

文章编号: 1001-3806(2024)06-0799-10

## GaAs 基近红外锥形半导体激光器的研究进展

吕梦瑶<sup>1,2,3</sup>, 王浩淼<sup>1,2\*</sup>, 贺钰雯<sup>1,2</sup>, 周智雨<sup>1,2</sup>, 宋梁<sup>1,2,3</sup>, 杜维川<sup>1,2</sup>, 武德勇<sup>1,2</sup>, 唐淳<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 高能激光重点实验室, 绵阳 621900, 中国; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900, 中国; 3. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088, 中国)

**摘要:** 基于 GaAs 衬底的近红外波段半导体激光器已经取得了显著的发展。在大功率研究方面, 因为可以同时实现高功率、高光束质量的优良特性, 主振荡功率放大器结构的锥形半导体激光器成为了广受关注的研究热点。归纳了近年来国内外关于 GaAs 基锥形激光器的代表性研究成果, 讨论了激光器器件结构设计(包括脊形区、锥形区以及布喇格光栅等的设计)和外延层优化在理论研究及实验方面取得的进展; 围绕高功率、高光束质量、高亮度、窄线宽应用需求, 总结整理了锥形激光器的研究进展与性能特征; 对本团队关于锥形激光器的研究工作进行了简要介绍; 并展望了锥形激光器未来的发展方向。

**关键词:** 激光器; 锥形半导体激光器; 器件结构设计; 外延优化

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.004

## Research progress on GaAs-based near-infrared tapered semiconductor lasers

LYU Mengyao<sup>1,2,3</sup>, WANG Haomiao<sup>1,2\*</sup>, HE Yuwen<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhiyu<sup>1,2</sup>, SONG Liang<sup>1,2,3</sup>,  
DU Weichuan<sup>1,2</sup>, WU Deyong<sup>1,2</sup>, TANG Chun<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 3. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Semiconductor lasers in the near-infrared wavelength range based on GaAs substrates have made significant advancements. In the realm of high-power research, the tapered semiconductor lasers with a master-oscillator power-amplifier structure have garnered widespread attention due to its excellent characteristics, allowing for the simultaneous achievement of high power and high beam quality. The representative research results on GaAs-based tapered lasers at home and abroad in recent years were summarized, and the progresses in theoretical studies and experiments on the design of laser device structures (including the design of ridge and tapered regions as well as Bragg gratings) and the optimization of epitaxial layers were discussed. Focusing on the demands for high power, high beam quality, high brightness, and narrow linewidth applications, the research progress and performance characteristics of tapered lasers were summarized. The research work of the tapered lasers was briefly introduced. Furthermore, an outlook on the future development directions of tapered semiconductor lasers has been provided.

**Key words:** lasers; tapered diode laser; structure design; optimization of epitaxial layer

## 0 引言

半导体激光器具有易集成、效率高、光谱范围宽、稳定性好等优点, 近红外波段(760 nm ~ 1060 nm)的 GaAs 基激光器被广泛应用于金属、塑料和复合材料的激光加工、激光点火、光纤激光器和光纤放大器抽运源、激光医疗等领域<sup>[1-4]</sup>。半导体激光器输出需要具有更高的功率和光束质量, 以满足其应用范围的不断扩展与应用水平的提高。目前最具发展前景的设计是

锥形半导体激光器, 主振荡功率放大(master-oscillation power amplifier, MOPA)技术利用一个窄脊型波导提供单模种子光, 锥形增益区实现功率放大, 可以实现近衍射极限的高功率输出<sup>[5-8]</sup>。相较于锁相激光器<sup>[9]</sup>、平板耦合激光器<sup>[10]</sup>和外腔激光器<sup>[11]</sup>等其它高亮度半导体激光器设计, 锥形激光器具有结构简单、工艺流程难度较小、成本较低等优势<sup>[12-15]</sup>, 成为当前高功率、高光束质量器件的研究热点。

当前, 近红外 GaAs 基半导体激光器已经取得了相对成熟的发展, 被广泛应用并投入商业市场。受半导体激光器工业直接加工和固体激光器与光纤激光器抽运源的需求推动, 随 GaAs 基材料外延生长、波导结

\* 通信作者: hao\_miao\_wang@163.com

收稿日期: 2024-02-22; 修回日期: 2024-04-26

构优化、芯片设计、封装技术的不断发展, GaAs 基锥形半导体激光器呈现出高功率、高光束质量、高光电效率、窄线宽和高可靠性的发展趋势<sup>[16]</sup>。代表性研究机构有德国费迪南德布劳恩研究所 (Ferdinand-Braun-Institute, FBH)、中国科学院半导体所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国工程物理研究院应用电子学研究所等。

传统的宽条形半导体激光器随输出功率增加易产生高阶模, 出现模式不稳定和光丝现象等, 器件光束质量较低<sup>[17]</sup>。相较于传统激光器, 单片集成式 MOPA 结构的锥形半导体激光器的光束质量得到很大提升, 但在大电流注入下, 锥形区的光束丝化和热效应引起的自聚焦以及高阶模激射等现象仍会导致激光器输出光束质量恶化, 激光器的优化设计被不断提出以解决上述问题。各国研究者们已经就锥形激光器设计的理论分析、材料生长、器件结构等进行了大量探究实验, 本文中将对 GaAs 基锥形激光器在结构设计和外延优化等方面的研究进展进行重点介绍, 梳理总结其在高功率、高光束质量、高亮度、窄线宽应用领域的性能特征, 并预测锥形半导体激光器研究的发展趋向。

## 1 GaAs 基锥形半导体激光器研究进展

锥形半导体激光器主要包括脊形区和锥形区, 如图 1 所示。单片集成式 MOPA 结构的锥形半导体激光器将脊形区和锥形区集成在同一衬底上, 脊形区两侧进行深刻蚀增大高阶模损耗, 产生单侧模种子光, 锥形 (tapered, TA) 区增益波导实现功率放大, 脊波导 (ridge waveguide, RW) 的刻蚀深度与宽度需满足基模条件, 锥形增益区的锥角设计也应与基模衍射角相匹配。逐渐加宽的锥形结构有利于实现更低的腔内光功率密度, 有效抑制空间烧孔和自聚焦效应, 宽的出光面可以提高光学腔面灾变性损伤阈值, 有利于实现高功率、高光束质量的激光输出。

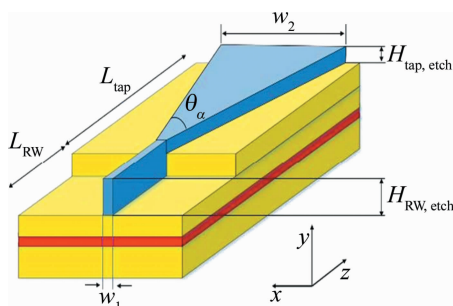


图 1 锥形激光器结构示意图<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of the tapered laser<sup>[17]</sup>

