

受激拉曼散射对高功率激光传输特性影响研究

郑也^{***}, 倪庆乐, 张琳, 刘小溪, 王军龙^{**}, 王学锋^{*}

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

摘要 研究了高功率光谱组束系统内光路的气体热效应对激光远场光束质量的影响。通过同等功率密度传输的子光束与合成光束的远场光斑分布对比研究,明确了子光束中的受激拉曼散射是造成组束光路气体热效应的主要因素。当拉曼光功率密度仅为 180 W/cm^2 时,远场光斑即出现了中心强度明显下降、能量分散等劣化状态。研究了激光传输路径长度对气体热效应的影响,当光程从 100 mm 增加至 450 mm 时,远场光斑的峰值强度逐渐下降,光斑逐渐变散。通过向密封的组束装置中充入氮气,基本可以消除气体热效应对远场光束质量的影响,可作为一种有效的气体热效应抑制手段。研究成果为光谱组束激光器的光束质量优化提供了有效支撑。

关键词 激光器; 高功率光纤激光; 光谱组束; 受激拉曼散射; 大气热效应; 光束质量

中图分类号 TN012

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0701005

1 引言

近年来,光纤激光器的输出功率不断提升,在民用和军用领域都得到了广泛的应用^[1-2]。但是,非线性效应、端面损伤以及模式不稳定等诸多因素限制了单纤单模激光器输出功率的进一步提升^[3-4]。光谱组束(SBC)技术是获得更高功率单模光纤激光的有效技术手段,国内外多家单位已通过光谱组束技术实现数万瓦级高光束质量激光输出^[5-8]。光谱组束技术涉及空间光路,将多路入射激光通过特定的空间排布方式以及组束光学元件组合为一束高能激光输出。当激光功率达到一定程度时,与大气介质相互作用,会产生多种线性和非线性光学效应,从而影响激光光束质量。在组束光路中,光斑尺寸相对较小,激光功率密度较高,同时光谱组束对于光束的谱线宽度有一定要求,导致子光束在功率提升过程中容易出现非线性效应^[9-11],产生容易被大气吸收的新波长激光,因此,大气热效应成为影响光谱组束激光器输出光束质量的一个重要因素。

高能激光的大气热效应研究比较广泛,主要集中在发射系统内部路径(内光路)和发射出口经大气至目标物路径(外光路)。对于外光路,高功率激光

通过大气传输时,大气湍流、热晕等效应会对激光远场光束质量产生影响,国内外研究机构在这方面已经开展了广泛的研究并探索了自适应光学技术进行有效补偿^[12-14]。而对于内光路热效应问题,也有多家研究单位开展了详细的理论和实验研究,相关的研究表明,尽管激光在光束控制系统中的传输距离与后续长程大气传输相比较短,但是高功率密度激光束在内光路中传输也会产生显著的热效应,研究人员也对内光路热效应的抑制方法进行了探索,结果表明,通过吹风以及注入低吸收气体等手段可以有效抑制内光路气体热效应的影响^[15-19]。随着高功率激光技术的不断发展,基于空间光路的组束激光器成为各平台激光武器系统激光光源的重要选择,除了上述大气传输路径的外光路以及激光发射系统的内光路的气体热效应研究之外,激光光源内部的气体热效应问题也需要加以考虑,目前针对组束激光器内部空间光路中气体热效应对输出激光光束质量影响的研究报道较少。

本文开展了高功率光谱组束激光器内部光路的气体热效应研究工作,研究发现当子光束激光功率从 1400 W 提升至 1800 W 时,远场光斑出现了峰值强度下降、光斑拉长、光场分布不规则等明显劣化。

收稿日期: 2020-08-13; 修回日期: 2020-09-26; 录用日期: 2020-10-27

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U20B2058)

*E-mail: xuefeng_wang@sina.com; **E-mail: wjl_case@126.com; ***E-mail: zhengye.no1@163.com

通过对比实验明确了子光束的受激拉曼散射(SRS)是造成组束激光器内气体热效应的主要因素,实验研究了不同中心波长、不同传输路径长度对气体热效应的影响规律以及验证了充入低吸收气体 N_2 对气体热效应的抑制效果。本文研究成果对组束激光器的光路设计及光束质量优化具有重要的参考价值。

2 基本原理

2.1 高功率窄线宽光纤激光器中的 SRS 效应

SRS 是光纤非线性光学中的一个重要非线性过程,它将一部分激光功率转移到频率下移的斯托克斯(Stokes)光子上,产生新的光谱分量,影响光纤激光器信号光功率进一步提升,降低激光器光-光效率^[20]。拉曼效应的量子力学描述为一个能量为 $h\omega_p$ 的光子被分子散射成另一个能量为 $h\omega_s$ 的低频光子,同时分子完成两个振动态之间的跃迁。入射光作为泵浦光产生的拉曼频移光被称为斯托克斯波,其初始增长可以描述为^[20]

