基于猫眼逆反射器的大范围免调试激光器*

盛泉[1)2)] 耿婧旎[1)2)] 王爱华[1)2)] 王盟[1)2)] 齐岳[3)]
刘俊杰[1)2)] 付士杰[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) (天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

3) (天津索维电子技术有限公司, 天津 300308)

(2022 年 10 月 14 日收到; 2022 年 11 月 8 日收到修改稿)

利用具有逆反射特性的光学元件构成激光器的谐振腔, 能够赋予激光器大范围免调试工作的潜力. 本文讨论了谐振激光自适应无线传能/通信等新兴应用对激光器免调试工作范围的要求, 设计了基于猫眼逆反射器的大范围免调试激光器, 采用腔内望远镜系统和复合腔结构分别拓展激光器的工作距离范围和提升激光安全性. 通过对激光谐振腔的稳定性分析和对猫眼逆反射器的像差分析, 明确了球差和场曲导致的猫眼离焦分别是限制免调试激光器工作距离和视场的关键因素. 实验中通过优化光学设计补偿像差, 实现了端面泵浦 Nd:$GdVO_4$ 激光器的大范围免调试运转. 16.6 W 泵浦功率下, 激光器接收端在 1—5 m 工作距离范围内移动和在±30°接收端视场范围内转动时输出功率保持在 5 W 以上, 功率波动小于 10%, 无需重新准直调节. 5 m 工作距离下, 在 4.6°发射端视场内输出功率保持在其最大值的 50% 以上, 对应接收端横向移动范围达到 40 cm. 本工作明确了猫眼腔免调试激光器的设计优化原则, 为相关研究提供了实验结果参考.

关键词: 免调试激光器, 猫眼逆反射器, 谐振腔稳区, 像差

PACS: 42.60.–v, 42.60.By, 42.60.Da **DOI:** 10.7498/aps.72.20221956

1 引 言

激光是最具代表性的定向能载体, 基于激光实现高效、高速的无线能量和信息传输是研究人员长久以来的追求[1,2]. 近年来出现了基于免调试激光器的谐振激光自适应无线传能/通信技术: 与图 1(a) 所示的常规激光无线传能/通信技术中通过跟瞄系统将光束投射到接收端不同, 该方法中将激光谐振腔的输出镜与能量/信息接收端的光电池/探测器布置在一起, 使得在谐振腔内振荡、经输出镜输出的激光自动投射到接收端, 不再需要复杂昂贵的跟瞄系统, 如图 1(b) 所示. 另一方面, 由于激光发射端和接收端之间的传输光路位于激光谐振腔之内, 侵入传输光路的物体会阻断激光振荡而不再受到激光辐照, 因此该技术具有天然的安全性[2,3]. 理论上, 利用角锥、球透镜或猫眼 (cat-eye retroreflector, CER) 等具有逆反射特性的光学元件构成激光谐振腔后, 激光器就具有免调试工作的能力, 即激光器在其发射端和接收端之间的距离和相对朝向在一定范围内变化时能保持高效工作, 从而使自适应的谐振激光无线传能/通信成为可能.

该技术由以色列的 Wi-Charge 公司带入大众视野后即受到广泛的关注[3,4], 其后 Liu 等[2,5] 对该

* 国家自然科学基金 (批准号: 61975146, 62105240, 62075159) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shijie_fu@tju.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

© 2023 中国物理学会 Chinese Physical Society

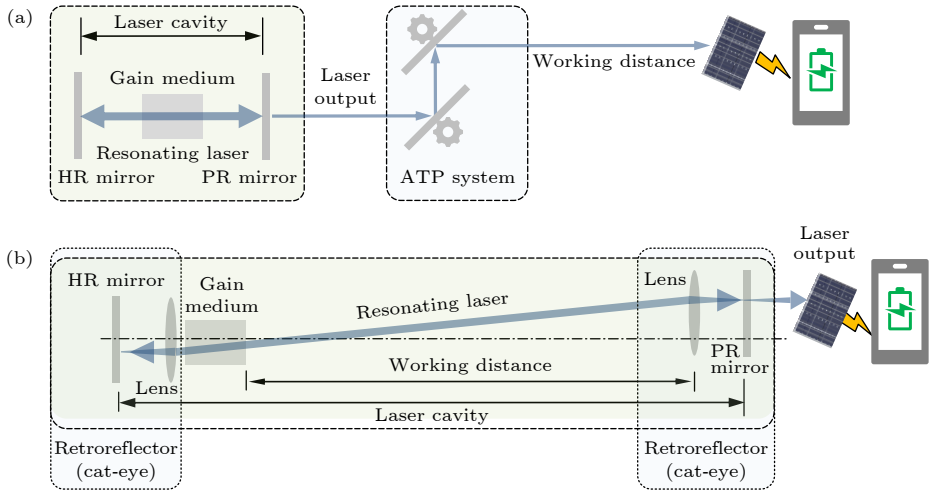

图 1 基于跟瞄的激光无线传能 (a) 和谐振激光自适应无线传能 (b) 示意图

Fig. 1. Schematic of the (a) conventional laser power transfer based on acquisition, tracking, and pointing (ATP) system and (b) adaptive resonant beam wireless laser power transfer/communication.

