光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250814001

638 nm大功率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，莫才平
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 文章设计、仿真并制备了一种短波长、大功率的红光半导体激光器。首先，通过仿真模拟计算了激光器的本征模式，并研究了限制因子和发散角等参数的变化规律。然后，采用金属有机化学气相沉积法制备出AlGaInP/GaAs材料体系的外延片。在激光器的制备过程中，使用Zn扩散法对端面处的量子阱进行混杂，形成非吸收窗口；PL光谱结果表明，扩散区域的峰值波长相较于未扩散区域发生蓝移，偏移量达39.2 nm。测试结果显示，未制作非吸收窗口的样品在1.7 W时发生了光学灾变损伤（COMD），而制作了非吸收窗口的样品达到5.7 W时仍未出现COMD，功率提升3倍以上。该方法能够有效提高器件腔面COMD阈值及其可靠性。

关键词： 红光半导体激光器；非吸收窗口；量子阱混杂；腔面灾变光学损伤
中图分类号： TN248　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0841－07

Design and Fabrication of a High-Power 638 nm Red Semiconductor Laser

YU Jiachen, ZHAO Lun, ZHANG Xiaqi, LI Ruixiao, LU Xiangmeng, CHEN Qiuyu, MO Caiping
(**Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: A short-wavelength, high-power red semiconductor laser was designed, simulated, and fabricated. The eigenmodes of the lasers were determined through simulations, and the behaviors of parameters such as the confinement factor and divergence angles were analyzed. An epitaxial structure based on an AlGaInP/GaAs material system was grown by metal - organic chemical vapor deposition (MOCVD). During laser fabrication, Zn diffusion was employed to induce quantum-well intermixing near the facet and thus form a non-absorbing window. The photoluminescence (PL) peak of the fabricated sample exhibited a blue shift of 39.2 nm with respect to that of the undiffused sample. The experimental results demonstrated that the sample without non-absorbing windows suffered from catastrophic optical mirror damage (COMD) at an output power of 1.7 W, whereas the sample with non-absorbing windows showed no COMD up to 5.7 W—representing a more than threefold improvement in COMD threshold. This approach effectively enhances the facet COMD threshold and overall device reliability.

Key words: red semiconductor lasers; non-absorbing window; quantum-well intermixing; catastrophic optical mirror damage

0　引言

红光半导体激光器是一类工作波长位于620～750 nm的激光器，主要由GaAs衬底以及与之晶格匹配的$(Al_xGa_{1-x})_{0.51}In_{0.49}P$作为有源区和波导层等构成。使用四元含磷化合物的原因是增大材料带

收稿日期：2025－08－14.
* 通信作者：卢翔孟

隙以避免对红光的吸收，然而这类化合物生长难度较大，尤其是在Al组分较高以及厚度较厚的情况下。有源区是实现粒子数反转的区域，对于激光器的发光性能有着重要影响，常采用双异质结结构和量子阱结构来优化其发光效率。

对于双异质结半导体激光器，日本NEC[1]、索尼[2]和东芝[3]先后实现了室温连续激射的红光激光器，工作波长约为670 nm，被广泛应用于光学扫描、打印和刻录等领域。随着应用需求的增加，短波长[4]、高功率[5]的激光器也逐渐通过外延材料质量的提升和器件结构的优化来实现。为进一步降低阈值电流密度并提高量子效率，量子阱结构被应用于红光半导体激光器[6-7]。尤其是应变量子阱的引入，其厚度和应变量的可调性使激光器激射波长和偏振可控，极大拓展了红光激光器的应用范围，在激光显示等领域发挥了重要作用。在红光波段，人眼对于较短波长的光具有更高的灵敏度，比如人眼对于638 nm的灵敏度是660 nm的3倍以上[8]。因此，为实现更好的显示效果，激光器的短波化是必然趋势。2018年山东华光报道了波长稍长的640 nm大功率红光激光器[9]，进一步推动了这一发展。

