

doi:10.3788/gzxb20184707.0723001

## 微电流高效率 650 nm 谐振腔发光二极管

王元诚, 李建军, 王海阔, 王梦欢, 袁泽旭, 邹德恕

(北京工业大学 信息学部电子科学与技术学院, 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘 要:**基于微腔理论和薄膜光学传输矩阵模型,设计并制备了孔径不同的谐振腔发光二极管.通过对外延结构的设计和对器件的制备与测试,详细研究了微腔结构、腔谱失谐以及有效辐射面积对器件发光效率、峰值波长和半波全宽等性能的影响,最终降低了器件的启亮电流并且提升了器件的外量子效率.制备的器件能够在 100  $\mu\text{A}$  偏置电流下产生肉眼清晰可见的微瓦级光强,在 1 mA 电流下达到 0.16 mW 的光功率和 7% 的外量子效率.器件的峰值波长为 650 nm,并且在 0.1~7 mA 范围内不随电流改变而发生变化.远场分布为均匀对称的圆形光斑,水平和竖直发散角分别为 46° 和 48°.与普通发光二极管相比,该器件具有更高的发光效率和更好的单色性、方向性、波长稳定性,研究成果为实现微小电流驱动的高亮度发光器件提供了基础元件,并为谐振腔发光二极管在微电流下的光电特性研究提供参考与借鉴.

**关键词:**谐振腔发光二极管; 微电流; 高效率; 腔谱失谐; 光子回收效应

**中图分类号:** O431.2; O432.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)07-0723001-7

## Micro Current High Efficiency 650 nm Resonant Cavity Light Emitting Diode

WANG Yuan-cheng, LI Jian-jun, WANG Hai-kuo, WANG Meng-huan, YUAN Ze-xu, ZOU De-shu  
(Key Laboratory of Opto-Electronics Technology Ministry of Education, College of Electronic Science and Technology, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the micro cavity theory and the film optical transmission matrix model, the resonant cavity light emitting diodes with different aperture have been designed and fabricated. Through the design of epitaxial structure as well as the preparation and testing of devices, in this paper, the effects of microcavity structure, cavity spectrum detuning and effective radiation area on the luminous efficiency, peak wavelength and full width of the half wave were investigated in detail. In the end, the bright current of the device is reduced and the external quantum efficiency of the device is improved. The device can produce visible light intensity at the 100  $\mu\text{A}$  bias current. At 1 mA current, the power is 0.16 mW and the external quantum efficiency is 7%. The peak wavelength of the device is 650 nm, which had not changed with the current in the range of 0.1~7 mA. The far-field distribution is circular spot with uniform symmetry, and the horizontal and vertical divergence angles are 46° and 48° respectively. Compared with ordinary light emitting diode, the device has higher luminous efficiency and better monochromaticity, directivity, wavelength stability. This research has provided devices for realizing high current luminescent driven by micro current, and provided references for the research of the photoelectric characteristics of resonant cavity light emitting diodes under micro current.

**Key words:** Resonant cavity light emitting diodes; Micro currents; High efficiency; Detuning between cavity mode and spectra; Photon recovery effect

