

· 封底文章 ·

# 面向微显示的小电流 655 nm Micro-RCLED

李建军\*, 曹红康, 邓军, 文振宇, 邹德恕, 周晓倩, 杨启伟

北京工业大学光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

**摘要** 针对微显示对高外量子效率、低工作电流和稳定光谱波长的红光 LED 的需求, 提出了一种将共振腔发光二极管与 AlAs 侧向氧化技术相结合的 Micro-RCLED。该器件利用共振腔改变有源区自发辐射场的空间分布, 将更多的光分布在光提取角之内以提高光提取效率, 而且共振腔还有利于输出光谱波长的稳定。AlAs 氧化孔对电流的横向限制既有利于降低侧壁的 Shockley-Read-Hall 非辐射复合, 又可减少漏电, 从而提高辐射复合效率。另外, P 电极出光孔的直径大于 AlAs 氧化电流注入孔的直径, 因此, 金属 P 电极对出射光的吸收可以有效避免。同时, 制作了 3 个并联的 655 nm Micro-RCLED, 每个单元的出光孔径为 17  $\mu\text{m}$ 。IdV/dI-I 曲线的拟合结果表明, 120  $\Omega$  的串联电阻器件在 1 mA 时的输出光功率为 0.21 mW, 外部量子效率大于 10%, 并且可以在低于 1  $\mu\text{A}$  的注入电流下点亮单个单元。另外, 当工作电流密度变化 12.5 倍时, 峰值波长仅增加 1.5 nm, 光谱的半峰全宽仅增加 0.33 nm。这使得 RCLED 作为单色光源在 Micro-LED 中的应用成为可能。

**关键词** 物理光学; 发光; 谐振腔; AlAs 横向氧化; 微型发光二极管; 红光发光二极管

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1526002

## Realization of 655 nm Micro-RCLED Working at Low Driving Current for Micro-Displays

Li Jianjun\*, Cao Hongkang, Deng Jun, Wen Zhenyu, Zou Deshu,

Zhou Xiaoqian, Yang Qiwei

Key Laboratory of Opto-Electronic Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology,  
Beijing 100124, China

**Abstract** In response to the needs of micro-displays for red LEDs with high external quantum efficiency, low operating current, and stable spectral wavelength, a Micro-RCLED that combines resonant cavity light-emitting diodes with AlAs lateral oxidation technology is realized. The device changes the spatial distribution of the spontaneous radiation field in the active region by a resonant cavity to concentrate more light within the light extraction angle to improve the light extraction efficiency, meanwhile, the resonant cavity is also beneficial to deminish the shift of the optical spectrum. The lateral current confinement to the AlAs oxide aperture can not only decreasing the Shockley-Read-Hall non-radiative recombination due to the sidewalls defects, but also reducing the leakage current so to improve the radiative recombination efficiency. In addition, the diameter of the light exit aperture of the P electrode is larger than that of the AlAs oxidation aperture, so that the absorption of the outgoing light by the P electrode can be effectively avoided. The 655 nm Micro-RCLED with 3 units parallel connected is fabricated, in which each unit has an exit aperture of 17  $\mu\text{m}$  diameter. Fitting result of IdV/dI-I shows a reasonable 120  $\Omega$  series resistance. The output optical power of the device at 1 mA is 0.21 mW, the external quantum efficiency is greater than 10%, and a single unit can be lighted up at an injection current lower than 1  $\mu\text{A}$ . In addition, when the working current density changes by 12.5 times, the peak wavelength only increases by 1.5 nm, and the full width at half maximum of the spectrum increases just 0.33 nm.