对于短波长638 nm大功率红光激光器的研发，日本厂商所取得的进展较为显著。例如，三菱于2014年报道了单发光区、脊宽为40 μm的638 nm激光器，功率可达1.5 W[10]。随后，三菱于2019年进一步报道了双发光区和三发光区的结构，在脉冲条件下，峰值功率可达2 W以上，寿命超过2万小时[11]。相比之下，国内的研究起步较晚，目前已取得一定进展的厂商主要以山东华光和深圳瑞波为主。2019年，两厂商共同报道了单发光区的638 nm激光器，其在连续波（CW）工作模式下最大功率可达2 W[12]。

尽管短波长红光激光器已取得了一定进展，但仍然存在器件失效的问题，主要表现为大功率时容易发生光学灾变损伤（COMD）[13]。针对这一问题，本文通过数值计算获得了激光器的本征模式、发散角和限制因子等参数，对其进行了优化。在器件制备过程中，对靠近端面的窗口区域进行选择性Zn扩散，使量子阱原子发生混杂，PL光谱蓝移了39.2 nm。最终实现激光器的功率在达到5.7 W时无COMD出现，相较于未进行Zn扩散的样品提高3倍以上，显著改善了COMD问题。

1 器件仿真及设计

谐振腔是激光器的重要组成部分。对于有限尺寸的谐振腔，其内部存在的光学模式是离散的，每个模式都有不同的特征，并且这些特征会随谐振腔的结构变化而发生变化。在激光器中，谐振腔结构的变化主要体现在外延结构以及脊波导结构的变化，这些变化共同作用决定本征模式的分布，最终影响限制因子。限制因子描述了本征模式光场与量子阱区域的重叠程度，表达式为：

$$\Gamma=\frac{\iint_{\text{有源区}}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\left|H_x(x,y)\right|^2}{\iint_{\text{所有区域}}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\left|H_x(x,y)\right|^2} \tag{1}$$

式中，$H_x(x,y)$是平行于有源区的磁场。

对于红光激光器，由于量子阱GaInP/AlGaInP材料体系所能提供的最大导带带隙差约为0.17 eV[14]，对于电子的限制作用较弱，电子更容易从量子阱溢出至波导层，从而使得材料所能提供的增益较小。为了实现大功率输出，需要尽可能提高光限制因子以提高增益。

使用有限差分法计算垂直于传播方向的二维截面上的本征模式，随后使用数值积分计算出限制因子。若计算结构为一维，也可使用传输矩阵法计算模式的电磁场分布[15]。在仿真计算过程中，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层。由于量子阱较薄，仿真时对该区域的网格进行了细化处理，其中y方向的最大网格距离为0.5 nm，能保证量子阱区域有足够数目的网格。在其余位置，x方向有200个网格，y方向有1 000个网格，计算本征模式时的最大收敛误差为1×10^{-12}。

仿真计算中所使用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、张应变量子阱、p侧包层、p侧中间层和接触层。其中，有源区采用张应变$Ga_{x_1}In_{1-x_1}P$（$x_1>0.51$），位于量子阱两侧的波导层采用与GaAs晶格匹配的$(Al_{x_2}Ga_{1-x_2})_{0.51}In_{0.49}P$材料。该材料当$x<0.65$时为直接带隙，能量最低的导带为$\Gamma$，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。为了更好地束缚量子阱中的电子，波导层的材料选用$(Al_{0.65}Ga_{0.35})_{0.51}In_{0.49}P$，包层则选用折射率更低的

$Al_{0.51}In_{0.49}P$ 以进一步限制光场。波导层和包层均采用对称结构，即 p 侧和 n 侧的波导层与包层厚度相等。对限制因子影响较大的量子阱和波导层，由于激射波长已经确定，量子阱无法更改，只能通过变化波导层厚度来优化限制因子。对于脊波导结构，宽度为 20 μm，刻蚀深度为 0.7 μm。经计算，基模的限制因子随波导层厚度的变化规律如图 1 所示。