**OCIS Codes:** 230.3670; 230.1480; 230.3670

**基金项目:**光电子技术教育部重点实验室发展基金(No.PXM2017\_014204\_500034)和北京市教委能力提升项目(No.PXM2016\_014204\_500026)资助

**第一作者:**王元诚(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为发光二极管.Email: s201502003@emails.bjut.edu.cn

**导师(通讯作者):**李建军(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为大功率半导体激光器 Email: lijianjun@bjut.edu.cn

**收稿日期:**2018-01-18; **录用日期:**2018-03-20

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

随着发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)应用不断拓展以及市场渗透率逐步提升,近年来,全球LED产业需求稳定增长.2016年LED照明市场规模已达到296亿美元,具有高亮度、低功耗的高性能LED已成为照明、户外全彩显示、智能产品背光源、生物农业光照、集成光子计算以及光纤传送数字通信的核心器件<sup>[1]</sup>,特别是在照明领域,LED已经取代传统白炽灯成为照明的主流光源.1946年,Purcell预言了辐射源所处的电磁环境能改变其自发辐射特性的现象.将辐射源置于尺寸在波长量级的腔中,则它在腔谐振模式处的自发辐射将得到增强<sup>[2]</sup>.1989年,Dallesasse和Holonyak等发现通过氧化 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料来改变和控制其物化性质的方法<sup>[3]</sup>,使得这项技术成为红光波段III-V族化合物半导体垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)制备工艺中最常用的一种技术.大多数与VCSELs结构相似的发光二极管也开始采用氧化 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的方法来限制电流的和光子的运动.谐振腔发光二极管(Resonant-Cavity Light emitting Diodes, RCLED)又被称为微腔发光二极管(Microcavity Light-emitting Diode, MCLED),这个概念在1992年被贝尔实验室的Schubert等首次提出<sup>[4]</sup>.共振腔发光二极管可视为VCSEL与LED二者的结合,同时兼具了两者的优点.相比于传统LED,采用谐振腔设计的共振腔发光二极管使出射的光能够具有更高的光强、效率、调制带宽,以及更好的方向性、光谱纯度、温度可靠性.虽然VCSEL有更出色的发光强度和远场性能,譬如在发光强度、出光方向性以及圆形光斑对称性等方面更加出色,但工艺复杂且受制于阈值限制.近年来发射波长为650 nm的红光RCLED凭借良好的发光性能在塑料光纤通信、照明显示等领域具备良好的应用价值<sup>[5]</sup>,有望进一步应用在微型器件的人脸识别模块等新兴技术领域.然而以往RCLED的研究当中,制备的器件出光孔径普遍大于 $80\ \mu\text{m}$ ,工作电流在20 mA以上,存在着启亮电流高、电流扩展不均以及小电流下外量子效率低等问题;并且对于小尺寸RCLED的研究成果中,器件发光效率十分低,光功率在微瓦级<sup>[6]</sup>,光电转换效率仅有3%<sup>[7]</sup>左右,迫切需求一种能够在 $100\ \mu\text{A}$ -5 mA微电流下工作,适用于微型电子器件和电池驱动的高效节能光源.由于针对微电流驱动RCLED的深入研究未有所见,本文重点探讨能够降低RCLED工作电流和提升外量子效率的方法,通过实验对比发现利用腔谱失谐和氧化控制等方式,可以有效提高器件在微电流下的外量子效率,并根据实验结果对微电流下影响器件光电特性的因素进行研究分析.

## 1 器件结构设计

图1为650 nm谐振腔发光二极管的三维结构示意图.RCLED的基本结构主要由上、下分布布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)和夹在反射镜之间的含有源区的谐振腔三部分组成.由谐振腔理论<sup>[8]</sup>

