

多波长级联拉曼光纤激光器的设计

秦祖军¹ 周晓军¹ 伍浩成² 邹自立²

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; ² 桂林激光通信研究所, 广西 桂林 541004)

摘要 基于稳态条件下描述光纤中受激拉曼散射效应的光功率耦合方程组, 提出一种新的多波长级联拉曼光纤激光器的设计算法。结合遗传算法和打靶法的优点, 采取对每一代种群中少数优良个体进行几次打靶, 使得种群中目标函数最优值附近的个体加速收敛。以 500 m 掺磷光纤为增益介质、光纤布拉格光栅构成谐振腔的三波长 (1427 nm, 1455 nm, 1480 nm) 级联拉曼光纤激光器为例, 采用该算法计算了其输出特性。结果表明, 总输出功率与抽运功率近似成线性关系, 斜率效率约 51%; 由于谐振腔中三个输出波长相互之间的受激拉曼散射作用产生的能量转移, 使得输出的长波长斯托克斯光斜率效率大于短波长斯托克斯光斜率效率。

关键词 光纤光学; 受激拉曼散射; 拉曼光纤激光器; 多波长; 数值设计

中图分类号 TN248.1; O437.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0244

Design of Multi-Wavelength Cascaded Raman Fiber Lasers

Qin Zujun¹ Zhou Xiaojun¹ Wu Haocheng² Zou Zili²

¹ School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China
² Guilin Institute of Optical Communications, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract A novel design algorithm for the steady-state coupled power equations describing stimulated Raman scattering in Multi-wavelength cascaded Raman fiber lasers has been proposed. By taking the advantage of genetic algorithm and shooting method, a few elite individuals with the best fitness on each generation are chosen to implement several shootings to accelerate their converging. As an example, the output characteristics of an all-fiber three-wavelength (1427 nm, 1455 nm, and 1480 nm) Raman fiber laser with 500 meters P₂O₅-doped fiber as gain medium and fiber Bragg gratings as resonators has been analyzed with the algorithm. The results show that the total output power linearly depends on the pump power approximately with a slope efficiency of ~51%; the slope efficiency of longer wavelengths is larger than that of the shorter wavelengths due to the longer wavelengths gain additional power at the expense of the power of the shorter wavelengths.

Key words fiber optics; stimulated Raman scattering; Raman fiber lasers; multi-wavelength; numerical design

1 引 言

基于光纤中受激拉曼散射机制^[1~6]的多波长抽运拉曼光纤放大器(RFA)具有几乎无限制的、平坦的增益带宽。理论上通过合理选择各个抽运波波长和相应抽运功率大小可以实现任意带宽上的平坦增益谱^[7,8]。多波长级联拉曼光纤激光器是 RFA 的理想抽运源之一, 只要选择适当的输出功率谱就可实现具有宽带、平坦增益谱的 RFA^[9~12]。作为

RFA 抽运源, 分别以锗硅光纤^[9,10]、磷硅光纤^[11,13]以及两种光纤相结合^[12]作为拉曼增益介质的多波长拉曼光纤激光器已有相关报道。多波长级联拉曼光纤激光器的输出特性由属于两点边值问题的耦合的非线性常微分方程组确定, 需采用打靶法等数值算法求解。鉴于级联谐振腔中各阶斯托克斯光之间复杂的相互耦合作用以及涉及的抽运光、斯托克斯光波数量众多, 任意设置的初始值不一定满足方程

