

变纤芯直径传能光纤中受激拉曼散射 传输特性的理论研究*

王 力¹, 王小林^{1,2,3}, 张汉伟^{1,2,3}, 陈子伦^{1,2,3}, 许晓军^{1,2,3}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 长沙 410073;
3. 高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 锥形光纤纤芯直径沿着光纤长度方向均匀增大, 在抑制非线性效应方面有着独特的优势。理论对比了单横模高斯光束输入时, 输入纤芯直径均为 50 μm 、纤芯直径沿着光纤长度方向恒定、线性增大和非线性增大的变纤芯直径传能光纤的输出光谱演化和拉曼光特性。在相同条件下, 输入功率 10 kW 时, 恒定型传能光纤的输出光谱中, 拉曼抑制比(定义为输出光谱中信号光峰值强度分贝值与拉曼光峰值强度分贝值之差)为 33.1 dB, 线性增大和非线性增大型的输出拉曼抑制比分别为 47.0, 48.6 dB, 分别优于恒定型传能光纤 13.9, 15.5 dB; 输入功率达 17.5 kW 时, 恒定型传能光纤中有 81.6% 的输入能量被耗散或转移到其他波长, 线性增大和非线性增大仅不到 2%, 其输出的信号光波段能量占总输入能量的 98.1%, 98.9%。结果表明, 使用线性增大型或非线形增大型传能光纤代替恒定型常规光纤, 可以有效提高受激拉曼散射阈值, 相关研究可以为大功率光纤合束器和光纤端帽的设计提供有益参考。

关键词: 光纤激光; 受激拉曼散射; 传能光纤; 变纤芯直径; 锥形光纤; 仿真
中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202133.210225

Theoretical study on transmission characteristics of stimulated Raman scattering in passive fiber with variable core radius

Wang Li¹, Wang Xiaoling^{1,2,3}, Zhang Hanwei^{1,2,3}, Chen Zilun^{1,2,3}, Xu Xiaojun^{1,2,3}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. State Key Laboratory of Pulsed Laser Technology, Changsha 410073, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Tapered fiber has unique advantages in suppressing nonlinear effects because its core radius increases uniformly along the length of the fiber. In this paper, the output spectrum evolution and Raman performance of three different types of passive fibers are simulated and analyzed under the input of single transverse mode Gaussian beam: the passive fibers with constant core radius, linearly increasing radius and nonlinearly increasing core radius, all have the same input core diameter of 50 μm . Under the same conditions, when the input power is 10 kW, the Raman suppression ratio (defined as the difference between the intensity of the signal peak and the Raman peak in the spectrum) of constant type passive fiber is 33.1 dB, while those of the linear type and nonlinear type are 47.0 dB and 48.6 dB, respectively, which are better than that of constant type by 13.9 dB and 15.5 dB; When the input power reaches 17.5 kW, 81.6% of the input energy of the constant type is dissipated or transferred to other wavelengths, while that of linear and nonlinear types is less than 2%, and the output signal optical band energy accounts for 98.1% and 98.9% of the total input energy. The results show that the threshold of stimulated Raman scattering can be effectively improved by using linear or nonlinear passive fiber instead of constant type, and the study can provide a useful reference for the design of high-power fiber combiner and fiber end cap.

Key words: fiber laser; stimulated Raman scattering; passive fiber; variable core diameter; tapered fiber; simulation

* 收稿日期: 2021-06-07; 修订日期: 2021-10-20
联系方式: 王 力, 13545485054@163.com。
通信作者: 王小林, chinawxllin@163.com;
许晓军, xu_xiaojun@126.com。