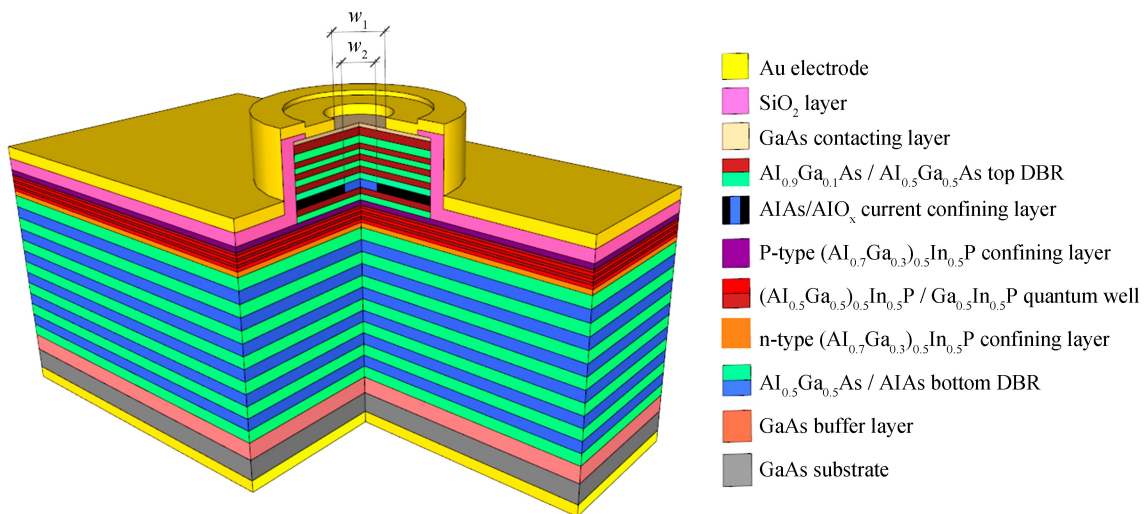


图1 650 nm 谐振腔发光二极管三维结构示意图

Fig.1 Three-dimensional diagram of 650 nm resonant cavity light emitting diode

可知,微腔效应改变了电磁场的模式结构,增大了选定波长的光模式密度,因而 RCLED 比无腔 LED 发光效率有极大提升.LED 的外量子效率为

$$\eta_{\text{out}} = \frac{P_{\text{opt}}/h\nu}{I/q} \quad (1)$$

式中,  $P_{\text{opt}}$  为发射光强,  $\nu$  为光的频率,  $I$  为电流强度,  $q$  为电子的电荷量.可以看出提高外量子效率  $\eta_{\text{out}}$  本质上就是单位时间、单位面积内注入更多电子-空穴对形成激子,并使激子自发辐射后产生的光子能更多的从器件表面发射出去.影响  $\eta_{\text{out}}$  的因素有三点:电流注入效率  $\eta_{\text{inj}}$ ,内量子效率  $\eta_{\text{int}}$ ,以及光提取效率  $\eta_{\text{extr}}$ .利用多量子阱(Quantum Well, QW)和异质结设计所构成的有源区可以使 LED 的内部效率之积  $\eta_{\text{int}}\eta_{\text{inj}} \approx 1$ ,因此研究重点在于如何提高  $\eta_{\text{extr}}$ .

纵向外延设计中重点研究了失谐对  $\eta_{\text{extr}}$  的影响.失谐是指谐振腔长  $\lambda_{\text{Cav}}$  与自发辐射谱峰值波长  $\lambda_{\text{SE}}$  两者不一致.为获得最大  $\eta_{\text{extr}}$ , QW 的发光光谱尽可能位于 RCLED 的光逃逸窗口中.RCLED 的逃逸窗口由  $\lambda_{\text{Cav}}$  作为长波长限制,全反射角决定的腔倾角  $\theta$  作为短波长限制.为了提高  $\eta_{\text{extr}}$  应使  $\lambda_{\text{SE}}$  失谐到比  $\lambda_{\text{Cav}}$  更短的波长范围,使提取锥中光子数目达到最大值.从热学角度解释:对于同样的温度变化量,  $\lambda_{\text{SE}}$  比  $\lambda_{\text{Cav}}$  的红移量大,改变量分别为  $0.14 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  和  $0.04 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  [9],失谐设计能够保证在达到工作电流所对应温度时腔模和发射光谱趋于一致.发光强度最大时的角度与失谐程度,可以通过式(2)求得.

$$\theta_{\text{max}} = \arcsin[(n_{\text{h}}/n_{\text{out}})\sqrt{1-(\lambda_{\text{SE}}/\lambda_{\text{Cav}})^2}] \quad (2)$$

式中,  $n_{\text{h}}$  和  $n_{\text{out}}$  分别为上 DBR 所包含高折射率层的折射率和空气的折射率,通过  $\lambda_{\text{SE}}$  和模拟所得  $\theta_{\text{max}}$ ,可计算对应的失谐  $\lambda_{\text{Cav}} = 652 \text{ nm}$ .图 2 利用光致发光原理所测芯片  $\lambda_{\text{Cav}} = 652 \text{ nm}$ ,符合预期.上 DBR 数量同样会对  $\eta_{\text{extr}}$  产生巨大影响,为了提高  $\eta_{\text{extr}}$ ,通过减少上 DBR 数量来增加非相干光的透射率,但会降低自发辐射光谱纯度.本文以 5 对  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  作为 P 型 DBR.

图 1 所示器件结构中,  $w_1$  为氧化电流限制层孔径,  $w_2$  表示环形出光孔的直径.横向工艺设计目的是探究尺寸效应对  $\eta_{\text{extr}}$  的具体影响.根据  $w_1$  的大小可以将 RCLED 分为大( $w_1 > 50 \mu\text{m}$ )、小尺寸( $w_1 < 50 \mu\text{m}$ )两类.已有关于改变大尺寸器件的有效辐射面积对器件发光效率影响的研究报道 [10],但目前为止,鲜有过大、小尺寸器件的特性对比研究报道.根据  $R_{\text{sp}} = B_{\text{np}}$ ,利用对湿法氧化等工艺的精确控制,制备不同尺寸器件并测量  $\eta_{\text{out}}$  进行对比研究.保证  $w_2 > w_1$  可避免载流子在 P 型金属区域下方的复合,并让与腔轴不垂直的光出射.