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s, \quad (1)$$

式中: I_s 为斯托克斯光强; I_p 为泵浦光强; g_R 为光纤的拉曼增益系数,它是描述 SRS 最重要的物理量。拉曼增益谱有很宽的频率范围(高达 40 THz),并且在 13 THz 附近存在较宽的峰值,这是由石英玻璃的非晶体特性导致的。

连续波激光的 SRS 阈值可以由下式近似估算^[21]。

$$P_t = 16A_{\text{eff}}/g_R L_{\text{eff}}, \quad (2)$$

式中: A_{eff} 和 L_{eff} 分别为光纤的有效模场面积和有效长度,根据 SRS 阈值公式推算,基于纤芯直径为 $20 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 增益光纤的高功率光纤激光器的 SRS 阈值一般在数千瓦以上。但是,对于光谱组束系统所需的高功率窄线宽光纤激光器,相关研究表明,由于四波混频(FWM)和 SRS 相互耦合产生了拉曼增强效应,使拉曼增益增加 1~3 倍,其阈值功率相比于传统阈值估算公式计算得到的 SRS 阈值要低很多,在输出功率不足 1 kW 时即达到 SRS 阈值^[22-24],此反常低阈值 SRS 的出现会导致大部分信号波长处的激光功率向频率下移的 Stokes 峰转移,产生新波段的激光,降低输出激光的光谱纯度。

对于中心波长 $1 \mu\text{m}$ 的窄线宽光纤激光器,其拉曼光相对于信号光波长的偏移量约为 44 nm。光谱组束系统一般用到的波长范围为 1030~1090 nm,对应的波长偏移量 46.68~52.28 nm,所

产生的拉曼光中心波长 1076.68~1142.28 nm。图 1 给出了基于振荡腔种子源的 2 kW 窄线宽光纤激光器的典型输出光谱。可以看出,当输出功率仅为 1400 W 时,已经出现一定的拉曼分量,当输出功率增加至 2000 W 时,拉曼分量所占的功率比例显著提升,已经有相当一部分信号光转换为拉曼光,而且所产生的拉曼光光谱较宽,覆盖了近 40 nm 的波长范围。

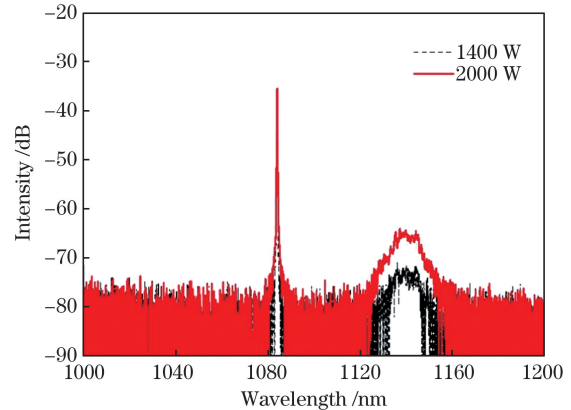


图 1 基于振荡腔种子源的 2 kW 窄线宽光纤激光器的输出光谱, SRS 效应显著

Fig. 1 Output spectra of 2 kW narrow linewidth fiber lasers based on oscillator cavity seed source with significant SRS

2.2 高能激光传输的大气热效应

当激光透过介质时其部分能量会被吸收,这将导致介质温度升高,当激光功率足够高时,气体吸收所致的温升会造成大气折射率的变化,从而导致传输路径上的光束畸变,这就是热晕效应。热效应通常有热传导、热对流和横向对流三种类型,会导致远场光强出现扩展、偏转、失真等严重影响。以无风情况下的热晕效应为例,其生成机理如图 2 所示,激光能量被吸收并加热空气,导致局部空气折射率的减小,使得空气类似于一个负透镜的作用,导致远场光强分布发生畸变。

热晕效应可以用热畸变数来描述,即

$$N_D = -\frac{4\sqrt{2}kp}{\rho_0 C_p} \int_{\text{path}} \frac{\alpha(z)T(z)n_T(z)}{V_{\text{wind}}(z)D(z)} dz, \quad (3)$$

式中: z 为 R 方向的距离; R 为光束总的倾斜路径长; $n_T(z)$ 为折射率随温度的变化率; $\alpha(z)$ 为吸收系数; $V_{\text{wind}}(z)$ 为垂直于光束方向的有效风速; p 为激光功率; k 为波数; $D(z)$ 为光束直径; T 为温度; $T(z)$ 为 z 处的透射系数。热晕效应随激光功率的增加、大气吸收的增强以及光斑尺寸的减小而更加显著。

