光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250915002

单模近圆光斑红光半导体激光器的设计与制备

余嘉晨，赵　伦，张夏琦，李睿骁，卢翔孟*，陈秋宇，朱长林，冉茂荣，莫才平

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 面向近眼显示设备对单模工作与高分辨率的迫切需求，设计并制备了一种输出近圆光斑的单模红光半导体激光器。通过仿真计算本征模式的近远场分布，优化了外延结构和脊波导的几何参数，从理论上明确了实现激光器单模工作的条件以及发散角的调控方法。在此基础上，成功制备出器件样品，并对其进行实验验证。结果表明，所制备的激光器工作在单模状态，输出功率可达235 mW，阈值电流约为51 mA，其快轴和慢轴发散角分别为13.6°和9.5°，光斑呈近圆形，能够满足近眼显示设备对于单模和高分辨率的要求，为该类设备的发展提供了重要支撑。

关键词： 红光半导体激光器；单模工作；近圆光斑

中图分类号： TN248　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1005－06

Design and Fabrication of a Single-Mode Red Semiconductor Laser with Near-Circular Beam Spot

YU Jiachen, ZHAO Lun, ZHANG Xiaqi, LI Ruixiao, LU Xiangmeng, CHEN Qiuyu, ZHU Changlin, RAN Maorong, MO Caiping

(**Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: We report the design, simulation, and fabrication of a single-mode red semiconductor laser featuring a near-circular beam spot, tailored for near-eye display applications requiring single-mode operation and high resolution. The near- and far-field distributions of the eigenmodes were analyzed to optimize the epitaxial structure and ridge waveguide. Conditions for stable single-mode operation and strategies for divergence angle control were theoretically established. Prototype devices were subsequently fabricated to validate the design. The realized laser exhibits a robust single-mode operation with an output power of 235 mW and a threshold current of approximately 51 mA. The near-circular beam demonstrates fast- and slow-axis divergence angles of 13.6° and 9.5°, respectively, fulfilling the single-mode operation and high-resolution requirements of near-eye display systems, thereby providing critical support for their further development.

Key words: red semiconductor lasers; single-mode operation; near-circular beam spot

0　引言

人类获取的信息80%以上来自视觉。从电视、显示器到智能手机、平板电脑，平板显示技术已深度融入日常生活，成为数字信息呈现的主要载件。显示技术历经阴极射线管（CRT）、液晶显示器（LCD）[1]、有机发光二极管（OLED）显示器[2]，直至近年来的微型发光二极管（μLED）显示器[3]，已在高分辨率、高动态范围（HDR）、广色域、宽视角、快速运动图像响应时间（MPRT）、薄型化、低功耗和低成本等方面取得长足进步[4-6]。尽管平板显示器具有诸多优良的特性，人们仍然希望摆脱显示器的空

收稿日期：2025－09－15.

* **通信作者：**卢翔孟

间限制，获得沉浸式的三维（3D）视觉体验，并实现虚拟和现实的交互[7-8]。为此，自上世纪90年代起，已有不同类型的增强现实（AR）和虚拟现实（VR）头戴式设备被提出。根据应用和功能的不同，AR/VR设备中光学引擎的显示特性与直视平板显示存在很大差异。例如，在直视显示器中，朗伯辐射模式有利于为多个观看者提供宽视角，但在近眼投影系统中，宽发射锥角会导致图像模糊并降低光学效率。此外，AR/VR投影系统需要比传统直视显示器有更高的分辨率密度。目前，常见的光引擎类型包括光调制显示（如液晶显示、LCOS和DLP等）、自发光显示（如OLED，μLED等）以及激光扫描显示（LBS）。

与其他显示技术相比，LBS具有尺寸小、亮度高、对比度高、色域广的优势。尺寸小是由于其不受光学扩展量守恒的限制，与基于面板的微显示器不同，LBS没有物平面。LBS系统由激光模块和光束扫描仪组成，其中激光模块通常包括三基色激光光源（红、绿、蓝半导体激光器）、准直光学元件和二向色光束组合器[9]。

