

# 可见光共振腔发光二极管原理及发展概况

## Principle and Development of Visible Resonant Cavity Light-Emitting Diodes

杨臻 李建军 康玉柱 宋小伟

(北京工业大学 北京光电子技术实验室, 北京 100124)

Yang Zhen Li Jianjun Kang Yuzhu Song Xiaowei

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**摘 要** 共振腔发光二极管(RCLED)是一种新型发光二极管(LED)结构,同时具备了传统 LED 和垂直腔面激光器(VCSEL)两者的优点,具有良好的应用价值和广阔的市场前景。介绍了 RCLED 的基本原理和结构,以及器件结构的设计要点,指出发射波长 650 nm 的 RCLED 在塑料光纤(POF)通信领域的应用优势,可以作为民用数据通讯系统用光发射器件的首选。对近年来 RCLED 尤其是红光波长范围的 RCLED 发展情况进行了概述,同时指出我国在这一领域的研究现状。

**关 键 词** 共振腔发光二极管; 微腔发光二极管; 红光; 塑料光纤

**Abstract** The resonant cavity light-emitting diode(RCLED) is novel light-emitting diode(LED) structure. This type of RCLED has some merits of plane LED and vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) and wide application and bright market prospect. The fundamentals, device structures of RCLED and some design rules are introduced. The advantages of 650 nm RCLED applied to the plastic optical fiber (POF) communication field are given. In addition, the remarkable developments of RCLED in recent years are reviewed, especially in red wavelength rang, and the domestic conditions of research in this field are presented as well.

**Key words** resonant cavity light-emitting diodes; microcavity light-emitting diodes; red emission; plastic optical fiber

中图分类号 TN312+.8 doi 10.3788/LOP20084512.0020

## 1 引言

在光纤通信中,电信号转变为光信号的过程由光发射机来完成,光发射机的关键器件是光源。常用的光源有发光二极管(LED)和激光二极管(LD)。传统平面结构的发光二极管制造工艺简单,成本较低,但是,它作为通信用光发射机光源光谱纯度不高,方向性不好,不利于光信号与光纤的耦合。与之相对应的垂直腔面发射激光器(VCSEL)虽然光谱线宽很窄,方向性极佳,但由于价格昂贵,对温度敏感等方面的原因,没

有得到市场的广泛认同。

1992 年,贝尔实验室的 Schubert 等<sup>[1]</sup>根据 Fabry-Perot (F-P)腔理论提出了一种新型 LED 结构——共振腔发光二极管(RCLED),从而进一步提高了 LED 各方面的性能,拓宽了其应用领域。

## 2 RCLED 原理及结构设计

### 2.1 RCLED 原理

RCLED 又称为微腔发光二极管(Microcavity

Light-emitting Diode, MCLED), 由于微腔效应改变了真空电磁场的模式结构, 能够使共振波长的光模式密度增大, 抑制其他波长的模式密度, 使与共振波长相当的有源区自发辐射率增加。同时, 再利用 F-P 腔干涉效应, 改变内部出射角的功率分布, 使出射光在腔中形成共振。这不仅增加了共振波长出射光的外量子效率, 还提高了纯度和方向性, 使大部分光集中在提取角范围内, 只有少数光被有源层等吸收。

利用 F-P 腔干涉效应是 RCLED 最为显著的特点。由于光束在腔内多次来回反射, 极少频率的光满足干涉相长条件, 光强得到增加, 频率得到筛选, 特别是在共振腔的轴线方向, 可以形成光强最强、模式数目最少的光振荡<sup>[2]</sup>。