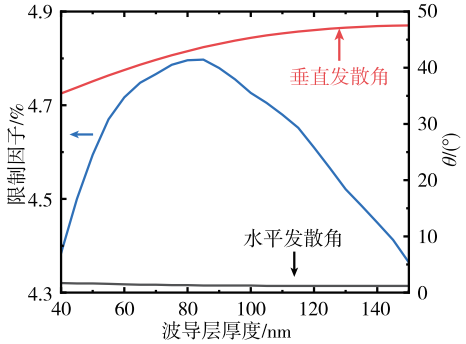


图 1　限制因子、水平和垂直发散角随波导层厚度的变化

可以看出，限制因子随波导层厚度的增加先增大再减小，当厚度为 85 nm 时达到最大值 4.8%。为实现大功率输出，波导层厚度最终选为 85 nm，此时截面处基模 TM 模式的电场分布如图 2 所示。

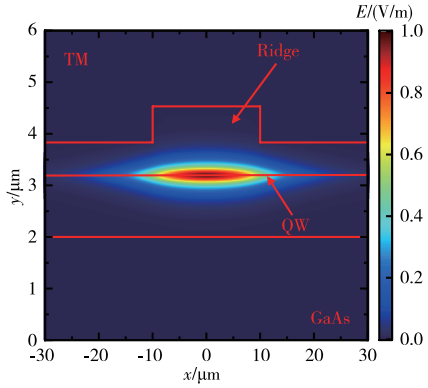


图 2　基模 TM 模式电场分布

图 3 为未刻蚀区域沿 y 方向的折射率分布，0～2.1 μm 处为 GaAs 衬底，4.53～6 μm 处为空气，GaInP 量子阱位于 3.19～3.202 μm。

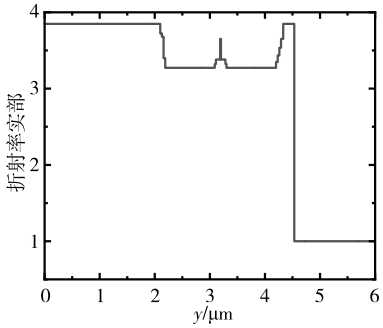
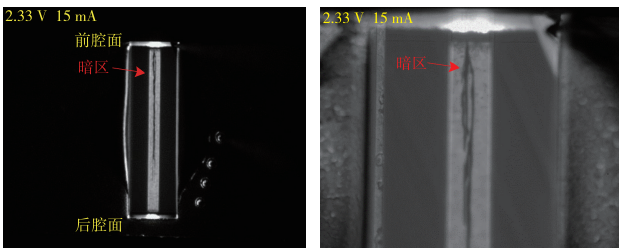


图 3　外延结构折射率分布

2　COMD 失效分析及可靠性研究

对于解理后的激光器，谐振腔的发光面处因晶格周期被破坏而存在表面态，导致在带隙中形成深能级并使表面处的能带弯曲[16-17]。注入激光器的电子和空穴会通过表面态产生非辐射复合，使得端面附近有源区中的电子和空穴密度相较于内部更低。因此，要实现激光的激射，需要有源区处于粒子数反转状态，即存在高密度的电子和空穴。若密度较低，激光将会被吸收，尤其是端面区域，这将导致端面处吸收内部产生的激光。这种吸收作用使得端面处的温度升高，进而导致该区域有源区的禁带宽度减小，并出现波长红移，逐渐接近激光振荡波长，从而进一步加剧端面的光吸收。当输出光功率大于某一特定值时，会形成光吸收到发热，再到光吸收的正反馈循环，使得腔面温度急剧升高，最终超过半导体材料的熔点导致端面熔化，发生 COMD[18]。通常端面损坏后会向内部扩展，形成暗线缺陷（DLDs）[10,19]。

在测试激光器的过程中观察到功率突然下降的现象，为进一步确认失效原因，使用 EMMI 法对 n 面研磨后的芯片进行观察分析。图 4 展示了失效激光器的测试结果，其中图 4(a)为整体结构的 EMMI 结果，图 4(b)为局部放大图。可以看到损坏的腔面为前腔面，且暗区的横向宽度在腔面处最窄，深入内部时宽度逐渐增大，呈放射状，符合红光激光器的典型失效模式。



