



系满足<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{P}_1^-}{dz} &= +\alpha_1 \bar{P}_1^- + g_0 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \bar{P}_1^- (\bar{P}_2^+ + \\ &\quad \bar{P}_2^- + 4h\nu_2 \Delta\nu_2) \\ \frac{d\bar{P}_2^\pm}{dz} &= \mp \alpha_2 \bar{P}_2^\pm \pm g_0 (\bar{P}_2^\pm + 2h\nu_2 \Delta\nu_2) \bar{P}_1^- \end{aligned}$$

式中,  $\bar{P}_1^-$  和  $\bar{P}_2^\pm$  分别表示 DCF<sub>2</sub> 中的反向一级斯托克斯光功率, 正向(反向)二级斯托克斯光功率。

在 DCF<sub>1</sub> 中, 光功率演变满足

$$\begin{aligned} \frac{dP_p^+}{dz} &= -\alpha_p P_p^+ - g \frac{\lambda_1}{\lambda_p} P_p^+ (P_1^+ + P_1^- + 4h\nu_1 \Delta\nu_2) \\ \frac{dP_1^\pm}{dz} &= \mp \alpha_1 P_1^\pm \pm g (P_1^\pm + 2h\nu_1 \Delta\nu_1) P_p^+ \mp g_0 P_1^\pm \\ &\quad \left[ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (P_2^+ + 2h\nu_2 \Delta\nu_2) + \frac{\lambda_c}{\lambda_1} (P_c^+ + P_c^- + 4h\nu_c \Delta\nu_c) \right] \\ \frac{dP_2^\pm}{dz} &= -\alpha_2 P_2^\pm + g_0 (P_2^\pm + 2h\nu_2 \Delta\nu_2) (P_1^+ + P_1^-) \\ \frac{dP_c^\pm}{dz} &= \mp \alpha_c P_c^\pm \pm r_c P_c^\pm \pm g_0 (P_c^\pm + 2h\nu_c \Delta\nu_c) \cdot \\ &\quad (P_1^+ + P_1^-) \end{aligned}$$

式中,  $P_p^+$ ,  $P_1^+$ ,  $P_2^+$  以及  $P_c^\pm$  分别代表抽运光、一级斯托克斯光、二级斯托克斯光以及钳制 ASE 光功率, 其中上标+和-分别代表正向和反向。

利用微分方程组, 对该激光器的特性进行了数值分析。表 1 给出了模拟分析中的参量取值, 其中  $\alpha_p$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  和  $\alpha_c$  分别是抽运光、一级斯托克斯光、二级斯托克斯光以及钳制 ASE 光的损耗系数,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  以及  $\lambda_c$  是它们对应的波长,  $g$  和  $g_0$  分别表示一级和二级斯托克斯光的喇曼增益系数,  $h$  是普朗克常量,  $\nu_c$ ,  $\nu_1$  和  $\nu_2$  分别表示钳制 ASE 光、一级斯托克斯光、二级斯托克斯光频率,  $\gamma_c$  是 DCF<sub>1</sub> 在钳制 ASE 光频处的瑞利散射系数。

表 1 模拟时参量取值

Table 1 Parameters used in simulation			
$\lambda_p = 1\ 355\ \text{nm}$	$\lambda_1 = 1\ 450\ \text{nm}$	$\lambda_2 = 1\ 545\ \text{nm}$	
$\lambda_c = 1\ 548\ \text{nm}$	$R_c = 100\%$	$g = g_0 = 3.7\ \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$	
$\Delta\nu_1 = \Delta\nu_2 = \Delta\nu_c = 0.2\ \text{nm}$	$\gamma_c = 8.1 \times 10^{-15}\ \text{km}^{-1}$		
$R_1^+ = 85\%$	$R_1^- = 30\%$	$R_2^+ = 80\%$	$R_2^- = 90\%$
$\alpha = 20\ \text{dB}$	$\alpha_p = 0.89\ \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$	$\alpha_1 = 0.69\ \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$	
	$\alpha_2 = 0.49\ \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$	$\alpha_c = 0.45\ \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$	