## 2.2 RCLED 基本结构

简单地说, RCLED 就是把有源层置于多层 F-P 光学共振腔中, 使自发发射的光在腔中发生干涉, 抑制非共振波长, 从而达到可选择性出光的目的。F-P 光学共振腔是用多对分布式布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 组成的腔体, 如图 1 所示。发光介质的折射率为  $n_s$ , 上下各层 DBR 的折射率分别为  $n_{s+1}, n_{s+2}, \dots$ , 周围环境折射率为  $n_{ext}$ 。发光层的厚度为  $d$ 。顶部 DBR 对的反射系数为  $r_1$ , 底部 DBR 对的反射系数为  $r_2$ , 为了保证光出射, 要求  $r_1 < r_2$ 。光沿着腔光轴的传播经过多次振荡后就脱离了共振腔, 主要从顶部 (折射率较低) 镜面射出<sup>[3,4]</sup>。

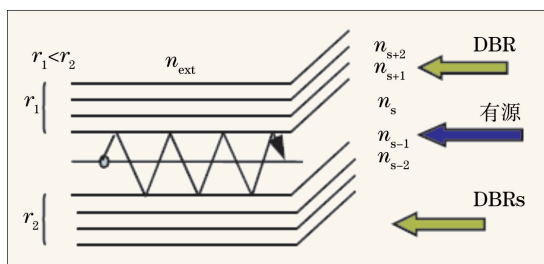


图 1 RCLED 基本结构

## 2.3 RCLED 设计要点

RCLED 的结构设计与传统 LED 相比, 不同之处在于 F-P 腔的设计, 其决定了出射光波长、光谱单色性和出射角度等光学性质。F-P 腔的设计规则有以下几个要点<sup>[5]</sup>。

### 2.3.1 腔厚度优化调节

在理想情况下, 当腔长为  $\lambda/2$  时, 所有光出射功率都是一个 F-P 模式, 但从技术角度来看, 由于考虑到损耗和光谱宽度等原因, 当有金属镜或介质镜时,  $1-\lambda$  腔长更为优越, 多用于实际器件。

### 2.3.2 有源层量子阱数量和位置选择

研究表明, 有源层的量子阱 (Quantum Well, QW) 最佳数目应控制在 3 个或 5 个。同时, 驻波偶极子位置决定了在一定模式下的光耦合强度。在驻波节点处使用薄有源层会使耦合强度最小, 而在波腹顶点处放置量子阱会使耦合强度最大。因此最佳偶极子位置是在 F-P 模式的波腹处。

### 2.3.3 反射镜 (DBR) 选取

首先, 透射深度需要最小化以提高提取效率, 且对于顶部 DBR, 要求低吸收损失。金属镜可以得到最小的透射深度, 但是由于高吸收损失, 不适合作为顶部 DBR。当金属作为底部反射镜, 沉积在外延生长后的半导体上时, 器件将从底部出光, 因此需要透明衬底或去掉衬底, 此时金属将同时作为反射镜和电极。如果能够找到折射率系数很高的透明材料, 就可以同时作为底部和顶部 DBR。

### 2.3.4 失调控制

为了进一步优化提取效率, 可以对 DBR 和腔模式波长进行相对发射光谱峰的失调。以腔长失调为例, 失调定义为:  $\Delta\lambda = \lambda_{CM} - \lambda_{QW}$  ( $\lambda_{QW}$ : 量子阱发射峰波长,  $\lambda_{CM}$ : 腔模式波长)。但是, 由于失调同时会导致光发射方向性降低, 这就需要在两者之间进行权衡<sup>[6]</sup>。

### 2.3.5 循环效应利用

在导波中的光子出射不能逃出腔体, 这些光子似乎是被消耗掉了, 其实它们能够在有源层中被再次吸收并发射, 使从腔中逃逸出来的光子数目增加。这种循环效应增加了内量子效率  $\eta_{int}$ , 相应的总外量子效率  $\eta_{ext}$  也会增加。循环效应的增加是 DBR 对数的函数, 导致了有源层周围的场效应更加集中, 加强了场交叠。另外, 由于吸收长度的典型值是  $50 \mu m$ , 因此, 在小尺寸器件中可忽略的循环效应在大直径器件中能够得到体现。