红光半导体激光器作为三基色之一，是激光光源中的重要组成部分，其输出特性决定后续光学系统的种类和设计方法，甚至是整个显示设备的性能。分辨率是近眼显示设备的重要参数，对于LBS系统，分辨率主要由可分辨的光斑数目所决定。在近轴近似条件下，水平方向可分辨光斑数目为[10]：

$$N_h=\frac{\theta_{\mathrm{opt}}z}{a\lambda z/D}=\frac{\theta_{\mathrm{opt}}}{a\lambda/D}=\frac{\theta_{\mathrm{opt}}D}{a\lambda} \tag{1}$$

式中，z是MEMS扫描系统到屏幕的距离，θ_{opt}和D分别是光束扫描全角和反射镜净口径，a由光束质量因子、反射镜形状和相邻光斑的重叠数量决定。根据公式（1），可分辨光斑数目与光束质量因子成反比例关系，因此激光器输出光必须为单模。此外，显示设备低功耗的要求也使得使用单模激光器成为必然。

另一方面，为降低后续光学系统的复杂程度，快轴和慢轴方向上的发散角需要尽可能接近，也就是在理想情况下，远场最好是圆形光斑。

目前已有大量关于激光电视、激光照明用激光光源的研究，其激光器本身仍然为多模激射，光束质量不满足LBS系统的要求[11-13]。对于单模红光激光器的研究集中于长波长，如660 nm，690 nm等[14-15]，人眼对该波长红光灵敏度较低，比如对于638 nm的灵敏度是660 nm的3倍以上[16]，因此需要将激光器短波化。

本文针对单模、短波长近圆光斑输出的红光激光器开展研究，对外延和脊波导结构进行理论分析，仿真计算本征模式的近远场分布，并根据优化后的结果制备了样品。最终测试得到的阈值电流约为51 mA，快轴和慢轴发散角分别为13.6°和9.5°，满足LBS系统单模、近圆光斑输出的要求。

1 器件仿真及设计

为实现激光器的单横模输出，需要在快轴和慢轴方向上施加限制，使两个方向上的本征模式仅存在基模，而截止高阶模。对于量子阱激光器，其量子阱的厚度一般较薄，远小于红光激射波长，因此快轴方向仅存在基模，高阶模均截止，此时只需要在慢轴方向实现单模即可最终输出单横模激光。在慢轴方向上实现高阶模截止的常用方法包括折射率限制和电流限制等，前者一般通过制作脊波导或掩埋异质结结构来实现，主要目的是在横向方向引入折射率差并限制光场；后者一般通过离子注入、制备电极窗口或二次外延反向pn结来实现，主要目的是限制注入电流，仅使部分量子阱产生粒子数反转并发光，同样能够起到限制光场的作用。当制备红光激光器时，同时制作了脊波导结构和电极窗口，以保证限制效果。

根据上述分析，快轴方向已能够实现单模，接下来需要在慢轴方向通过控制波导的宽度实现单模。在一定范围内，波导内能够仅存在基模，其余所有高阶模式均截止。对于波导高度或刻蚀深度，其数值不宜超过量子阱距表面的高度，如果超过量子阱会使有源区侧壁暴露在空气中并产生不饱和键，对器件的可靠性产生不良影响。

在实现单模的基础上，还需要使快轴和慢轴方向的发散角尽可能减小并且在数值上接近，即实现小发散角的近圆光斑。根据菲涅尔衍射积分，减小远场发散角的方法是增大近场光斑尺寸，即扩展近场本征模式的大小。由于p侧有接触层，光场不宜向p侧扩展太多。因此，在满足脊波导能够限制光场的条件下，应向n侧进一步扩展光场以减小发散角。同样，向n侧扩展光场应同时考虑限制因子，使其减小的幅度在可接受的范围内。

依据上述讨论，单横模红光激光器的外延结构包括倾斜衬底、缓冲层、n侧中间层、n侧包层、波导

层、有源区、p侧包层、p侧中间层和接触层。p侧接触层为C掺杂，掺杂浓度为1×10^{20} cm^{-3}，其余层为Mg掺杂，掺杂浓度均为3×10^{18} cm^{-3}，n侧为1×10^{18} cm^{-3}的Si掺杂。