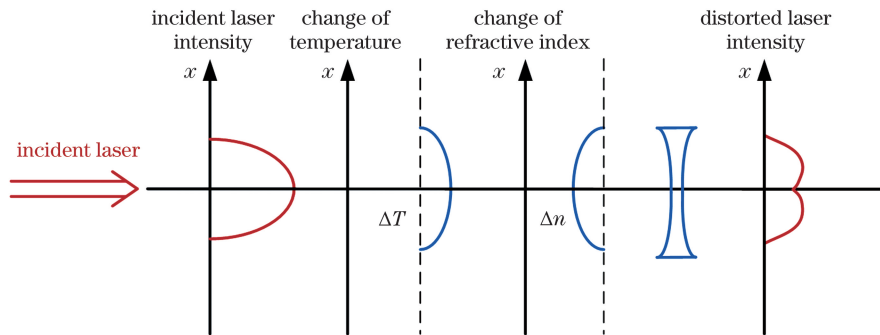


图 2 无风时,热晕效应产生原理示意图

Fig. 2 Principle of thermal blooming effect without wind

大气中 N_2 和 O_2 虽然含量最多,但它们在可见光和红外区几乎不表现吸收,对远红外和微波段才呈现出很大的吸收。在可见光和近红外区,一般不考虑其吸收作用。 H_2O 分子在近红外区有宽广的振动-转动及纯振动结构,是可见光和近红外区最重要的吸收分子。空气中水蒸气为 $1 \mu m$ 波段激光的主要吸收成分,采用 Modtran 软件对大气中水分子在 $1 \sim 1.2 \mu m$ 波段的典型透过率曲线进行计算,结果如图 3 所示。可以看出,当波长在 $1 \sim 1.08 \mu m$ 范围时,透过率基本接近于 100% ,几乎不存在吸收。当波长在 $1.08 \sim 1.1 \mu m$ 范围时,透过率开始逐渐下降,但是透射率仍能保持在 50% 以上。当波长在 $1.1 \sim 1.12 \mu m$ 范围时,透射率显著下降至 10% 以下,呈现出严重的吸收。可见, $1 \mu m$ 窄线宽光纤激光器的拉曼光谱分量所处的波长范围,处于水分子高吸收带。

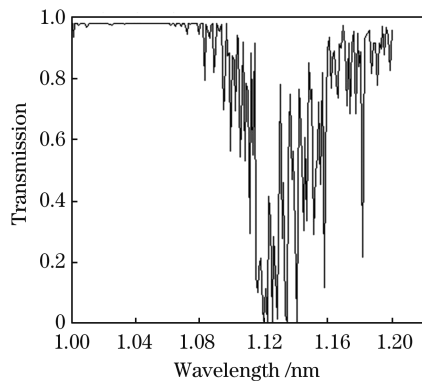


图 3 空气中水分子对 $1 \sim 1.2 \mu m$ 波段激光的透过率曲线
Fig. 3 Transmission curve of $1 \sim 1.2 \mu m$ laser through H_2O in atmosphere

通道介质的热效应不仅使光束波面变坏,而且对在截面上强度分布偏向一边的光束也会造成严重的光轴倾斜。为减小介质对高能激光的热效应,可以采用吹风的办法,使介质垂直光轴流动,减少热积累。但是吹风会引起湍流,导致光束质量下降。更

为有效的办法是导光光路采用密封管道,抽真空或者再充入对激光吸收率低的气体(如充氮气或者氦气),并保持一定的正压,可以减少对真空系统的密封要求。

3 实验装置

搭建了基于 3 路窄线宽光纤激光器的光谱组束装置,如图 4 所示。中心波长分别为 1064 、 1072 、 1084 nm , 3 dB 线宽约为 0.3 nm ,由于入射激光谱线较宽,为实现良好的光束质量,采用双光栅光谱组束方案,所采用的衍射光栅为透射式衍射光栅,刻线密度为 1000 mm^{-1} ,针对 $1030 \sim 1090 \text{ nm}$ 激光, -1 级次衍射效率 $> 95\%$ 。3 路激光准直输出,光斑直径为 8.4 mm ,平行入射到衍射光栅 1 表面,间距分别为 10 mm 和 15 mm ,与衍射光栅 1 的法线所成的角度为 32° ,衍射光栅 2 与衍射光栅 1 平行放置,两块光栅之间的垂直距离约为 1 m ,3 束光经衍射光栅 2 后合成为一束激光输出。合成光束通过分束镜,大于 99.6% 的光从组束装置输出,进入后续系统,剩余的光作为探测光,经过测试光路进入 CCD,用于监测不同状态下的远场光斑分布情况。入射激光到衍射光栅 1 的光路长度约为 450 mm 。在研究传输路径长度对气体热效应影响的实验中,在 1084 nm 激光的准直输出端和衍射光栅 1 之间的传输路径上添加一片可移动的高反镜,用于控制高功率激光传输的路径长度。组束模块采用密封结构设计,在对角线位置设计了充气口和排气口。