锥形光纤作为一种非均匀的光波导,被广泛应用于光场能量耦合、传感、扩束、超连续谱产生以及超低功率水平下的非线性效应产生等领域,但直到最近的十多年,锥形双包层光纤才逐渐被应用到高功率激光器中^[1-11]。2008年,芬兰坦佩雷理工大学和俄罗斯科学院首次将双包层锥形光纤作为高功率激光振荡器和放大器的增益介质^[1],并于2009年和2010年分别实现了振荡器结构600 W^[2]和750 W^[3]输出。2012年,该课题组的J. Kerttula等人利用截断法测量了一段长7 m、拉锥比高达18的长锥形光纤的模式演化情况^[4],该实验使用1060 μm单模光从小端注入,大端纤芯直径达到117 μm,结果表明,即使在如此大的拉锥比之下,距离小端6.4 m处,长锥形光纤仍然很好地保持了光纤中的基模传输。2016年,本课题组史尘等人,系统研究了有源长锥形多模光纤模式演化^[6],结果也表明,在近基模场注入条件下,纤芯直径由小到大配置变纤芯直径光纤可以有效地保持良好的光束质量。在此基础上,本课题组于2018年提出了一种纤芯直径两端小、中间大的纺锤形增益光纤,并应用于光纤振荡器中,初步验证了该类光纤在功率提升和光束质量保持方面的可行性^[7],于2020年先后实现了3 kW^[8]和5 kW^[9]的功率输出。

关于增益双包层锥形光纤的诸多研究成果也可应用于传能光纤领域,进一步提高受激拉曼散射(SRS)阈值,提升传能光纤的功率传输能力。由于纤芯直径由小到大配置变纤芯直径光纤可以有效地保持良好的光束质量,因而本文对光束质量的变化不做讨论,重点考虑变纤芯直径传能光纤中的SRS传输特性。本文使用Matlab数值仿真方法,对纤芯直径恒定(以下简称Constant型)、纤芯直径线性增大(以下简称Linear型)和非线性增大(以下简称Nonlinear型)的传能光纤在拉曼抑制方面的效果进行了分析。

1 理论模型

三种不同纤芯形状的光纤剖面图及半径变化示意图如图1所示,其纤芯直径变化曲线描述为^[10]

$$r(z) = \frac{b_0 - b}{2L}z^2 + \frac{b}{2}z + \frac{D_1}{2} \quad (1)$$

式中: $b_0 = (D_2 - D_1)/L$ 为平均锥角, D_1, D_2 分别为前段和后段的纤芯直径, L 为中段变化区的总长度; b 为形状参数,控制弯曲的程度。

可以看出,与Constant型传能光纤不同的是,Linear型和Nonlinear型前后两段光纤纤芯直径恒定,前段纤径与Constant型相同,但后段纤径较大;中段为过渡锥区,沿光传播方向线性或非线性过渡到后段;由于中后段大芯径区域的存在,Linear型和Nonlinear型的有效模场面积 A_{eff} 大于Constant型^[7]。

拉曼阈值公式^[12]

$$P_{\text{th}}^{\text{SRS}} \approx 16A_{\text{eff}}/g_{\text{R}}L_{\text{eff}} \quad (2)$$

式中: g_{R} 为拉曼增益系数; $A_{\text{eff}}, L_{\text{eff}}$ 分别表示有效模场面积和光纤等效长度,且

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_{\text{p}}L)]/\alpha_{\text{p}} \quad (3)$$

式中: α_{p} 和 L 分别为信号光频率处的光纤损耗和光纤长度。

式(3)表明,由于光纤损耗,有效光纤长度由 L 减至 L_{eff} 。在本文的分析比较中,三种不同纤芯形状的光纤损耗和总长度相同,因而 L_{eff} 相同,拉曼阈值的差别主要由 A_{eff} 决定。因此可以预见,通过合理设计图1(b)和图1(c)两种光纤前中后三段的长度和纤芯直径,即可在保持光束质量不变的前提下,增大光纤有效模场面积 A_{eff} ,从而进一步提高传能光纤中的SRS阈值。

