



·强激光物理与技术·

大功率 780 nm 单管连续输出 16 W 和巴条 连续输出 180 W 半导体激光器*

李 弋^{1,2}, 王浩淼^{1,2}, 张 亮^{1,2}, 贺钰雯^{1,2}, 周 坤^{1,2}, 杜维川^{1,2},
何林安^{1,2}, 胡 耀^{1,2}, 武德勇^{1,2}, 高松信^{1,2}, 唐 淳^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 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)

摘 要: 设计并制备了 780 nm 大功率半导体激光器的单管和巴条。采用金属有机化学气相沉积技术制备的外延结构, 分别使用 GaAsP 和 GaInP 作为量子阱和波导层, 限制层是具有高带隙的 AlGaInP 材料。量子阱与波导层带隙 0.15 eV, 波导层与限制层带隙 0.28 eV, 抑制了载流子泄露。1.55 μm 厚非对称大光学腔波导结构抑制快轴高阶模, 同时缓解腔面损伤问题。为进一步提高腔面损伤阈值, 利用超高真空解理和钝化技术, 在腔面上沉积了非晶 ZnSe 钝化层。条宽 150 μm 、腔长 4 mm 的单管器件, 在电流为 15 A 时, 输出连续功率 16.3 W 未出现 COD 现象, 斜率效率达到 1.27 W/A, 电光转换效率为 58%, 慢轴发散角 9.9°, 光谱半高宽为 1.81 nm。填充因子为 40% 的厘米巴条, 在 192 A 下实现连续输出功率 180 W, 电光转换效率为 50.7%, 光谱宽度仅为 2.2 nm。

关键词: 半导体激光器; 泵浦源; 高效率; 腔面光学灾变损伤; 硒化锌

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230073

High power semiconductor lasers with output power over 16 W for single emitter and 180 W for bar operation at 780 nm under CW operation

Li Yi^{1,2}, Wang Haomiao^{1,2}, Zhang Liang^{1,2}, He Yuwen^{1,2}, Zhou Kun^{1,2}, Du Weichuan^{1,2},
He Linan^{1,2}, Hu Yao^{1,2}, Wu Deyong^{1,2}, Gao Songxin^{1,2}, Tang Chun^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The single emitter and bars of 780 nm semiconductor laser have been designed and fabricated. 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. The bandgap between the quantum well and the waveguide layer was 0.15 eV, while the bandgap between the waveguide layer and the confinement layer was 0.28 eV. The high bandgap was effective in suppressing carrier leakage. The 1.55 μm thick large optical cavity epitaxy structure increases the beam's size and alleviates the cavity optical surface damage problem. The asymmetric structure suppresses high-order fast axis modes. Using the ultra-high vacuum cleavage and passivation technology, an amorphous ZnSe passivation layer was deposited on the laser cavity facets. The ZnSe passivated single emitter device with 150 μm width and 4 mm cavity length, did not show COD phenomenon with 16.3 W continuous-wave output, when the current was 15 A. In this case, the slope efficiency reached 1.27 W/A while the electro-optic conversion efficiency was 58%, and the divergence angle of slow-axis was 9.9° and the spectral width was 1.81 nm. The 1-cm laser bar with lateral emitter fill factor of 40%, reached continuous-wave 180 W output power at 192 A, and the electro-optic conversion efficiency was 50.7%, the spectral width was 2.2 nm.

Key words: semiconductor laser, pump source, high efficiency, catastrophic optical mirror damage, ZnSe