## 3 RCLED 的优点及应用领域

### 3.1 与传统 LED 相比

与传统平面 LED 相比, RCLED 有以下优点: 1) 光谱线宽较窄, RCLED 有源区的自发发射限制在微腔光场模式中, 因此相比传统平面 LED 光谱线宽可以更窄, 单色性更好, 20 mA 下光谱半峰全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 仅有十几个纳米; 2) 光输出方向性好, 共振腔的干涉效应使得器件光输出的方向性好, 发散角小, 与光纤的耦合效率更高; 3) 具有高亮度、高效率的特点。

### 3.2 与 VCSEL 相比

RCLED 和 VCSEL 都是具有 DBR 谐振腔的光发射器件, 它们结构的不同之处是两者的 DBR 对数有差异。两者都是垂直于腔面出光, 但发光原理不同, 前者是自发发射, 后者是需要达到粒子数反转才能起振的受激发射。与 VCSEL 相比, RCLED 优势有: 1) VCSEL 有阈值电流限制, 而 RCLED 不需要达到阈值条件就可激射, 所需驱动电流较小; 2) RCLED 工艺相对简单, 提高了工业产量, 且成本较低; 3) 相比 VCSEL 对温度敏感的缺点, RCLED 具有更好热稳定性。

### 3.3 RCLED 应用领域

从以上几点可以看出, 作为高效率发光器件, RCLED 的优点能够很好地应用在光通信领域和其他一些方面, 例如传感器、放映机光源、打印机和显示屏等。

光纤技术的出现和应用使得长距离通信速率得以大幅提高, 并由此促进了信息技术的快速发展。然而随着信息量的急剧膨胀, 非主干网短距离信息传输已逐渐成为信息传输的瓶颈, 由于光纤比同轴电缆的带宽大得多, 因此, 短距离光信息传输技术将是未来光电子技术应用的重点领域。目前, 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的塑料光纤(POF)由于其价格低廉、可靠耐用等优势, 在短距离数据通信系统中的应用已经非常广泛。但在光发射器件方面, 虽然还没有在 PMMA 吸收最小的波长 470 nm 附近的廉价光源, 但是可以利用在第二最小吸收波长 650 nm 的廉价光源, 达到光纤中的第二小衰减。LED 是一种无噪声光源, 且有很高的可靠性和寿命。同时, LED 的成本很低, 因此对不要求极端调制速率的应用, LED 是代替昂贵的激光器光源的首选器件。但是, 对数据中继系统, 由于传统 LED 的工作频率仅为 60 MHz, 所发射光的单向性较差, 光谱较宽且与光纤的耦合效率很低, 所以更倾向于使用垂直发射光源, 如 VCSEL 和 RCLED。VCSEL 具有谱线窄、适合制作面阵等优点, 但要求其共振腔、DBR 反射峰和有源区的增益峰要对准, 工艺条件较为苛刻。RCLED 是介于 LED 和 VCSEL 之间的一个很好的折中, 同时具有两者的优点。其中, 650 nm AlGaInP 基 RCLED 近来已经成为应用在基于 POF 的低成本、短距离网络通信系统中的最佳光源, 对民用数据通信系统的发展具有重大意义<sup>[7]</sup>。AlGaInP 基 RCLED 不仅是 POF 通信的理想光源, 由于其是 650 nm 可见光波长器件, 同样可用于其他要求高效率和高方向性的非通信领域, 如扫描仪、光电鼠标等。

由此可见, 红光 RCLED 不但应用领域十分广泛, 其发展前景也十分光明。随着市场需求不断增加, 是各大通信设备厂商的今后市场开发的重点之一。

## 4 RCLED 制造工艺

RCLED 制造工艺和传统 LED 类似, 金属有机化合物化学气相沉积 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 和分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 成为生长 RCLED 的主要方法。如今, 高质量 AlGaInP 材料系已经逐步取代 GaAsP 材料系, 成为红光波段的首选, DBR 材料多选用  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  或  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。为了避免 GaAs 衬底的吸收, RCLED 更适宜从顶部出光, 且需要对电流注入进行适当设计。目前市场大量生产的 RCLED 器件最大尺寸为  $300\text{ }\mu\text{m}\times 300\text{ }\mu\text{m}$ , 寿命达到  $10^5\text{ h}$  以上。

