

文章编号: 1000-7032(2025)07-1310-07

高亮度 1 060 nm HiBBEE 锥形半导体激光器

刘 祥^{1,2}, 吴承坤^{1,2}, 薛晓娥^{1*}, MIAH Md Jarez³, 汪丽杰⁴, 宿家鑫⁵,
高 翔^{1,2}, SANA Fatima^{1,2}, 田思聪^{1*}, BIMBERG Dieter^{1,6*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 Bimberg 中德绿色光子学研究中心 &

特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 孟加拉国工程技术大学 信息与通信技术学院, 孟加拉国 达卡 1205;

4. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130031;

5. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 大珩光电技术战略研究中心, 吉林 长春 130033;

6. 柏林工业大学固体物理研究所 纳米光学中心, 德国 柏林 D-10623)

摘要: 为实现 1 060 nm 半导体激光器的高亮度、低发散角输出, 采用高亮度垂直宽区边发射(HiBBEE)外延芯片, 设计并成功制备了 HiBBEE 锥形半导体激光器。该激光器采用 7 μm 窄脊波导实现单模输出, 以及后腔面 100 μm 锥形波导部分进行功率放大。工作电流 1.5 A 条件下激光器亮度达 $25 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。通过 HiBBEE 结构, 垂直方向发散角减小至 8.0° 。该激光器在面向人眼安全的激光雷达等领域具有重要应用。

关键词: 锥形半导体激光器; 垂直宽区边发射激光器; 高亮度; 光束质量

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250056

CSTR: 32170. 14. CJL. 20250056

1 060 nm High-brightness HiBBEE Tapered Semiconductor Laser

LIU Xiang^{1,2}, WU Chengkun^{1,2}, XUE Xiaoe^{1*}, MIAH Md Jarez³, WANG Lijie⁴, SU Jiabin⁵,
GAO Xiang^{1,2}, SANA Fatima^{1,2}, TIAN Sicong^{1*}, BIMBERG Dieter^{1,6*}

(1. Bimberg Chinese-German Center for Green Photonics & State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Information and Communication Technology, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka 1205, Bangladesh;

4. Jlight Semiconductor Technology Co. Ltd, Changchun 130031, China;

5. Daheng Optoelectronic Technology Strategy Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

6. Center of Nanophotonics, Institute of Solid State Physics, Technische Universität Berlin, Berlin D-10623, Germany)

* Corresponding Authors, E-mail: xxe@ciomp. ac. cn; tiansicong@ciomp. ac. cn; bimberg@physik. tu-berlin. de

Abstract: To achieve high-brightness and low divergence angle output for a 1 060 nm semiconductor laser, a high-brightness vertical broad-area edge-emitting (HiBBEE) epitaxial wafer was utilized, and a HiBBEE tapered semiconductor laser was designed and successfully fabricated. A 7 μm narrow ridge waveguide is designed to achieve single-mode output and a 100 μm tapered waveguide section at the rear facet for power amplification. At a driving current of 1.5 A, the laser achieves a brightness of up to $25 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. The device exhibits a vertical

收稿日期: 2025-03-03; 修订日期: 2025-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(62061136010, 61774156, 62174159); 中国科学院青年创新促进会(Y2022067); 中德科学中心合作交流项目(M0386); 吉林省科技发展计划项目(2023SYHZ0024, SKL202302028)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62061136010, 61774156, 62174159); CAS Youth Innovation Promotion Association (Y2022067); Sino-German Center for Research Promotion (Joint Mobility Program of DFG and NSFC, M0386); Jilin Provincial Scientific and Technological Development Program (2023SYHZ0024, SKL202302028)

divergence angle of 8.0° due to the HiBBEE structure. This laser has significant applications in the eye-safety Li-dar application.