根据文献[12],考虑一束连续波入射进光纤,同时考虑损耗、信号光和拉曼光之间的非线性相互作用,长锥形光纤中的受激拉曼散射过程可以用下列两个耦合方程来描述

$$dI_{\text{s}}/dz = g_{\text{R}}I_{\text{p}}I_{\text{s}} - \alpha_{\text{s}}I_{\text{s}} \quad (4)$$

$$dI_{\text{p}}/dz = -(\omega_{\text{p}}/\omega_{\text{s}})g_{\text{R}}I_{\text{p}}I_{\text{s}} - \alpha_{\text{p}}I_{\text{p}} \quad (5)$$

式中: ω_{p} 和 ω_{s} 分别为信号光和拉曼光频率; I_{p} 和 I_{s} 分别为该频率处的信号光和拉曼光功率; α_{p} 和 α_{s} 分别为信号光和拉

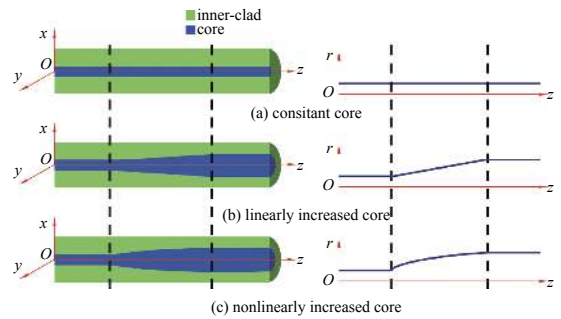


Fig. 1 Profile and radius change diagram of energy transmission fiber with different core shapes

图1 三种不同纤芯形状的传能光纤剖面及芯径变化示意图

曼光频率处的光纤损耗。

式 (5) 右边第一项代表作为拉曼泵浦的信号光消耗, 尽管完整的受激拉曼散射过程必须考虑到该项影响, 但在估计拉曼阈值时可以将其忽略^[13]。如果忽略泵浦消耗, 式 (5) 只是信号光 I_p 的方程, 易于求解, 再根据式 (4) 即可求解拉曼光强

$$I_s(L) = I_s(0) \exp(g_R I_0 L_{\text{eff}} - \alpha_s L) \quad (6)$$

式中: I_0 为 $z = 0$ 处的入射信号功率密度, 即光强。

式 (6) 表明, 沿光传播方向, 某一位置的拉曼光强与前一位置的入射信号光的功率密度值有关。在相同功率基模信号光输入时, 纤芯直径越大, 则有效模场面积越大, 入射的信号光强 I_0 越弱, 在 L 处产生的拉曼光强将呈指数衰减, 信号光转移到拉曼光的能量减少, 从而拉曼抑制比越大。可以预见, 使用 Linear 或 Nonlinear 型替代 Constant 型光纤, 由于中后段的纤芯直径较大, 可以有效降低信号光功率密度, 从而提高输出光谱的拉曼抑制比, 且中段越短、后段直径越大, 拉曼抑制效果越好。

本文的仿真从式 (4)、式 (5) 出发, 通过求解微分方程组, 得到特定长度处各个频率点的光功率, 即输出光谱。通常纤芯直径与有效模场直径并不完全相等^[14], 为简化分析, 可以假定二者相等, 并假定信号光为基模, 呈高斯型分布, 其他波长处的扰动按照不大于中心波长峰值强度的 10^{-7} 随机给出; 采用单个洛伦兹线型作为石英光纤中实际拉曼增益谱的近似^[12,15-16], 则拉曼响应函数 $h_R(t)$ 可以写为

$$h_R(t) = (\tau_1^{-2} + \tau_2^{-2}) \tau_1 \exp(-t/\tau_2) \sin(-t/\tau_1) \quad (7)$$

$$g_R(\Delta\omega) = \frac{\omega_0}{cn(\omega_0)} f_R \chi^{(3)} \text{Im}[\tilde{h}_R(\Delta\omega)] \quad (8)$$

