

基于目标反射回光对高功率光纤激光器影响的理论模型和数值研究

段磊^{1)†} 徐润亲²⁾ 宋云波¹⁾ 谭姝丹¹⁾ 梁成斌¹⁾ 徐帆江¹⁾ 刘朝晖¹⁾

1) (中国科学院软件研究所, 北京 100190)

2) (中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

(2022年12月30日收到; 2023年3月6日收到修改稿)

在高功率光纤激光系统中, 常会出现激光照射到目标处产生的回光被重新耦合到激光器内部并得到放大, 从而损伤激光系统的现象. 对于高功率光谱合成光纤激光系统等缺乏有效回光防护的高功率激光系统, 该情况尤为严重. 为了解决上述问题, 有必要综合整个系统链路中的多种物理效应, 评估和分析反射回光对系统运转状态的影响, 在设计光纤激光器时优化光路布局和系统结构, 以尽量避免不必要的损失. 本文基于大气传输理论、光纤速率方程和介质热传导方程模型, 分析了反向回光对高功率光纤激光器的影响. 研究发现, 在大气条件一定的情况下, 回光功率与传输距离、光轴偏移角度、光束发散角和光束中心位置偏移量等因素有关, 并且会影响光纤激光器输出功率、光束质量因子、热效应和受激拉曼散射光谱信噪比. 研究结果对于优化高能光纤激光系统的外光路布局和激光器内部器件系统参数设计具有一定的指导意义.

关键词: 光纤激光器, 反射回光, 大气传输, 光纤耦合

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Lh, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.72.20222464

1 引言

光纤激光器具有光束质量好、结构紧凑、性能稳定等优点, 是激光领域重要的研究方向, 在工业加工、材料处理、生物医疗、智能制造等领域应用广泛^[1,2]. 随着包层泵浦技术^[3]的出现, 大功率泵浦半导体激光器的应用、光纤材料元器件制造工艺的提升, 以及高功率高光束质量光纤激光及其光束合成技术^[4,5]的不断发展, 目前 1 μm 波段掺镱光纤激光器输出功率已经攀升至数万瓦量级^[6,7].

在实际应用中, 由于目标材质和反射特性不同, 激光器输出激光照射到目标时, 可能会有部分不可忽略的反射回光经过大气传输后, 又被耦合到光纤激光器输出尾纤中, 再次进入光纤激光器. 尤

其是在高功率光谱合成光纤激光系统^[8-11], 由于输出激光功率非常高, 针对反射回光的防护措施中很难有适合在整个激光器系统输出端设置的隔离器等光学器件. 倘若有部分光经过目标材料表面的反射, 使得反射回光返回并耦合至各级激光放大系统中, 反射回光将在增益光纤中逐渐积累能量, 这可能会对系统中光纤激光器造成损坏, 存在很大的损伤隐患^[12-15]. 为了研究反向回光对激光器的影响, 张栋等^[16]仿真分析了高功率光纤激光器中不同反射率表面可能产生的反向回光干扰光功率. 盛泉等^[17]对反向回光放大进行了数值模拟, 并讨论了损害激光器系统的因素. Chapman 等^[18]讨论了高能激光照射在目标等离子体时反向回光对激光系统的损伤. Alig 等^[19]研究了增加光学元件抗反射膜损伤阈值的方法.

† 通信作者. E-mail: duanlei@iscas.ac.cn

在理论研究方面, 激光大气传输湍流效应^[20,21]、空间光耦合^[22]以及高功率连续掺镱光纤激光器放大传输^[23–25]等方面各自有相关理论介绍, 但在整个回光传输和放大链路过程中, 涉及到多种非线性效应和随机变化动力学过程较为复杂, 以往的研究中对激光回光传输链路上关注的影响因素往往只包含角度偏差和轴向偏差带来的影响, 而本文对回光功率与传输距离、光轴偏移角度、光束发散角和光束中心位置偏移量, 研究内容更为全面. 同时, 从自由空间到波导系统, 如不同功率和光束质量的回光, 有可能会对激光器系统内部功率、光束质量因子、热分布和非线性效应等产生影响, 对整个系统传输外光路和激光器内光路综合多个影响因素进行分析, 目前还少见系统层级仿真的深入理论研究和报道.

本文关注目标反射回光对高功率光纤激光器的影响, 首先对基于目标反射回光的大气传输模型进行介绍, 然后对回光耦合到光纤激光器内的耦合效率进行讨论, 最后对反射回光对光纤激光器造成的影响进行分析. 研究基于大气多相位屏分布理论、连续光纤速率方程、热传导方程开展数值建模仿真, 定量分析了回光大气传输通道内传输距离、光轴偏移角度、光束发散角、光束偏移量等因素对耦合效率的影响和回光信号光功率、光束质量因子等对光纤激光器输出功率、光谱特性和热源分布等特性的影响.

2 理论模型

高功率光纤激光系统中多路光纤激光阵列通过准直透镜和衍射光栅后, 输出的宽谱激光经过大气正向传输后照射到目标表面, 被目标反射后, 部分回光再次经过大气反向传输又被耦合到光纤激光器中. 考虑到正向光和反向回光通过的大气传输是一个瞬时过程, 大气条件不变, 建模时将目标作

为一个激光光源来建模, 研究回光经过大气传输后, 通过透镜被耦合到光纤激光器阵列这一过程对高功率光纤激光器的影响. 目标反射回光经过大气传输后被耦合至光纤激光器内的整个系统链路基本结构, 如图 1 所示.

目标材料表面回波特性和反射特性精细建模需要对空间目标几何特征和目标反射光线建模, 回光重新耦合至激光器的耦合效率和能量与反射回光的功率与发射方式有关联. 反射回光在大气中传输时, 需考虑大气折射率分布随空间和时间的随机变化, 并引入大气湍流带来的畸变影响. 这些因素会使反射回光的光束质量进一步下降. 反射光束经过聚焦透镜后变为聚焦光束并耦合入光纤激光器的尾纤中. 在计算过程中, 需要将聚焦光场与光纤纤芯重叠处的功率进行积分, 获得反射回光在纤芯处的耦合效率, 并由耦合进纤芯的反射回光光场的复振幅信息得到纤芯内的功率分布. 由于反射回光受到大气传输等各方面原因影响, 且光纤数值孔径和模场半径较小, 所以反射回光的耦合效率相对于激光器正向出光的耦合效率较低. 但对于千瓦至万瓦级的高功率光纤激光器, 在某些情况下反射回光将造成光纤激光器的输出功率显著下降, 甚至损坏光纤激光器.

上述物理过程中, 需要综合考虑大气湍流引起的激光光束波前畸变、由传输距离和发散角偏差对光纤耦合效率影响、反射回光影响光纤激光器非线性效应和光纤温度演化等因素, 建立完备的反射回光在光纤激光器中运转过程的理论模型, 对造成激光器系统输出功率下降和光纤元器件温度过高的隐患部位进行估计.

2.1 反射回光大气传输模型

光束在光纤激光器中是以光纤导模的形式传输, 为获得良好的光束质量, 光纤激光光束合成输出一般是单模或少模光纤激光. 为了表述和计算方

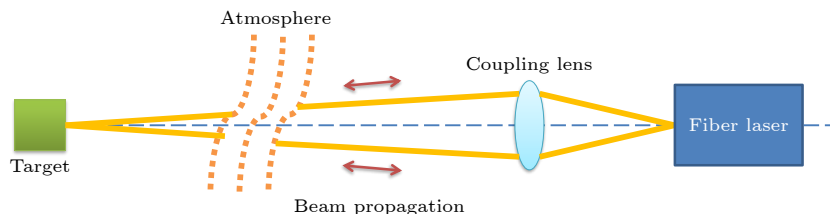


图 1 目标反射回光经大气传输耦合到光纤激光器中结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the structure of the target reflected light coupled to the fiber laser through atmospheric transmission.

便, 假设目标作为激光器光源建模时, 反射回光在理想情况下为 LP_{01} 模, 其光强分布与高斯分布近似, 可简化为理想高斯光源. 光场在大气中传输时, 其光束质量会劣化, 使耦合效率降低, 但并不影响本文对于目标反射回光给光纤激光器造成影响的分析.

目标反射回光按照高斯光源建模, 对于稳态传输光频电磁场可归结为研究对光现象起主要作用的电矢量所满足的波动方程, 其满足麦克斯韦电磁场方程组. 高斯光束是 Helmholtz 方程在缓变振幅近似下的一个特解, 结合标量衍射理论, 可以推导出满足标量波动方程的解, 即描述基模高斯光束的复振幅表达式:

$$E(x, y, z) = \frac{A_0}{\omega(z)} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{\omega^2(z)}} \cdot e^{-i\left[\mathbf{k}z + \frac{\mathbf{k}(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2R(z)} - \arctan \frac{z\lambda}{\pi\omega_0} - \varphi\right]}. \quad (1)$$

这里, (x_0, y_0) 为中心坐标, z 为传输距离, A_0 为归一化常数, $\omega(z)$ 为在距离 z 处的光斑半径, \mathbf{k} 为波矢, $R(z)$ 为在距离 z 处的波面曲率半径, φ 为附加相移, ω_0 为束腰半径, 是高斯光束的一个重要参数, λ 为激光中心波长.

实际传输过程中, 孔径的限制发生衍射后光斑会随着传输距离而变化, 因此在不同传输距离上进行数值仿真时, 光束的尺寸是在不断变化的, 数值仿真中需要根据实际情况采用变换采样网格. 本文采用适用范围较广的多相位屏分段传输算法和可变采样网格原理建立大气传输模型, 其数值分析方法原理示意如图 2 所示. 高斯光束在大气传输时,

由于存在远场发散角, 光斑在传输过程中也会不断变大, 而发散或汇聚的球面波的光斑变化更为明显, 大气湍流扰动光波的波前相位, 使它在 z 分量上随时间迅速变化, 导致目标通过大气的成像质量下降. 当传输距离远大于激光波长 λ 时, 根据夫琅禾费远场衍射传输理论近似, 可得到目标回光远场横向光场分布形式表达式为^[26]

$$E(\xi, \eta) = \frac{e^{i\mathbf{k}z}}{i\mathbf{k}z} \cdot e^{-\frac{i\mathbf{k}(\xi^2+\eta^2)}{2z}} \cdot \iint E(x, y) e^{-\frac{i\mathbf{k}(\xi x+\eta y)}{2z}} dx dy = \frac{e^{i\mathbf{k}z}}{i\mathbf{k}z} \cdot e^{-\frac{i\mathbf{k}(\xi^2+\eta^2)}{2z}} \cdot F[E(x, y)]. \quad (2)$$

这里, ξ 为 η 网格变换后坐标, F 表示傅里叶变换.

将光束在大气中的传输分为多个距离为 Δz 的传输, 每小段传输距离可以按照等间距或等 r_0 划分, r_0 表示大气相干长度. 假设在这段距离内相位变化足够小, 可认为这一段传输包含一个菲涅耳衍射真空传输过程和一个等效相位屏的相位调制过程. 大气中的光束传输按照给定初始光场, 按照可变网格计算出每传输 Δz 距离后的激光光场, 然后施加湍流相位屏到当前光场, 依次从 z_{i-1} 到 z_i 进行计算, 可得到目标处的最终光场分布:

$$E(x, y, z_i) = F^{-1} \left\{ e^{-\frac{i\Delta z(K_x^2+K_y^2)}{2k}} F \left[E(x, y, z_{i-1}) e^{i\varphi(x, y, z_i)} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中, K_x 和 K_y 为空间波数在 x 和 y 方向的分量, F^{-1} 表示逆傅里叶变换.

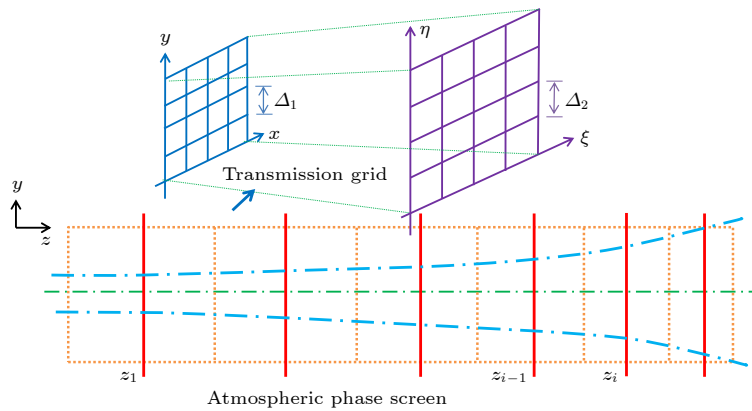


图 2 大气传输网格划分和分段传输原理示意图

Fig. 2. Schematic diagram of atmospheric transmission grid division and segmented transmission principle.

2.2 光纤耦合

目标反射回光在大气传输后,将被重新耦合入光纤激光器输出尾纤中进入到光纤激光器系统中. 光纤端面对于激光具有较高的灵敏度,而这种灵敏度大小主要由单模光纤耦合效率来决定. 空间光到单模光纤耦合一般通过直接熔接耦合、耦合透镜和光纤耦合器等方式实现. 考虑到光谱合成光纤激光器应用中目标回光耦合过程. 一般情况下,光纤端面处在聚焦透镜的焦点位置,平行光入射聚焦后的艾里斑与纤芯中基模匹配时耦合效率最高. 经过大气传输环境后,由于受到各方面原因,系统链路不断变化,任何微扰和偏移量都会对耦合效率造成影响. 本文关注运用耦合透镜来完成空间回光至单模光纤的耦合过程,透镜焦距和光束位置等因素制约光纤耦合效率,如图 3 所示.

在耦合透镜后焦平面中,根据透镜焦点生成相应的球面相位变换因子叠加到输入光场光束上,透镜的相位变换因子可表示为^[27]

$$\varphi(x, y) = \exp \left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right]. \quad (4)$$

叠加后的光场分布得到光纤端面接受端功率分布,可表示为

$$P = \frac{n_k}{2Z_0} |E(r_k)|^2, \quad (5)$$

其中, n_k 表示纤芯或包层折射率, r_k 表示纤芯或包层半径, E 表示信号光振幅, Z_0 为真空中波阻抗.

由光纤尾纤芯包比得到光纤端面和纤芯面积处的功率值,可得到耦合进入光纤激光器内部的耦合效率,定义耦合效率为光纤端面上接受光功率除以纤芯面积处接收到的光功率:

$$\eta = P_{\text{core}}/P_{\text{end}}. \quad (6)$$

根据计算得到的耦合效率,可以分析反射回光功率对光纤激光器系统造成的影响. 耦合效率比较高的部分集中在偏差较小的范围内,随着偏差的增

大,耦合效率下降速度也变快,耦合到透镜焦平面上的能量主要是处于艾里斑中,一旦超出该光斑位置耦合效率就会快速下降. 在这种情况下,反射回光对光纤激光器系统影响很小. 仿真中主要关注光轴倾斜角度和传输过程中横向光束中心位置偏移等因素,通过改变接受端与目标端高度预设不同发射角度偏差、对空间光进行调制从而控制横向传输光场分布下的偏移量,并从焦点光束和光纤端面截取相应的光场分布来计算耦合效率.

2.3 光纤激光器传输模型

目前,掺镱光纤几乎创造了所有光纤激光的功率记录,也是目前高功率光纤激光器合束方案首选. 在高功率激光放大器中激光线宽一般在 1 nm 以上,因此影响激光功率提升最主要的因素为受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS). 本文理论模型中主要考虑掺镱连续光纤激光器. 回光作为反向信号光在有源光纤传输过程中被逐渐放大,会剧烈地消耗光纤中的上能级反转粒子数,使光纤激光器信号光功率产生波动与下降.

光纤激光器基本结构与边界条件如图 4 所示. 将掺镱光纤中三能级的 Yb 能量系统简化为相对简单的二能级形式速率方程,考虑放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 和 SRS 项,来定量分析对功率和光谱的影响程度. 宽带速率方程组可写为

$$\begin{aligned} & \partial N_2(z, t) / \partial t \\ &= \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA_{\text{eff}}} [\sigma_{\text{ap}} N_1(z, t) - \sigma_{\text{ep}} N_2(z, t)] \\ & \quad \times [P_p^+(z, t) + P_p^-(z, t)] \\ & \quad + \frac{\Gamma_s \lambda_s}{hcA_{\text{eff}}} [\sigma_{\text{as}} N_1(z, t) - \sigma_{\text{es}} N_2(z, t)] \\ & \quad \times [P_s^+(z, t) + P_s^-(z, t)] - \frac{N_2}{\tau}, \end{aligned} \quad (7)$$

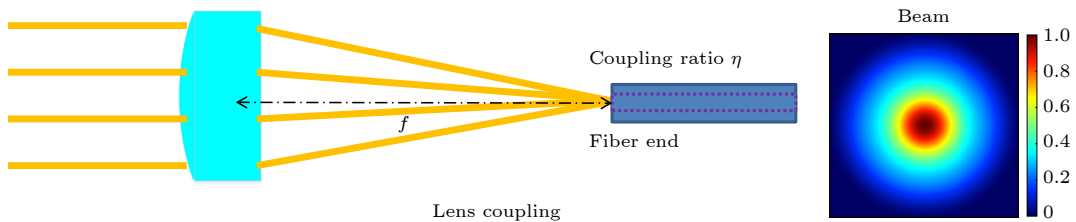


图 3 反射回光通过透镜耦合进入光纤示意图

Fig. 3. Diagram of reflected light coupling through a lens into an optical fiber.

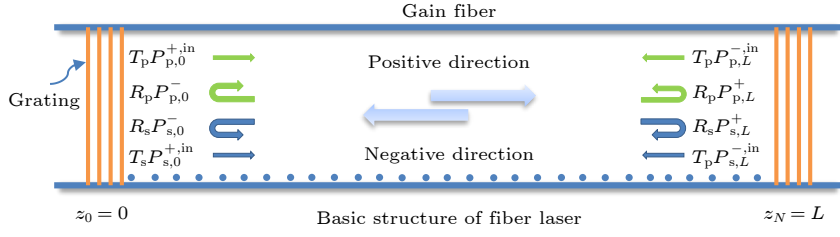


图 4 光纤激光器基本结构与边界条件示意图

Fig. 4. Schematic diagram of basic structure and boundary conditions of fiber laser.

$$\begin{aligned}
 & \pm \frac{\partial P_p^\pm(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(z, t)}{\partial t} \\
 = & \Gamma_p [\sigma_{ep} N_2(z, t) - \sigma_{ap} N_1(z, t)] P_p^\pm(z, t) \\
 & - \alpha_p P_p^\pm(z, t), \\
 & \pm \frac{\partial P_s^\pm(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial P_s^\pm(z, t)}{\partial t} \\
 = & \Gamma_s [\sigma_{es} N_2(z, t) - \sigma_{as} N_1(z, t)] P_s^\pm(z, t) \\
 & - \alpha_s P_s^\pm(z, t) + 2\sigma_e N_2(z, t) \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \Delta\lambda \\
 & + \Gamma_s P_s^\pm(z, t) \sum_{i=1}^N \frac{1}{A_{eff}^{i,n}} g_R(\omega_i - \omega_n) \\
 & \times [P_s^+(z, t) + P_s^-(z, t)]. \quad (8)
 \end{aligned}$$

这里, z 和 t 分别为时间和空间坐标, 下标 p 和 s 分别表示泵浦光和信号光, N 为掺杂浓度, $N = N_1 + N_2$, N_1 和 N_2 分别表示下能级粒子数和上能级粒子数. Γ_p 和 Γ_s 分别为泵浦光和信号光的填充因子. A_{eff} 为掺杂区域有效面积, 一般等于纤芯面积. σ_a 和 σ_e 分别为吸收和发射截面面积. h , v , g_R 和 τ 分别为普朗克常量、群速度、Raman 增益、上能级粒子数寿命. $P_{ASE} = \Delta\lambda hc^2 / \lambda_s^3$ 与自发辐射有关.

2.4 温度和热源模型

高功率光纤激光器内部的热量主要来源于光转换过程中的量子亏损和光纤的背景损耗吸收, 影响输出功率最主要的因素是模式不稳定效应和受激拉曼散射效应. 其中, 模式不稳定效应与增益光纤内部产热有关, 对光纤激光器中的光纤进行热负载分析是判断损伤阈值的必要途径. 通过热仿真分析, 不仅可以初步判断光纤激光器的可行性, 对制冷提出相应的要求, 还可以对光纤激光器结构进一步优化. 考虑多波长泵浦和单一信号波长输出激光情况下, 假设 K 个泵浦光波段中每个泵浦光中心波

长为 $\lambda_p^{(i)}$, 对应的吸收发射截面为 $\sigma_{ap}^{(i)}$ 和 $\sigma_{ep}^{(i)}$, 输出的激光中心波长为 λ_s . 那么在光纤内部, 热源可以描述为^[28]

$$\begin{aligned}
 & Q(r, z) \\
 = & \sum_{i=1}^K \left\{ \frac{\lambda_s - \lambda_p^{(i)}}{\lambda_p^{(i)}} \left[\frac{\beta_p(\lambda)}{k_0 \Gamma_p} - (\sigma_{ep}^{(i)} + \sigma_{ap}^{(i)}) N_2(z) \right] \right. \\
 & \times \left. \frac{P_p^{(i)+}(r, z) + P_p^{(i)-}(r, z)}{A_{clad}} \right\} \\
 & + \alpha_s \frac{P_s^+(r, z) + P_s^-(r, z)}{A_{eff}}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

式中, $(\lambda_s - \lambda_p^{(i)}) / \lambda_p^{(i)}$ 表示泵浦吸收系数, A_{clad} 为光纤内包层面积, A_{eff} 为纤芯信号光有效模场面积. $(\lambda_s - \lambda_p^{(i)}) / \lambda_p^{(i)}$ 代表量子亏损对热源的贡献, 为了降低热负荷, 可通过缩短泵浦光波长与信号光波长的间隔的方法减少量子亏损. 热源与增益光纤泵浦吸收系数成正比, 信号光吸收之后主要转换为热量, 也会导致光纤温度上升.

为计算增益光纤的温度, 利用 (11) 式介质热传导方程, 根据牛顿冷却定律和边界连续性条件, 推导得到纤芯区温度 T_1 , 内包层区温度 T_2 和外包层区温度 T_3 的表达式分别为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right] = -\frac{Q}{\kappa}, \quad (11)$$

$$T_1(r, z) = T_0(z) - \frac{Q(z)r^2}{4\kappa_1}, \quad (12)$$

$$T_2(r, z) = T_0(z) - \frac{Q(z)r_1^2}{4\kappa_1} - \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right), \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 T_3(r, z) = & T_0(z) - \frac{Q(z)r_1^2}{4\kappa_1} - \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \\
 & - \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_3} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right), \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$T_0(0, z) = T_c(r_3, z) + \frac{Q(z)r_1^2}{2hr_3} + \frac{Q(z)r_1^2}{4\kappa_1} + \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right). \quad (15)$$

这里, r 为半径, κ 为导热系数, 下标 1、2、3 分别表示纤芯区、内包层区、外包层区, T_c 为环境温度, T_0 为纤芯中心温度, Q 为热源功率密度.

3 数值仿真与讨论

数值仿真中设光纤激光器输出中心波长为 1080 nm 的连续激光, 抽运激光为 976 nm 的高斯型光谱泵浦源, 目标处回光激光功率 1000 W, 初

始光束质量 1.0, 高斯束腰半径 0.005 m, 大气相干长度 0.0384 m, 耦合透镜焦距 0.4 m, 增益光纤选择直径 20/400 μm 掺镱光纤. 通过传输距离、光轴偏移角度、传输光斑中心位置偏移量、泵浦吸收系数等变量进行输出特性分析, 其他主要仿真参数见表 1.

3.1 系统回光传输通道变量对耦合效率的影响

目标反射回光空域初始形态近似为基模高斯光束, 如图 5(a) 所示, 经过 1000 m 大气传输后的光斑形态如图 5(b) 所示. 可以看出考虑角度和位置偏移的情况下, 高斯光束经过大气传输后, 中心

表 1 仿真中使用的参数
Table 1. Parameters used in the simulation.

参数	数值	参数	数值
回光激光功率 $P_{\text{laser}}/\text{W}$	1000	泵浦光中心波长 λ_p/nm	976
高斯束腰半径 ω_0/m	0.005	纤芯直径 $r_{\text{core}}/\mu\text{m}$	20
激光中心波长 λ/nm	1080	包层直径 $r_{\text{clad}}/\mu\text{m}$	400
目标回光孔径 R_{obj}/m	0.08	泵浦重叠因子 Γ_p	0.00774
大气传输距离 Z_{atm}/m	500—3000	信号填充因子 Γ_s	1
大气相干长度 r_0/m	0.0384	上能级粒子数寿命 τ/ms	0.85
大气透射率 T_{trans}	0.095	光纤长度 L/m	20
通光孔径 R_{lens}/m	0.1	泵浦吸收系数 $\beta/\text{dB}@976 \text{ nm}$	1.5—4.8
耦合透镜焦距 f/m	0.4	环境温度 $T/^\circ\text{C}$	25
光轴倾斜角度偏移量 $\theta/^\circ$	0—0.44	换热系数 $\kappa/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	1200
光轴偏移位置偏移量 $\Delta z/\text{m}$	X/Y: 0—0.06	纤芯直径 $R_{\text{core}}/\mu\text{m}$	20
包层直径 $R_{\text{clad}}/\mu\text{m}$	400		

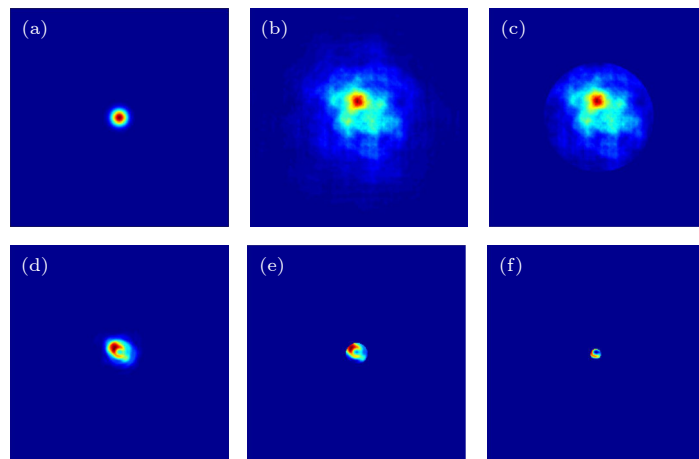


图 5 不同位置处的反射回光 (a) 目标回光激光光斑形态; (b) 经过大气传输后光斑形态; (c) 透镜孔径内光斑形态; (d) 透镜焦点光斑形态; (e) 光纤端面处光斑; (f) 光纤纤芯耦合光斑

Fig. 5. Reflected light at different locations: (a) The morphology of the laser spot of the target return light; (b) the pattern of light spots after atmospheric transmission; (c) the pattern of light spots in the aperture of the lens; (d) the morphology of focal spot of lens; (e) light spots on the end face of the optical fiber; (f) fiber core coupling spot.

处能量占比仍保持较高. 光束通过透镜时, 只有通过透镜口径下的光束被聚焦, 功率进一步下降, 如图 5(c) 所示. 在透镜后焦点位置光束聚焦, 与理想基模光束相比, 能量质心已有所偏移, 如图 5(d) 所示. 焦点光斑大小与光纤端面在同一平面内, 光纤端面包层截面处和纤芯横截面处尺寸大小决定提取到尾纤的功率与最终进入纤芯后进行信号传输的功率的能量占比, 如图 5(e), (f) 所示. 在大气条件一定的情况下, 反射回光功率取决于传输距离、传输光轴偏移角度、光束中心位置偏移量等因素. 但耦合入光纤的回光是否对光纤激光器造成影响仍需进一步分析.

设反射回光功率 1000 W, 光轴偏移角度和光束中心位置偏移量为 0 的情况下, 大气传输距离 500—3000 m 时的光纤端面处接受到的反射回光功率和纤芯处接受到功率的变化情况, 如图 6 所示. 随着传输距离增大, 光纤端面处接受到的功率不断降低, 且降低趋势逐步放缓, 这说明耦合效率降低到一定程度时, 距离的变化因素影响变小. 而纤芯处接受到功率随着距离的增加, 呈现迅速增长趋势, 到某一个位置存在一个耦合功率极大值, 之后逐步下降, 而这个极值点处附近的功率, 对光纤激光器的影响会更为显著. 可以看出在 1500 m 处, 光纤纤芯处反射回光的耦合效率最高, 使得耦合功率达到 140 W 以上, 这会对激光系统造成较大影响.

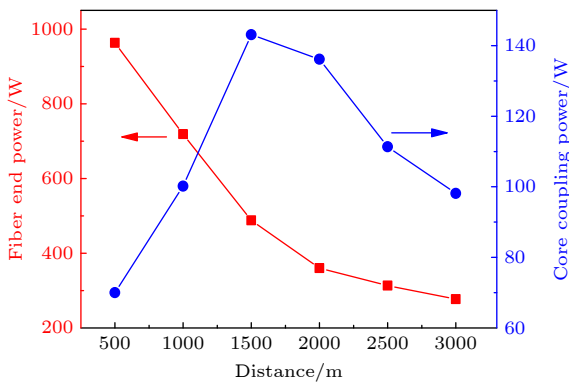


图 6 光纤端面处反射回光功率和纤芯处接受到功率随传输距离的变化
Fig. 6. Reflected power at the end face of the fiber and the received power at the core change with the transmission distance.

设光束中心位置偏移量为 0, 在不同传输距离时光轴偏移角度与耦合功率的关系如图 7 所示. 可以看到当传输距离为 1000 m, 光轴偏移时角度为

0 时, 耦合功率为 100.27 W. 随着光轴在小角度范围 $0.11^\circ, 0.22^\circ, 0.33^\circ, 0.44^\circ$ 偏移时, 功率偏差绝对值不超过 0.1 W, 基本可以忽略. 当传输距离从 500 m 增加到 2000 m 时, 角度偏移量对功率造成的影响远小于距离对功率造成的影响. 小偏移角度下角度偏移与耦合功率近似线性关系, 反射回光到透镜处存在小角度偏移的情况下, 对耦合功率影响不大, 而且随传输距离增加会存在极值点, 如 2000 m 处的耦合功率低于 1500 m 处, 这与图 6 展示纤芯处功率存在极值关系具有一致性.

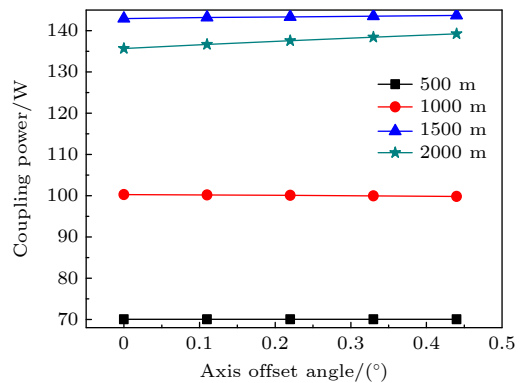


图 7 光轴偏移角度对耦合功率的影响
Fig. 7. Effect of optical axis offset angle on coupling power.

设光轴偏移角度为 0, 在不同位置处分析光束偏移量与耦合功率关系, 如图 8 所示. 仿真中假设 x, y 偏移量相同情况, 光斑对称分布, 对于偏移量不同情况仅是相同情况下处理不同权重的问题, 并不影响得到的结论. 可以看出, 中心偏移大于 0.02 m 时, 端面处接受功率才出现了较为明显的下降, 而且随着 500 m 到 1500 m 距离增长的情况下, 端面

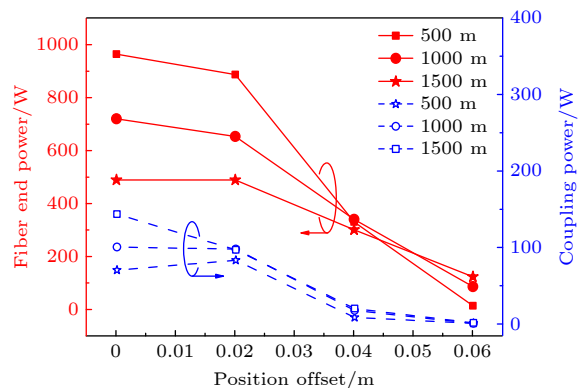


图 8 光纤端面功率及耦合功率随光束中心位置偏移量的变化关系
Fig. 8. Relationship of fiber end power and coupling power with the offset of beam center position.

处功率分别为 885, 652 和 488 W, 下降的趋势都呈正相关. 当中心偏移量达到 0.04 m 时, 耦合功率维持在 32 W 附近, 说明当偏移量达到某值时, 端面处接受功率随距离影响因素很小. 而纤芯处耦合功率则在无偏移量情况下, 随距离增加耦合功率上升, 分别为 70, 100 和 143 W, 功率有明显的区分度, 但随着偏移量逐渐增加, 耦合功率各点偏差已不明显, 耦合功率的下降与距离因素更为相关.

实际回光光路中存在光束发散角, 引入了倾斜相位, 会引起接收端光斑位置漂移. 研究不同传输距离情况下, 回光发散角对纤芯耦合功率的影响. 如图 9 所示, 当传输距离从 500 m 到 2000 m 距离增长情况下, 发散角从 0'' 到 15'' 的变化, 耦合功率随发散角变化接近指数衰减, 在 12'' 附近耦合效率接近 1% 几乎可以忽略, 说明当回光发散角度大到一定程度时, 回光功率对激光系统的影响已不明显.

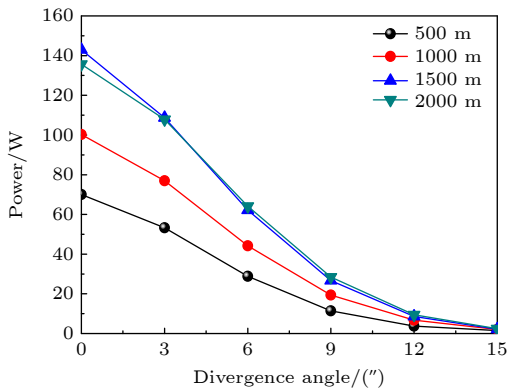


图 9 发散角与纤芯耦合功率的关系

Fig. 9. Relationship between divergence angle and core coupling power.

3.2 回光对光纤激光器内部的影响

高功率光纤激光器合束方案多采用主振荡功率放大器 (master oscillator power amplifier, MOPA) 结构, 即由振荡器产生一定功率的种子光, 再经过

一级或多级放大器得到高功率、高光束质量因子的激光输出. 为了保证单路激光的光束质量, 一般会通过模式抑制使光纤放大器工作在近单模或少模状态. 因此数值仿真中, 选择 20/400 μm 增益光纤, 假定信号光和斯托克斯光以 LP01 模和 LP11 模形式传输. 本文中仿真以双向泵浦 MOPA 结构光纤激光器为例, 该激光器由光纤激光振荡器和功率放大器两部分组成, 图 10 给出 MOPA 结构光纤激光器示意图, 其中箭头代表光传输方向. 振荡部分前向泵浦光通过前向泵浦信号合束器 (forward pump and signal combiner, FPSC) 注入到由高反射光纤光栅 (high reflectivity fiber bragg grating, HRFBG)、双包层掺镱光纤 (ytterbium-doped double-clad fiber, YDF) 和输出耦合光纤光栅 (output coupler fiber bragg grating, OCFBG) 组成的谐振腔中, 经过增益光纤放大, 产生前向种子光激光通过 FPSC 注入到放大器部分. 放大部分反向回光 (reflected signal) 作为后向种子光, 由后向泵浦信号合束器 (backward pump and signal combiner, BPSC) 注入到 YDF 中, 通过双向泵浦激发, 前后向种子光诱导, 使得激光放大并输出.

仿真中设置参数: 振荡部分泵浦功率 1000 W, 泵浦中心波长 976 nm, 信号光中心波长 1080 nm, 高反光栅反射率 99%, 低反光栅反射率 10%, 掺镱光纤 Yb 20/400 μm , 光纤长度 10 m, 泵浦吸收系数 1.5 dB@975 nm, 掺杂浓度 $8.37305 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$; 放大部分前后向泵浦功率 2000 W, 泵浦中心波长 976 nm, 掺镱光纤 Yb 20/400 μm , 光纤长度 20 m, 泵浦吸收系数 6 dB@975 nm, 掺杂浓度 $3.34922 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, 反射回光注入到纤芯的反向种子光功率 100 W. 在输出端得到功率分布、光谱分布、增益光纤中心处轴向温度分布和径向横截面温度分布仿真结果, 如图 11 所示. 从图 11(a) 可知当前参数

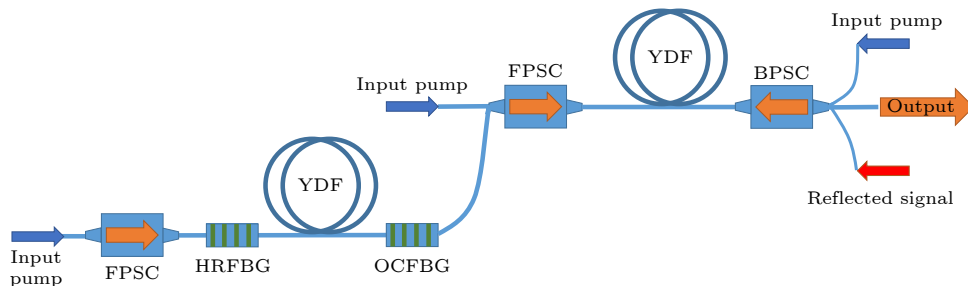


图 10 MOPA 光纤激光器结构示意图

Fig. 10. Schematic diagram of fiber laser structure of MOPA.

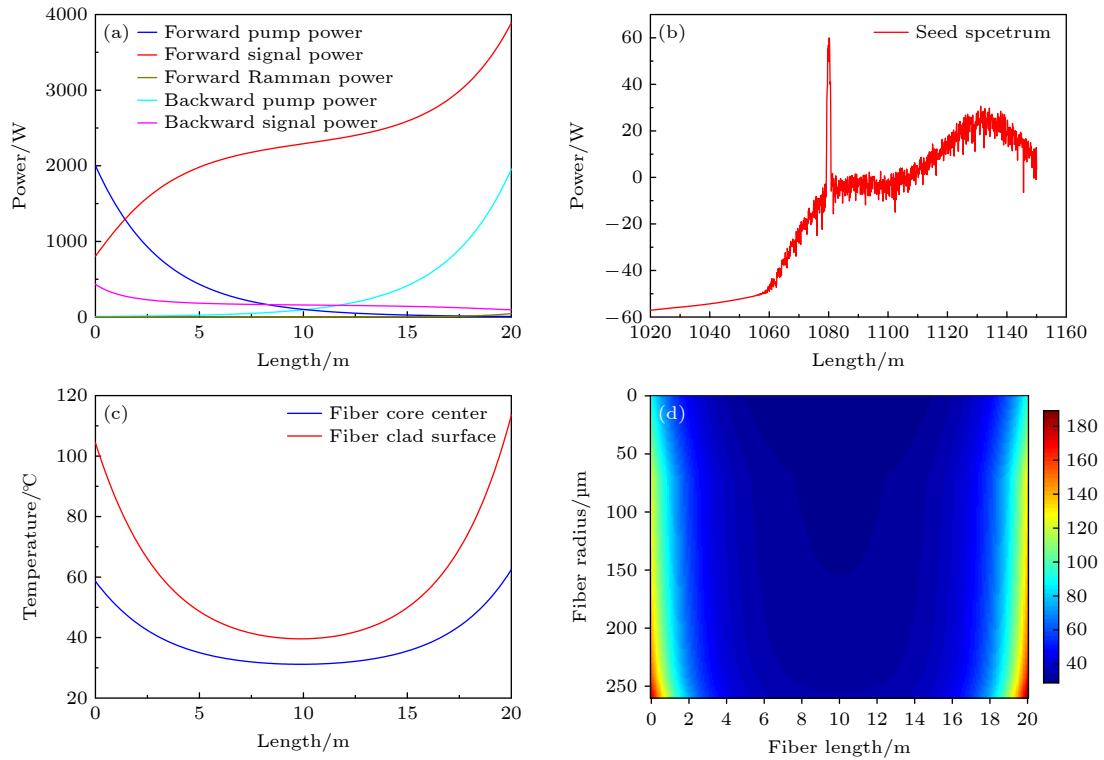


图 11 仿真结果 (a) 输出端增益光纤功率分布; (b) 光谱分布; (c) 中心轴向温度分布; (d) 径向横截面温度分布

Fig. 11. Simulation results: (a) Output gain fiber power distribution; (b) spectral distribution; (c) central axial temperature distribution; (d) temperature distribution in radial cross section.

条件下随着反向信号光注入, 反向信号功率逐步积累达到 478 W, 将被重新注入到光纤振荡器的低反光栅处. 光纤振荡器结构自身具有一定的抗反射回光能力的特点, 但考虑到一般商用的高功率光纤光栅承载功率阈值一般在 1—3 kW, 一旦反射回光功率超过光纤光栅承受功率阈值将对激光器造成损坏. 图 11(b) 展示激光和拉曼光谱成分, 在高功率光纤激光器中需要充分考虑反向信号光和拉曼光限制信号激光功率进一步提升的影响. 由图 11(c), (d) 可知, 双端泵情况下光纤两端温度和靠近中心处热量积累比较多, 在实际激光器系统中回光导致信号功率和非线性 SRS 效应的变化, 可能造成光在这些部位反射“淤积”导致严重发热, 应用效果下降, 并可能造成整个系统的可靠性下降, 甚至导致激光器烧毁. 本文主要关注输出功率、温度和非线性 Raman 效应等重要因素对于反射回光对整个激光系统的影响.

在不同反射回光功率下时, 信号光和拉曼光功率变化情况如图 12 所示. 假设没有反向回光的情况下, 放大器输出功率为 4309 W. 随着反向信号光功率的增加, 输出功率随之下降, 当注入的反向信号光增至 100 W 时, 放大器正向输出功率为

3985 W, 光纤激光器输出功率下降明显. 这是由于反向回光信号消耗了抽运功率, 导致正向输出功率的下降和反向信号的功率增加. 另一方面, 拉曼功率的增长变化并未和输出功率的变化正相关, 而是在接近光纤输出尾部有明显的快速增长, 所以对光纤长度需要综合考虑激光输出功率和 SRS 效应来进行优化. 而且, 随着反射回光功率的增加, 增益被诱导产生 Raman 频移, 拉曼波段损耗大于放大, 导致拉曼净增益下降, 拉曼输出功率略有下降.

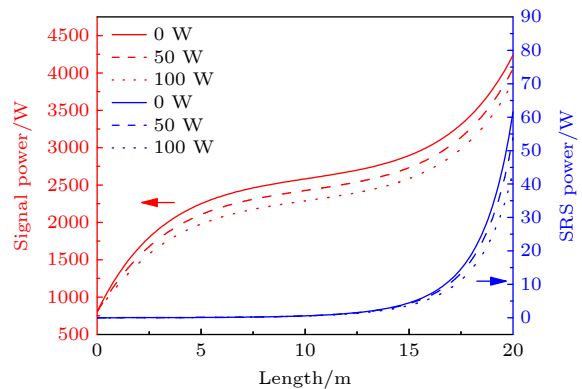


图 12 不同回光功率下激光功率和拉曼功率分布

Fig. 12. Distribution of laser power and Raman power under different optical return power.

当反射回光功率 100 W, 光纤放大器前后向泵浦功率 2 kW, 光纤长度 20 m, 室温不变的情况下, 不同泵浦吸收系数掺镱光纤的温度分布情况如图 13 所示. 可以看出沿光纤轴向方向上光纤两端温度高, 中间温度低. 对比两端光纤纤芯和包层温差, 当掺镱光纤泵浦吸收系数为 1.5 dB/m 时左侧 (靠近振荡器部分) 略低于右侧 (靠近激光放大输出部分), 维持在 50 °C 附近; 随着泵浦吸收增加, 光纤两端温度快速上升, 纤芯和包层温差增大, 泵浦吸收系数 4.5 dB/m 时, 温差达到 240 °C, 输出端纤芯处温度高达 264 °C. 由于反向回光的存在, 选择不同泵浦吸收系数增益光纤引起的热效应因素影响很大, 在光纤激光器系统设计之初就需要充分考虑这类影响并进行有效的热管理, 否则有损伤激光器系统的风险.

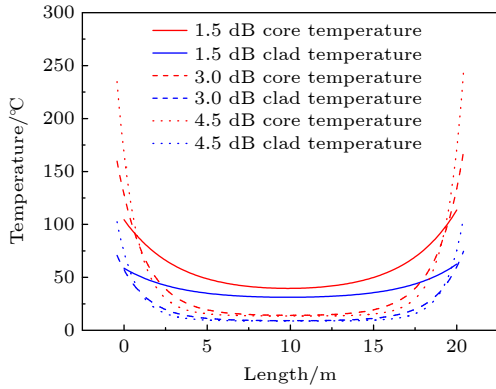


图 13 不同泵浦吸收系数下光纤径向横截面温度分布
Fig. 13. Temperature distribution of fiber radial cross section under different pump absorption coefficients.

当回光中心波长 1080 nm, 反向回光信号功率 100 W, 光纤长度 20 m, 泵浦吸收系数分别为 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 dB/m 时, 激光与拉曼光谱变化情况如图 14 所示. 采用 1.5 dB/m@975 nm 泵浦吸收系数的掺镱光纤时, SRS 抑制比达到 31 dB. 随着泵浦吸收系数的升高, 拉曼中心波长功率逐步提升, SRS 抑制比逐渐减小到 26 dB 左右. 这说明虽然增大泵浦吸收系数有益于提高泵浦光利用率, 但由于反向回光信号和种子光的非线性拉曼效应, 受激拉曼散射会将信号激光功率转化到斯托克斯光上, 导致激光信噪比下降. SRS 抑制比过低会对万瓦级光纤激光器系统链路中的光学元件造成一定压力, 导致光纤激光器系统可靠性下降.

除激光器中关注的功率因素外, 实际回光经过大气传输后会使得光斑形态劣化, 耦合进入光纤激光

器系统后, 会影响激光输出光束质量因子. 设系统传输距离为 1000 m, 回光功率为 100 W 变化时, 输出光束质量因子 M^2 的变化情况. 输出激光的 M^2 因子随着回光 M^2 因子的增加而增加, 如图 15 所示. 表明传输过程中信号光的基模含量逐渐减小, 高阶模激光在光纤中获得增益并输出到了腔外, 回光光束质量变差会引起激光输出光束质量劣化.

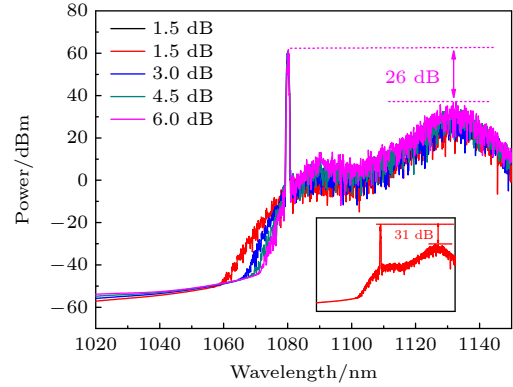


图 14 不同泵浦吸收系数下的信号光光谱, 内插图为例掺镱光纤泵浦吸收系数 1.5 dB@975 nm 时的信号光光谱图
Fig. 14. Signal light spectrum under different pump absorption coefficients. The inner illustration shows the signal light spectrum at the pump absorption coefficient of ytterbium-doped fiber 1.5 dB@975 nm.

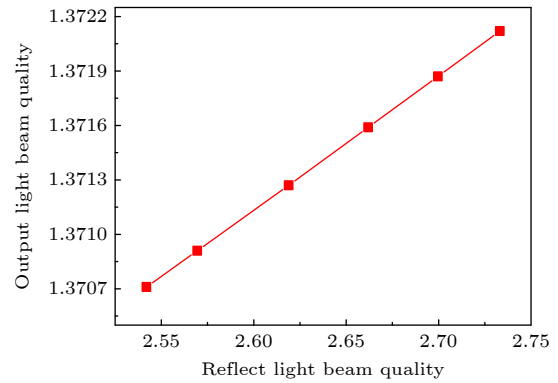


图 15 输出光束质量因子与回光光束质量因子的关系
Fig. 15. Relationship between the out light beam quality factor and the reflected light beam quality factor.

4 结 论

对系统层级全链路波动光学理论和激光原理联合建模, 建立了基于目标反射回光经过大气传输到光纤激光器内部的整个链路关键理论模型, 包括大气多相位屏分布模型、考虑 ASE/SRS 效应的光纤速率方程和介质热传导方程模型. 定量分析了系统回光传输通道变化对耦合效率和反射回光对光

纤激光器系统的影响. 研究发现, 在大气条件一定的情况下, 反射回光功率取决于传输距离、光轴偏移角度、回光光束发散角和光束中心位置偏移量等因素. 反射回光耦合功率在某个传输距离上存在一个极大值, 这部分较大的反射回光功率会对激光系统造成影响. 反射回光经过远距离传输时, 如果目标和激光器位置不在同一水平线的情况下, 可能存在光轴小角度范围偏转, 但对反射回光功率的影响并不明显. 而随着光轴偏移量的增加, 不同传输距离下, 耦合效率有所波动, 但耦合到光纤的反向回光功率偏差趋于不变. 耦合功率随回光发散角变化接近指数衰减, 当回光发散角度大到一定程度时, 回光功率对激光系统的影响已不明显. 不同功率的反向回光进入到光纤激光器系统内部时, 会导致正向输出功率的下降和反向信号的功率增加, 在靠近输出端光纤处拉曼功率会快速增长. 而且由于反射回光存在, 选择不同泵浦吸收系数增益光纤引起的热效应因素影响很大, 随着泵浦吸收系数的增加, SRS 抑制比逐渐减小. 回光光束质量变差会引起激光输出光束质量劣化.

因此, 在高功率光谱合成光纤激光器设计和实验中, 对回光的关注应贯穿于外光路传输与激光器内光路设计的整个过程, 并根据具体应用环境多次统计平均, 仿真回光传输到激光系统整个链路的全过程. 分析多个关键指标的综合约束, 评估由于回光反射造成系统损坏或可靠性下降的概率, 为高能光纤激光器外光路设计和激光器内部设计系统方案论证、参数优化、设计评估和结论验证提供参考.

感谢 SeeFiberLaser 光纤激光设计仿真软件和开发团队对本文模拟仿真方面提供的帮助.

参考文献

- [1] Koester C J, Snitzer E 1964 *Appl. Opt.* **3** 1182
- [2] Shi W, Fang Q, Zhu X, Norwood R A, Peyghambarian N 2014 *Appl. Opt.* **53** 6554
- [3] Snitzer E, Po H, Hakimi F, Tumminelli R, McCollum B C 1988 *Optical Fiber Sensors*. **2** PD5
- [4] Nilsson J, Payne D N 2011 *Science*. **332** 6032
- [5] Zhou P, Xu X J, Liu Z J, Chen Z L, Chen J B, Zhao Y J 2008 *Laser & Optoelectronics Progress*. **45** 37 (in Chinese) [周朴, 许晓军, 刘泽金, 陈子伦, 陈金宝, 赵伊君 2008 *激光与光电子学进展* **45** 37]
- [6] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, Schreiber T, Eberhardt R, Limpert Y, Tünnemann A, Ludewig K, Gowin M, Have E T, Jung M 2011 *Opt. Lett.* **36** 3118
- [7] Xiao Q R, Tian J D, Li D, Qi T C, Wang Z H, Yu W L, Wu Y L, Yan P, Gong M L 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 1501004 (in Chinese) [肖起榕, 田佳丁, 李丹, 齐天澄, 王泽晖, 于伟龙, 吴与

- 伦, 闫平, 巩马理 2021 *中国激光* **48** 1501004]
- [8] Pan L L, Zhang B, Yin S Q, Zhang Y 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 8289 (in Chinese) [潘雷雷, 张彬, 阴素芹, 张艳 2009 *物理学报* **58** 8289]
- [9] Honea E, Afzal R S, Matthias S L, et al. 2016 *Components and Packaging for Laser Systems II* San Francisco, California, United States, April 22, 2016 p97300Y
- [10] Chen, F, Ma, J, Wei, C, Zhu R, Zhou W C, Yuan Q, Pan S H, Zhang J Y, Wen Y Z, Dou J T 2017 *Opt. Express*. **25** 32783
- [11] Huang Y S, Xiao Q R, Li D, Xin J T, Wang Z H, Tian J D, Wu Y L, Gong M L, Zhu L Q, Yan P 2021 *Opt. Laser Technol.* **133** 106538
- [12] Carter A, Samson, B N, Tankala K, Machewirth D P, Khitrov V, Manyam U H, Gonthier F, Seguin F 2005 *Laser-Induced Damage in Optical Materials Boulder Colorado, United States, February 21, 2005* p561
- [13] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Yu H W 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 5027 (in Chinese) [赵兴海, 高杨, 徐美健, 段文涛, 於海武 2008 *物理学报* **57** 5027]
- [14] Li Y, Wu J, Lin J X, Wang X F, Zhu C 2009 *Laser Technology* **33** 490 (in Chinese) [李尧, 吴涓, 林信翔, 王雄飞, 朱辰 2009 *激光技术* **33** 490]
- [15] Han X, Feng G Y, Han J H, Zhang Q Y, Li Y, Zhang D Y 2009 *Acta. Photonica Sinica*. **38** 2468 (in Chinese) [韩旭, 冯国英, 韩敬华, 张秋慧, 李尧, 张大勇 2009 *光子学报* **38** 2468]
- [16] Zhang D, Zheng J F, Chen Y L, Li X L 2012 *Annual Conference of Optics (laser) Societies of Heilongjiang, Jiangsu, Shandong, Henan and Jiangxi Provinces Zhengzhou, Henan, China, September 1, 2012* p16
- [17] Sheng Q, Si H Y, Zhang H W, Zhang Y X, Ding Y, Shi W, Yao J Q 2020 *Infrar. Laser Eng.* **49** 20200009 (in Chinese) [盛泉, 司汉英, 张海伟, 张钧翔, 丁宇, 史伟, 姚建铨 2020 *红外与激光工程* **49** 20200009]
- [18] Chapman T, Michel P, Nicola D J M G, Berger R L, Whitman P K, Moody J D, Manes K R, Spaeth M L, Belyaev M A, Thomas C A, MacGowan B J 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 033101
- [19] Alig T, Bartels N, Allenspacher P, Balasa I, Böntgen T, Ristau D, Jensen L 2021 *Opt. Express* **29** 14189
- [20] Zhu W Y, Qian X M, Rao R Z, Wang H H 2019 *Infrar. Laser Eng.* **48** 1203002 (in Chinese) [朱文越, 钱仙妹, 饶瑞中, 王辉华 2019 *红外与激光工程* **48** 1203002]
- [21] Rao R Z 2022 *Infrar. Laser Eng.* **51** 20210818 (in Chinese) [饶瑞中 2022 *红外与激光工程* **51** 20210818]
- [22] Zhang Y J 2016 *M. S. Thesis (Harbin: Harbin Institute of Technology)* (in Chinese) [张月姣 2016 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [23] Xu Y, Fang Q, Qin Y, Meng X, Shi W 2015 *A. O.* **54** 9419
- [24] Wang Y S, Feng Y G, Ma Y, Chang Z, Peng W J, Sun Y H, Gao Q S, Zhu R H, Tang C 2020 *IEEE Photonics J.* **12** 1
- [25] Ren S, Ma P, Li W, Wang G, Chen Y, Song J, Liu W, Zhou P 2022 *Nanomaterials. Basel.* **12** 2541
- [26] Xie J H, Zhao D Z, Yan J X 2005 *Phys. Optics Course* (1st. Ed.) (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) pp159–160 (in Chinese) [谢敬辉, 赵达尊, 阎吉祥 2005 *物理光学教程* (第一版) (北京: 北京理工大学出版社) 第159—160页]
- [27] Lü N G 2006 *Fourier Optics* (2nd. Ed.) (Beijing: China Machine Press) pp121–122 (in Chinese) [吕乃光 2006 *傅里叶光学* (第二版) (北京: 机械工业出版社) 第121—122页]
- [28] Wang X L, Zhang H W, Shi C, Duan L, Xi X M 2021 *Fiber Laser Simulation and Modeling Based on SeeFiberLaser* (1st. Ed.) (Beijing: Science Press) pp61–62 (in Chinese) [王小林, 张汉伟, 史尘, 段磊, 奚小明 2021 *基于SeeFiberLaser的光纤激光建模与仿真* (北京: 科学出版社) 第61—62页]

Theoretical model and numerical study of effect of target reflected light on high-power fiber laser

Duan Lei^{1)†} Xu Run-Qin²⁾ Song Yun-Bo¹⁾ Tan Shu-Dan¹⁾

Liang Cheng-Bin¹⁾ Xu Fan-Jiang¹⁾ Liu Zhao-Hui¹⁾

¹⁾ (*Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

²⁾ (*Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 30 December 2022; revised manuscript received 6 March 2023)

Abstract

In a high-power fiber laser system, the reflected light generated when the laser hits the target may be recoupled to the laser and amplified by the laser, thereby damaging the laser system. This situation is particularly serious for a high-power laser system, such as spectral beam combining a high power fiber laser, which lacks effective light-return protection. In order to solve the above problems, it is necessary to integrate various physical effects in the whole system link, evaluate and analyze the influence of reflected light on the operating state of the system, so as to optimize the optical path layout and system structure in the beginning of the design of fiber laser to avoid unnecessary losses. Based on the atmospheric transmission theory, fiber rate equation and medium heat conduction equation model, the effect of reflected light on high-power fiber laser is analyzed. In this paper is conducted the numerical simulation of coupling efficiency of reflected light of high-power fiber laser. It is found that under certain atmospheric conditions, the reflected power is related to the transmission distance, the offset angle of optical axis, divergence angle, and the offset of center position of the beam, and will affect the output power, beam quality factor, thermal effect and the signal-to-noise ratio of the stimulated Raman scattering spectrum of the fiber laser. The coupling efficiency of reflected light has a maximum value at a certain transmission distance. For example, the reflected light power up to 140 W is obtained when the transmission distance is 1500 m, which will largely affect the laser system. The reflected power is affected by the offset angle of optical axis far less than by the transmission distance when transmission increases from 500 m to 2000 m. For example, a change of less than 0.1 W can be obtained when offset angle increases from 0.11° to 0.44° . It is also shown that as the divergence angle changes from 0 to $15''$, the coupling power decays nearly exponentially with the divergence angle. The coupling efficiency is close to 1% near $12''$, which is almost negligible. The output beam quality of the laser system is also affected by the beam quality of reflected light. Deterioration of the beam quality of reflected light will lead to the deterioration of the laser output beam quality. As the reflected light power enters the fiber laser system and increases, the forward output power will decrease and the backward signal power will increase, and the Raman power will increase rapidly near the fiber output end. When the reflected light is present, the thermal effects caused by selecting the gain fiber with different pump absorption coefficients are very important. The stimulated Raman scattering (SRS) rejection ratio decreases with the increase of pump absorption coefficient. For example, the SRS rejection ratio decreases by 5 dB when pump absorption coefficient increases from 1.5 dB/m to 4.5 dB/m, resulting in a decrease in the signal-to-noise ratio of the laser, which will reduce the reliability of the fiber laser system.

In the design and test of spectral beam combining systems for high-power fiber lasers, the attention should be paid to the reflected light in the entire process, which includes the outer optical path and the internal optical path of the laser. The comprehensive constraints of multiple key indicators are analyzed, and the probability of system damage or reliability degradation due to reflected light is evaluated. The research results of this paper are of certain guiding significance in selecting suitable outer optical path layout and system parameters and also in optimizing the design of high energy fiber laser system.

Keywords: fiber lasers, reflected light, atmospheric transmission, fiber coupling

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Lh, 42.60.Da

DOI: [10.7498/aps.72.20222464](https://doi.org/10.7498/aps.72.20222464)

† Corresponding author. E-mail: duanlei@iscas.ac.cn

基于目标反射回光对高功率光纤激光器影响的理论模型和数值研究

段磊 徐润亲 宋云波 谭姝丹 梁成斌 徐帆江 刘朝晖

Theoretical model and numerical study of effect of target reflected light on high-power fiber laser

Duan Lei Xu Run-Qin Song Yun-Bo Tan Shu-Dan Liang Cheng-Bin Xu Fan-Jiang Liu Zhao-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 104203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222464

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222464>

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

光纤光栅对的参数匹配与激光输出特性

Fiber gratings matching and output characteristics of fiber laser

物理学报. 2019, 68(11): 114205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190178>

基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的差频产生红外光梳

Fiber-type difference frequency generation infrared optical frequency comb based on the femtosecond pulses generated by a mode-locked fiber laser

物理学报. 2018, 67(9): 094207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172503>

1064 nm固体激光器和光纤激光器在制备压缩真空态光场实验中的对比研究

Comparative study of squeezed vacuum states prepared by using 1064-nm solid-state and fiber-laser as pump source

物理学报. 2019, 68(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182304>

量子点单光子源的光纤耦合

Optical fiber coupling of quantum dot single photon sources

物理学报. 2021, 70(8): 087801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201605>

基于二维纳米材料的超快脉冲激光器

Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterials

物理学报. 2019, 68(18): 188101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190751>

光纤激光器中包层功率剥离器散热性能的优化

Optimization of thermal performance of cladding power stripper in fiber laser

物理学报. 2020, 69(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191093>