（a）整体结构测试结果图　　（b）局部放大图

图 4　失效样品的 EMMI 测试结果

激光器在非失效的情况下所能达到的最大功率受多种因素的影响，包括腔面处有源区区域的光功率密度、所使用的材料以及是否进行了腔面保护等。根据文献[20]报道，最大出光功率的定量表达式为：

$$P_{\max,\mathrm{cw}}=\left(\frac{d}{\Gamma}\right)W\left(\frac{1-R}{1+R}\right)\bar{P}_{\mathrm{COMD}} \tag{2}$$

式中，W，R，d，Γ和$\bar{P}_{\mathrm{COMD}}$分别是波导宽度、前腔面反射率、量子阱厚度、限制因子以及COMD阈值功率密度。

对于量子阱增益较高的激光器，例如980 nm激光器，提高最大出光功率的常用方法是提高公式(2)中d/Γ的比值。例如采用BW-SCH结构，即增大波导层厚度以使光场分散，从而降低光限制因子[21-22]。然而对于红光激光器，由于其材料本身的增益相对较低，若减小光限制因子可能会导致反转粒子数不足，无法实现大功率输出。虽然采用多量子阱结构也能够获得较大d/Γ比值和光限制因子，但红光激光器受温度影响较大[23]，使用多量子阱结构会使有源区附近热量积累，导致温度升高和功率下降。同时，多量子阱结构也会使阈值电流和工作电压增大。综合各种因素，在大功率红光激光器中使用单量子阱结构是更优的选择。

为了保证红光激光器的大功率输出，同时不发生COMD，一种较为可行的方法提高COMD阈值功率密度$\bar{P}_{\mathrm{COMD}}$，该数值的大小与有源区材料以及腔面是否经过钝化相关[24]。由于材料已经选定，提高COMD阈值功率密度需要通过腔面处理来实现，常见的方法包括腔面镀膜、制作电流非注入区以及端面改性等。

对于红光激光器，制作非吸收窗口是克服COMD的有效手段。该方法能够增大腔面附近量子阱的禁带宽度，减少腔面处的光吸收，降低温度。量子阱混杂一般使用Zn原子杂质诱导GaInP/AlGaInP超晶格中的Al和Ga发生相互扩散，进而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，也就是端面改性结构。图5为内部与端面附近量子阱有源区的能带结构示意图，其中端面附近有源区的带隙更大。

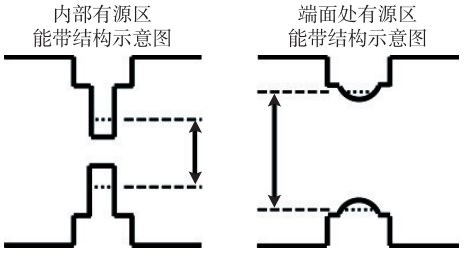


图5 Zn扩散后端面处与内部有源区的能带结构示意图对比

在微观层面，当Zn原子由外部进入p掺杂的AlGaInP晶格时，由于费米能级效应[25]，极易失去两个电子形成Zn^{2+}。相较于AlGaInP晶体的晶格间隙，Zn^{2+}的半径较小，在扩散过程中会进入晶格间隙形成间隙离子，即以Longini机制为主，并且扩散难度较低、速度较快。在Zn^{2+}进入晶格之后，间隙处的Zn^{2+}可以与III族元素原子Ga或Al发生置换，进入晶格位置。而被置换出的Ga或Al进入间隙后也会相对容易发生扩散，当晶格位置的Zn^{2+}再次被间隙处的Ga或Al置换时，Ga与Al晶格位置的交换得以实现。通过这一反复过程，杂化过程得以推进和完成。

3 器件制备

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，脊波导为双发光区，每个脊的宽度为75 μm。流片工艺完成后进行巴条解理、腔面钝化和裂片等工艺，并进行封装，解理后激光器的腔长为1 460 μm。

