



·强激光物理与技术·

# 大功率 780 nm 半导体激光器的设计与制备\*

何林安<sup>1,2</sup>, 周 坤<sup>1,2</sup>, 张 亮<sup>1,2</sup>, 李 弋<sup>1,2</sup>, 杜维川<sup>1,2</sup>, 胡 耀<sup>1,2</sup>, 高松信<sup>1,2</sup>, 唐 淳<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 设计并制备了一款 780 nm 半导体激光器, 并进行了外腔反馈锁模研究。利用金属有机化学气相沉积技术制备了激光器外延层, 采用 GaAsP/GaN<sub>0.5</sub>P 作为量子阱/波导层有源区, 限制层采用低折射率 AlGaInP 材料。采用超高真空解理钝化技术, 在激光器腔面蒸镀无定形 ZnSe 钝化层。未钝化器件在输出功率 2.5 W 时发生腔面灾变损伤 (COD), 钝化后器件未发生 COD 现象, 电流在 10 A 时输出功率 10.1 W, 电光转换效率 54%。体布拉格光栅 (VBG) 外腔锁定前后, 器件的光谱半峰全宽分别为 2.6 nm 和 0.06 nm, VBG 变温调控波长范围约 230 pm。

**关键词:** 半导体激光器; 腔面灾变损伤; 光谱调控; ZnSe; 外腔反馈

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210099

## Fabrication of high-power semiconductor laser with wavelength-locked at 780 nm

He Lin'an<sup>1,2</sup>, Zhou Kun<sup>1,2</sup>, Zhang Liang<sup>1,2</sup>, Li Yi<sup>1,2</sup>, Du Weichuan<sup>1,2</sup>,  
Hu Yao<sup>1,2</sup>, Gao Songxin<sup>1,2</sup>, Tang Chun<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A short wavelength of 780 nm semiconductor laser has been designed and fabricated, and the mode locking by external cavity feedback has been studied. The epitaxial layers were prepared by the metal organic chemical vapor deposition technology. GaAsP and GaInP were used as the quantum well and waveguide layer, respectively. The confinement layers were AlGaInP material with low refractive index. Using the ultra-high vacuum cleavage and passivation technology, an amorphous ZnSe passivation layer was deposited on the laser cavity facets. For the original device the catastrophic optical damage (COD) occurred when the output power was 2.5 W. The ZnSe passivated device did not show COD phenomenon until 10.1 W. When the current was 10 A, the output power was 10.1 W, and the electro-optical conversion efficiency was 54%. Before and after the wavelength being locked by the volume Bragg grating (VBG), the full width at half maximum of the spectrum were 2.6 nm and 0.06 nm, respectively, and the wavelength range was about 230 pm through controlling the temperature of VBG.

**Key words:** semiconductor lasers; catastrophic optical damage; spectral adjustment; ZnSe; external cavity feedback

大功率 7xx nm 半导体激光器具有体积小、成本低且易于集成的优点, 在激光医疗、材料加工、高精度激光打印及军用高能激光系统等领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。例如, 79x nm 半导体激光器可用于千瓦级掺铈光纤激光器的泵浦源<sup>[4]</sup>。而激光波长在 780 nm 的半导体激光器与铷金属蒸汽的原子能级匹配, 经光栅锁谱后, 可用于半导体泵浦的碱金属气体激光器 (DPAL) 和空间铷原子钟<sup>[5-6]</sup>。相比于理论与技术上更成熟的 9xx nm 大功率半导体激光器, 7xx nm 波段的主要难点之一是电光效率低且光子能量高, 因此更容易在腔面积热, 引发腔面的光学灾变损伤 (COD), 导致激光器的性能迅速下降<sup>[7-8]</sup>。因此, 研究人员采取了多种方式用以实现高可靠性的大功率 7xx nm 半导体激光器。例如, 采用大光腔的外延结构和增加芯片条宽, 可以达到降低腔面功率密度的效果, 缓解腔面损伤, 但也会带来快轴模式控制和线功率密度降低的问题<sup>[9-10]</sup>。此外, 采用 Zn 扩散形成腔面光学窗口和真空解理腔面钝化

\* 收稿日期: 2021-03-21; 修订日期: 2021-08-18  
基金项目: 科技部重点研发项目 (2018YFB1107302)  
联系方式: 何林安, sdhelinan@126.com。