Key words: tapered semiconductor laser; HiBBEE; high-brightness; beam quality

1 引言

高亮度1 060 nm波长半导体激光器作为重要光源在多领域具有广泛应用价值。在工业领域,1 060 nm波长可应用于光纤激光器转换泵浦源、激光显示二次谐波泵浦源、材料加工等^[1-3]。值得注意的是,依据人眼安全波长标准,1 060 nm激光器在激光雷达探测系统中具有独特的应用优势^[4]。此外,该激光器在医疗领域亦展现出应用价值,其典型应用场景涵盖皮肤科(脱毛、除皱)、整形外科(脂肪抽吸)以及各类微创手术治疗等临床方向^[5-6]。

高亮度激光器的实现需要兼顾高输出功率和良好的光束质量因子^[7-9]。目前,宽区半导体激光器是实现大功率输出的主要途径,其输出功率通常可以达到几十瓦甚至上百瓦^[10-12]。然而,这类激光器容易产生多侧模激射,因而光束质量较差,导致器件亮度受限^[13]。为实现光束质量的改善,需要解决侧向模式多模激射的问题。降低半导体激光器的脊宽是减少多侧模激射的常用办法,但窄的脊宽限制了增益面积导致输出功率低^[14-15],同样无法实现亮度的提升。锥形激光器的提出成功解决了上述问题,其锥形谐振腔结合了窄脊型波导部分与宽区锥形光放大波导部分。窄脊型波导可以有效过滤高阶模式,实现单模输出,同时锥形部分实现功率放大,减小功率密度,降低热效应,保证高功率输出的同时具有良好的光束质量^[16-20]。虽然锥形激光器容易实现亮度的明显提升,但垂直远场发散角大的问题并未得到解决。

为降低边发射半导体激光器的垂直发散角,需要将光场在垂直方向上进行扩展。采用模式扩展层^[21]、超大光学腔(SLOC)结构能够减小器件的垂直发散角^[22],但这些方法受限于由工作电流或温度引起的折射率变化。2009年,德国FBH的Kettler等^[23]发表了光子带隙晶体(PBC)激光器,通过布拉格反射波导结构在垂直方向上扩展光场,从而减小垂直发散角。然而,在进一步提高输出功率的同时优化垂直发散角以实现圆光束发射的方面存在局限性^[24-25]。2014年,Kalosha等提出了

高亮度垂直宽面边发射(HiBBEE)激光器^[26]并极大地改善了垂直远场,实现垂直发散角小于 10° 的近圆形光束轮廓^[27-29]。

本文采用HiBBEE结构,设计并制备了1 060 nm锥形激光器,并对其进行性能测试与分析,在获得较小垂直发散角(8.0°)的同时兼具良好的光束质量,在许多现代化应用中具有广阔前景。

2 器件结构设计制备

2.1 HiBBEE外延结构设计

通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术,在(100)径向n-掺杂GaAs衬底上构建HiBBEE结构。该结构由11 μm 厚的n掺杂AlGaAs层序列组成,其中包括9对Al含量交替的非周期n-掺杂AlGaAs层。1 μm 厚的p-掺杂AlGaAs包层上覆盖了300 nm高p-掺杂GaAs接触层。有源区在p-和n-掺杂层之间,为了确保高限制因子从而实现低阈值电流,在有源区采用了四个由GaAsP势垒层分隔的压缩应变InGaAs量子阱(QWs),InGaAs量子阱和GaAsP势垒层厚度分别为6 nm和9 nm,中心发射波长为1 060 nm^[30-31]。

图1(a)展示了HiBBEE结构的折射率分布和前三个模式的近场分布,仿真采用的折射率模型数据源自于Adachi^[32]。由于对外延结构靠近衬底的HiBBEE波导层中最后三层改变了层厚,光子晶体结构中基模模式(Mode 0)与高阶模式(Mode 1和Mode 2)的峰值位置出现了些许偏移,这使得基模峰值中心位置更靠近有源区中心,而高阶模式则向衬底偏移并产生较高的模式泄漏。因此,基模的限制因子会大于高阶模式的限制因子,而损耗却远远小于高阶模式。图1(b)显示了HiBBEE外延结构的泄漏损耗和基模及高阶模式的光限制因子。与高阶模相比,基模具有更小的损耗和更大的限制因子,可以实现垂直方向上的基模发射。通过设计HiBBEE结构各层厚度与折射率差异,使得近场基模在垂直方向上扩展至整个波导区域。根据发散角与模式宽度关系:远场发散角 θ_{vertical} 与近场模式宽度 ω 成反比,近场模式宽度 ω 增加,发散角 θ_{vertical} 随之减小,计算得到基模的