红光激光器的外延采用MOCVD一次生长成型，所制备的结构包括倾斜衬底、缓冲层、n侧中间层、n侧包层、波导层、张应变量子阱、p侧包层、p侧中间层和接触层。其中，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掺杂的AlGaAs和AlGaInP，p侧包层和中间层为Mg掺杂的AlGaInP和AlGaAs，接触层为C掺杂的GaAs。有源区采用张应变$Ga_{x_1}In_{1-x_1}P$，此时轻空穴带作为激光的下能级，相较于晶格匹配的量子阱，应变量子阱可以使阈值电流和工作电流降低，同时提高光电转换效率。在生长过程中，为了实现更短波长的激射，采用温度控制的方法，避免GaP和InP单原子层在(111)面上有序排列，抑制自然超晶格的形成，相较于有序的GaInP材料，无序的GaInP材料具有更大的带隙差，无应力情况下为1.91 eV[26-29]。

外延片生长完成后，将顶层的GaAs接触层去除后测量其光致发光(PL)谱，经过归一化之后如图6所示。由于量子阱存在张应变，价带中的轻空穴(lh)带和重空穴(hh)带发生分裂，电子与轻、重两种空穴发生复合时产生了两个PL谱发光峰，分别位于622.4 nm和609.8 nm。

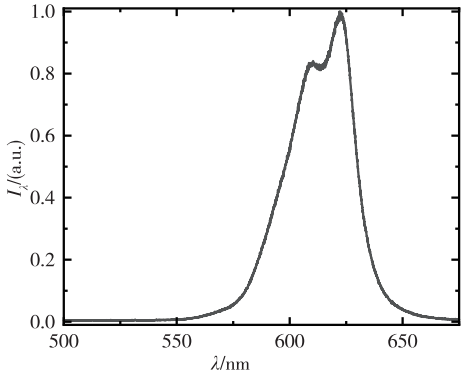


图 6　Zn 扩散前外延片的 PL 光谱

外延片生长结束后，使用磁控溅射制备 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，单侧 Zn 扩散区域的长度为 40 μm。扩散的效果可以通过 PL 光谱进行判断，图 7 是扩散后外延片的 PL 光谱。从图中可以看到，量子阱混杂后只在 583.2 nm 处出现了一个峰，说明量子阱的应力得到了释放，价带不再分裂。经过计算，腔面附近扩散区域的 PL 光谱蓝移了 39.2 nm，说明这一透明窗口能够使腔面附近吸收和温度下降，从而提高 COMD 阈值。

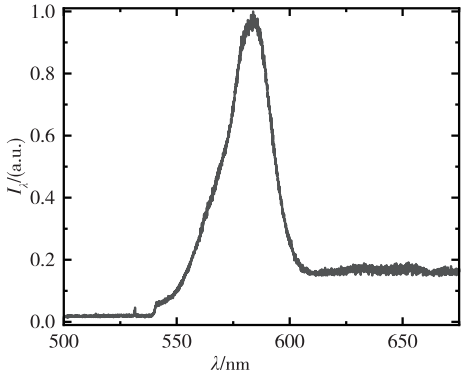


图 7　Zn 扩散后外延片的 PL 光谱

Zn 扩散工艺完成后依次完成脊波导刻蚀、窗口制备、电极制备等标准工艺，将晶圆解理之后，使用电子回旋共振法制备腔面钝化膜。该方法制备的薄膜具有高致密性、高平坦性以及高纯度等优良特性，能够起到隔绝空气中氧气和水份的作用，避免腔面氧化。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。

4　测试结果及分析

在激光器芯片制备和封装完成后，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。测试过程中，环境温度为 25℃，样品通过 TEC 进行温度控制，如果需要更好的散热效果，也可以使用微通道散热结构[30]。图 8 是所制备样品的光谱，峰值波长位于 638 nm，实现了短波化的目标。图中还给出了未进行 Zn 扩散样品的光谱图作为对比，其峰值波长红移了 0.5 nm。

