

10 W 近衍射极限输出的高效率窄线宽主控振荡放大 半导体激光器

杜维川^{1,2}, 何林安^{1,2}, 李弋^{1,2}, 贺钰雯^{1,2}, 谢鹏飞^{1,2}, 周坤^{1,2*}, 张亮^{1,2},
刘晟哲^{1,2}, 高松信^{1,2}, 唐淳^{1,2*}

(1. 中国工程物理研究院高能激光重点实验室, 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:为研制近衍射极限的高功率半导体激光器,采用了片上光栅、窄脊型波导、锥形放大器一体集成的主控放大(Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA)技术路线,以长度为8 mm、脊型宽度为3 μm的波导为单模种子源,配合长度为7 mm、全角为3.3°的锥形放大器,实现了功率10.3 W、慢轴光束质量 $M^2(1/e^2)$ 因子=1.06, 3 dB线宽40 pm,工作电光效率50.5%的半导体激光输出,并采用片上电致加热光栅调谐技术,实现了中心波长在4 nm范围内连续可调。

关键词:近衍射极限; MOPA 半导体激光器; 高亮度半导体激光器; 窄线宽
中图分类号: TN3 **文献标识码:** A

Monolithic master oscillator high efficiency diode laser with nearly diffraction-limited narrowband emission and 10 W of optical output power

DU Wei-Chuan^{1,2}, HE Lin-An^{1,2}, LI Yi^{1,2}, HE Yu-Wen^{1,2}, XIE Peng-Fei^{1,2}, ZHOU Kun^{1,2*},
ZHANG Liang^{1,2}, LIU Sheng-Zhe^{1,2}, GAO Song-Xin^{1,2}, TANG Chun^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Lasers, CAEP, Mianyang 621900, China;
2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: High-power semiconductor laser with nearly diffraction limited narrowband emission was designed and fabricated. The monolithic master oscillator power-amplifier (MOPA) diode laser consists of distributed Bragg gratings, a narrow ridge waveguide and a tapered amplifier. The ridge waveguide with length of 8 mm and width of 3 μm is used as the single-mode seed source. A tapered gain section with length of 7 mm and a full taper angle of 3.3° amplify the seed power. The fabricated device reach an output power of 10.3 W with a slow axis beam quality $M^2(1/e^2)$ factor of 1.06 and an electro-optic efficiency of 50.5%. The spectral linewidth is 40 pm (3 dB), and a central wavelength tuning range of 4 nm was realized by the integrated Bragg gratings micro heater.

Key words: diffraction-limited, MOPA semiconductor laser, high brightness, narrowband

引言

直接电泵浦的高功率半导体激光器无需二次

转换,理论效率高,但由于光束质量较差、亮度低,限制了其应用范围,目前主要作为激光泵浦源以及用于对亮度需求不高的工业加工领域^[1-3]。近年来,

收稿日期: 2022-01-14, 修回日期: 2022-07-07

Received date: 2022-01-14, revised date: 2022-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(11804322); 中国工程物理研究院创新发展基金(C-2020-CX2019035)

Foundation items: the National Natural Science Foundation of China (11804322), the Innovation and Development Fund of CAEP (C-2020-CX2019035)

作者简介(Biography): 杜维川(1986—),男,四川江油人,副研究员,硕士学位,主要研究领域为半导体激光器、光学薄膜。E-mail: weichuan-du@126.com

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: 17764988391@163.com, tangchun21@caep.cn.

随着智能制造、激光传感、激光雷达、空间激光通讯、非线性频率转换等领域的迫切需求,对半导体激光的输出亮度提出了更高的要求^[4-5]。利用脊型波导为单模种子源,角度匹配的锥形增益区为放大器的主控振荡放大技术(MOPA),可以实现近衍射极限的高功率输出,引起了国内外众多研究机构的高度重视^[6-10]。2013年,Wang xiaozhuo等人利用分离全半导体MOPA的实验系统实现了17 W的准连续激光近衍射极限输出^[11],2019年,德国费迪南德劳恩研究所(FBH)在宽度为5 μm 脊型波导前后两端均设计了分步式反馈反射(Distributed Bragg Reflection, DBR)光栅作为谐振腔、锥角为6°增益区作为放大器,并采用了弯曲波导为反馈光隔离器,获得了9.5 W的输出功率,并在8 W时获得了近衍射极限输出,中心能量占比76%^[12]。