器件结构设计直接影响激光输出特性, 目前锥形激光器的发展受到大功率下光束质量恶化的制

约, 外延结构决定了激光器的内量子效率、内损耗及增益等。

### 1.1 锥形激光器器件结构设计

锥形半导体激光器最明显的特点是光放大区采用了锥形设计, 大锥角结构可以提高增益体积, 获得高功率输出, 但锥角过大容易引起光束丝化现象。国内学者对器件几何形状产生的影响进行了大量实验探究。中国科学院半导体所的 MAN<sup>[18]</sup> 对 975 nm 普通锥形半导体激光器的锥角大小 (出光面宽度) 进行了系统性实验, 研究结果表明, 锥角大小决定了有源区的增益分布, 从而影响了锥形区中的光场分布, 设计锥形半导体激光器的锥角大小时应考虑种子光的基模衍射角。

种子光的光束质量对锥形器件性能具有显著影响, 为获得近衍射极限的激光输出, 需要提供基模光源。脊形区为折射率导引型, 输出模式由脊波导的刻蚀深度、宽度决定, 可等效为平板波导, 通过有效折射率法确定基模输出条件。

2011 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的 YANG 等人<sup>[19-20]</sup> 通过金属有机化合物化学气相沉淀技术制备了具有梯度折射率波导结构的 AlGaInAs/AlGaAs 锥形半导体激光器, 将脊波导长度分别设置为 750  $\mu\text{m}$ 、1000  $\mu\text{m}$  和 1250  $\mu\text{m}$ , 激光器顶部形貌如图 2 所示。脉冲 (50  $\mu\text{s}$ , 100 Hz) 测量条件下, 750  $\mu\text{m}$  脊形区的激光器在工作电流为 4 A 时输出功率达到 870 mW, 且没有光学灾变损伤现象出现。器件输出特性的测量结果表明, 锥形区较短的激光器, 具有更高的斜率效率。这是因为锥形区长度的减小使注入面积变小, 同时锥形区带来的光损耗也减小, 从而获得更小的阈值电流和更高的斜率效率。

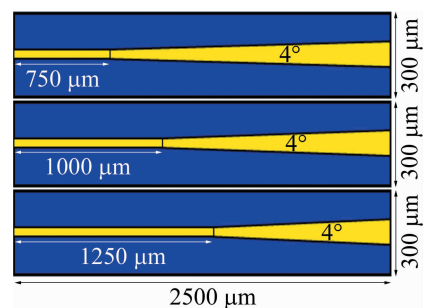


图 2 不同脊形区长度的激光器顶部形貌图<sup>[20]</sup>

Fig. 2 Schematic top view of the tapered lasers with different RW lengths<sup>[20]</sup>

2022 年, 长春理工大学的 WANG<sup>[17]</sup> 关于脊形区/锥形区长度比对器件光束质量的影响展开了更为深入的分析讨论。通过对 AlGaAs/InGaAs 量子阱激光器进行模拟, 发现不同脊形区/锥形区长度比对锥形激光器出光面的近场分布有严重影响, 如图 3 所示。脊形区长度较小时, 前腔面处光场分布中旁瓣较多; 脊形区长

度越长,对于模式的滤波作用越强,可以有效抑制后向行波中的高阶模。

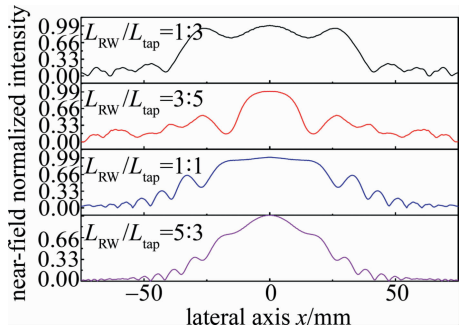


图 3 不同脊形/锥形区长度比的锥形激光器输出近场分布<sup>[17]</sup>  
Fig. 3 Near-field distribution of the tapered lasers with different  $L_{RW}/L_{tap}$  ratios<sup>[17]</sup>

也有通过在脊波导两侧刻蚀结构获得单模输出的报道。2014 年,中国科学院半导体所的 LIU 等人<sup>[21]</sup>制备了发射波长在 913 nm 的 23 阶侧向耦合表面光栅双锥形激光器,如图 4 所示。在脊形区两侧刻蚀周期为  $3.05 \mu\text{m}$ 、占空比为 0.5 的侧向光栅条纹,得到单纵模输出的同时,抑制脊形区两侧的高阶模式,提升器件输出光束质量,双锥形放大器的设计也有利于在腔内光传输过程中滤除高阶侧模,增大边模抑制比。实验测得激光器的光谱线宽  $0.16 \text{ nm}$ ,边模抑制比可达 27 dB,阈值电流为  $0.16 \text{ A}$ ,连续条件下单面输出功率达到  $565 \text{ mW}$ ,慢轴方向半峰全宽发散角始终低于  $3^\circ$ 。受刻蚀精度限制,不光滑的刻蚀波导侧壁的散射损耗导致斜率效率较低,仅有  $0.23 \text{ W/A}$ ,优化刻蚀条件可以降低光损耗,将斜率效率提升 1 倍。

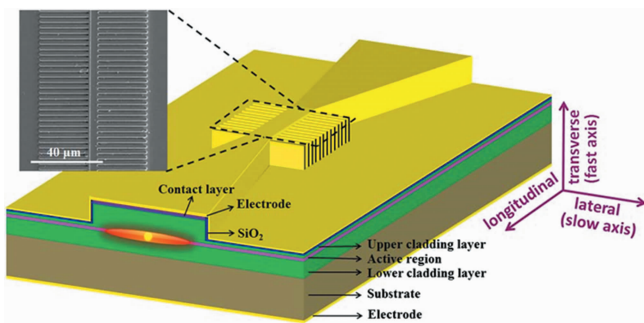


图 4 双锥形激光器结构示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 4 Schematic picture of the device<sup>[21]</sup>

2017 年,中国工程物理研究院应用电子学所的 LI 等人<sup>[22]</sup>报道了具有侧向光子晶体结构 (photonic crystal structure, PCS) 的锥形半导体激光器,利用标准光刻和干法刻蚀工艺在脊波导两侧引入光子晶体结构,有效抑制了大电流注入下高阶侧模的产生,如图 5 所示。其研制的基于 InGaAs/AlGaAs 非对称外延结构的  $4 \text{ mm}$ 腔长器件,连续条件下最大输出功率为  $6.9 \text{ W}$ ,

激光波长在  $940 \text{ nm}$ 、 $0.5 \text{ W}$  输出下具有近衍射极限光束质量  $M^2(1/e^2) = 1.9$ ,最高亮度可达  $75 \text{ MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

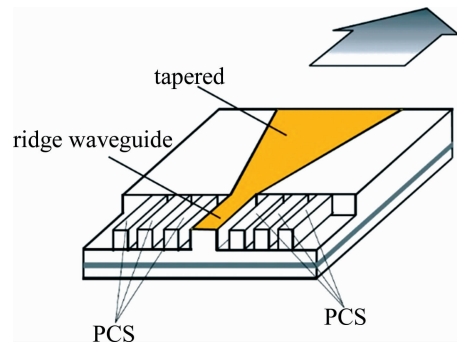


图 5 侧向光子晶体锥形激光器示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 5 Schematic of the tapered laser diode with lateral photonic crystal structure<sup>[22]</sup>