**Key words** physical optics; luminescence; resonant cavity; AlAs lateral oxidation; micro light emitting diode; red light emitting diode

**OCIS codes** 260.3800; 260.5740; 250.5590

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-04-28; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0209003)、北京市基金(4182011)、北京市教委科技创新服务能力建设项目(PXM2019\_014204\_500032)

\* E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn

# 1 引 言

Micro-LED是指发光单元横向尺寸在 $50\ \mu\text{m}$ 以下的LED<sup>[1]</sup>。与其他显示技术(例如LCD和OLED)相比,微型LED具有效率高、寿命长、亮度高和可靠性高的优势<sup>[2]</sup>,因此,其在自发射微显示器、微投影仪和可穿戴设备等领域有着巨大的潜在应用市场<sup>[3-5]</sup>。当前,已经制备出了GaInN基的像素间距为 $12.8\ \mu\text{m}$ (像素大小为 $8\ \mu\text{m}$ )的 $960\times 540$ 面阵蓝光微显示器<sup>[6]</sup>和像素间距为 $10\ \mu\text{m}$ (像素大小为 $8\ \mu\text{m}$ )的 $873\times 500$ 面阵蓝/绿光微显示器<sup>[7]</sup>。对于LED大屏幕显示,可通过一种全新的现场可编程门阵列(FPGA)系统框架来灵活实现<sup>[8]</sup>,而为了获得具有高对比度和高显色性的微型显示器,集成红色、绿色和蓝色LED的全彩色RGB微型显示器是未来的发展趋势<sup>[9]</sup>,因此,除了高效率的蓝/绿光Micro-LED,微电流、高效率的红光Micro-LED也必不可少。Horng等<sup>[10]</sup>基于复杂的芯片倒装工艺,制备出 $114.3\ \mu\text{m}\times 127\ \mu\text{m}$ 的AlGaInP Micro-LED,在注入电流为 $5\ \text{mA}$ 时,外部量子效率达到 $19\%$ 。然而,由于AlGaInP红光LED的衬底吸收、电流拥挤及内反射效应,造成红光Micro-LED的效率普遍较低, $200\ \mu\text{m}$ 外延片在 $10\ \text{mA}$ 的外加电流下,外部量子效率为 $4.35\%$ <sup>[11]</sup>。用于提高常规LED效率的金字塔结构、电流阻挡层、表面织构等<sup>[12]</sup>技术,对于红光Micro-LED都不太适用。另外,对于横向宽度为 $w$ ,发光面为正方形,厚度为 $d$ 的Micro-LED而言,其侧表面积与出光表面积的比是 $4d/w$ ,当厚度 $d$ 一定时,随着横向尺寸 $w$ 的减小,Micro-LED的侧表面积占比会更大,侧壁相对面积的比例也更大,导致侧壁缺陷处的Shockley-Read-Hall(SRH)非辐射复合面积变大。并且,基于AlGaInP的红色微型LED的侧壁非辐射复合效应比基于GaInN的LED更严重<sup>[13]</sup>,这会导致效率进一步降低。当前,高性能红光Micro-LED的实现已成为RGB微显示技术面临的主要问题之一。

当应用于面阵显示时,红光Micro-LED需要满足如下三个条件:1)尽可能低的单像素工作电流。以一个 $960\times 540$ 的面阵为例,即使单个Micro-LED的工作电流低至 $0.1\ \text{mA}$ ,整个面阵的工作电流仍可高达 $52\ \text{A}$ ,这对于可穿戴设备来说是不可接受的<sup>[14]</sup>。然而,目前所研究的光Micro-LED的工作电流大多都在 $1\ \text{mA}$ 以上<sup>[10,11,14]</sup>。2)尽可能高的