本实验中 3 路入射激光的最大工作功率为 1800 W ,在输出功率 1400 W 时开始出现拉曼光,在输出功率 1800 W 时拉曼光变得显著。衍射光栅 1 之前,拉曼光与信号光共光路传输,衍射光栅 1 之后,由于拉曼光中心波长与信号光中心波长间隔约 50 nm ,经过较短的距离即可色散开,因此可以在拉

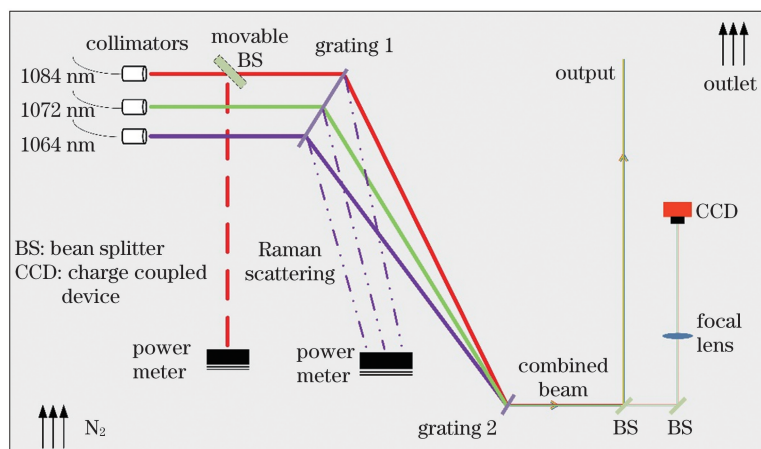


图 4 光谱组束系统中的热效应研究实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of thermal blooming in an SBC system

曼光的色散方向测试拉曼光功率。实验中所使用的衍射光栅,在 32° 的工作角时,在 $1.1\sim 1.15\ \mu\text{m}$ 范围内, -1 级衍射效率从 93.4% 近似线性地下降至 90% ,可以根据测试拉曼光功率与衍射效率的比值对子光束中的实际拉曼光功率进行估算。测试结果显示,当输出激光功率 $1800\ \text{W}$ 时, $1064\ \text{nm}$ 拉曼光功率测试结果为 $114\ \text{W}$,实际功率可估算为 $123\ \text{W}$, $1072\ \text{nm}$ 拉曼光功率测试结果为 $110\ \text{W}$,实际功率可估算为 $120\ \text{W}$, $1084\ \text{nm}$ 拉曼光功率测试结果为 $96.4\ \text{W}$,实际功率估算为 $105\ \text{W}$ 。

4 结果分析与讨论

首先测试了子光束功率提升过程的远场光斑变化情况。如上所述,子光束输出功率为 $1400\ \text{W}$ 时,

开始出现拉曼光,当输出功率达到 $1800\ \text{W}$ 时,拉曼光增长剧烈,已经达到百瓦。分别测试了 1064 、 1072 、 $1084\ \text{nm}$ 激光在 $1400\ \text{W}$ 和 $1800\ \text{W}$ 时的远场光斑分布,如图5(a)~(c)所示,此时从激光器出口至衍射光栅1传输路径上的激光功率密度约为 $2526\ \text{W}/\text{cm}^2$ 和 $3248\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。根据拉曼光功率测试结果,三路子光束在输出功率 $1800\ \text{W}$ 时,拉曼光的功率密度约为 $180\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。由图5可以看出,三路入射激光的远场光斑都出现了显著的劣化,峰值强度严重下降,光斑变散,不再满足高斯分布,严重降低了激光的远场聚焦能力。

为确定是 $1\ \mu\text{m}$ 信号光还是拉曼光导致的气体吸收效应,本文进行了一组对比实验。将 1064 、 1072 、 $1084\ \text{nm}$ 三路激光,通过双光栅光谱组束的方