方法的应用前景进行了讨论和展望. 大动态范围的免调试激光器是实现谐振激光自适应无线传能/通信的关键, 此处动态范围包括工作距离、发射端视场和接收端视场 3 个方面, 如图 2 所示: 工作距离即包含全反镜和增益介质的激光发射端与激光接收端 (输出端) 之间的距离 d; 接收端视场 (field of view, FoV)α 指接收端自身的俯仰偏摆方向变化, 其光轴未对准发射端时, 接收端光轴与振荡光路夹角的容限; 发射端视场 β 则代表了接收端相对发射端光轴偏离的容限. 激光器只有发射端和接收端互相在对方的视场内, 且间距在有效工作距离范围内时才能正常工作.

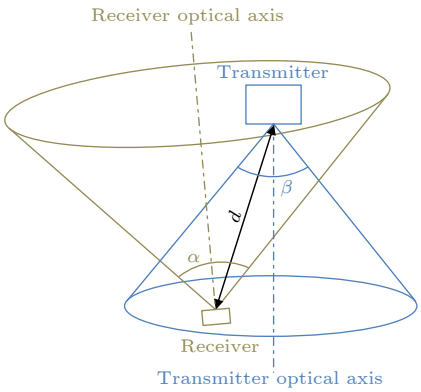

图 2 免调试激光器的工作距离、接收端视场和发射端视场

Fig. 2. Working distance, receiver FoV and transmitter FoV of the alignment-free laser.

在大范围免调试激光器的具体实现方面, Lim 等[6] 在 2019 年报道了基于半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA) 增益和角锥逆反射器的免调试激光器, 在 1 m 的工作距离下获得了毫瓦量级的激光输出, 并利用 SOA 的宽带增益特性和光栅色散实现了约 40 mm 的接收端横向位移范围 (约 2.3°发射端视场). 2021 年, 上海光机所的 Wang 等[7] 报道了基于薄片 Nd:YVO_4 增益介质和猫眼逆反射器的免调试激光器, 在 150 mm 的工作距离下实现了±13°的接收端视场, 接收端横向位移范围为约±20 mm, 最大输出功率超过 10 W. 2022 年, 长春光机所的 Zhang 等[8] 报道了面向传能应用的光泵浦外腔 VECSEL 激光器, 工作距离 2 m 时, 15 W 泵浦功率下激光输出功率 86.3 mW, 接收端横向位移容限小于 10 mm. 同年, Javed 等[9] 报道了基于光纤增益和球透镜逆反射器的免调试激光器, 能够在长达 30 m 的工作距离下提供 400 mW 的激光输出功率, 球透镜理论上具有不受限制的接收端视场, 但该方案中的光纤耦合结构在很大程度上限制了发射端视场, 即使进一步通过光栅等元件引入色散也只能允许一个方向上的接收端离轴, 无法实现二维的发射端视场. Liu 等[5] 采用类似图 1(b) 光路结构开展了实验工作, 泵浦功率为 37.3 W 时, 在 2.6 m 工作距离内能够产生约 5 W 的激光输出, 激光功率降至接近 0 时的接收端离轴量为±18 cm(发射端视场±5.1°), 接收端视场未进行说明. 除高校和科研院所之外, 华为公司等[10] 工业界的代表也有开展相关研究工作的报道.

为实现激光器的大范围免调试工作, 本文选择以猫眼逆反射器构成激光器的谐振腔. 经过分析,

认为球差和场曲等像差导致的猫眼离焦是限制激光器工作距离和视场动态范围的主要因素. 通过优化激光谐振腔设计和补偿像差, 实验实现了激光器的大范围免调试工作: 在不对谐振腔进行任何重新准直调节的情况下, 端面泵浦的 1063 nm Nd:$GdVO_4$ 激光器泵浦功率 16.6 W 时, 1—5 m 工作距离和±30°接收端视场内激光输出功率保持在 5 W 以上且波动小于 10%, 5 m 工作距离下 4.6°发射端视场内激光输出功率大于其最大值的 50%. 此外, 采用复合腔结构降低发射端与接收端之间传输光路上的激光功率密度, 优化了激光安全性. 本文对相关实验结果以及猫眼腔免调试激光器的设计优化原则进行总结和讨论.

2 激光器的谐振腔设计

图 3 给出了大范围免调试激光器的光路示意图. 光纤耦合输出的泵浦光经过透镜 L0 和 L1 准直和聚焦后入射激光晶体, 实验中所用晶体为原子掺杂浓度 0.5% 的 a 切割 Nd:$GdVO_4$ 晶体, 尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm; 激光波长 1063 nm, 泵浦波长为 808 nm, 激光晶体处泵浦光斑半径约 500 μm. 平面激光全反镜 M1 与透镜 L1 构成发射端猫眼, 激光输出镜 M3 与透镜 L4 构成接收端猫眼. 考虑激光器工作距离的要求以及高斯光束固有的发散特性, 腔内插入两片透镜 L2 和 L3, 二者间距等于其焦距之和, 构成望远镜系统, 起到对光束扩束准直、压缩发散角的作用. 腔内各透镜均镀有 1063 nm 激光增透膜. 从 L0 到 L3 的器件构成激光发射端, L4 与 M3 构成的猫眼为激光接收端. 此外, 腔内还在透镜 L2 与 L3 相重叠的焦点处插入一片平面部分反射镜 M2, 形成复合腔结构, 起到降低传输光路上的激光功率密度、提高激光安全性的作用[4,11,12]. 实验中 M2 和 M3 对 1063 nm 激光的反射率均为 40%, 对应整个复合腔的等效耦合输出透过率为约 18%, Nd:$GdVO_4$ 晶体的受激发射截面相对常用的 Nd:YVO_4 晶体较小, 能够保证所用的最大泵浦功率 16.6 W 下内腔部分不会单独起振. 各器件之间的距离分别用符号 d_1—d_7 表示.