电光转换外量子效率(EQE)。随着Micro-LED横向尺寸的减小,侧壁的非辐射复合率占总复合率的比例增加,从而引起光电子内量子转换效率的降低,当芯片尺寸从 $150\ \mu\text{m}\times 150\ \mu\text{m}$ 减小到 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$ 时,EQE降低了约 $60\%$ <sup>[15]</sup>。由于红光Micro-LED的效率低,当应用于RGB全色显示时,在每一个单元中虽然只需要一个蓝光和绿光管芯,但是红光管芯却需要2个甚至更多。这不但不利于整个显示器尺寸的减小,还会增加能耗和生产成本。3)尽可能稳定的工作波长。LED的亮度变化是通过注入电流来改变的,由于载流子的带填充效应及LED的自热效应,导致LED的光谱会随着电流的改变而改变<sup>[15]</sup>。在红光波段,人眼的视见函数非常敏感,相同光功率下,当光的波长从 $650\ \text{nm}$ 增加到 $655\ \text{nm}$ 时,人眼的视见函数会从 $0.107$ 降为 $0.0816$ <sup>[16]</sup>,降低了 $24\%$ ,这对于RGB配色是非常不利的。

本文将侧向氧化技术与共振腔发光二极管(RCLED)<sup>[17]</sup>结构相结合制备了出光孔径为 $17\ \mu\text{m}$ 的红光Micro-RCLED芯片。测试结果表明,芯片的EQE超过 $10\%$ ,单像素点可以在低于 $1\ \mu\text{A}$ 的工作电流下被点亮,并且随工作电流的变化峰值波长变化较小。

## 2 红光 Micro-RCLED 芯片制备

### 2.1 芯片外延生长

为了获得如图1所示的器件结构。使用垂直反应室EMCORE D125 MOCVD在N型GaAs衬底上生长RCLED外延结构,包括30对N型 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$  DBR, $1\lambda$ 的AlGaInP光学谐振腔,6对P型AlGaAs DBR,以及 $5\ \text{nm}$ 的 $\text{p}^+$  GaAs接触层。其中,DBR的中心反射波长和谐振腔的谐振波长都是 $655\ \text{nm}$ ,P型DBR靠近腔的1对是AlAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ,用于侧向氧化,其他5对则是 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ,在谐振腔的中心是3个 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})\text{In}_{0.5}\text{P}$ 量子阱作为发光有源区,阱和垒的厚度都是 $5\ \text{nm}$ 。外延生长温度在 $550\sim 650\ ^\circ\text{C}$ 之间,用到的III族源是TMAI、TMGa和TMIn,V族源是高纯的 $\text{AsH}_3$ 和 $\text{PH}_3$ ,N型和P型掺杂剂分别是 $\text{SiH}_4$ 和 $\text{CCl}_4$ 。

### 2.2 芯片制备后工艺

外延生长结束后,进行如图1所示的Micro-RCLED芯片制备。受限于低光功率( $<1\ \mu\text{W}$ )的探测器,将三个相同的Micro-RCLED单元进行了并

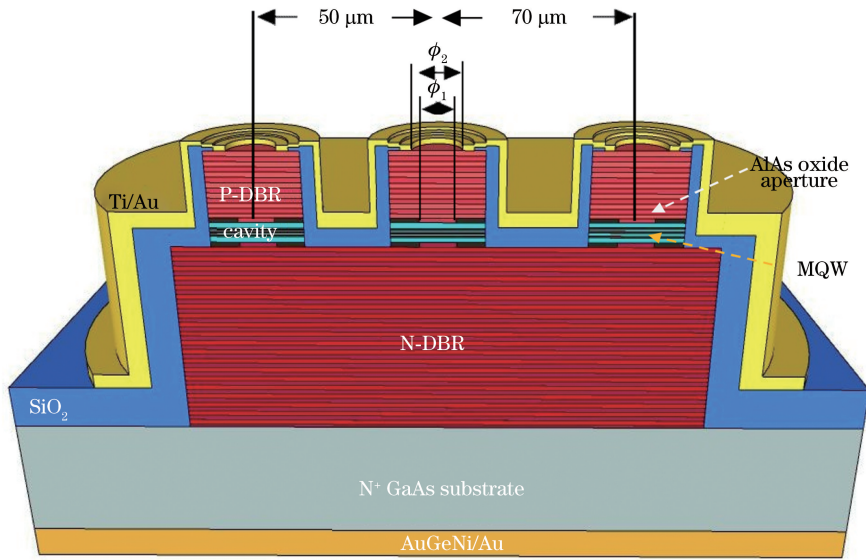


图1 Micro-RCLED结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the Micro-RCLED