本文采用在片上集成的种子源与放大器之间增加一段脊型波导,该结构的引入一方面作为功率预放大器,提高注入放大器前种子激光功率,提升放大效率,另一方面作为额外的模式过滤器,可以更好地滤除高阶横模与杂散光,保持近衍射极限的光束质量,并且保持较高的中心能量占比。

1 器件设计与制备

1.1 器件结构

1.1.1 外延结构

器件的外延层采用铟镓砷(InGaAs)单应变量子阱和2.4 μm 的厚波导结构,通过改变In组分,可以实现波长在900~1 200 nm之间变化。本文中,In组分为18%,对应的PL波长为1 004 nm,波导层采用15%铝组分的铝镓砷($\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$)材料,相对量子阱材料提供了较高的带阶高度($\Delta E \geq 8 k_{\text{B}}T$),便于在MOPA器件中降低少数载流子泄露至波导层,提高内量子效率。量子阱采用非对称放置,P波导和N波导的厚度比约为1:2,目的是降低放大器中的丝状发光效应,同时降低器件串联电阻,提高转换效率^[13]。限制层采用重掺杂($\sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)的 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 材料,形成稳定的模式控制和载流子限制。采用金属有机化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)系统完成了器件外延层的生长制备,随后采用标准芯片工艺制备了100 μm 宽条型器件,通过变腔长方法测得器件内量子效率为96.6%,内损耗为0.48 cm^{-1} ,快轴发散角40°(全宽全角),如图1所示。

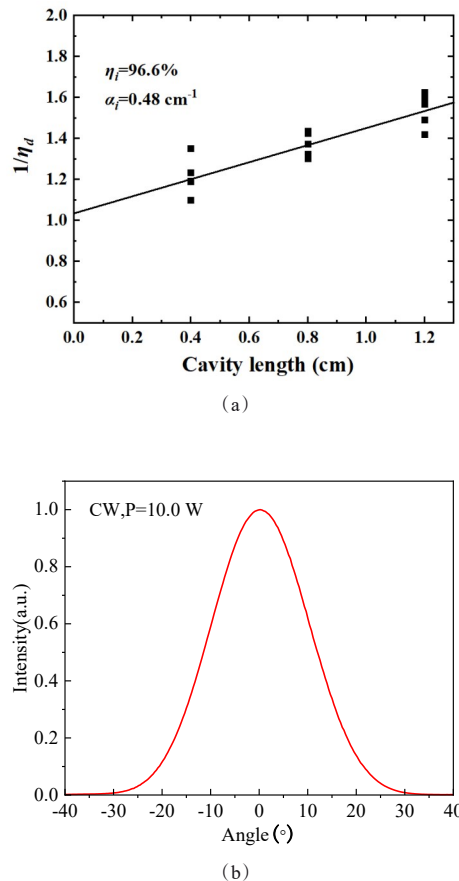


图1 外延结构的关键参数测试结果。(a)内损耗和内量子效率测试结果,(b)快轴远场发散角测试结果

Fig. 1 Key parameter of the vertical layer structure. (a) internal loss and Internal quantum efficiency, (b) far-field divergence angle of fast axis

1.1.2 芯片侧向结构

片上集成MOPA半导体激光器的芯片结构如图2所示,由提供单模输出的脊形种子源区(MO)、作为前置放大器的脊形预放区(PRE)和实现功率放大的锥形区(PA)三部分组成,三段电极分离可独立加电驱动。器件总长度15 mm,其中MO脊形区包含1 mm长的6阶后DBR光栅,2 mm长的增益区,以及0.3 mm长的6阶前DBR光栅,脊形波导宽度为3 μm ,侧脊刻蚀深度为1.05 μm ,芯片整体厚度为120 μm 。为了便于注电,并避免大尺寸器件封装应力对器件的出光造成影响,采用了正装的封装结构,并在PA区域上焊接了散热辅助热沉。