收稿日期: 2008-08-28; 收到修改稿日期: 2008-10-15

作者简介: 秦祖军(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器和光纤放大器等方面的研究。

E-mail: junqin@uestc.edu.cn

导师简介: 周晓军(1955—), 女, 教授, 主要从事非线性光纤光学、光纤传感和光信号处理等方面的研究。

E-mail: xjzhou@uestc.edu.cn

组的收敛性。文献[14]提出了一种变量替换法,将边值问题转换为初值问题,一定程度上简化了耦合方程组,但同时引入了相同数量的未知变量。根据稳态条件下描述光纤中受激拉曼散射效应的光功率耦合方程组,本文提出了一种新的多波长级联拉曼光纤激光器数值设计算法,利用遗传算法全局搜索能力强和打靶法在收敛域内快速收敛的优点,克服了遗传算法收敛于局部最优值或者在最优化值附近左右摆动、打靶法需要设置适当初值的缺点。根据该算法计算了以 500 m 磷硅光纤为增益介质、光纤布拉格光栅构成谐振腔的全光纤结构的三波长(1427 nm, 1455 nm, 1480 nm)拉曼光纤激光器的输出特性。

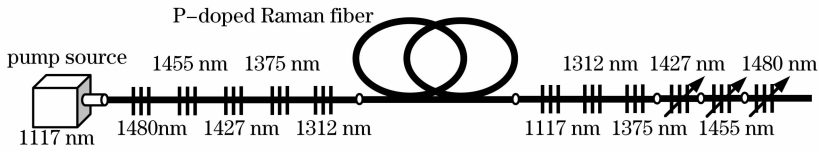


图 1 三波长输出级联拉曼光纤激光器

Fig. 1 Schematic of a three-wavelength cascaded Raman fiber laser

在强抽运情况下,拉曼光纤中的自发拉曼散射效应通常非常弱,可以忽略其影响。多波长级联拉曼光纤激光器达到稳态时,表征拉曼光纤中前、后向传输的抽运光、各斯托克斯光的功率在光纤中的分布满足耦合的微分方程组

$$\begin{aligned} \frac{1}{P_0^F} \frac{dP_0^F}{dz} &= -\frac{1}{P_0^B} \frac{dP_0^B}{dz} = -\alpha_0 - \sum_{i=1}^n g_{0i} \nu_0 (P_i^F + P_i^B) / \nu_i, \\ \frac{1}{P_j^F} \frac{dP_j^F}{dz} &= -\frac{1}{P_j^B} \frac{dP_j^B}{dz} = -\alpha_j + \sum_{i=0}^{j-1} g_{ij} (P_i^F + P_i^B) - \sum_{i=j+1}^n g_{ji} \nu_j (P_i^F + P_i^B) / \nu_i, \\ \frac{1}{P_n^F} \frac{dP_n^F}{dz} &= -\frac{1}{P_n^B} \frac{dP_n^B}{dz} = -\alpha_n + \sum_{i=0}^{n-1} g_{in} (P_i^F + P_i^B), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 P_0 为抽运光功率, P_j, ν_j 分别为第 j 阶斯托克斯光的功率和频率, 上标 F 和 B 分别表示光的传播方向为前向和后向, α 为拉曼光纤的损耗, g_{ij} 为光纤的拉曼增益系数, 其大小与抽运光波长成正比, 即

$$g_{ij} = \nu_i G_R(\nu_{\text{ref}}, \nu_{\text{ref}} - \Omega) / [\nu_{\text{ref}} A_{\text{eff}}(\nu_i, \nu_j)], \quad (2)$$

式中 G_R 为光纤材料的拉曼增益, $\Omega = \nu_i - \nu_j$ 为斯托克斯光之间频移量, ν_{ref} 为测量光纤拉曼增益谱 G_R 所用的抽运光频率, $A_{\text{eff}}(\nu_i, \nu_j)$ 为第 i 阶斯托克斯光和第 j 阶斯托克斯光在光纤中的平均有效纤芯面积。

在输入端和输出端, 微分方程组(1)满足边界条件

$$\begin{aligned} P_0^F(0) &= P_{\text{in}}, & P_0^B(L) &= R_0^F P_0^F(L), \\ P_j^F(0) &= R_j^B P_j^B(0), & P_j^B(L) &= R_j^F P_j^F(L), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 P_{in} 为注入增益光纤中的抽运光功率, L 为光纤长度, $R_j^{F/B}$ 表示输出端(F)/输入端(B)FBG 对第 j

