

文章编号: 1000-7032(2026)01-0133-11

## 隧道结级联多源区激光器光束整形与合束系统

曾 越<sup>1,2</sup>, 仲 莉<sup>1\*</sup>, 薛春来<sup>1</sup>, 陈 平<sup>1</sup>, 王钊心<sup>1</sup>, 肖湘珂<sup>1,2</sup>, 胡 涛<sup>1</sup>

(1. 中国科学院半导体研究所 固态光电信息技术实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

**摘要:** 在通过隧道结形成的多源区串联结构的半导体激光器中, 由于发光区域之间通常缺乏有效的横向光学耦合, 各有源区的激光光斑在远场呈现多个非相干的离散空间分布。经过快轴准直后, 输出光束表现为一系列相对于光轴对称的离散角度分布, 不仅导致远场发散角显著增大, 还使远场强度分布维持多光斑结构。经光学系统聚焦或成像后, 引发焦斑质量退化, 限制光纤耦合效率及输出光束亮度的提升。针对该问题, 本文提出基于临界角调控的全反射棱镜组和对称式高反射棱镜结构的光束整形方法, 通过临界角下的选择性反射实现多发区光束的角度重构, 使角空间中原本离散的三峰分布经整形后合成为单峰集中分布, 快轴发散角由  $0.52^\circ$  压缩至  $0.11^\circ$ , 实现约 79% 的角度压缩率, 提升了多源区光束方向的一致性。结合快轴暗区压缩棱镜与伽利略缩束系统, 进一步实现快慢轴光束参数积的匹配。整形后, 快轴光束参数积由  $54.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  降低至  $22.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 焦平面光强分布由“三光斑离散分布”转变为“单光斑集中分布”, 并将聚焦光束耦合进 NA 0.22、芯径  $300 \mu\text{m}$  的光纤中。系统峰值输出功率达 630 W, 光-光转换效率为 78.8%。此外, 通过装调与加工公差分析、热-结构耦合仿真及光谱色散与热致折射率效应分析评估了全反射角度整形镜的稳定性与可实现性, 表明该光束整形与合束方案具有良好的光学稳定性和工程应用前景。

**关键词:** 隧道结级联多源区半导体激光器; 快轴准直; 光束整形; 角度校正; 光束质量; 光纤耦合

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250221

CSTR: 32170.14.CJL.20250221

Beam Shaping and Beam Combining System for Tunnel-junction  
Cascaded Multi-active-region Semiconductor LasersZENG Yue<sup>1,2</sup>, ZHONG Li<sup>1\*</sup>, XUE Chunlai<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>1</sup>, WANG Yixin<sup>1</sup>,XIAO Xiangke<sup>1,2</sup>, HU Tao<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Solid-State Optoelectronic Information Technology, Institute of Semiconductors,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Author, E-mail: zhongli@semi.ac.cn

**Abstract:** In tunnel-junction-based semiconductor lasers with cascaded multi-active-region structures, the emission regions are typically optically isolated in the lateral direction, leading to multiple incoherent and spatially separated far-field patterns. After fast-axis collimation, the output beam exhibits a series of angularly symmetric but discrete patterns, which significantly increase the far-field divergence and maintain a multi-spot intensity profile. When the beam is focused or imaged, this angular separation degrades the focal quality, thereby limiting the fiber-coupling efficiency and output brightness. To address this issue, a beam-shaping method based on critical-angle-controlled total internal reflection (TIR) prisms is proposed. The design employs a TIR prism array in combination with a symmetric high-reflectivity

收稿日期: 2025-09-23; 修订日期: 2025-10-14

基金项目: 新材料重大专项(2024ZD0605200); 国家重点研发计划(2022YFB4601201, 2022YFB3605205); 中国科学院全球共性挑战专项(172111KYSB20210016); 国家自然科学基金(U21B2061, 62074142)

Supported by Advanced Materials-National Science and Technology Major Project (2024ZD0605200); National Key R&amp;D Program of China (2022YFB4601201, 2022YFB3605205); International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences for Grand Challenges (172111KYSB20210016); National Natural Science Foundation of China (U21B2061, 62074142)

prism to reconstruct the angular distribution of emissions from multiple active regions *via* selective reflection near the critical angle. As a result, the initially discrete triple-peak distribution in angular space is transformed into a single concentrated peak, reducing the fast-axis divergence from  $0.52^\circ$  to  $0.11^\circ$ , corresponding to an angular compression ratio of approximately 79%. This effectively enhances the directional uniformity of the multi-emitter output beam. By integrating a fast-axis dark-zone compression prism with a Galilean beam-compression system, the beam parameter products (BPPs) of both the fast and slow axes are further balanced. After beam shaping, the fast-axis BPP decreases from  $54.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  to  $22.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , while the focal-plane intensity evolves from a discrete triple-spot pattern to a single compact spot. The focused beam is efficiently coupled into a  $300 \text{ }\mu\text{m}$ -core fiber with a numerical aperture of 0.22, achieving a peak output power of 630 W and an optical-to-optical conversion efficiency of 78.8%. Furthermore, analyses of assembly and fabrication tolerances, thermo-mechanical coupling, and spectral dispersion as well as thermo-optic effects confirm the stability and feasibility of the proposed TIR-based beam-shaping and combining scheme, demonstrating its strong potential for high-brightness multi-emitter semiconductor laser systems.

**Keywords:** tunnel-junction cascaded multi-active-region semiconductor laser; fast-axis collimation; beam shaping; angular correction; beam quality; fiber coupling

## 1 引 言

近年来,随着自动驾驶、三维成像和安防监测等技术的迅速发展,高功率半导体激光器在激光雷达、精密测距及红外照明等领域的需求持续攀升<sup>[1-3]</sup>。其中,905 nm波段的半导体激光器由于与硅基探测器的高灵敏度匹配、低成本及成熟的制造工艺,已成为车载激光雷达的主流光源<sup>[4]</sup>。

传统的单有源区边发射激光二极管受限于发光条宽与谐振腔长度,峰值功率与亮度提升受限<sup>[5]</sup>。为突破这一瓶颈,研究者提出了基于隧道结的多有源区级联结构<sup>[6-10]</sup>。相关研究表明,905 nm多结隧道结激光器在脉冲条件下可实现数十瓦至百瓦级峰值功率输出<sup>[6,11]</sup>,其阵列化器件已在纳秒脉冲驱动下实现了千瓦级峰值功率,展现出在高功率密度与紧凑化光源领域的应用潜力<sup>[12]</sup>。

在工程实现层面,部分商用隧道结激光器,如Laser Components公司与Osram公司的905 nm产品采用传统的光学整形方式,通过柱面透镜将快轴发散角压缩至毫弧度量级。然而,这类方法主要针对整体发散角的压缩,并未考虑多有源区结构所带来的空间发射特性差异。本文通过仿真分析发现,即使在快轴方向进行了准直,不同有源区的出射光仍因空间位置差异和非共轴发射而产生毫弧度量级的角度偏离。这种角度离散效应使焦平面能量分布呈多峰离散结构,中心能量密度显著下降,导致远场光束质量降低并限制了光纤耦合效率与系统亮度的进一步提升。