脊形区采用法布里-珀罗谐振腔的激光器难以实现单纵模<sup>[23]</sup>,具有较宽的光谱,会限制锥形激光器在光通信领域的应用。为解决传统锥形半导体激光器中光谱较宽的问题,在其基础上发展出了具有光栅结构的锥形激光器,研究者们对在脊波导区域刻蚀布喇格光栅结构<sup>[24]</sup>展开了大量分析,国外相关报道较多。在锥形半导体激光器的脊形区引入布喇格光栅,提供了波长选择性<sup>[25]</sup>,使激光器的输出光谱线宽大幅降低。基于光栅结构的锥形半导体激光器主要为分布式布喇格反射器 (distributed Bragg reflector, DBR) 激光器和分布式反馈 (distributed feedback, DFB) 激光器。

2019 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的 LEI 等人<sup>[26]</sup>制备了激光波长在  $990 \text{ nm}$  的 DFB 锥形激光器,图 6 为激光器结构示意图。DFB 锥形激光器是将布喇格光栅集成在脊波导的整个谐振腔中,通过周期性变化的波导结构实现对激光器模式的调控。在  $3 \text{ A}$  工作电流下,连续波功率超过  $0.681 \text{ W}$ 、 $1.4 \text{ A}$  时的单纵模最大功率为  $0.3 \text{ W}$ 。3 dB 光谱宽度小于  $1.41 \text{ pm}$ ,具有超过 35 dB 的高侧模抑制比,横向

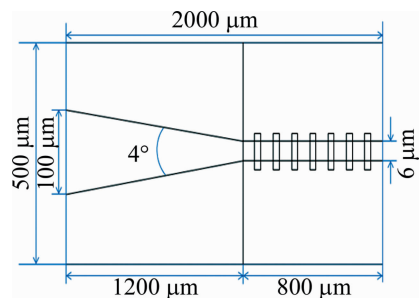


图 6 锥形波导增益耦合 DFB 激光器结构图<sup>[26]</sup>

Fig. 6 Structural diagram of the tapered waveguide gain-coupled DFB laser<sup>[26]</sup>

远场发散角仅为  $15.05^\circ$ , 光束质量因子  $M^2 = 1.245$ , 实现了近衍射极限发射。

DFB 激光器需要在外延处内置布喇格光栅, 实现难度较大, 且受复合腔效应影响, 动态特性不稳定。相比之下, DBR 激光器直接在脊波导上刻蚀光栅, 制备工艺简单、稳定性较好。KAUNGA-NYIRENDA 等人<sup>[27]</sup>对比了传统锥形激光器和 DBR 锥形激光器的输出特性, 器件几何结构如图 7 所示。讨论分析了发射波长 1060 nm 时光栅对激光器输出光束质量的提升作用。

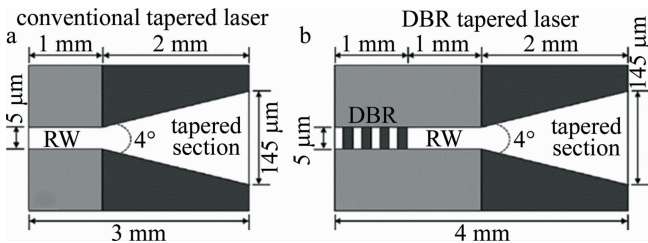


图 7 锥形激光器的几何结构<sup>[27]</sup>

Fig. 7 Geometry structure of the tapered laser<sup>[27]</sup>

仿真结果如图 8 所示, 传统锥形激光器的近、远场模式的光场分布中存在明显的旁瓣, 表明锥形区中高阶模被激励放大。DBR 锥形激光器中, DBR 光栅良好的模式滤波作用提高了脊波导滤波性能, 抑制了后腔面处高阶侧模的反射, 丝状发光现象得到缓解。

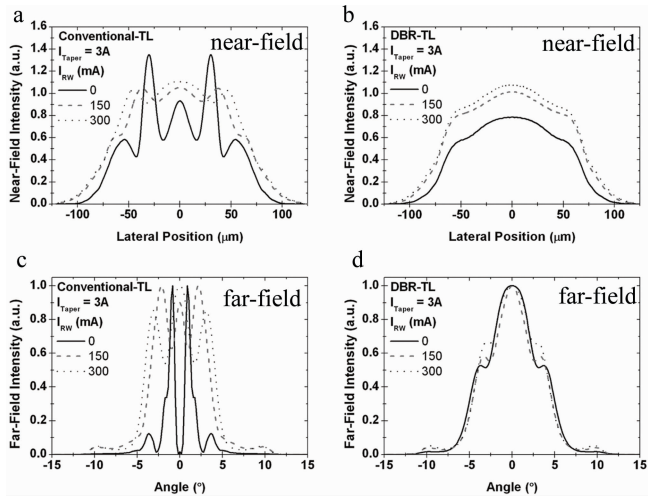


图 8 锥形区电流为 3 A 时, 不同脊区电流下的光场分布<sup>[27]</sup>

Fig. 8 Optical distributions for different currents of RW at a TA current of 3 A<sup>[27]</sup>

DBR 光栅的反射率与凹槽的宽度、刻蚀深度、间距以及剩余波导厚度相关。低阶光栅或高占空比的高阶光栅可以实现较高的反射率。位于后腔面的 DBR 光栅可以形成具有局部反射率的激光器谐振腔, 仅对脊波导基模提供强反馈, 压窄光谱线宽。目前常见的方法是利用一次外延技术, 在外延片表面刻蚀周期分

布的凹槽, 形成周期性高低折射率相间的表面光栅<sup>[28-29]</sup>结构。

2016 年, 德国 FBH 的 MÜLLER 等人<sup>[30]</sup>制备了基于 3 个量子阱非对称超大光腔结构的 DBR 锥形半导体激光器, 发射波长为 1030 nm, 采用 460 nm 光栅周期的 3 阶 DBR 光栅, 理论上可以实现 95% 的高衍射效率, 如图 9 所示。激光器后腔面反射率仅为 0.08%, 有效抑制了脊区两侧高阶模反射对光束质量的不良影响, 起到滤模作用。15 °C 工作条件下, 可获得 12.7 W 的输出功率, 17 pm 线宽以及超过 40% 的电光效率, 10.5 W 功率输出时主瓣功率占 8.1 W, 光束质量因子  $M^2(1/e^2) = 1.1$ , 亮度为 700 MW/(cm<sup>2</sup> · sr), 实现了 10 W 以上的近衍射极限输出。

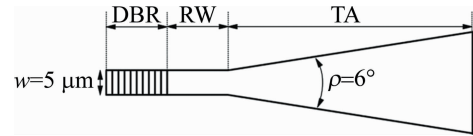


图 9 DBR 锥形激光器结构示意图<sup>[30]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of DBR tapered diode laser<sup>[30]</sup>

