

分布式猫眼腔免调试激光器发射端视场的优化

刘俊杰^{1,2,3}, 齐岳⁴, 盛泉^{1,2*}, 王思佳⁵, 王盟^{1,2}, 徐德刚^{1,2}, 史伟^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;
2. 光电信息技术教育部重点实验室-天津大学, 天津 300072;
3. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308;
4. 天津索维电子技术有限公司, 天津 300384;
5. 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

摘要: 为实现面向自适应激光无线传能应用的大范围免调试激光器, 对基于猫眼逆反射器的端面泵浦 Nd: GdVO₄ 激光器开展实验研究; 在补偿接收端的球差和场曲、优化激光器工作距离和接收端视场的基础上, 分析发现发射端各透镜的场曲所导致的猫眼逆反射器离焦是限制其视场角度(接收端离轴量容限)的主要因素。基于 Zemax 软件对发射端场曲进行分析计算, 并设计加工了矫正场曲的非球面透镜以避免接收端离轴情况下的发射端离焦, 实现优化发射端视场的目的。使用优化设计的非球面透镜后, 在 5 m 的长工作距离下激光器 4.6° 发射端视场内的输出功率均在其最高输出功率的 50% 以上, 相比使用普通球面透镜时的结果得到显著的提升。对比理论设计和实验结果仍有一定差距, 认为补偿激光晶体热透镜的像差是进一步优化发射端视场的关键。

关键词: 免调试激光器; 猫眼逆反射器; 视场; 像差; 场曲

中图分类号: TN242 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211108

Optimizing the transmitter field of view of an alignment-free distributed-cavity laser incorporating cat-eye optics

Liu Junjie^{1,2,3}, Qi Yue⁴, Sheng Quan^{1,2*}, Wang Sijia⁵, Wang Meng^{1,2}, Xu Degang^{1,2}, Shi Wei^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

1. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;
4. Tianjin Suowei Electronic Technology Co., Ltd., Tianjin 300384, China;
5. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To realize practical alignment-free distributed-cavity laser over a large dynamic range for adaptive laser wireless power transmission, experimental investigation was carried out based on an end-pumped Nd: GdVO₄ laser of cat-eye retroreflector. On the basis of compensating the spherical aberration and field curvature(FC) of the receiver, optimizing the laser working distance and field of view(FOV) of receiver, it was found that the out-of-focus of cat-eye retroreflector induced by FC of each lens at the transmitter was main factors

收稿日期: 2021-12-24; 修订日期: 2022-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(61975146); 航天五院杰出青年人才基金

作者简介: 刘俊杰, 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事激光技术方面的研究。

导师简介: 史伟, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光技术和太赫兹技术方面的研究。

通讯作者: 盛泉, 男, 副教授, 博士, 主要从事单频光纤激光器和固体激光器方面的研究。

for limiting FOV angle(off-axis tolerance at receiving end). FC of the transmitter was analyzed and calculated based on the Zemax software, aspherical lens with corrected FC was designed and fabricated to avoid the out-of-focus of the transmitter when the receiving end was off-axis, the purpose of improving the transmitter FOV was realized. Using the optimized design aspherical lens, the laser output power was over 50% of its maximum value at a long working distance of 5 m within transmitter FOV of 4.6° in the experiment. The result was enhanced significantly compared with that using the common spherical lens, but there was still a certain gap between the ideal designed value and the experimental results. It is considered that the optical aberration of the thermal lens of laser crystal is a key factor for further optimizing the FOV at the transmitter.

Key words: alignment-free laser; cat-eye retroreflector; field of view; optical aberration; field curvature

0 引言

用角锥或猫眼等具有逆反射特性的光学元件作为构成激光谐振腔的反馈器件,能够使激光器具有较大的失调容限,从而实现“免调试”运转的特殊效果^[1-3]。免调试激光谐振腔以往的主要应用目的在于提高激光器对复杂环境的适应性,大多采用角锥棱镜逆反射器、以高增益的大能量脉冲模式运转^[1,4]。近年来,以色列的 WiCharge 公司公开了一系列利用逆反射器件构成免调试的分布式激光谐振腔,以实现大动态范围的自适应无线激光传能,申请通信专利^[5-6];所谓“分布式谐振腔”指包含全反镜和激光增益介质的激光发射端与包含激光输出镜的接收端在空间上大尺度分离的结构,结合逆反射器件的特性,理论上能够实现激光器大范围免调试运转,为免调试激光器的研究和应用方向提供了新的思路。此后,同济大学的研究人员也发表了相关论文,讨论了此类传能和通信方法的潜在优点^[7-8]。然而,上述的专利和论文都没有对大范围免调试激光器的实际实现方法进行具体分析,在笔者课题组的近期工作之前^[9-11],兼顾工作距离和视场角度的大范围免调试激光器实验结果鲜有报道。