常见的光束整形与合束技术,如衍射光学元

件的波前调控<sup>[13-15]</sup>、基于偏振分光棱镜<sup>[16-18]</sup>的偏振复用以及利用反射光栅或体布拉格光栅的光谱合束<sup>[19-22]</sup>等,分别依赖于波前相干性、偏振态控制或光谱选择性的反馈或透射机制,适用于相干或多波长激光系统。相比之下,隧道结多有源区激光器的输出光束在空间上呈非相干叠加,且发射角度存在离散性,使上述方法难以直接适用。因此,需要发展一种能够在同波长、非相干条件下实现角度校正与能量复合的新型光束整形方案。

基于全反射原理的光学结构在多个领域得到了广泛研究和应用。在成像、光谱及投影系统中,全反射棱镜常用于光路折返与空间复用,在有限体积内实现光束的多次反射与路径重构。Zhao等<sup>[23]</sup>针对数字微反射镜角度偏转受限导致的光路重叠问题,设计了三程全反射棱镜组,通过临界角下的几何分光实现“ON/OFF”光束的空间解耦与折叠,在单一光口内同时复用成像与光谱信号。Yan等<sup>[24]</sup>提出双棱镜TIR结构的投影系统,在照明与成像光路间建立了空间隔离与能量复用机制,显著提升了系统紧凑性与光能利用率。在高功率激光系统中,全反射棱镜被用于光束的时序或空间合束。MegaWatt Lasers公司<sup>[25]</sup>在Ho:YAG/Cr,Tm,Ho:YAG(CTH:YAG)固体激光器中采用旋转菱形全反射棱镜实现四路谐振腔输出脉冲的时序合束。该结构以两个平行抛光面为全反射界面,依靠旋转使多路激光依次反射至同一出口,具有低损耗和高装调容忍度,为构建紧凑、稳定的高功率合束系统提供了有效途径。

与以往主要用于光束分离或光路折叠的全反射棱镜不同,本文提出一种基于临界角调控的全

反射棱镜结构,可对多发射区阵列激光器的出射光实现角度选择性反射与方向重构,实现发散角度一致化,并结合暗区压缩棱镜进一步消除空间分离,有效克服前述角度离散效应导致的焦平面离散能量分布与中心能量密度下降问题,显著提升远场光束质量与光纤耦合效率。

2 光束质量匹配理论

光束质量通常用光束参数积(Beam parameter product, BPP) $K_{\text{BPP}}$ 来表征,定义为光斑腰半径 $\omega$ 与远场发散半角 $\theta$ 的乘积:

$$K_{\text{BPP}} = \omega \cdot \theta, \tag{1}$$

$K_{\text{BPP}}$ 越小,代表光束的聚焦能力越强。

在光纤耦合系统中,光纤的可接收光束范围由数值孔径(Numerical aperture, NA)和芯径 $D_{\text{fiber}}$ 决定。其最大可接收光束参数积为:

$$K_{\text{BPP-fiber}} = \frac{1}{2} \cdot \text{NA} \cdot D_{\text{fiber}}, \tag{2}$$

本文采用的光纤 NA 为 0.22,芯径为 300  $\mu\text{m}$ ,光束

参数积 $K_{\text{BPP-fiber}}$ 为 33  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

实现高效光纤耦合需满足以下匹配条件:(1)聚焦光斑的最大直径应小于光纤的芯径;(2)聚焦光斑在快轴与慢轴方向的发散角应均小于光纤的接收角;(3)光束快慢轴的光参数积 $K_{\text{BPP-fast}}$ 和 $K_{\text{BPP-slow}}$ 均小于 $1/\sqrt{2} \cdot K_{\text{BPP-fiber}}$ 。

3 光束整形结构与模拟

本文所采用的光源为中心波长 905 nm 的隧道结半导体激光器,芯片条宽为 100  $\mu\text{m}$ 。在脉冲宽度 100 ns、占空比 0.1%、驱动电流 30 A 的工作条件下,器件峰值输出功率可达 80 W。芯片内部由三个经隧道结串联的有源区组成。为简化分析,假设各有源区在条宽、有效厚度及快轴/慢轴发散角(以 $1/e^2$ 半角定义)等几何与辐射特性上保持一致。单个有源区厚度约 3  $\mu\text{m}$ ,相邻有源区间距约 5  $\mu\text{m}$ 。该激光器以 2×5 阵列形式排布,具体参数见表 1。

表 1 隧道结激光器阵列参数

Tab. 1 Parameters of the tunnel-junction laser array

| Central wavelength/nm    | Pulse conditions/ns                            | Driving current/A                             | Duty cycle/%                        | Chip size/ $\mu\text{m}$            | Peak power/W               | Stripe width/ $\mu\text{m}$ |
|--------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 905                      | 100                                            | 30                                            | 0.1%                                | 800×200×150                         | 80                         | 100                         |
| Number of active regions | Thickness of each active region/ $\mu\text{m}$ | Spacing between active regions/ $\mu\text{m}$ | Fast axis divergence/( $^{\circ}$ ) | Slow axis divergence/( $^{\circ}$ ) | Period of the fast axis/mm | Period of the slow axis/mm  |
| 3                        | 3                                              | 5                                             | 60                                  | 11                                  | 2.2                        | 3                           |

首先针对单颗隧道结激光器分析其准直与传输特性,其结构相对简单、光斑分布清晰,便于揭示准直特性及角度离散规律。采用的快轴准直透镜(FAC)有效焦距为 1.5 mm,后焦距 0.15 mm,曲率半径-1.23 mm,圆锥系数 0.3,材料为 S-TIH53。如图 1 所示,三有源区发出的光束(以蓝、红、绿区分)经 FAC 后,在快轴方向得到有效压缩,呈近似平行传播;然而,因有源区存在微小位置差异,三束光的主光线相对于系统光轴仍具有小角度偏离,图中虚线框内放大区域展示了出射端的光线空间位置分布差异。进一步在 FAC 后方 10.8 mm 处设置慢轴准直透镜(SAC),其有效焦距 14.2 mm,后焦距 12.7 mm,材料同为 S-TIH53,曲率半径-11.7 mm。单颗隧道结激光器准直方案同样应用于后续 2×5 阵列中的每个发光单元。因此,单颗激光器经准直后的发散角特性与阵列中的单元一致,具体发散角特性参见图 3。

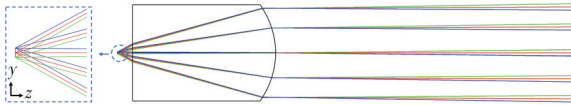


图 1 单颗隧道结激光器光束经 FAC 准直后的传播示意图(蓝、红、绿光束分别表示第一、第二、第三有源区的出射光)