等技术,可以有效降低腔面光学吸收和避免腔面氧化,从而有效提升前腔面的激光耐受能力<sup>[11]</sup>。

近 10 年,随着光纤激光器和 DPAL 等高能激光系统的发展,以美国、德国为主的多家公司和研究机构致力于大功率 7xx nm 半导体激光器的研发。美国 nLIGHT 公司在 2011 年报道了 200  $\mu\text{m}$  条宽的 786 nm 半导体激光器,其在连续电流下的功率效率达 10W@65%,并通过了数千小时的加速寿命考核实验<sup>[12]</sup>。美国相干 (Coherent) 公司在 2020 年报道了 100  $\mu\text{m}$  条宽的 793 nm 半导体激光器,连续工作下达到了 5.6 W@60.3% 的功率效率<sup>[13]</sup>。德国费迪南布劳恩研究所 (FBH) 在 2020 年报道了 90  $\mu\text{m}$  条宽的 780 nm 半导体激光器,在脉宽 1 ms、频率 10 Hz 的脉冲电流下,芯片功率效率达到 14 W@45%,并进行了 1200  $\mu\text{m}$  出光孔径的研究,脉冲下极限峰值功率效率可达到 60 W@50%<sup>[14]</sup>。在 7xx nm 波段半导体激光器方面,国内研究机构多集中于后端光学系统设计<sup>[15]</sup>。因此,针对国内对 7xx nm 大功率半导体激光器的需求,开展国产化研究势在必行。

本文设计并制备了基于 GaAsP/GaNnP 有源波导区的 780 nm 半导体激光器,通过优化量子阱的位置与材料组分,提高了基模与高阶模模式限制因子比值,降低了模式损耗和器件热阻,采用高带隙限制层材料,抑制了载流子泄露,提高了内量子效率。利用超高真空解理与腔面钝化技术提高了腔面损伤阈值,器件最大输出功率大于 10 W。

## 1 器件设计与制备

首先,采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 系统在偏向  $\langle 111 \rangle$  晶向  $15^\circ$  的 N 型 GaAs (100) 单晶衬底上制备了 780 nm 半导体激光器的外延层。其外延结构依次为 950 nm Si 掺杂  $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  限制层, 9 nm 的压应变 GaAsP 量子阱置于 1500 nm 非故意掺杂的 GaInP 波导层中, 800 nm Zn 掺杂  $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  限制层, 50 nm Zn 掺杂 GaInP 过渡层及 200 nm C 掺杂的 GaAs 欧姆接触层。

外延结构的折射率及光场分布如图 1 所示,本研究中采用了非对称厚度的波导结构,量子阱的位置偏向  $P$  侧,目的是使模场分布偏向  $N$  侧,降低空穴对光的吸收,从而降低内部光损耗。同时,厚度较薄的  $P$  侧利于降低器件  $P$  面向下封装时的热阻。由于采用了 1.5  $\mu\text{m}$  的大光腔波导结构,该波导可容纳基模 ( $\text{TM}_{00}$ )、一阶模 ( $\text{TM}_{01}$ ) 和二阶模 ( $\text{TM}_{02}$ ),通过优化量子阱的位置保证了激光器基模的稳定激射,抑制了高阶模成分,如图 1 所示,基模、一阶模和二阶模的限制因子分别为 1.32%, 0.66% 和 0.01%,较大的限制因子之比,提高了基模与高阶模的增益差距。