式中: $\tilde{h}_R(\Delta\omega)$ 是 $h_R(t)$ 的傅里叶变换; c 为光速; n 为折射率; $\chi^{(3)}$ 表示介质的第三阶极化率; Im 表示虚部。根据 1989 年的相关研究^[12,15-16], 可以使用仿真参数 $\tau_1 = 12.2$ fs, $\tau_2 = 32$ fs 和 $f_R \approx 0.18$ 进行计算。

2 结果分析

2.1 不同纤芯形状的仿真结果对比

首先, 给出仿真光纤的尺寸参数和输入光谱形态, 如图 2 所示。图 2(a) 为纤芯直径随长度变化, 图 2(b) 为输入光参数。

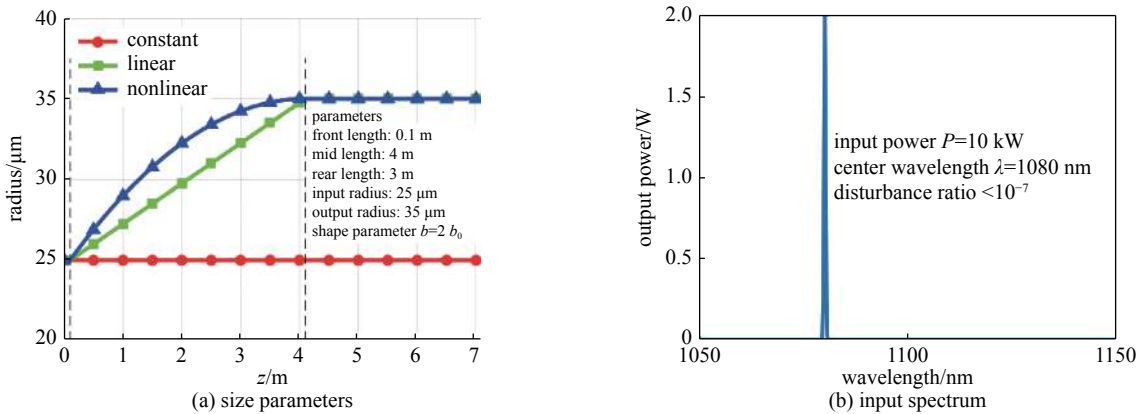


Fig. 2 Size parameters and input spectrum of simulated optical fibers

图 2 仿真光纤的尺寸参数和输入光谱

此时输出光谱如图 3 所示, 容易看出, Linear 或 Nonlinear 型传能光纤的拉曼抑制比明显高于 Constant 型。

表 1 给出了不同输入光功率条件下, 三种光纤的输出光谱拉曼抑制比。可以看到: 输入功率 10 kW 时, Constant 型传能光纤的输出光谱中, 拉曼抑制比为 33.1 dB, Linear 和 Nonlinear 型的输出拉曼抑制比为 47.0, 48.6 dB, 分别优于 Constant 型传能光纤 13.9, 15.5 dB; 当输入功率增加到 17.5 kW 时, Linear 和 Nonlinear 型传能光纤的拉曼抑制比为 28.5, 31.3 dB, 仍具有较好的 SRS 抑制效果, 而此时 Constant 型已产生很强的拉曼效应, 拉曼抑制比仅为 4.1 dB。

从能量转移角度也可以看出 Linear 型或 Nonlinear 型明显优于 Constant 型。输入功率 17.5 kW 时的仿真结果如图 4 所示。当输入功率为 17.5 kW 时, Constant 型传能光纤有 81.6% 的能量被耗散或耦合到其他波长, 而 Linear 和

Nonlinear 型仅不到 2%, 其输出的信号光波段能量占总输入能量的 98.1%, 98.9%, 仍然具有较好的拉曼抑制效果。

表 1 给出了不同输入光功率下, 输出光谱中信号光能量相对输入光总能量的百分比, 其中信号光能量按 1078.5~1081.5 nm 范围计算。可以看出, 随着输入功率的增大, 有更多的输入光能量被耗散或者耦合到拉曼光中, 但相同条件下 Linear 或 Nonlinear 型的信号光能量始终高于 Constant 型。