2017 年, MÜLLER 等人<sup>[31]</sup>对之前设计的 DBR 锥形激光器进行了外延和器件结构上的优化, 降低了器件内损耗, 获得了更高的增益和内量子效率。脊波导宽度增加至 6 micrometers, 通过电子束刻蚀技术实现了波导内的 1070 nm 光栅周期的 7 阶光栅。15 °C 工作温度下获得最大输出功率  $P_{max} = 16$  W, 激光线宽 22 pm。当激光器功率为 14.5 W 时, 慢轴方向远场发散角为  $12^\circ$ , 主斑光束质量因子  $M^2(1/e^2) = 1.2$ 。同年, 该团队还研究讨论了不同的脊波导光栅形状对激光器输出特性的影响。对 3 种结构<sup>[32]</sup>激光器的近场分布和光束质量因子进行对比, 如图 10 所示。结构 1 是在脊波导后端直接刻蚀 DBR 光栅; 结构 2 是将 DBR 光栅以

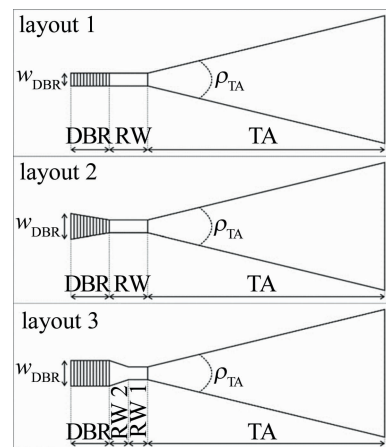


图 10 不同结构的 DBR 锥形激光器设计<sup>[32]</sup>

Fig. 10 Illustration of DBR tapered diode lasers with different gratings<sup>[32]</sup>

0.36°从 4 μm 逐渐扩展到 10 μm;结构 3 是在拓宽的脊波导后端进行 DBR 光栅刻蚀。光栅的锥形形状可以增加主瓣功率、扩大在近衍射极限发射下的电流注入范围,从而提高了锥形激光器的整体性能,研究发现第 2 种结构对高阶侧模的抑制效果最佳。

近年来,三段式锥形 MOPA 半导体激光器受到研究者们关注。传统的 MOPA 通常由主振荡器和功率放大器两部分组成,通过分离电极注入电流进行直接调制。三段式 MOPA 在主振荡区与功率放大区之间加入一段预放区,不仅能增加注入放大器的种子光功率,提升光放大效率,还可以作为模式过滤器,保持激光器的高光束质量输出。

2019 年,德国 FBH 报道<sup>[33]</sup>了一种采用弯曲波导作为光反馈隔离器的激光器设计,器件最大输出光功率可到 9.5 W,光谱线宽小于 20 pm,光束质量达到近衍射极限  $M^2(1/e^2) = 1.5$ 。器件结构如图 11 所示,具有两个表面 DBR 光栅的脊形区作为主振荡区(master-oscillation, MO),后腔面处的 7 阶锥形光栅提供 95% 的高反射率的同时还可加强侧模限制,中间光栅的反射率设置为 67%,控制区(control, CON)的脊宽与 MO 区一致,被用作功率放大区(poweramplifier, PA)的前置放大器,锥形区的锥角为 6°,锥形部分具有 4°倾斜以抑制来自前腔面和多腔工作下的不必要反馈。通过改变 CON 区的电流注入,可以控制注入锥形区种子光的功率和相位,提高调制性能,大大提升了光通信系统的传输容量和灵活性。

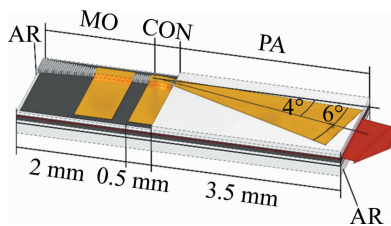


图 11 三段式单片集成 MOPA 示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 11 Schematic view of three-section monolithic MOPA<sup>[33]</sup>

### 1.2 锥形激光器外延优化

金属有机化合物化学气相沉淀和分子束外延等技术的不断发展,可在外延生长中将材料厚度控制在原子层级,使具有量子阱结构和光子晶体结构激光器的制作得以实现。

量子阱激光器相当于有源区厚度小于电子德布罗意波长的双异质 P-N 结激光器,势阱区材料带隙较窄,两侧的宽禁带材料作为势垒。其势阱宽度通常小于载流子扩散长度,这种外延结构具有很高的载流子限制能力,从而增强粒子数反转程度,提升注入效率,改善了增益特性,使阈值电流降低<sup>[34]</sup>。量子阱结构带

来了低阈值电流与高微分增益等优良特性。量子阱激光器的典型结构示意图如图 12 所示。外延结构对激光器性能具有很大影响,波导层和有源区的改进是相关研究的两个重点。

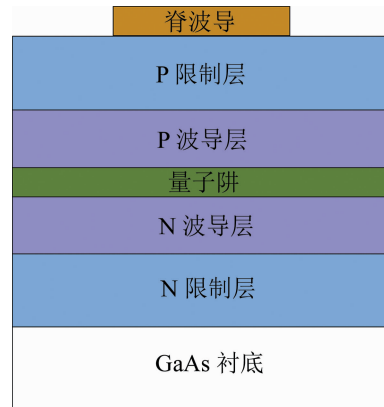


图 12 半导体激光器外延结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of epitaxial structure of semiconductor lasers

对波导结构的优化有利于降低激光器的损耗,提升输出功率。2007 年,TIJERO 等人<sup>[35]</sup>研究分析了不同波导结构的锥形激光器输出性能,研究结果如图 13 所示。在相同的光束质量  $M^2$  下,具有非对称波导结构的激光器(N 型、P 型波导层厚度比为 75/25)输出功率,对称波导结构(见图 13 中 exp. [6]▲)器件功率提升了约 3 倍。

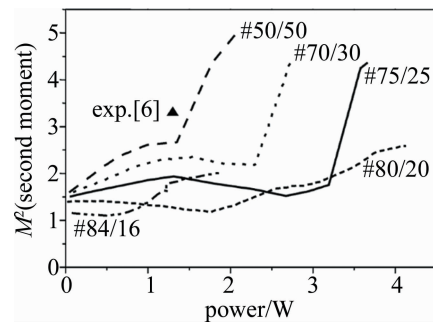


图 13 不同外延结构的器件输出功率和  $M^2$  因子的关系<sup>[35]</sup>

Fig. 13 Beam quality factor  $M^2$  with output power for different epitaxial structures<sup>[35]</sup>

非对称波导结构使光场分布向 N 型波导层偏移,产生了更小的光限制因子  $\Gamma$ ,使得有源区光子密度降低,避免了光子浓度过大导致的空间烧孔效应<sup>[36]</sup>和自聚焦效应。由于空穴对光子的吸收系数大于电子,减小 P 型波导层厚度可以降低内损耗,同时减小器件的串联电阻,实现更优良的器件特性,使锥形激光器光束质量恶化的功率节点提高,同时大功率时的光束丝化现象有所减弱,由此非对称超大光腔(asymmetric super large optical cavity, ASLOC)结构被广泛应用于高功率锥形半导体激光器的波导设计。

锥形激光器的有源区通常设计为应变量子阱,通过改变材料组分控制量子阱的应变类型及应变量,可以实现更高的内量子效率和更低的内损耗。量子阱数目也对激光器输出功率有显著影响。表1中给出了德国FBH对MOPA结构锥形激光器的外延优化研究进