光栅是通过电子束光刻及等离子体刻蚀形成,光栅槽深度约1.1 μm ,前、后光栅的设计反射率分别为92%和30%,DBR的反射图谱如图所示,前、后

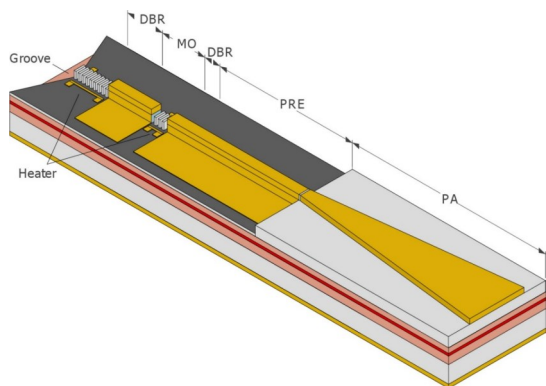


图2 设计的MOPA器件结构

Fig. 2 Designed structure of MOPA device

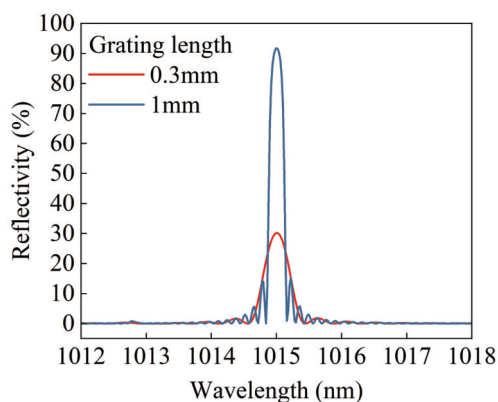
光栅侧边都设计有微电极加热器(Heater)用于光谱的调谐。在后 DBR 光栅与后腔面之间,设计有长度 0.2 mm,刻蚀深度 $5\ \mu\text{m}$ 的三角形刻蚀深槽,以抑制除 DBR 外的谐振。Pre 预放区脊宽同样为 $3\ \mu\text{m}$,侧脊刻蚀深度 $1.05\ \mu\text{m}$,长度为 4.5 mm。PA 放大区的锥形区域锥角为 3.3° 全角,长度为 7 mm,出光口宽度为 $400\ \mu\text{m}$ 。前、后腔反射率 $< 0.1\%$,为克服腔面光学灾变,利用离子清洗工艺,去除了表面氧化层,并利用 Al_2O_3 高稳定的特点,镀膜过程无氧氛围,作为腔面钝化层。最终利用 Sub/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 全介质膜体系,实现了高抗损伤的低反膜制备。

2 器件测试与讨论

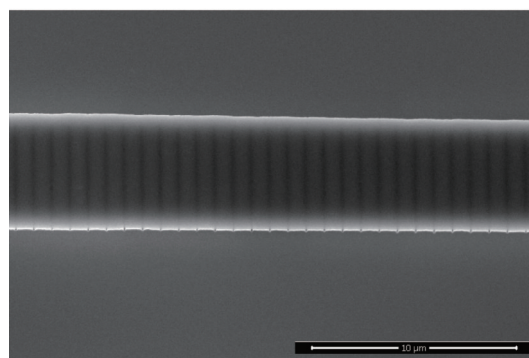
2.1 功率-电流-电压特性

在水温为 $18\ ^\circ\text{C}$ 时,连续出光条件下,测试器件的功率、电流和电压特性。采用三个独立直流电源分别对器件的种子源、预防区和放大区进行了注电,并利用万用表测试了放大区在不同电流下的电压,记录了不同注入条件下的激光功率,并计算了电光效率,结果如图4所示。

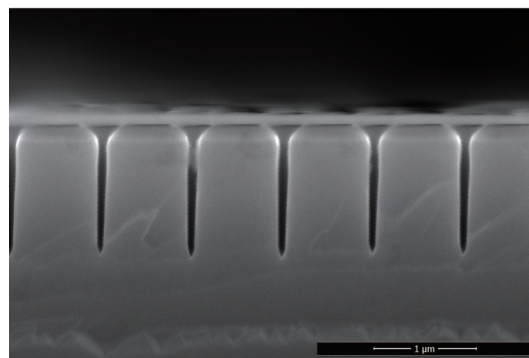
从图4中可以看出,器件的最大输出功率为 $10.1\ \text{W}@13\ \text{A}$,此时放大区的电压为 $1.54\ \text{V}$,电光转换效率为 50.5% ,器件的最大斜率效率为 $1.01\ \text{W/A}$,在 $3\sim 13\ \text{A}$ 的平均斜率效率为 $0.9\ \text{W/A}$ 。保持放大区的注入电流为 $13\ \text{A}$,改变器件的预放区电流在 $0\sim 0.3\ \text{A}$ 变化时,其功率变化曲线如图所示。输出功率随着 PRE 注入电流增大而增大,且在 PRE 注入电流较小时,输出功率增长速度较快,当 PRE 电流接近 $0.25\ \text{A}$ 时,注入功率不再增长,这是由于半导体激光器的放大特性在种子源功率从小功率到接近饱和功率时,其放大倍率逐渐下降,从而输出功率也接近饱和。