具体来说，有源区材料为压应变$Ga_{x1}In_{1-x1}P$（$x1<0.51$），厚度为5 nm，共两层，使用应变量子阱可以带来缩短波长、降低阈值、稳定偏振度等一系列的好处[17-18]。两量子阱中间由势垒层隔开，材料为与GaAs晶格匹配的$(Al_{x2}Ga_{1-x2})_{0.51}In_{0.49}P$。该材料当$x<0.65$时为直接带隙，能量最低的导带为Γ，其与量子阱的导带带隙差随组分x增大逐渐增大；当$x>0.65$时能量最低的导带为X，导带带隙差随x增大逐渐减小[19]。为了更好地束缚量子阱中的电子，势垒层材料被选为$(Al_{0.65}Ga_{0.35})_{0.51}In_{0.49}P$。

位于有源区两侧的波导层采用与势垒层相同的材料，由于该层折射率已经确定，因此需要通过适当减薄波导层厚度来减弱其对光场的限制作用，使光场能够同时向p侧和n侧扩展并进入包层，这是光场向n侧偏移的前提条件。经过优化，波导层厚度为21 nm。包层位于波导层外侧，其作用是进一步限制光场并控制光场大小。p侧包层采用与GaAs晶格匹配的$Al_{0.51}In_{0.49}P$，与波导层材料折射率差较大，使光场向p侧适当扩展而不过多引入损耗，优化后的厚度为1 μm。n侧包层同样采用$Al_{0.51}In_{0.49}P$，在波导层减薄之后，光场被引至包层，为了使光场向n侧有更多扩展，厚度应更大，经优化后的厚度为3.3 μm，相较于p侧包层更厚。

对于脊波导，在外延结构确定的情况下，需要进一步确定脊波导宽度，最后得到基模的近远场分布。为了计算的准确性，采用了有限差分法[20]对激光器的横截面进行仿真计算。计算时采用的网格增长因子为1.414 21，x和y方向的边界条件均设置为完美匹配层（PML），PML的参数为$\kappa=2$，$\sigma=5$，层数为12。由于量子阱较薄，仿真时对该区域的网格进行了细化，y方向的最大网格距离为0.5 nm，能够保证量子阱区域有足够数目的网格。其余位置的网格数量为，x方向200个，y方向1 000个，计算本征模式时的最大收敛误差为1×10^{-12}。计算时使用的材料折射率由单有效振子法（Single Effective Oscillator，SEO）计算得到，其计算公式为[21]：

$$n^2-1=\frac{E_0E_d}{E_0^2-E^2} \tag{2}$$

式中，n和E分别为折射率实部和光子能量（eV）。

E_0和E_d的表达式为：

$$\begin{aligned}E_0&=3.39+0.62x\\E_d&=28.07+1.72x\end{aligned} \tag{3}$$

式中，x为Al的组分。

理论上，仿真时会出现TE和TM偏振的各阶本征模式。然而，由于量子阱为压应变，轻空穴带和重空穴带分离且Γ点处重空穴带能量更小，空穴的p轨道在TE方向上波函数更大。因此，激射光为TE偏振[22]，仿真时只需计算TE偏振的模式即可。

图1是脊宽变化时各阶模式的有效折射率，TE后方的下标为模式序号，两个数字分别表示慢轴和快轴方向的阶数。从图中可以看到，当脊宽小于1 μm时，所有模式均截止，即截止宽度为1 μm，随着脊宽逐渐增大，各阶模式依次出现。当脊宽在1～3 μm范围内时，仅有TE_{00}能够被激发，其余高阶模式均截止，也就是脊宽在这一范围内时能够实现激光的单横模激射，所制备的样品选取脊宽为2 μm。