联,以增加总的输出光功率。每个单元的出光孔径  $\phi_2 = 17 \mu\text{m}$ ,中心单元与两侧单元的中心孔距分别为  $50 \mu\text{m}$  和  $70 \mu\text{m}$ 。具体工艺流程包括:1)用电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀直径为  $37 \mu\text{m}$ 的单元台面,台面深度穿过1对N型DBR。2)由  $\text{N}_2$  携带水蒸汽进行 AlAs 侧向氧化,通过控制氧化时间形成直径为  $\phi_1$  的电流注入限制孔,氧化温度为  $380 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\text{N}_2$  流量为  $1 \text{ L/min}$ ,水浴温度为  $94 \text{ }^\circ\text{C}$ ,图2(a)是经侧向氧化后芯片的显微照片,由图可以清晰看出氧化孔径的大小。3)用 ICP 干法刻蚀大台面,台面深度至衬底。4)溅射  $400 \text{ nm}$  的  $\text{SiO}_2$ ,并刻蚀出直径为  $27 \mu\text{m}$  的 P 电极接触孔。5)溅射 Ti/Au 作为 P 电极,并光刻腐蚀出直径为  $\phi_2 = 17 \mu\text{m}$  的出光孔,结果如图2(b)所示。为了避免 P 电极对出射光的遮挡吸收,要求 AlAs 氧化孔的直径  $\phi_1$  应小于 P 电极出光孔径  $\phi_2$ ,图2(c)给出了图2(b)中一个单元的放大图像,图中  $\phi_1 = 15 \mu\text{m}$ 。6)将 N 面衬底减薄至  $150 \mu\text{m}$  后,溅射 AuGeNi N 电极,并于  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  下合金退火。7)解理成单个管芯,烧结在 TO56 管座上进行光电特性测试。

器件的正向电流-电压特性由 KEYSIGHT 2400 测试,反向电流-电压特性由 KEYSIGHT B1500A 测试,光功率和光谱在直径为  $9 \text{ cm}$  的积分球内测试,所用光谱仪是 RS-OP181102。

### 3 分析与讨论

图3是3单元 Micro-RCLED 的正向  $V-I$  特性测试曲线,当电流为  $1 \text{ mA}$  时,器件的端电压为

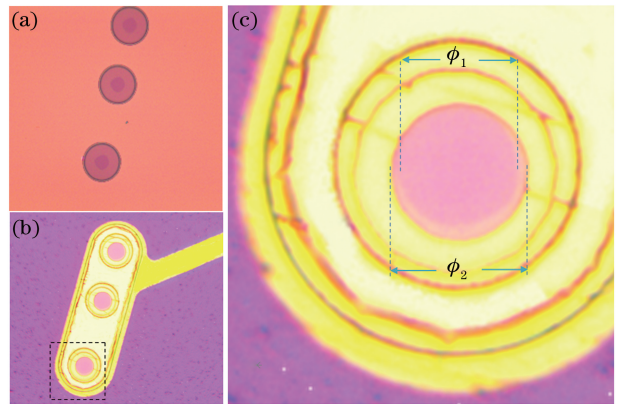


图2 Micro-RCLED 顶视图。(a) AlAs 横向氧化后; (b)剥离 P 电极之后;(c)图(b)部分的放大

Fig. 2 Top view micrograph of Micro-RCLED. (a) After AlAs lateral oxidation; (b) after removing P-electrode; (c) enlargement of Fig. (b)