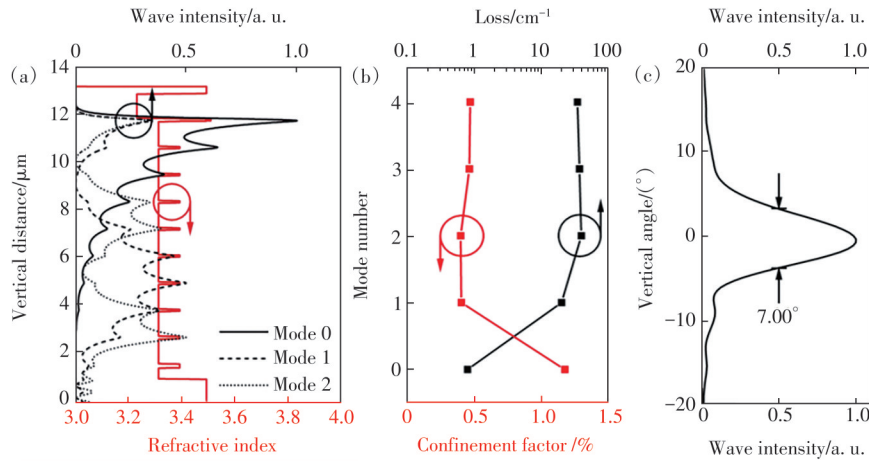


图1 (a)HiBBEE结构的折射率、近场模式分布;(b)HiBBEE结构的垂直方向近场模式的泄漏损耗(上)与光限制因子(下);(c)HiBBEE外延结构的垂直远场发散角

Fig.1 (a)Refractive index, near-field mode distribution of HiBBEE structure. (b)Leakage loss of vertical near-field mode (up) and confinement factor (bottom) in HiBBEE structure. (c)Vertical far-field divergence of HiBBEE epitaxial structure

垂直远场发散角的峰值半高宽(FWHM)仅为 7.0° ,如图1(c)所示。

2.2 器件设计与制备

HiBBEE锥形半导体激光器结构如图2所示,图2(a)所示为锥形激光器三维图以及外延层结构。图2(b)为锥形半导体激光器表面示意图,锥形激光器总腔长2 mm,由两部分构成:用于模式过滤的 $7\mu\text{m}$ 窄条宽的脊形部分长1.1 mm,来实现单模输出;锥形部分腔面为 $100\mu\text{m}$,长度0.9 mm,用于放大功率的同时减小功率密度,从而降低腔面的灾变光学损伤。本文器件工艺的刻蚀深度为 $1.2\mu\text{m}$,这一刻蚀深度下允许 1060 nm HiBBEE激光器单模输出的最大脊宽为 $8\mu\text{m}$,为确保单模输出,设计窄脊部分脊宽为 $7\mu\text{m}$ 。锥形角度是锥形激光器设计中的重要参数,锥形角要与自由衍射光束的发散角匹配^[33],基模衍射角 θ 的计算公式如下:

$$\theta = \frac{\lambda}{nW} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{b}{1-b}} \right), \quad (1)$$

$$b = \frac{n_{\text{eff-n}}^2 - n^2}{n_{\text{eff}}^2 - n^2}, \quad (2)$$

其中, n 为体折射率,脊形波导宽度为 W 时有效折射率为 n_{eff} ,波导宽度 W 趋近无穷时的有效折射率为 $n_{\text{eff-n}}$ 。 $7\mu\text{m}$ 脊宽 1060 nm 波长器件的基模衍射角计算约为 $6^\circ \sim 7^\circ$,为防止高阶模耦合入基模中,锥形角度要小于基模衍射角。本设计锥型角度为 5.92° ,综合参数设计确定锥形结构。

采用干法刻蚀工艺制备锥形激光器的台面,

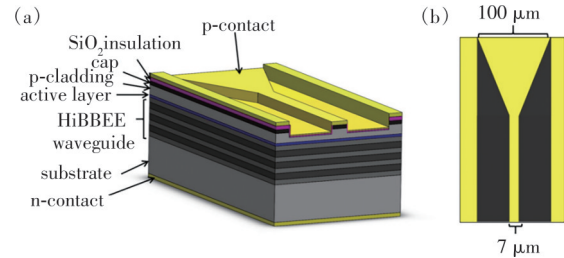


图2 HiBBEE锥形激光器:(a)三维示意图,(b)表面结构示意图

Fig.2 (a)3-D schematic diagram of the HiBBEE tapered laser. (b)Surface image of the HiBBEE tapered laser