## 2 器件制备

图 1 中 650 nm RCLED 的外延结构外延生长过程为:利用 EMCORE D125 系统,在(100)偏  $\langle 111 \rangle 15^\circ$  的 N 型 GaAs 衬底上生长 AlGaAs 过渡层,随后交替生长 34 对厚度均为  $1/4$  光学波长反射率达到 99.34% 的 AlAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  下 DBR,之后在下 DBR 上方生长谐振腔结构,其中包括:48.6 nm 厚的掺杂 ( $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}$ ) $_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  上下限制层和 3 对 5nm 厚的紧密排列的 ( $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ ) $_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaInP}$  量子阱,之后再在谐振腔上生长反射率达到 60% 的 5 对 P 型  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  和 1 对 AlAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  作为上 DBR,后者通过氧化可以作为电流限制层,接着生长一层掺 C 的重掺杂 GaAs 欧姆接触层增强电流扩展能力,掺杂浓度为  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .生长中用到的 V 族源是纯度为 6N 的  $\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$ , III 族源为 TMGa、TMAI 和 TMIIn,载气为经钯管纯化后的高纯  $\text{H}_2$ ,生长温度在  $600\text{--}700^\circ\text{C}$ .

工艺制备过程为:首先清洁原片然后用等离子体增强化学气相沉积法(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)生长 300 nm 的  $\text{SiO}_2$  作为掩膜层,光刻并利用湿法腐蚀除去待刻蚀区域上面  $\text{SiO}_2$  掩膜留下圆形掩模,之后利用等离子电感耦合刻蚀(Inductively Coupled Plasma, ICP)工艺,刻蚀出圆柱

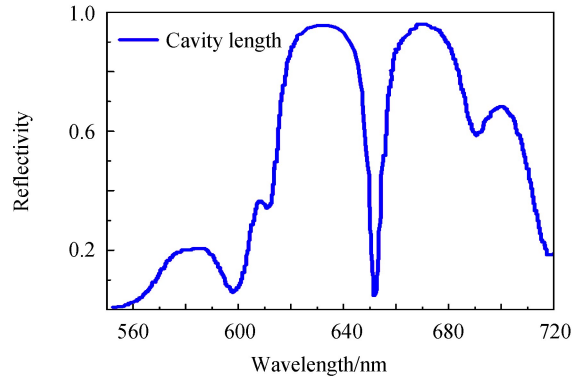


图 2 650 nm RCLED 的白光反射谱  
Fig.2 White light reflection spectrum of 650 nm RCLED

形台面,直径为  $80\ \mu\text{m}$ ,深度为  $600\ \text{nm}$  达到有源区层.然后利用湿法氧化工艺,严格把握时间,气体流量,水浴温度等工艺参数,将台柱侧壁裸露出的 AlAs 组分进行选择性氧化得到图 3 所示四组氧化孔径芯片.生成物  $\text{AlO}_3$  既能够凭借极低的电导率形成电流的横向限制,又能与中心材料形成折射率差提供光波导限制.然后腐蚀去掉剩余的  $\text{SiO}_2$  掩模,再重新通过 PECVD 淀积一层  $200\ \text{nm}$  厚的  $\text{SiO}_2$  作为 p 型电极与接触层表面的电隔离层.之后进行二次光刻,在直径为  $80\ \mu\text{m}$  的圆柱台面上腐蚀出同心孔状图形.之后进行反转光刻,利用磁控溅射仪溅射出厚度为  $50/300\ \text{nm}$  的 Ti/Au P 型电极,通过剥离工艺留下电极露出出光孔径.然后将背面衬底减薄至  $100\ \mu\text{m}$ ,溅射  $50/300\ \text{nm}$  的 AuGeNi/Au n 型电极.最后合金退火、压焊封装.在温度为  $435^\circ\text{C}$ ,时间  $45\ \text{s}$  条件下进行快速退火工艺,解理得到  $330\ \mu\text{m}\times 280\ \mu\text{m}$  尺寸的单管芯片,压焊封装<sup>[11]</sup>后测试器件性能.

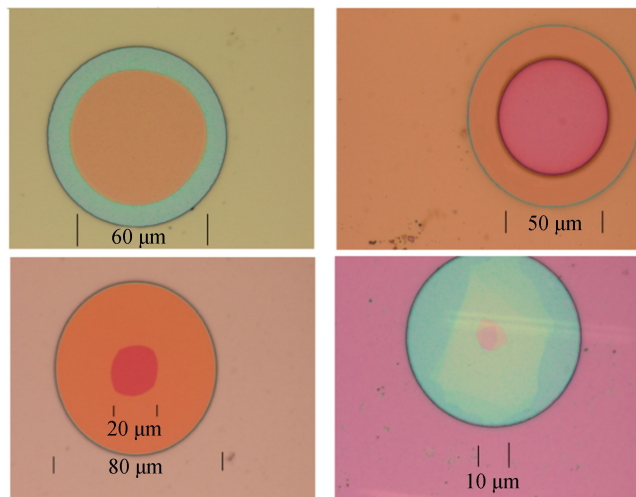


图 3 不同氧化孔径芯片的显微照片

Fig.3 Micrograph of different size oxidation aperture

### 3 实验结果与分析

图 4 为不同器件的光功率随电流变化曲线,在实验中设计了 4 组孔径不同其他结构均相同的  $650\ \text{nm}$  RCLED.首先将 4 组不同孔径 RCLED 进行对比,从图 4 中可以看出小尺寸器件在微电流下有更高的功率,但尺寸减小更易发生电流饱和效应.开始电流增加,由于电流注入面积越小,单位时间和面积下电子浓度就越高,使得  $R_{sp}$  也越高,电流进一步加强,注入载流子浓度增加,使得准费米能级提升,量子阱对载流子的限制减弱,产生载流子溢出使内量子效率下降.为了获得在约  $0.1\sim 2\ \text{mA}$  的微电流下产生较高光功率的  $650\ \text{nm}$  RCLED,器件尺寸需达到  $10\sim 20\ \mu\text{m}$ .然后将  $60\ \mu\text{m}$  孔径的两种 LED 进行对比,普通红光 LED 在  $2\ \text{mA}$  下的发光功率仅有  $0.1\ \text{mW}$ ,而同样  $60\ \mu\text{m}$  尺寸的 RCLED 发光功率是普通 LED 的 1.5 倍.这是由于腔的干涉

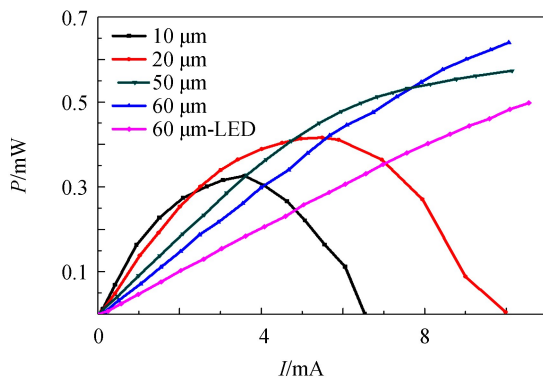


图 4 不同尺寸 RCLED 的功率曲线

Fig.4 Plot of power and current of RCLED with different size

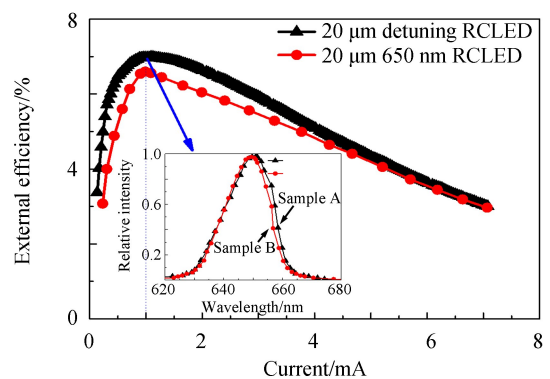


图 5 失谐器件外量子效率与电流的关系曲线/发射光谱

Fig.5 Plot of external quantum efficiency and current in detuning device/Emission spectra



效应,自发辐射光子的优先传播方向被改变,从而器件内部辐射中心的角功率分布改变,更多的光进入 RCLED 辐射立体角内.而普通无腔器件可看作是漫发射源,发光亮度分布接近标准朗伯发射体(余弦发射体)的空间分布模型<sup>[12]</sup>,光谱涵盖角度较大,并且在半导体-空气界面处存在很大的折射率差,根据 Snell 定律光只能从很小的临界角范围内出射,使得 AlGaInP LED 的发光效率低于 3%.

图 5 为测试所得的  $\eta_{out}$  与电流关系曲线.为了研究失谐设计对  $\eta_{out}$  的影响,设计了孔径均为 20  $\mu\text{m}$  的 A、B 两组 RCLED 器件.A 为腔模失谐 RCLED,B 为未失谐 RCLED.两组器件在 1 mA 时  $\eta_{out}$  达到最大,可以看出 A 组能够提高  $\eta_{out}$  约 0.5%.插图是 1 mA 下两组器件的光谱图,A、B 的峰值相差 2 nm 说明失谐是使 RCLED  $\eta_{out}$  增加的关键因素,这是由于工作电流下 652 nm 失谐设计使光谱与光子逸出窗口重叠程度提高,导致更多光子出射.这与前面理论分析相符.在 1 mA 以下 A 组器件的  $\eta_{out}$  随电流增加而逐渐提高,在 1 mA 时达到最大值 7%,电流继续增加  $\eta_{out}$  逐渐减小,这是由于器件刚启亮时器件的电流密度较小,载流子浓度开始迅速增加,使  $\eta_{int}$  随之大幅增加, $\eta_{out}$  增长曲线呈陡直状态,随着电流继续增加器件内部的电场急剧增大,注入的载流子急剧增多,形成的激子也迅速增多,此时辐射型复合接近饱和, $\eta_{inj}$ 、 $\eta_{int}$  达到最大值,因此器件的  $\eta_{out}$  也达到最大值.再继续加大器件上的电压,器件在高电流密度下会产生电荷的诱导吸收和激子之间猝灭效应<sup>[13]</sup>,因而器件的发光效率会逐步降低.

传统大尺寸红光 RCLED 有更高的  $\eta_{extr}$ , $\eta_{out}$  最高可达 20%,但受制于微电流下低电流密度;而对于小尺寸红光 RCLED 的发光效率一般低于 4%<sup>[14-15]</sup>,原因有以下两点:1)小尺寸 RCLED 在大电流密度下热效应增加,会发生自发发射光谱展宽现象使发射光谱与腔模严重失谐,此外量子阱内载流子泄漏会降低  $\eta_{int}$ ;2)大尺寸 RCLED 中有源区能够发生“光子回收效应”<sup>[16]</sup>将光波导中逃逸出的光子进行吸收并再发射至提取锥中.但吸收效率会随着载流子密度增加而减小.因此大尺寸器件载流子密度小光子回收效应显著,有更高的  $\eta_{extr}$ ;小尺寸的器件载流子密度大很容易吸收饱和.Po-Hsun Lei 等曾利用电介质 DBR 制备出在 1 mA 微电流下最高  $\eta_{out}=6\%$  的 650 nm RCLED<sup>[17]</sup>,本文在此基础上使  $\eta_{out}$  获得了提升.可以看出小尺寸器件在微电流下能够进行高效率的工作.

图 6(a)为 4 组不同器件的半波全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)图.将 20  $\mu\text{m}$  孔径的失谐器件与未失谐器件进行比较,5 mA 下两种 20  $\mu\text{m}$  器件的 FWHM 均约为 19 nm,可以看出失谐并未对 FWHM 产生明显影响.而尺寸增大至 60  $\mu\text{m}$ ,器件 5 mA 下的 FWHM 仅为 14 nm,可见小尺寸器件可提高注入电流效率,但电流密度过大会使热效应加剧,造成 FWHM 展宽的现象,而大尺寸器件载流子浓度低电流热效应较弱,发射光谱展宽不明显.与 60  $\mu\text{m}$  尺寸无腔型 650 nm LED 在 5 mA 电流下 FWHM 为 17 nm 相比较,RCLED 的光谱纯度更高.图 6(b)为 4 组不同器件的峰值波长  $\lambda_p$  图.能够看出 RCLED 的失谐和尺寸变化均不会对  $\lambda_p$  产生影响,稳定在 650 nm 左右;而普通 LED 的  $\lambda_p$  在 1 mA~7 mA 电流变化范围内从 650 nm 变化至 654.5 nm.这是因为普通 LED 的  $\lambda_p$  由自发发射谱决定,而 RCLED 的  $\lambda_p$  由共振腔的腔模决定,可以证明 RCLED 比普通 LED 具有更加优秀的单色性和温度稳定性.

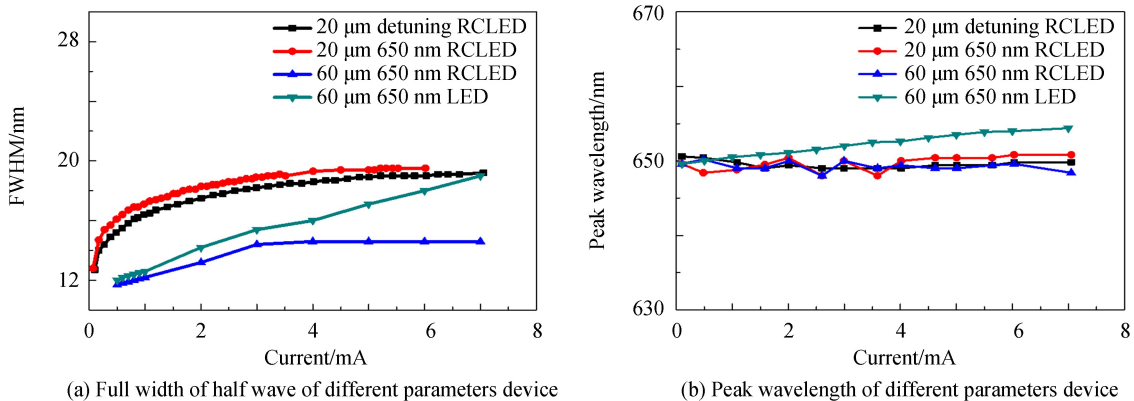


图 6 器件尺寸对光谱影响

Fig.6 The influence of the size of the devices on the spectrum

图7为室温下测得的650 nm RCLED在2 mA下的远场图.蓝色和红色的闭合曲线图形分别表示仪器沿两个在空间上相互垂直的不同方向测量所得的远场图像,插图为用光束分析仪测量的2 mA下芯片远场光斑,可以观察到器件在不同方向的远场分布均为对称的圆形光斑;器件的水平发散角为 $46^\circ$ ,垂直发散角为 $48^\circ$ ,相比于普通650 nm LED的发散角大于 $100^\circ$ <sup>[18]</sup>表现出更好的方向性,未经环氧或金属封装即可满足指示照明的需求.

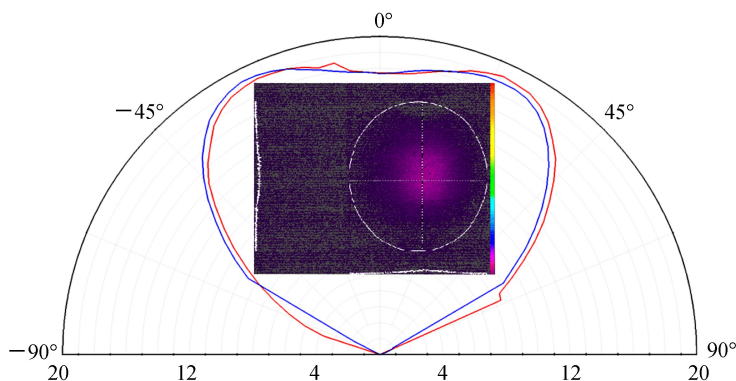


图7 RCLED在2 mA电流下的远场图像  
Fig.7 Far-field distribution of RCLED under 2 mA

## 4 结论

本文基于微腔理论和腔谱失谐设计,并利用侧向湿法氧化工艺进行深度氧化对有源区内光场和电流进行有效限制,使微电流下的 $\eta_{\text{out}}$ 获得提高,设计并最终制备了微电流高亮度的650 nm谐振腔发光二极管单管器件.测试器件可在0.1~5 mA电流下进行高效率的工作, $\eta_{\text{out}}$ 最高值达到7%,最大光功率可达0.42 mW,峰值波长为650 nm,同时具有良好的峰值波长稳定性、出光方向性、远场光斑对称性和温度稳定性等特征.在今后的研究工作中,利用ITO窗口技术、有源区两侧添加电流阻挡层、多有源区并联<sup>[19]</sup>等一系列更为先进的外延及工艺方法,可以使 $\eta_{\text{ext}}$ 进一步的提高来获得更高效的微电流RCLED器件.