$2.06 \text{ V}$ ,对于红光 LED 来说,这个电压值似乎略高,事实上,这主要是由于芯片面积较小导致的串联电阻较大引起的。设器件的串联电阻为  $R$ ,则流过器件的电流  $I$  与端电压  $V$  之间存在以下关系,

$$V = V_j + IR, \quad (1)$$

$$I = I_0 \{ \exp[qV/(nkT)] - 1 \}, \quad (2)$$

式中: $V_j$  是结压降; $n$  是理想因子; $k$  是玻尔兹曼常数; $T$  是绝对温度; $I_0$  是常数。反向  $V-I$  测试表明,器件的漏电流很小,在电压为  $-2 \text{ V}$  时电流小于  $8 \text{ nA}$ ,因此,在(1)式和(2)式中忽略了并联电阻的影响。由(1)式和(2)式可得,

$$I \frac{dV}{dI} = \frac{nkT}{q} + IR. \quad (3)$$



图 3 给出了根据  $V-I$  测试数据求得的  $I dV/dI-I$  结果,以及根据 (3) 式得到的线性拟合结果。由直线的斜率得到器件的串联电阻为  $120 \Omega$ , 如果将发光孔的面积扩大为常规 LED 的  $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ , 串联电阻仅为  $0.7 \Omega$ , 低于常规 LED 的值。因此, 所制备的 Micro-RCLED 电阻值是合理的, 如果采用相同的电流密度  $22 \text{ A/cm}^2$  (相当于正常 LED 的  $20 \text{ mA}$  工作电流), 则微型 RCLED 的外部电压仅为  $1.79 \text{ V}$ 。另外, 由  $I dV/dI-I$  拟合直线与  $I dV/dI$  轴的截距求得理想因子  $n = 3.23$ ,  $n > 2$  表明侧壁的 SRH 非辐射复合效应在总电流中不占主要地位<sup>[14]</sup>。

当驱动电流  $I$  从  $2 \mu\text{A}$  增加到  $1 \text{ mA}$  时, 图 4 给出了在显微镜 ( $\times 100$  倍) 中观察到的 Micro-RCLED 的亮度变化情况, 需要说明的是, 图中标注的电流值是 3 个单元的总电流值, 因此, 每个单元的电值应当用标示值除以 3。当  $I = 2 \mu\text{A}$  时, 即可将 3 个 Micro-RCLED 点亮, 实际上, 当  $I = 1 \mu\text{A}$  (每

个单元约  $330 \text{ nA}$ ) 时, 肉眼就能从显微镜中观察到红点光, 可惜的是相机无法拍摄出图像。当  $2 \mu\text{A} \leq I \leq 10 \mu\text{A}$  时, 亮度随电流逐渐增加, 显示的是暗红的光点, 且各光点清晰可辨。当  $15 \mu\text{A} \leq I \leq 200 \mu\text{A}$  时, 光点逐渐变为亮红色。当  $500 \mu\text{A} \leq I \leq 1 \text{ mA}$  时, 由于亮度太高, 各单元的图像逐渐连在一起, 特别是  $I = 1 \text{ mA}$  时, 各单元点的图像已不可分辨。

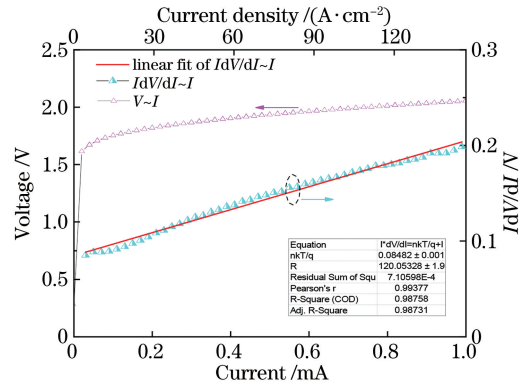


图 3 3 个单元 Micro-RCLED 的  $V-I$  和  $I dV/dI-I$  曲线  
Fig. 3  $V-I$  and  $I dV/dI-I$  curves for units Micro-RCLED