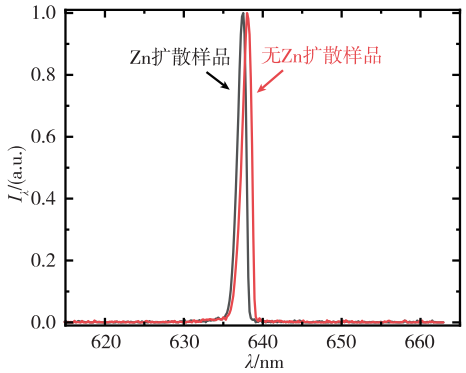


图 8　样品光谱图

为了更直观展示 Zn 扩散对于可靠性的改善作用，在同一流片批次中制备了具有 Zn 扩散工艺和不具有 Zn 扩散工艺的两种芯片样品，光功率-电流-电压曲线如图 9 所示。可以看到，未进行 Zn 扩散的样品在 1.7 W 时发生了 COMD，而进行了 Zn 扩散的样品直到 5.7 W 都未出现 COMD，实现了腔面可靠性的改善。对于 Zn 扩散样品，当功率达到约 5 W 时曲线斜率略有下降，说明出现了热饱和。另外，从测试结果中可以看到，两种样品的阈值电流、斜率效率等参数变化很小，说明端面处 Zn 扩散对于激光器的其他光电性能参数几乎没有影响，也不会引入负面效应。

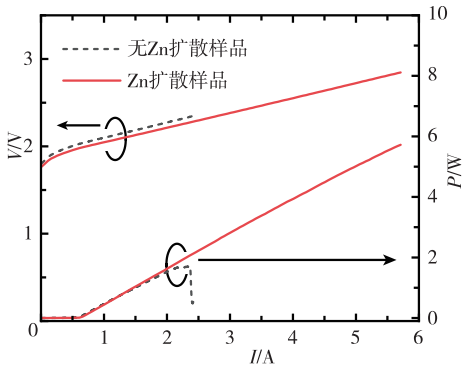


图 9　Zn 扩散前后两样品的 *P-I-V* 曲线

图 10 是样品远场发散角的测试结果，慢轴（水平）和快轴（垂直）方向发散角的半高全宽分别是 9.9°和 43.3°。其中水平发散角与仿真结果有差距，

这是由于仿真时仅考虑了基模的情况，而器件实际为多模工作，实际远场发散角会更大。相比之下，垂直发散角与仿真结果非常接近，这是因为垂直方向模式始终为基模。

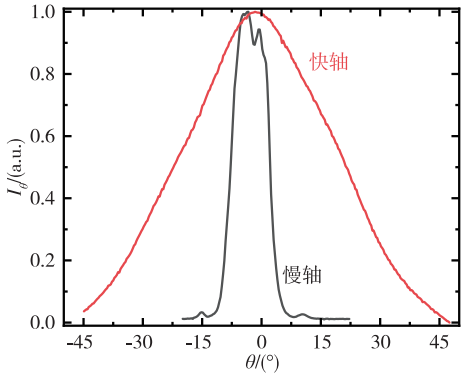


图10 慢轴（水平）和快轴（垂直）方向光强随角度的变化关系

5 结论

设计并制备了短波长638 nm大功率红光半导体激光器。通过仿真计算实现了光学限制因子的优化，达到4.8%。在外延生长过程中，采用倾斜衬底和温度控制法生长了张应变GaInP量子阱。在器件制备过程中，使用Zn扩散工艺对腔面附近的量子阱进行了杂化，PL谱峰值波长蓝移量达到39.2 nm。最终，成功得到波长位于638 nm，功率能够达到5.7 W的大功率红光激光器。

参考文献：

[1] Kobayashi K, Kawata S, Gomyo A, et al. Room-temperature CW operation of AlGaInP double-heterostructure visible lasers [J]. Electronics Letters, 1985, 21(20): 931-932.

[2] Ikeda M, Mori Y, Sato H, et al. Room-temperature continuous-wave operation of an AlGaInP double heterostructure laser grown by atmospheric pressure metalorganic chemical vapor deposition [J]. Applied Physics Letters, 1985, 47(10): 1027-1028.