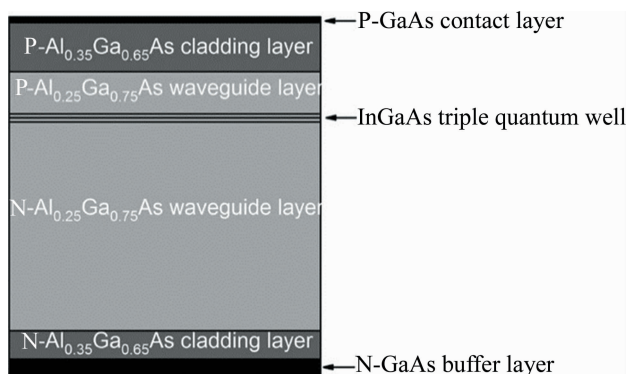
展。有源区的设计从单量子阱(single quantum well, SQW)演变到双量子阱(double quantum well, DQW)再到三量子阱(triple quantum well, TQW),外延参数主要包含内量子效率 $\eta_i$ 、内损耗 $\alpha_i$ 、光限制因子 $\Gamma$ 及材料增益 $g_0$ 等。

表1 FBH外延设计进展

Table 1 Progress in epitaxial design of FBH

时间	波长 $\lambda$ /nm	外延结构		外延参数	性能参数	参考文献
		有源区	波导层			
2005	980	SQW	光腔: SLOC 厚度: 3.6 $\mu\text{m}$ 材料: $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$	$\eta_i > 95\%$ , $\alpha_i \approx 1.4 \text{ cm}^{-1}$	$P_{\text{max}} = 14 \text{ W}$ , $M^2 < 2 @ 7.7 \text{ W}$	[37]
2008	976	SQW	厚度: 1.06 $\mu\text{m}$ 材料: $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$	$\eta_i > 97\%$ , $\alpha_i < 0.5 \text{ cm}^{-1}$	$P_{\text{max}} = 15 \text{ W}$ , $M^2 = 2.3 @ 5.4 \text{ W}$	[38]
2008	979	DQW	光腔: ASLOC 厚度: 4.8 $\mu\text{m}$ 材料: $\text{AlGaAs}$	转换效率: 44%	$P_{\text{max}} = 12 \text{ W}$ , $M^2 = 1.1 @ 11.4 \text{ W}$	[39]
2016	1029	TQW	光腔: ASLOC 厚度: 4.8 $\mu\text{m}$ 材料: $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	$\Gamma g_0 = 19 \text{ cm}^{-1}$ , $\eta_i = 1.0$ , $\alpha_i \approx 1.5 \text{ cm}^{-1}$	$P_{\text{max}} = 12.7 \text{ W}$ , $M^2 = 1.1 @ 10.5 \text{ W}$ , 谱宽: 17 pm	[30]
2017	1022	TQW	光腔: ASLOC 厚度: 4.8 $\mu\text{m}$ 材料: $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	$\Gamma g_0 = 23 \text{ cm}^{-1}$ , $\eta_i \approx 0.99$ , $\alpha_i \approx 0.8 \text{ cm}^{-1}$	$P_{\text{max}} = 15.5 \text{ W}$	[40]

2017年, MÜLLER等人<sup>[40]</sup>对改进的多量子阱层结构的质量进行了验证,外延片通过金属有机气相外延生长,并且基于一个嵌入在非对称超大光腔结构中的三量子阱,如图14所示。在脉冲条件下测量了未镀膜、未封装的100  $\mu\text{m}$ 条宽宽面激光器的电光特性以及光谱。器件的斜率效率为0.56 W/A,外微分子效率为0.93,垂直方向上的半峰全宽发散角为14.4°,  $1/e^2$ 发散角为26.6°,便于光束整形,并且测得了近乎理想值的内量子效率0.99,证明多量子阱设计可以获得更好的外延参数。

图14 激光器垂直层结构示意图<sup>[40]</sup>Fig. 14 Schematic of epitaxial layer structure<sup>[40]</sup>

单量子阱激光器对载流子的限制能力较弱,注入载流子易扩展进限制层内复合,器件电光转换效率较低。多量子阱结构中,多个量子阱之间由很薄的势垒层连接,产生的隧道效应使载流子被限制在量子阱内。

多量子阱结构可实现大的限制因子 $\Gamma$ ,使阈值电流密度降低、模式增益大大增加,同时可以提高器件的微分增益,提升输出光功率。锥形量子阱激光器的外延结构向超大光腔分离限制异质结多量子阱方向发展,其能带结构如图15所示。波导层与有源层之间的能带差可以有效地将载流子限制在有源区中,有源层和波导层一起构成光波导限制光场。

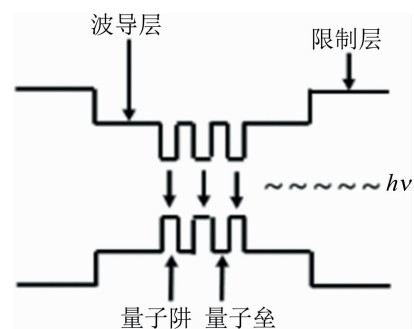


图15 分离限制异质结多量子阱激光器的能带结构示意图

Fig. 15 Energy band structure of separated confinement heterostructure multiple quantum wells lasers

大量研究表明,光子晶体结构能有效提升锥形激光器的光束质量。1维光子晶体半导体激光器通过在外延方向上周期性生长高、低折射率材料,利用光子禁带和局域特性<sup>[41]</sup>,使高阶模式在光子晶体中被不断损耗,实现基模发射和小的垂直发散角。

2016年, MA等人<sup>[42]</sup>制备了具有光子晶体结构(photonic band crystal, PBC)的锥形激光器。在外延

方向上,激光器的核心区域包含 3 个 InGaAs 量子阱,激光波长在 980 nm 范围内,量子阱和垒位于一个 0.2 μm 的 AlGaAs 缺陷层中。光子晶体结构包含 10 个周期交替的 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As/Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As 层,如图 16 所示。低铝含量的层作为高折射率层 (high index layer, HIL), Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As 层作为低折射率层 (low index layer, LIL)。HIL 层和 LIL 层的厚度分别为 0.15 μm 和 0.5 μm, PBC 层的总厚度为 6.7 μm。基于厚 PBC 结构,可以同时实现大模式尺寸和窄的垂直发散角。这种设计还降低了出光面的光功率密度,提高灾变性损伤光功率。

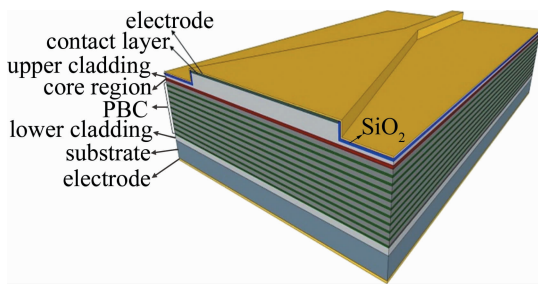


图 16 PCB 锥形激光器结构示意图<sup>[42]</sup>

Fig. 16 Schematic of the tapered lasers with longitudinal PBC structure<sup>[42]</sup>