* 收稿日期: 2023-04-02; 修订日期: 2023-10-15

联系方式: 李 弋, njuliyi@aliyun.com。

通信作者: 贺钰雯, 18380597763@163.com。

基于宽条结构的大功率半导体激光器具有高功率效率、体积小、易于集成等优点,其中波长 7xx nm 的激光光源在泵浦千瓦级掺铥光纤激光器、碱金属气体激光器和空间铷原子钟等领域有广泛应用^[1-3]。例如,掺铥钇铝石榴石(Tm:YAG)固体激光器可以被高功率 780 nm 半导体激光器高效泵浦^[4],波长 766 nm 半导体用于泵浦碱金属蒸气激光器(K-DPAL)^[5]。然而,在 7xx nm 波段实现高效率 and 可靠功率比在成熟的 9xx nm 波段更具挑战性,原因之一由于该波段半导体材料特性其电子限制较弱造成器件内量子效率较低,另一原因是短波长的光子能量更高,吸收系数高且穿透深度短^[6],这导致腔面被急剧加热,引起腔面光学灾变损伤(COMD),进而造成器件失效。因此,多种增强 7xx nm 波段腔面可靠性的技术被研究,例如采用大光腔外延结构和增加条宽来降低腔面功率密度^[7],或增大 COMD 阈值的无吸收腔面技术和腔面钝化技术^[8-9]。

随着光纤和固体激光器发展及其对泵浦源需求的增加,提高 7xx nm 半导体激光器的功率效率是近来国内外热点研究方向。国际上,2011年,美国 nLight 公司报道基于 AlGaInAs 材料体系的 786 nm 波长 200 μm 条宽单管,出光功率 10 W(对应线功率 5 W/100 μm)时电光效率 64%,快轴发散角 50°,慢轴发散角 10°(1/e² 能量),光谱半高全宽 1.7 nm,寿命达数千小时^[10]。2020年,美国 Coherent 公司报道基于无 Al 材料有源区的 793 nm 波长条宽 100 μm 单管,在 5 A 时连续输出 5.6 W,电光效率为 60.3%,慢轴发散角 8.8°(95% 能量)^[11]。2020年,德国 FBH 研究所报道其基于 GaAsP 材料有源区的 780 nm 波长条宽 90 μm 单管,在 10% 占空比、脉宽 10 ms 的脉冲条件下,脉冲功率 14 W(对应线功率 15.6 W/100 μm),效率 45%;而 1200 μm 条宽单管脉冲功率 60 W(对应线功率 5 W/100 μm),效率 50%,慢轴发散角 13°(95% 能量)^[5]。国内方面,2019年,深圳瑞波光电子公司报道基于 InGaAsP 量子阱/AlGaInP 波导层的 755 nm 波长条宽 350 μm 单管,连续功率 12.7 W(对应线功率 3.6 W/100 μm),效率 54%,快轴发散角 37°,慢轴发散角 8°(FWHM),并经过 3800 h 的寿命考核^[12]。2021年,中物院应用电子学研究所报道基于 GaAsP 量子阱/GaInP 波导层的 780 nm 波长条宽 100 μm 单管,连续输出功率在 10.1 W 时器件功率效率达到 54%,快轴发散角 46°,慢轴发散角 7°(95% 能量),光谱半峰全宽 2.6 nm,经 VBG 外腔锁定光谱半峰全宽低至 0.06 nm,波长线性调制范围达 0.23 nm^[13]。2023年,苏州长光华芯公司报道基于 GaAsP 量子阱/AlGaAs 波导层的 780 nm 波长条宽 150 μm 单管,连续功率约 16.3 W(对应线功率 10.9 W/100 μm),效率约 60%,5.4 A 时最高电光效率 71%,快轴发散角 39.9°(FWHM),并在 6 A 经过 600 h 的寿命考核^[14]。而在 7xx nm 大功率巴条(线阵列)激光器方面报道不多,2012年,美国 DILAS 公司报道基于 GaAsP 量子阱 780 nm 波长的 19 点巴条,每个发光点条宽 150 μm ,连续功率 110 W,电光效率约 57%,79 W 时慢轴发散角 10.4°(95% 能量),光谱半峰全宽 2.2 nm^[3]。2021年,德国 FBH 研究所报道基于 GaAsP 量子阱/AlGaAs 波导层的 780 nm 波长 5 发光点巴条,在 0.5 ms 脉冲和 10 Hz 重复频率下,脉冲功率 172 W^[15]。国内单位对于 7xx nm 大功率巴条尚未见研究报道。从材料体系上看,7xx nm 芯片通常基于 AlGaInAs 或 GaInAsP 材料,含铝 AlGaInAs 材料体系的优点是含铝组分带来的高带隙可以抑制载流子泄露提高效率,缺点是高表面复合速率的铝容易被氧化,腔面光学损伤阈值低,因此有源区含铝通常被认为会降低可靠性^[5]。无铝 GaInAsP 材料体系优点是有可能通过标准钝化就获得良好的腔面可靠性,缺点是透明电流(因而阈值电流)相对较高。本文采用 GaAsP/GaInP 作为量子阱/波导避免发光区含铝,同时采用高带隙 AlGaInP 作为限制层,这种混合材料体系兼具二者优点。