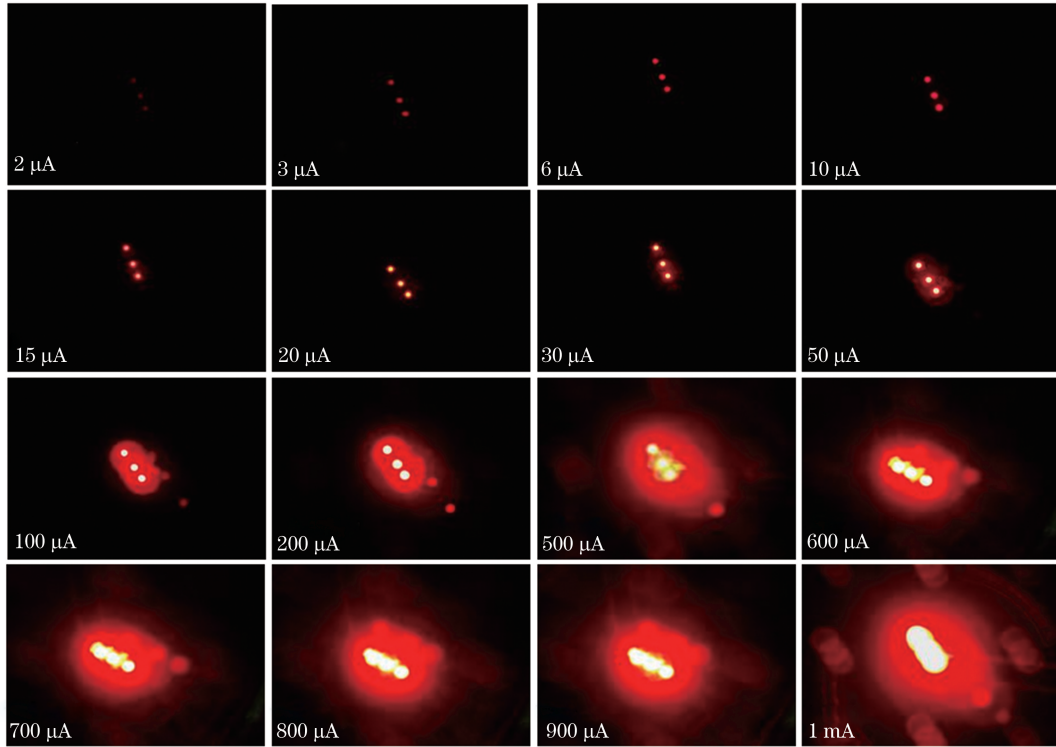


图 4 Micro-RCLED 在不同驱动电流下的亮度变化

Fig. 4 Brightness of the Micro-RCLED at different working currents

图 5 给出了输出光功率  $P$  和注入电流  $I$  之间的关系。由图可见, 光功率基本随注入电流的增加而线性增大, 当  $I = 1 \text{ mA}$  时,  $P$  达到  $0.21 \text{ mW}$ 。图 5 同时给出了外量子效率随注入电流的变化关系, 随注入电流的增加, 辐射复合率在总复合率中的比

例逐渐增大, 因此外量子效率逐渐增加。当  $I = 1 \text{ mA}$  时, EQE 为  $10.9\%$ , 几乎达到理论预期的最大值<sup>[18]</sup>, 远高于常规 AlGaInP LED 单面 EQE 的  $2\%$ <sup>[19]</sup>。

Micro-RCLED 的高 EQE 与以下三个因素有

关:1)由于采用了 AlAs 侧向氧化技术,将注入电流限制在直径为  $\phi_1$  的孔径内,所以有效避免了刻蚀工艺引入的侧壁非辐射复合;2)由于出光孔的直径  $\phi_2$  大于电流限制孔的直径  $\phi_1$ ,因此避免了 P 电极对出射光的遮挡吸收;3)更为重要的原因是,通过谐振腔的干涉效应,改变了光辐射场的空间分布,将更多的光功率集中到了光提取角范围之内。根据谐振腔理论,谐振腔内光波的电场为<sup>[20]</sup>

$$E = \frac{1 + r_1}{1 - r_1 r_2} E_0, \quad (4)$$

式中: $E$  是光辐射朝向器件顶部时的电场; $r_1$ 、 $r_2$  分别是有源区底部所有层和顶部所有层对有源区辐射电场的幅值反射系数; $E_0$  是没有谐振腔时的光波电场。对于  $E$  是光辐射朝向器件底部时的电场情况,应将(4)式中的  $r_1$  和  $r_2$  对调。