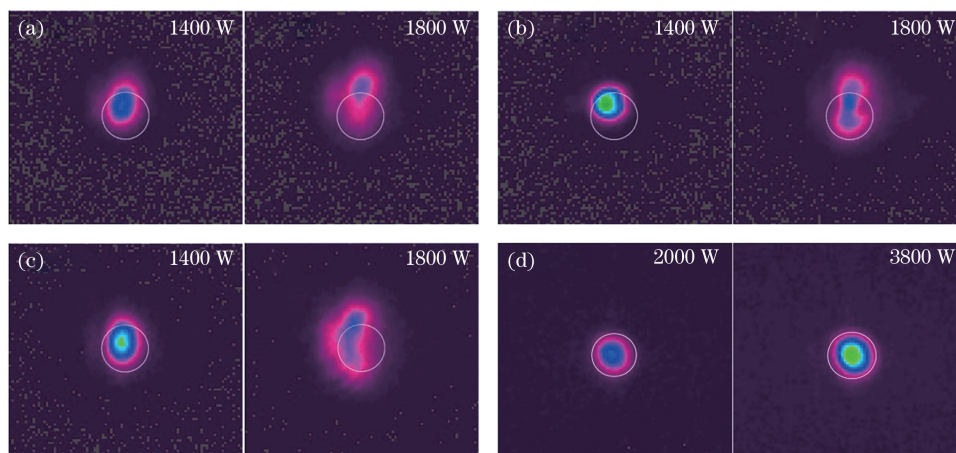


图 5 远场光斑分布。(a)~(c) 1064 、 1072 、 $1084\ \text{nm}$ 激光在子光束输出功率分别为 $1400\ \text{W}$ 和 $1800\ \text{W}$ 时的远场光斑分布;(d)三路组束激光功率分别为 $2000\ \text{W}$ 和 $3800\ \text{W}$ 时的远场光斑分布

Fig. 5 Distributions of far-field beam pattern. (a)~(c) Distributions of far-field beam pattern of the 1064 , 1072 , and $1084\ \text{nm}$ laser beams when the sub-beam output power is $1400\ \text{W}$ and $1800\ \text{W}$, respectively; (d) distributions of far-field beam pattern when the power of three-channel combined beam is $2000\ \text{W}$ and $3800\ \text{W}$, respectively

式合成为一束激光输出。在组束光路中,子光束所产生的拉曼光经过衍射光栅 1 后即与信号光发生分离,进入到功率计中,所以在经过衍射光栅 2 的合成光束中不存在拉曼光分量,全部为 $1\ \mu\text{m}$ 的信号光。为获得与信号光功率密度相当的组束激光功率密度,本文选取组束激光的功率分别为 2000 W 和 3800 W (子光束输出功率为 750 W 和 1400 W) 时的远场光斑作为对比研究,此时的激光功率密度分别为 $3609\ \text{W}/\text{cm}^2$ 和 $6857\ \text{W}/\text{cm}^2$, 对应输出光斑的远场分布如图 5(d) 所示。可以看出,组束功率从 2000 W 提升至 3800 W 时,远场光斑峰值强度显著提升,光斑保持高斯分布,未出现图 5(a)~(c) 中那样的劣化情况。组束功率 3800 W 时,传输路径上的激光功率密度已经达到了单束激光 1800 W 传输时的 2 倍以上,远场光斑仍保持稳定的单模运转,证明了在本实验条件下 $1\ \mu\text{m}$ 信号激光不是引起气体热效应的主要因素。而子光束中,随着功率提升而出现的受激拉曼散光,由于其中心波长覆盖了 $1.11\sim 1.13\ \mu\text{m}$ 范围,处于空气中水分子的强吸收峰,吸收系数较高,从而传输路径上气体被加热,折射率变小,引起了明显的热晕效应,导致远场光斑的劣化。单路激光中的拉曼光约为 100 W 时,传输路径上的拉曼光功率密度仅为 $180\ \text{W}/\text{cm}^2$, 已经出现了显著的光斑劣化。由此可见,相比于信号光,拉曼光在大气中传输时非常容易产生热晕效应,降低激光的远场聚焦能力,进一步提升子光束的受激拉曼

散射阈值,降低拉曼光功率占比,对于光谱组束系统的光束质量优化非常重要。

接下来研究传输路径长度对气体热效应的影响规律,以 1084 nm 激光为研究对象。由于信号光和拉曼光波长相差约 50 nm,在经过衍射光栅 1 后,两者衍射角度相差约 2° ,沿着不同的方向传播,不再共光路传输,因此可以认为这一段路径上的拉曼光引起的气体吸收不会对信号光的传输造成明显影响,本文只对准直输出端口至衍射光栅 1 之间的信号光和拉曼光的共同传输路径长度进行研究。通过设置图 4 中可移动高反镜的位置来控制高功率激光光路长度,选取 100、150、260、450 mm 四组光路长度进行实验研究,输出功率从 1400 W 提升至 1800 W,对应的远场光斑分布如图 6 所示。当光程为 100 mm 时,峰值强度降低 6.5%,150 mm 时峰值强度降低 11.2%,260 mm 时峰值强度降低 25.2%,450 mm 时峰值强度降低 46.7%。综合 4 组远场光斑分布可以看出,当光程长度仅为 100 mm 时,远场光斑的峰值强度已经出现了一定的下降,随着光程逐渐增加,峰值强度下降越来越多,同时光斑形状变得越来越不规则,光强分布愈加分散。由于空气对拉曼光吸收率较高,在整个拉曼光的传输路径上,空气不断吸收拉曼光,光束的热畸变积累得越来越多,空气的负透镜作用越来越强,导致了远场光斑的峰值强度不断下降、光斑发散越来越严重。

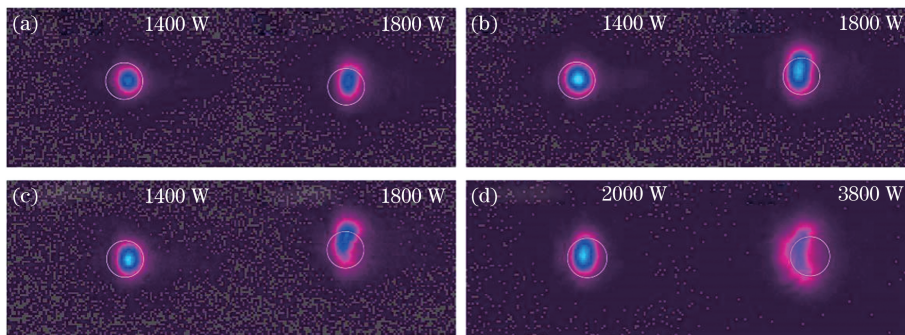


图 6 不同光程条件下,1084 nm 激光输出功率从 1400 W 增加至 1800 W 时远场光斑分布。(a) 100 mm; (b) 150 mm; (c) 260 mm; (d) 450 mm

Fig. 6 Distributions of far-field beam pattern when the 1084 nm laser output power is increased from 1400 W to 1800 W, under different optical path lengths. (a)100 mm; (b)150 mm; (c)260 mm; (d)450 mm

为了削弱激光传输通道中的气体热效应,文献中报道比较多的是在通道中注入低吸收系数气体的方法,主要是降低气体对激光的吸收。本文采用高纯 N_2 作为注入气体,研究其对受激拉曼散射光所引起的气体热效应的抑制效果。充气过程中,首先

打开泄压阀,开启气瓶,将组束装置中空气排空,然后开闭泄压阀,继续保持充气,直至组束装置内气压达到 1.2 个标准大气压。仍然以 1084 nm 激光为研究对象,充入 N_2 后,对输出功率 1400 W 和 1800 W 时的远场光斑进行测试,如图 7 所示。可以

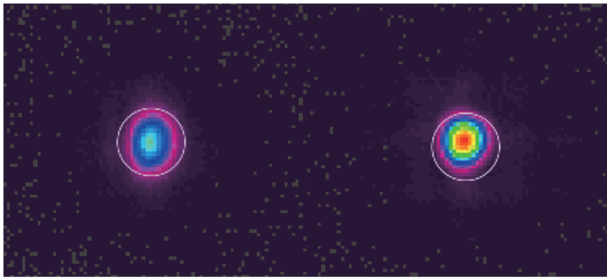


图 7 充入 N_2 后,1084 nm 激光输出功率分别为 1400 W 和 1800 W 时的远场光斑分布

Fig. 7 Distributions of far-field beam pattern of 1084 nm laser at 1400 W and 1800 W output power after N_2 injection

看出,远场光斑的峰值强度显著提升,与此同时无论是光斑尺寸、形状还是光强分布均未出现退化情况,基本不存在气体热效应的影响。与图 5(c)未充 N_2 的远场光斑相比,光束质量得到显著优化,激光的远场聚焦能力得到明显改善,因此充 N_2 可作为抑制拉曼光引起的热效应的有效手段。

5 结 论

本文搭建了 1064、1072、1084 nm 三路窄线宽光纤激光的光谱组束实验装置,对气体热效应对组束光路内高功率激光传输特性的影响进行了研究。研究发现,当子光束输出功率从 1400 W 提升至 1800 W 时,远场光斑的中心强度严重下降,光斑变散。作为对比,测试了 2000 W 和 3800 W 组束激光的远场光斑,均保持良好的光强分布,未出现强度下降、光斑变散等现象。通过对比分析确定,子光束中的受激拉曼散射光是造成远场光束质量劣化的主要因素,拉曼光波长处于空气中水分子的强吸收峰,当传输路径上拉曼光的功率密度仅为 $180 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,便出现了显著的气体热效应。

对衍射光栅 1 之前的信号光和拉曼光共光路传输路径长度对远场光束质量的影响进行了研究。输出功率从 1400 W 增加至 1800 W,当光程仅为 100 mm 时,远场光斑便出现了约 6.5% 的峰值强度下降,随着光程增加至 150、260、450 mm,远场光斑的峰值强度下降越加明显,分别下降 11.2%、25.2% 和 46.7%。这主要是由于光束的热畸变积累得越来越多,空气的负透镜作用越来越强。通过充入低吸光气体 N_2 ,基本消除了拉曼光所致的气体热效应对激光远场光束质量的影响。本文在已有气体热效应研究成果的基础上,对组束激光器内部的气体热效应进行了探索,为高功率光谱组束激光器

的设计及优化提供了一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, et al. The renaissance and bright future of fibre lasers [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 38(9): S681-S693.
- [2] Limpert J, Roser F, Klingebiel S, et al. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 537-545.
- [3] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [4] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [5] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9730: 97300Y.
- [6] Zheng Y, Yang Y F, Wang J H, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [7] Zheng Y, Zhu Z D, Liu X X, et al. High-power, high-beam-quality spectral beam combination of six narrow-linewidth fiber amplifiers with two transmission diffraction gratings[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(30): 8339-8343.
- [8] Ludewigt K, Liem A, Stühr U, et al. High-power laser development for laser weapons [J]. *Proceeding of SPIE*, 2019, 11162:1116207.
- [9] Yin Z, Yan F P, Liu S, et al. Research of stimulated Brillouin scattering effect in $2 \mu\text{m}$ band single-frequency Raman fiber amplifier [J]. *Navigation and Control*, 2015, 14(1): 100-105.
尹智, 延凤平, 刘硕, 等. $2 \mu\text{m}$ 波段单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射研究 [J]. *导航与控制*, 2015, 14(1): 100-105.
- [10] Liu W, Kuang W J, Jiang M, et al. Modeling of the spectral evolution in a narrow-linewidth fiber amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(3): 035105.
- [11] Chu Q H, Shu Q, Chen Z, et al. Experimental study of mode distortion induced by stimulated Raman scattering in high-power fiber amplifiers [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(4): 595-600.
- [12] He Q Y, Zong S G. Influence of atmosphere on the

- efficiency of shipborne laser weapons[J]. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(2): 57-60.
何奇毅, 宗思光. 大气对舰载激光武器效能影响的研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2019, 41(2): 57-60.
- [13] Ding Z L, Li X Q, Cao J Y, et al. Thermal blooming effect of Hermite-Gaussian beams propagating through the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(7): 1152-1160.
- [14] Barchers J D. Linear analysis of thermal blooming compensation instabilities in laser propagation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(7): 1638-1653.
- [15] Ji X L, Tao X Y, Lü B D. The influence of thermal effects and aberrations in a beam control system on the beam quality in the far field [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5):514-517.
季小玲, 陶向阳, 吕百达. 内光路热效应和像差对远场光束质量的影响[J]. *激光技术*, 2004, 28(5):514-517.
- [16] Tao X Y, Ji X L, Lü B D. Suppression of the thermal effect within a beam control system in the presence of wind[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, 16(11): 1370-1374.
陶向阳, 季小玲, 吕百达. 风对光束控制系统内热效应的抑制作用[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(11): 1370-1374.
- [17] Zhang E T, Ji X L, Lü B D. Influence of atmospheric absorption in the inner optical system on the laser beam quality[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 96-98.
张恩涛, 季小玲, 吕百达. 内光路中大气吸收对远场光束质量的影响[J]. *激光技术*, 2006, 30(1): 96-98.
- [18] Sun Y Q. Study on the thermal blooming of beam propagation in the inner channel [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 99-110.
孙运强. 激光内通道传输的气体热效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 99-110.
- [19] Zhang J H, Shi C P. Experimental research on thermal blooming effects of high energy laser internal optical transmission [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2020, 35(3): 45-49.
张建晖, 史春鹏. 强激光内光路传输的热晕效应实验研究[J]. *光电技术应用*, 2020, 35(3): 45-49.
- [20] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. New York: Academic Press, 1997.
- [21] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(11): 2489-2494.
- [22] Hu M, Ke W W, Yang Y F, et al. Low threshold Raman effect in high power narrowband fiber amplifier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(1): 0119010.
- [23] Xu Y, Fang Q, Qin Y G, et al. 2 kW narrow spectral width monolithic continuous wave in a near-diffraction-limited fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9419-9421.
- [24] Lin H, Tao R, Li C, et al. 3.7 kW monolithic narrow linewidth single mode fiber laser through simultaneously suppressing nonlinear effects and mode instability[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9716-9724.