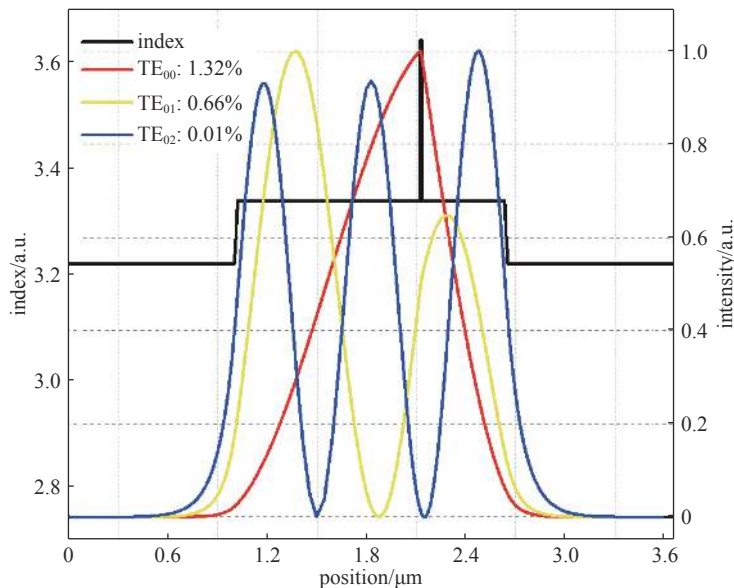


Fig. 1 Refractive index and mode distribution diagram of 780 nm semiconductor laser

图 1 780 nm 半导体激光器的折射率及光场分布

外延片生长完成后,采用湿法腐蚀工艺制成 100  $\mu\text{m}$  宽条,通过电子束蒸镀  $\text{SiO}_2$  绝缘膜,制备注电窗口区,同时形成弱折射率限制。 $P$  面金属电极依次为 Ti/Pt/Au,  $N$  面金属电极为 Ni/AuGe/Pt/Au。采用超高真空解理机制成 4 mm 长的厘米巴条,真空度  $1 \times 10^{-10}$  MPa,并在前后腔面分别蒸镀无定形 ZnSe 钝化层,然后利用电子束镀膜机分别蒸镀反射率 5% 的增透膜和 95% 的高反膜。解理成管芯, $P$  面向下焊接在热沉上。

## 2 实验结果与分析

制成的 780 nm 半导体激光器的功率效率测试结果如图 2(a) 所示。ZnSe 钝化前后的器件阈值电流均为 1 A, 对应的阈值电流密度为 0.25 kA/cm<sup>2</sup>。当测试电流在 3 A 以下, 输出功率低于 2.5 W 时, 两种激光器的功率曲线基本重合, 说明 ZnSe 钝化层对激光器的光学性能并未产生明显影响。当测试电流继续增大, 未经 ZnSe 钝化腔面的器件在 2.5 W 时发生了 COD 现象。而采用 ZnSe 钝化层的器件在测试电流 10 A 时仍未出现 COD 现象, 输出功率为 10.1 W, 电光转换效率为 54%。半导体激光器解理腔面的吸附水汽、砷氧化物及发生化学反应后析出的砷等是导致 COD 现象的关键因素之一, 采用超高真空解理和 ZnSe 钝化膜保护腔面抑制了腔面材料在空气中发生化学反应, 因此提高了 COD 阈值<sup>[16]</sup>。图 2(b) 为该器件在 25 °C@8 A 下的老化测试实验, 器件经 300 h 连续工作下无明显的功率退化。7xx nm 半导体激光器的电光效率普遍低于同尺寸的 9xx nm 半导体激光器, 主要原因是随着波长的缩短, 量子阱的带隙宽度增大, 导致电子更容易泄露至 P 波导层和 P 限制层, 导致内量子效率降低<sup>[12]</sup>。本研究中采用了高带隙的 (Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 限制层材料, 可以抑制载流子泄露至限制层, 从而提高器件的内量子效率。