角锥棱镜逆反射器的顶点和楞线无法对光束提供有效的反馈,且逆反射过程中存在退偏作用,导致较大的损耗和模式退化^[12-13];而基于分布式谐振腔的自适应无线传能应用要求激光器能够提供稳定的连续波输出,对于损耗非常敏感。猫眼是角锥之外的另一种常用逆反射器件,一般由一片透镜和一片置于透镜焦点处的反射镜构成,理论上能够使以任意角度经过其光瞳入射的光束沿入射光路逆向返回。猫眼逆

反射器中透镜焦距和面型、反射镜的曲率和面型以及二者的间距都可以根据需要进行选择和调整,相对角锥更为灵活,也不存在角锥中的损耗和退偏等不利因素,在基于 Nd: YAG、Nd: YVO₄ 薄片、铜蒸汽、氦氛以及半导体等增益介质的激光器中都有应用猫眼逆反射器提高激光器失调容限的报道^[14-18]。其中,中国科学院上海光学精密机械研究所近期报道了同样以无线传能为应用目标、采用薄片 Nd: YVO₄ 作为增益介质的双猫眼谐振腔免调试激光器;激光器最大输出功率超过 10 W,在较短的工作距离(150 mm)下实现了接收端角度失调容限(半功率)超过 $\pm 11^\circ$,横向偏移容限(也即发射端视场)超过 ± 20 mm 的实验结果^[18]。在免调试激光器的实际应用中往往对于激光器的工作距离有一定要求,而长工作距离下谐振腔的稳区会发生明显的窄化;此时,透镜的球差和场曲等像差导致的猫眼结构离焦就会对激光器的工作距离和视场角度免调试动态范围产生明显的限制。为解决上述问题,笔者课题组在前期工作中通过理论分析和实验明确了像差的影响,并且优化光学设计对球差和场曲进行补偿,实现了 1~5 m 的工作距离范围以及 $\pm 30^\circ$ 的接收端视场角度范围;在不对激光谐振腔进行重新调整的情况下,激光接收端在该动态范围内移动和转动时激光器的输出功率波动小于 10%^[9-11]。

除前述的工作距离和接收端视场外,发射端的视场,也即激光接收端相对发射端光轴的偏移量容限,也是免调试激光器动态范围的一个重要方面。文中针对发射端视场进行优化,设计并加工非球面透镜矫正发射端的球差和场曲;优化后发射端视场得到明显提升,5 m 工作距离下的半功率视场全角达到 4.6° ,并对进一步优化的方法进行了讨论。

1 实验设计

图 1 给出猫眼腔免调试激光器的光路示意图。激光器光路基本结构与笔者课题组前期工作中的相似^[9-10], 光纤耦合输出的 808 nm 半导体激光器经透镜 F0 和 F1 准直和聚焦后, 泵浦激光增益介质 *a* 切割 Nd:GdVO₄ 晶体, 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm, 掺杂浓度 0.5-at.%, 对入射的随机偏振泵浦光吸收~90%, 根据端泵固体激光器热透镜计算公式, 在泵浦光斑半径 520 μm、最大泵浦功率 16.6 W 下, 晶体中热透镜焦距为~500 mm^[19]。1063 nm 激光谐振腔由全反镜 M1 和透过率 *T*=50% 的输出镜 M3 构成, 腔内还插入另一片对 1063 nm 激光 *R*=30% 的部分反射镜 M2 构成复合腔结构以降低发射端与接收端之间光路上的激光功率密度^[10]。谐振腔全反镜 M1 与透镜 F1、内腔部分反射镜 M2 与透镜 F2 和 F3、激光输出镜 M3 与透镜 F4 之间的间距均约为相应的透镜焦距, 即分别构成 4 个猫眼逆射结构; 透镜 F2 与 F3 构成望远镜系统, 起到对腔内激光进行准直扩束、压缩发散角的作用。上述从