Influence of Stimulated Raman Scattering on Propagation Properties of High-Power Laser

Zheng Ye^{***}, Ni Qingle, Zhang Lin, Liu Xiaoxi, Wang Junlong^{**}, Wang Xuefeng^{*}

Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China

Abstract

Objective Spectral beam combining (SBC) is an effective method to achieve a high-power, high beam quality fiber laser. In the SBC system, multi-channel incident lasers are arranged spatially and are combined into a single laser beam via an optical element. The transmitted laser power density in the SBC system is very high due to the high power and small beam diameter. In this case, the thermal blooming effect becomes a nonnegligible factor that influences the far-field beam quality. In addition, a narrow linewidth is required in SBC to eliminate the dispersion effect. As a result, nonlinear effects are easy to stimulate, e. g., stimulated Brillouin scattering (SBS) and stimulated Raman scattering (SRS), which generates a new wavelength laser. The new wavelength laser may cause enhanced atmospheric absorption and degrade the far-field beam quality. Atmospheric thermal blooming of high-power laser propagation has been studied extensively in the outer path (optical path in atmosphere) and inner path

(optical path in the launching system). However, relevant studies of the inside optical path of a high-power laser have not been sufficiently thorough. Therefore, in this paper, the influence of thermal blooming on far-field beam quality in a high-power spectral beam combining system is studied. SRS in the incident narrow linewidth fiber amplifier is verified to be the dominant factor that induces thermal blooming in the beam combining system. In addition, N_2 injection into the combining system essentially eliminates the influence of thermal blooming on far-field beam quality, which can be considered an efficient suppression method.

Methods A three-channel spectral beam combining system is constructed with central wavelengths of 1064, 1072, and 1084 nm, respectively. Each incident laser can deliver 2 kW power. Taking the SRS effect into consideration, we employ 1400 W and 1800 W laser power in this experiment. First, the far-field beam patterns of each incident laser at 1400 W and 1800 W are tested. Then, the far-field beam patterns of the three-channel combined beam at different power are measured. By analyzing the measured results, the causing factor of thermal blooming in SBS system is confirmed. Then, the relationship between the optical path length and thermal blooming effect is investigated by adjusting the beam splitter position of a 1084 nm laser. Finally, suppression of the thermal blooming effect by N_2 injection is verified.

Results and Discussions When the power of each incident laser increases from 1400 W to 1800 W, apparent degradation is observed in the far-field beam pattern [Fig. 5(a)–(c)]. The peak intensity degrades severely, and the beam distribution disperses badly, which reduces the laser's focusing property. For the combined beam, when the power reaches 2000 W to 3800 W, no obvious beam quality degradation is observed [Fig. 5(d)]. The results demonstrate that the 1 μm signal laser does not cause obvious thermal blooming effect in the SBC system. The thermal blooming effect of the incident laser at 1800 W can be attributed to the SRS light. When the incident laser power is 1800 W, the SRS is measured as 100 W. In addition, the SRS wavelength covers from 1.1 μm to 1.3 μm for the 1 μm signal laser, which is in the strong absorption band of the H_2O molecule in atmosphere. Thus, air in the beam propagation path is heated to cause the thermal blooming effect. We found that optical path length has direct influence on the thermal blooming effect. When the optical path length increases from 100 mm to 450 mm, the thermal blooming effect becomes increasingly significant (Fig. 6). The far-field beam patterns of the 1084 nm laser at 1400 W and 1800 W after N_2 injection are measured (Fig. 7). The peak intensity increases significantly from 1400 W to 1800 W, and no beam quality degradation is observed, which means that the thermal blooming effect did not occur. This result demonstrates that N_2 injection can be an effective method to eliminate the thermal blooming effect in the SBC system.

Conclusions In this paper, we investigate the thermal blooming effect in an SBC system. By comparing the far-field beam patterns of a sub-beam and combined beam with identical power density, stimulated Raman scattering in the incident narrow linewidth fiber amplifier is verified as the dominant factor that induces thermal blooming in the SBC system. When the power density of Raman light reaches 180 W/cm^2 , the peak intensity of the far-field beam is reduced significantly, and the energy spreads. The influence of optical path length on thermal blooming is investigated. The focusing property of the far-field beam degrades gradually and finally spreads as the length increases from 100 mm to 450 mm. By injecting N_2 into the combining system to reduce H_2O content, the thermal blooming effect is effectively suppressed. The results presented in this paper are expected to facilitate optimization of the beam quality of high-power spectral beam combining.

Key words lasers; high-power fiber laser; spectral beam combining; stimulated Raman scattering; thermal blooming; beam quality

OCIS codes 140.3510; 140.3298; 190.4370; 290.5900