

窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的理论模型和数值分析

粟荣涛 张鹏飞 周朴 肖虎 王小林 段磊 吕品 许晓军

Theoretical and numerical study on narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifier

Su Rong-Tao Zhang Peng-Fei Zhou Pu Xiao Hu Wang Xiao-Lin Duan Lei Lü Pin Xu Xiao-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 154202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172679

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172679>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[国产光纤实现同带抽运 3000 W 激光输出](#)

3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber

物理学报.2018, 67(2): 024205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171676>

[Nd³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤的发光与激光特性研究](#)

Stimulated emission and laser behaviors of Nd³⁺/Yb³⁺ Co-doped phosphate glass fiber

物理学报.2017, 66(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164204>

[单模热致超大模场掺镱光纤放大器的数值研究](#)

Modeling the single-mode thermally guiding very-large-mode-area Yb-doped fiber amplifier

物理学报.2017, 66(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064201>

[基于压电陶瓷与光纤电光调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究](#)

Experimental researches of laser phase lock with dual-servo feedbacks based on the piezoelectric transducer and fiber electrooptic phase modulator

物理学报.2016, 65(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234204>

[掺铒光纤环形激光器中饱和吸收光栅瞬态特性引发跳模的实验研究](#)

Experimental study on mode hopping triggered by transient characteristics of saturable absorber gratings in Er-doped fiber ring lasers

物理学报.2014, 63(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134206>

窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的理论模型 和数值分析*

栗荣涛^{1)2)3)†} 张鹏飞²⁾ 周朴²⁾³⁾ 肖虎¹⁾²⁾³⁾ 王小林²⁾³⁾ 段磊¹⁾
吕品¹⁾ 许晓军²⁾³⁾

1) (中国科学院软件研究所, 北京 100190)

2) (国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

3) (大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 长沙 410073)

(2017年12月18日收到; 2018年2月24日收到修改稿)

窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器在非线性频率变换、遥感探测和量子信息等领域有广泛的应用前景. 综合考虑受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS)、受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS)、自相位调制 (self-phase modulation) 和交叉相位调制 (cross-phase modulation) 等非线性效应, 建立了窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的非线性动力学模型. 仿真分析了放大器中脉冲激光的时频演化特性, 对比研究了抽运脉冲宽度、光纤长度和信号光功率等因素对放大器性能的影响. 研究发现, 上述因素会影响放大器的 SRS 阈值、SBS 阈值、输出激光线宽、激光转换效率等. 例如, 当脉冲宽度为 800 ns 时, SBS 随着抽运功率的增加而发生, 限制了激光功率的提升; 减短抽运脉宽可以抑制 SBS, 但是输出激光的线宽易于展宽到数百 MHz 以上; 增加光纤长度可以获得更低的 SRS 阈值和更高的转换效率, 但是 SBS 效应和光谱展宽程度也随之增强. 系统搭建中需要平衡各非线性效应, 选择合适的系统参数. 研究内容可以为窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的设计搭建提供参考.

关键词: 光纤激光, 拉曼激光, 受激拉曼散射, 受激布里渊散射

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Ye, 42.65.Dr, 42.65.Es

DOI: 10.7498/aps.67.20172679

1 引言

光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑、热管理方便、性能稳定等优势, 是激光领域的重要研究方向^[1-3]. 窄线宽光纤激光具有良好的时间相干性, 在非线性频率变换、激光雷达、量子信息和相干合成等领域有重要应用, 受到研究人员的广泛关注^[4-7]. 直接利用稀土离子受激辐射获得的激光只占整个光谱范围的较小部分, 许多波段的激光无法通过这种方式获得. 激光雷达和激光导星等应用需要用到一些特殊波长的窄线宽激光^[8,9]. 掺稀土离子光纤放大器有效工作的光谱范围有限, 无

法放大这些特殊波段的激光. 由于受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 效应的增益谱较宽 (例如在石英光纤中高达 40 THz^[10]), 因此可以基于 SRS 效应构建光纤拉曼激光器/放大器, 有效拓展高功率光纤激光的光谱范围.

在窄线宽光纤激光中, 极易发生受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 效应. 由于布里渊增益系数远大于拉曼增益系数, 窄线宽拉曼光纤放大器的输出功率主要受限于 SBS 效应. 为了提升系统的 SBS 阈值, 国内外研究人员采用声子剪切光纤^[11]、施加纵向应力梯度^[12-14]和温度梯度^[15,16]等方法抑制 SBS 效应, 实现了数十瓦功率的窄线宽拉曼激光输出^[11,12,17]. 但是, 这些 SBS

* 国家自然科学基金 (批准号: 61705265, 61705264)、中国博士后科学基金 (批准号: 2017M620070) 和国家重点研发计划 (批准号: 2017YFF0104603, 2016YFB0402204) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: surongtao@126.com

抑制方法的技术难度较大,从一定程度上增加了系统的复杂性. 由于SRS和SBS中参与作用的分别是光学声子和声学声子,故SRS的响应时间(小于100 fs)远小于SBS的响应时间(10 ns左右). 对于脉宽为纳秒量级的窄线宽脉冲激光, SBS阈值将大幅度提高,而SRS阈值却不受影响. 因此,采用纳秒脉冲激光作为抽运激光,能够有效提升拉曼放大器的SBS阈值,达到提升拉曼激光峰值功率的目的^[18]. 2014年,国防科技大学的Su等^[19]利用纳秒脉冲激光作为抽运源,使系统的SRS阈值低于SBS阈值,实现了窄线宽纳秒脉冲SRS放大实验. 2015年,伦敦帝国学院的Runcorn等^[20]搭建了中心波长1120 nm、功率大于1 W、线宽约0.04 nm的脉冲光纤拉曼放大器.