2.2 不同拉锥参数结果对比

2.2.1 不同拉锥长度对输出光谱的影响

保持输入输出端纤芯直径和总长度不变, 改变 Linear 型光纤的中段长度 (图 5(a)), 在输入功率为 20 kW 时, 得到仿真结果如图 5(b) 所示, 可以看出, 随着中段锥形区域长度增加, 拉曼抑制比减小, 信号光能量也随之降低, 说明转移到其他波长的能量在增加。因此, 为获得更高的拉曼抑制比, 在设计 Linear 型锥区长度时, 应在保证绝热拉锥的条件下, 尽可能短, 这和理论分析也是相符的。

表 1 不同输入光功率条件下的拉曼抑制比和信号光能量占比

Table 1 Raman suppression ratio and proportion of signal light energy at different input power

No.	input power/kW	Raman suppression ratio/dB			proportion of signal light energy/%		
		constant	linear	nonlinear	constant	linear	nonlinear
1	10.0	33.1	47.0	48.6	99.2	100	100
2	12.5	22.7	40.3	42.3	93.6	99.8	99.9
3	15.0	13.1	34.2	36.6	64.5	99.5	99.7
4	17.5	4.1	28.5	31.3	18.4	98.1	98.9
5	20.0	0.0	22.3	25.4	2.6	93.0	96.4

2.2.2 不同拉锥比例对输出光谱的影响

保持前中后三段长度、输入端纤芯直径不变的前提下, 改变 Linear 型输出端纤芯直径, 即调整拉锥比例 (图 6(a)), 在输入功率为 20 kW 时, 仿真结果如表 2 和图 6(b) 所示, 其中第二组数据即为 Constant 型光纤的输出表现。可以看出, 当输出端纤芯直径比输入端小时, 如第一组数据所示, 拉曼效应明显增强, 当输出端纤芯直径增大时, 拉锥比增大, 拉曼效应逐渐减弱, 拉曼抑制比和信号光能量占比也随之增大。这与理论分析也是相符的。

综合上述分析可知, 使用 Linear 型时, 为获得更高的拉曼抑制比, 应在保证光束质量要求的条件下, 尽量减小锥区长度, 增大拉锥比。

对于 Nonlinear 型也可以得到上述结论, 讨论方法同上, 这里不再赘述, 仅讨论形状参数 b 对输出光谱的影响。

2.2.3 形状参数对输出光谱的影响

保持 Nonlinear 型传能光纤前段 0.1 m、中段 4 m、后段 3 m, 前段和后段半径为 25 μm 和 35 μm 不变, 取不同的形状参数 b (图 7(a)), 输入光功率为 20 kW 时, 仿真结果如图 7(b) 所示, 可以看出, 随着形状参数 b 的增大, 信号光和拉曼光峰值之差的分贝值以及信号光的能量占比均在增大, 说明大的形状参数在相同条件下具有更好的拉曼抑制效果。当形状参数 $b = b_0$ 时, Nonlinear 型传能光纤退化为 Linear 型。

3 结 论

本文我们采用 Matlab 方法比较了纤芯直径恒定 (Constant)、线性增大 (Linear) 和非线性增大 (Nonlinear) 三种不同形态传能光纤的输出光谱演化和拉曼光特性, 根据理论分析和仿真计算, 将常规纤芯直径不变的传能光纤改用