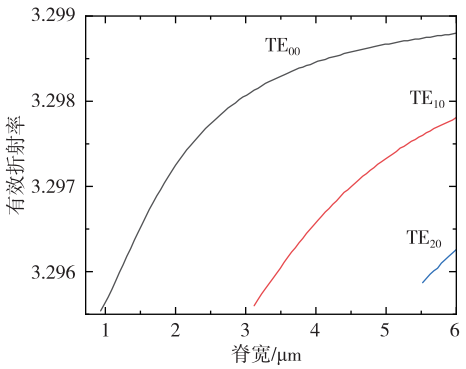


图1　各阶模式有效折射率与脊宽的关系

在保证激光器能够以单横模输出后，还需要进一步考虑光限制因子和发散角。其中光限制因子描述了本征模式光场与量子阱区域的重叠程度，可由公式（4）计算得到。

$$\Gamma=\frac{\iint_{有源区}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\left|E_x(x,y)\right|^2}{\iint_{所有区域}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\left|E_x(x,y)\right|^2} \tag{4}$$

式中，$E_x(x,y)$是平行于结平面的电场。

通过计算得到TE_{00}本征模式近场电场分布如图2所示。可以看到，光场整体位于脊波导下方的量子阱附近，快轴和慢轴方向上均仅出现一个极大值（基模）。在快轴方向上，光场向p侧扩展较少，与高损耗的接触层距离较远，而向n侧扩展较多，与设计预期相符。经计算，光限制因子为1.2%。

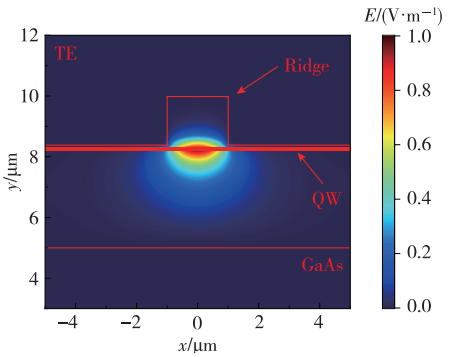


图2 TE_{00}模式近场电场分布

为了更清晰地展示电场和折射率的相对位置，图3绘制了$x=0$直线处的折射率和电场分布，整体光场偏向于n侧，呈非对称分布。其中p侧包层存在一折射率突变，这是由刻蚀阻挡层所导致的，其材料为$(Al_{0.1}Ga_{0.9})_{0.51}In_{0.49}P$，厚度为10 nm。由于厚度较薄，不会对器件损耗产生显著影响，并且不会改变包层限制光场的作用。

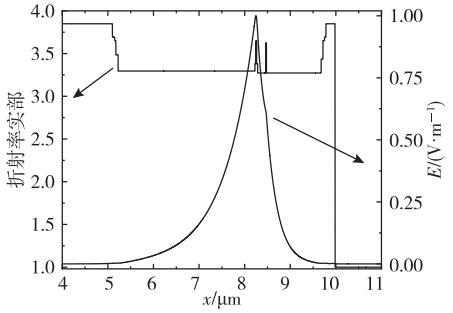


图3 $x=0$处折射率与电场分布

将上述近场基模电场投影至一个半球形面上，可得电场强度的角度分布，如图4所示。其中方位角0°和90°所在的方向分别表示慢轴和快轴方向。

图5绘制了快轴和慢轴方向电场随角度的变化趋势，整体呈单峰分布，符合单模特征。经过计算，快轴和慢轴方向的发散角分别为13.1°和9.4°，实现了小发散角、近圆光斑的设计目标。