对于复合腔的参数设计, 首先激光谐振腔整体 M1—M3 应是稳定腔, 才能形成激光振荡. 考虑 M1-M2 内腔部分与 M2-M3 外腔部分之间模式耦合的要求, 应使内腔部分 M1-M2 为临界腔, 允许以任意高度平行于光轴入射的光在其中振荡; 同时外腔部分 M2-M3 为稳腔, 则激光器的模式和谐振腔稳定性完全由外腔部分所决定. M2 位于 L2 和 L3 重叠的焦点处, 与二者分别构成两个猫眼. 只有经过猫眼光瞳入射的光束才能得到较为理想的逆反射效果, 损耗最小; 因此当接收端相对发射端光轴存在一定偏移量 Δ 时, 激光在发射端与接收端之间以图 3(b) 所示的光路振荡, 振荡光路与发射端光轴之间的夹角 θ_1 由二者的光瞳位置决定, 所允许的 θ_1 的最大值即为发射端视场 α. 接收端自身的朝向也可能导致其光轴与振荡光路存在

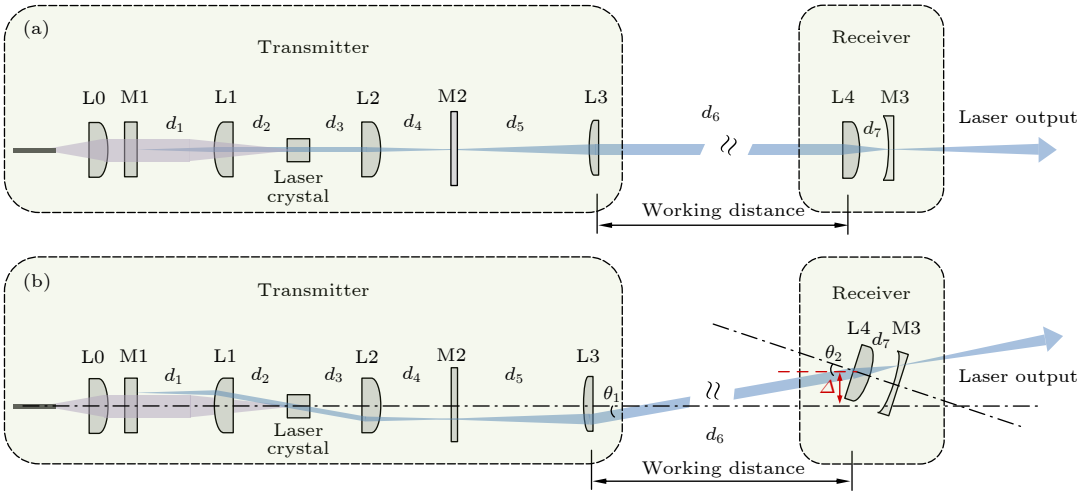

图 3 免调试激光器光路示意图 (a) 接收端位于发射端光轴上且朝向发射端; (b) 接收端相对发射端光轴存在偏离, 且朝向与振荡光路存在夹角

Fig. 3. Schematic of the alignment-free laser: (a) The receiver and the transmitter are on the optical axes of each other; (b) the receiving end deviates from the optical axis of the transmitting end, and the orientation has an angle with the oscillating optical path.

一定夹角 θ_2, 所允许的 θ_2 的最大值即为接收端视场 β. 理想情况下, 发射端和接收端的视场由器件的孔径决定, 而实际上由于谐振腔稳定性的要求, 光学元件的像差成为更重要的限制因素.