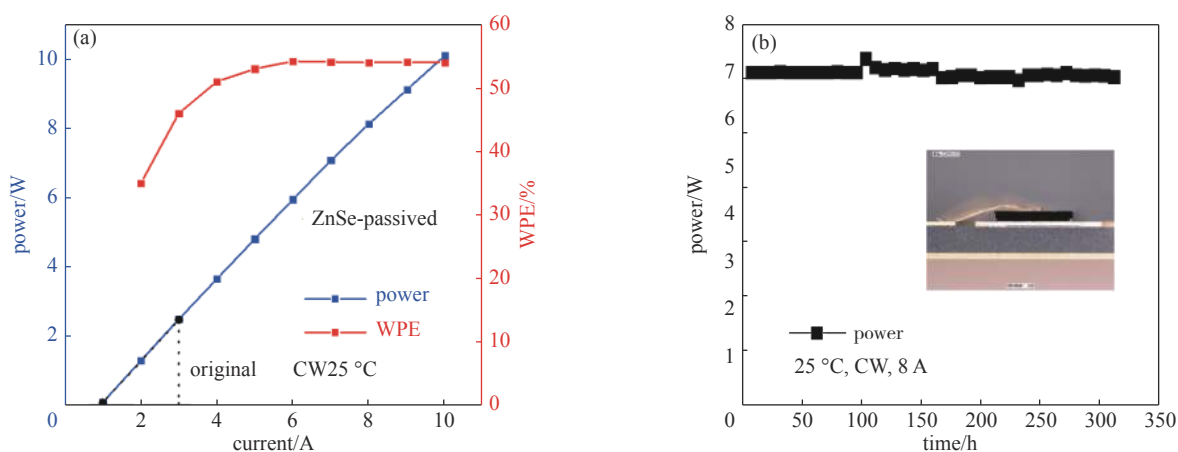


Fig. 2 Power and wall-plug efficiency curves of 780 nm semiconductor laser

图 2 780 nm 半导体激光器的功率效率曲线

图 3 为激光器在 10 A 电流下测试的远场与近场曲线。以 95% 能量为衡量标准, 激光器在工作时的水平发散角为 7°, 垂直发散角为 46°。激光器工作时的发光区宽度约为 100 μm, 说明精准的脊型工艺形成了良好的电流限制。

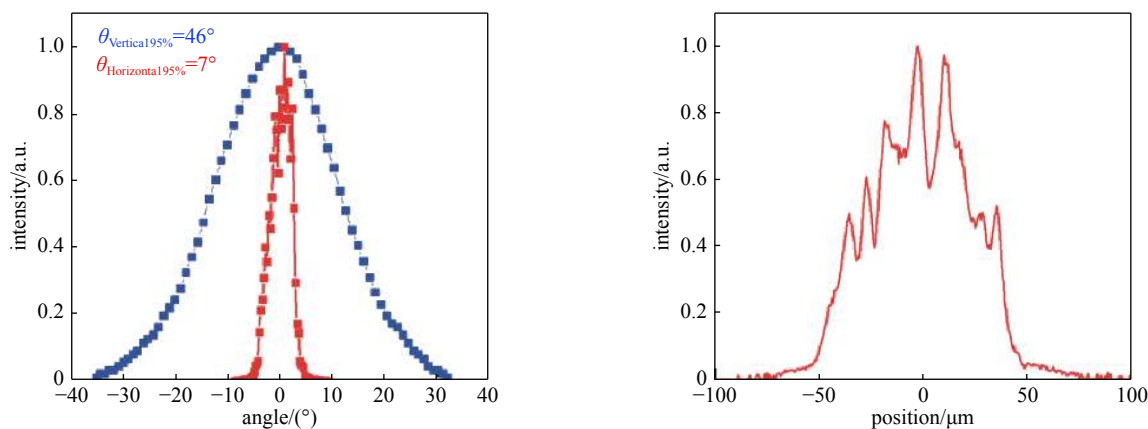


Fig. 3 Far field and near field of 780 nm semiconductor laser

图 3 780 nm 半导体激光器的远场与近场

选用衍射效率为 15% 的体布拉格光栅 (VBG) 对制成的 780 nm 半导体激光器进行纵模锁定, VBG 结构参数为 12 mm×4 mm×2.5 mm, 图 4(a) 和图 4(b) 分别展示了测得的器件功率效率和光谱分布特性曲线。电流为 8 A 时, 模式锁定后的功率降低约 0.3 W, 测得电光转换效率约为 52%。纵模锁定前, 器件的激光光谱半峰全宽 (FWHM) 约为 2.6 nm, 中心波长为 781.2 nm, 经 VBG 外腔锁定后中心波长为 779.9 nm, 由于采用的 5% 前腔反射率较高, 锁定后的半峰全宽约为 0.06 nm。