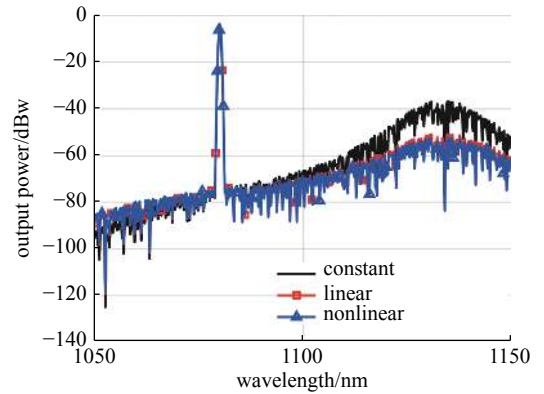


Fig. 3 Output spectrum at 10 kW input

图 3 输入为 10 kW 时的输出光谱

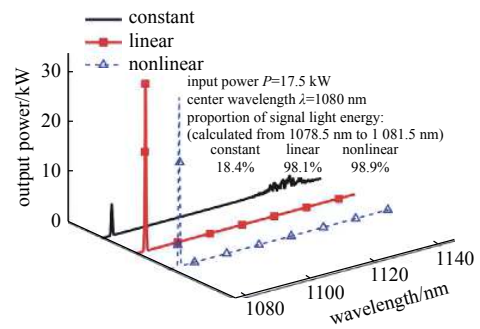


Fig. 4 Raman power distribution at 17.5 kW input

图 4 输入 17.5 kW 时的拉曼光功率分布

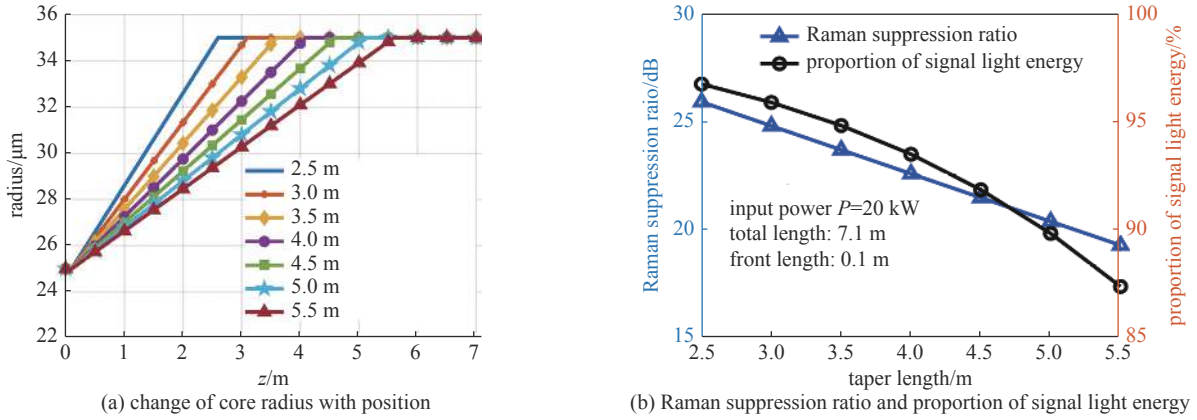


Fig. 5 Simulation results of different taper lengths

图 5 不同拉锥长度的仿真结果

表 2 不同拉锥比例的仿真结果

Table 2 Simulation results of different taper ratios

No.	input radius/ μm	output radius/ μm	SRS suppression ratio/dB	proportion of signal light energy/%
1	25	20	0	0
2	25	25	0	2.7
3	25	30	11.3	54.5
4	25	35	22.3	93.2
5	25	40	30.1	98.7
6	25	45	35.8	99.6
7	25	50	40.1	99.8