利用 ABCD 矩阵计算谐振腔的稳区, 对于自适应激光无线传能的应用场景, 一方面工作距离 d_6 是一个大范围变化的变量, 另一方面考虑长工作距离对于激光准直性的要求, 透镜 L3 与 M2 镜的间距 d_5 应正好等于 L3 的焦距, 发射端的其他参数也应是固化的, 因此需要着重考虑的是接收端猫眼间距 d_7 和工作距离 d_6 对谐振腔稳定性的影响. 图 4 给出工作距离 d_6 在 1—5 m 范围内变化时 d_7 的稳区, 计算中各透镜和激光晶体的热透镜均近似为薄透镜处理, 理论计算 Nd:$GdVO_4$ 晶体在实验中所用的最大泵浦功率 16.6 W 下热透镜焦距 f_t 为 500 mm[13], 相关参数如表 1 所示. 其中透镜 L1 与 L2 选用一致的参数以简化系统设计, 为优化工作距离, L3 的焦距约为 L2 焦距的 2 倍, 将 L2 左侧半径约 500 μm 的光束扩束到半径约 1 mm, 与未加入腔内望远镜系统对光束扩束准直的情况相比, 5 m 工作距离处的接收端光斑半径从约 3.4 mm 压缩至约 2 mm. 从图 4 中可以看出, 随着工作距离 d_6 的增大, 接收端猫眼间距 d_7 的稳区发生严重的窄化. 当透镜 L4 的焦距 $f_4 = 50$ mm 时, d_7 的稳区范围从 $d_6 = 1$ m 时的 50—52.94 mm 收窄到 $d_6 = 5$ m 时的 50—50.52 mm. 如使用更短焦距的透镜 L4, 则 d_7 的稳区也更窄: 例如 $f_4 = 25$ mm, $d_6 = 5$ m 时 d_7 稳区范围为 25—25.13 mm, 其宽度仅是 $f_4 = 50$ mm 时相同工作距离下的四分之一. 因此可以预见, 当激光器的工作距离较长时, d_7 相对其优化值的微小偏离即会严重影响激光器的输出功率, 甚至导致激光不能起振. 从另一个角度解释, 只有合焦的猫眼才能让逆射光与入射光的发散角一致; 如果二者的发散角度不一致, 相当于光束经猫眼逆射后其中的部分能量不在原来的模式中, 即模式不能完全自再现, 遭受了一定损耗. 激光器的工作距离越长, 发散角变化造成的逆射光与入射光之间的偏差也就越大, 因此猫眼离焦的容限也就越小, 对应 d_7 的稳区范围越窄.

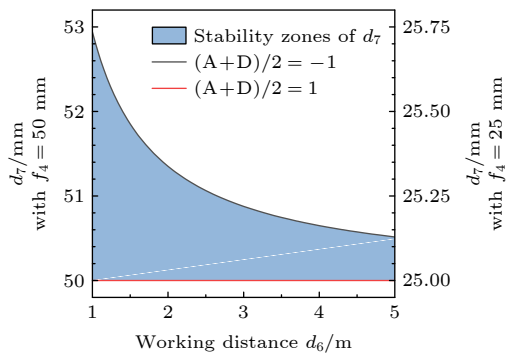

图 4 不同工作距离 d_6 下接收端猫眼间距 d_7 的稳区

Fig. 4. Stability zones of receiver CER distance d_7 as a function of working distance d_6.

表 1 计算和实验中所用参数

Table 1. Parameters used in the experiment and calculation.

Lenses	Focal length/mm	Distances	Length/mm
L0	10	d_1	23.8
L1	24.6	d_2	23
L2	24.6	d_3	23.8
L3	48.3	d_4	23
L4	25, 50 (51.8)	d_5	49.1
f_t	500	d_6	1000—5000

3 像差的影响

理想情况下, 激光器的免调试范围仅受到光学元件孔径的限制. 光束经过较长的工作距离到达接收端时会发散成较大的尺寸, 因此要求接收端透镜有足够的孔径; 同时, 各猫眼透镜和反射镜的孔径决定了视场的理论上限. 但在实际工作中, 球差和场曲等像差会对激光器的免调试范围产生严重的限制.

球差是球面光学元件固有的一种像差, 在球差的作用下不同入射高度的光线的实际焦点相对近轴像点发生不同程度的偏离, 如图 5(a) 所示. 而猫眼只能对合焦的光线实现良好的逆射作用, 因此在球差的作用下腔内振荡的光束中必然有部分能量离焦, 不能得到逆射和形成自再现, 影响腔模和产生损耗[11,14–16]. 在工作距离 5 m 时接收端的基模光斑半径会达到 2 mm[11], 光束口径越大, 相应球差越严重. 图 5(b) 给出理论计算的焦距 $f = 25$ mm 的 K9 平凸透镜的球差, 也即不同半径的光束边缘的实际焦点位置相对透镜理论焦点的偏移量. 可以看出, 当光束半径 2 mm 时, 球差导致的离焦达到 0.70 mm, 已明显大于 5 m 工作距离下接收端猫眼间距 $d_7 = 0.13$ mm 的稳区宽度. 根据谐振腔稳区的定义, 不满足稳定性条件时光线在腔内经过有限次往返后会逸出谐振腔, 形成损耗.

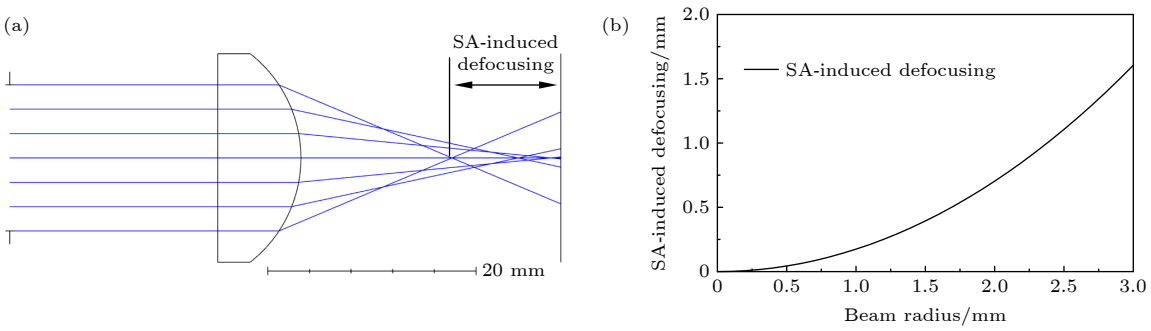

图 5 使用 $f = 25$ mm 的 K9 平凸球面透镜时球差导致的猫眼逆反射器离焦

Fig. 5. CER defocusing induced by the spherical aberration of a K9 plano-convex spherical lens with $f = 25$ mm.