泵浦源到透镜 F3 构成激光发射端, 而接收端为多片透镜与 M3 镜构成的大视场猫眼逆反射器^[11], 腔内元件除 M2 镜外均镀有 1063 nm 增透膜。此前的工作中^[9-11], 课题组已经通过矫正接收端像差和工作点的优化实现了 1~5 m 工作距离和±30°接收端视场的免调试工作范围; 对复合腔的反馈、谐振腔稳区、工作距离和视场以及像差的优化原则也进行了详细的分析讨论, 文中的主要目的在于优化发射端的视场, 不再对上述内容进行赘述。如图 1 所示, 接收端偏离发射端光轴情况下, 发射端的光路相对其光轴会产生一定的夹角, 即图中的 θ 角, 由发射端和接收端的光瞳位置决定。根据参考文献 [10] 中的分析可知, 光束以一定角度入射时场曲会导致猫眼逆反射器离焦, 是视场角度的主要限制因素。因此, 在实验中使用了焦距分别为 25.4 mm、25.4 mm 和 51.8 mm 的 K9 球面平凸透镜作为 F1、F2、F3 的组合以及自行设计加工的焦距分别为 24.6 mm、24.6 mm 和 48.3 mm 的非球面平场透镜的组合“两种发射端”设计进行对比。

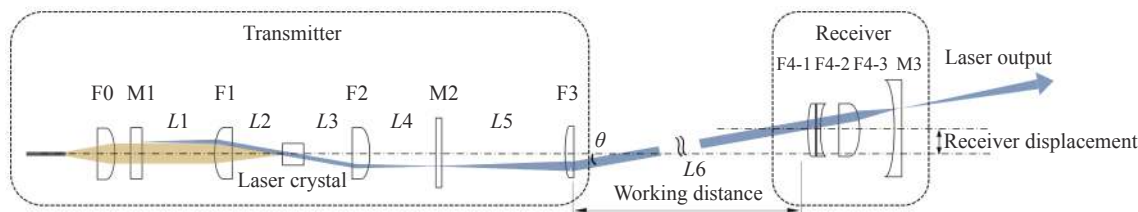


图 1 分布式猫眼腔免调试激光器实验光路图

Fig.1 Schematic of alignment-free distributed-cavity laser incorporating cat-eye optics

考虑准直高斯光束经过 F3 的光瞳 (位于其焦点附近) 入射, 经历整个发射端往返后出射的情况。由于发射端长度较短 (<160 mm), 可以忽略高斯光束的衍射效应, 采用 Zemax 进行近似计算。图 2(a) 给出使用普通球面透镜组合时光束往返的 Zemax 光路图, 模拟中晶体热透镜近似为理想薄透镜, 设置浮动光阑保证经历往返后的逆射光角度与入射光一致。可以看出, 存在一定入射角度时, 由于各透镜场曲的累积, 入射平行光经发射端单程传输后到达全反镜 M1 时其光束焦点明显与镜面有一定偏离, 进一步经历往返后的出射光线也不再是平行光线; 即发射端作为一个整体不能保证一定视场内入射光的逆射效果, 而是存在随入射角度变化的离焦。图 2(b) 给出不同入射角度

时发射端整体的光焦度计算结果: 在入射角仅有 1°的情况下, 光焦度为-0.37 D, 而在 2°的入射角下光焦度会达到-1.47 D, 根据此前对离焦容限的分析和实验结果^[10], 如此大的光焦度显然是不可接受的, 会严重限制发射端的视场。

为克服场曲导致猫眼结构离焦对发射端视场的限制, 设计加工了前述焦距分别为 24.6 mm 和 48.3 mm、像面为平面的非球面透镜, 用作发射端透镜 F1/F2 和 F3。图 3(a) 给出此时的发射端光路, 可以看出经 F3 光瞳以不同角度入射的光束经 F1 聚焦后的像面与全反镜 M1 匹配很好。图 3(b) 为理论计算的往返光焦度随入射角度的变化关系, 可以看出在±5°的视场内场曲导致的光焦度都不超过 0.07 D; 根据前期分析,