刻蚀深度为 $1.2\mu\text{m}$,有效折射率差为 0.00053 ^[31],沉积 300 nm SiO_2 绝缘层后利用干法刻蚀在台面上刻蚀出电极窗口,分别蒸镀p-与n-电极。之后对腔面进行镀膜处理,后腔面镀95%反射率的高反射(HR)膜,前腔面镀1%反射率的增透(AR)膜,将处理好的芯片解理成2 mm腔长的激光器单管,p面朝下封装在c-mount热沉上,以便更好地散热。

3 测试与分析

在连续波(CW)条件下对封装后的器件进行功率-电流-电压($L-I-V$)特性分析,冷却温度设置为 20°C ,结果如图3所示。根据电流-电压曲线可得,在工作电流大于阈值电流时,微分电阻约为 0.45Ω ,器件具有良好的欧姆接触。从功率特性曲线可知HiBBEE锥形激光器的阈值电流为 0.28 A ,在工作电流为 1.5 A 时功率仍未达到饱和,且未出现扭结,输出功率为 0.93 W ,斜率效率

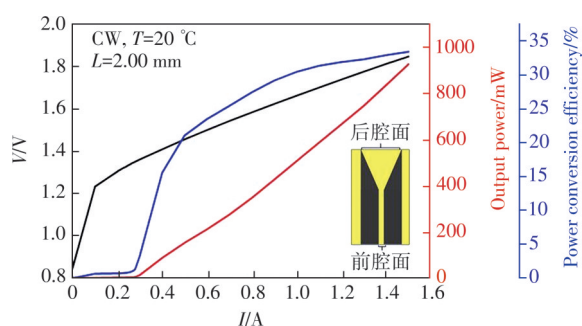


图3 20 °C HiBBEE锥形激光器的功率-电流-电压特性曲线

Fig.3 L - I - V characteristic of HiBBEE tapered laser at 20 °C

约为0.756 W/A,转换效率33.5%(1.5 A)。

图4展示了HiBBEE锥形激光器在不同驱动电流下的远场分布。图4(a)为锥形激光器在侧向上的远场分布,从阈值电流到0.8 A范围内表现为单模输出,侧向远场呈近高斯分布,远场发散角在半高全宽(FWHM)标准下约为 5.2° ,证明 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的窄条宽具有很好的模式过滤作用。且在个工作电流中垂直方向均为单模发射,垂直发散角仅 8.0° 左右,这归因于HiBBEE结构的垂直方向光场拓展,与HiBBEE外延设计保持一致,如图4(b)所示。

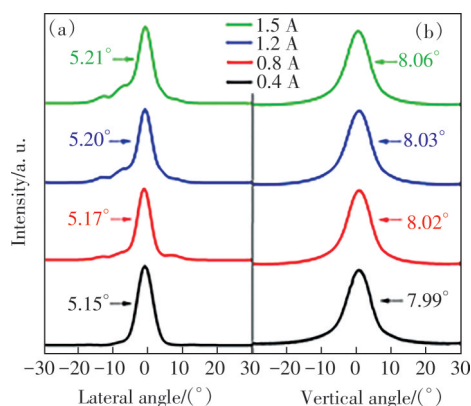


图4 HiBBEE锥形激光器在20 °C、不同驱动电流下的远场分布图。(a)侧向远场分布图;(b)垂直方向远场分布图。图中角度为FWHM角度

Fig.4 Far-field profiles of the HiBBEE tapered laser at 20 °C various drive currents. (a) Lateral far-field profiles. (b) Vertical far-field distributions. FWHM beam divergence angles are noted

光束质量因子 M^2 是激光器性能表征的重要参数之一,本文使用商用光束质量分析仪(M2MS-BP209VIS)测量光束质量因子 M^2 。图5是不同电流下侧向和垂直方向光束质量因子,图5中红色线条所示为HiBBEE锥形激光器在垂直方向上的