根据(4)式,针对 Micro-RCLED 的层结构,计算了其内部的光场功率分布,结果如图 5 中的插图所示。由图可见,由于谐振腔的作用,光辐射在空间不再是各向同性,而是将更多的光辐射集中到了光提取角之内,这有利于光提取效率的提高。

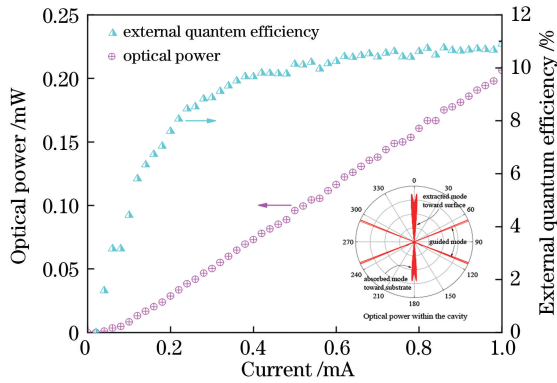


图 5 Micro-RCLED 的光功率与外部量子效率与驱动电流变化曲线

Fig. 5 Optical power and external quantum efficiency as function of the Micro-RCLED driving current

图 6 是室温下 Micro-RCLED 在不同电流下的电致光谱(EL)。由于谐振腔将有源区的自发辐射限制到了腔模中,随着注入电流的增加,尽管光谱的峰值强度增加,但峰值波长的变化和半峰全宽(FWHM)光谱很小<sup>[21]</sup>。图 6 插图中给了 Micro-RCLED 的峰值波长和 FWHM 随电流的变化。当电流从  $80 \mu\text{A}$  增加到  $1 \text{ mA}$  时(电流密度变化 12.5 倍),峰值波长从  $645.5 \text{ nm}$  增加到  $656 \text{ nm}$ ,仅增加了  $1.5 \text{ nm}$ ,FWHM 从  $13.033 \text{ nm}$  增加到  $13.363 \text{ nm}$ ,仅增加了  $0.33 \text{ nm}$ 。

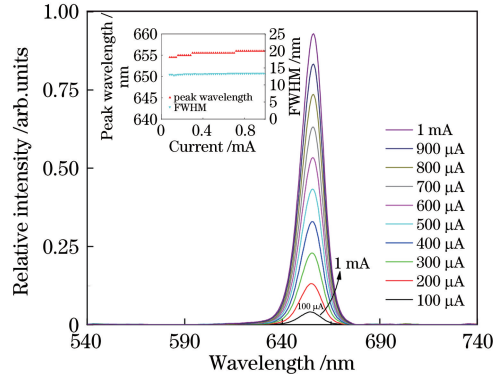


图 6 不同电流下 Micro-RCLED 的室温电致发光光谱  
Fig. 6 Room temperature electroluminescence spectrum of the Micro-RCLED at different currents

## 4 结 论

本文实现了一种将 RCLED 与 AlAs 侧向氧化技术相结合的红光 Micro-RCLED 结构,该结构具有较低的工作电流、较高的外量子效率以及稳定的峰值波长和光谱 FWHM。利用 MOCVD 进行了外延结构的生长,并通过光刻、侧向氧化、ICP 和溅射等工艺制备了出光孔径为  $17 \mu\text{m}$  的 Micro-RCLED。测试结果表明,器件的外量子效率大于 10%,当电流密度变化 12.5 倍时,峰值波长仅增加了  $1.5 \text{ nm}$ ,FWHM 仅增加了  $0.33 \text{ nm}$ ,并且单个 Micro-RCLED 可以在工作电流低于  $1 \mu\text{A}$  时点亮。这些结果有益于满足微显示器对红光 Micro-LED 的需求。