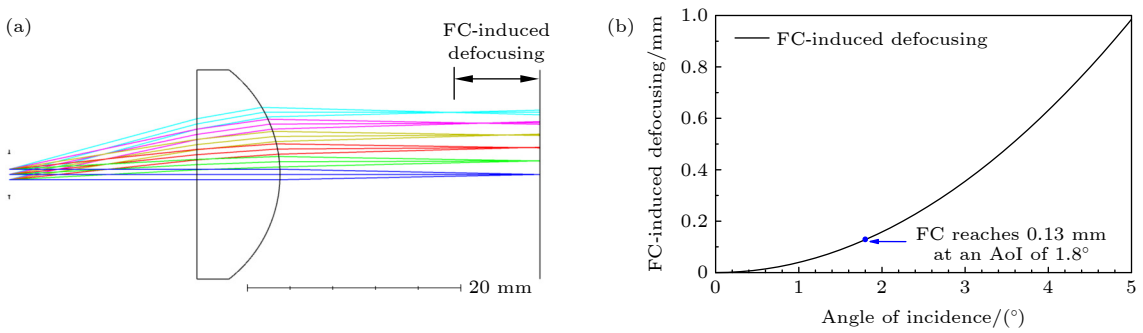

图 6 使用 $f = 25$ mm 的 K9 平凸透镜时场曲导致的猫眼逆反射器离焦

Fig. 6. CER defocusing induced by the field curvature of a K9 plano-convex lens with $f = 25$ mm.

因此, 要拓展激光器的工作距离, 需要对球差进行有效的控制.

如图 3(b) 所示, 当发射端和接收端的光瞳所决定的振荡激光光路与发射端和接收端的光轴存在夹角时, 光束以一定角度入射猫眼逆反射器; 不同角度入射光束的实际焦面既不是平面, 也不是曲率半径 (radius of curvature, RoC) 等于透镜焦距的曲面, 即存在场曲, 如图 6(a) 所示. 场曲也不可避免地导致猫眼的离焦[12,17], 图 6(b) 给出反射镜为平面镜的常规"远心猫眼"中场曲导致的光束实际焦点相对位于透镜理论焦点处的反射镜面的偏离量. 当所用透镜为 $f = 25$ mm 的 K9 平凸透镜时, 在入射角度仅为 1.8°时场曲导致的猫眼离焦量就达到 0.13 mm, 如图 6(b) 所示, 与 5 m 工作距离下 d_7 的稳区宽度相等, 且离焦量随入射角度的增大趋势变快. 因此, 尽管理想情况下 25.4 mm 的透镜孔径决定的猫眼视场超过±26°, 但实际工作中场曲导致的猫眼离焦会严重限制激光器的视场, 在长工作距离导致稳区范围很窄时尤为明显. 为实现激光器的大范围免调试运转, 也要考虑场曲的补偿.

4 实验结果和讨论

按照图 3 的光路结构开展实验研究, 入射激光晶体 Nd:$GdVO_4$ 的 808 nm 泵浦光功率为 16.6 W. 首先令发射端与接收端互相在对方的光轴上, 研究激光器的工作距离特性. 随着激光器工作距离 d_6 的增大, 接收端的光斑尺寸增大, 球差的影响逐渐增强, 同时谐振腔的稳区变窄, 导致激光输出功率逐渐降低. 接收端球面透镜焦距 $f_4 = 25$ mm 时, 在发射端的球差得到补偿的情况下[18], 随着工作距离 d_6 从 1 m 拉长到 5 m, 激光输出功率从 5.95 W 下降至 1.16 W, 如图 7 中蓝色菱形曲线. 当 $f_4 = 51.8$ mm 时, 由于球差得到一定缓解, 同时 d_7 的稳区范围相对较宽, 激光输出功率随工作距离 d_6 的下降趋势变缓 (黑色方块), 1 m 和 5 m 工作距离下输出功率分别为 6.28 W 和 4.54 W, 验证了球差导致的猫眼离焦是限制激光器工作距离的主要因素. 在此基础上, 选用 $f = 25$ mm 的消球差非球面透镜作为接收端透镜 L4, 激光器的工作距离特性得到进一步提升 (红色圆圈), 1 m 和 5 m 工作距离下输出功率分别为 6.45 W 和 5.84 W. 需要说明

的是, 上述输出功率是在不同工作距离 d_6 下分别优化接收端猫眼间距 d_7 得到的最大输出功率. 在工作距离增大的过程中, 为获得最大输出功率需要将 d_7 略微减小, d_6 从 1 m 增大到 5 m 的过程中, d_7 的变化量与其在 $d_6 = 5$ m 时的稳区范围相近. 考虑实际应用中整个接收端应是一个固化的整体, 使用非球面透镜 L4 在 $d_6 = 5$ m 时优化并固定接收端猫眼间距 d_7 后, 工作距离 d_6 在 1—5 m 范围内变化时激光输出功率能够始终保持在 5.75 W 以上 (灰色圆点), 且波动小于 10%, 实现了激光器工作距离方面的大范围免调试工作.