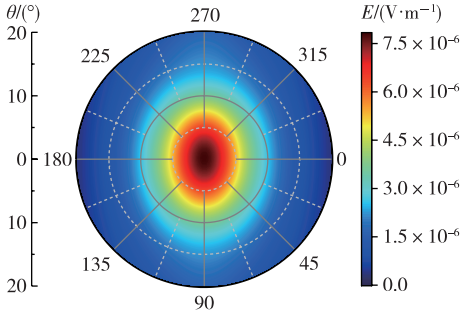


图4 TE_{00}模式远场分布

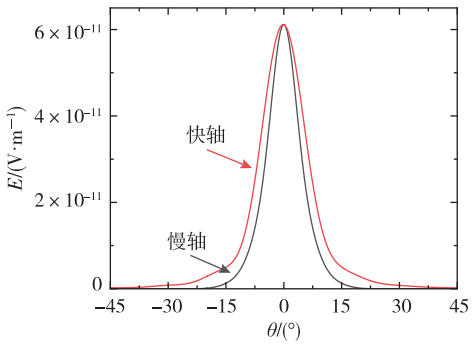


图5 快轴和慢轴方向远场电场分布

2 器件制备

在外延生长时，晶片采用MOCVD一次生长成型，所使用的衬底是偏向(111)晶向10°的n型GaAs单晶衬底，n侧中间层和包层为Si掺杂，p侧为Mg掺杂，接触层则为C掺杂。为了增大GaInP的禁带宽度，使激射波长更短，生长时采用了温度控制的方法，抑制了GaP和InP单原子层在(111)面上的自然超晶格。相较于有序的GaInP，无序GaInP具有更大的带隙差，为1.91 eV[23-26]。

器件制备采用标准的脊波导制备工艺，包括去除背面黄膜、电流非注入区制作、Zn扩散、脊波导刻蚀、p面电极窗口制作、p面薄电极制备、电镀厚金、p面合金、衬底减薄及抛光、n面电极制备及合金。流片工艺完成后进行巴条解理、腔面钝化和裂片等工艺，最后进行封装。

其中Zn扩散步骤通过磁控溅射制备ZnO薄膜作为扩散源，随后采用闭管扩散法实现Zn的固态扩散。这一步骤使用Zn原子杂质诱导GaInP/AlGaInP超晶格中的Al和Ga发生相互扩散，使量子阱层和势垒层混合，破坏量子阱中晶格的有序性，以此增加禁带宽度，形成非吸收窗口[27-28]，提高腔面处光学灾变损伤(COMD)的阈值。

当制备腔面的增透膜和高反射膜时，采用电子回旋共振法镀膜。该方法制备的薄膜具有高致密性、高平坦性以及高纯度等特性，能够更好地隔绝空气中的氧气和水份，以此保护腔面，避免产生COMD。最后将制备好的芯片以倒装形式焊接到SiC热沉上并完成引线键合、管壳封装等后道工序。

3 测试结果及分析

在制备并封装好激光器芯片之后，使用TO综合性能测试机对激光器的各项性能参数进行测试，包

括光谱、光功率-电流曲线和发散角等。测试时环境温度为25℃，样品通过TEC进行温度控制，同样控制在25℃，若对散热要求更高，可采用微通道结构的散热模块[29]。测试时使用脉冲电源，占空比为1%。

经过测试，所制备样品的光谱如图6所示，峰值波长为638.8 nm，光谱的半高全宽为0.79 nm。

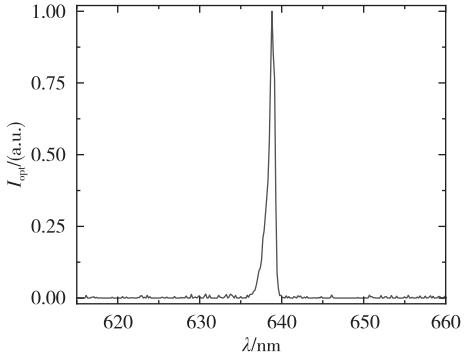


图6　测试样品光谱

测试得到的电流-电压-光功率曲线如图7所示。根据测试曲线，激光器的阈值电流为51 mA，对应的开启电压为1.90 V。当测试电流为235 mA时，光功率为238 mW，此时电压为2.64 V。经计算，斜率效率为1.36 W/A，电光转换效率（WPE）为38.5%，激光器电阻为3.19 Ω。激射后，激光器的光功率曲线平直、未出现扭折（kink），同时未出现COMD，具有良好的光电特性和可靠性。