Fig.1 Schematic of beam propagation from a single tunnel-junction laser after FAC collimation (The blue, red, and green beams represent the emission paths from the first, second, and third active regions, respectively)

在完成单颗光源准直后,为研究隧道结激光器准直光束在自由空间传播过程中的演化特性,在 SAC 后方不同距离处设置探测面,观察光斑形貌变化。如图 2 所示,探测位置分别位于 50 mm、150 mm、250 mm 和 400 mm。结果表明,在距出射端 50 mm 处,光斑呈单一椭圆分布,能量高度集中;当传播距离增加至 150 mm 时,光斑在慢轴方向逐渐展宽并出现明显拉伸;在 250 mm 处,光斑进一步

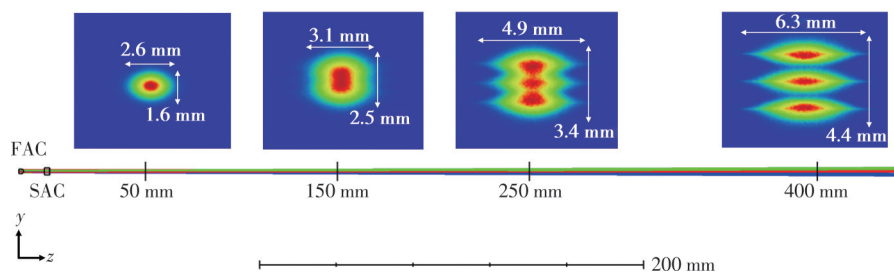


图2 单颗隧道结激光器在不同探测距离的光斑分布

Fig.2 Beam spot distributions of a single tunnel-junction laser at different detection distances

演化并逐渐分离为三个独立的光斑结构;至400 mm时,三光斑间的空间分离更为显著,但仍存在部分能量重叠,形成相互连带的多光斑形态。这一演化过程可归因于几何放大效应与衍射展宽的共同作用:不同有源区的出射光束的主光线与光轴之间存在固定的角度差,在自由空间传播过程中会通过几何放大效应转化为空间分离,光斑的分离量与传播距离近线性相关。另一方面,每个有源区的光束并非理想点源,而是在腔面处以近似矩形或椭圆的有限孔径出射,因此在传播过程中会发生衍射展宽,使单个光斑束腰尺寸随距离增加而不断扩展。正是几何分离与衍射展宽的叠加作用,导致远场光斑既表现出逐渐分裂的多光斑结构,在相邻光

斑间仍保留部分能量重叠与耦合。

进一步对2×5隧道结阵列光源进行仿真,阵列在快、慢轴方向的中心间距分别为2.2 mm与3 mm。如图3(a)所示,经FAC后快轴方向角分布呈现三个独立发散峰,中心位于 $-0.19^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $0.19^\circ$ ,对应于三处有源区主光线的角度差异。单个发散峰的全宽约为 $0.06^\circ$ ,由外侧峰包络所确定的快轴远场发散全角为 $0.52^\circ$ ,说明FAC虽有效压缩发散角,但多发光区导致的角度离散仍然存在。图3(b)表明,经SAC准直后,慢轴方向发散全角为 $0.56^\circ$ 。插图显示30 mm处观测到的2×5阵列远场光斑,尚未出现明显分离,准直后快慢轴的 $K_{BPP}$ 分别为 $23.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 与 $13.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

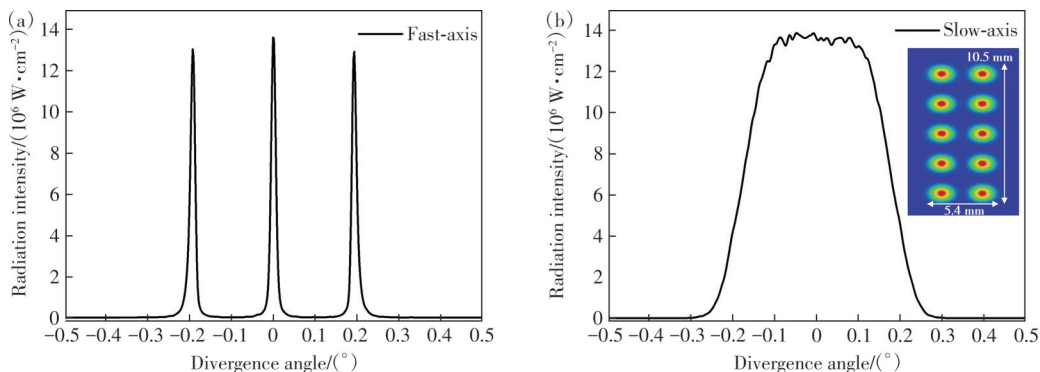


图3 2×5激光阵列准直后的快轴发散角(a)、慢轴发散角(b)分布,插图显示30 mm处的阵列光斑

Fig.3 Fast-axis(a) and slow-axis(b) divergence distributions of the 2×5 laser array after collimation. The inset shows the array beam spot at a distance of 30 mm

为更直观地评估这种效应对光学系统的影响,本文在FAC与SAC准直基础上,加入快轴2倍缩束系统并进行聚焦仿真。图4所示为未采用任何快轴角度整形条件下的光束传播与聚焦情况,三有源区光束经FAC、SAC和缩束系统后仍保持约 $\pm\theta_1$ 的主光线偏离角,聚焦镜无法使其在焦平面完全重合,在距光源约120 mm的焦平面上,最终形成3个相互独立的像点,间距约90  $\mu\text{m}$ 。插图展示了焦平面光斑沿快轴方向呈离散分布,中央像点能量约占总能量的33.15%。该结果表明,多有源区结构在快

轴方向引入的微小角度偏差经几何放大后导致能量分裂,不仅降低焦斑中心亮度和能量密度,也限制了系统的整体耦合效率与亮度输出。

为解决这一角度离散问题,本文提出了一种基于全反射原理的快轴角度整形镜结构。该结构由4个SCHOTT N-K5玻璃棱镜组成,其中棱镜1和棱镜3为梯形截面,棱镜2和棱镜4为直角三棱镜,放置于距离光源30 mm处,具体结构参数如图5(a)所示。为确保光线在界面发生全反射,棱镜1与棱镜2、棱镜3与棱镜4之间均设有0.02 mm