(a)



(b)



(c)

图3 光栅设计与制备结果:(a)光栅反射率设计值,(b)制作的光栅俯视图,(c)光栅侧视图

Fig. 3 Results of grating design and fabrication: (a) grating reflectivity design value, (b) grating top view, (c) grating side view

2.2 光束质量

利用快慢轴镜对器件的快慢轴进行了准直,在水温为 $18\ ^\circ\text{C}$ 的条件下,根据国标 ISO 11146-3,利用 M2 测试仪测试了器件的光束质量。测试结果表明,在 $1/e^2$ 测试标准下,器件的光束质量在大功率输出条件下仍然可以保持近衍射极限;但是在二阶矩 ($D4\sigma$) 评价标准下,随着 PA 区注入电流的增加,光束质量不断变差,当注入电流为 $13\ \text{A}$ 时, $M^2(1/e^2) =$

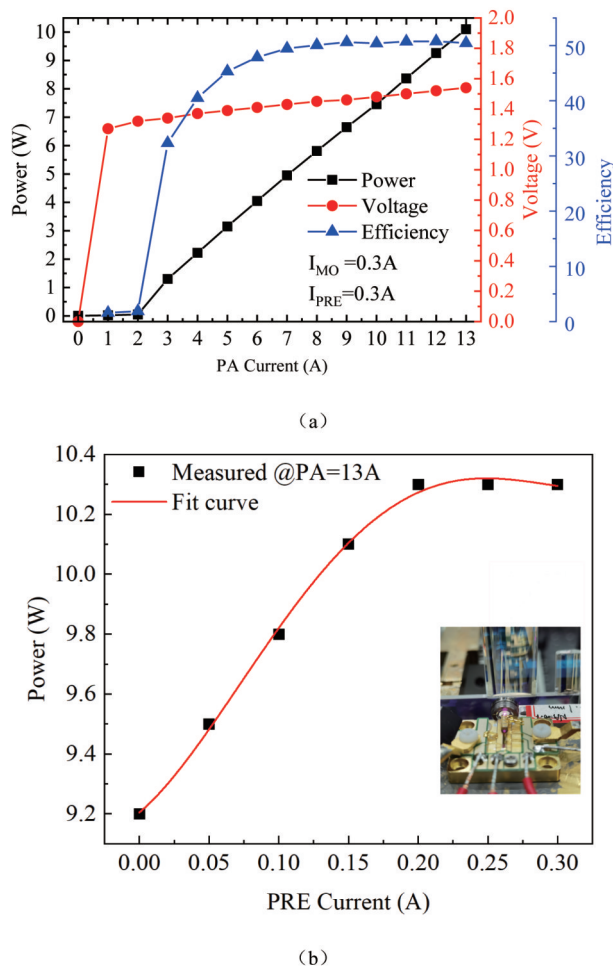


图4 器件的P-I-V-E测试结果(a)PRE电流为0.3 A时器件测试结果,(b)变化PRE电流器件的输出功率

Fig. 4 The P-I-V-E test results of the MOPA device (a) test results under the PRE current equals 0.3 A, (b) relation between PRE current and output power

1.06, $M^2(D4\sigma)=14$, 输出功率为 10.3 W, 中心能量占比为 78%, 对应亮度为 $900/MW \cdot cm^{-2} \cdot str$ 。利用光束分析仪通过成像系统测试了最小束腰以及腔面处的光强分布, 光束特性测试结果如图所示。输出功率为 10.1 W 时, 慢轴最小束腰大小约为 $5 \mu m$ (半宽), 腔面处的慢轴宽度为 $300 \mu m(1/e^2)$, 对应慢轴的衍射全角为 2.45° 。大电流下主光斑附近出现了旁瓣, 是二阶矩光束质量恶化的主要原因, 出现该类旁瓣的原因主要是丝状发光和放大器的非故意反馈光引起的窄脊型波导模式的失稳^[13]。

2.3 光谱特性

将准直好的激光缩束后引入积分球, 将匀化后的激光导入单模光纤, 利用 YOKOGAWA 公司的 AQ6373 光谱仪对器件的中心波长及光谱宽度进行了测试, 并对加