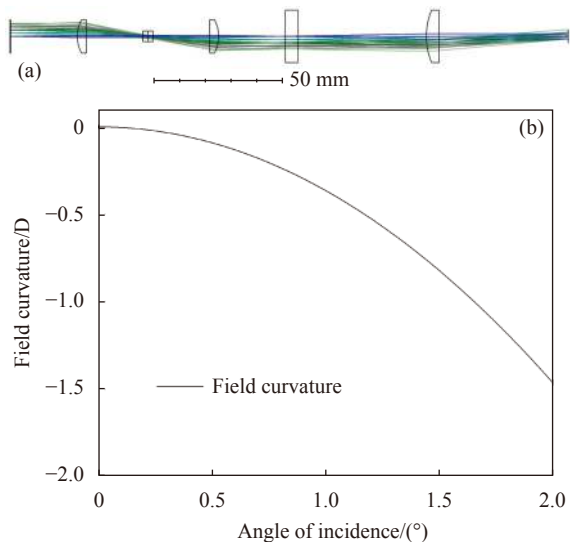


图 2 使用普通球面透镜时发射端 (a) Zemax 光路图和 (b) 场曲计算结果

Fig.2 (a) Zemax cross section and (b) calculated field curvature of the laser transmitter with spherical lenses

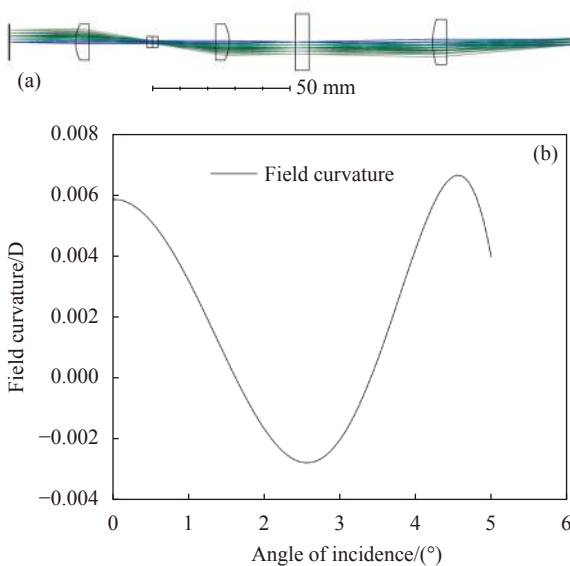


图 3 使用优化非球面透镜时发射端 (a) Zemax 光路图和 (b) 场曲计算结果

Fig.3 (a) Zemax cross section and (b) calculated field curvature of the laser transmitter with optimized aspherical lenses

在该离焦程度下激光器输出功率不会受到明显影响。需要说明的是,接收端离轴会导致发射端振荡激光光路离轴,使得振荡激光光路与泵浦光路(也即光轴)的交叠发生一定程度的下降,但由于 Nd: GdVO₄ 晶体折射率较高 (~2.2 @ 1063 nm), 光路在晶体内部的角度较小, 计算得到 $\theta=5^\circ$ 时晶体内部振荡光与光轴

的夹角仅为 $\sim 1.1^\circ$, 代入晶体对泵浦光的吸收系数后可知交叠区域内的泵浦功率在总吸收泵浦功率的 95% 以上, 对激光器效率的影响很小。

2 实验结果和讨论

在 16.6 W 泵浦功率下分别测试使用普通球面透镜和平场非球面透镜构成的激光发射端的视场, 也即所允许的接收端离轴容限; 所用接收端为参考文献 [11] 中的多镜片大视场猫眼逆反射器, 已实验验证了该接收端具有良好的工作距离和视场特性。测试中接收端光轴与发射端光轴保持平行, 5 m 工作距离下使用球面和非球面发射端时最大输出功率为分别 4.37 W 和 5.13 W, 输出功率的差异由发射端的球差所致。图 4 中黑色空心方块为使用普通球面透镜发射端在工作距离 $L=5$ m、泵浦功率 16.6 W 时测得的激光输出功率随接收端相对发射端光轴偏移量的变化关系。需要说明的是, 由于接收端距离发射端较远, 事实上难以确定接收端是否严格位于发射端的光轴上; 因此, 测试中以获得最高激光输出功率处为初始位置, 记录接收端向两侧偏移时的输出功率变化情况。由于发射端带有曲率的器件较多, 限于装调精度, 接收端向两侧离轴时的输出功率变化趋势也并不完全对称, 因此后文中给出接收端分别向两侧离轴使输出