在理论研究方面,连续激光拉曼激光器/放大器的相关理论已较为成熟^[21,22],但在窄线宽纳秒脉冲拉曼放大器中,存在SRS、SBS、自相位调制(self-phase modulation, SPM)和交叉相位调制(cross-phase modulation, XPM)等多种非线性效应的相互作用,非线性动力学过程较为复杂,目前还少见深入的理论研究报道. 本文综合考虑SBS, SRS, SPM和XPM等非线性效应,建立了窄线宽脉冲光纤拉曼放大器的动力学理论模型. 基于并行双向的有限时域差分算法建立数值仿真模型并开展了数值仿真研究,描述了拉曼放大器中SBS, SRS和SPM等非线性效应之间的相互作用过程,定量分析了抽运脉冲宽度、光纤长度和信号光功率等对拉曼放大器SBS阈值、输出功率、转换效率和光谱特性等的影响.

2 理论模型

窄线宽脉冲拉曼放大器的基本结构如图1所示. 宽谱的抽运脉冲激光(input pump: A_p)和窄

线宽的信号光(input signal: A_R)从波分复用器(wavelength-division multiplexing, WDM)的两端注入到被动光纤(passive fiber)中. 其中信号光可以是脉冲激光,也可以是连续激光. 当信号光为连续激光时,由于拉曼响应时间小于100 fs,故只有在抽运脉冲经过光纤时才能提取拉曼增益而实现放大,成为具有信号光基底的脉冲序列. 当信号光为脉冲激光时,为有效提取抽运激光能量,需要使信号光和抽运光在时域上保持同步. 信号光提取被动光纤中的拉曼增益得到放大并从放大器前向输出拉曼Stokes光(SRS-f Stokes, amplified signal: A_R). 由于绝大部分增益都被信号光提取,因此后向的拉曼Stokes光(SRS-b Stokes: A_R)一般非常微弱. 被动光纤中未吸收完全的抽运激光经过另一个WDM输出(output pump: A_p). 由于放大后的信号光线宽较窄,峰值功率较高,容易在被动光纤中产生SBS效应,从而激发出后向传输的布里渊Stokes光(SBS-b Stokes: A_B),并在后向传输过程中因布里渊增益得到放大. 由于光纤长度较长且峰值功率较高,在信号光放大的过程中, XPM和SPM效应会使窄线宽的前向拉曼Stokes脉冲光(即拉曼放大后的信号光)发生光谱展宽.

根据上述物理过程,综合考虑SRS, SBS, SPM和XPM等非线性效应以及光纤中的传输损耗,以麦克斯韦方程和物质方程等为基础,可以得到信号光、抽运激光和后向布里渊Stokes光的耦合振幅方程. 其中,方程(1)表示抽运光的传输过程,其等号右边依次代表传输损耗、SRS效应、SPM和XPM效应;方程(2)表示信号光的传输过程,其等号右边依次代表传输损耗、SBS效应、SRS效应、SPM和XPM效应;方程(3)表示后向布里渊Stokes光的传输过程,其等号右边依次代表传输损耗、SBS效应、SPM和XPM效应;方程(4)表示声波场的传输过程.

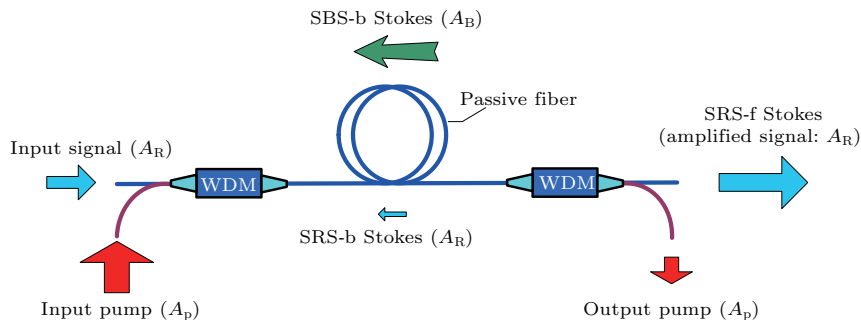


图1 窄线宽脉冲光纤拉曼放大器结构示意图

Fig. 1. Schematic of narrowlinewidth nanosecond pulsed fiber Raman amplifier.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A_p}{\partial z} + \beta_{1p} \frac{\partial A_p}{\partial t} \\ = & -\frac{1}{2}\alpha A_p + i\frac{2}{3}\gamma_p f_R \tilde{h}(\Omega_R) |A_R|^2 A_p \\ & + i\gamma_p \left[\left(1 - \frac{1}{3}f_R\right) |A_p|^2 + 2\left(1 - \frac{2}{3}f_R\right) \right. \\ & \left. \times (|A_B|^2 + |A_R|^2) \right] A_p, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A_R}{\partial z} + \beta_{1R} \frac{\partial A_R}{\partial t} \\ = & -\frac{1}{2}\alpha A_R + i\kappa_1 A_B Q + i\frac{2}{3}\gamma_R f_R \tilde{h}(-\Omega_R) |A_p|^2 A_R \\ & + i\gamma_R \left[\left(1 - \frac{1}{3}f_R\right) |A_R|^2 \right. \\ & \left. + 2\left(1 - \frac{2}{3}f_R\right) (|A_B|^2 + |A_p|^2) \right] A_R, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial A_B}{\partial z} + \beta_{1B} \frac{\partial A_B}{\partial t} \\ = & -\frac{1}{2}\alpha A_B + i\kappa_1 A_R Q^* + i\gamma_B \left[\left(1 - \frac{1}{3}f_R\right) |A_B|^2 \right. \\ & \left. + 2\left(1 - \frac{2}{3}f_R\right) (|A_R|^2 + |A_p|^2) \right] A_B, \end{aligned} \quad (3)$$

$$v_A \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{1}{2}\Gamma_B Q + \frac{i\kappa_2}{A_{\text{eff}}} A_R A_B^* + f, \quad (4)$$