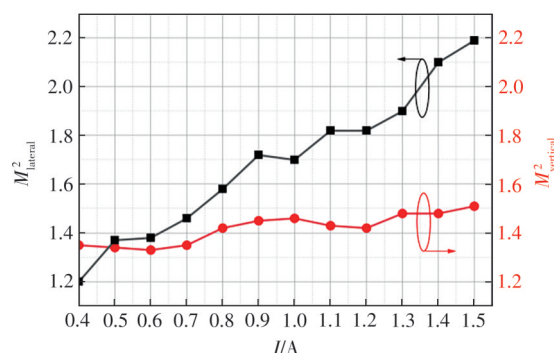


图5 HiBBEE锥形激光器在20 °C不同驱动电流下的光束质量

Fig.5 Lateral(black line) and vertical(red line) beam quality factors of the HiBBEE tapered laser as a function of drive current at 20 °C

M^2_{vertical} 值,在整个工作电流中均小于等于1.5。图中黑色线条为侧向 M^2_{lateral} 值,电流从0.4 A增加到1.3 A时 M^2_{lateral} 数值均小于2,具有良好侧向光束质量;且在0.8 A下 M^2_{lateral} 数值小于1.6,看作为近衍射极限,只有基模发射^[28,34],且与侧向远场分布图对应。随着电流继续增加,侧向 M^2_{lateral} 也逐渐增大,窄脊部分的热透镜效应增强导致高阶模式激励,从而产生光束质量劣化,侧向光束质量因子在1.4 A出现跳变^[30-31]。

激光器亮度可由下式表示:

$$B = \frac{P}{M^2_{\text{lateral}} M^2_{\text{vertical}} \lambda^2}, \quad (3)$$

其中, B 为器件亮度, P 为输出功率, λ 为波长。若要实现高亮度,需兼顾高输出功率与低光束质量因子。图6所示为器件的亮度,可以看出HiBBEE锥形激光器的亮度随电流的增大而增加。在1.3 A之后,器件的亮度不再明显增加,这主要是由于侧向光束质量因子的增加所致。当驱动电流为1.5 A

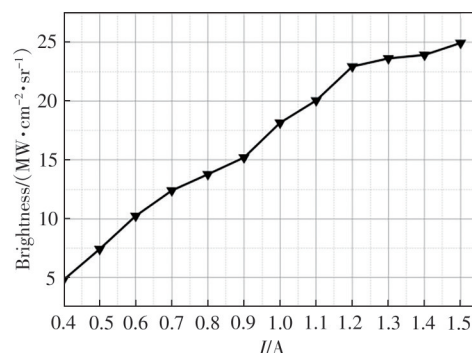


图6 HiBBEE锥形激光器在20 °C不同驱动电流下的亮度

Fig.6 Brightness of the HiBBEE tapered laser as a function of drive current at 20 °C

时,器件亮度约为 $25 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,这一性能在窄脊短腔长 $1\,060 \text{ nm}$ 激光器领域处于较好水平^[28,30-31,35]。

4 结 论

本文基于 HiBBEE 外延制备了锥形半导体激光器,提高了 $1\,060 \text{ nm}$ 边发射器件的亮度,并减小了垂直方向发散角。首先,HiBBEE 结构能够使光场在垂直方向上扩展,从而减小垂直发散角的同时保证良好的垂直光束质量。其次,锥形谐振腔的设计在保证高输出功率的情况下兼具良好的侧向光束质量。在驱动电流为 1.5 A 时,器件的亮度高达

$25 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,且器件的功率仍未出现扭结与翻转,有望在更高工作电流下实现更高亮度。后期将通过两方面来进一步提升器件亮度:一,优化锥形波导宽度与长度,可以进一步提高单模输出功率的同时保持良好的光束质量因子;二,在纳秒脉冲电流下获得更大峰值功率。HiBBEE 锥形半导体激光器的设计与成功制备为实现高亮度边发射半导体激光器提供了一种简单且高效的途径。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250056>

参 考 文 献:

- [1] PIETRZAK A, WENZEL H, CRUMP P, *et al.* $1\,060 \text{ nm}$ ridge waveguide lasers based on extremely wide waveguides for 1.3 W continuous-wave emission into a single mode with FWHM divergence angle of $9^\circ \times 6^\circ$ [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, 48(5): 568-575.
- [2] HU M H, NGUYEN H K, SONG K C, *et al.* High-power distributed Bragg reflector lasers for green-light generation [C]. *Proceedings of SPIE 6116, Optical Components and Materials III*, San Jose, California, United States, 2006: 61160M.
- [3] NGUYEN H K, HU M H, LI Y B, *et al.* 304 mW green light emission by frequency doubling of a high-power $1\,060 \text{ nm}$ DBR semiconductor laser diode [C]. *Proceedings of SPIE 6890, Optical Components and Materials V*, San Jose, California, United States, 2006: 68900I.
- [4] LI Y, IBANEZ-GUZMAN J. Lidar for autonomous driving: the principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems [J]. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2020, 37(4): 50-61.
- [5] PIETRZAK A, ZORN M, HUELSEWEDE R, *et al.* Development of highly efficient laser diodes emitting around $1\,060 \text{ nm}$ for medical and industrial applications [C]. *Proceedings of SPIE 10900, High-Power Diode Laser Technology XVII*, San Francisco, California, United States, 2019: 109000K.
- [6] PIETRZAK A, HUELSEWEDE R, ZORN M, *et al.* Development of highly-efficient laser diodes emitting at around $1\,060 \text{ nm}$ [C]. *Proceedings of SPIE 10086, High-Power Diode Laser Technology XV*, San Francisco, California, United States, 2017: 100860J.
- [7] BONI A, ARSLAN S, ERBERT G, *et al.* Epitaxial design progress for high power, efficiency, and brightness in 970 nm broad area lasers [C]. *Proceedings of SPIE 11668, High-Power Diode Laser Technology XIX*, California, United States, 2021: 1166807.
- [8] SUMPF B, HASLER K H, ADAMIEC P, *et al.* High-brightness quantum well tapered lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, 15(3): 1009-1020.
- [9] 汪丽杰, 佟存柱, 曾玉刚, 等. 高亮度布拉格反射波导激光器 [J]. *发光学报*, 2013, 34(6): 787-791.
WANG L J, TONG C Z, ZENG Y G, *et al.* High brightness Bragg reflection waveguide laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(6): 787-791. (in Chinese)
- [10] 王涛. 高功率宽区半导体激光器侧向光束质量控制研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
WANG T. *Research on the Lateral Beam Quality of High-Power Broad-Area Diode Lasers* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [11] RONG J M, XING E B, WANG L J, *et al.* Control of lateral divergence in high-power, broad-area photonic crystal lasers [J]. *Appl. Phys. Express*, 2016, 9(7): 072104.
- [12] WINTERFELDT M, CRUMP P, KNIGGE S, *et al.* High beam quality in broad area lasers *via* suppression of lateral carrier accumulation [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, 27(17): 1809-1812.