2018 年, MA 等人<sup>[43]</sup> 又对光子晶体激光器的设计进行了改进,研究了缺陷层厚度对模态分布的影响,通过对光子晶体结构以及掺杂浓度进行优化,实现了更小的光限制因子和更低的光损耗,从而提升了光束质量和器件效率。1.5 A 工作电流下快、慢轴方向  $M^2$  因子分别为 1.78 和 1.62, 随电流增加, 输出光束的垂直发散角几乎不变, 垂直方向以及横向发散角分别为 11° 和 6°, 连续波功率为 7.3 W, 脉冲条件下的最大输出功率可达 17 W。

受外延加工设备限制,国内对外延层优化的研究起步较晚。2016 年,北京工业大学的 LI 等人<sup>[44]</sup> 研制了具有双量子阱结构的锥形半导体激光器,外延片包括两层 In<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>As 量子阱,以 GaAs<sub>0.836</sub>P<sub>0.164</sub> 材料作为量子垒, N 型波导层与 P 型波导层厚度比为 3/1, 使得光场分布向 N 型区偏移, 减弱了 P 型区热效应和电阻效应的影响, 降低 P 型区空穴产生的光吸收损耗, 同时, 有源区厚度增加实现了更小的垂直发散角。器件激光波长在 963 nm, 7 A 电流下输出功率为 4.026 W, 快、慢轴方向的光参数积分别为 0.668 mm · mrad、1.593 mm · mrad。

2017 年, 长春理工大学的 SUN 等人<sup>[45]</sup> 仿真了 976 nm InGaAs/AlGaAs 锥形半导体激光器的输出特性, 研究结果如图 17 所示。双量子阱有源区结构相比于单量子阱, 可以令锥形激光器中的脊形区产生更为

集中的基侧模强度分布, 从而获得更好的锥形区模式衍射分布。同时, 双量子阱结果具有更高的电光转换效率, 可以得到高亮度锥形半导体激光器。

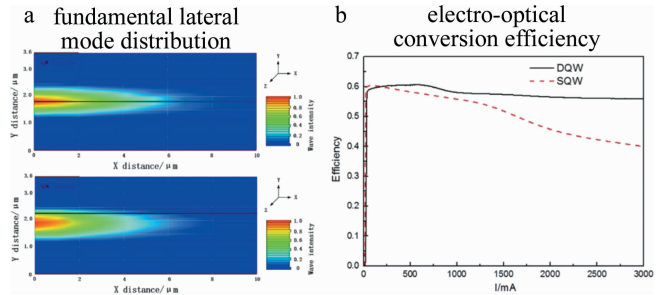


图 17 单/双量子阱结构锥形激光器输出特性对比<sup>[45]</sup>

Fig. 17 Comparison of output characteristics of tapered lasers with single/double quantum well<sup>[45]</sup>

### 1.3 GaAs 基锥形半导体激光器应用特性

针对不同应用领域的需求, 研究者们对锥形半导体激光器的优化设计进行深入探索, 使其特征性能大大提升, 向高功率、窄线宽、高光束质量、高亮度的方向不断发展。

通过对外延层以及器件结构、腔面镀膜和封装技术的优化, 锥形半导体激光器单管可实现 10 W 以上大功率输出, 满足抽运、材料加工、空间激光通讯等应用需求; 布喇格光栅的引入可以有效压缩锥形激光器输出线宽, 使激光输出能量更为集中<sup>[46]</sup>, 提升模式稳定性, 可作为光通信中窄线宽光源; 为实现近衍射极限高光束质量, 针对外延设计进行优化, 还引入了光子晶体结构以及各种侧模限制技术实现基模输出。半导体激光器的许多应用领域, 包括抽运、激光加工、激光武器等, 均要求激光器具有高亮度输出。表 2 中列出了近年来 980 nm 附近的锥形半导体激光器特性。

表 2 锥形激光器应用特性及研究进展

Table 2 Application characteristics and research progress of the tapered laser

应用特性	年份	$\lambda$ /nm	性能参数	参考文献
高功率	2018	980	7.3	[43]
	2019	1060	9.5	[33]
	2021	975	7	[47]
	2022	1015	10.3	[48]
窄线宽	2019	996	2.4	[49]
	2019	980	2.7	[50]
高光束质量	2019	980	1.5	[51]
	2019	1060	1.1	[52]
	2021	975	1.66	[47]
	2022	1015	1.06	[48]
高亮度	2019	980	亮度/ 126.8 (the 2nd moment)	[53]
	2021	975	369 (1/e <sup>2</sup> )	[47]

## 2 本团队研究工作介绍

中国工程物理研究院应用电子学研究所作为锥形激光器的代表性研究机构之一,对锥形激光器进行了深入研究。

2022年,HE等人<sup>[54]</sup>研究了锥形激光器中脊形区与锥形区的增益匹配问题,最终设计的锥形激光器在8 W输出功率下光束质量因子 $M^2(1/e^2) = 1.1$ ,电光效率可达56.6%。测试结果表明,不同注入电流下,器件输出光谱会发生偏移,如图18所示。脊形区较高的载流子密度会导致其增益峰值波长大于锥形区,脊形区与锥形区之间的增益峰值失配会导致器件光谱变宽,输出功率较低。提出了抑制增益失配的方法,包含降低脊形区结温度,将增益峰值移到更短的波长;在脊形区注入氦离子,引入额外光损耗使透明载流子密度增加,实现增益谱位移。

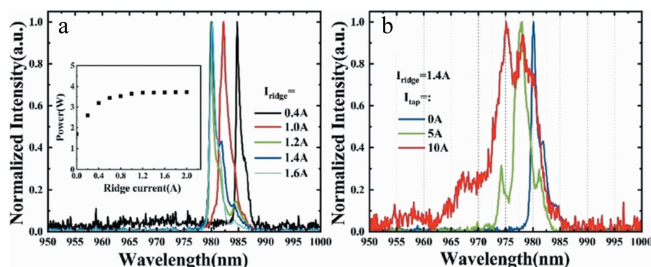


图18 锥形激光器光谱测量结果<sup>[54]</sup>

a—固定锥形区电流下,改变脊形区注入电流 b—固定脊形区电流下,改变锥形区注入电流

Fig. 18 Measured spectra of the tapered laser diode<sup>[54]</sup>

a—variation of injection current in the ridge region under the fixed current in the tapered region b—variation of injection current in the tapered region under the fixed current in the ridge region

同年,DU等人<sup>[48]</sup>研制了10 W近衍射极限输出的高效率锥形半导体激光器,光束空间特性与光谱特性测试结果如图19所示。获得了功率10.3 W的激光输出,慢轴光束质量 $M^2(1/e^2) = 1.06$ ,3 dB线宽40  $\mu\text{m}$ ,电光转换效率高达50.5%。激光器外延层采用InGaAs应变单量子阱和2.4  $\mu\text{m}$ 的非对称厚波导结构,芯片侧向结构包括3个部分:脊形种子源区产生单模种子光、脊形预放区提高种子光功率、锥形区作为功率放大器,采用分离电极方式可独立控制三段电流注入。DBR光栅两侧设计有微电极加热器用于光谱调谐,对加热器施加电流,可在4 nm范围内实现无跳模现象的中心波长调谐,这种可调谐特性有利于激光器在光通信领域的应用。预放区的引入不仅可以提高种子光功率,还能作为滤模器消除高阶模式与杂散光,使激光输出获得近衍射极限的光束质量,并且主瓣能量占比较高。