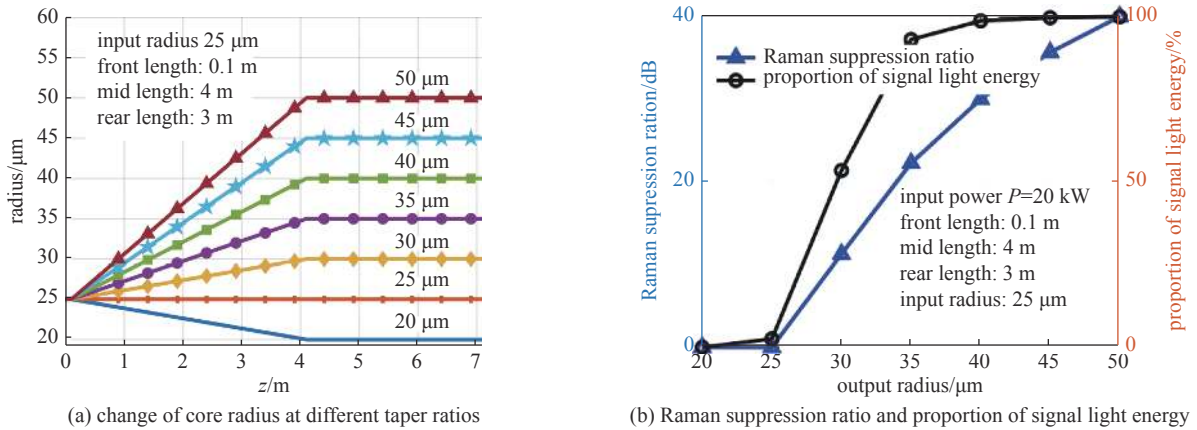


Fig. 6 Simulation results of different taper ratios

图 6 不同拉锥比例的仿真结果

Linear 型或 Nonlinear 型变纤芯直径传能光纤,可以有效抑制受激拉曼散射,从而提高激光器的输出功率水平。仿真结果表明,在单横模高斯光束输入、初始纤芯直径均为 $50\ \mu\text{m}$ 的条件下,输入功率 $10\ \text{kW}$ 时,Constant 型传能光纤的输出拉曼抑制比为 $33.1\ \text{dB}$,Linear 和 Nonlinear 型的输出拉曼抑制比分别为 $47.0, 48.6\ \text{dB}$,分别优于 Constant 型传能光纤 $13.9, 15.5\ \text{dB}$;输入功率达 $17.5\ \text{kW}$ 时,Constant 型传能光纤有 81.6% 的能量被耗散或耦合到其他波长,而 Linear 和 Nonlinear 型仅不到 2% ,其输出的信号光波段能量占总输入能量的 $98.1\%, 98.9\%$ 。为获得更好的 SRS 抑制效果,在设计变纤芯直径传能光纤时,应在保证光束质量要求的前提下,尽量减小锥区长度,增大拉锥比,使用 Nonlinear 型变纤芯直径传能光纤时,还应尽可能设计大的形状参数。

关于变纤芯直径有源光纤的制作,文献 [17] 做了详细论述,对变纤芯直径传能光纤而言,由于没有 Yb 离子掺杂,技术实现上相对更加容易。目前变纤芯直径有源光纤已有相关成品和实验应用 [7-9,17],相信未来变纤芯直径传能光纤在高功率应用方面也将有很好的应用前景,例如可以采用锥形光纤制作光纤端帽 [18] 或用作合束器输出尾