本文设计高效 GaAsP/GaInP 外延结构制备大功率 780 nm 半导体激光器,采用高带隙限制层材料抑制载流子泄露从而提高内量子效率,并采用超高真空解理原位腔面钝化技术提高了腔面损伤阈值。制造的单管激光器件最大输出功率大于 16 W,巴条最大输出功率 180 W,为所能调研到的现有报道 780 nm 巴条最高连续功率指标。

1 器件设计制备

采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)方法在 n 型 GaAs(100)单晶衬底上生长了 GaAsP/GaInP 体系的 780 nm 半导体激光的外延层。具体结构为:有源层由张应变 GaAsP 单量子阱(9 nm 厚)组成,其嵌入 450 nm 厚的 Zn 掺杂 p 型和 1100 nm 厚的 Si 掺杂 n 型 GaInP 波导层中。它们共同被 1800 nm 厚的 (Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P 限制层包围。最上层为厚度 200 nm 的重掺杂 p 型 GaAs 接触层。图 1 是该外延结构的能带图,图中量子阱与波导层的带隙是 0.15 eV,波导层与限制层的带隙是 0.28 eV,带隙较高起到抑制载流子泄露的作用。

计算外延层的折射率与光场模式分布如图 2 所示,采用 1.55 μm 厚的大光学腔波导结构增加了光束近场模式的尺寸,从而减小输出光功率密度,缓解腔面损伤问题。但大光腔可能容纳基模(TM₀)、一阶模(TM₁)、二阶模(TM₂)。为保持基模稳定激射,设计量子阱处于靠近 p 型波导层的位置,基模、一阶模和二阶模的限制因子分别为 1.32%,0.66% 和 0.01%,这种非对称的大光学腔结构可以抑制快轴高阶模,维持基模激射,快轴发散角即基模发

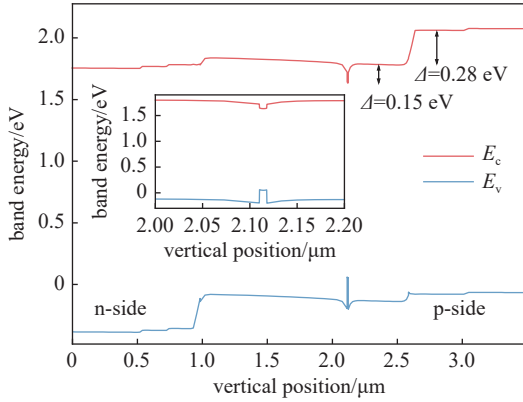


Fig. 1 Energy bands diagram of 780 nm diode laser

图 1 780 nm 半导体激光外延的能带结构

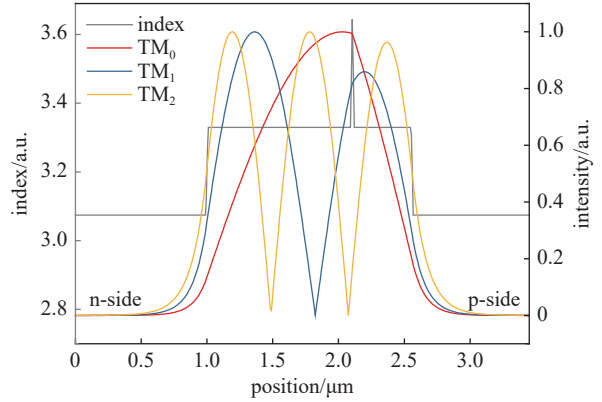


Fig. 2 Refractive index and mode distribution diagram of 780 nm diode laser

图 2 780 nm 半导体激光外延的折射率及光场分布

散角, 一般由外延结构决定。由于光子在 p 型掺杂材料中的损耗比 n 型材料中大, 这样的结构使得整个光场偏向 n 型限制层, 光场进入 p 型波导层的比例更低, 减小了损耗。同时窄 p 型波导结构减小了热阻, 有利于获得高功率输出特性。