### 参考文献

- [1] YANG Zhen, LI Jian-jun, KANG Yu-zhu, *et al.* The principle and development of visible resonant cavity light emitting diode [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12):25-29.  
杨臻,李建军,康玉柱,等.可见光共振腔发光二极管原理及发展概况[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(12):25-29.
- [2] HASHEMI E, BENGTESSON J, GUSTAVSSON J, *et al.* Air-suspended TiO<sub>2</sub>-based HCG reflectors for visible spectral range[C]. SPIE, 2015, 9372:93720D.
- [3] DALLESASSE J M, HOKONYAK N. Monolithic integration of an (Al)GaAs laser and an intracavity electroabsorption modulator using selective partial intermixing[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **58**(13):1363-1365.
- [4] SCHUBERT E F, WANG Y, CHO A Y, *et al.* Resonant cavity light-emitting diode[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, **60**(8):921-923.
- [5] MOUDAKIR T, GENTY F, KUNZER M, *et al.* Design, fabrication, and characterization of near-milliwatt-power RCLEDs emitting at 390 nm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, **5**(6):8400709-8400709.
- [6] STREUBEL K, HELIN U, OSKARSSON V, *et al.* High brightness visible (660 nm) resonant-cavity light-emitting diode[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 1998, **10**(12):1685-1687.
- [7] LEE Y C, LEE C E, CHENG B S, *et al.* High-performance 650 nm resonant-cavity light-emitting diodes for plastic optical-fiber application[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, **46**(4):2450-2453.
- [8] LI Jian-jun, YANG Zhen, HAN Jun, *et al.* High performance resonant cavity LEDs for POF[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9):6304-6307.  
李建军,杨臻,韩军,等.用于POF的高性能共振腔发光二极管[J]. *物理学报*, 2009, **58**(9):6304-6307.
- [9] SCHUBERT E F, HUNT N E J, MALIK R J, *et al.* Temperature and modulation characteristics of resonant-cavity light-emitting diodes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **14**(7):1721-1729.
- [10] CHIOU S W, LEE Y C, YANG Y C, *et al.* High-performance resonant cavity light-emitting diode for plastic optical fiber application[M]. 2004.
- [11] CAO Yan-ting, CHEN Chao, LIANG Pei, *et al.* The effect of phosphor encapsulation on the encapsulation efficiency of multi chip array LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(7):0723003.

- 曹艳亭, 陈超, 梁培, 等. 荧光粉封装方式对多芯片阵列 LED 封装效率的影响[J]. 光子学报, 2016, **45**(7):0723003.
- [12] HAN Jun, LI Jian-jun, DENG Jun, *et al.* High luminance AlGaInP red light emitting diode [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(2):32-34.  
韩军, 李建军, 邓军, 等. 高亮度 AlGaInP 红光发光二极管[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(2):32-34.
- [13] MA Feng-ying, SU Jian-po, GUO Mao-tian, *et al.* Research on external quantum efficiency of micro cavity surface emitter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(6):304-309.  
马凤英, 苏建坡, 郭茂田, 等. 微腔面发射器件外量子效率研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(6):304-309.
- [14] PENDRY J B, GARCIA VIDAL F J. Computational studies of photonic band gaps in metals[C]. IEEE Colloquium on Semiconductor Optical Microcavity Devices & Photonic Bandgaps, IEEE Xplore, 1996;5/1-5/6.
- [15] ZHEN Yang, LI Jian-jun, KANG Yu-zhu, *et al.* Effect of top distributed Bragg reflectors on the performance of 650 nm AlGaInP resonant cavity light-emitting diodes[J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, **6**(1):21-23.  
杨臻, 李建军, 康玉柱, 等. 650nm AlGaInP 谐振腔发光二极管中上分布布拉格反射镜的影响[J]. 光电子快报, 2010, **6**(1):21-23.
- [16] NEVE H D, BLONDELLE J, DAELE P V, *et al.* Recycling of guided mode light emission in planar microcavity light emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, **70**(7):799-801.
- [17] LEI P H, YANG C D. 650 nm Resonant-cavity light-emitting diodes with dielectric distributed Bragg reflectors[J]. *Solid State Electronics*, 2008, **52**(2):227-232.
- [18] ZHENG Yuan-yu, WU Chao-yu, LIN Feng, *et al.* Composite DBR structure AlGaInP light emitting diode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(5): 052301.  
郑元宇, 吴超瑜, 林峰, 等. 复合 DBR 结构 AlGaInP 发光二极管[J]. 激光与光电子学进展, 2017, **54**(5): 052301.
- [19] LIAN Peng, YIN Tao. Novel coupled multi-active region high power semiconductor lasers cascaded via tunnel junction [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(12):2374-2377.  
廉鹏, 殷涛, 等. 新型多源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器[J]. 物理学报, 2000, **49**(12):2374-2377.

**Foundation item:** Key Laboratory of Optoelectronics Technology Ministry of Education Development Fund (No. PXM2017\_014204\_500034), Project of Capacity Improvement Project of Beijing Municipal Education Commission (No. PXM2016\_014204\_500026)

引用格式: WANG Yuan-cheng, LI Jian-jun, WANG Hai-kuo, *et al.* Micro Current High Efficiency 650 nm Resonant Cavity Light Emitting Diode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7):0723001

王元诚, 李建军, 王海阔, 等. 微电流高效率 650 nm 谐振腔发光二极管[J]. 光子学报, 2018, **47**(7):0723001