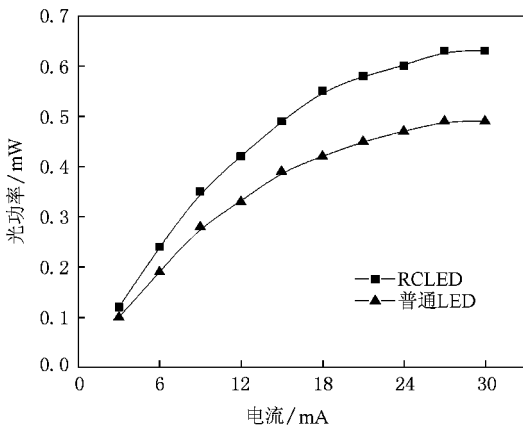


图 4 器件的光功率-电流关系

器件光谱的峰值波长及半高宽随注入电流的变化关系示于图 5.由图可见,虽然随注入电流的增加器件的峰值波长都发生红移,但普通 LED 要敏感得多,当器件的注入电流从  $3\text{ mA}$  增加到  $30\text{ mA}$  时,普

通 LED 的峰值波长从  $650\text{ nm}$  增加到  $657\text{ nm}$ ,变化  $7\text{ nm}$  而 RCLED 的峰值波长仅从  $650\text{ nm}$  变化到  $651\text{ nm}$ ,只变化了  $1\text{ nm}$ .这是由于普通 LED 的峰值波长决定于有源区的自发辐射谱,对温度较为敏感,而 RCLED 的峰值波长则决定于其共振腔腔模的波长,腔模对温度敏感性则要弱得多.上述解释与图 5 中器件光谱半宽的变化关系是一致的.当器件的注入电流从  $3\text{ mA}$  增加到  $30\text{ mA}$  时,普通 LED 的光谱半宽从  $12\text{ nm}$  增加到  $18.6\text{ nm}$ ,变化  $6.6\text{ nm}$ ,而 RCLED 的半宽仅从  $11.7\text{ nm}$  增加到  $13.4\text{ nm}$ ,只变化了  $1.7\text{ nm}$ .

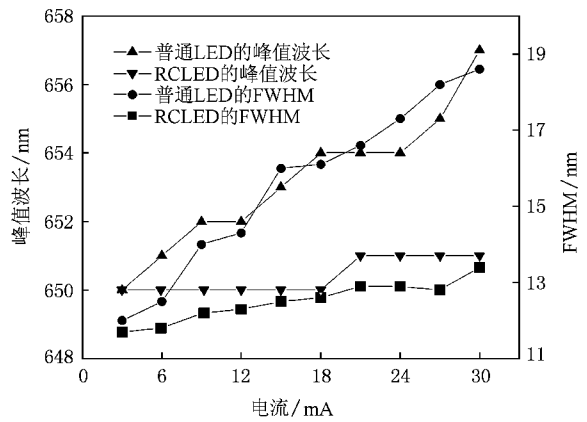


图 5 器件峰值波长及半宽与注入电流的关系

图 6 是在  $20\text{ mA}$  注入电流下测量得到的器件远场分布.可以看出,相对于普通 LED,RCLED 在轴向有更强的分布,且 RCLED 的远场光更集中在轴向,由图示结果得到,RCLED 和普通 LED 的半高宽角度分别为  $102^\circ$  和  $111^\circ$ .因而将 RCLED 与光纤耦合时,将会有更高的耦合效率.

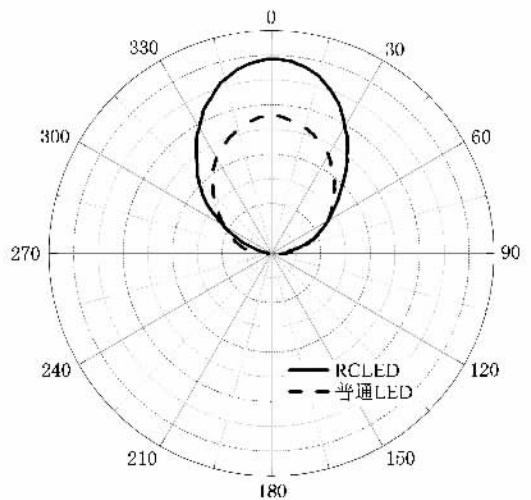


图 6 器件的远场分布

## 5. 结 论

以 AlGaInP 材料为 p 型上 DBR, AlGaAs 材料为 n 型下 DBR, GaInP/AlGaInP 多量子阱为有源区, GaP 材料为 p 型欧姆接触层, 得到了高性能的 RCLED.