2 理论模型

2.1 模型

图 1 所示为一个三波长级联拉曼光纤激光器结构。激光器由多对光纤布拉格光栅(FBG)构成级联的谐振腔, FBG 中心反射波长分别与各阶斯托克斯光对应, 除了作为输出用的三个 FBG 为部分反射外, 其余 FBG 均为宽带高反射光栅, 输出端还有一个光栅, 将未完全转化的抽运光反射回谐振腔内, 以提高光-光转换效率。增益光纤为拉曼频移为 1330 cm^{-1} 的磷硅光纤。

阶斯托克斯光的有效反射率。根据(3)式得到, 每个输出斯托克斯光的输出功率为

$$P_{\text{out}}^k = (1 - R_k^F) P_k^F(L) = \frac{(1 - R_k^F) R_k^B}{\sqrt{R_k^F R_k^B}} P_k^B(0). \quad (4)$$

2.2 数值算法设计

在单波长拉曼光纤激光器谐振腔中, 各光波通常只与相邻级光波发生耦合, 因此可用近似解析结果计算^[15,16]。而对于多波长拉曼光纤激光器, 耦合微分方程组(1)中的抽运光和斯托克斯光对其增益谱宽内的所有光波发生能量迁移, 同时各阶斯托克斯光也从短波长光波获取能量得到放大, 耦合过程复杂, 解析方法求解困难。为此, 针对多波长拉曼光纤激光器, 提出了一种遗传算法结合打靶法的混合遗传算法进行数值求解, 具体思想是: 遗传算法种群经过选择、交叉、变异之后, 根据各个个体的适应度大小, 找出少数优良个体, 并对其进行几次打靶, 使

得其中全局最优化值附近的个体加速收敛。

由(4)式可知,只需知道各级斯托克斯光在初始端的值,因此设遗传算法种群的每一个体由剩余抽运光功率和初始端各级斯托克斯光的功率值组成,即 $\mathbf{P}^B(0) = [P_0^B(0), P_1^B(0), \dots, P_n^B(0)]$ 。首先,定义目标函数 Ψ

$$\Psi[\mathbf{P}^B(0)] = \mathbf{R}^F - \mathbf{P}^B(L)/\mathbf{P}^F(L), \quad (5)$$

式中 $\mathbf{R}^F = [R_0^F, R_1^F, \dots, R_n^F]^T$, $\mathbf{P}^{F/B} = [P_0^{F/B}, P_1^{F/B}, \dots, P_n^{F/B}]^T$, 则可将(1)式转换为求自变量为 $\mathbf{P}^B(0)$ 的目标函数范数的最小值问题,即寻找一个恰当的个体 $[\mathbf{P}^B(0)]$, 使之满足

$$y = \|\Psi[\mathbf{P}^B(0)]\| \leq \epsilon, \quad (6)$$

式中 ϵ 为给定的误差容限。本设计算法具体操作步骤如下:

1) 产生具有 N 个个体的种群, 每个个体满足

$$0 \leq \left| \int_0^L \frac{d\mathbf{P}^B(z)}{dz} \right| \leq \infty;$$

2) 种群进行选择、交叉、变异运算, 在遗传算子中, 采取了最优保存策略;

3) 根据(5)式、(6)式计算种群的目标函数值以及适应度值, 并找出 M 个优良个体;

4) 对 M 个优良个体进行 n 次打靶。设 $[\mathbf{P}^B(0)]_i$ 为第 i 代中的适应度较高的一个优良个体:

- i) 根据(5)式计算目标函数值 $\Psi\{[\mathbf{P}^B(0)]_i\}$;
- ii) 计算雅克比矩阵

$$\mathbf{J} = \left[\frac{\partial \Psi}{\partial P_0^B(0)}, \frac{\partial \Psi}{\partial P_1^B(0)}, \dots, \frac{\partial \Psi}{\partial P_n^B(0)} \right], \quad (7)$$

由于目标函数无确切的解析表达式, (7)式无法由解析给出, 可由近似获取

$$\mathbf{J}_m \approx \frac{\Psi[P_m^B(0) + \Delta P_m^B(0)] - \Psi[P_m^B(0)]}{\Delta P_m^B(0)}, \quad (8)$$