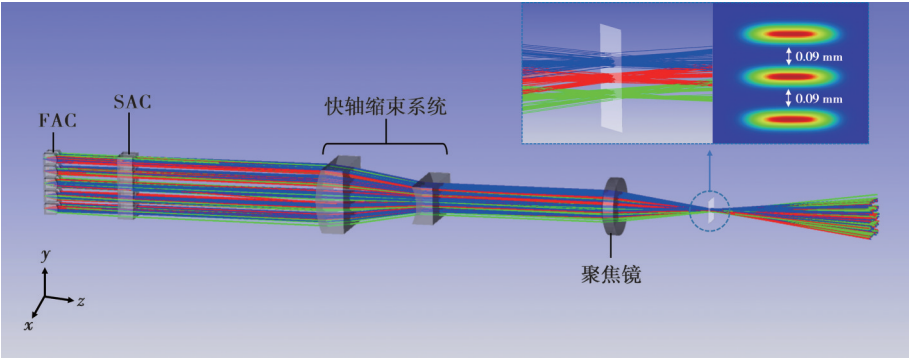


图 4 未进行快轴整形时的聚焦光路  
Fig.4 Focusing optical path without fast-axis beam shaping

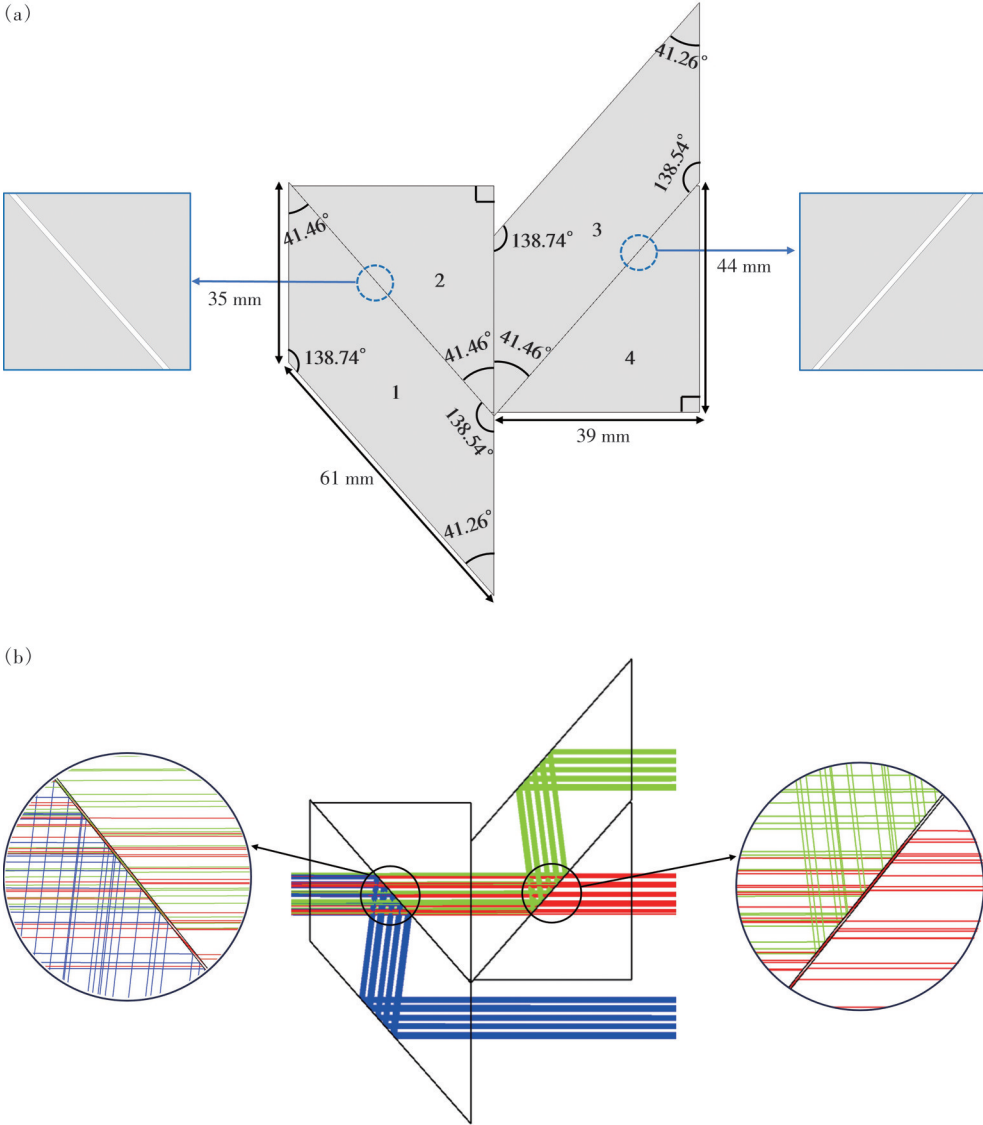


图 5 基于全反射的角度整形镜的结构参数(a), 光路分布图(b)  
Fig.5 Structural parameters(a) and optical path layout(b) of the angle-shaping mirror based on total internal reflection

的空气间隙。光束在玻璃-空气界面的传输行为由入射角与临界角的相对关系决定。三束主光线相对于系统光轴的偏离角分别为 $\pm\theta_1$ 和 $0^\circ$ 。当界面法线与光轴一致时,所有光束的入射角均小于全反射临界角 $\theta_c$ ,界面无法对它们进行区分。一旦将界面倾斜角度 $\theta$ ,三束光的入射角将分别变为 $\theta+\theta_1$ 、 $\theta$ 和 $\theta-\theta_1$ ,使部分光束满足全反射条件、部分透射进入相邻棱镜。通过优化倾斜角 $\theta$ ,可实

现对不同角度光束的分离。

根据图 3(a)所示的角分布结果,在棱镜 1 的入射界面处,各光束满足如下关系:

$$\theta + \theta_1 - 0.03^\circ > \theta_c, \quad (3)$$

$$\theta - \theta_1 + 0.03^\circ < \theta_c, \quad (4)$$

$$\theta - 0^\circ + 0.03^\circ < \theta_c, \quad (5)$$

其中,  $n_{\text{air}}=1.0003$  为空气的折射率,  $n_{\text{glass}}=1.5089$  为玻璃的折射率。同理,在棱镜 3 的入射界面处也有类似的关系。计算得临界角  $\theta_c=41.56^\circ$ 。  $\theta_1=0.19^\circ$ , 单发散峰半宽为  $0.03^\circ$ , 则  $\theta$  的取值范围  $41.40^\circ < \theta < 41.52^\circ$ , 本研究取中间值  $\theta=41.46^\circ$ 。

图 5(b)展示了角度整形镜的工作光路图,左右两侧的放大区域展示了光束在棱镜界面处发生全反射的细节。通过调整棱镜 1 和棱镜 3 的斜面角度,使蓝色和绿色光线的出射方向与红色光线保持一致,实现隧道结激光器三有源区光束的快轴角度整形。

经过角度整形镜后,如图 6 所示,快轴方向的远场角分布由原先的三发散峰收敛为单一发散峰,其峰值中心位于  $0^\circ$ , 全宽约为  $0.11^\circ$ 。然而,从插图所示的光斑探测结果可以观察到,三个有源区的光束在空间上仍保持约 20.2 mm 的“暗区”间隔,该间隔源于角度整形镜的几何结构设计。经过整形后,快慢轴  $K_{\text{BPP}}$  表现出明显的不均衡,快轴与慢轴方向分别为:  $K_{\text{BPP-fast}}$  为  $34.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,  $K_{\text{BPP-slow}}$  为  $14.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