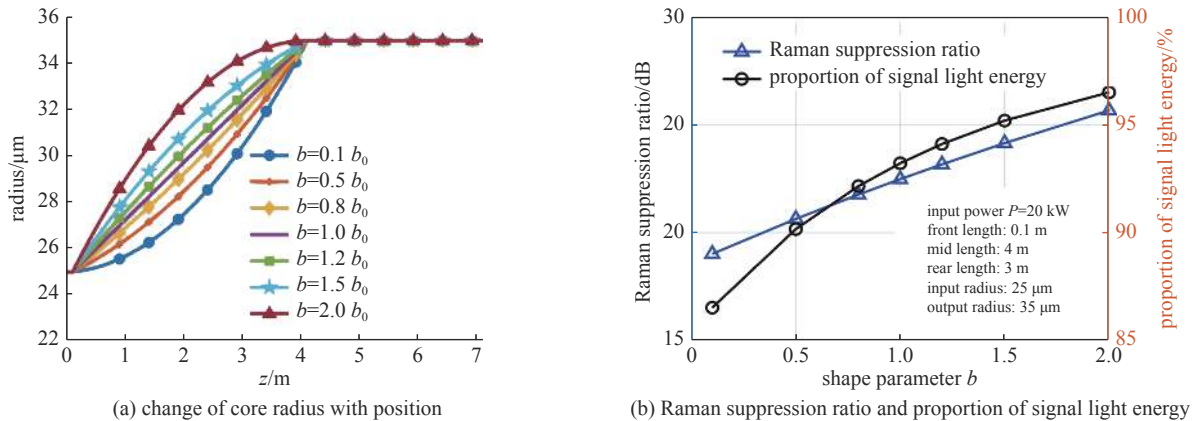


Fig. 7 Simulation results of different shape parameters

图7 不同形状参数的仿真结果

纤,在提升受激拉曼散射阈值的同时保证激光的光束质量,避免普通纤芯直径均匀大模场光纤难以兼顾非线性和光束质量的问题,进一步提高激光器功率输出水平。

参考文献:

- [1] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. Double clad tapered fiber for high power applications[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 1929-1944.
- [2] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. 600 W power scalable single transverse mode tapered double-clad fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1203-1214.
- [3] Filippov V, Kerttula J, Chamorovskii Y, et al. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12499-12512.
- [4] Kerttula J, Filippov V, Ustimchik V, et al. Mode evolution in long tapered fibers with high tapering ratio[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25461-25470.
- [5] Kerttula J, Filippov V, Chamorovskii Y, et al. Tapered fiber amplifier with high gain and output power[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(11): 1734-1738.
- [6] Shi Chen, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Theoretical study of mode evolution in active long tapered multimode fiber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19473-19490.
- [7] 王小林, 张汉伟, 杨保来, 等. 高功率掺镱光纤振荡器: 研究现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0401004. (Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Yang Baolai, et al. High-power ytterbium-doped fiber laser oscillator: current situation and future developments[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0401004)
- [8] Zeng Lingfa, Xi Xiaoming, Ye Yun, et al. Near-single-mode 3 kW monolithic fiber oscillator based on a longitudinally spindle-shaped Yb-doped fiber[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5792-5795.
- [9] 奚小明, 杨欢, 曾令筏, 等. 国产纺锤形增益光纤主振荡功率放大器实现5kW输出[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 021001. (Xi Xiaoming, Yang Huan, Zeng Lingfa, et al. 5 kW all-fiber amplifier based on homemade spindle-shaped Yb-doped fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 021001)
- [10] 史尘. 高功率长锥形掺镱光纤放大器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017: 1-21 (Shi Chen. The study of high power long tapered fiber amplifiers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 1-21)
- [11] Roy V, Paré C, Labranche B, et al. Yb-doped large mode area tapered fiber with depressed cladding and dopant confinement[C]. *Proceedings SPIE 10083 Fiber Lasers XIV: Technology and Systems*. 2017: 1008314.
- [12] 阿戈沃 G P. 非线性光纤光学[M]. 贾东方, 葛春风, 译. 5版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 27, 203-206 (Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. Jia Dongfang, Ge Chunfeng, trans. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 27, 203-206)
- [13] 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.
- [14] 欧攀, 贾豫东, 白明, 等. 高等光学仿真(Matlab版)——光波导, 激光[M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014 (Ou Pan, Jia Yudong, Bai Ming, et al. *Advanced optical simulation (MATLAB version), optical waveguide and laser*[M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2014)
- [15] Stolen R H, Gordon J P, Tomlinson W J, et al. Raman response function of silica-core fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1989, 6(6): 1159-1166.
- [16] Blow K J, Wood D. Theoretical description of transient stimulated Raman scattering in optical fibers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(12): 2665-2673.
- [17] Ye Yun, Lin Xianfeng, Xi Xiaoming, et al. Novel constant-cladding tapered-core ytterbium-doped fiber for high-power fiber laser oscillator[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e21.
- [18] 王小林, 史尘, 杨保来, 等. 一种基于锥形光纤的高功率光纤端帽: CN207081848U[P]. 2018-03-09 (Wang Xiaolin, Shi Chen, Yang Baolai, et al. High-power fiber end cap based on tapered fiber: CN207081848U[P]. 2018-03-09)