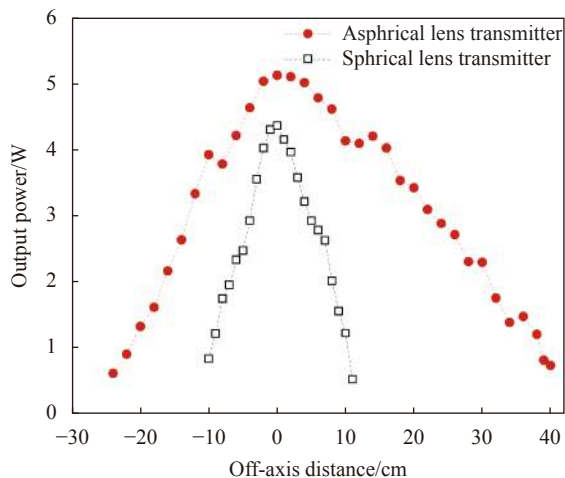


图 4 普通球面透镜和优化非球面透镜发射端 5 m 工作距离下激光输出功率随接收端离轴量的变化关系

Fig.4 Laser output power as a function of receiver off-axis distance when using the common spherical lenses and optimized aspheric lenses(The working distance was 5 m)

功率降至其最大值一半的总范围来表征发射端的视场,相应给出的视场角度也为全角。可以看出,激光输出功率随接收端离轴量(发射端入射角度)增大而下降,5 m 工作距离下激光输出降至其最大值一半处的接收端离轴量为 13 cm,对应视场全角为 1.5°。工作距离分别为 2 m、3 m 和 4 m 时的视场全角分别为 2.3°、2.0°和 1.8°,如图 5 中黑色方块所示。不同工作距离下的视场角度并非定值,而是随工作距离增加而减小,这是由于谐振腔稳区随工作距离的增加而变窄、激光器对像差导致的离焦更为敏感^[9-10]。

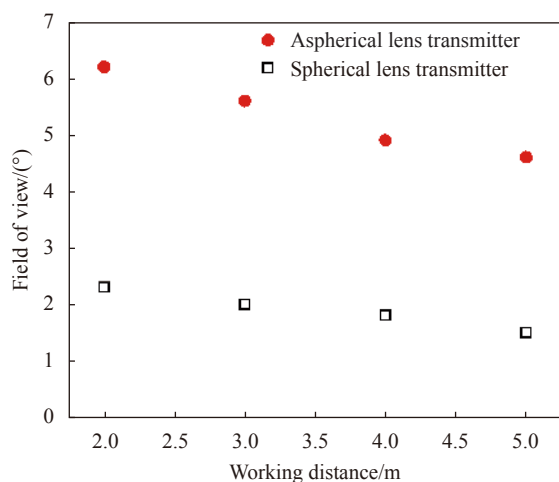


图 5 普通球面透镜和优化非球面透镜发射端视场角度随工作距离的变化关系

Fig.5 Transmitter field of view versus working distance when using the common spherical lenses and optimized aspherical lenses

换用优化后的非球面透镜构成激光发射端,固定泵浦功率 16.6 W 时,5 m 工作距离下向两侧的半功率离轴范围提升至 40 cm,在接近 60 cm 的离轴量范围内都能够获得 1 W 以上的有效激光输出,如图 4 中红色圆点曲线。与其他基于猫眼逆反射器的免调试固体激光器报道中几十 mm 的横向位移容限相比^[18],文中优化后的接收端横向位移容限提升了一个数量级,实现了大范围免调试工作的效果。图 5 给出以角度表示的发射端半功率视场全角随工作距离的变化关系,非球面透镜发射端在 2 m、3 m、4 m 和 5 m 工作距离下存在 21 cm、29 cm、34 cm 和 40 cm 的双侧离轴容限,对应视场角度全角分别仅为 6.2°、5.6°、4.9°和 4.6°。尽管优化后的激光发射端视场相比使用普通球面透镜时的结果得到了明显的提升,但仍