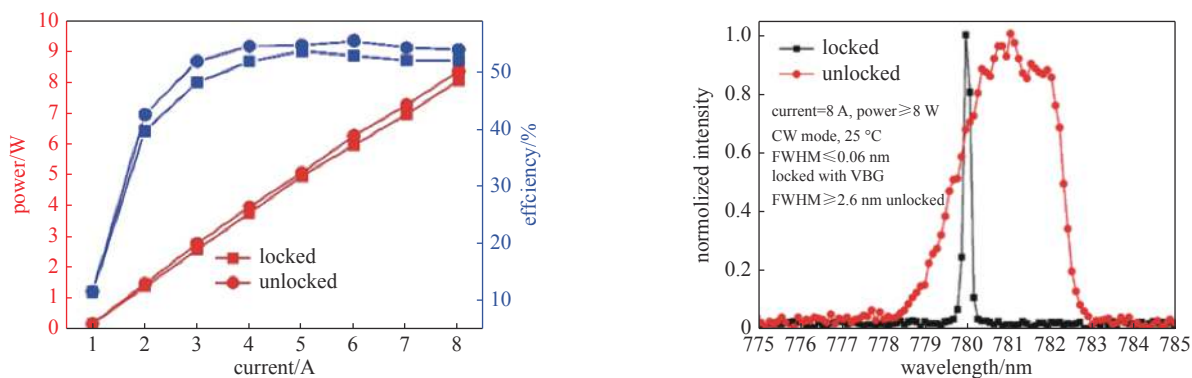


Fig. 4 Power, conversion efficiency and spectrum curves of the 780 nm semiconductor laser before and after mode locked by VBG

图4 780 nm 半导体激光器 VBG 锁模前后功率效率曲线和光谱分布

图5为锁定光谱的中心波长随 VBG 加热电流的变化曲线。采用 VBG 两侧贴合镍铬合金加热片的方式,通过改变加热片的电流控制 VBG 温度,从而调制激光器激射的中心波长<sup>[17-18]</sup>。所有测得光谱的谱宽均为 $\sim 0.06$  nm,当电流为 0 A 时,光谱的中心波长为 779.12 nm,随着电流增加到 3, 4, 5 A 时,光谱的中心波长逐渐红移至 779.28, 779.35, 779.48 nm。这是由于 VBG 为光热敏材料制作,其折射率随温度变化,从而使得 VBG 中心波长随温度变化存在热漂移现象<sup>[18-19]</sup>。测试电流在 4 A 以下时,波长红移梯度约为 0.077 nm/A, 4~5 A 波长红移 0.13 nm,继续增加测试电流,光谱的中心波长没有明显变化。

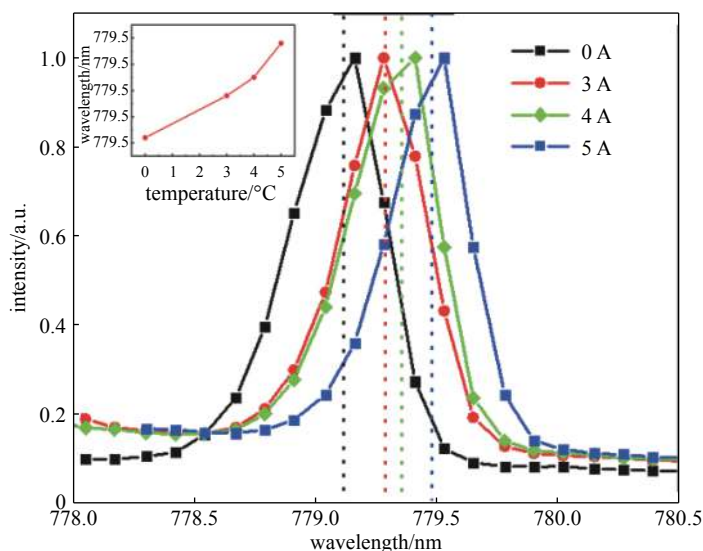


Fig. 5 Spectrum curves of the 780 nm semiconductor laser at different VBG heating current

图5 不同 VBG 加热电流下的 780 nm 半导体激光器光谱

### 3 结论

设计并制备了大功率 780 nm 半导体激光器,并进行了 VBG 外腔锁模研究。量子阱和波导层分别采用 GaAsP 和 GaInP 材料,结合非对称厚度波导结构,提高了器件可靠性,降低了器件的内损耗和热阻。利用超高真空解理和无定形 ZnSe 钝化腔面技术,大幅提高了器件的 COD 阈值,输出功率在 10.1 W 时器件功率效率达到 54%。经 VBG 锁定后,光谱半峰全宽从 2.6 nm 降低至 0.06 nm,并通过改变 VBG 温度,波长线性调制范围达 0.23 nm。