外延片生长完成之后, 半导体器件条宽 150 μm 台面结构通过光刻定义, 并通过电感耦合等离子体 (ICP) 蚀刻转移到外延结构中。刻蚀深度为 900 nm, 提供横向有效折射率台阶 $\Delta n_{\text{eff}}=1.5 \times 10^{-3}$, 使激光器大功率工作时保持正波导, 从而维持稳定的侧向模式, 有利于改善慢轴发散角。之后沉积 SiO_2 绝缘膜, 刻蚀打开电注入窗口。芯片 p 面电子束蒸发 Ti/Pt/Au 电极。减薄晶片后电子束蒸发 Ni/AuGe/Pt/Au 芯片 n 面电极。采用真空度 1×10^{-10} MPa 的超高真空解理镀膜设备解理巴条, 并在腔体内原位蒸镀非晶硒化锌 (ZnSe) 前、后腔面钝化层。然后前腔面电子束蒸镀高透膜 (Al_2O_3) 反射率 $R=2\%$ 。后腔面镀高反膜 ($\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$) $R>99\%$ 。最后将芯片 p 面向下安装在 COS 热沉上。而厘米巴条具有 4 mm 的腔长和 40% 的填充因子, 单发光单元为 200 μm 条宽, 为避免发光单元间光热串扰, 工艺上用深隔离沟槽。隔离沟槽位于两发光点中间, 设计宽度 9 μm 、深度 3.7 μm 贯穿整个外延层, 如图 3 所示。巴条被芯片 p 面向下安装在铜微通道冷却器上。

2 实验结果分析

制备的 780 nm 条宽 150 μm 激光器件的连续功率效率测试结果如图 4 所示。测试条件为冷却水温 20 $^\circ\text{C}$ 。可以看出器件阈值电流为 1 A, 对应的阈值电流密度为 0.17 kA/cm^2 , 斜效率为 1.27 W/A 。器件在电流 6.5~13.5 A 之间维持大于 60% 的电光效率, 峰值电光效率出现在电流 10 A 附近达 62%, 在 15 A 输出功率 16.3 W, 此时电光效率为 58%。

由于 7xx nm 半导体激光器的量子阱带隙宽度大于 9xx nm 激光器, 其电子更易从量子阱层泄露至 p 型波导层/限制层, 造成 7xx nm 器件内量子效率降低普遍低于 9xx nm 器件。我们采用的 $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{InP}$ 高带隙限制层有利

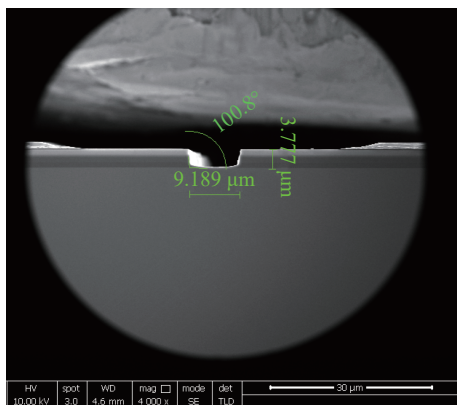


Fig. 3 SEM photo of deep isolation groove between emitters on bar

图 3 巴条上发光点间深隔离沟槽 SEM 照片

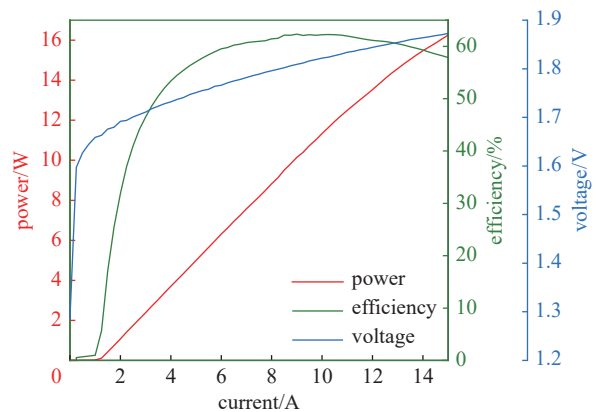


Fig. 4 Optical output power, voltage, and conversion efficiency as function of current of 780 nm single emitter