式中, A_p , A_R 和 A_B 分别为抽运光、信号光和后向布里渊 Stokes 光的振幅; Q 为声模的振幅; f_R 表示小数拉曼贡献; $\beta_{1j} = 1/v_j$ ($j = p, R, B$) 为模传输常数; α 为光纤损耗, \tilde{h}_R 表示拉曼响应函数 $h_R(t)$ 的傅里叶变换; Ω_R 和 Ω_B 分别为拉曼和布里渊频移; Γ_B 是声阻尼率; A_{eff} 为有效模场面积; $\gamma_j = n_2\omega_j/(cA_{\text{eff}})$ ($j = p, R, B$) 为非线性系数, n_2 为非线性折射率; v_A 为声速; κ_1 和 κ_2 为 SBS 耦合系数, 其表达式分别为

$$\kappa_1 = \frac{\omega_p \gamma_e}{4n_p c p_0} \frac{\langle |F_p|^2 F_A \rangle}{\langle |F_p|^2 \rangle}, \quad (5)$$

$$\kappa_2 = \frac{\varepsilon_0 n_p \omega_p \gamma_e}{2c v_A} \frac{\langle |F_p|^2 F_A \rangle}{\langle |F_A|^2 \rangle}, \quad (6)$$

其中, γ_e 为电致伸缩常数; F_j ($j = p, A$) 为本征模式分布. 方程 (4) 中 f 为引起 SBS 的噪声项, f 满足以下关系 [23]:

$$\langle f(z, t) \rangle = 0, \quad (7)$$

$$\langle f(z, t) f^*(z', t') \rangle = N_Q \delta(z - z') \delta(t - t'), \quad (8)$$

$$N_Q = \frac{2kT_0 \rho_0 \Gamma_B}{v_A^2 A_{\text{eff}}}, \quad (9)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, T_0 为温度, ρ_0 为平均石英密度.

3 数值仿真与讨论

数值仿真中设信号激光为 1120 nm 的单频连续激光, 抽运激光为 1064 nm 的高斯型脉冲激光, 其峰值功率利用 (10) 式进行计算:

$$P_{\text{peak}} = 2(\ln 2/\pi)^{1/2} J/t_p, \quad (10)$$

式中, P_{peak} 为峰值功率, J 为脉冲能量, t_p 为脉冲宽度 (取半高全宽). 数值仿真中使用的其他主要参数如表 1 所列.

表 1 脉冲光纤拉曼放大器数值仿真中使用的参数
Table 1. Parameters used in the numerical analysis of pulsed fiber Raman amplifier.

参数	数值	参数	数值
λ_p/nm	1064	k	1.38×10^{-23}
λ_R/nm	1120	Γ_B	2.0552×10^8
$n_{\text{clad-p}}$	1.4496	$A_{\text{eff}}/\text{m}^2$	9.4261×10^{-11}
$n_{\text{core-p}}$	1.4518	$v_A/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5897.4
$n_{\text{clad-s}}$	1.4490	γ_e	0.902
$n_{\text{core-s}}$	1.4512	$n_2/\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$	2.6×10^{-20}
$\alpha/\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$	15	$\rho_0/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2210

本节采用并行双向的有限时域差分算法对方程进行求解, 仿真分析脉冲激光的时频特性, 对比研究脉冲宽度、光纤长度和信号光功率等参数对放大器性能的影响.

3.1 时频特性分析

设信号光功率为 20 mW, 光纤长度为 100 m, 抽运脉宽为 800 ns. 激光脉冲在不同抽运功率下的时域特性如图 2 所示, 主要包括输入/输出抽运激光 (input/output pump)、前向拉曼 Stokes 光和后向布里渊 Stokes 光. 从图 2(a) 可以看出, 当抽运激光峰值功率为 155 W 时, SRS 效应还不够强, 前向拉曼 Stokes 光较弱, SBS 效应也未发生. 如图 2(b) 所示, 当抽运激光的峰值功率为 390 W 时, 前向拉曼 Stokes 光的峰值功率达到 354 W, 脉冲宽度被压缩到了约 600 ns. 由于抽运脉冲中间部分的瞬态功率高, 更容易被信号光提取, 于是输出的抽运激光的脉冲中央出现凹陷. 同时, 窄线宽的信号光得到有效放大, 容易在光纤中激发 SBS 效应, 能够观察到较为明显的后向布里渊 Stokes 光. 此外, 由于前向的信号激光提取了绝大部分抽运激光功率, 整个数值计算过程中几乎观察不到后向拉曼 Stokes 光.