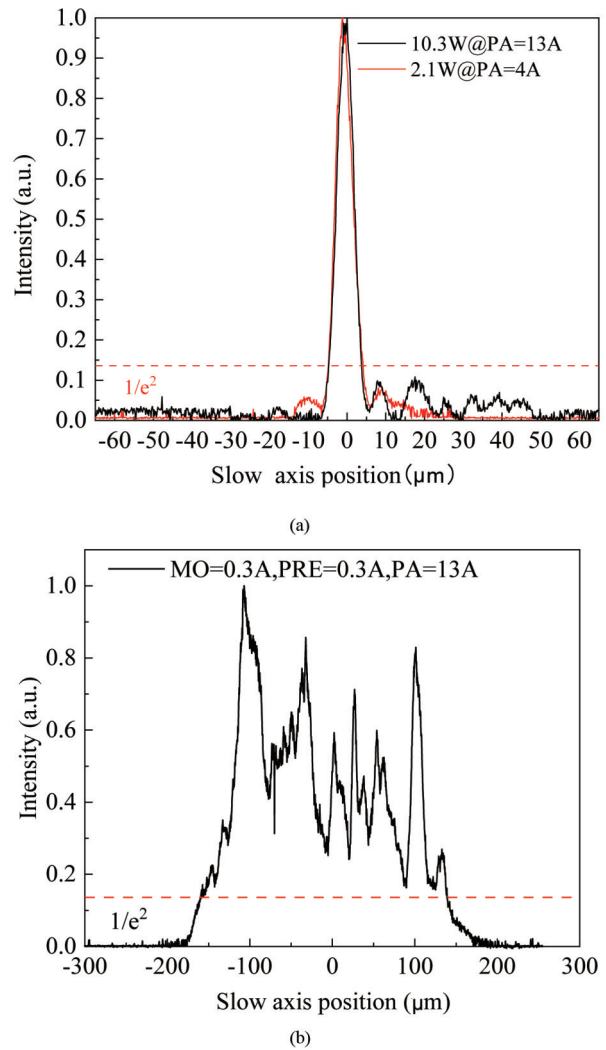
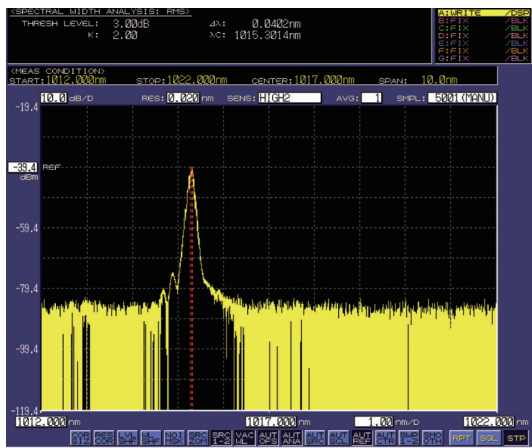


图5 光束空间特性测试结果(a)最小慢轴束腰,(b)腔面位置的慢轴光强分布

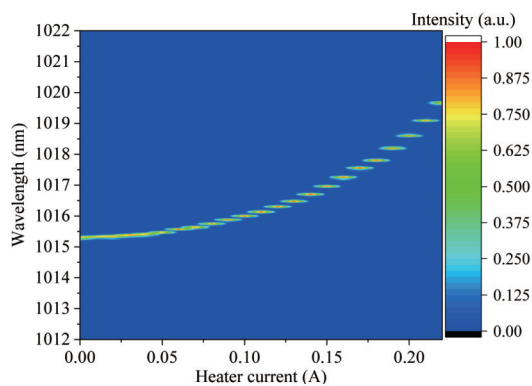
Fig. 5 Results of beam space characteristics (a) minimum beam waist of slow axis, (b) distribution of laser intensity of slow axis at facet position

热电极施加不同电流测试光谱调谐特性。

从图6中可以看出, 当输出功率为 10 W 时, 器件的中心波长为 1015.3 nm, 3 dB 光谱宽度为 40 pm, 边模抑制比 (Side-Mode Suppression Ratio, SMSR) 大于 40 dB。在加热器上施加 0~0.2 A, 步进为 10 mA、精度为 1 mA 的电流, 可以实现中心波长的调谐, 调谐范围约 4 nm, 调谐过程中未出现跳模现象。由于采用了电加热的方式改变光栅的中心波长, 在小电流下, 波长随着调谐电流的增加呈现连续变化, 随着电流的进一步增大, 中心波长台阶式增大, 这说明在大电流下, 中心波长的调谐精度随电流变化更加敏感。为了在大电流下保持连续调谐, 需要进一步提高电流的控制精度, 并减小



(a)