图 4 780 nm 单管的功率电压效率曲线

于抑制载流子泄露,提高内量子效率,获得了较高功率和效率表现。而其功率稳定一方面得益于超高真空解理原位钝化膜阻止了腔面在空气中与氧气和水气反应^[16],因此在腔面承受的连续激光功率密度达到 $7 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时仍未发生 COMD 退化,另一方面也受益于波导层为无铝 GaInP 材料本身的抗损伤阈值高于含铝波导。综合来说,芯片腔面抗 COMD 性能提高的主要原因是量子阱和波导层不含易氧化的 Al 组分,以及腔面在真空解理并原位镀 ZnSe 钝化膜提高了 COMD。

图 5 为激光器在 15 A 电流下测试的远场与近场曲线。在 16.3 W 连续工作功率下,95% 功率含量下测得的快轴远场角 $\theta_{\perp 95\%}=45^\circ$,慢轴远场角 $\theta_{\parallel 95\%}=9.9^\circ$ 。慢轴发散角受外延结构、条宽、腔长、刻蚀深度、侧向波导结构、散热等因素综合影响。如前文所述的 $1.55 \mu\text{m}$ 厚度大光学腔波导外延结构、 $150 \mu\text{m}$ 条宽、4 mm 腔长、900 nm 刻蚀深度的折射率引导侧向波导结构, COS 封装散热条件下,较窄的慢轴发散角说明脊型波导形成了良好的载流子和光场限制作用。图 6 是 15 A 时的光谱图,半高全宽(FWHM)为 1.81 nm,中心波长 779.8 nm。