## 5 RCLED 发展概况

当今, RCLED 在提高输出功率、外量子效率调制速度、耦合效率和热稳定性可靠性几个方面均取得了一定进展。

### 5.1 效率提高

第一只高效率 RCLED 由 De Neve 等<sup>[8]</sup> 在 1995 年做出, 出射波长为 980 nm, 其最高外量子效率接近 23%。此后, RCLED 效率不断得到提高。近年来, RCLED 在提高效率和光功率方面的主要发展成果如下。

#### 5.1.1 共振腔反射 LED

针对普通 RCLED 的微腔共振仅仅改善了有源层出射光的光谱纯度和发射角度, 却降低了提取效率的

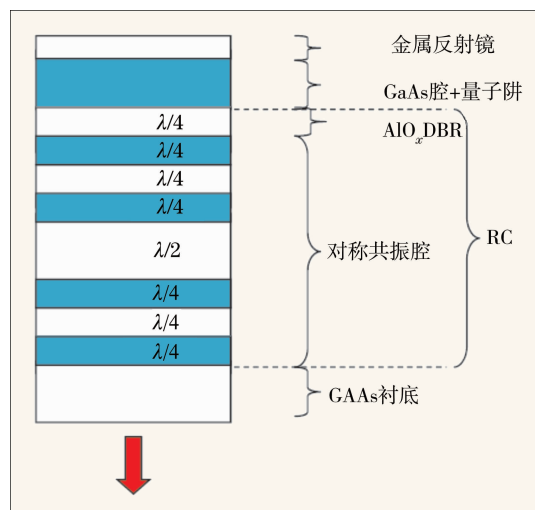


图 2 RCLED 结构



问题,RCLED (Resonant-Cavity Reflector, RCR)作为 RCLED 的改进结构在 2000 年由 Peter Bienstman 等<sup>[9]</sup>提出。其基本结构是在顶部 DBR 下面加入一个对称共振腔,形成共振腔反射,如图 2 所示。这种结构不仅可以得到更窄的出射光谱,而且相比传统 RCLED 的 DBR 结构,把对 TE 模的反射率提高到超过 90%,使在有限数值孔径内的提取效率提高了近一倍。

## 5.1.2 光栅辅助 RCLED

2002 年,D. Delbeke 等<sup>[10]</sup>通过将光栅辅助 (Grating Assisted, GA)结构放置在 RCLED 上,达到增加光输出功率的目的,且计算出方形光栅波长为 976 nm,周期为 300 nm 时光提取效率与格子深度的关系。GA-RCLED 与其他高效率 LED 相比的主要优点是,它可以有 1D 和 2D 阵列的平面器件。数值计算显示,用 DBR 和部分带有 2D 光栅的金属反射镜结合作为底部反射镜的 RCLED 效率超过了 40%。

## 5.1.3 薄膜 RCLED

由于 DBR 的透射深度和折射率差值成反比,且在红光波长范围的 AlGaAs 基 DBR 的折射率比在近红外波长范围的折射率要低,因此标准红光 RCLED 的外量子效率相比近红外 RCLED 的外量子效率更低<sup>[11]</sup>。在 DBR 中掺入氧化铝可以使折射率增加,提高提取效率。但是,DBR 的氧化大大增加了器件设计和制造的复杂程度。一个可供选择的解决办法是把共振腔和薄膜结构结合起来。这种方法包括对吸收衬底的移动和在镀介质镜上生长过渡外延结构。在 2004 年,加入了几微米厚 n 型 AlGaAs 电流扩展层的 650 nm AlGaInP/GaInP 薄膜 RCLED,封装和未封装器件的最大外量子效率分别达到 23%和 18%,对应光输出功率为 3.4 mW 和 5.4 mW<sup>[12]</sup>。