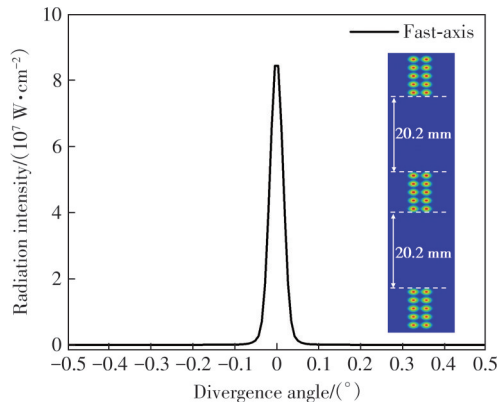


图 6 经过角度整形镜后的快轴发散角及光斑情况

Fig.6 Fast-axis divergence angle and spot profile after the angle-shaping mirror

为消除 3 个有源区之间的暗区间隔,本文设计了如图 7 所示的二次整形快轴暗区压缩棱镜结构,该结构由一对对称的  $45^\circ$  反射棱镜组成,其斜面镀有高反射膜。蓝色与绿色两路光束经斜面发生两次反射后向中心平移,与红色光束在空间位

置上实现紧密排布,有效缩小了暗区间隔。整形后的光斑尺寸为  $32.77 \text{ mm} \times 6.6 \text{ mm}$ , 快轴束腰约为慢轴的 5 倍,快轴方向  $K_{\text{BPP-fast}}=14.3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 慢轴方向  $K_{\text{BPP-slow}}=16.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 快慢轴  $K_{\text{BPP}}$  接近。

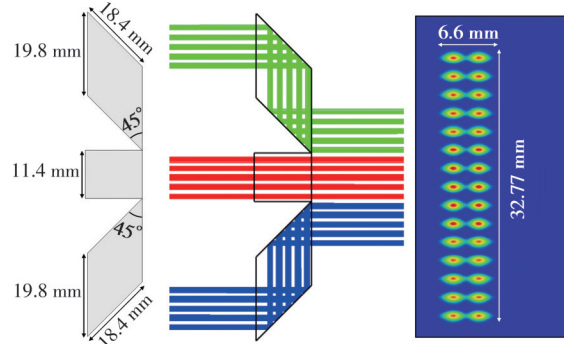


图 7 快轴暗区压缩棱镜截面图

Fig.7 Cross-sectional view of the fast-axis dark-zone compression prism

采用伽利略系统对快轴方向进行缩束,如图 8 所示,透镜总长为 99 mm,正柱面透镜的焦距为 115 mm,负柱面透镜的焦距为  $-25 \text{ mm}$ ,玻璃材料为 H-ZLAF52。缩束后的光斑束腰为  $6.92 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$ ,对应的快慢轴  $K_{\text{BPP}}$  为:  $K_{\text{BPP-fast}}=16.9 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,  $K_{\text{BPP-slow}}=16.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,二者已实现良好平衡,为后续聚焦提供了有利条件。

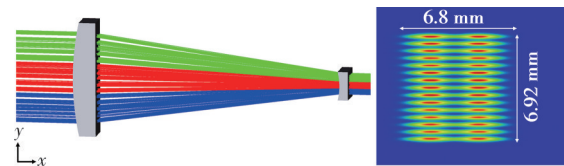


图 8 快轴暗区压缩棱镜截面图

Fig.8 Galilean beam-compression system

图 9 展示了隧道结激光器的光纤耦合系统整体结构。系统依次包括准直系统、角度整形镜、快轴暗区压缩镜、快轴缩束系统、聚焦镜以及多模光纤。聚焦镜采用 D-ZK3M 材料,焦距为 20 mm,曲率半径为 11.58 mm。聚焦后光束的快轴与慢轴发散半角分别为  $10.05^\circ$  和  $11.56^\circ$ , 均小于光纤的可接受半角  $12.7^\circ$ , 光斑束腰约为  $260 \mu\text{m} \times 290 \mu\text{m}$ , 均小于光纤芯径  $300 \mu\text{m}$ , 可将光束耦合进芯径为  $300 \mu\text{m}$ 、数值孔径 NA 为 0.22 的光纤中。在模拟过程中,各光学元件的入射面与出射面均镀有相应增透膜与增反膜,其中增透膜透射率  $T=99.5\%$ , 增反膜透射率  $T=0.5\%$ 。最终,系统输入峰值总功率为 800 W, 输出峰值功率为 630 W, 对应光-光转换效率为 78.8%, 整体体积为  $300 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。

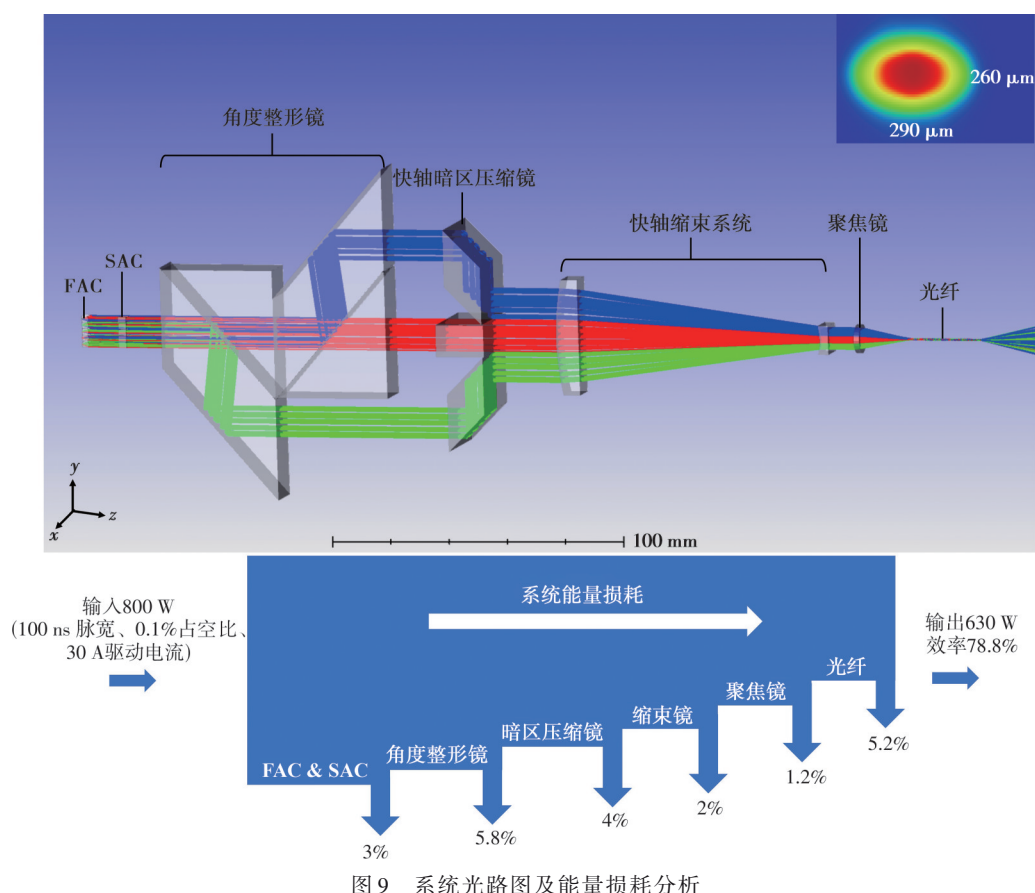


图 9 系统光路图及能量损耗分析

Fig.9 System optical layout and corresponding energy-loss analysis

与未进行快轴整形的系统对比,如图 10 所示,在相同焦距条件下,未整形系统焦平面上的快轴发散半角为  $14.9^\circ$ ,而加入全反射角度整形镜后减小至  $10.05^\circ$ ,实现约 32% 的压缩。相应地,聚焦后的  $K_{\text{BPP-fast}}$  由  $54.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  降低至  $22.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,说明角度整形镜有效改善了多源区光束的能量收敛性,使快轴方向的能量在角空间更加