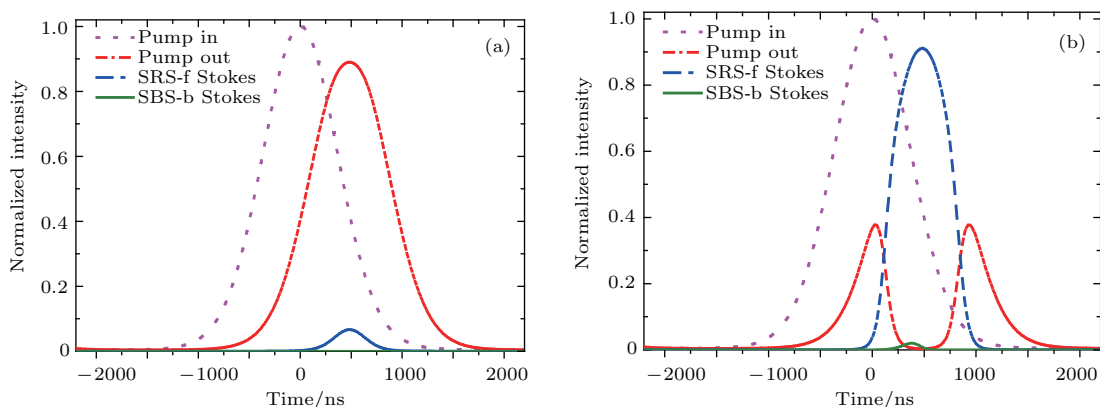


图2 脉冲激光的时域特性 (a) 抽运峰值功率为 155 W; (b) 抽运峰值功率为 390 W

Fig. 2. Pulse shapes of the pulses in the amplifier: (a) When pump peak power is 155 W; (b) when pump peak power is 390 W.

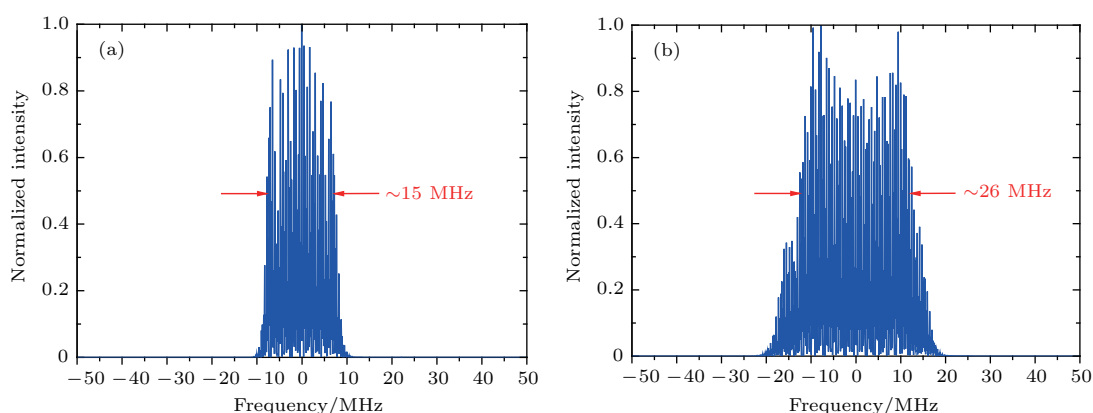


图3 前向拉曼 Stokes 光的频域特性 (a) 抽运峰值功率为 155 W; (b) 抽运峰值功率为 390 W

Fig. 3. Frequency characteristic of forward Raman Stokes: (a) When pump peak power is 155 W; (b) when pump peak power is 390 W.

不同抽运峰值功率下前向拉曼 Stokes 光的光谱特性如图 3 所示, 光谱线宽随前向拉曼 Stokes 光功率的增加而逐渐展宽. 这是因为在拉曼 Stokes 光放大过程中, SPM 会产生与光强有关的非线性相移, 随着前向 Stokes 光峰值功率的增加, 由 SPM 引起的光谱展宽也更加明显. 在抽运脉冲激光的峰值功率为 390 W 时, 前向拉曼 Stokes 光的 3 dB 带宽展宽到约为 26 MHz.

3.2 脉冲宽度的影响

设光纤长度为 100 m, 种子功率为 20 mW, 计算抽运脉宽为 800 和 80 ns 时, 输出抽运激光、前向拉曼 Stokes 光和后向布里渊 Stokes 光的脉冲能量随抽运脉冲能量/峰值功率的变化情况, 结果如图 4 所示. 从图 4(a) 可以看出, 如果抽运脉宽为 800 ns, 当抽运峰值功率约大于 150 W 后, 前向拉曼 Stokes 光的功率才出现较为明显的增长. 随着抽

运能量/峰值功率的提升, 信号光对抽运脉冲能量的提取效率随之增加. 当抽运峰值功率大于一定值后, 前向拉曼 Stokes 光能量随着抽运激光能量的增加呈近线性增长. 随着抽运峰值功率的进一步增加, 由于前向拉曼 Stokes 功率的增长, 后向布里渊 Stokes 光能量明显增强, 呈非线性趋势增长. 由于后向布里渊 Stokes 光极易损坏前级光学器件, 实际的窄线宽拉曼放大器应工作在布里渊 Stokes 光呈非线性增长之前的功率水平.