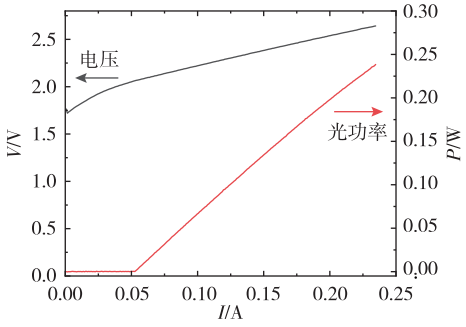


图7　测试样品 *P-I-V* 曲线

激光器快轴和慢轴方向的光强分布分别如图8和9所示。在100 mA，150 mA，200 mA和235 mA下测量得到，覆盖了从略高于阈值直到工作电流的情况，所有电流条件下均呈单峰分布，未出现边模。经计算，在工作电流235 mA下，半高全宽分别为13.6°和9.5°，与设计值13.1°和9.4°接近，误差不超过3.8%和1.1%。由此可以判断所制备的红光激光器稳定单模工作，并且远场呈近圆光斑。

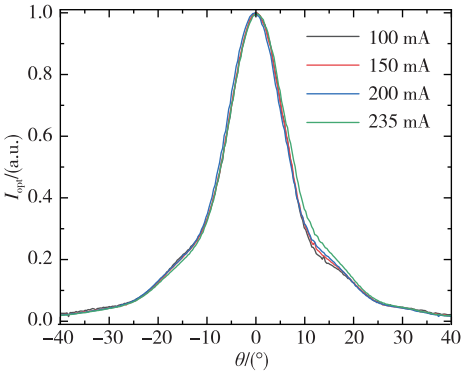


图8　不同电流下的快轴发散角

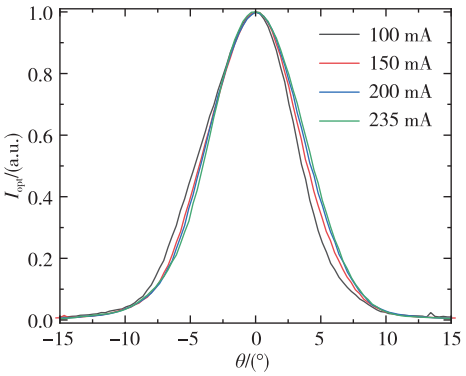


图9　不同电流下的慢轴发散角

4　结论

本文使用数值计算方法对AlGaInP红光激光器脊波导截面的近场和远场光场进行计算，结合外延结构优化了脊波导宽度，在理论上探究了发散角随结构参数的变化规律。根据优化后的结构所制备的激光器与理论设计较为符合，具有单模、近圆光斑的特性，未来有望在头戴式显示设备等低功耗场景中发挥重要作用。

参考文献：

[1] Schadt M. Milestone in the history of field-effect liquid crystal displays and materials [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48(3S2): 03B001.

[2] Tang C W, VanSlyke S A. Organic electroluminescent diodes[C]//Electroluminescence, 1989: 356-357.

[3] Lin J Y, Jiang H X. Development of microLED[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(10): 100502.

[4] Hsiang E L, Yang Z, Yang Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2021, 29(6): 446-465.

[5] Huang Y, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 105.

[6] Chen H W, Lee J H, Lin B Y, et al. Liquid crystal display and

organic light-emitting diode display: present status and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(3): 17168.

[7] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2(3): 199-216.

[8] Choi S, Jung K, Noh S D. Virtual reality applications in manufacturing industries: past research, present findings, and future directions[J]. Concurrent Engineering, 2015, 23(1): 40-63.

[9] Hsiang E L, Yang Z, Yang Q, et al. AR/VR light engines: perspectives and challenges [J]. Advances in Optics and Photonics, 2022, 14(4): 783-861.

[10] Holmstrom S T S, Baran U, Urey H. MEMS laser scanners: a review [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(2): 259-275.

[11] Toikkanen L, Dumitrescu M M, Tukiainen A, et al. SS-MBE-grown short red wavelength range AlGaInP laser structures [J]. Semiconductor Lasers and Laser Dynamics, 2004, 5452: 199.

[12] 孟 雪. 高功率红光半导体激光器光束质量控制的研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
Meng Xue. Study on beam quality control of high power red semiconductor laser[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.

[13] 孟 雪, 宁永强, 张建伟, 等. 面向激光显示的红光半导体激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 9-20.
Meng Xue, Ning Yongqiang, Zhang Jianwei, et al. Research progress of red semiconductor laser diodes for laser display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 9-20.