#### 参考文献:

- [1] Rotondaro M D, Zhdanov B V, Shaffer M K, et al. Narrowband diode laser pump module for pumping alkali vapors[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9792-9797.
- [2] Koenning T, McCormick D, Irwin D, et al. DPAL pump system exceeding 3 kW at 766 nm and 30 GHz bandwidth[C]//Proceedings of SPIE 9733, High-Power Diode Laser Technology and Applications XIV. 2016: 97330E.
- [3] Vinokurov D A, Zorina S A, Kapitonov V A, et al. MOCVD GaInAsP/GaInP/AlGaInP laser structures emitting at 780 nm[J]. *Semiconductors*, 2003, 37(12): 1421-1424.
- [4] Moulton P F, Rines G A, Slobodtchikov E V, et al. Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum*

- [Electronics](#), 2009, 15(1): 85-92.
- [5] Pitz G A, Anderson M D. Recent advances in optically pumped alkali lasers[J]. [Applied Physics Reviews](#), 2017, 4: 041101.
- [6] Keaveney J, Hamlyn W J, Adams C S, et al. A single-mode external cavity diode laser using an intra-cavity atomic Faraday filter with short-term linewidth < 400 kHz and long-term stability of < 1 MHz[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2016, 87: 095111.
- [7] Hempel M, Tomm J W, Ziegler M, et al. Catastrophic optical damage at front and rear facets of diode lasers[J]. [Applied Physics Letters](#), 2010, 97: 231101.
- [8] Sanayeh M B, Brick P, Schmid W, et al. The physics of catastrophic optical damage in high-power AlGaInP laser diodes[C]//Proceedings of SPIE 6997, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics III. 2008: 699703.
- [9] Christopher H, Kovalchuk E V, Wenzel H, et al. Comparison of symmetric and asymmetric double quantum well extended-cavity diode lasers for broadband passive mode-locking at 780 nm[J]. [Applied Optics](#), 2017, 56(19): 5566-5572.
- [10] Sanayeh M B, Brick P, Schmid W, et al. Temperature-power dependence of catastrophic optical damage in AlGaInP laser diodes[J]. [Applied Physics Letters](#), 2007, 91: 041115.
- [11] 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: 081403. (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: 081403)
- [12] Bao Ling, Wang Jun, Devito M, et al. Performance and reliability of high power 7xx nm laser diodes[C]//Proceedings of SPIE 7953, Novel In-Plane Semiconductor Lasers X. 2011: 79531B.
- [13] Liu Guoli, Lehkonen S, Li Jingwei, et al. High power and reliable 793nm single emitter and T-bar for thulium-doped fiber laser pumping[C]//Proceedings of SPIE 11262, High-Power Diode Laser Technology XVIII. 2020: 1126208.
- [14] Crump P, Wilkens M, Hübner M, et al. Efficient, high power 780 nm pumps for high energy class mid-infrared solid state lasers[C]//Proceedings of SPIE 11262, High-Power Diode Laser Technology XVIII. 2020: 1126204.
- [15] 田景玉, 张俊, 彭航宇, 等. 用于碱金属蒸汽激光器泵浦的窄线宽780 nm半导体激光光源[J]. [发光学报](#), 2019, 40(9): 1123-1129. (Tian Jingyu, Zhang Jun, Peng Hangyu, et al. 780 nm diode laser source with narrow linewidth for alkali metal vapor laser pumping[J]. [Chinese Journal of Luminescence](#), 2019, 40(9): 1123-1129)
- [16] Ressel P, Erbert G, Zeimer U, et al. Novel passivation process for the mirror facets of Al-free active-region high-power semiconductor diode lasers[J]. [IEEE Photonics Technology Letters](#), 2005, 17(5): 962-964.
- [17] Koenning T, McCormick D, Irvin D, et al. Narrow-line fiber-coupled modules for DPAL pumping[C]//Proceedings of SPIE 9348, High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII. 2015: 934805.
- [18] 李志永, 谭荣清, 徐程, 等. 用于铷蒸气激光泵浦的窄线宽阵列半导体激光器[J]. [强激光与粒子束](#), 2013, 25(4): 875-878. (Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, et al. Laser diode array with narrow linewidth for rubidium vapor laser pumping[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2013, 25(4): 875-878)
- [19] Venus G B, Sevian A, Smirnov V I, et al. High-brightness narrow-line laser diode source with volume Bragg-grating feedback[C]//Proceedings of SPIE 5711, High-Power Diode Laser Technology and Applications III. 2005.