如图 4(b) 所示, 当抽运脉冲宽度为 80 ns 时, 由于脉冲宽度减小后 SBS 作用减弱, 在整个过程中观察不到后向布里渊 Stokes 光的非线性增长, 说明 SBS 效应得到了有效抑制. 对比图 4(a) 和图 4(b) 还可以看出, 脉冲宽度不改变抽运脉冲的 SRS 峰值功率阈值. 当抽运脉宽为 800 和 80 ns 时, 前向 Stokes 光均是在抽运峰值功率约大于 150 W 时呈现迅速增长趋势; 当抽运峰值功率达到 300 W 左右时, 前向 Stokes 光的能量和剩余的抽运脉冲能量相

等. 此外, 抽运脉宽越短, 激发的前向拉曼 Stokes 光的脉宽也越短, 由傅里叶变化关系可知其光谱线宽越宽. SPM 和 XPM 效应对脉冲激光线宽的展宽量与脉冲的初始线宽和峰值功率都呈正相关, 因此当前向拉曼 Stokes 光的线宽在抽运脉冲的脉宽为

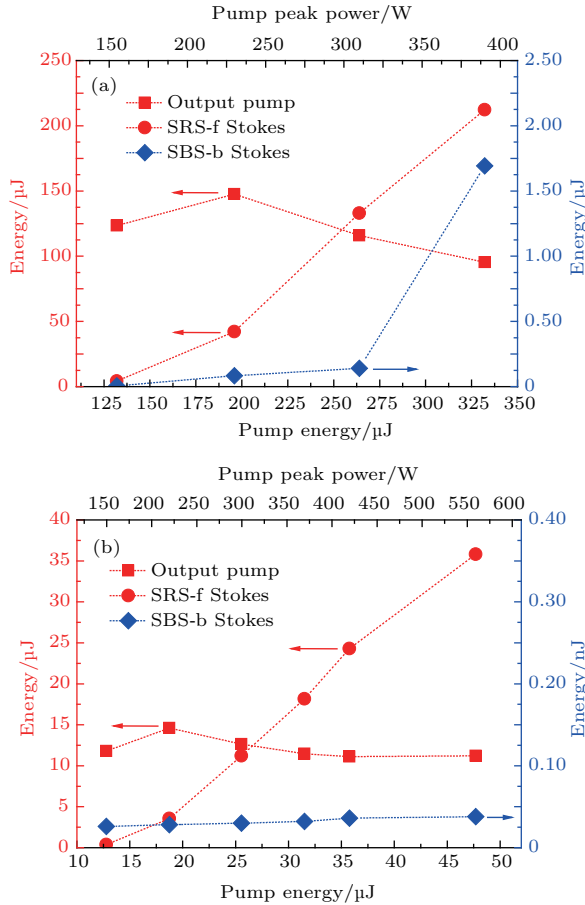


图4 输出脉冲能量随抽运能量的变化 (a) 脉宽 800 ns; (b) 脉宽 80 ns

Fig. 4. Output pulse energies as a function of the pump energy: (a) When pulse width is 800 ns; (b) when pulse width is 80 ns.

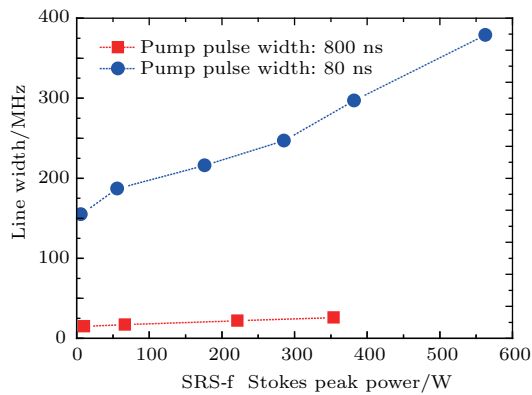


图5 当抽运脉冲的脉宽为 800 和 80 ns 时前向拉曼 Stokes 光的激光线宽

Fig. 5. Linewidth of forward Raman Stokes pulses when the pump pulse widths are 800 and 80 ns.

800 和 80 ns 时存在较大的差异, 且线宽的差距随着峰值功率的提升进一步加大(图 5).

3.3 光纤长度的影响

设抽运脉宽为 800 ns, 种子功率为 20 mW. 在光纤长度为 100 和 80 m 时, 放大器输出脉冲能量随抽运能量的变化分别如图 4 (a) 和图 6 所示. 对比上述两图可知, 由于 SRS 作用强度与光纤长度正相关, 光纤长度越长, SRS 阈值越低. 从图 4 (a) 可以看出, 当光纤长度为 100 m 时, 前向拉曼 Stokes 光的脉冲能量在抽运脉冲能量为 132 μJ (峰值功率为 155 W) 时约为 4.2 μJ , 在抽运脉冲能量大于 196 μJ (峰值功率为 230 W) 后呈近线性增长; 从图 6 可以看出, 当光纤长度为 80 m 时, 前向拉曼 Stokes 光的脉冲能量当抽运脉冲能量同为 132 μJ 时仅约为 1.6 μJ , 当抽运脉冲能量大于 264 μJ (峰值功率为 310 W) 后才呈近线性增长. 对比图 4 (a) 和图 6 还可以看出, 当抽运功率较低时, 使用较长的光纤可以获得更高的转换效率. 当抽运脉冲能量为 332 μJ , 光纤长度为 100 和 80 m 时的光光效率分别为 63.9% 和 48.2%. 这是因为当抽运峰值功率一定时, 如果光纤长度较短, SRS 作用就会较弱, 抽运能量无法被有效提取, 导致放大器效率较低. 当抽运能量提高到 387 μJ , 光纤长度为 80 m 时的转换效率提高到了 62%. 此外, 光纤长度较短时, 由于 SPM 和 XPM 效应相对较弱, 窄线宽的前向拉曼 Stokes 光的光谱展宽程度较低, 输出线宽相对较窄, 如图 7 所示.