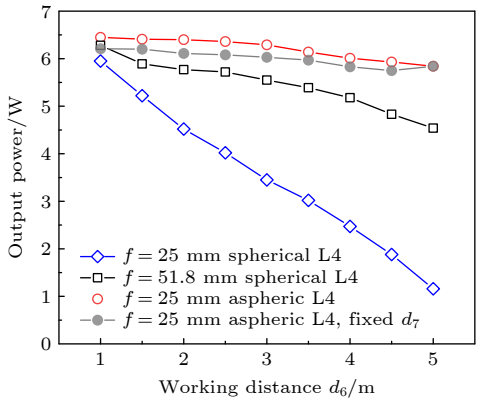

图 7 不同接收端透镜球差条件下激光器的工作距离特性实验结果

Fig. 7. The experimental working distance behavior of the laser using receiver lenses with different SA.

在接收端视场方面, 当激光器工作距离较短, 在几十厘米时, 采用常规猫眼设计就能够实现仅受器件孔径所限的较大接收端视场, 与 Wang 等[7]的报道类似. 但是, 随着工作距离的增大, 接收端猫眼间距 d_7 的稳区变窄, 场曲导致的猫眼离焦对接收端视场的限制越发严重. 如图 8 所示, 工作距离 5 m 时输出镜 RoC $= f_4 = 51.8$ mm 的猫眼接收端视场 (以输出功率降至其最大值一半计) 小于±3°(红色圆点), 而输出镜为平面镜的“远心猫眼”视场更小 (黑色方块), 不到±2°, 这也和后者的场曲离焦相对前者更严重的理论计算结果相符, 验证了场曲导致的猫眼离焦是限制视场的主要因素. 在此基础上, 分别设计了平场非球面透镜、反射镜曲率半径与透镜像面相适配 (蓝色菱形) 以及多镜片改进猫眼 (绿色五星) 等结构来补偿场曲导致的猫眼离焦[12,19], 在 5 m 的长工作距离下实验实现了最大±30°的接收端视场, 此范围内 16.6 W 泵浦功率下的激光输出功率始终保持在 5 W 以上, 无需对谐振腔进行任何重新准直调整. 得益于泵浦光与振荡光较好的模体积匹配以及对像差的有效控制, 接收端移动和转动过程中激光输出保持了较好的光束质量, M^2 在 1.3—1.7 之间, 接收端运动的动态过程中输出功率也未出现明显的波动. 在发射端视场方面, 设计加工了补偿场曲的非球面透镜, 也使发射端视场得到大幅提升: 以输出功率降至其最大值的一半计, 5 m 工作距离下的接收端横向位移允许范围达到 40 cm, 对应发射端视场 4.6°, 是补偿场曲之前 1.8°视场的约 3 倍, 但仍与设计水平存在一定差距, 离轴量逐渐增大的过程中光束质量也发生了明显的劣化[18]. 可推测这与激光晶体热透镜的像差有关, 后续考虑测量热透镜的像差并据此设计非球面透镜进行补偿, 以进一步优化发射端视场. 此外, 晶体中振荡激光光路的离轴导致其与泵浦光的交叠效率下降, 也会在一定程度上限制发射端视场; 采用更大的泵浦光斑以及长度更短的激光晶体有助于缓解这一问题, 例如文献 [5,7] 中基于薄片激光晶体实现了较好的发射端视场.

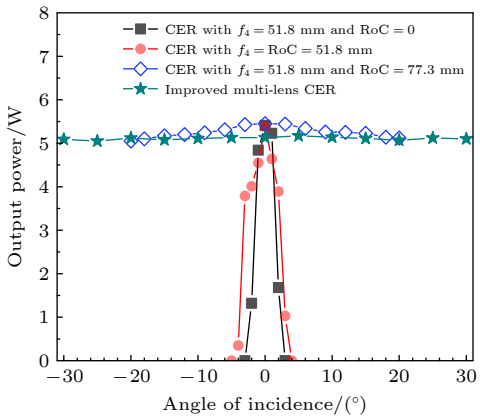

图 8 不同接收端透镜场曲条件下的接收端视场特性实验结果

Fig. 8. The experimental receiver FoVs with and without FC of the receiver CER compensated.

表 2 归纳大范围免调试激光器的典型实验结果. 通过分析谐振腔结构特点和光学像差, 确定了像差导致猫眼离焦和长工作距离下谐振腔稳区窄化是限制激光器免调试工作范围的主要因素, 通过优化光学设计补偿像差, 实验实现了激光器的大范围免调试高效率运转, 为安全、便捷的谐振激光自适应无线传能/通信应用提供光源支持. 在 1.06 μm 附近波段, 低成本的硅光伏电池转换效率为约 20%,

表 2 面向谐振激光自适应无线传能/通信应用的免调试激光器典型实验结果

Table 2. Typical experimental results of alignment-free lasers for adaptive resonant beam charging/communication applications.