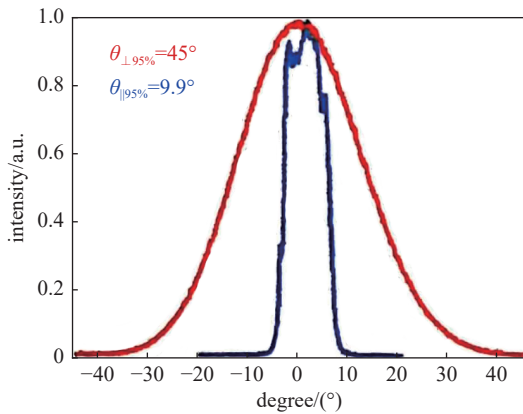


Fig. 5 Far field of 780 nm single emitter
图 5 780 nm 单管的远场曲线

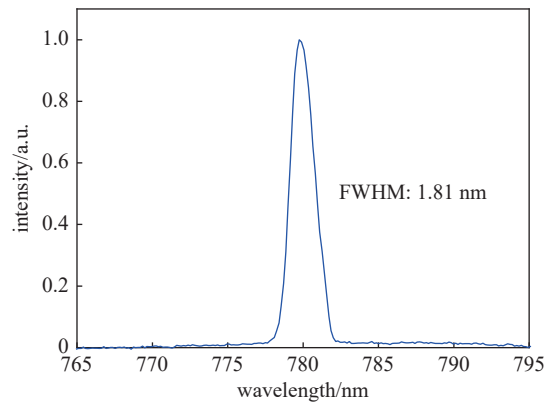


Fig. 6 Spectrum curve of 780 nm single emitter
图 6 780 nm 激光单管的光谱曲线

对于 19 点巴条,如图 7 所示,器件阈值电流和斜效率分别为 30 A 和 1.17 W/A,功率在连续电流 192 A 下达到 180 W (平均每个发光单元 9.5 W),此时电光效率为 50.7%,最大功率下的电压为 1.84 V。180 W 时光谱半高全宽(FWHM)为 2.2 nm,中心波长 780 nm(图 8)。对于巴条电光效率进一步提高的方法,除了优化外延结构来提高内量子效率、减少材料损耗外,还可以从优化腔长入手。较短腔长有利于减少波导损耗,本文中巴条 4 mm 腔长较长。与单管需要增大腔长改善慢轴发散角不同,巴条的泵浦应用一般对于慢轴发散角无要求,因此后续将尝试制造 3 mm 或更短腔长来提高巴条电光效率。与单管器件的结果相比,由于巴条整体产热更高,自热造成了整体效率下降,巴条器件的电光效率比单管器件低约 7%。巴条的自发热 $P_{\text{heat}} = (1/\eta_{\text{eff}} - 1)P_{\text{light}}$,因此在一定的出光功率下减少产热主要依靠提高电光效率,除了外延结构优化外,降低节温也可以提高电光效率,主要方法包括设计更大的条宽来减小发光区节温,或使用金刚石次热沉等高热导率封装材料提高散热能力。如果改进封装散热能力,巴条效率有可能

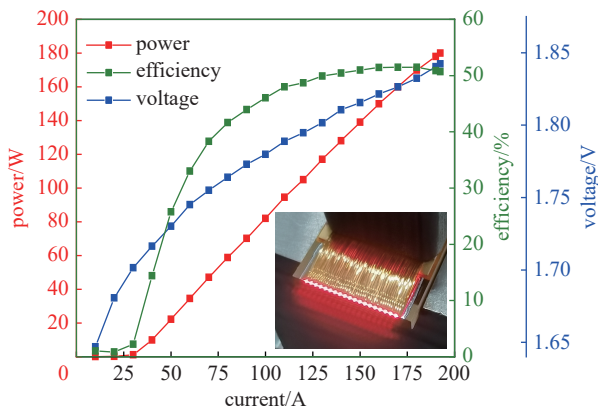


Fig. 7 Optical output power, voltage, and conversion efficiency as function of current of 780 nm diode laser bar
图 7 780 nm 激光巴条的功率电压效率曲线

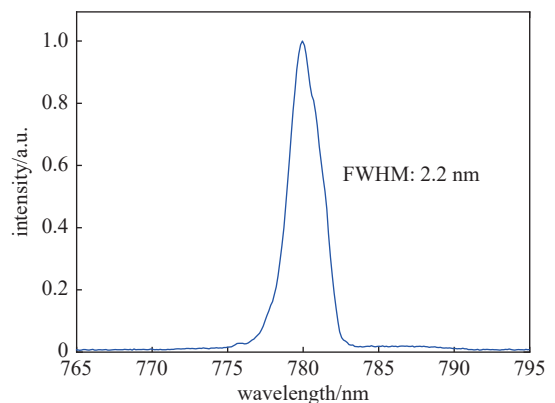


Fig. 8 Spectrum curve of 780 nm diode laser bar
图 8 780 nm 激光巴条的光谱曲线

进一步改善。

本文研制的器件和文献报道的 7xx nm 激光单管性能指标对比见表 1, 巴条的性能指标对比见表 2。

表 1 7xx nm 激光单管性能对比

Table 1 Performance comparison of 7xx nm diode laser single emitters

diode laser single emitter	wavelength/nm	emitter width/ μm	power/W	conversion efficiency/%	fast axis divergence/ $^{\circ}$	slow axis divergence/ $^{\circ}$	spectral width/nm
nLight ^[10]	786	200	10	64	50 (FW1/e ²)	10 (FW1/e ²)	1.7
Coherent ^[11]	793	100	5.6	60.3	/	8.8 (FW95%)	/
Ferdinand-Braun-Institut ^[5]	780	90	14 (pulse)	45	/	/	/
Ferdinand-Braun-Institut ^[5]	780	1200	60 (pulse)	50	/	13 (FW95%)	/
Raybow Optoelectronics ^[12]	755	350	12.7	54	37 (FWHM)	8 (FWHM)	/
Institute of Applied Electronics, CAEP ^[13]	780	100	10.1	54	46 (FW95%)	7 (FW95%)	2.6
Everbright Photonics ^[14]	780	150	7 16.3	71 60	39.9 (FWHM)	/	/
this work	780	150	16.3	58	45 (FW95%)	9.9 (FW95%)	1.81