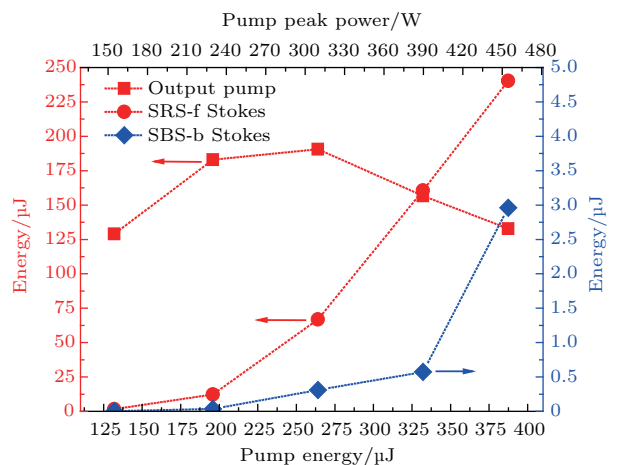


图6 脉宽 800 ns、光纤 80 m 时输出脉冲能量随抽运能量的变化

Fig. 6. Output pulse energies as a function of the pump energy when pulse width is 800 ns and passive fiber length is 80 m.

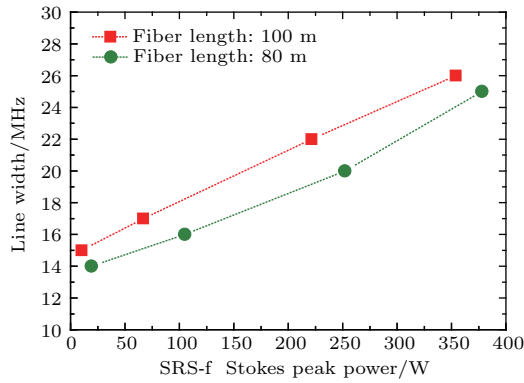


图7 当光纤长度为100和80 m时前向拉曼Stokes光的激光线宽

Fig. 7. Linewidth of the forward Raman Stokes pulses when the fiber lengths are 100 and 80 m.

3.4 信号光功率的影响

设光纤长度为100 m, 抽运脉宽为800 ns, 对比分析信号光为20, 60和100 mW时, 前向拉曼Stokes光和后向布里渊Stokes光随抽运能量的变化情况. 从图8可以看出, 信号光功率会影响放大器的转换效率和SBS阈值. 例如, 当抽运能量约为264 μJ (峰值功率为310 W)时, 转换效率在信

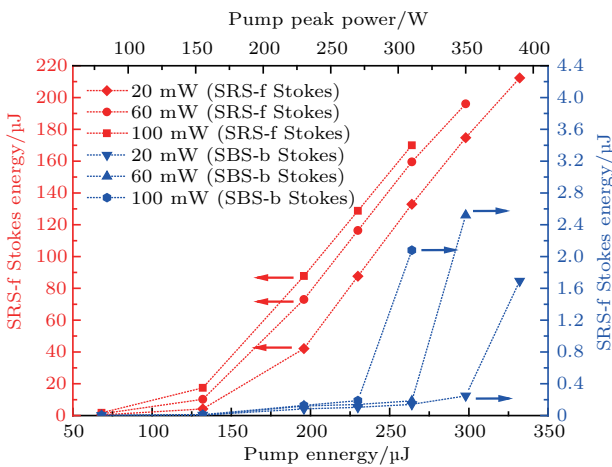


图8 不同信号光功率下输出脉冲能量随抽运能量的变化
Fig. 8. Output pulse energies as a function of the pump energy with different signal power.

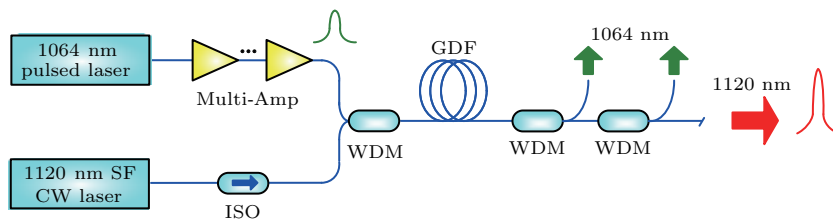


图9 窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器结构示意图

Fig. 9. Experimental setup for the narrow-linewidth nanosecond pulsed fiber Raman amplifier.

号光功率为20, 60和100 mW时分别约为50.4%, 60.4%和64.4%. 增加信号光功率有利于提高放大器的转换效率, 但是这也会增强SBS效应, 降低SBS阈值. 例如, 从图8可以看出, 当信号光功率为20, 60和100 mW, 而抽运脉冲能量分别超过230, 264和298 μJ后, 后向布里渊Stokes光的脉冲能量开始呈非线性增长. 因此, 在实际的系统搭建中, 应当选取适当功率的种子, 以期同时获得高的输出功率和转换效率.

4 实验与讨论

第3节对窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的时频特性进行了分析, 讨论了脉冲宽度、光纤长度和信号光功率等参数对放大器的影响. 为了能够较为全面地分析SBS, SRS和SPM等现象的综合作用, 仿真中选取了较为典型的脉冲宽度(800 ns, 80 ns). 为了初步验证理论模型的正确性, 根据实验室现有条件搭建了图9所示的实验平台. 其中, 种子激光为1120 nm的单频连续(SF CW)激光, 平均功率为20 mW, 后接一个隔离器(ISO)来保护种子源. 抽运激光为脉宽约40 ns, 重复频率500 kHz的脉冲激光, 经过级联放大后, 和种子激光经过一个1064/1120 nm的WDM耦合进一段纤芯/内包层直径为10/125 μm, 数值孔径为0.08的被动光纤(GDF)中. 在GDF的输出端连接两个1064/1120 nm的WDM, 用来导出没有吸收完全的脉冲抽运激光.