实验结果表明, 相对于普通 LED, RCLED 有更高的发光效率、更窄的光谱半宽和更小的远场发散角, 且随注入电注的变化 RCLED 有更好的波长稳定性. 因此, RCLED 是用于短程光通信时与 POF 进行耦合的理想光源. 器件的频率特性分析将在后续工作中进一步进行.

- [ 1 ] Gindera R, Mollers I, Bulters M, Kalinowski D, Jager D 2007 *International Conference on Transparent Optical Networks* 54
- [ 2 ] Cui B F, Li J J, Zou D S, Lian P, Han J R, Wang D F, Du J Y, Liu Y, Zhao H M, Shen G D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2150 ( in Chinese ) [ 崔碧峰、李建军、邹德恕、廉 鹏、韩金茹、王东风、杜金玉、刘 莹、赵慧敏、沈光地 2004 *物理学报* **53** 2150 ]
- [ 3 ] Schubert E F, Wang Y H, Cho A Y, Tu L W, Zydzik G J 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 921
- [ 4 ] Chiou S W, Lee Y C, Yang Y C, Chang C S, Chen T P 2004 *Proceedings of SPIE* **5366** 36
- [ 5 ] Dumitrescu M M, Saarinen M J, Guina M D, Pessa M V 2002 *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* **8** 219
- [ 6 ] Schneider R, Crawford M, Choquette K, Lear K, Kilcoyne S, Figiel J 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 329
- [ 7 ] Rakic A D, Majewski M L, Djurisic A B, LiE I, Elazar J M 2000 *Proc. 22nd International conference on microelectronics* **2** 607
- [ 8 ] Kokubo Y, Ohta I 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 2042
- [ 9 ] Tanaka H, Kawamura Y, Asahi H 1986 *J. Appl. Phys.* **59** 985
- [ 10 ] Piprek J 2003 *Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation* ( Academic Press ) 91
- [ 11 ] Li J J, Shen G D 2006 *Journal of Optoelectronics · Laser* **17** 1457 ( in Chinese ) [ 李建军、沈光地 2006 *光电子·激光* **17** 1457 ]

# High performance resonant cavity light emitting diodes for POF application<sup>\*</sup>

Li Jian-Jun<sup>†</sup> Yang Zhen Han Jun Deng Jun Zou De-Shu Kang Yu-Zhu Ding Liang Shen Guang-Di  
( Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China )

( Received 28 December 2008; revised manuscript received 16 January 2009 )

### Abstract

A device structure of resonant cavity light emitting diodes ( RCLED ) at 650nm wavelength was proposed by using AlGaAs as the n-type bottom DBR, AlGaInP as the p-type top DBR, and GaInP/AlGaInP MQW as the active region. The device was designed according to the transfer matrix method, and both RCLED and normal LED were fabricated for comparison. Results showed that the efficiency of RCLED is 30% higher than the normal LED, and the peak wavelength of RCLED changed only 1 nm when the driving current increased from 3 mA to 30 mA, compared with that of 7 nm for the normal LED. Meanwhile, RCLED has a narrower spectrum and a smaller far field divergence angle.

**Keywords:** light emitting diode, resonant cavity, metal organic chemical vapor deposition

**PACC:** 4280S, 7865K, 8115H

<sup>\*</sup> Project supported by the Beijing Education Committee Science and Technology Plan Surface Projects ( Grant No. KM200810005002 ) and PHR ( IHLB ).

<sup>†</sup> E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn