

辅助光对高功率掺镱光纤激光放大器 受激拉曼散射效应的抑制作用*

赵卫¹⁾²⁾ 付士杰^{1)2)†} 盛泉¹⁾²⁾³⁾ 薛凯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) (山东海富光子科技股份有限公司, 威海 264200)

(2024 年 6 月 28 日收到; 2024 年 9 月 10 日收到修改稿)

提出一种利用辅助光调控高功率掺镱光纤放大器中增益分布, 以控制信号光的受激拉曼散射 (SRS) 增益、提高 SRS 阈值的方法. 基于数值模拟分析了辅助光的波长以及辅助光和信号光的功率比例对放大器 SRS 阈值的影响规律. 计算结果显示, 通过引入适当波长和功率的辅助光可以有效提升放大器的 SRS 阈值.

关键词: 高功率激光, 光纤放大器, 受激拉曼散射效应, 辅助光

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Dr, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.73.20240895

CSTR: 32037.14.aps.73.20240895

1 引言

高功率掺镱光纤激光器以电光效率高、光束质量优、系统结构紧凑、维护成本低等优点广泛应用于工业和国防等领域^[1-3]. 随着激光功率水平的快速提升, 受激拉曼散射效应 (SRS) 已成为限制其发展的一大制约因素. SRS 效应会导致信号光功率向斯托克斯 (Stokes) 光的快速转化, 在造成激光光谱纯度降低的同时, 限制激光功率的进一步放大. 针对这一问题, 研究人员对 SRS 效应抑制方法开展了一系列的理论与实验研究. 通过新型光纤结构设计来提高 Stokes 光传输损耗是一种有效方法, 如双孔辅助的单模光纤^[4] 和 W 型折射率分布光纤^[5] 等, 在保证信号光放大的同时实现对 SRS 效应的抑制. 但此类光纤高度依赖光纤的折射率分布, 且

对光纤弯曲较为敏感, 目前报道的放大器功率仍不足百瓦. 级间插入长周期光纤光栅 (LPFG)^[6] 与啁啾倾斜光纤布拉格光栅 (CTFBG)^[7] 作为光谱滤波器件来滤除 Stokes 光为抑制 SRS 效应的另一技术途径. 2022 年, Hu 等^[8] 使用级联的 LPFG 来提升种子光中 Stokes 光的滤除效果, 在基于 25 μm /400 μm 掺镱光纤的 5 kW 光纤放大器中实现了 34 dB 的拉曼抑制比. 而刻写在 50 μm /400 μm 大芯径光纤中的 CTFBG, 已在 10 kW 级光纤放大器中实现了应用, 在 1080 nm 光纤放大器最高输出功率 10090 W 时拉曼滤除深度达 10 dB^[9]. 拉曼滤波型光纤光栅具有结构简单及全光纤化等优势, 但 LPFG 对温度、应力等变化较为敏感, 实际滤波效果易受影响^[10], CTFBG 产生的反射光沿纤芯传播, 会在一定程度上降低激光器的模式不稳定 (TMI) 效应阈值^[11]. 除了对激光放大过程产生的 Stokes

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3606000)、国家自然科学基金 (批准号: 62105240, 62275190, 62075159)、山东省重点研发计划 (批准号: 2020CXGC010104, 2021CXGC010202)、天津大学自主创新基金 (批准号: 2023XPD-0020)、中国兵器工业集团有限公司激光器件技术重点实验室开放基金 (批准号: QT23120019) 和泰山产业领军人才项目 (批准号: tscx202312163) 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

光采取有效滤除技术, 增加振荡器种子源光纤光栅的带宽^[12]、延长种子源与放大级间无源光纤长度^[13]来降低激光的时域强度波动, 是高功率全光纤放大器中抑制 SRS 效应的另一技术手段. 2023 年, Meng 等^[14]使用宽带光纤光栅 (高反射率光栅带宽 4 nm, 低反射率带宽 2.05 nm) 来提高种子的时域稳定性, 在光纤尺寸为 20 μm /400 μm 的放大器中实现了 3.5 kW 的近单模激光输出, 拉曼抑制比达 27.6 dB. 此外, SRS 效应阈值还会受到泵浦方式的影响, 在光纤放大器中反向泵浦可以有效降低高功率信号光与 Stokes 光的作用距离, 使 SRS 阈值高于正向泵浦, 但反向泵浦对合束器的性能提出了更高的要求^[15,16].

总的来看, 虽然当前高功率光纤放大器 SRS 效应抑制技术不断取得新的进展, 但在实际应用过程中仍受到一定的条件制约, 为提升高功率光纤激光器的输出上限, 需进一步探索 SRS 效应抑制新技术. 本工作基于稳态速率方程与包含 Stokes 光的功率传输方程理论研究了高功率掺镱光纤放大器的 SRS 阈值特性. 通过对放大器额外注入一波长短于信号光的辅助光, 优化辅助光波长与功率占比, 使放大器前段增益主要由辅助光提取, 信号光功率维持在较低水平, 在放大器后段, 随着泵浦光的消耗, 辅助光被重吸收, 形成粒子数反转信号光提供增益. 结果显示, 该方法可有效地减短信号光 SRS 效应作用长度和强度, 实现对高功率光纤放大器中 SRS 效应的抑制. 最后, 基于辅助光放大抑制 SRS 效应的技术, 分析了辅助光注入对主振

荡功率放大器 (MOPA) 结构的单纤激光器输出极限的提升能力.

2 基本原理与理论模型

考虑到高功率掺镱光纤放大器较为严重的热效应, 所用掺镱光纤吸收系数低, 光纤长度通常达到数十米, 较长的有源光纤导致短波存在一定的重吸收, 且 1070—1080 nm 附近表现为镱离子的高增益区^[14], 因此, 高功率掺镱光纤放大器多以 1070—1080 nm 波长运转. 当对光纤放大器同时注入长波长信号光和波长相对较短的辅助光时, 由于辅助光具有较大的受激发射截面, 在放大器的前段能够提取较多的激光增益, 此时波长较长信号光的增益在一定程度上被抑制; 在放大器后段, 随着泵浦光对辅助光提供的增益逐渐减小, 吸收截面较大的辅助光逐渐被有源光纤吸收, 这一过程为长波长信号光提供了增益, 使信号光在放大器后段被快速放大. 与单波长信号光放大过程相比, 辅助光的注入使得放大器中信号光的增益整体向后推移, 减轻了非线性效应的积累, 即 Stokes 光与信号光的作用强度得到显著抑制, 从而实现 SRS 效应阈值的提升.

对于引入辅助光的光纤放大器, 需同时考虑信号光与辅助光的 SRS 效应, 因此构建如下包括信号光、辅助光及各自 Stokes 光的掺镱光纤激光放大器理论模型:

$$\frac{N_2}{N_0} = \frac{\frac{1}{hcA} \left[\Gamma_s \sum_{i=1,2} P_{si}^+ \sigma_{asi} \lambda_{si} + \Gamma_p (P_p^+ + P_p^-) \sigma_{ap} \lambda_p + \Gamma_R \sum_{j=1,2} P_{Rj}^+ \sigma_{aRj} \lambda_{Rj} \right]}{\frac{1}{\tau} + \frac{1}{hcA} \left[\Gamma_s \sum_{i=1,2} P_{si}^+ (\sigma_{asi} + \sigma_{esi}) \lambda_{si} + \Gamma_p (P_p^+ + P_p^-) (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \lambda_p + \Gamma_R \sum_{j=1,2} P_{Rj}^+ (\sigma_{aRj} + \sigma_{eRj}) \lambda_{Rj} \right]}, \quad (1)$$

$$\frac{dP_{si(i=1,2)}^+}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{esi} + \sigma_{asi}) N_2 - \sigma_{asi} N_0] P_{si} - \alpha_s P_{si} + 2\sigma_{esi} N_2 \frac{hc^2}{\lambda_{si}^3} \Delta\lambda_s - \frac{\lambda_R}{\lambda_s} \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_{Ri}^+ P_{si}^+, \quad (2)$$

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \mp \Gamma_p [\sigma_{ap} N_0 - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2] P_p^\pm \pm \alpha_p P_p^\pm, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{Rj(j=1,2)}^+}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{eRj} + \sigma_{aRj}) N_2 - \sigma_{aRj} N_0] P_{Rj} - \alpha_R P_{Rj} \pm 2\sigma_{eRj} N_2 \frac{hc^2}{\lambda_{Rj}^3} \Delta\lambda_R + \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_{sj}^+ P_{Rj}^+, \quad (4)$$

N_0 为有源纤中镱离子掺杂浓度, N_2 为上能级粒子数密度, P_{s1} 与 P_{s2} 代表信号光与辅助光功率, $P_p^\pm$ 为泵浦光功率, 其中上角标+, - 分别代表泵浦光的

正、反传输方向, P_{R1} 与 P_{R2} 分别为信号光与辅助光受激拉曼散射过程产生的 Stokes 光功率; λ_{s1} , λ_{s2} , λ_{R1} , λ_{R2} 为信号光、辅助光以及信号光和辅助

光产生的 Stokes 光波长, λ_p 为泵浦光波长, σ_{as1} , σ_{es1} , σ_{as2} 和 σ_{es2} 代表信号光与辅助光的吸收和发射截面, σ_{ar1} , σ_{er1} , σ_{ar2} , σ_{er2} 为对应的 Stokes 光吸收和发射截面, σ_{ap} 和 σ_{ep} 为泵浦光吸收和发射截面; Γ_s , Γ_p , Γ_R 是信号光、泵浦光和 Stokes 光模场与纤芯的重叠因子, α_s , α_p , α_R 为信号光、泵浦光、Stokes 光传输损耗系数, $\Delta\lambda_s$, $\Delta\lambda_R$ 分别信号光与 Stokes 光带宽. 此模型中信号光和辅助光具有相同的重叠因子和光纤损耗系数, 信号光和辅助光对应的 Stokes 光具有相同的重叠因子、光纤损耗系数和带宽. A 为纤芯面积, A_{eff} 为有效模场面积, h 为普朗克常数, c 为真空中光速, τ 为 Yb^{3+} 上能级寿命, g_R 为受激拉曼散射增益系数, 该值会受到信号光与 Stokes 光偏振态影响^[16], 仿真过程中默认放大器为随机偏振. 对于正向泵浦的光纤放大器, 其边界条件为

$$\begin{aligned} P_{s1}^+(z=0) &= P_{\text{signal}}, & P_{R1}^+(z=0) &= P_{\text{signal}} \times 10^{-4}, \\ P_{s2}^+(z=0) &= P_{\text{auxiliary}}, & P_{R2}^+(z=0) &= P_{\text{auxiliary}} \times 10^{-4}, \\ P_p^+(z=0) &= P_{\text{pump}}, & P_p^+(z=L) &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 L 为光纤长度; P_{signal} , P_{pump} , $P_{\text{auxiliary}}$ 分别为 $z=0$ 处的信号光、泵浦光与辅助光功率. 模拟分析中设定信号种子光中 Stokes 成分占比为 0.01%^[17,18], 根据边界条件带入初始值, 使用差分迭代法来求解方程组 (1)–(4), 参数取值如表 1 所列, 表中只给出了辅助光波长为 1050 nm 时的吸收和发射截面, 其他波长的吸收和发射截面可由文献^[19]获得.

表 1 仿真参数
Table 1. Simulation parameters.

Parameter	Value	Parameter	Value
$N_0/(10^{25} \text{ m}^{-3})$	5.2	$\sigma_{es2}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	4.8
λ_{s1}/nm	1080	λ_p/nm	976
λ_{s2}/nm	1050	$g_R/(10^{-13} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1})$	0.53
λ_{R1}/nm	1132	α_s/m^{-1}	0.003
λ_{R2}/nm	1101	α_p/m^{-1}	0.005
$\sigma_{as1}/(10^{-27} \text{ m}^2)$	2.3	α_R/m^{-1}	0.003
$\sigma_{es1}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	2.8	$\Delta\lambda_R/\text{nm}$	5 ^[17]
$\sigma_{as2}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	1.4	$\Delta\lambda_s/\text{nm}$	2 ^[17]

3 数值模拟与分析

3.1 辅助光抑制 SRS 效应的仿真分析

对于高功率光纤放大器, 通常认为 Stokes 光成分达到信号光输出功率的 1% 时即达到了 SRS

效应阈值^[20], 本工作将信号光与辅助光产生的 Stokes 光功率之和达到放大器总输出功率 1% 作为 SRS 效应达到阈值的判断条件, 并以此时 1080 nm 的信号光功率作为 SRS 阈值.

如图 1(a) 和图 1(b) 所示, 对于功率为 200 W 的 1080 nm 信号光, 采用 15 m 长、976 nm 泵浦吸收系数为 1 dB/m 的 20 μm /400 μm 双包层掺镱光纤进行功率放大, 泵浦功率为 3.58 kW 时输出信号光功率 3.14 kW, 此时由 SRS 效应产生的 Stokes 光功率为 31.6 W, 可认为达到 SRS 效应阈值. 保持放大器输入端注入的信号光与泵浦功率不变, 额外注入一功率为 200 W 的 1050 nm 辅助光, 如图 1(c) 所示, 在放大器前段, 由于辅助光发射截面高于信号光, 因此辅助光功率增长更快, 信号光功率增长变缓, 而在放大器后段, 随着泵浦光的消耗, 具有更高吸收截面的辅助光开始为 1080 nm 信号光提供增益. 与辅助光注入前相比, 信号光获得的增益向光纤后端移动, 最终信号光输出功率为 3.28 kW. 由图 1(d) 可知, 此时辅助光未发生明显 SRS 效应, 而信号光产生的 Stokes 光功率仅为 16.2 W, 相比单一信号光注入的情况, SRS 效应得到抑制.

将注入放大器的信号光与辅助光功率之和固定为 200 W, 改变信号光/辅助光功率比观察 SRS 效应阈值变化规律. 如图 2 所示, SRS 效应阈值随着辅助光功率占比的提升呈现先升高后降低的趋势, 信号光/辅助光功率比由 2:1 降低至 1:3 的过程中, SRS 阈值由 3.92 kW 提升至 6.55 kW, 此时 SRS 阈值达到峰值, 对比仅有信号光注入时的 3.12 kW 输出功率, SRS 阈值提升显著. 继续增加辅助光的占比, 即信号光/辅助光功率比由 1:3 降低至 1:6 过程中, SRS 阈值由 6.55 kW 降低至 4.55 kW.

由图 2 给出的 SRS 效应阈值变化规律可知, 辅助光对 SRS 效应抑制存在最优化的功率占比, 下面对此展开具体分析. 图 3(a) 和图 3(b) 为信号光/辅助光功率比 2:1 时达到 SRS 阈值的激光功率分布, 由于注入辅助光功率低于信号光, 辅助光被迅速重吸收, 对信号光增益调控效果有限; 图 3(c) 中信号光/辅助光功率比调整到 1:3, 此时光纤在 0–6 m 区间内的增益主要由辅助光提取, 这使得信号光功率维持在较低水平, 进而减弱了与 Stokes 光的耦合强度. 随着沿光纤长度方向泵浦光被逐渐消耗, 辅助光在光纤后段被重吸收并转化为信号

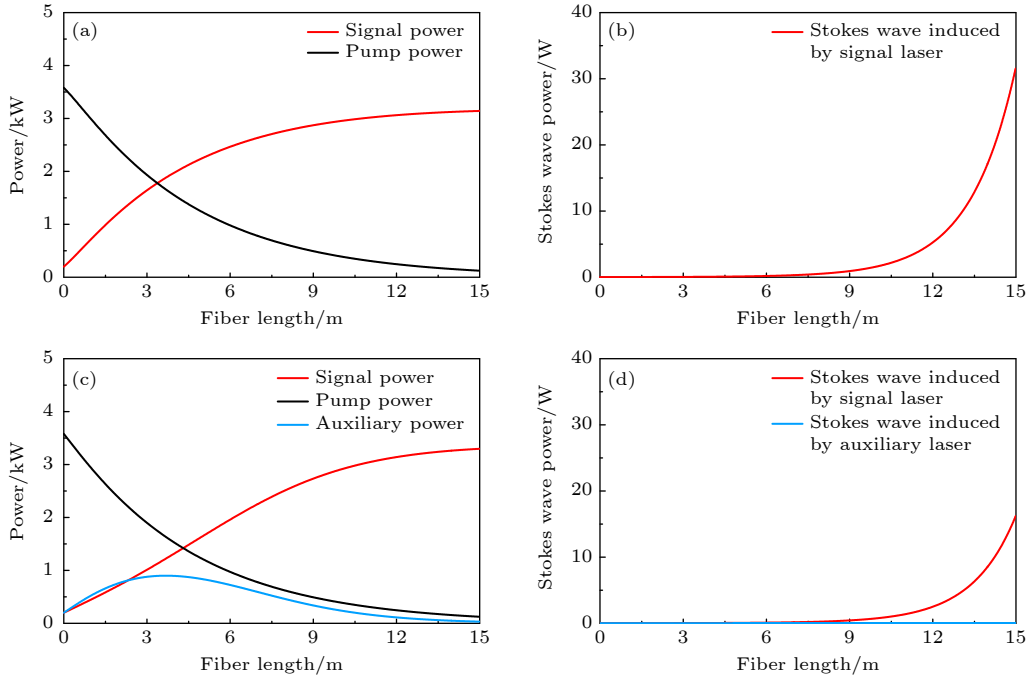


图 1 掺镱光纤放大器中激光功率分布. 未注入辅助光情况下 (a) 信号光、泵浦光和 (b) Stokes 光随光纤长度的功率演化特性; 1080 nm 信号光与泵浦光功率固定不变, 额外注入 200 W 的 1050 nm 辅助光, (c) 信号光、辅助光、泵浦光和 (d) Stokes 光功率演化特性

Fig. 1. Laser power distribution in ytterbium-doped fiber amplifier. Power evolution characteristics of (a) signal, pump and (b) Stokes wave as a function of fiber length without injection of auxiliary laser; power evolution characteristics of (c) signal light, auxiliary light, pump light and (d) Stokes light when the powers of 1080 nm signal and pump light are fixed, an additional 200 W auxiliary light at 1050 nm is injected.

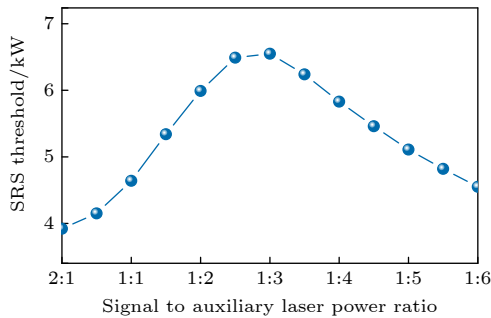


图 2 辅助光波长为 1050 nm 时 SRS 效应阈值与信号/辅助光功率比的关系

Fig. 2. SRS threshold as a function of signal and auxiliary laser power ratio when the auxiliary laser wavelength is 1050 nm.

光, 这一过程不仅保证了信号光的放大效率, 还避免了辅助光自身产生较强的 SRS 效应, 因此在这一信号光和辅助光比例下 SRS 效应阈值得到最大化提升. 由图 3(d) 可知, 此时功率提升同时受限于信号光与辅助光二者产生的 SRS 效应; 而进一步降低信号光/辅助光功率比到 1:6, 如图 3(e) 和图 3(f) 所示, 辅助光较高的功率占比使其产生的 Stokes 光成为功率增长的主要限制因素, 因此相比于信号光/辅助光功率比 1:3 的情况, SRS 阈值出

现显著降低.

考虑到 Yb^{3+} 的宽光谱吸收发射特性, 除了辅助光的功率占比, 辅助光波长的选取也会影响激光增益的调控效果, 进而导致不同的 SRS 阈值. 如图 4 所示, 对于某一固定的信号/辅助光注入功率比, SRS 阈值随着波长的增加呈现先升高后降低的趋势, 如信号/辅助光注入功率比为 1:20 (总功率仍为 200 W) 时, 辅助光波长从 1030 nm 增加至 1040 nm, SRS 阈值由 5.66 kW 升高至 8.18 kW; 而在波长继续增加至 1050 nm 的过程中, SRS 阈值逐渐下降到 3.31 kW. 为实现最优的 SRS 效应抑制, 需要根据辅助光波长对其功率占比进行针对性优化: 对于吸收截面较高的波段, 提高辅助光功率占比可避免辅助光的重吸收较早发生, 有助于提升 SRS 效应阈值; 随着辅助光波长增加, Yb^{3+} 在对应波长的吸收截面降低, 需要适当降低辅助光功率占比, 保证辅助光的重吸收及向信号光的转化. 由图 4 所示, 采用 1040 nm 辅助光, 且 1080 nm 信号光与辅助光功率比为 1:25 的情况下, 可将放大器 SRS 效应阈值由未注入辅助光时的 3.14 kW 提升至最高 8.42 kW.

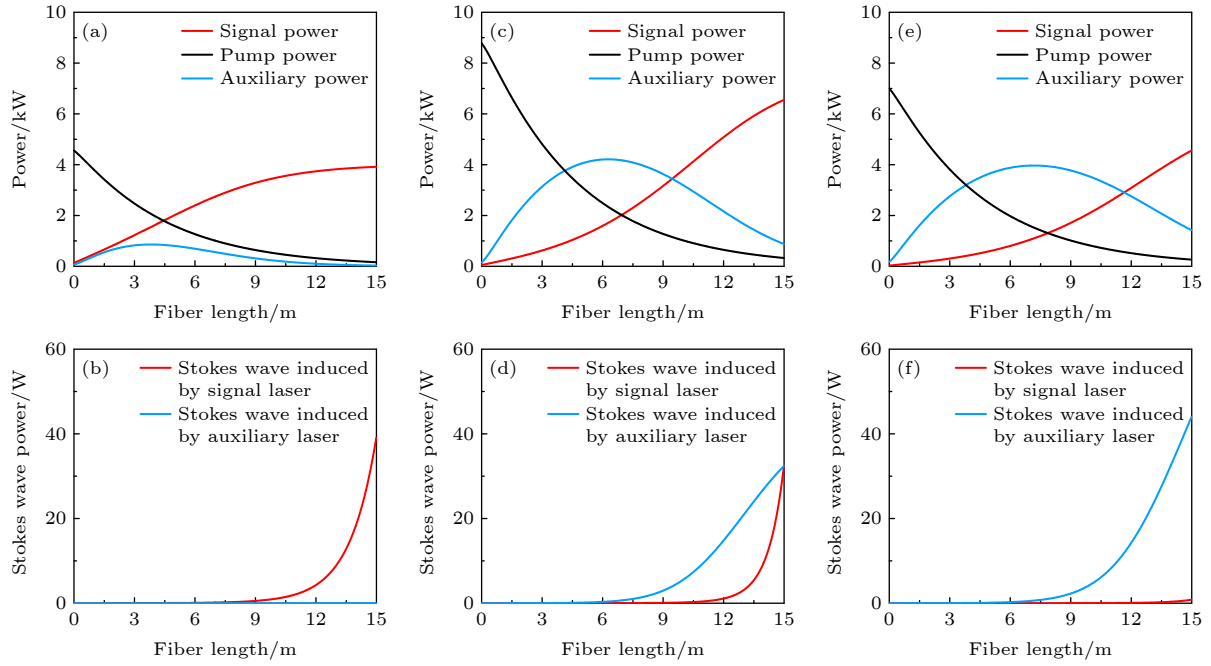


图 3 不同信号/辅助光功率比下掺镱光纤放大器中激光功率分布 (a), (b) 2:1; (c), (d) 1:3; (e), (f) 1:6

Fig. 3. Laser power distribution in yttrium-doped fiber amplifier with different signal/auxiliary laser power ratios: (a), (b) 2:1; (c), (d) 1:3; (e), (f) 1:6.

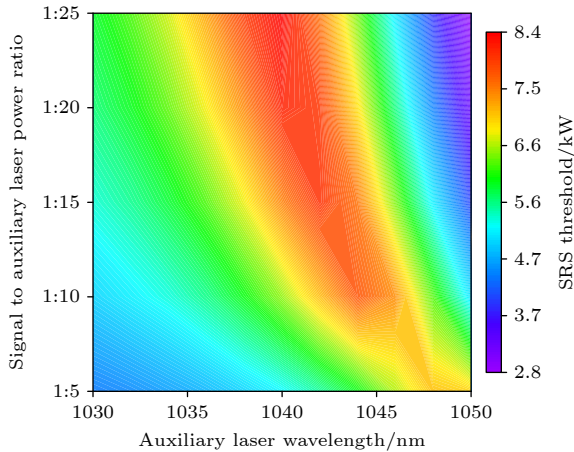


图 4 SRS 效应阈值与辅助光波长、功率占比的关系

Fig. 4. SRS threshold as a function of auxiliary laser wavelength and power ratio with signal laser.

3.2 辅助光对光纤放大器单纤输出功率理论极限的影响

3.1 节的分析中固定了光纤尺寸为 $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$, 当光纤尺寸发生改变时, SRS 效应不再是限制功率提升的唯一因素. 研究表明, 高功率掺镱光纤放大器输出功率提升会受到 SRS, TMI、泵浦亮度、热透镜、热断裂、纤芯熔融、光学损伤等因素的综合限制^[21–24]. 本节通过功率传输方程计算 SRS 效应阈值, 结合前述其他限制因素, 分析辅助光注

入对光纤放大器输出功率极限的提升效果. 需要指出的是, 其他限制因素的功率阈值由 Zervas 等^[21,23]的经验公式计算得到, 仿真中选用的光纤端面损伤强度为 $100\ \text{W}/\mu\text{m}^2$, 半导体激光器泵浦亮度值为 $0.34\ \text{W}/\mu\text{m}^2$ ^[24].

通过计算不同光纤尺寸和长度下前述限制因素的激光阈值, 可获得放大器在该光纤参数下的功率输出极限, 如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 其中, 灰色等高线为包层尺寸, 黄色虚线划分出不同限制因素的影响区域. 仿真结果表明, 泵浦亮度、SRS, TMI 为限制掺镱光纤放大器激光功率提升的主要因素. 对比图 5 所示结果可知, 在未注入辅助光时, 使用长 8 m, 纤芯/包层尺寸为 $40\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 的双包层掺镱光纤, 在 976 nm 半导体激光泵浦条件下, 掺镱光纤放大器最高可实现约 19 kW 的功率输出, 此时功率进一步提升受到 SRS 效应与 TMI 效应共同限制; 当引入辅助光来抑制 SRS 效应时, 可在光纤长度为 11 m、纤芯/包层尺寸为 $40\ \mu\text{m}/460\ \mu\text{m}$ 时实现约 31 kW 功率输出, 输出极限比无辅助光注入时提升 63%. 需要注意的是, 图 5(b) 关于 SRS 阈值的计算始终根据光纤的长度和尺寸调节辅助光的优化参数以获得最高的 SRS 效应阈值, 注入信号光与辅助光功率之和仍为 200 W.

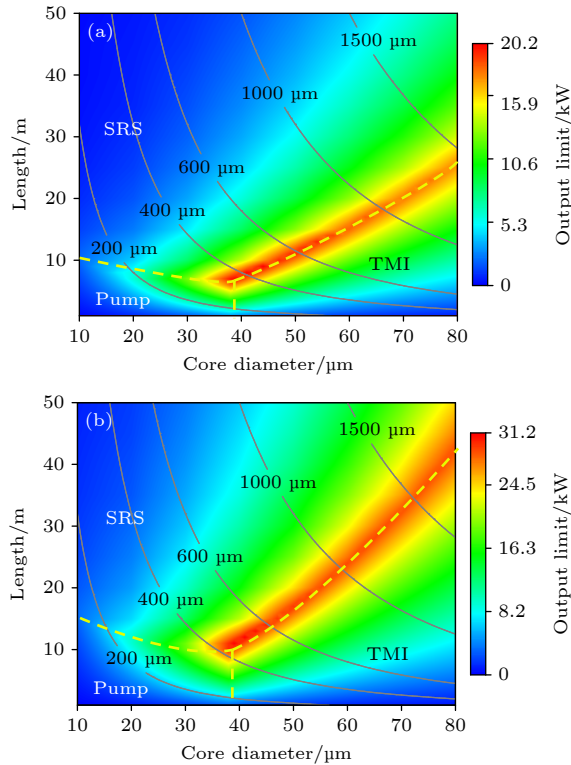


图5 掺镱光纤放大器在不同光纤尺寸下功率输出极限, SRS: 受激拉曼散射效应; TMI: 模式不稳定效应; Pump: 泵浦亮度 (a) 未注入辅助光时功率输出极限; (b) 注入辅助光后功率输出极限

Fig. 5. Power scaling limit of ytterbium-doped fiber amplifiers under different fiber size. SRS: stimulated Raman scattering, TMI: transverse mode instability, Pump: pump brightness: (a) Output limit without auxiliary laser injection; (b) output limit after auxiliary laser injection.

4 结 论

通过对高功率掺镱光纤放大器引入辅助光, 根据 Yb^{3+} 对不同波长激光的吸收发射特性优化辅助光波长与功率占比, 使信号光获得的增益向光纤输出端移动, 降低信号光在光纤中与 Stokes 光的作用强度和长度来抑制 SRS 效应. 理论分析表明, 在基于 20 μm /400 μm 掺镱大模场光纤的 1080 nm 光纤放大器中, 采取 1080 nm 信号光和 1040 nm 辅助光注入功率和为 200 W、注入功率比为 1:25 时, 有望将 SRS 阈值由 1080 nm 单波长放大的 3.14 kW 提升至 8.42 kW. 该技术方案操作较为简单, 可以和其他抑制 SRS 效应的技术相结合, 为功率提升受限于 SRS 效应的 MOPA 结构光纤激光器提供新的发展思路.

参考文献

[1] Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2013 *Nat. Photonics* **7**

861

- [2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **27** B63
- [3] Shi W, Fang Q, Zhu X, Norwood R A, Peyghambarian N 2014 *Appl. Opt.* **53** 6554
- [4] Zenteno L A, Wang J, Walton D T, Ruffin B A, Li M J 2005 *Opt. Express* **13** 8921
- [5] Kim J, Dupriez P, Codemard C, Codemard C, Nilsson J, Sahu J K 2006 *Opt. Express* **14** 5103
- [6] Nodop D, Jauregui C, Jansen F, Limpert, Tünnemann A 2010 *Opt. Lett.* **35** 2982
- [7] Wang M, Zhang Y J, Wang Z F, Sun J J, Cao J Q, Leng J Y, Gu X J, Xu X J 2017 *Opt. Express* **25** 1529
- [8] Hu Q H, Tian X, Zhao X F, Wang M, Xi X M, Wang Z F, Xu X J 2022 *Opt. Laser Technol.* **150** 107984
- [9] Li H, Chen J B, Ye X Y, Wang C W, Wang M, Wu B Y, Xiao H, Chen Z L, Wang Z F 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 0215001 (in Chinese) [李昊, 陈金宝, 叶新宇, 王崇伟, 王蒙, 武柏屹, 肖虎, 陈子伦, 王泽峰 2024 *中国激光* **51** 0215001]
- [10] Li H, Ye X Y, Wang M, Wu B Y, Gao C H, Chen Z L, Wang Z F, Chen J B 2023 *Acta Opt. Sin.* **43** 1714007 (in Chinese) [李昊, 叶新宇, 王蒙, 武柏屹, 高晨晖, 陈子伦, 王泽峰, 陈金宝 2023 *光学学报* **43** 1714007]
- [11] Jiao K R, Shen H, Guan Z W, Yang F Y, Zhu R H 2020 *Opt. Express* **28** 6048
- [12] Liu W, Ma P F, Lv H B, Xu J G, Zhou P, Jiang Z F 2016 *Opt. Express* **24** 26715
- [13] Li T L, Ke W W, Ma Y, S Y H, Gao Q S 2019 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **36** 1457
- [14] Meng X M, Yang B L, Xi X M, Wang P, Shi C, Zhang H W, Wang X L 2023 *Acta Opt Sin* **43** 1714001 (in Chinese) [孟祥明, 杨保来, 奚小明, 王鹏, 史尘, 张汉伟, 王小林 2023 *光学学报* **43** 1714001]
- [15] Zhang C, Xie L H, Chu Q H, Liu Y, Huang S, Song H Q, Wu W J, Feng X, Li M, Shen B J, Li H K, Tao R M, Xu L X, Wang J J 2022 *High Power Laser Part. Beams* **34** 126 (in Chinese) [张春, 谢亮华, 楚秋慧, 刘均, 黄珊, 宋华青, 吴文杰, 冯曦, 李敏, 沈本剑, 李昊坤, 陶汝茂, 许立新, 王建军 2022 *强激光与粒子束* **34** 126]
- [16] Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2009 *Opt. Express* **17** 8476
- [17] Zheng J k, Zhao W, Zhao B Y, Li Z, Li G, Gao Q, Ju P, Gao W, She S F, Wu P 2018 *Laser Phys.* **28** 105105
- [18] Ying H Y, Cao J Q, Yu Y, Wang M, Wang Z F, Chen J B 2017 *Optik* **144** 163
- [19] Luo Y, Wang X L, Zhang H W, Su R T, Ma P F, Zhou P, Jiang Z F 2017 *Acta Physica. Sin.* **66** 234206 (in Chinese) [罗亿, 王小林, 张汉伟, 栗荣涛, 马鹏飞, 周朴, 姜宗福 2017 *物理学报* **66** 234206]
- [20] Lu Y, Han Z G, Shen H, Yan M J, Shen H, Zhu R H 2019 *Proceeding of the 14th National Conference on Laser Technology and Optoelectronics* Shanghai, China, March 17–20, 2019 p11170
- [21] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, Shverdin M Y, Stappaerts E A, Sridharan A K, Pax H P, Heebner J E, Sider C W, Barty C P J 2008 *Opt. Express* **16** 13240
- [22] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, Xu X J, Liu Z J 2011 *Opt. Express* **19** 18645
- [23] Zervas M N 2019 *Opt. Express* **13** 19019
- [24] Dong L, Ballato J, Kolis J 2023 *Opt. Express* **27** 6690

Suppression effect of auxiliary laser on stimulated Raman scattering effect of high-power Yb-doped fiber laser amplifier*

Zhao Wei¹⁾²⁾ Fu Shi-Jie^{1)2)†} Sheng Quan¹⁾²⁾³⁾ Xue Kai¹⁾²⁾
Shi Wei^{1)2)‡} Yao Jian-Quan¹⁾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) (HFB Photonics Co., Ltd., Weihai 264200, China)

(Received 28 June 2024; revised manuscript received 10 September 2024)

Abstract

A novel technique to suppress the stimulated Raman scattering (SRS) effect in high-power ytterbium-doped fiber amplifier is proposed and theoretically investigated by introducing an auxiliary laser to manipulate the gain distribution in the amplifier.

By injecting an auxiliary laser with shorter wavelength than the signal into the amplifier, the auxiliary laser, owing to its larger stimulated emission cross-section, initially extracts a significant portion of the laser gain. At this point, the gain of the longer-wavelength signal laser is suppressed to a certain extent. As the pump power is depleted in the rear segment of the gain fiber, the amplified auxiliary laser, which has larger absorption cross-section than the signal, is gradually absorbed by the active fiber and transfers its power to the signal laser. This process enhances the gain of the long-wavelength signal laser, enabling it to be rapidly amplified at the end of the amplifier. Compared with the amplification of the singular signal laser, the introduction of an extra auxiliary laser shifts the high-gain region of the signal laser to the rear portion of the amplifier, thereby reducing the effective length and alleviating the interaction strength between the signal laser and Stokes wave, in order to obtain a higher SRS threshold.

The SRS threshold of a 20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ fiber amplifier is investigated by using numerical simulation under different wavelengths of the auxiliary laser and different power ratios of the signal laser to auxiliary laser. The results indicate that incorporating an auxiliary laser with an appropriate wavelength and power level can significantly reduce the interaction strength between the signal and Stokes wave, thereby enhancing the SRS threshold of the amplifier efficiently. Specifically, in a 1080 nm fiber amplifier utilizing a 20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ ytterbium-doped large mode area fiber, if the total power of the 1080 nm signal and 1040 nm auxiliary laser is set to 200 W, while with a power ratio of 1:25, the SRS threshold increasing from 3.14 kW (singular signal laser) to 8.42 kW can be anticipated. Moreover, based on the auxiliary laser amplification technique that suppresses the SRS effect, the output power enhancement of fiber lasers with the structure of master oscillator power amplifier (MOPA) is also analyzed. This technical solution is relatively straightforward to implement and can be seamlessly integrated with other techniques aimed at reducing the SRS effect, which is promising to promote further power scaling of all-fiber amplifier.

Keywords: high-power laser, fiber amplifier, stimulated Raman scattering, auxiliary laser

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Dr, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.73.20240895

CSTR: 32037.14.aps.73.20240895

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFB3606000), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62105240, 62275190, 62075159), the Key R&D Program of Shandong Province, China (Grants Nos. 2020CXGC010104, 2021CXGC010202), the Seed Foundation of Tianjin University, China (Grant No. 2023XPD-0020), the Open Foundation of Key Laboratory of Laser Devices and Technology of China North Industries Group Co., LTD (Grant No. QT23120019), and the Taishan Industry Leading Talent Project, China (Grant No. scx202312163).

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

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



辅助光对高功率掺镱光纤激光放大器受激拉曼散射效应的抑制作用

赵卫 付士杰 盛泉 薛凯 史伟 姚建铨

Suppression effect of auxiliary laser on stimulated Raman scattering effect of high-power Yb-doped fiber laser amplifier

Zhao Wei Fu Shi-Jie Sheng Quan Xue Kai Shi Wei Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 204201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240895

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240895>

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

基于M型掺镱光纤的近单模2 kW光纤放大器

Near-single-mode 2-kW fiber amplifier based on M-type ytterbium-doped fiber

物理学报. 2022, 71(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211751>

基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

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

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

物理学报. 2023, 72(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222464>

强度调制宽带激光对受激拉曼散射动力学爆发的抑制

Suppression of stimulated Raman scattering kinetic bursts by intensity-modulated broadband laser

物理学报. 2024, 73(5): 055202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231679>

高功率全光纤1.6微米类噪声方形脉冲激光器

High-power 1.6 μm noise-like square pulse generation in an all-fiber mode-locked laser

物理学报. 2020, 69(16): 164202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200245>

X波段高重频长脉冲高功率多注相对论速调管放大器的设计与实验研究

Design and experiment of X-band high-repetition rate high-power multi-beam relativistic klystron amplifier

物理学报. 2020, 69(21): 218401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201013>