## 5.1.4 量子阱 RCLED 和量子点微腔 LED

2006 年,清华大学以 InAs/GaAs 作为有源层用 MOCVD 制造出了量子点微腔(QD-MC)LED,其峰值波长为 1320 nm,100 mA 下的光输出功率为 28  $\mu$ W<sup>[13]</sup>。值得一提的是,在 600~650 nm 红光波段 AlGaInP RCLED 的  $\eta_{\text{ext}}$  已经达到 10%以上<sup>[14]</sup>,并且,基于 IEEE 1394b 标准的发射波长 650 nm RCLED 也实现了产业化<sup>[15]</sup>。

## 5.2 调制速率提高

### 5.2.1 减少量子阱数目

2002 年,Shu-Woei Chiou 等<sup>[16]</sup>开始通过减少量子阱数目提高 RCLED 调制速率。2005 年,他们把量

子阱减少到一个时,标准孔径尺寸的器件性能为:小信号调制带宽( $f_{3\text{dB}}$ )在偏压电流 20 mA 下为 235 MHz,且没有其他方面损失,如最大输出功率、温度特性等。

### 5.2.2 Pt 外延掺杂 RCLED

2005 年,中国台湾 Chang L.B. 等<sup>[17]</sup>通过在 660 nm RCLED 外延层中扩散掺杂 Pt 原子,增加复合中心浓度来提高调制速率。在对放置了多个 AlInGaP 量子阱的 AlGaAs 共振腔进行重度掺杂 Pt 后,平均响应时间从 18.07 ns 提高到 12.21 ns,相应的调制频率( $f_{\text{cu}}$ )也从 19.54 MHz 提高到了 30.21 MHz。有报道指出,Pt 外延掺杂高调制频率 RCLED 还具有非常良好的温度特性<sup>[18]</sup>。

## 5.3 温度特性改善

### 5.3.1 控制失调

通过研究可知,决定 RCLED 器件特性的两个重要参数是:量子阱发射峰波长  $\lambda_{\text{qw}}$  和腔模式波长  $\lambda_{\text{cm}}$ ,两者的失调  $\Delta\lambda$  对优化光输出功率和温度特性非常重要。为了得到较小的温度敏感性,需要一定程度的正失调( $\Delta\lambda > 0$ )<sup>[19]</sup>。

### 5.3.2 硅晶片焊接技术

2007 年,在硅衬底上用晶片焊接技术制造出来了高温稳定的 GaInP-AlGaInP 金属焊接 RCLED (Metal-bonding RCLED, MBRCLD)。与传统 RCLED 相比,MBRCLD 的功率受温度影响的变化不大。84  $\mu$ m MBRCLD 在注入电流为 2.5 mA 和 20 mA 时,能量转换效率分别高达 13.7%和 10.75%,并且改良了热消散,从室温上升到 100℃时,功率只下降 0.31 dB<sup>[20]</sup>。

## 6 结语

介绍了一种前景光明的新型 LED——RCLED 的原理和设计要点,指出其与传统 LED 和 VCSEL 相比的优势,尤其在 650 nm 红光波段,可以作为 POF 民用数据通信系统用光发射器件的首选,具有广阔的市场前景,并概述了近年来国内外 RCLED,尤其是红光 RCLED 发展状况。虽然国外 RCLED 研究已经取得了很大进展,并且实现了商品化,但相比 AlGaInP 接近 100%的内量子效率,红光 RCLED 外量子效率还很低(10%),需要进一步提高器件出光效率、光功率、方向性和热稳定性。目前,由于国内对其研究正处在起步阶段,与国际领先水平尚有差距,还需要相关科技人员的进一步努力。

收稿日期:2008-07-07;收到修改稿日期:2008-09-01

基金项目:北京市教委(KM200810005002)资助项目;北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目。

