

反向多抽运光纤拉曼放大器偏振相关增益研究

王丹燕 姜海明 谢 康

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要 基于光纤拉曼放大器(FRA)的非线性耦合方程,采用数值计算的方法系统研究了反向多抽运 FRA 中的偏振相关增益(PDG),其中包括 FRA 系统中由所有光波拉曼相互作用所产生的 PDG、由抽运-信号拉曼相互作用所产生的 PDG、由抽运-抽运拉曼相互作用所产生的 PDG 以及由信号-信号拉曼相互作用所产生的 PDG。研究结果表明,相比于单抽运 FRA 系统,多抽运 FRA 系统不仅可以获得较平坦的拉曼增益谱而且可以使整个增益带宽内的 PDG 较均匀。此研究不仅可以有效地估计反向多抽运 FRA 系统中分别由抽运-信号、抽运-抽运、信号-信号之间拉曼相互作用所产生的 PDG,而且对有效降低 FRA 系统中的 PDG 提供重要的参考价值。

关键词 光通信;偏振相关增益;光纤拉曼放大器;反向抽运;偏振模色散

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0905008

Study on Polarization Dependent Gain of Fiber Raman Amplifiers with Backward Multiple Pumps

Wang Danyan Jiang Haiming Xie Kang

(School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract The polarization dependent gain (PDG) of fiber Raman amplifiers (FRAs) with backward multiple pumps is investigated systematically, by numerical method based on the nonlinear coupled equations describing the properties of fiber Raman amplifiers. The PDGs induced by all waves Raman interaction, by pump-signal Raman interaction, by pump-pump Raman interaction and by signal-signal Raman interaction are studied respectively. The results show that compared to the FRAs with single pump, the FRAs with multiple pumps can obtain not only flat gains but also uniform PDGs. This study can be used to estimate the PDGs of a FRA with backward pumps induced by pump-signal Raman interaction, pump-pump Raman interaction and signal-signal Raman interaction. These results are useful and important for reducing the PDG of a FRA.

Key words optical communications; polarization dependent gain; fiber Raman amplifier; backward pumped; polarization mode dispersion

OCIS codes 060.2310; 060.2320; 060.2330; 060.4370; 060.4510

1 引 言

随着光纤通信系统容量的不断扩大,掺铒光纤放大器^[1-2](EDFA)的带宽和饱和输出功率已经满足不了系统的要求,需要新的宽带放大器。基于受

激拉曼散射^[3](SRS)的光纤拉曼放大器^[4](FRA)具有分布式放大、低噪声以及大带宽等优点,已经成为现代光纤系统不可或缺的关键部件之一。

在光波沿光纤的实际传播中,由于光纤均存在

收稿日期: 2014-02-26; **收到修改稿日期**: 2014-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(60588502,60607005,60877033)

作者简介: 王丹燕(1989—),女,硕士研究生,主要从事光纤拉曼放大器偏振相关增益方面的研究。

E-mail: wangdanyan1016@163.com

导师简介: 姜海明(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光电器件等方面的研究。

E-mail: hmjiang@hfut.edu.cn(通信联系人)

一定程度的双折射,受到外界温度、压力等的影响光波的偏振态会发生随机的变化,因此很难控制抽运光与信号光之间偏振态的相对方向。研究表明当抽运光和信号光的偏振面平行时,拉曼增益系数最大,当抽运光和信号光的偏振面垂直时,几乎不能产生增益^[5]。根据信号光和抽运光在增益介质中传播方向的关系,FRA 一般有正向抽运、反向抽运和双向抽运三种结构。有研究报道,反向抽运方式 FRA 中的偏振相关增益(PDG)大约是正向抽运方式 FRA 中 PDG 的 1/3^[6]。因此,为了减小 FRA 系统中的非线性效应对传输系统的影响,FRA 一般采用反向抽运方式。关于反向抽运方式 FRA 中 PDG 的研究已有一些报道:Stolen^[5]提出了单模双折射光纤中反向散射的抽运和斯托克斯场分布中的偏振长度;Popov 等^[7]在基于色散补偿光纤(DCF)的集总式 FRA 研究了反向抽运方式 FRA 中 PDG 的特性;Zhang 等^[8]利用数值计算的方法得出了反向抽运方式 FRA 中 PDG 特性。但是这些研究都是基于单抽运单信号的 FRA 系统,对反向多抽运 FRA 中的 PDG 研究尚未见相关报道。