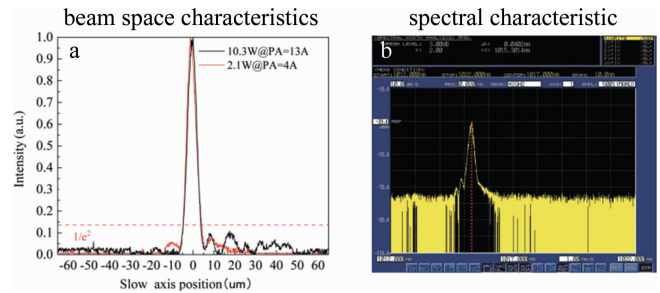


图19 激光器输出光束测试结果<sup>[48]</sup>

Fig. 19 Test results of laser output beam<sup>[48]</sup>

## 3 结束语

由于激光器加工设备和工艺水平的限制,国内锥形半导体激光器的研究较国外起步较晚,但近年来国内外差距正在急剧缩小。目前对GaAs基DBR锥形激光器的相关报道中,主要问题是器件快、慢轴发散角相差大难以直接应用,以及大电流注入下光束质量恶化、产生灾变性腔面光学损伤等,锥形激光器的工作模式受非线性效应和反向行波影响较大,同时低阶光栅刻蚀工艺也存在很大难度。通过优化外延结构、芯片几何形状、光栅设计,进一步提升锥形激光器的输出功率及光束质量是国内外一大研究热点。

近红外波段的GaAs基激光器在工业、通信、医疗、军事等领域具有广泛用途,MOPA结构的锥形半导体激光器是目前最具潜力的高亮度器件,各国研究者们对其进行了深入研究探讨与优化设计,逐步提升了其输出特性。本文中以激光器的外延优化和器件结构设计为出发点,简要回顾分析了锥形激光器的发展历程。随着制备工艺与激光技术的不断发展,锥形半导体激光器必然可以实现量产并投入商业化应用,在智能制造、激光雷达、空间激光通讯、激光抽运源、高精度工业加工等领域拥有更加广阔的市场<sup>[55]</sup>。

## 参考文献

- [1] ZHANG X C, QIAN J, LIU J, *et al.* Recent process in laser processing of fiber-reinforced composites [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111432 (in Chinese). 张学聪, 钱静, 刘军, 等. 激光加工纤维增强复合材料研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111432.
- [2] CHEN L H, YANG G W, LIU Y X. Development of semiconductor lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500001 (in Chinese). 陈良惠, 杨国文, 刘育衔. 半导体激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500001.
- [3] ZHONG H W. Research and application of semiconductor laser ignition technology [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020 (in Chinese). 钟海文. 半导体激光点火技术的研究与应用 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.