式中 ΔP_m^B 为差分微变量。

iii) 获取打靶修正量, 并更新该个体:

$$[\mathbf{P}^B(0)]_i = [\mathbf{P}^B(0)]_i + \Delta \mathbf{P},$$

其中修正量 $\Delta \mathbf{P}$ 满足

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{P} = \psi\{[\mathbf{P}^B(0)]_i\}.$$

如果更新后的个体使得(6)式满足, 则退出并输出结果, 否则进行下次打靶, 直至 n ;

5) 判断经打靶后是否存在个体满足 $y < \epsilon$, 若满足, 则退出并输出结果, 否则返回 2)。

3 数值计算结果与讨论

采用上述算法, 分析图 1 所示的三波长(1427 nm, 1455 nm, 1480 nm)级联拉曼光纤激光器输出特性。

磷硅光纤的损耗谱、用波长为 1060 nm 抽运光测得的拉曼增益谱见图 2^[13]。设对应 1427 nm, 1455 nm, 1480 nm 输出的 FBG 反射率分别为 40%, 30%, 30%, 其余高反射 FBG 均为 99%, 光纤长度 500 m, FBG 的平均背景损耗 0.07 dB, 熔接损耗 0.05 dB。遗传算法种群规模 $N=50$, 选择需要打靶的优良个体数 $M=10\% \times N$, 每个优良个体的打靶次数 $n=2$ (根据情况可调整), 误差容限 $\epsilon=10^{-5}$ 。

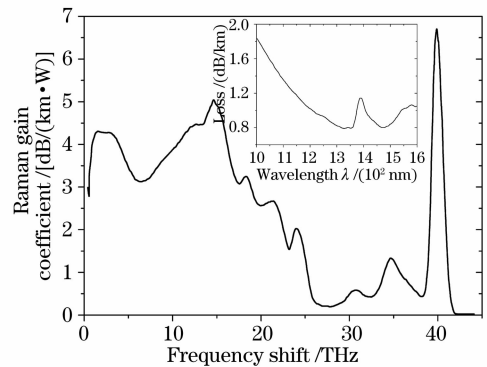


图 2 磷硅光纤的拉曼增益谱和损耗谱

Fig. 2 Raman gain spectrum and loss spectrum of the phosphosilicate fiber

为研究提出的新型设计算法的收敛性能, 分别采用该混合遗传算法与普通遗传算法对多波长级联拉曼光纤激光器满足的功率耦合方程组(1)进行了计算。图 3 给出了两者的比较结果, 纵坐标为根据(6)式计算的遗传算法每一代种群中最佳个体的目标函数范数值。可见, 提出的设计方法经过不到 12 代的数值迭代就满足数值设计算法要求的收敛条件, 即 $y < \epsilon$; 而普通遗传算法由于其本身的缺点, 即使经过 100 代甚至更多次数的迭代, 也无法收敛到给定的误差容限。计算结果表明, 提出的多波长级联拉曼光纤激光器设计算法具有良好的收敛性能,

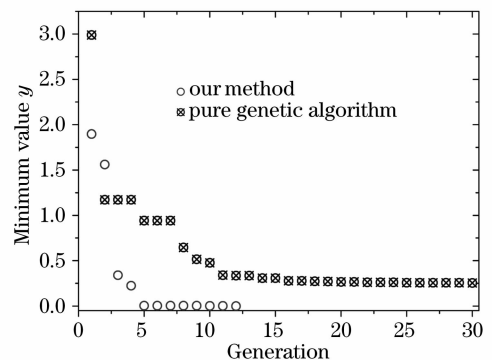


图 3 与普通遗传算法的比较结果

Fig. 3 Comparison between our proposed method and 'pure' genetic algorithm

由于由功率初始值构成的初始种群是随机产生的, 因此克服了单纯打靶法需要适当设置初始值的缺点; 与普通遗传算法相比, 对少数优良个体的打靶大大加速了计算过程的收敛。