在计算分析中, 所用的边界条件为

$$\begin{aligned} \bar{P}_2^+(l) &= R_2^+ \bar{P}_2^-(l), \\ \bar{P}_2^-(r) &= R_2^- \bar{P}_2^+(r), P_1^+(l) = R_1^+ P_1^-(l), \\ P_1^-(r) &= R_1^- P_1^+(r), \\ \bar{P}_1^-(r) &= (1 - R_1^-) P_1^-(l), \\ P_2^+(l) &= \alpha (1 - R_2^+) \bar{P}_2^+(r), \end{aligned}$$

$$P_c^-(r) = R_c P_c^+(r),$$

$$P_p^+(l) = P_0$$

式中  $R$  是光纤光栅的反射率, 下标 1、2 以及  $c$  表示一级斯托克斯光、二级斯托克斯光以及钳制 ASE 光, 而  $l$  和  $r$  分别表示 DCF 的左端和右端,  $\alpha$  是 VOA 的衰减系数。

## 2 结果与讨论

图 2 给出了在不同的  $R_c$  情况下一级、二级斯托克斯光功率与抽运光功率的关系。可以看出, 当  $R_c = 0$ , 即没有引入钳制时, 一级、二级斯托克斯光功率随着抽运光功率单调增加。当引入钳制技术 ( $R_c = 100\%$ ) 时, 关系曲线可以分为四段。第一段, 抽运功率 ( $< 0.2\ \text{W}$ ) 低于喇曼激射阈值, 因此不产生一级、二级斯托克斯光以及钳制 ASE 光; 第二段, 抽运功率 ( $> 0.2\ \text{W}$  且  $< 1.1\ \text{W}$ ) 大于一级喇曼激射阈值但小于二级喇曼激射阈值, 因此可以产生一级斯托克斯光而不产生二级斯托克斯光和钳制 ASE 光; 第三段, 抽运功率 ( $> 1.1\ \text{W}$  而  $< 1.4\ \text{W}$ ) 超过二级喇曼激射阈值, 可以产生一级、二级斯托克斯光, 但 ASE 光功率较低, 还不能间接消耗增加的抽运光功率, 即起不到钳制作用; 最后一段, 抽运功率 ( $> 1.4\ \text{W}$ ) 产生了足够高的 ASE 光, 能间接消耗增加的抽运光功率, 使得一级、二级斯托克斯光受到钳制作用, 输出功率不再随着抽运光功率增加而增加了。其原因主要是因为增加的抽运光功率通过一级斯托克斯光间接地转化成 ASE 光功率, 因此抽运光功率的增加不再影响输出的一级和二级斯托克斯光功率。由此可见, 当抽运光功率达到一定值时 ( $> 1.4\ \text{W}$ ), 由于 ASE 光的钳制作用, 系统输出的一级、二级斯托克斯光功率几乎不随输入抽运光功率的变化而变化, 从而大大降低了激光输出的相对

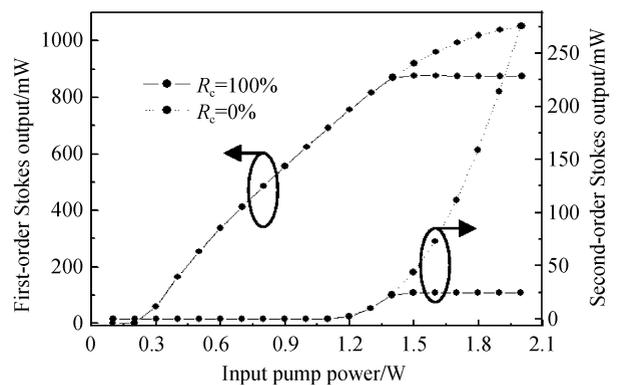


图 2 激光器输出的一级和二级 Stokes 光功率与抽运光功率的关系

Fig. 2 First- and second-order Stokes output powers as a function of the input pump power with and without clamping technique

强度噪音.

为了进一步分析以上特性,计算了在不同瑞利散射系数  $\gamma_c$  下,一级、二级斯托克斯光输出功率随抽运光功率的变化关系,如图 3. 当  $\gamma_c=0$  时,即不存在瑞利散射,系统输出的一级、二级斯托克斯光功率不存在钳制效应,它们都随抽运光功率的增大而单调增加. 而当  $\gamma_c \neq 0$ ,即存在瑞利散射时,输出的一级、二级斯托克斯光功率存在钳制作用. 究其原因,我们认为是瑞利散射在 DCF 中形成许多微型谐振腔,一定程度上抵消了由抽运光功率变化而引起的一级和二级斯托克斯输出光功率的变化<sup>[8]</sup>. 由图 3 还可以发现钳制效应随着  $\gamma_c$  的增大钳制程度加深,输出的一级、二级斯托克斯光功率会降低,这主要是由于随着  $\gamma_c$  的增大,产生钳制 ASE 光的抽运阈值功率降低的缘故.