Year	Retro-reflector	Laser gain medium	Output power/W	Optical efficiency/%	Working distance/m	Receiver FoV/(°)	Transmitter FoV/(°)
2019[6]	Corner cube	SOA	0.0017	—	1	—	6.6° (only one dimension)
2021[7]	CER	Nd:YVO_4 disk	>10	—	0.15	±13° @ 0.15 m	±8.3°@0.15 m (0 output)
2022[8]	Ball lens	EDFA	0.4	—	30	Unlimited	—
2022[5]	CER	Nd:YVO_4 disk	>10	~15	<3	—	±5.1°@2 m (0 output)
2022[9]	CER	Optically pumped VECSEL	0.863	0.57	2	—	1.37°@0.5 m 0.47°@2 m
2021[10]	CER	—	0.012	—	2	—	—
Our work	CER	Bulk Nd:$GdVO_4$	>5	>30	>5	±30°@5 m	4.6°@5 m (half maximum)

InGaAs 光伏电池的效率能够超过 40%[20], 相应可产生 1—2 W 的电输出功率, 能够支持大部分低功率物联网设备的供电需求. 如采用具有更高功率处理能力的薄片晶体或半导体激光增益介质, 激光器的输出功率水平能够进一步提高, 支持更多实际应用.

5 结 论

针对自适应激光无线传能/通信等领域对于大范围免调试激光器的需要, 本文讨论了激光器免调试工作动态范围的优化要求, 设计实现了基于猫眼逆反射器的大范围免调试激光器. 通过引入望远镜系统和复合腔结构分别压缩传输光路上的激光发散角和提升激光安全性. 基于腔模理论分析谐振腔的稳区, 发现长工作距离下, 谐振腔稳区的窄化和像差导致的猫眼离焦是限制激光器免调试动态范围的主要因素. 通过优化光学设计补偿像差, 端面泵浦的 Nd:$GdVO_4$ 激光器泵浦功率 16.6 W 时能够在 1—5 m 工作距离、±30°接收端视场范围内保持 5 W 以上的激光输出功率, 5 m 工作距离时的半功率发射端视场 4.6°, 对应接收端横向位移范围达到 40 cm. 本工作明确了猫眼腔免调试激光器的设计要求和关键优化方法, 实验实现了激光器大范围免调试运转, 为实际应用需求和免调试激光器的发展提供了理论和实验结果支持.

参考文献

[1] Jin K, Zhou W Y 2019 *IEEE Trans. Power Electron.* **34** 3842

[2] Liu Q W, Wu J, Xia P F, Zhao S J, Yang Y P, Chen W, Hanzo L 2016 *IEEE Veh. Technol. Mag.* **11** 36

[3] Alpert O, Paschotta R 2016 US Patent 9312660 B2

[4] Alpert O, Ronen E, Nahmias O, Mor O R, Golan L, Sagi R 2019 US Patent 10193297 B2

[5] Liu Q W, Xiong M L, Liu M Q, Jiang Q W, Fang W, Bai Y F 2022 *IEEE Internet Things J.* **9** 13876

[6] Lim J Y, Khwaja T S, Ha J Y 2019 *Opt. Express* **27** A924

[7] Wang W, Gao Y X, Sun D, Du X, Guo J, Liang X Y 2021 *Chin. Opt. Lett.* **19** 111403

[8] Zhang Z, Zhang J W, Zhou Y L, Zhang X, Li Z W, Zhang J Y, Zhang J, Gong Y X, Liu T J, Mu J F, Ning Y Q, Qin L, Wang L J 2022 *Opt. Express* **30** 22364

[9] Javed N, Nguyen N L, Naqvi S F A, Ha J Y 2022 *Opt. Express* **30** 33767

[10] Huang J J, Li X, Zhang J P 2021 *9th International Conference on Intelligent Computing and Wireless Optical Communications*, Chongqing, China, June 4–7, 2021 p1

[11] Sheng Q, Wang M, Ma H C, Qi Y, Liu J J, Xu D G, Shi W, Yao J Q 2021 *Opt. Express* **29** 34269

[12] Sheng Q, Wang A H, Wang M, Ma H C, Qi Y, Liu J J, Wang S J, Xu D G, Shi W, Yao J Q 2022 *Opt. Laser Technol.* **151** 108011

[13] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, Fields R A 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1831

[14] Sheng Q, Wang A H, Ma Y Y, Wang S J, Wang M, Shi Z, Liu J J, Fu S J, Shi W, Yao J Q, Omatsu T 2022 *Photoni X* **3** 4

[15] Liu J J, Sheng Q, Wang M, Zhang J X, Geng X N, Shi Z, Wang A H, Shi W, Yao J Q 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 014204 (in Chinese) [刘俊杰, 盛泉, 王盟, 张钧翔, 耿兴宁, 石争, 王爱华, 史伟, 姚建铨 2022 物理学报 **71** 014204]

[16] Wang M, Ma Y Y, Sheng Q, He X, Liu J J, Shi W, Yao J Q, Omatsu T 2021 *Opt. Express* **29** 27783

[17] Sheng Q, Wang A H, Qi Y, Wang M, Shi Z, Geng J N, Liu J J, Wang S J, Fu S J, Shi W, Yao, J Q 2022 *Results Phys.* **37** 105558