- [13] 汪丽杰, 佟存柱, 王廷靖, 等. 半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展 [J]. 中国光学(中英文), 2022, 15(5): 895-911.
- WANG L J, TONG C Z, WANG Y J, *et al.* Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2022, 15(5): 895-911. (in Chinese)
- [14] ZHAO S Y, WANG Y F, QU H W, *et al.* 2 W high-efficiency ridge-waveguide lasers with single transverse mode and low vertical divergence [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2017, 29(23): 2005-2007.
- [15] WENZEL H, DALLMER M, ERBERT G. Thermal lensing in high-power ridge-waveguide lasers [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2008, 40(3): 379-384.
- [16] DITTMAR F, KLEHR A, SUMPFF B, *et al.* 9 W output power from an 808 nm tapered diode laser in pulse mode operation with nearly diffraction-limited beam quality [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, 13(5): 1194-1199.
- [17] WENZEL H, PASCHKE K, BROX O, *et al.* 10 W continuous-wave monolithically integrated master-oscillator power-amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(3): 160-162.
- [18] AHO A T, VIHARIÄLÄ J, KOSKINEN M, *et al.* High-power 1.5 μm tapered distributed Bragg reflector laser diodes for eye-safe LIDAR [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2020, 32(19): 1249-1252.
- [19] MA X L, LIU A J, QU H W, *et al.* Nearly diffraction-limited and low-divergence tapered lasers with photonic crystal structure [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2016, 28(21): 2403-2406.
- [20] SUMPFF B, KLEHR A, VU T N, *et al.* 975 nm high-peak power ns-diode laser based MOPA system suitable for water vapor DIAL applications [C]. *Proceedings of SPIE 9382, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIV, San Francisco, California, United States*, 2015: 93821K.
- [21] WENZEL H, BUGGE F, ERBERT G, *et al.* High-power diode lasers with small vertical beam divergence emitting at 808 nm [J]. *Electron. Lett.*, 2001, 37(16): 1024-1026.
- [22] WENZEL H, BUGGE F, DALLMER M, *et al.* Fundamental-lateral mode stabilized high-power ridge-waveguide lasers with a low beam divergence [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, 20(3): 214-216.
- [23] KETTLER T, POSILOVIC K, KARACHINSKY L Y, *et al.* High-brightness and ultranarrow-beam 850-nm GaAs/AlGaAs photonic band crystal lasers and single-mode arrays [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, 15(3): 901-908.
- [24] MIAH M J, KETTLER T, KALOSHA V P, *et al.* High temperature operation of 1 060 nm high-brightness photonic band crystal lasers with very low astigmatism [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(6): 722-727.
- [25] LIU L, QU H W, LIU Y, *et al.* High-power narrow-vertical-divergence photonic band crystal laser diodes with optimized epitaxial structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(23): 231110.
- [26] KALOSHA V P, BIMBERG D. An improved design method for lasers: US, 9705285B2 [P]. 2014-01-31.
- [27] MIAH M J, KALOSHA V P, BIMBERG D, *et al.* Astigmatism-free high-brightness 1 060 nm edge-emitting lasers with narrow circular beam profile [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(26): 30514-30522.
- [28] MIAH M J, STROHMAIER S, URBAN G, *et al.* Beam quality improvement of high-power semiconductor lasers using laterally inhomogeneous waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113(22): 221107.
- [29] MIAH M J, KALOSHA V P, ROSALES R, *et al.* Novel types of photonic band crystal high power and high brightness semiconductor lasers [J]. *Front. Optoelectron.*, 2016, 9(2): 225-237.
- [30] WU C K, XUE X E, TIAN S C, *et al.* Improvement of beam quality of high-power edge-emitting lasers using inhomogeneous waveguides [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(14): 24802-24810.
- [31] WU C K, XUE X E, TIAN S C, *et al.* Brightness improvement of edge-emitting lasers by combining vertical broad-area HiBBEE and laterally inhomogeneous waveguides [J]. *APL Photonics*, 2024, 9(12): 126113.
- [32] GaAsADACHI S., AlAs, and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: material parameters for use in research and device applications [J]. *J. Appl. Phys.*, 1985, 58(3): R1-R29.
- [33] 杨晔. 高亮度大功率半导体激光器研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- YANG Y. *The Disquisitions of High-brightness High-power Laser Diode* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [34] 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 [J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(6): 721-724.
- LANG X K, JIA P, QIN L, *et al.* 980 nm high-power tapered semiconductor laser with high order gratings [J]. *J. Infrared*

Millimeter Waves, 2021, 40(6): 721-724. (in Chinese)

- [35] ZEGHUZI A, CHRISTOPHER H, KLEHR A, *et al.* High-brightness nanosecond-pulse operation from tapered-ridge-waveguide lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021, 33(3): 151-154.



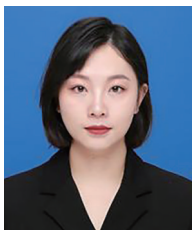
刘祥(1998-),男,安徽合肥人,硕士研究生,2022年于安徽大学江淮学院获得学士学位,主要从事高亮度半导体激光器的研究。

E-mail: liuxiang23@mails.ucas.ac.cn



田思聪(1984-),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事高亮度半导体激光器和高速垂直腔面发射激光器的研究。

E-mail: tiansicong@ciomp.ac.cn



薛晓娥(1994-),女,内蒙古乌兰察布人,硕士,工程师,2019年于鲁东大学获得硕士学位,主要从事高亮度半导体激光器的研究。

E-mail: xxe@ciomp.ac.cn



BIMBERG Dieter(1942-),男,德国籍,博士,教授,博士生导师,德国科学院院士,美国工程院院士,美国发明家学会院士,俄罗斯科学院院士,1971年于德国法兰克福歌德大学获得博士学位,主要从事量子点激光器、高速垂直腔面发射激光器、高亮度半导体激光器的研究。

E-mail: bimberg@physik.tu-berlin.de