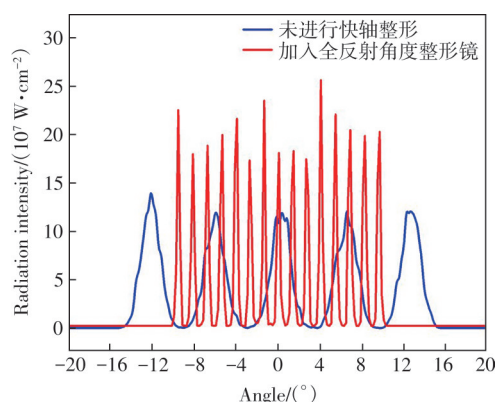


图 10 加入全反射角度整形镜前后快轴方向聚焦光束的角分布对比

Fig.10 Comparison of the fast-axis angular distributions of the focused beam before and after introducing the TIR angle-shaping mirror

集中,焦平面上原先分离的多像点融合,显著提升了光束质量。

#### 4 装调与加工误差分析

在完成系统设计后,为进一步评估其在实际装调和加工偏差下的稳定性,对关键参数进行了容差分析。图 11 展示了系统在典型装调误差与加工误差条件下的耦合效率变化,用以评估基于全反射角度整形镜的容差性能。所有结果均以无偏转、无加工误差为参照。如图 11(a)所示,对系统沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的装调角度误差进行了分析。结果表明, $X$  方向偏转最为敏感:当偏转角度小于  $\pm 0.05^\circ$  时,耦合效率约 89%;当偏转角进一步增大至  $0.1^\circ$  时,效率下降至 64%。这与全反射镜组的入射角接近临界角相关,使快轴方向对应的角度变化更为敏感。对于  $Y$  方向偏转,系统在  $0.3^\circ$  范围内仍能保持较高的耦合效率;而  $Z$  方向偏转对系统性能影响最小,即使达到  $1^\circ$ ,光纤耦合效率仍保持稳定。实际装调中,伺服或步进电机控制调整精度可达到  $0.001^\circ$  以内,能够满足设计所需的装调精度,表明系统在垂直于全反射面

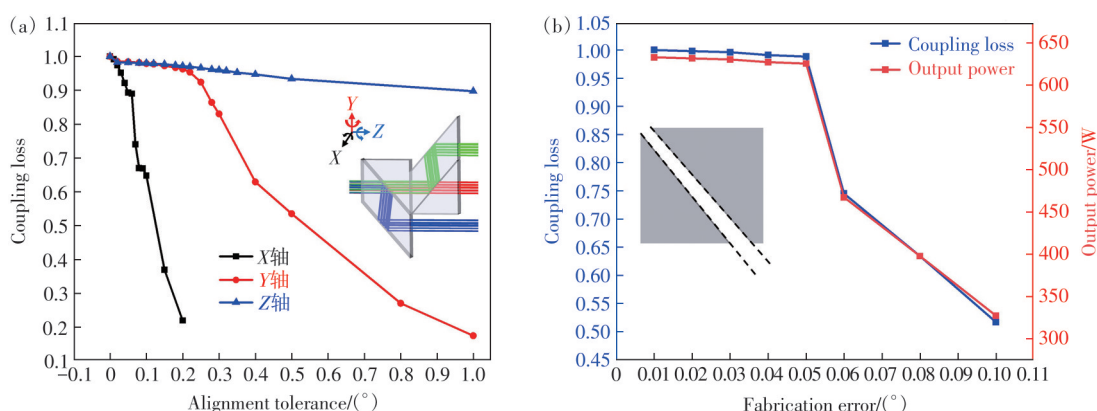


图 11 全反射角度整形镜误差分析。(a)XYZ装调误差;(b)加工误差

Fig.11 Error analysis of the TIR angle-shaping mirror. (a)XYZ alignment tolerances. (b)Fabrication errors

方向上具有良好的装调容差。图 11(b)展示了棱镜某一全反射面的加工角度误差对耦合效率与输出功率的影响。结果显示,当加工角度误差小于  $0.05^\circ$  时,系统效率保持在 98.8% 以上,输出功率保持在 625 W 以上。在实际光学加工中,常规平面元件的角度精度可控制在  $30'' \sim 1'$ , 约  $0.01^\circ \sim 0.017^\circ$ , 远优于设计容差要求。此外,在上述容差范围内,快慢轴发散角变化较小,光斑未出现明显畸变或能量偏移,说明所提出的全反射角度整形镜方案具有较高的工程可实现性。

## 5 热-结构耦合仿真

图 12 展示了基于有限元仿真的全反射角度整形镜的热-结构耦合分析结果。在图 12(a)的稳态热仿真中,为简化“光-流-固-热”多场耦合问题的计算复杂度,未建模流体与光在介质中的传播,

仅将空气间隙以边界换热近似其散热作用,并在光束辐照的入射面和全反射界面施加等效面热源以表征膜层及界面的光吸收效应。该简化模型能够捕捉界面主导吸热与玻璃体导热扩散的主要热行为,在保证物理合理性的同时显著降低计算复杂度。仿真结果显示,光线入射面的局部温度最高,约为  $54^\circ\text{C}$ ; 第一全反射界面温度降至约  $42.5^\circ\text{C}$ , 第二全反射界面进一步降低至约  $34^\circ\text{C}$ 。这种温度梯度主要源于光束在入射与反射过程中的分光效应,使后续反射界面吸收的能量显著减小。图 12(b)通过多物理场耦合接口将温度场数据导入结构力学仿真模块,开展热变形定量分析。透镜上下边界作为固定支撑约束条件,等效整形镜实际工作中的安装固定状态,对其热变形进行分析。计算结果显示,全反射界面处的最大位移在  $10^{-4}$  mm 量级,远小于整形镜设计方案中预设