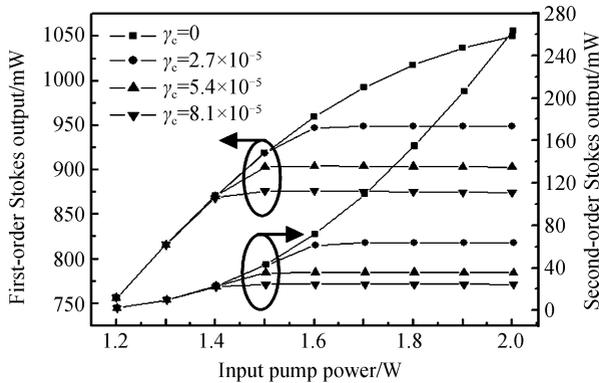


图 3 不同瑞利散射系数  $\gamma_c$  下,一级和二级 Stokes 光功率与抽运光功率的关系

Fig. 3 First- and second-order Stokes outputs versus pump power for different reighlei scattering coefficient  $\gamma_c$

图 4 给出了当  $g_0=3.7$  时,对不同的喇曼增益系数  $g$ ,一级与二级斯托克斯光输出功率随抽运光功率的变化关系. 由图可知,存在一个最佳的增益系数  $g_{opt}$  ( $\sim 3.33$ ),当增益系数  $g$  小于  $g_{opt}$  时,一级、二

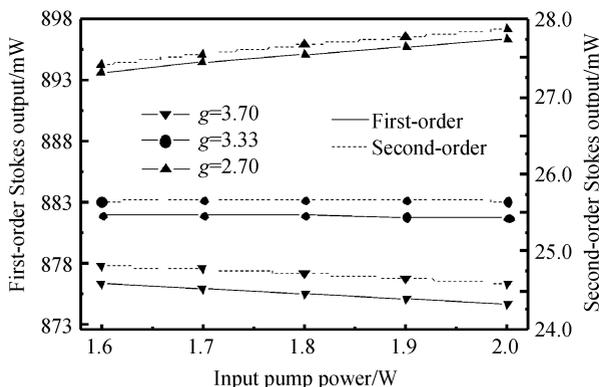


图 4 不同的喇曼增益系数  $g$  下,一级和二级 Stokes 光功率与抽运光功率的关系

Fig. 4 First and second-order Stokes output powers versus pump power with different Raman gain constant  $g$

级斯托克斯光输出功率随着抽运光功率的增加而缓慢增加,这主要是由于钳制 ASE 光所消耗的一级斯托克斯光功率小于由于抽运光功率增加而增加的一级斯托克斯光功率;另一方面,当增益系数  $g$  大于  $g_{opt}$  时,一级、二级斯托克斯光输出功率随着抽运光功率的增加而缓慢减小,这主要是由于钳制 ASE 光所消耗的一级斯托克斯光功率大于由于抽运光功率增加而增加的一级斯托克斯光功率的缘故;而当  $g$  等于  $g_{opt}$  时,输出的一级和二级斯托克斯光功率几乎不变,意味着由抽运光功率提高而增加的一级斯托克斯光功率刚好可以被增加的 ASE 的光消耗掉.

由文献[3]可知,喇曼光纤激光器要作为喇曼光纤放大器的抽运源,激光器输出的一级与二级斯托克斯光功率的比值是个很重要的参量,因而通常情况下要求这个比值可以控制. 图 5 给出了一级与二级斯托克斯光功率与 VOA 衰减值之间的关系. 由图可知,当 VOA 的衰减从 16 dB 增加到 28 dB 时,一级 Stokes 光输出功率由 874 mW 增加到 886 mW,只增加了 1.4%. 而二级 Stokes 输出光功率由 61 mW 降低到 4 mW,降低了 93.4%. 这主要是因为二级斯托克斯经过 VOA 后功率变化对一级斯托克斯功率输出功率的影响被产生的钳制 ASE 光功率补偿,使得二级斯托克斯光输出功率几乎可以独立改变. 由此可见,通过调节 VOA 的衰减量,可以比较方便的实现调整一级与二级斯托克斯光输出功率以及它们比值的目.

