

文章编号:1002-2082(2015)03-0486-06

分布式反向抽运光纤拉曼放大器的 功率转换效率分析

龙青云¹, 胡素梅², 彭志平¹

(1. 广东石油化工学院 计算机与电子信息学院, 广东 茂名 525000;

2. 广东石油化工学院 理学院, 广东 茂名 525000)

摘要: 为了对反向抽运光纤拉曼放大器的功率转换效率进行研究, 由耦合方程出发, 采用龙格库塔算法和打靶法相结合的数值模拟方法, 详细分析所有物理因素对反向抽运光纤拉曼放大器功率转换效率的影响。结果表明: 功率转换效率先随着光纤长度增加而增加, 当增加到最大值时保持数值不变; 功率转换效率随着初始信号光功率、光纤拉曼增益系数、信号光损耗系数增加而增加, 随着光纤有效面积、抽运光损耗系数、抽运光与信号光的频率比增加而减小; 功率转换效率和初始抽运光功率呈抛物线曲线关系。所得结论对反向抽运光纤拉曼放大器功率转换效率的进一步研究以及光纤拉曼放大器的其他相关研究有重要参考意义。

关键词: 光纤通信; 光纤拉曼放大器; 功率转换效率; 反向抽运; 数值模拟

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201536.0308002

Power conversion efficiency analysis of distributed backward pumped fibre Raman amplifier

Long Qingyun¹, Hu Sumei², Peng Zhiping¹

(1. College of Computer and Electronic Information, Guangdong University of Petrochemical Technology,

Maoming 525000, China; 2. College of Science, Guangdong University of Petrochemical Technology,

Maoming 525000, China)

Abstract: In order to analyze the power conversion efficiency of backward pumped fibre Raman amplifier(FRA), by combining the shooting method with the Runge-Kutta method for solving differential coupling equations of backward pumped FRA, the effect of every parameter on backward pumped FRA's power conversion efficiency was detailedly investigated. It is found that the power conversion efficiency is increasing with the increase of fibre length, until it reaches the maximum; the power conversion efficiency increases when the initial signal power or Raman gain coefficient or the attenuation coefficient of signal is larger, and it decreases when the fibre efficient area or the attenuation coefficient of pump or the pump and signal frequency ratio is larger; the relation between power conversion efficiency and initial pump power is parabolic. The conclusions are helpful to further study the backward pumped FRA.

Key words: optical fibre communication; fibre Raman amplifier; power conversion efficiency; backward pumped; numeric simulation

收稿日期:2014-12-17; 修回日期:2014-12-31

基金项目:国家自然科学基金(61272382);广东省自然科学基金(s2013010012844);茂名市科技计划(2014033)

作者简介:龙青云(1982—),女,湖南绥宁人,硕士,讲师,主要研究方向为光纤通信器件。E-mail:lian149605@163.com

引言

光纤拉曼放大器(fibre Raman amplifier, FRA)具有分布式放大、低噪声以及宽带宽等优点,是继掺铒光纤放大器后的新宠,在未来高速、大容量系统中将发挥不可替代的关键作用^[1-4]。

尽管国内外相关学界和业界对 FRA 进行了多方位的研究,包括 FRA 增益、噪声、色散、优化设计增益平坦度、光信噪比的文献已经较多^[1-4],但是在考虑这些性能的基础上,定量分析抽运效率的文献还是较少的,具体表现:1)文献中对 FRA 抽运效率的定义是不同的^[5-8];2)相关研究成果数量一直很缺乏,迄今查得的专题研究通信线路中 FRA 抽运效率的相关论文仅 4 篇左右,即文献[5]、[6]、[8]及[9],其中文献[5]和[9]为理论文献,文献[6]和[8]为实验研究文献;3)FRA 抽运效率的研究视角和路径也比较单一。多数研究成果只是提出 FRA 抽运效率低的问题,缺乏对影响 FRA 抽运效率的系统因素的全面研究。而 FRA 作为通信线路中的一个重要器件,其抽运效率与 FRA 产品的性价比直接相关,是设计理想的各类 FRA 的关键参数之一,其研究极大影响着 FRA 能否在新一代光纤通信系统中的推广应用和成熟化。结合目前的通信系统设备商希望尽量少用 FRA,这说明 FRA 在商业化上还存在问题,最关键的问题是抽运效率偏低。本研究试图弥补这一点,通过龙格库塔算法和打靶法相结合的算法进行数值模拟,系统地分析光纤长度、初始信号光功率、初始抽运光功率、光纤拉曼增益系数、光纤有效面积、信号光损耗系数、抽运光损耗系数、抽运光和信号光的频率比值等所有参量对功率转换效率的影响,全面地研究反向抽运 FRA 的功率转换效率问题,最后对反向抽运 FRA 的功率转换效率问题进行总结。