本文基于 FRA 的非线性耦合方程,采用数值

计算的方法研究了反向多抽运 FRA 中的 PDG 特性,其中包括所有光波拉曼相互作用所产生的 PDG、抽运-信号拉曼相互作用所产生的 PDG、抽运-抽运拉曼相互作用所产生的 PDG 以及信号-信号拉曼相互作用所产生的 PDG 等。数值计算的结果不仅可以有效地估计 FRA 系统中的 PDG 值,而且对有效降低 FRA 系统中的 PDG 提供了重要参考。

2 理论模型

一般来说,在非线性光学介质中传输的高能量激光将发生散射,将一小部分入射功率转移到另一频率的光功率,频率改变量由介质的性质决定,此过程称为自发拉曼散射。如果一弱信号光与一更高频率的强抽运光波同时非线性光学介质中传输,并且信号光的频率在介质的拉曼增益带宽之内,则由于拉曼效应,弱信号光即可从强抽运光中获取能量得到放大,此过程就是 SRS。如果把光纤作为非线性介质,利用 SRS 的原理就可以制成 FRA。目前已被广泛使用的 FRA 的数学模型是建立在下述非线性耦合方程基础上^[9-10]的:

$$\pm \frac{dP_k}{dz} = -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{v_j}(v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{v_k}{v_j} \frac{g_{v_k}(v_k - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k, \quad (1)$$

式中 P_i , v_i 和 α_i 分别代表第 i 路波的功率、频率和损耗系数;正负号分别代表正向抽运和反向抽运;抽运光频率为 v_i 的增益系数为 $g_{v_i}(\Delta v) = g_R(\Delta v) v_i / v_0$, $g_R(\Delta v)$ 即为频率为 v_0 的抽运光得到的拉曼增益谱; m 为抽运光数目; n 为信号光数目; A_{eff} 为光纤有效截面积, K_{eff} 为偏振系数。(1) 式的含义是:当多路光波同时在光纤内传输时,除光纤损耗外,由于受激拉曼散射效应,所有频率大于 λ_p 的光向第 j 路光传输能量,所有频率小于 λ_s 的光从第 j 路光吸收能量。

在一段长光纤中,拉曼增益将呈现出某种平均,在数值上近似等于最大偏振增益的一半,故一般情况下 K_{eff} 取为 2。若要精确研究 FRA 中增益的偏振相关特性,则偏振系数的具体表达式可为^[8]

$$K_{\text{eff}} = 2 / \left\{ 1 \pm \frac{\sin\{2\pi\{L_k/[L/(\langle\Delta\tau\rangle\delta v)]\}\}}{2\pi\{L_k/[L/(\langle\Delta\tau\rangle\delta v)]\}} \right\},$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, N,$$

$$L_k = (k - 1)\delta L, \quad (2)$$

式中 δL 为数值计算方法的迭代步长, N 为迭代次

数, L_k 为迭代步长的累加, L 为光纤总长度, $\Delta\tau$ 为光纤偏振模色散(PMD)值, δv 为两光波频率差。偏振系数 K_{eff} 考虑了光纤 PMD、两光波频率差、光纤总长度在内的影响 PDG 的因素。