分别在光纤长度为100和80 m的情况下对放大器的功率特性进行测试, 结果如图10所示. 当抽运峰值功率较低时, 随着抽运激光功率的增加, 信号光的功率变化不大. 随着抽运功率的增加, 当光纤长度为100 m时, 前向拉曼Stokes光在抽运峰值功率达到约120 W时就开始呈明显的近线性增长, 这与图4(b)中的仿真结果接近, 且变化趋势相同. 然而, 当光纤长度为80 m时, 需要更高的抽运功率

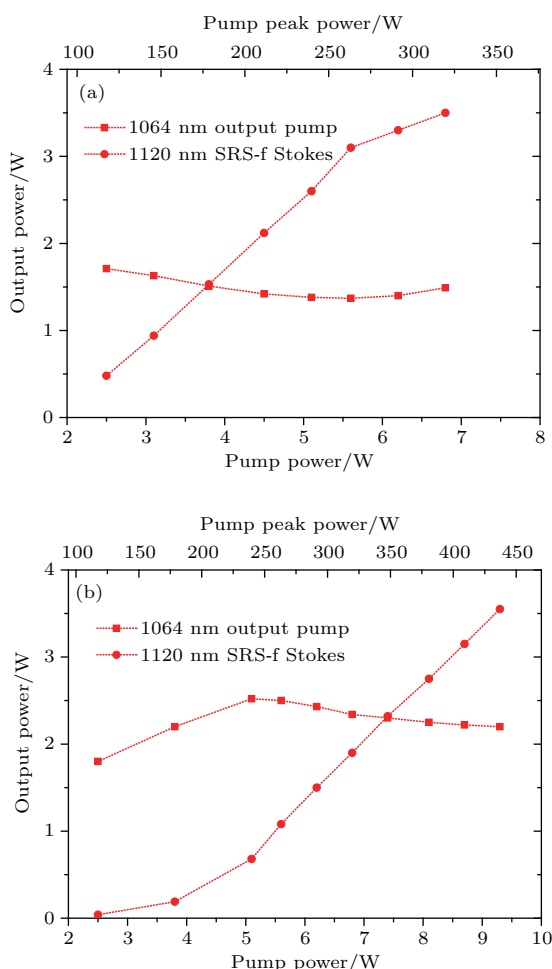


图 10 实验测得的输出功率随抽运功率的变化 (a) 光纤为 100 m; (b) 光纤为 80 m

Fig. 10. Measured output power as a function of the pump power: (a) When GDF is 100 m; (b) when GDF is 80 m.

才能实现抽运激光向抽运脉冲激光的有效转换. 另外, 光纤长度为 100 和 80 m 的情况下, 抽运功率为 6.8 W 时的光光转化效率分别为 51.5% 和 27.9%. 上述结果和 3.3 节的仿真结果趋势一致, 从实验上证明了较长的光纤不但能够获得较低的 SRS 阈值, 还能获得更高的转换效率.

5 结 论

建立了窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的非线性动力学模型. 定量分析了在脉冲抽运连续窄线宽信号光的情况下, 脉冲宽度、光纤长度和信号光功率对放大器特性的影响. 研究发现, 抽运脉冲宽度不影响系统的 SRS 峰值功率阈值, 但是会对 SBS 效应强弱和输出激光线宽产生明显影响, 当抽运脉冲的脉宽较宽 (如 800 ns) 时, 随着抽运功率增加,

会发生明显的 SBS 效应, 限制了放大器功率的进一步提升. 采用脉宽较短的抽运脉冲可以抑制 SBS 效应, 获得更高的峰值功率输出, 但是由于变换极限线宽和 XPM 与 SPM 引起的光谱展宽, 输出激光的线宽非常容易达到数百 MHz. 光纤长度较长时, 系统的 SRS 阈值更低、效率更高, 但由于非线性效应强, 输出激光的脉冲线宽较宽. 提高信号光功率可以获得更高的转换效率, 但是同时会降低放大器的 SRS 阈值. 因此, 在放大器的设计和搭建过程中, 需要综合考虑激光功率、线宽和放大器效率等指标需求, 平衡各非线性效应, 选取合适的抽运脉宽、光纤长度和信号光功率等放大器参数. 上述研究结果可以为窄线宽光纤拉曼放大器的系统设计和搭建提供参考.

参考文献

- [1] Shi W, Fang Q, Zhu X, Norwood R A, Peyghambarian N 2014 *Appl. Opt.* **53** 6554
- [2] Zheng Y, Yang Y, Wang J, Hu M, Liu G, Zhao X, Chen X, Liu K, Zhao C, He B, Zhou J 2016 *Opt. Express* **24** 12063
- [3] Yan P, Sun J, Li D, Wang X, Huang Y, Gong M, Xiao Q 2016 *Opt. Express* **24** 19940
- [4] Fu S, Shi W, Feng Y, Zhang L, Yang Z, Xu S, Zhu X, Norwood R A, Peyghambarian N 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** A49
- [5] Xu S, Li C, Zhang W, Mo S, Yang C, Wei X, Feng Z, Qian Q, Shen S, Peng M, Zhang Q, Yang Z 2013 *Opt. Lett.* **38** 501
- [6] Zhang L M, Zhou S H, Zhao H, Zhang K, Hao J P, Zhang D Y, Zhu C, Li Y, Wang X F, Zhang H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134205 (in Chinese) [张利明, 周寿桓, 赵鸿, 张昆, 郝金坪, 张大勇, 朱辰, 李尧, 王雄飞, 张浩彬 2014 物理学报 **63** 134205]
- [7] Huang Z, Liang X, Li C, Lin H, Li Q, Wang J, Jing F 2016 *Appl. Opt.* **55** 297
- [8] Carlson C G, Dragic P D, Price R K, Coleman J J, Swenson G R 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 451
- [9] Feng Y, Huang S, Shirakawa A, Ueda K 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 722
- [10] Agrawal G P 2013 *Nonlinear Fiber Optics* (Fifth Edition) (New York: Academic) pp296–297
- [11] Dajani I, Vergien C, Robin C, Ward B 2013 *Opt. Express* **21** 12038
- [12] Zhang L, Hu J, Wang J, Feng Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 4796
- [13] Zhang L, Cui S, Liu C, Zhou J, Feng Y 2013 *Opt. Express* **21** 5456
- [14] Boggio J M C, Marconi J D, Fragnito H L 2005 *IEEE J. Lightwave Technol.* **23** 3808
- [15] Qi Y F, Liu C, Zhou J, Chen W B, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3942 (in Chinese) [漆