(b)

图6 光谱特性与调谐特性测试结果 (a)光谱仪测试结果, (b)heater 注入电流与光谱的对应关系

Fig. 6 Test results of spectral characteristics (a) spectrometer measured results, (b)heater relationship between injection current and spectrum

步进。

3 结语

片上集成的MOPA型半导体激光芯片可以实现高功率的近衍射极限输出,采用较长的直波导作为预放区,一方面保持了种子激光良好的光束特性,另一方面实现了功率的放大,从而在放大过程中保持良好的光束质量。制作了整体长度为15 mm的MOPA半导体激光器,采用多电极正装辅助散热实现了高亮度输出,当PA区注入电流为13 A时,输出功率10.3 W,光束质量近衍射极限。采用DBR光栅配合电致加热调谐的方案,可以实现中心在4 nm范围内变化,并保持小于100 pm的光谱宽度,可以应用于宽波段高亮度半导体光源的研制。

References

[1] QIAO Yan-Bin, CHEN Yan-Ning, ZHAO Dong-Yan, et

al. Thermal crosstalk characteristics in high-power 808 nm AlGaAs/GaAs laser diode bars [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (乔彦彬,陈燕宁,赵东艳,等. 高功率808 nm AlGaAs/GaAs基半导体激光器巴条的热耦合特征. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(1):10-13.

[2] LI Te, HAO Er-Juan, LI Zai-Jin, et al. Optimization of waveguide structure for high power 1 060 nm diode laser [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (李特,郝二娟,李再金,等. 高功率1 060 nm半导体激光器波导结构优化. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(3):226-230.

[3] He Tianjiang, Jing Hongqi, Zhu Lingni, et al. Quantum Well Intermixing of 915 nm InGaAsP/GaAsP Primary Epitaxial Wafers [J]. *Acta Optica Sinica.* (何天将,井红旗,朱凌妮,等. 对915 nm InGaAsP/GaAsP初次外延片量子阱混杂的研究. *光学学报*), 2022, **42**(1): 0114003.

[4] LANG Xing-Kai, JIA Peng, QIN Li, et al. 980 nm high-power tapered semiconductor laser with high order gratings [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (郎兴凯,贾鹏,秦莉,等. 980 nm大功率高阶光栅锥形半导体激光器. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(6):721-724.

[5] Sumpf B, Wenzel H, Erbert G. High-power high-brightness semiconductor tapered diode lasers for the red and near infrared spectral range [C]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7616**:76161L.

[6] Müller A, Fricke J, Bugg F, et al. DBR tapered diode laser with 12.7 W output power and nearly diffraction-limited, narrowband emission at 1 030 nm [J]. *Applied Physics B*, 2016, **4**(122):87.

[7] Zink C, Maiwald M, Wenzel H, et al. Monolithic Master Oscillator with Tapered Power Amplifier Diode Laser at 1060 nm with Additional Control Section for High Power Operation [C]. *IEEE*, 2019.

[8] Sumpf B, Paschke K, Kudryashov A V, et al. Spectrally stabilized high-power high-brightness DBR-tapered lasers in the VIS and NIR range [C]. *Proc. of SPIE*, 2018, **10518**:1051817.

[9] Albrodt P, Jamal M T, Hansen A K, et al. Recent progress in brightness scaling by coherent beam combining of tapered amplifiers for efficient high power frequency doubling [C]. *Proc. of SPIE*, 2019, **10900**:1090000.

[10] Paschke K, Blume G, Pohl J, et al. Reliable high-spectral-radiance 635 nm tapered diode lasers with monolithically integrated distributed Bragg reflector [C]. *Proc. of SPIE*, 2020, **11262**:112620L.

[11] Wang Xiaozhuo, Erbert G, Wenzel H, et al. 17 W Near-Diffraction-Limited 970 nm Output From a Tapered Semiconductor Optical Amplifier [J]. *IEEE photonics technology letters*, 2013, **2**(25):115-118.

[12] Christof Z, Maabdorf A, Fricke J, et al. Monolithic Master Oscillator Tilted Tapered Power Amplifier Emitting 9.5 W at 1060 nm [J]. *IEEE photonics technology letters*, 2020, **32**(1):59-62.

[13] Zhou Kun, Du Weichuan, Li Yi, et al. Suppression of higher-order modes in a large-optical-cavity waveguide structure for high-power high-efficiency 976 nm diode laser [J]. *Superlattices and Microstructures* 2019, **129**(40): 40-46.