数值仿真过程中采用的是具有随机双折射的 DCF,其拉曼增益效率系数(g_R/A_{eff})如图 1 所示。其他的数值仿真参数如表 1 所示。

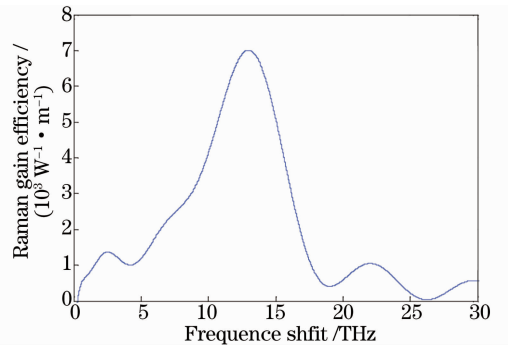


图 1 Raman 增益效率系数谱

Fig. 1 Spectrum of Raman gain efficiency

表1 FRA 中数值仿真参数

Table 1 Parameters used in simulations of four-pump FRAs

Parameter name	Value
Fiber length /km	10
Fiber loss coefficient / (dB/km)	1.5
Fiber PMD / (ps/km ^{1/2})	0.22
Effective core area of fiber / μm^2	80
Number of signals n	11
Power of each signal channel / dBm	0
Starting wavelength for signals / nm	1530
Ending wavelength for signals / nm	1580
Number of pumps m	3
Power of each pump channel / W	0.1
Wavelength of the first pump / nm	1432
Wavelength of the second pump / nm	1452
Wavelength of the third pump / nm	1472

3 数值仿真及结果

对于反向抽运方式的 FRA, 非线性耦合方程(1)式的求解在数学上可以归结为一阶常微分方程组的边值问题, 通常边值问题可以应用打靶法转化为初值问题, 然后初值问题通常采用四阶龙格-库塔积分法^[11]进行数值求解。本文对反向多抽运 FRA 非线性耦合方程的求解, 采用文献[12]提出的用于快速求解反向抽运拉曼耦合方程的打靶法。

根据打靶法的基本思路, 应用牛顿-拉斐森方法求解(1)式的基本打靶法步骤可归结如下。

1) 在积分的起点, 即信号光的输入端, 随机猜测一组各路抽运光的输出功率组成预测向量 $\mathbf{P}_g = (\mathbf{P}_{1g}, \mathbf{P}_{2g}, \dots, \mathbf{P}_{ng})$, 并和已知的各路信号光输入功率 $\mathbf{P}_0 = (\mathbf{P}_{10}, \mathbf{P}_{20}, \dots, \mathbf{P}_{n_0})$ 一起构成积分迭代的初始向量 $\mathbf{P}_{g0} = (\mathbf{P}_{10}, \mathbf{P}_{20}, \dots, \mathbf{P}_{n_0}, \mathbf{P}_{1g}, \mathbf{P}_{2g}, \dots, \mathbf{P}_{ng})$ 。

2) 按照求解微分方程初值问题的方法, 采用四阶龙格库塔法, 沿光纤进行积分, 直到光纤的另一端。

3) 判断边界条件(已知的输入抽运光功率)是否满足, 满足则结束计算, 否则重新计算积分迭代初值并返回第 2 步继续计算。

在第 3 步中新的迭代初值非常重要, 这里采用牛顿-拉斐森方法^[12]获得积分迭代初值。值得注意的是在迭代计算时, 步长不宜太长, 否则相当于对偏振沿传输方向取平均。数值仿真中取迭代步长 δL 为 10 m。

利用上述方法计算 FRA 系统中由所有光波拉曼相互作用所产生的 PDG 的数值仿真结果如图 2

所示。当仅考虑反向多抽运 FRA 系统中由抽运-信号拉曼相互作用所产生的 PDG 时, 只需将抽运-信号拉曼相互作用时的偏振系数取为(2)式, 不考虑反向多抽运 FRA 系统中其他拉曼相互作用所产生的 PDG 的影响, 取其拉曼相互作用时的偏振系数 $K_{\text{eff}} = 2$ 。其数值仿真结果如图 3 所示。