[18] Liu J J, Qi Y, Sheng Q, Wang S J, Wang M, Xu D G, Shi W, Yao J Q 2022 *Infrared Laser Eng.* **51** 20211108 (in Chinese) [刘俊杰, 齐岳, 盛泉, 王思佳, 王盟, 徐德刚, 史伟, 姚建铨 2022 红外与激光工程 **51** 20211108]

[19] Liu J J, Wang A H, Sheng Q, Qi Y, Wang S J, Wang M, Xu D G, Fu S J, Shi W, Yao J Q 2022 *Chin. Opt. Lett.* **20** 031407

[20] Lumb M P, Meitl M, Wilson J, Bonafede S, Burroughs S, Forbes D V, Bailey C G, Hoven N M, Hoheisel R, Yakes M K, Polly S J, Hubbard S M, Walters R J 2014 *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference*, Denve, USA, June 8–13, 2014 p0491

Cat-eye retroreflectors based large-dynamic-range alignment-free laser*

Sheng Quan [1)2)] Geng Jing-Ni [1)2)] Wang Ai-Hua [1)2)] Wang Meng [1)2)]
Qi Yue [3)] Liu Jun-Jie [1)2)] Fu Shi-Jie [1)2)†] Shi Wei [1)2)‡] Yao Jian-Quan [1)2)]

1) (*School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

2) (*Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology* (*Ministry of Education*), *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

3) (*Tianjin Suowei Electronic Technology Co.*, *Ltd.*, *Tianjin* 300308, *China*)

(Received 14 October 2022; revised manuscript received 8 November 2022)

Abstract

Lasers with cavities consisting of retroreflecting elements can give the potential for large-dynamic-range alignment-free operation, which makes the important applications in adaptive wireless laser power transfer/communication possible. In such an emerging approach based on resonant laser beam in the cavity, the laser is delivered to the photovoltaic cell for charging application (or photodiode for communication application) at the receiver automatically, without the necessity of positioning and aiming the receiver in conventional laser wireless power transfer techniques. The laser capable of operating alignment-free efficiently across large-dynamic-range is essential for the application. In this work, the requirements for the dynamic range of alignment-free operation are summarized. An alignment-free laser with a cavity consisting of cat-eye retroreflectors is designed, and a large alignment-free dynamic range as never before is experimentally demonstrated. Telescope system in the laser cavity is adopted to suppress the beam expansion to enhance the working distance between the laser transmitter and the receiver. Coupled cavity scheme is used to reduce the laser intensity between the transmitter and the receiver for laser safety. By calculating the stability zone of the laser cavity, it is found that the stability zone of the receiver cat-eye distance is quite narrow. Hence, the laser operation is very sensitive to the defocusing of the cat eye defocusing. Moreover, the cat eye defocusing induced by optical aberrations of spherical aberration and field curvature can be rather serious, when the long working distance results in a large beam size and the angle of incidence is large, hence limiting the effective working distance and the field of view of the alignment-free laser significantly. In the experiment, the improved optical designs with the aberrations compensation are adopted for large-dynamic-range alignment-free operation. The end-pumped Nd:$GdVO_4$ laser at 1063 nm can deliver over 5-W output within a working distance range of 1–5 m, and a receiver field of view of $\pm 30°$, without cavity realignment. The transmitter field of view reaching 4.6° (full width at half maximum) at a working distance of 5 m is also realized, with a corresponding receiver transverse movement range of 40 cm. Our work clarifies the optimizing criteria of the large-dynamic-range alignment-free laser based on cat-eye retroreflectors.

Keywords: alignment-free laser, cat-eye retroreflector, cavity stability zone, optical aberration

PACS: 42.60.–v, 42.60.By, 42.60.Da **DOI:** 10.7498/aps.72.20221956

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975146, 62105240, 62075159).

† Corresponding author. E-mail: shijie_fu@tju.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

基于猫眼逆反射器的大范围免调试激光器

盛泉 耿婧旎 王爱华 王盟 齐岳 刘俊杰 付士杰 史伟 姚建铨

Cat-eye retroreflectors based large-dynamic-range alignment-free laser

Sheng Quan Geng Jing-Ni Wang Ai-Hua Wang Meng Qi Yue Liu Jun-Jie Fu Shi-Jie Shi Wei Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 72, 044203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221956

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.72.20221956

当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双凹型谐振腔结构的金属半导体纳米激光器的数值仿真

Numerical study of metallic semiconductor nanolasers with double-concave cavity structures

物理学报. 2019, 68(22): 224201 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190972

铅卤钙钛矿法布里-珀罗谐振腔激光器

Lead halide perovskites Fabry-P é rot resonant cavity laser

物理学报. 2021, 70(5): 054205 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201302

基于光学Parity-Time对称微腔结构的大范围电场传感器

Large-range electric field sensor based on parity-time symmetry cavity structure

物理学报. 2019, 68(19): 194201 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190784

垂直腔面发射激光器低温光电特性

Optoelectronic properties of vertical-cavity surface-emitting laser at low temperature

物理学报. 2019, 68(19): 194203 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190427

双波长外腔面发射激光器

Dual-wavelength external-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2019, 68(11): 114204 https://doi.org/10.7498/aps.68.20182261

基于1560 nm外腔式激光器的拉曼光锁相技术

Phase locking technology for Raman laser system based on 1560 nm external cavity lasers

物理学报. 2021, 70(17): 170303 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210432