[3] Ishikawa M, Ohba Y, Sugawara H, et al. Room-temperature cw operation of InGaP/InGaAlP visible light laser diodes on GaAs substrates grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(3): 207-208.

[4] Hatakoshi G I, Nitta K, Itaya K, et al. High-power InGaAlP laser diodes for high-density optical recording [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(2S): 501.

[5] Hatakoshi G, Itaya K, Ishikawa M, et al. Short-wavelength InGaAlP visible laser diodes [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(6): 1476-1482.

[6] Katsuyama T, Yoshida I, Hashimoto J, et al. OMVPE growth of AlGaInP/$Ga_xIn_{1-x}P$ strained quantum well structures and their applications to visible laser diodes [J]. Journal of Crystal Growth, 1992, 124(1/4): 697-702.

[7] Serreze H B, Chen Y C, Waters R G. High-power, very low threshold, GaInP/AlGaInP visible diode lasers [J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(22): 2464-2466.

[8] 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.

[9] 朱 振，肖成峰，夏 伟，等. 大功率640 nm红光半导体激光器的设计及制备[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(8)：344-348.
Zhu Zhen, Xiao Chengfeng, Xia Wei, et al. Design and fabrication of high power 640 nm red laser diodes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 344-348.

[10] Mitsuyama H, Motoda T, Nishida T, et al. Reliability study on high-power 638nm broad stripe laser diode [J]. Optical Review, 2014, 21(1): 43-47.

[11] Kuramoto K, Abe S, Miyashita M, et al. Highly reliable operation under high case temperature in 638-nm BA-LD[J]. Optical Review, 2019, 26(1): 201-212.

[12] Hu M H, Xia W, Zhu Z, et al. 638nm Wide Stripe Semiconductor Laser with 2W Output Power[C]//Wuhan: Optica Publishing Group, 2018: 1-4.
Hu M H, Xia W, Zhu Z, et al. 638nm wide stripe semiconductor laser with 2W output power [C]//The International Photonics and Optoelectronics Meeting (POEM) 2018: OT4A.72.

[13] 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.

[14] Bour D P. AlGaInP Quantum Well Lasers[M]. San Diego: Academic Press, 1993.

[15] 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.

[16] Sze S M, Ng K K. Physics of Semiconductor Devices[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.

[17] Yu P Y, Cardona M. Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties[M]. Heidelberg: Springer, 2010.

[18] Hempel M, Tomm J W. Defect temperature kinetics during catastrophic optical damage in high power diode lasers [J].

Proc. SPIE, 2014, 9002: 90021H.

[19] Hakki B W, Nash F R. Catastrophic failure in GaAs double-heterostructure injection lasers [J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(9): 3907-3912.

[20] Wade J K, Mawst L J, Botez D, et al. 8.8 W CW power from broad-waveguide Al-free active-region (λ = 805 nm) diode lasers[J]. Electronics Letters, 1998, 34(11): 1100-1101.

[21] Mawst L J, Bhattacharya A, Lopez J, et al. 8 W continuous wave front-facet power from broad-waveguide Al-free 980 nm diode lasers[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(11): 1532-1534.

[22] 李睿骁, 卢翔孟, 赵　伦, 等. 高温高斜率效率1 060 nm单模半导体激光器[J]. 半导体光电, 2024, 45(4): 557-560.
Li Ruixiao, Lu Xiangmeng, Zhao Lun, et al. High-temperature high-slope-efficiency 1 060 nm single-mode semiconductor laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(4): 557-560.

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

[24] Botez D. Design considerations and analytical approximations for high continuous-wave power, broad-waveguide diode lasers[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(21): 3102-3104.

[25] Tan T Y, Gösele U, Yu S. Point defects, diffusion mechanisms, and superlattice disordering in gallium arsenide-based materials [J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 1991, 17(1): 47-106.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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—)，男，甘肃省兰州市人，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—)，男，河南省人，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。