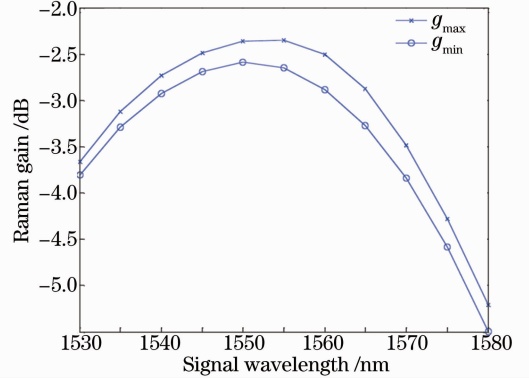


图2 考虑所有光波拉曼相互作用下的增益谱
Fig. 2 Spectra of Raman gain with all waves

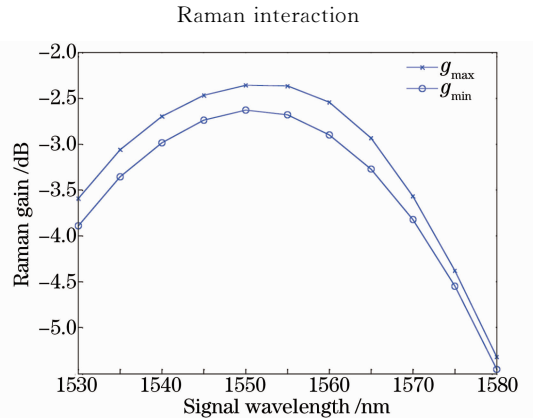


图3 仅考虑抽运-信号拉曼相互作用下的增益谱
Fig. 3 Spectra of Raman gain with pump-signal

Raman interaction
观察图 2 可以发现, 在整个信号增益带宽内, PDG 的值都比较均匀。文献[13]中提到的单抽运 FRA 系统中的 PDG 在整个增益带宽内是不均匀的, 具体表现为: 增益随信号光偏振态的波动在 13.2 THz 之前的值比较大而且递减速率很小, 而在长波长方向的差值随着信号光波的增加迅速减小并接近于 0。由此可见, 抽运数目增多会使增益带宽内的 PDG 曲线谱分布变均匀。比较图 2 和图 3 还可以发现, 在反向多抽运 FRA 系统中, 考虑所有光波拉曼相互作用所产生的 PDG 和仅考虑由抽运-信号拉曼相互所产生的 PDG 相差不大。

当仅考虑反向多抽运 FRA 系统中由抽运-抽运拉曼相互作用所产生的 PDG 时, 只需将抽运-抽运

拉曼相互作用时的偏振系数取为(2)式,不考虑反向多抽运 FRA 系统中其他拉曼相互作用所产生的 PDG 的影响,取其拉曼相互作用时的偏振系数 $K_{\text{eff}}=2$ 。其结果如图 4 所示。若仅考虑反向多抽运 FRA 系统中由信号-信号拉曼相互作用所产生的 PDG,只需将信号-信号拉曼相互作用时的偏振系数取为(2)式,而为了排除多抽运 FRA 系统中由其他拉曼相互作用所产生的 PDG 的影响,取其拉曼相互作用时的偏振系数 $K_{\text{eff}}=2$ 。其结果如图 5 所示。

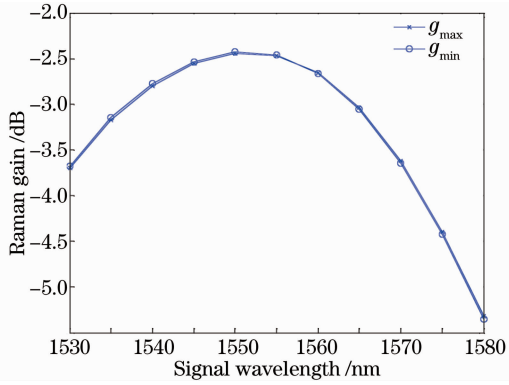


图 4 仅考虑抽运-抽运拉曼相互作用下的增益谱
Fig. 4 Spectra of Raman gain with pump-pump Raman interaction

观察图 4 可以发现,在反向多抽运 FRA 系统中,由抽运-抽运拉曼相互作用所产生的 PDG 几乎为 0。观察图 5 可知,在反向多抽运 FRA 系统中,由信号-信号拉曼相互作用所产生的 PDG 最大只有 0.1 dB。

4 结果与分析

观察图 2~5 可以发现,反向多抽运 FRA 系统中拉曼相互作用所产生的 PDG 主要由抽运-信号之间拉曼相互作用所产生的 PDG 决定。而抽运-抽运之间、信号-信号之间的拉曼相互作用所产生的 PDG 对

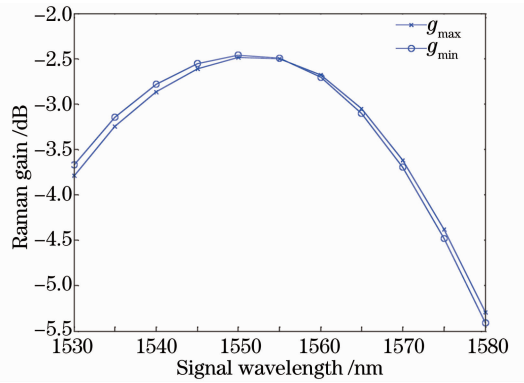


图 5 仅考虑信号-信号拉曼相互作用下的增益谱
Fig. 5 Spectra of Raman gain with signal-signal Raman interaction