图 4 给出了波长分别为 1427 nm(λ_3), 1455 nm(λ_4), 1480 nm(λ_5) 的斯托克斯光输出功率以及总输出功率与抽运光功率的关系。一般情况下, 由于每级斯托克斯光子能量不一样, 输出功率与抽运功率为非线性关系^[17], 但在以上给定的输出 FBG 反射率条件下, 总输出功率与抽运光依然成线性关系, 其斜率效率 $\sim 51\%$ 。随着抽运光功率 P_{in} 的增加, λ_4 由于模式竞争优势首先达到阈值并输出, 其阈值功率 ~ 1.7 W, 当 P_{in} 达到 ~ 2.7 W 时, λ_5 产生, 此时抽运光会把部分能量转移至 λ_5 , 并且由于 λ_4, λ_5 之间的能量迁移, 使得 λ_4 输出功率下降。此后, λ_3 产生, 它将放大 λ_4 和 λ_5 , 因此其斜率效率低于后两者。 λ_4 在 λ_3 和 λ_5 产生后, 它从 λ_3 获得增益不足以弥补由于抽运光能量的分散和对 λ_5 发生能量迁移而产生的损耗, 因此 λ_4 的斜率效率大大降低。磷硅光纤具有宽达 ~ 40 THz 的拉曼增益谱, 输出斯托克斯光之间在谐振腔中会发生相互耦合作用, 短波长斯托克斯光对长波长斯托克斯光提供拉曼增益, 发生能量迁移, 因此 λ_5 的斜率效率最大。

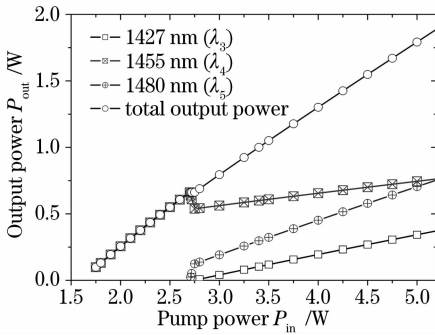


图 4 斯托克斯光输出功率随抽运功率变化

Fig. 4 Output power versus the pump power

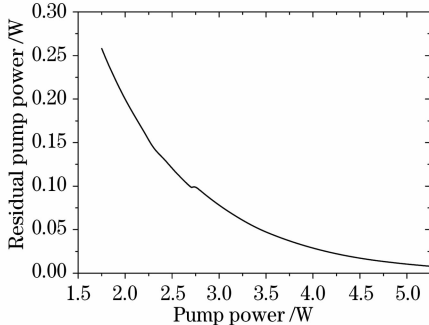


图 5 剩余抽运光与抽运光功率关系

Fig. 5 Residual pump power versus pump power

在采取的混合遗传算法中, 剩余抽运光功率 $P_0^B(0)$ 也是需要全局搜索的自变量 $P^B(0)$ 的元素之一, 图 5 给出了剩余抽运光大小与抽运光功率的关系。当抽运光功率较高时, 拉曼光纤中的受激拉曼散射作用的增强将提高抽运光向斯托克斯光的转换效率, 剩余抽运光功率 $P_0^B(0)$ 将以近似为指数形式减小, 当抽运光功率为 5 W, 其余参数不变时, 仅有 ~ 10 mW 的剩余抽运功率返回。所以当抽运光较强时, 可以大大缩小遗传算法对 $P_0^B(0)$ 的搜索空间范围, 从而提高算法的运算速度。