## 参 考 文 献

- [1] Semenza P. Can MicroLEDs and quantum dots revitalize inorganic displays? [J]. Information Display, 2018, 34(6): 23-26.
- [2] Soh M Y, Ng W X, Teo T H, et al. Design and characterization of micro-LED matrix display with heterogeneous integration of GaN and BCD technologies [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(10): 4221-4227.
- [3] Chong W C, Cho W K, Liu Z J, et al. 1700 pixels per inch (PPI) passive-matrix micro-LED display powered by ASIC [J]. 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2014: 1-4.
- [4] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, et al. 360 PPI flip-chip mounted active matrix addressable light emitting diode on silicon (LEDoS) micro-displays[J]. Journal of Display Technology, 2013, 9(8): 678-682.
- [5] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, et al. A novel

- BLU-free full-color LED projector using LED on silicon micro-displays [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(23): 2267-2270.
- [6] Chen C J, Chen H C, Liao J H, et al. Fabrication and characterization of active-matrix  $960 \times 540$  blue GaN-based micro-LED display [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 55(2): 1-6.
- [7] Templier F, Dupré L, Dupont B, et al. High-resolution active-matrix 10-um pixel-pitch GaN LED microdisplays for augmented reality applications [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1055: 105560I.
- [8] Li Q, Liu Z Z, Cao H, et al. Parameter configurable LED display control system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101101.  
李强, 刘振泽, 曹慧, 等. 参数可配置全彩 LED 显示控制系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101101.
- [9] Guo W J, Chen N, Lu H, et al. The impact of luminous properties of red, green, and blue mini-LEDs on the color gamut [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(5): 2263-2268.
- [10] Horng R, Chien H Y, Chen K, et al. Development and fabrication of AlGaInP-based flip-chip micro-LEDs [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, 6: 475-479.
- [11] D'Hondt M, Modak P, Delbeke D, et al. 4 mW microcavity LED at 650 nm on germanium substrates [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3938: 196-204.
- [12] Gessmann T, Schubert E F. High-efficiency AlGaInP light-emitting diodes for solid-state lighting applications [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(5): 2203-2216.
- [13] Boroditsky M, Gontijo I, Jackson M, et al. Surface recombination measurements on III-V candidate materials for nanostructure light-emitting diodes [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(7): 3497-3504.
- [14] Horng R H, Chien H Y, Tarntair F G, et al. Fabrication and study on red light micro-LED displays [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, 6: 1064-1069.
- [15] Oh J T, Lee S Y, Moon Y T, et al. Light output performance of red AlGaInP-based light emitting diodes with different chip geometries and structures [J]. Optics Express, 2018, 26(9): 11194-11200.
- [16] Schubert E F. Resonant-cavity light-emitting diodes [M]//Light-Emitting Diodes. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 255-274.
- [17] Dallesasse J M, Deppe D G. III-V oxidation: discoveries and applications in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(10): 2234-2242.
- [18] Royo P, Stanley R P, Ilegems A. Analytical calculation of the extraction efficiency of microcavity light-emitting diodes for display and fiber coupling applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(2): 207-218.
- [19] Benisty H, de Neve H, Weisbuch C. Impact of planar microcavity effects on light extraction-Part I: basic concepts and analytical trends [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(9): 1612-1631.
- [20] Benisty H, Stanley R, Mayer M. Method of source terms for dipole emission modification in modes of arbitrary planar structures [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(5): 1192-1201.
- [21] Schubert E F, Wang Y, Cho A Y, et al. Resonant cavity light-emitting diode [J]. Applied Physics Letters, 1992, 60(8): 921-923.