- [4] WANG Y W, HE H D, ZHANG W H, *et al.* Experience of 980 nm semiconductor red laser aided “zero ischemia” retroperitoneal laparoscopic partial nephrectomy[J]. *Journal of Clinical Urology*, 2022, 37(1): 37-41 (in Chinese).  
王宇伟,何华东,张文豪,等. 980 nm 半导体红激光辅助后腹腔镜下“零缺血”肾部分切除术的应用经验[J]. *临床泌尿外科杂志*, 2022, 37(1): 37-41.
- [5] MULLER A, FRICKE J, BUGG F, *et al.* DBR tapered diode laser with 12.7 W output power and nearly diffraction-limited, narrowband emission at 1030nm[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(4): 1-6.
- [6] WENZEL H, PASCHKE K, BROX O, *et al.* 10 W continuous-wave monolithically integrated master-oscillator power-amplifier[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(3): 160-162.
- [7] SUMPF B, PASCHKE K, KUDRYASHOV A V, *et al.* Spectrally stabilized high-power high-brightness DBR-tapered lasers in the VIS and NIR range[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2018, 10518: 170-177.
- [8] 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 [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2019, 10900: 115-124.
- [9] GORDEEV N Y, PAYUSOV A, MAXIMOV M. Semiconductor laser quasi-array with phase-locked single-mode emitting channels [J]. *Semiconductors*, 2019, 35(10): 1405-1408.
- [10] KHARAS D, PLANT J, LOH W, *et al.* High-power (>300 mW) on-chip laser with passively aligned silicon-nitride waveguide DBR cavity[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(6): 1-12.
- [11] YUAN M Y, WANG W Q, WANG X Y, *et al.* Demonstration of an external cavity semiconductor mode-locked laser [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4855-4858.
- [12] SUMP B, KLEHR A, VU T N, *et al.* 975nm high-peak power ns-diode laser based MOPA system suitable for water vapor DIAL application[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9382: 231-238.
- [13] CHRISTENSEN M, HANSEN A K, NOORDEGRAAF D, *et al.* Modulation of frequency doubled DFB-tapered diode lasers for medical treatment[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2017, 10088: 205-210.
- [14] ANDRE T, JENS M, PETER B, *et al.* Next generation high-brightness diode lasers offer new industrial applications[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2008, 6876: U8760.
- [15] HANSEN A K, TAWFIEQ M, JENSEN O B, *et al.* Concept for power scaling second harmonic generation using a cascade of nonlinear crystals[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15921-15934.
- [16] ZHANG J. Design, growth and fabrication of near infrared semiconductor laser based on GaAs[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2013 (in Chinese).  
张建. GaAs 基近红外半导体激光器的设计、生长和制备研究 [D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
- [17] WANG Zh H. Studies on 970 nm high brightness high power tapered semiconductor laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023 (in Chinese).  
王芝浩. 970 nm 高亮度大功率锥形半导体激光器的研究[D]. 长春:长春理工大学, 2023.
- [18] MAN Y X. Research on structure of high-brightness tapered diode lasers[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences), 2021 (in Chinese).  
曼玉选. 高亮度锥形半导体激光器结构的研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院半导体研究所), 2021.
- [19] YANG Y, LIU Y, QIN L, *et al.* Electro-optic properties of 850 nm high-brightness tapered lasers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(6): 593-597 (in Chinese).  
杨晔,刘云,秦莉,等. 850 nm 高亮度锥形半导体激光器的光电特性[J]. *发光学报*, 2011, 32(6): 593-597.
- [20] YANG Y, LIU Y, ZHANG J L, *et al.* Near diffraction limit high-brightness 850 nm tapered laser diodes[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(10): 1064-1068.
- [21] LIU L, QU H, WANG Y, *et al.* High-brightness single-mode double-tapered laser diodes with laterally coupled high-order surface grating[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3231-3234.
- [22] LI Y, DU W Ch, ZHOU K, *et al.* High-brightness tapered laser diodes with photonic crystal structures[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2018, 10697: 1238-1242.
- [23] TAN M Q, YOU D M, GUO W T, *et al.* Research progress of monolithic integration master-oscillation power-amplifiers [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 61-75 (in Chinese).  
谭满清,游道明,郭文涛,等. 单片集成式主振荡功率放大器研究进展[J]. *中国光学*, 2023, 16(1): 61-75.
- [24] YANG J J. Study on mode regulation of tapered laser diode[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2003 (in Chinese).  
杨晶晶. 锥形半导体激光器模式调控研究[D]. 长春:长春理工大学, 2023.
- [25] ZHU K, LI H, HAO Y Q, *et al.* Design of grating structure in distributed Bragg reflector semiconductor laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(11): 1101022 (in Chinese).  
朱坤,李辉,郝永芹,等. 分布布喇格反射器半导体激光器中光栅结构设计[J]. *中国激光*, 2023, 50(11): 1101022.
- [26] LEI Y X, CHEN Y Y, GAO F, *et al.* 990 nm high-power high-beam-quality DFB laser with narrow linewidth regulation led by gain-coupled effect[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-9.
- [27] KAUNGA-NYIRENDA S N, BULL S, LIM J J, *et al.* Factors influencing brightness and beam quality of conventional and distributed Bragg reflector tapered laser diodes in absence of self-heating[J]. *IET Optoelectronics*, 2014, 8(2): 99-107.
- [28] FRICKE J, WENZEL H, BUGGE F, *et al.* High-power distributed feedback lasers with surface gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(16): 1443-1445.
- [29] ZOLOTAREV V V, YU L A, SOKOLOVA Z N, *et al.* Diode lasers with front surface high-order distributed Bragg reflector [C]//Fifth International Symposium on Coherent Optical Radiation of Semiconductor Compounds and Structures. Moscow, Russia; *Journal of Physics Conference Series*, 2016, 740(1): 012003.
- [30] MÜLLER A, FRICKE J, BUGG F, *et al.* DBR tapered diode laser at 1030 nm with nearly diffraction-limited narrowband emission and 12.7 W of optical output power[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2016, 9767: 193-200.
- [31] MÜLLER A, ZINK C, FRICKE J, *et al.* 1030 nm DBR tapered diode laser with up to 16 W of optical output power[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2017, 10123: 197-203.
- [32] MÜLLER A, FRICKE J, BROX O, *et al.* Increased diffraction efficiencies of DBR gratings in diode lasers with adiabatic ridge waveguides[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, 31(12): 125011.
- [33] 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.
- [34] HOU J D. Study on and fabrication of 905 nm epitaxially stacked structure semiconductor laser[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2018 (in Chinese).  
侯继达. 905 nm 外延叠层多源区激光器的研制[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2018.
- [35] TIJERO J M G, ODRIOZOLA H, BORRUEL L, *et al.* Enhanced brightness of tapered laser diodes based on an asymmetric epitaxial design[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1640-1642.
- [36] GUO R, ZHENG J, ZHANG Y, *et al.* Suppressing longitudinal spatial hole burning with dual assisted phase shifts in pitch-modulated DFB lasers[J]. Science Bulletin, 2015, 60(11): 1026-1032.
- [37] PASCHKE K, SUMPFF B, DITTMAR F, *et al.* Nearly diffraction limited 980 nm tapered diode lasers with an output power of 7.7 W [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(5): 1223-1227.
- [38] OSTENDORF R, KAUFEL G, MORITZ R, *et al.* 10 W high-efficiency high-brightness tapered diode lasers at 976 nm[J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 6876: 146-153.
- [39] FIEBIG C, BLUME G, KASPARI C, *et al.* 12 W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser[J]. Electronics Letters, 2008, 44(21): 1253-1255.
- [40] MILLER A, ZINK C, FRICKE J, *et al.* Efficient, high brightness 1030 nm DBR tapered diode lasers with optimized lateral layout[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1-7.
- [41] LI Ch W, CHEN X, CAI Y Y, *et al.* Design of one-dimensional edge-emitting organic semiconductor photonic crystal lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0914001 (in Chinese).  
李长伟, 陈笑, 蔡园园, 等. 一维边发射有机半导体光子晶体激光器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0914001.
- [42] 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 Technology Letters, 2016, 28(21): 2403-2406.
- [43] MA X L, QU H W, QI A Y, *et al.* High power tapered lasers with optimized photonic crystal structure for low divergence and high efficiency[J]. Semiconductor Science and Technology, 2018, 33(4): 045010.
- [44] LI J, QIU Y T, CAO Y H, *et al.* High brightness tapered diode laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(8): 990-995 (in Chinese).  
李景, 邱运涛, 曹银花, 等. 高亮度锥形半导体激光器[J]. 发光学报, 2016, 37(8): 990-995.
- [45] SUN Sh M, FAN J, XU L, *et al.* Design and optimization of 976 nm tapered semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 32-37 (in Chinese).  
孙胜明, 范杰, 徐莉, 等. 976 nm 锥形半导体激光器结构设计及优化[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 32-37.
- [46] LÜ G R, BIAN J T, WENG J Q, *et al.* Research progress of narrow-linewidth mid-infrared laser[J]. Laser Technology, 2023, 47(6): 742-750 (in Chinese).  
吕国瑞, 卞进田, 温佳起, 等. 窄谱宽中红外激光技术研究进展[J]. 激光技术, 2023, 47(6): 742-750.
- [47] MAN Y X, ZHONG L, MA X Y, *et al.* Characteristic analysis of 975 nm tapered semiconductor lasers with separated contacts [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1701005 (in Chinese).  
曼玉选, 仲莉, 马骁宇, 等. 975 nm 分离电极锥形半导体激光器特性分析[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1701005.
- [48] DU W Ch, HE L A, LI Y, *et al.* Monolithic master oscillator high efficiency diode laser with nearly diffraction-limited narrowband emission and 10 W of optical output power [J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2023, 42(1): 21-25 (in Chinese).  
杜维川, 何林安, 李弋, 等. 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[J]. 红外与毫米波学报, 2023, 42(1): 21-25.
- [49] LEI Y X, CHEN Y Y, GAO F, *et al.* 996 nm high-power single-longitudinal-mode tapered gain-coupled distributed feedback laser diodes [J]. Applied Optics, 2019, 58(23): 6426-6432.
- [50] LEI Y X, CHEN Y Y, GAO F, *et al.* High-power single-longitudinal-mode double-tapered gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers based on periodic anodes defined by i-line lithography [J]. Optics Communications, 2019, 443: 150-155.
- [51] CHEN Zh H, QU H W, MA X L, *et al.* High-brightness low-divergence tapered lasers with a narrow taper angle [J]. Chinese Physics Letters, 2019, 36(8): 084201.
- [52] 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]//The European Conference on Lasers and Electro-Optics. Munich, Germany: IEEE Press, 2019: 204820575.
- [53] ZHOU X Y, MA X L, QU H W, *et al.* Extremely high-brightness tapered photonic crystal diode laser with narrow-emitting aperture [J]. Applied Physics Express, 2019, 12(9): 094004.
- [54] HE L A, DU W Ch, LI Y, *et al.* Investigation of the gain match in high brightness 980 nm tapered diode laser[J]. Journal of Luminescence, 2023, 257(3): 119644.
- [55] YUAN Q H, JING H Q, ZHANG Q Y, *et al.* Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 040003 (in Chinese).  
袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040003.