4 结 论

提出了一种新的混合遗传算法设计多波长级联拉曼光纤激光器。该算法结合了遗传算法全局搜索能力强和打靶法在收敛域内快速收敛的优点, 采取对每一代中经过选择、交叉和变异等遗传算子获得的种群中少数优良个体进行几次打靶, 使得其中目标函数的最优化值附近的个体加速收敛。以 500 m 掺磷光纤为增益介质、光纤布拉格光栅构成谐振腔的全光纤结构三波长(1427 nm, 1455 nm, 1480 nm)级联拉曼光纤激光器为例, 计算了其输出特性。结果表明, 总输出功率与抽运功率近似成线性关系, 斜率效率 $\sim 51\%$; 由于谐振腔中三个输出波长相互之间会发生受激拉曼散射作用, 短波长斯托克斯光对长波长斯托克斯光发生能量迁移, 因此长波长斯托克斯光具有更大斜率效率。同时计算结果也表明, 该新型算法克服了遗传算法收敛于局部最优化值或者在最优化值附近左右摆动、打靶法需要设置适当初值的缺点。

参 考 文 献

- 1 S. A. Babin, D. V. Churkin, S. J. Kablukov *et al.*. Characteristics of a two cascaded Raman fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 156~162
S. A. Babin, D. V. Churkin, S. I. Kablukov 等. 二级级联拉曼光纤激光器的特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 156~162
- 2 Hu Shuling, Zhang Chunxi, Gao Chunqing *et al.*. Stimulated Raman Scattering and Stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 6~10
胡姝玲, 张春熹, 高春清 等. 包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 6~10
- 3 Zhang Xianbin, Shi Wei. Thz electromagnetic radiation based on the stimulated Raman scattering of polariton[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 1012~1016
张显斌, 施 卫. 基于耦合场量子受激拉曼散射的太赫兹波辐射[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 1012~1016
- 4 Zheng Hongjun, Liu Shanliang, Tian Zhen *et al.*. Effects of Raman amplification on propagation characteristics of the soliton

- [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 861~866
 郑宏军, 刘山亮, 田 振 等. 拉曼放大对孤子传输特性的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 861~866
- 5 Cai Weiqi, Huan Chaohong, Xu Huiying *et al.*. Second-order approximate solution of cascaded Raman lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1449~1454
 蔡伟琦, 黄朝红, 许惠英 等. 级联拉曼激光器的二阶近似解[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1449~1454
- 6 Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Stimulated Raman scattering of GdVO₄ crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 11~16
 胡大伟, 王正平, 张怀金 等. GdVO₄ 晶体的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 11~16
- 7 S. Namiki, Y. Emori. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(1): 3~16
- 8 V. E. Perlin, H. G. Winful. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 250~254
- 9 M. D. Mermelstein, C. Headley, J. C. Bouteiller *et al.*. Configurable three-wavelength Raman fiber laser for Raman amplification and dynamic gain flattening [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12): 1286~1288
- 10 F. Leplingard, S. Borne, L. Lorcy *et al.*. Six output wavelength Raman fibre laser for Raman amplification[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(16): 886~887
- 11 X. Normandin, F. Leplingard, E. Bourova *et al.*. Experimental assessment of phospho-silicate fibers for three wavelength (1427 nm, 1455 nm, 1480 nm) reconfigurable Raman lasers[C]. *OFC '2002*, TuB2
- 12 A. A. Demidov, A. N. Starodumov, X. Li *et al.*. Three-wavelength Raman fiber laser with reliable dynamic control[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1540~1542
- 13 Z. Xiong, T. Chen. Multi-wavelength Raman fiber laser with 2- and 3-stage cavities in a phosphosilicate fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **13**(1): 81~84
- 14 F. Leplingard, C. Martinelli, S. Borne *et al.*. Modeling of multiwavelength Raman fiber lasers using a new and fast algorithm[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(12): 2601~2603
- 15 Qin Zujun, Zhou Xiaojun, Li Fadan *et al.*. Theoretical analysis and optimized design of multi-order cascaded Raman fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 786~790
 秦祖军, 周晓军, 李发丹 等. 多阶级联拉曼光纤激光器理论分析与优化设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 786~790
- 16 Z. Qin, X. Zhou, Q. Li *et al.*. An improved theoretical model of *n*th-order cascaded Raman fiber lasers[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(6): 1555~1560
- 17 M. N. Islam. Raman Amplifiers for Telecommunications. 2: Sub-Systems and Systems [M]. New York: Springer-Verlag, 2004. 353~382