[14] Hagimoto M, Miyamoto S, Watanabe K, et al. Single-mode 200 mW 660 nm to 690 nm red laser diode for sensing and medical application[J]. Proc. of SPIE, 2020, 11301: 1130105.

[15] Hagimoto M, Miyamoto S, Watanabe K, et al. Red laser diodes explore the future of biomedical and quantum technology[J]. Proc. of SPIE, 2023, 12440: 124400M.

[16] Shimada N, Yukawa M, Shibata K, et al. 640-nm laser diode for small laser display [J]. High-Power Diode Laser Technology and Applications VII, 2009, 7198: 719806.

[17] Ghiti A, Silver M, O'Reilly E P. Low threshold current and high differential gain in ideal tensile- and compressive-strained quantum-well lasers [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(9): 4626-4628.

[18] Valster A, van der Poel C J, Finke M N, et al. Effect of strain on the threshold current of GaInP/AlGaInP quantum well lasers emitting at 633 nm[C]//13th IEEE International Semiconductor Laser Conference, 1992: 152-153.

[19] Bour D P, Geels R S, Treat D W, et al. Strained $Ga_yIn_{1-x}P$/$(AlGa)_{0.5}In_{0.5}P$ heterostructures and quantum-well laser diodes[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(2): 593-607.

[20] 熊 煜, 张 靖, 李小冰, 等. 基于Python的半导体激光二极管仿真技术研究[J]. 半导体光电, 2023, 44(4): 538-542.
Xiong Yu, Zhang Jing, Li Xiaobing, et al. Research on simulation technology of semiconductor laser diode based on Python[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(4): 538-542.

[21] Tanaka H, Kawamura Y, Asahi H. Refractive indices of $In_{0.49}Ga_{0.51-x}Al_xP$ lattice matched to GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59(3): 985-986.

[22] Chinn S R, Zory P S, Reisinger A R. A model for GRIN-SCH-SQW diode lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(11): 2191-2214.

[23] Gomyo A, Suzuki T, Kobayashi K, et al. Evidence for the existence of an ordered state in $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ grown by metalorganic vapor phase epitaxy and its relation to band-gap energy [J]. Applied Physics Letters, 1987, 50(11): 673-675.

[24] Bellon P, Chevalier J P, Martin G P, et al. Chemical ordering in $Ga_xIn_{1-x}P$ semiconductor alloy grown by metalorganic vapor phase epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 1988, 52(7): 567-569.

[25] McKernan S, De Cooman B C, Carter C B, et al. Direct observation of ordering in (GaIn) P[J]. Journal of Materials Research, 1988, 3(3): 406-409.

[26] Yasuami S, Nozaki C, Ohba Y. Diffuse scattering and superstructure reflections from $In_{1-y}(Al_xGa_{1-x})_yP$ [J]. Applied Physics Letters, 1988, 52(24): 2031-2033.

[27] Tada H, Shima A, Utakoji T, et al. Uniform fabrication of highly reliable, 50 - 60 mW-class, 685 nm, window-mirror lasers for optical data storage[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36(5R): 2666.

[28] 闫博昭, 崔碧峰, 陈 芬, 等. 大功率半导体激光器端面特性改善的研究[J]. 半导体光电, 2024, 45(4): 623-627.
Yan Bozhao, Cui Bifeng, Chen Fen, et al. Study on the improvement of facet characteristics of high-power semiconductor lasers [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(4): 623-627.

[29] 胡明哲, 云和明, 王宝雪, 等. 基于场协同和耗散的双层微通道强化传热的数值模拟[J]. 半导体光电, 2025, 46(3): 498-507.
Hu Mingzhe, Yun Heming, Wang Baoxue, et al. Numerical simulation of enhanced heat transfer in a double-layer microchannel based on field synergy and entransy dissipation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(3): 498-507.

作者简介:

余嘉晨(1997—),博士,工程师,主要研究方向为半导体激光器及光束整形系统;

卢翔孟(1983—),博士,正高级工程师,主要研究方向为半导体激光器及其应用。