- 云凤, 刘驰, 周军, 陈卫标, 董景星, 魏运荣, 楼祺洪 2010 物理学报 **59** 3942]
- [16] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, Kracht D 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1864
- [17] Feng Y, Taylor L R, Calia D B, Holzlöner R, Hackenberg W 2009 *Frontiers in Optics* San Jose, October 18–22, 2009 PDPA4
- [18] Su R T, Zhou P, Xiao H, Wang X L, Ma Y X, Si L, Xu X J 2012 *Chinese Patent CN 102931574B* (in Chinese) [粟荣涛, 周朴, 肖虎, 王小林, 马阎星, 司磊, 许晓军 2012 中国发明专利 CN 102931574B]
- [19] Su R T, Zhou P, Wang X L, Lü H, Xu X J 2014 *J. Opt.* **16** 015201
- [20] Runcorn T H, Murray R T, Kelleher E J, Popov S V, Taylor J R 2015 *Opt. Lett.* **40** 3085
- [21] Vergien C, Dajani I, Zeringue C 2010 *Opt. Express* **18** 26214
- [22] Zhang L, Jiang H, Cui S, Feng Y 2014 *Opt. Lett.* **39** 1933
- [23] Boyd R W, Rzyzewski K, Narum P 1990 *Phys. Rev. A* **42** 5514

Theoretical and numerical study on narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifier*

Su Rong-Tao^{1)2)3)†} Zhang Peng-Fei²⁾ Zhou Pu²⁾³⁾ Xiao Hu¹⁾²⁾³⁾ Wang Xiao-Lin²⁾³⁾
Duan Lei¹⁾ Lü Pin¹⁾ Xu Xiao-Jun²⁾³⁾

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

2) (College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

3) (Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha 410073, China)

(Received 18 December 2017; revised manuscript received 24 February 2018)

Abstract

Narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifiers possess many applications such as in nonlinear frequency generation, remote sensing and quantum information. By considering nonlinear effects such as stimulated Raman scattering (SRS), stimulated Brillouin scattering (SBS), self-phase modulation (SPM) and cross-phase modulation (XPM), we build a nonlinear dynamical model of narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifier. A numerical simulation model is also built and the simulation is carried out based on the parallelizable bidirectional finite difference time-domain method. The pulse evolution processes in time and spectral domain are simulated. The influences of pump pulse width, fiber length and signal laser power are studied in detail. It is found that SRS peak power threshold is not influenced by pump pulse width, however, pump pulse width will affect SBS threshold and output linewidth. When the pump pulse width is 800 ns, tens of MHz narrow linewidth can be obtained, but the SBS occurs as the increasing of pump energy, which limits the power scaling of the narrow-linewidth laser pulses. When the pump pulse width is 80 ns, the SBS is effectively suppressed and the peak power can be further increased, but the linewidth of output laser is easily broadened to hundreds of MHz. The simulation results also show that lower SRS threshold and higher efficiency can be obtained by using longer passive fiber, however, if shorter passive fiber is used, SPM and XPM can be weakened and narrower linewidth can be obtained. We build an experimental setup to study the influence of fiber length. In our experiment, a polarization-maintained passive fiber with a core diameter of 10 μm and core numerical aperture of 0.08 is used as the Raman gain fiber. The signal laser is a 1120 nm single frequency continuous wave fiber laser with an average power of 20 mW, and the pump laser is a 1064 nm pulsed laser with a pulse width of ~ 40 ns and repetition rate of 500 kHz. When the fiber lengths are 100 m and 80 m, the efficiencies of the pulsed Raman amplifier are, respectively, 51.5% and 38.2% at a pump power of 6.8 W. It can also be found that increasing signal power can increase the efficiency of the amplifier, but it will reduce the SBS threshold at the same time. Therefore, in order to balance the different nonlinear effects in the narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifier, we should take laser power, linewidth and efficiency into consideration, and choose the suitable system parameters such as pump pulse width, fiber length and signal power. These analyses can serve as design guidelines for narrow-linewidth nanosecond pulsed fiber Raman amplifiers.

Keywords: fiber lasers, Raman lasers, stimulated Raman scattering, stimulated Brillouin scattering

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Ye, 42.65.Dr, 42.65.Es

DOI: 10.7498/aps.67.20172679

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61705265, 61705264), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2017M620070), and the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2017YFF0104603, 2016YFB0402204).

† Corresponding author. E-mail: surongtao@126.com