反向多抽运 FRA 中的 PDG 的贡献很小,几乎可以忽略不计。原因在于,本文数值计算过程中所采用的抽运与信号之间的频差范围为 7~19 THz,所采用的各抽运波长之间的频差范围为 3~6 THz、各信号之间的频差范围为 0.6~6 THz。对照图 1 的增益效率系数谱,可以看出抽运-信号之间的拉曼增益系数较大,而抽运-抽运、信号-信号之间的拉曼增益系数较小。从而决定了抽运-抽运之间的拉曼相互作用和信号-信号之间的拉曼相互作用很小。

因为反向抽运方式 FRA 中的 PDG 是正向抽运方式 FRA 中 PDG 的 $1/3^{[6]}$,所以为了减小 FRA 系统中的非线性效应造成的增益波动,一般采用反向抽运方式的 FRA,并且对于多抽运 FRA 选择合适的抽运波长可以获得较平坦的拉曼增益谱^[14-15]。上述研究发现,相比于单抽运 FRA 系统[如图 6 (a)、(b)所示],多抽运 FRA 系统不仅可以获得较平坦的拉曼增益谱而且可以使整个增益带宽内的 PDG 较均匀,如图 2、3 所示。由图 6 可见,单个抽运在信号光的不同波长范围产生的 PDG 不同。所

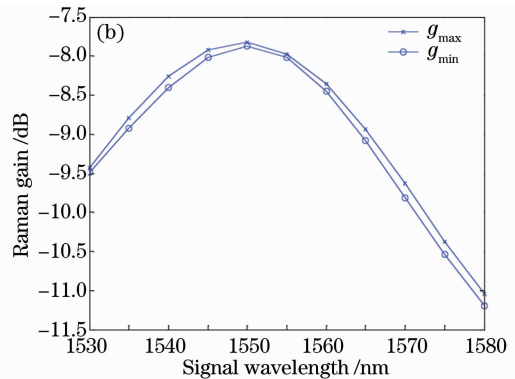
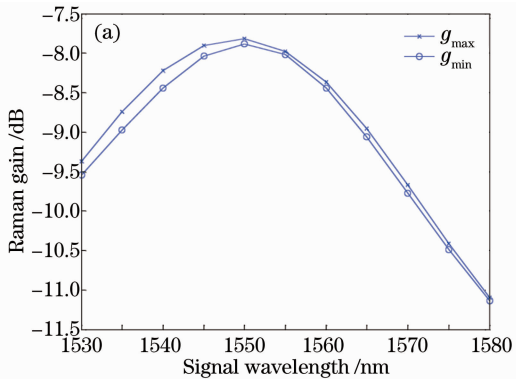


图 6 单抽运 FRA 系统中的 PDG。(a) 考虑抽运-信号拉曼相互作用下的增益谱;
Fig. 6 PDG in FRA with a single pump. (a) Spectra of Raman gain with pump-signal Raman interaction;
(b) spectrum of Raman gain with all waves Raman interaction

以,通过把不同抽运产生的 PDG 进行合理叠加,就可以在整个信号光波段产生平坦的 PDG 谱。

关于反向多抽运 FRA 系统中 PDG 的进一步研究发现:1) 当抽运光功率从 0.05 W 增大到 0.3 W 的过程中,PDG 的值先增大后降低,且抽运功率越低,PDG 曲线越平坦;2) 抽运光波长在增益带宽内分布越均匀,PDG 曲线就越平坦;3) PDG 值随着光纤损耗系数的增大而降低,PDG 曲线随着光纤损耗系数的增大而趋于平坦;4) 光纤 PMD 越大,PDG 值越小且 PDG 曲线越平坦;5) 在信号光功率从 10^{-3} W 逐渐减小到 10^{-4} W 的过程中,PDG 逐渐增大,在信号光功率从 10^{-4} W 逐渐减小到 5×10^{-6} W 的过程中,PDG 几乎不变。