表 2 7xx nm 激光巴条性能对比

Table 2 Performance comparison of 7xx nm diode laser bars

diode laser bar	wavelength/nm	emitter number	emitter width/ μm	power/W	conversion efficiency/%	spectral width/nm
DILAS ^[3]	780	19	150	110	57	2.2
Ferdinand-Braun-Institut ^[15]	780	5	/	172 (pulse)	57	/
this work	780	19	200	180	50.7	2.2

3 结 论

本文基于无铝源区 GaAsP/GaInP 高增益量子阱材料, 结合非对称大光腔设计, 获得了低内损耗和低热阻的高效率外延结构, 采用超高真空解理钝化膜技术提高了腔面 COMD 阈值和器件可靠性。研制的大功率 780 nm 波长、条宽 150 μm 单管芯片连续输出 16.3 W, 电光效率 58%, 慢轴发散角 9.9°, 谱宽 1.81 nm; 厘米巴条连续输出 180 W, 电光效率 50.7%, 谱宽仅 2.2 nm, 为现有报道的 780 nm 巴条最高连续功率。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Kissel H, Köhler B, Biesenbach J. High-power diode laser pumps for alkali lasers (DPALs)[C]//Proceedings of the SPIE 8241, High-Power Diode Laser Technology and Applications X. 2012: 82410Q.
- [4] Hübner M, Wilkens M, Eppich B, et al. A 1.4kW 780nm pulsed diode laser, high duty cycle, passively side-cooled pump module[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 9749-9757.
- [5] 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 the SPIE 11262, High-Power Diode Laser Technology XVIII. 2020: 1126204.
- [6] Kissel H, Tomm J W, Köhler B, et al. Impact of external optical feedback on high-power diode laser lifetime and failure modes[C]//Proceedings of the SPIE 10900, High-Power Diode Laser Technology XVII. 2019: 109000S.
- [7] 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 780nm[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): 5566-5572.
- [8] Al-Jabr A A, Majid M A, Alias M S, et al. Large bandgap blueshifts in the InGaP/InAlGaP laser structure using novel strain-induced quantum well intermixing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119: 135703.
- [9] Michaud J, Vecchio P D, BéchouL, et al. Precise facet temperature distribution of high-power laser diodes: unpumped window effect[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(9): 1002-1005.
- [10] Bao L, Wang J, Devito M, et al. Performance and reliability of high power 7xx nm laser diodes[C]//Proceedings of the SPIE 7953, Novel In-Plane Semiconductor Lasers X. 2011: 79531B.

- [11] Liu G L, Lehtonen S, Li J W, et al. High power and reliable 793nm T-bar and single emitter for thulium-doped fiber laser pumping[C]//Proceedings of the SPIE 11262, High-Power Diode Laser Technology XVIII. 2020: 1126208.
- [12] Hu H M, Zhao Jianyang, Wang Weimin, et al. 12 W high power InGaAsP/AlGaInP 755 nm quantum well laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17: 061403.
- [13] 何林安, 周坤, 张亮, 等. 大功率 780 nm 半导体激光器的设计与制备[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 091001. (He Lin'an, ZhouKun, ZhangLiang, et al. Fabrication of high-power semiconductor laser with wavelength-locked at 780 nm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 091001)
- [14] Wang Bangguo, Zhou Li, Tan Shaoyang, et al. 71% wall-plug efficiency from 780 nm-emitting laser diode with GaAsP quantum well[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 168: 109867.
- [15] Arslan S, Maaßdorf A, Martin D, et al. Progress in high power diode laser pumps for high-energy class mid infra-red lasers[C]//2021 IEEE Photonics Conference (IPC). 2021: 1-2.
- [16] Boschker J E, Spengler U, Ressel P, et al. Stability of ZnSe-passivated laser facets cleaved in air and in ultra-high vacuum[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14: 1531606.