与±5°的设计预期存在较大的差距。分析原因,笔者认为这主要在于激光晶体热透镜的像差:在非球面透镜的设计过程中,将晶体热透镜简化为理想的薄透镜,但实际情况并非如此。热透镜同样存在球差、像散和场曲等像差,且在高泵浦功率下尤为严重。因此,尽管根据理想薄透镜简化情况设计的非球面透镜对场曲起到了一定的补偿作用,使发射端视场得到了一定改善,但热透镜引入的像差没有得到有效的补偿,残留的场曲导致大视场角度下仍存在明显的离焦。为解决此问题,可考虑使用波前探测器等手段精确测量热透镜的像差,以进一步优化非球面透镜的设计对此进行补偿。

3 结 论

为优化分布式猫眼腔免调试激光器的发射端视场,设计加工了非球面透镜对场曲进行矫正。用非球面透镜代替普通球面透镜后,发射端视场得到明显提升,在 5 m 的长工作距离下半功率视场达到 4.6°,接收端在垂直于发射端光轴的方向上超过 60 cm 的范围内横向移动时激光器能够产生有效的激光输出。发射端视场实验结果相对其设计预期水平仍有明显的差距,分析原因认为是激光晶体热透镜的像差所致。通过精确测量热透镜像差并进行相应的补偿,有望实现对发射端视场的进一步优化提升。

参考文献:

- [1] Sun B, Zhu M, Tan C, et al. Latest progress of research on adjust-free solid state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3244-3251. (in Chinese)
- [2] Xu Z. Cat's eye resonator He-Ne laser and its displacement sensors [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- [3] Xu Z, Zhang S, Li Y, et al. Adjustment-free cat's eye cavity He-Ne laser and its outstanding stability [J]. *Optics Express*, 2005, 13(14): 5565-5573.
- [4] Liu X, Cheng Y, Wang S, et al. Application of prism resonator in 1.57 μm eye-safe OPO laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 351-356. (in Chinese)
- [5] Della-Pergola R, Aplert O, Nahmias O, et al. Spatially distributed laser resonator: US9553418(B2)[P]. 2017-01-24.
- [6] Aplert O, Ronen E, Nahmias O, et al. Distributed coupled resonator cavity: US10193297(B2)[P]. 2019-01-29.

- [7] Zhang Q, Fang W, Liu Q, et al. Distributed laser charging: A wireless power transfer approach [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 3853-3864.
- [8] Xiong M, Liu M, Jiang Q, et al. Retro-reflective beam communications with spatially separated laser resonator [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(8): 4917-4928.
- [9] Sheng Q, Wang M, Ma H, et al. Continuous-wave long-distributed-cavity laser using cat-eye retroreflectors [J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 34269-34277.
- [10] Liu J, Wang A, Sheng Q, et al. Large-range alignment-free distributed-cavity laser based on an improved multi-lens retroreflector [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(3): 031407.
- [11] Sheng Q, Wang A, Wang M, et al. Enhancing the field of view of a distributed-cavity laser incorporating cat-eye optics by compensating the field-curvature [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 151(108011).
- [12] Xu L, Yang Y N. Laser-mode simulation of corner cube resonator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0114001. (in Chinese)
- [13] Zhou G S, Alfrey A J, Casperson L W. Modes of a laser resonator with a retroreflecting corner cube mirror [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(9): 1670-1674.
- [14] Zeng Q, Wan Y, Qin K. Laser resonator of novel configuration applicable to efficient electro-optical countermeasure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0806002. (in Chinese)
- [15] Singh B, Daultabad S R, Subramaniam V V, et al. Performance of a 80 W copper vapor laser with “alignment free” unstable CAT-EYE resonator and other configurations using intra-cavity apertures [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(24): 6080-6090.
- [16] Xu Z, Zhang S, Du W, et al. Misalignment sensitivity of the cat's eye cavity He-Ne laser [J]. *Optics Communications*, 2006, 265(1): 270-276.
- [17] Fermigier B, Lucas-Leclin G, Dupont J, et al. Self-aligned external-cavity semiconductor lasers for high resolution spectroscopy [J]. *Optics Communications*, 1998, 153(1-3): 73-77.
- [18] Wang W, Gao Y, Sun D, et al. Adjustable-free and movable Nd:YVO₄ thin disk laser based on the telecentric cat's eye cavity [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 111403.
- [19] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(19): 1831-1833.