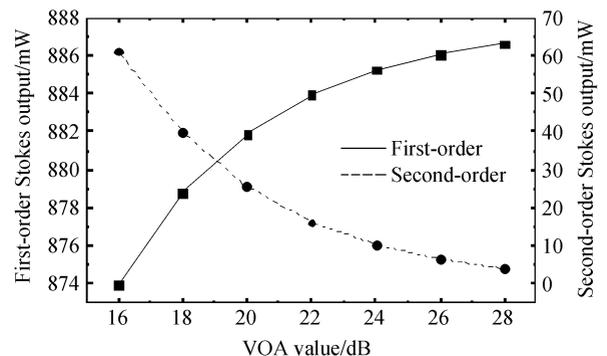


图 5 一级与二级斯托克斯光功率与 VOA 衰减值之间的关系  
Fig. 5 First and second-order Stokes output powers as a function of the VOA value

### 3 结论

提出了一种能抑制抽运光低频相对强度噪音转移的二级喇曼光纤激光器. 研究表明,当抽运光功率大到能产生足够高的钳制 ASE 光功率时,激光器的一级和二级斯托克斯光输出功率不再随着抽运光功率的变化而变化. 因此,抽运源的低频相对强度噪音转移会受到很大程度上的抑制. 除此之外,通过调节 VOA 的衰减量,可以控制该喇曼光纤激光器输出的

一级、二级斯托克斯光功率以及它们的比值. 这些特性表明,设计的二级喇曼光纤激光器很适合于作为喇曼光纤放大器的抽运源.

#### 参考文献

- [1] BROMAGE J. Raman amplification for fiber communication systems[J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2004, **22**(1): 79-91.
- [2] FLUDGER C R S, HANDEREK V, MEARS R J. Pump to signal RIN transfer in Raman amplifiers [J]. *IEEE J Lightwave Tech*, 2001, **19**(8): 1140-1148.
- [3] BOUTEILLER J C. Spectral modeling of Raman fiber lasers [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2003, **15**(12): 1698-1700.
- [4] FLUDGER C R S, HANDEREK V, MEARS R J. Pump to Signal RIN transfer in Raman fiber amplifiers[J]. *Electron Lett*, 2001, **37**(1):15-16.
- [5] MERMELSTEIN M D, BRAR K, HEADLEY C. RIN transfer suppression technique for dual-order raman pumping schemes[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**(10): 1354-1356.
- [6] MERMELSTEIN M D, HEADLEY C, BOUTEILLER J C, *et al.* Configurable three-wavelength Raman fiber laser for Raman amplification and dynamic gain flattening[J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2001, **13**(12): 1286-1288.
- [7] SUN G. Output-power-clamped Raman fiber laser with suppression of low-frequency RIN transfer from pump sources [J]. *Electron Lett*, 2005, **41**(8): 468-469.
- [8] RINI M, CRISTIANI I, DEGIORGIO V. Numerical modeling and optimization of cascaded CW Raman fiber lasers[J]. *IEEE J Quant Electron*, 2000, **36**(10): 1117-1122.

## Characteristics of Dual-order Raman Fiber Laser with Stable Output Power

ZHOU Ying-wu, DI Ju-nan

(Department of Physics and Electronics Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** A dual-order Raman fiber laser (RFL) with stabilized output power is proposed and theoretically analyzed. The results show that the first- and second-order Stokes output powers are hardly impacted by the pump power fluctuations due to the clamping mechanism induced by the amplified spontaneous emission near the second-order Stokes shift from the launched pump line. As a result, the low-frequency relative-intensity-noise transfer from the pump power to the laser outputs is greatly suppressed. The results show that the first- and second-order Stokes are both stable. In addition, their powers can be tuned by adjusting one attenuator in the RFL setup. These special behaviors predict that the proposed RFL is highly suitable to be the pump sources in Raman fiber amplifiers.

**Key words:** Raman fiber laser, Relative intensity noise, Amplified spontaneous emission



**ZHOU Ying-wu** was born in 1968. He obtained the Ph. D. degree from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences in 2004. Now he is an associate professor, and his current research interests focus on polarization effects in optic fiber communication systems, optical fiber lasers and amplifiers, optoelectronic devices for optical communication system.