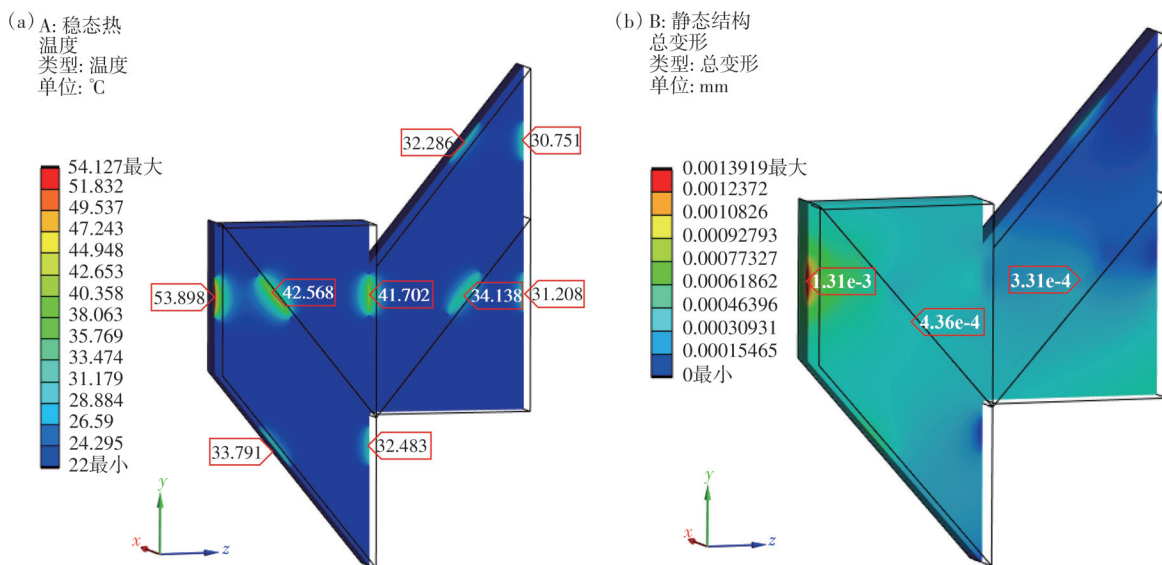


图 12 全反射角度整形镜的温度及热应力分析

Fig.12 Temperature and thermal stress analysis of the total internal reflection angle-shaping mirror



的0.02 mm空气间隙,表明该结构在工作温度下具有良好的热稳定性与装调容差裕度。

## 6 光谱色散与热致折射率效应分析

由于隧道结激光器在实际工作过程中具有一定的光谱宽度,并会随温度或驱动电流变化产生光谱漂移;同时,棱镜材料的折射率不仅与波长有关,还会受到温度变化引起的热致折射率效应影响。当光谱分布或温度发生变化时,入射光在全反射界面的临界角也将随之偏移。已有研究表明,光学玻璃的折射率可视为波长和温度的双变量函数 $n(\lambda, T)$ ,波长色散项 $(\partial n / \partial \lambda)_T$ 反映光谱分布引起的折射率变化,热致折射率项 $(\partial n / \partial T)_\lambda$ 描述温度变化造成的折射率漂移。Ghosh等通过对硅酸盐光纤玻璃的系统实验验证,建立了折射率随波长与温度变化的模型<sup>[26-27]</sup>,并给出了温度依赖的Sellmeier系数及其线性规律。据此,对 $n(\lambda, T)$ 进行一阶泰勒展开近似表示为:

$$\Delta n = \left( \frac{\partial n_{\text{glass}}}{\partial T} \right) \Delta T + \left( \frac{\partial n_{\text{glass}}}{\partial \lambda} \right) \Delta \lambda, \quad (6)$$

对全反射临界角公式做微分后的表达式为:

$$\Delta \theta_c = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{glass}}^2 \sqrt{1 - (n_{\text{air}}/n_{\text{glass}})^2}} \left[ \left( \frac{\partial n_{\text{glass}}}{\partial T} \right) \Delta T + \left( \frac{\partial n_{\text{glass}}}{\partial \lambda} \right) \Delta \lambda \right], \quad (7)$$

在有限的工作温区,可用一阶近似描述波长与温度的线性关系<sup>[28]</sup>:

$$\Delta \lambda = \alpha \Delta T, \quad (8)$$

公式(7)可简化为:

$$\Delta \theta_c = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{glass}}^2 \sqrt{1 - (n_{\text{air}}/n_{\text{glass}})^2}} \left( \frac{\partial n_{\text{glass}}}{\partial T} + \alpha \frac{\partial n_{\text{glass}}}{\partial \lambda} \right) \Delta T, \quad (9)$$

$\alpha$ 为波长温漂系数,数值为 $0.28 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,考虑10 nm波长变化, $(\partial n / \partial \lambda)_T$ 数值约为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ 。在30 °C温度波动下, $(\partial n / \partial T)_\lambda$ 约为 $1.49 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。因

此,临界角变化量 $\Delta \theta_c$ 约为 $0.006^\circ$ ,该偏移量远小于系统反射面倾角容差。

## 7 结 论

本文针对905 nm隧道结多源区半导体激光器在光束传输过程中出现的角度离散与能量分裂问题,提出并设计了一种基于全反射原理的快轴角度整形镜结构。通过光学仿真,完成了从准直、角度校正、暗区压缩、光束缩束到聚焦耦合的系统建模与设计。仿真结果显示,整形后快轴方向发散角显著收敛,三有源区光束发散角在角空间实现重合,聚焦光斑由间隔90 μm三光斑结构融合为260 μm×290 μm的单一光斑,有效提升了中心能量密度与光束质量。系统最终将800 W峰值功率的激光以78.8%的效率耦合进入300 μm/0.22 NA光纤,输出峰值功率达630 W。容差分析表明,该结构对Z轴偏转具有较高容忍度,X轴偏转需控制在 $\pm 0.05^\circ$ 以内,加工角度误差在 $0.05^\circ$ 范围内对系统性能影响可忽略。热-结构耦合仿真进一步验证了结构在热载荷下的形变可控性。综上所述,本文提出的基于全反射棱镜的光束整形方案可有效消除隧道结多源区激光器的快轴角度离散,为实现高亮度、高稳定性的光纤耦合半导体激光模块提供了可行的设计途径。

此外,本设计具有良好的波长适应性与结构扩展性。在应用上,其工作波长无特定限制。在结构上,可通过级联多级全反射棱镜实现对更多有源区激光器(如四结、五结量子点结构VCSEL)的光束整形;同时,通过旋转其工作界面的方向,还可拓展至慢轴方向的多脊型边发射激光器,用于对各脊的慢轴发散角进行一致性调控,提升整体光束质量。本设计为多源高亮度半导体激光系统的集成化设计提供了新的思路。

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.20250221>

## 参 考 文 献:

- [1] KRAKOWSKI M, MEGHNAGI M, AFUSO-ROXO P, et al. High optical power pulsed laser structures at 905 nm for automotive LIDAR [C]. *Proceedings of the Novel In-Plane Semiconductor Lasers XXII, San Francisco*, 2023: 124400J.
- [2] MA J, ZHUO S L, QIU L, et al. A review of ToF-based LiDAR [J]. *J. Semicond.*, 2024, 45(10): 101201.