作者简介:杨臻(1984-),女,硕士研究生,主要从事共振腔发光二

极管的器件设计和材料测试方面研究。

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

导师简介:李建军(1966-),男,博士,副教授,主要从事半导体光电子器的制备分析,半导体器件的计算机模拟方面的研究。

E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn

## — | 参考文献 | —

- Schubert E. F., Wang Y. H., Cho A. Y. *et al.*. Resonant cavity light-emitting diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(8): 921~923
- 马声全, 陈贻汉. 光电子理论与技术 [M]. 北京:电子工业出版社, 2005
- Lysak V. V., Lee Y. T.. Highly efficient resonant-cavity light-emitting diodes for compact color projectors [J]. *IEEE Optoelectron. Phys. Technol.*, 2007, **6**(20-22): 3~4
- Danaë D., Ronny B., Peter B. *et al.*. High-efficiency semiconductor resonant-cavity light-emitting diodes: a review [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2002, **8**(2): 189~194
- Baets R. G., Delbeke D., Bockstaele R. *et al.*. Resonant-cavity light-emitting diodes: a review [C]. *SPIE*, 2003, **4996**: 74~87
- Ochoa D., Houdre' R., Stanley R. P. *et al.*. Device simultaneous determination of the source and cavity parameters of a microcavity light-emitting diode [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(5): 2994~2995
- Mihail D., Mika S., Ville V. *et al.*. Visible-light emitting diodes based on microcavity concepts [C]. *SPIE*, 2001, **4278**: 50~60
- Blondelle J., De Neve Ho, Borghs G. *et al.*. High efficiency (>20%) microcavity LEDs [J]. *IEE Colloquium*, 1996, **267**: 12/3
- Bienstman P.. The RC<sup>2</sup>LED: A novel resonant-cavity LED design using a symmetric resonant cavity in the outcoupling reflector [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(6): 669~671
- Ghawana K., Delbeke D., Christiaens I. *et al.*. Grating-assisted resonant-cavity LEDs: toward thin film devices for heterogeneous integration [C]. *SPIE*, 2003, **4947**, 25: 31
- Ioray R., Ilegems M., Stanley R. P. *et al.*. Far-field radiation pattern of red emitting thin-film resonant cavity LED [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9): 1052~1054
- Joray R., Ilegems M., Stanley R. *et al.*. High brightness red emitting AlGaInP thin - film RCLED [C]. *SPIE*, 2004, **5594**: 190~192
- Huang K. F., Lee F. M., Hu C. W. *et al.*. 1.32  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum-dot resonant-cavity light-emitting diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Vac. Sci. Technol.*, 2006, **B24**(4): 1922
- Wirth R., Karnutsch C.. High-efficiency resonant-cavity LEDs emitting at 650 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 421~424
- Chiou S. W., Lee Y. C., Chang C. S.. High performance resonant cavity light emitting diode for plastic optical fiber application [C]. *SPIE*, 2004, **5366**: 36~37
- Chiou S. W., Lee Y. C., Chang C. S.. High speed red RCLEDs and VCSELs for plastic optical fiber application [C]. *SPIE*, 2005, **5739**: 129~131
- Chang L. B., Yeh D. H., Hsieh L. Z. *et al.*. Enhanced modulation rate in platinum-diffused resonant-cavity light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(9): 093504
- Li-Zen Hsieh, Der-Hwa Yeh, Liann-Be Chang *et al.*. Temperature characteristics of high modulation rate platinum-diffused algaInP resonant-cavity light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45**(9): 6911~6913
- Sipilä P., Saarinen M., Vilokkinen V.. Resonant cavity LED at 655 and 880 nm wavelengths [C]. *SPIE*, 2000, **3938**: 83
- Lee Y. C., Kuo H. C., Lee C. E. *et al.*. High-temperature stability of 650-nm resonant-cavity light-emitting diodes fabricated using wafer-bonding technique on silicon substrates [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(14):1060~1062