5 结 论

基于 FRA 的非线性方程,数值计算出了反向多抽运 FRA 中的 PDG,其中包括所有光波拉曼相互作用所产生的 PDG、抽运-信号拉曼相互作用所产生的 PDG、抽运-抽运拉曼相互作用所产生的 PDG 以及信号-信号拉曼相互作用所产生的 PDG。研究表明,反向多抽运 FRA 系统中拉曼相互作用所产生的 PDG 主要由抽运-信号之间拉曼相互作用所产生的 PDG 决定。同时,采用反向多抽运方式的 FRA 可以使得整个增益带宽内的 PDG 较均匀。此数值结果可以有效地估计 FRA 系统中由抽运-信号、抽运-抽运、信号-信号之间拉曼相互作用所产生的 PDG 并对有效降低反向多抽运 FRA 中的 PDG 有重要参考价值。

参 考 文 献

- Zhang Zhiguo, Cao Zhihui, Chen Xue, *et al.*. Remotely pumped EDFA-based 40-Gb/s downstream and 10-Gb/s upstream long-reach WDM PON employing RSOA and FBG equalizer[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(12): 120602.
- Zhang Kewei, Zhao Wei, Xie Xiaoping, *et al.*. Experimental research of high gain and low noise figure optical amplifier based on erbium-doped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506003.
- 张珂卫, 赵 卫, 谢小平, 等. 基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506003.

- Ma Honglei, Jin Haipeng, Yang Rui. External fluorescence seeding enhanced stimulated Raman scattering in liquid-core optical fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0115001.
- 马宏磊, 金海鹏, 杨 睿. 外部荧光种子植入法增强液芯光纤的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0115001.
- Xu Jia, Wang Lei, Liu Jiang, *et al.*. Narrow line-width 1653 nm Raman fiber amplifiers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602001.
- 徐 佳, 汪 磊, 刘 江, 等. 1653 nm 窄线宽拉曼光纤放大器[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602001.
- R H Stolen. Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1979, 15(10): 1157-1160.
- E S Son, J H Lee, Y C Chung. Statistics of polarization-dependent gain in fiber Raman amplifiers[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(3): 1219-1226.
- S Popov, E Vanin, G Jacobsen. Influence of polarization mode dispersion value in dispersion-compensating fibers on the polarization dependence of Raman gain[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(10): 848-850.
- Minming Zhang, De ming Liu, Ying Wang, *et al.*. Efficient numerical method for predicting the polarization-dependent Raman gain in fiber Raman amplifiers[J]. *J Opt Soc Am A*, 2004, 21(2): 263-266.
- E P Victor, G W Herbert. Optimal design of flat-gain wide band fiber Raman amplifiers[J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(2): 250-254.
- Y Aoki. Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems[J]. *J Lightwave Technol*, 1988, 6(7): 1225-1239.
- Nie Tiejun. Numerical Calculation Method[M]. Beijing: Press of University of Tsinghua, 1990.
- 聂铁军. 数值计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- Jiang Haiming, Wang Yafei, Xie Kang. Stable and efficient shooting algorithm for a backward multi-pumped Raman fiber amplifier[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, 16(5): 558-561.
- 姜海明, 王亚非, 谢 康. 反向多波长抽运 RFA 的稳定高效的打靶算法[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(5): 558-561.
- Zhang Minming, Liu Deming, Wang Ying, *et al.*. Study on the polarization dependent gain of fiber Raman amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4): 600-604.
- 张敏明, 刘德明, 王 英, 等. 光纤拉曼放大器中增益的偏振相关特性研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(4): 600-604.
- Yan Fenfen, Wang Kuiru, Yu Chongxiu, *et al.*. Broadband gain-flattened multiwavelength pumped Raman fiber amplifier[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 155-158.
- 颜纷纷, 王葵如, 余重秀, 等. 增益平坦的多波长抽运宽带拉曼光纤放大器[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 155-158.
- Zhou Weijun, Xu Ming, Wang Rongbo. The design on gain flatness of distributed broadband fiber Raman amplifier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030602.
- 周维军, 绪 明, 王荣波. 分布式宽带光纤拉曼放大器增益平坦优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030602.

栏目编辑:王晓琰