- [ 3 ] QIN H S, QIN H B. Image-based dedicated methods of night traffic visibility estimation [J]. *Appl. Sci.*, 2020, 10(2): 440.
- [ 4 ] KNIGGE A, KLEHR A, LIERO A, *et al.* Wavelength stabilized 905 nm diode lasers in the 100 W class for automotive LiDAR [C]. *Proceedings of the 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, Munich, 2019: 1.
- [ 5 ] CRUMP P, BONI A, ELATTAR M, *et al.* Power and efficiency scaling of GaAs-based edge-emitting high-power diode lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2025, 31(2): 1502512.
- [ 6 ] ZHAO Y L, YANG G W, ZHAO Y M, *et al.* Epitaxially-stacked high efficiency laser diodes near 905 nm [J]. *IEEE Photonics J.*, 2022, 14(6): 1557006.
- [ 7 ] WENZEL H, MAAßDORF A, ZINK C, *et al.* Novel 900 nm diode lasers with epitaxially stacked multiple active regions and tunnel junctions [J]. *Electron. Lett.*, 2021, 57(11): 445-447.
- [ 8 ] STAUDINGER P, PALLMANN W, PAUL S, *et al.* Multi-junction lasers for LiDAR applications [C]. *Proceedings of the High-Power Diode Laser Technology XXI, San Francisco*, 2023: 1240303.
- [ 9 ] 陈良惠, 杨国文, 刘育街. 半导体激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500001.  
CHEN L H, YANG G W, LIU Y X. Development of semiconductor lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, 47(5): 0500001. (in Chinese)
- [ 10 ] 姬世宇, 熊聪, 祁琼, 等. 905 nm 多有源区半导体激光器芯片结构优化设计 [J]. *光学学报*, 2023, 43(13): 1314001.  
JI S Y, XIONG C, QI Q, *et al.* Chip structure optimization of 905 nm multiple-active-region semiconductor lasers [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2023, 43(13): 1314001. (in Chinese)
- [ 11 ] AMMOURI N, CHRISTOPHER H, MAAßDORF A, *et al.* 420 W pulse power from a 905 nm distributed Bragg reflector laser with multiple active regions and tunnel junctions [J]. *Phys. Scr.*, 2025, 100(7): 075514.
- [ 12 ] SLIPCHENKO S O, PODOSKIN A A, VESELOV D A, *et al.* Tunnel-coupled laser diode microarray as a kW-level 100-ns pulsed optical power source ( $\lambda=910$  nm) [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2022, 34(1): 35-38.
- [ 13 ] DOSKOLOVICH L L, MINGAZOV A A, BYZOV E V, *et al.* Hybrid design of diffractive optical elements for optical beam shaping [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(20): 31875-31890.
- [ 14 ] XUE D B, DUN X, WEI Z Y, *et al.* Collimated flat-top beam shaper metasurface doublet based on the complex-amplitude constraint Gerchberg-Saxton algorithm [J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(8): 1379-1385.
- [ 15 ] 徐娜, 王常宇, 王涌天, 等. 衍射光学元件设计方法综述 [J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 0822007.  
XU Y, WANG C Y, WANG Y T, *et al.* Review of design methods of diffractive optical element [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2023, 43(8): 0822007. (in Chinese)
- [ 16 ] ZHANG W Q, CAO P, TING F, *et al.* High-efficiency spectral beam combining of an individual laser diode bar with polarization multiplexing [J]. *Opt. Lett.*, 2023, 48(4): 1080-1083.
- [ 17 ] LIN X C, LIN G Y, ZHAO P F, *et al.* Generation of high brightness diode laser by using spectral and polarization beam combination [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2019, 116: 219-223.
- [ 18 ] 韩金樑, 张俊, 单肖楠, 等. 基于半导体激光合束技术的高功率加热光源 [J]. *光学学报*, 2021, 41(22): 2214001.  
HAN J L, ZHANG J, SHAN X N, *et al.* High power heating light source based on semiconductor laser beam combination technology [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(22): 2214001. (in Chinese)
- [ 19 ] ZHAO B X, ZHANG W Q, ZHOU X Y, *et al.* High beam quality, high brightness dense spectral beam combining of 650 nm laser diode module [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(20): 35840-35853.
- [ 20 ] 郭林辉, 蒋全伟, 吴华玲, 等. 基于光栅光谱合束的蓝光高亮度半导体激光光源 [J]. *中国激光*, 2024, 51(13): 1301007.  
GUO L H, JIANG Q W, WU H L, *et al.* High-brightness blue semiconductor laser source based on grating spectral beam combining [J]. *Chin. J. Lasers*, 2024, 51(13): 1301007. (in Chinese)
- [ 21 ] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.  
WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 1-19. (in Chinese)
- [ 22 ] 张俊, 王靖博, 彭航宇, 等. 分离反射式中继成像光谱合束光源 [J]. *中国激光*, 2022, 49(23): 2301001.

- ZHANG J, WANG J B, PENG H Y, *et al.* Spectral beam combining of diode lasers based on separated reflection relay imaging [J]. *Chin. J. Lasers*, 2022, 49(23): 2301001. (in Chinese)
- [ 23 ] ZHAO Y M, LIU C Y, FAN X H, *et al.* Optical system design based on DMD and triple-pass TIR prism for asteroid exploration [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(26): 43198-43212.
- [ 24 ] YAN S B, DUAN Y F, HUANG Q L, *et al.* An optical apparatus for inspecting adjacent surfaces defects of TEC components with equal-optical-path confocal imaging using optical wedge prisms [J]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2022, 2226(1): 012005.
- [ 25 ] CHARPENTIER A, HAMLIN S, HART B, *et al.* Compact laser beam combiner [C]. *Proceedings of the Solid State Lasers XXXIV: Technology and Devices, San Francisco*, 2025: 1334112.
- [ 26 ] GHOSH G. Temperature dispersion of refractive indexes in some silicate fiber glasses [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, 6(3): 431-433.
- [ 27 ] GHOSH G, ENDO M, IWASAKI T. Temperature-dependent Sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some optical fiber glasses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(8): 1338-1342.
- [ 28 ] VLASOVA S, VLASOV A, ALLOYAROV K, *et al.* Investigation of temperature dependence of radiation from semiconductor lasers and light emitting diodes [J]. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.*, 2020, 539(1): 012137.



曾越(1996-),女,河南郑州人,博士研究生,2021年于厦门大学获得硕士学位,主要从事高功率半导体激光器的光纤耦合光学系统以及封装结构与热管理技术方面的研究。

E-mail: zengyue@semi.ac.cn



仲莉(1980-),女,江苏连云港人,博士,研究员,博士生导师,2008年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事大功率半导体激光器方面的研究。

E-mail: zhongli@semi.ac.cn