1 理论基础

在连续或准连续波抽运时,反向抽运 FRA 中信号光和抽运光的耦合方程为^[10]

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_p(z) P_s(z) - \alpha_s P_s(z) \quad (1)$$

$$-\frac{dP_p(z)}{dz} = -\frac{v_p}{v_s} \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_s(z) P_p(z) - \alpha_p P_p(z) \quad (2)$$

式中: v_s 、 v_p 分别是信号光和抽运光的频率; g_R 为

光纤的拉曼增益系数; A_{eff} 为光纤有效面积; α_s 、 α_p 分别为信号光频率和抽运光频率处光纤的损耗系数; $P_s(z)$ 、 $P_p(z)$ 分别是信号光和抽运光沿光纤分布的光功率。

分布式 FRA 的抽运功率转换效率的定义是^[5]:

$$\alpha_{\text{PCE}} = P_s(0)(G-1)/P_p(L) \quad (3)$$

G 表示 FRA 的开关增益,表示为^[11]

$$G = 10 \lg \frac{P_s(L)}{P_s(0) \exp(-\alpha_s L)} \quad (4)$$

因此,功率转换效率(PCE)受到许多参量的影响,如 L 、 $P_s(0)$ 、 $P_p(L)$ 、 A_{eff} 、 g_R 、 v_s 、 v_p 、 α_s 及 α_p 等。目前,文献[5]、[6]、[8]、[9]中都只是分析了很少一部分参量对功率转换效率的影响,如文献[5]从理论上分析了同向抽运 FRA 中功率转换效率与 L 、 $P_s(0)$ 、 $P_p(L)$ 的关系,文献[6]从实验的角度分析了功率转换效率与 $P_s(0)$ 的关系。(1)式和(2)式属于一阶微分方程组的边值问题。和文献[5]、[6]、[8]、[9]不同,这里为了分析更全面,采用龙格库塔算法和打靶法 2 种数值计算方法相结合,对(1)式和(2)式进行数值模拟求解。参量取值为典型值,同文献[11],即:抽运光的波长为 1 450 nm,其注入光功率 $P_p = 400$ mW;信号光的波长为 1 550 nm,初始功率为 $P_s(0) = -25$ dBm;采用常规单模光纤, $\alpha_s = 0.20$ dB/km; $\alpha_p = 0.24$ dB/km; $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$; $g_R = 0.690 \times 10^{-13}$ m/W; $L = 25$ km。

2 数值模拟结果与分析

2.1 光纤长度 L 对功率转换效率的影响

图 1 为光纤长度 L 与功率转换效率的关系图。总体趋势是:功率转换效率随着光纤长度增加而增加,一直增加到一确定值而保持不变。当初始信号光功率较小时(<5 dBm),功率转换效率随着光纤长度增加而缓慢增加,而且很容易增加至最大值而保持不变;当初始信号光功率较大时(>5 dBm),功率转换效率随着光纤长度增加而快速增加,而且不容易增加至最大值。结合文献[11]的结论,开关增益实质上与光纤有效长度($L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$)直接相关,而不是直接与光纤长度有关。当光纤长度大于光纤有效长度后,拉曼放大得到的开关增益将维持一个不变值(此时抽运光能量一部分用于保持恒定的增益,

另一部分则越来越多地用于弥补光纤损耗而引起的消耗)。根据(3)式,当初始信号光功率和初始抽运光功率确定时,此时的功率转换效率也将维持一个不变值。这个结论和理论研究文献[5]给出的结论是一致的。

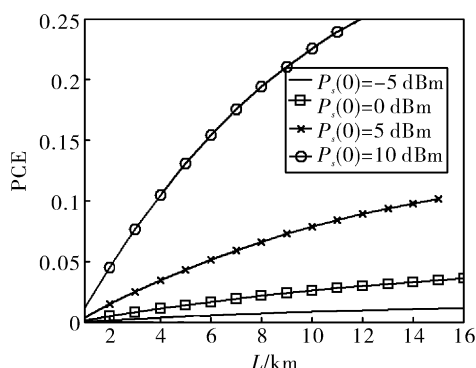


图1 光纤长度对功率转换效率的影响

Fig. 1 Effect of fiber length on power conversion efficiency

2.2 初始信号光功率 $P_s(0)$ 对功率转换效率的影响

图2表示出不同光纤长度时初始信号光功率与功率转换效率的关系。总体来说,初始信号光功率对功率转换效率的影响较大,功率转换效率随着初始信号光功率增加而增加。仔细观察程序运行过程,当初始信号光功率很小(< -10 dBm)时,功率转换效率随初始信号光功率增加而非常缓慢地增加,比如,初始信号光功率从 -75 dBm增加到 -10 dBm,功率转换效率只增加了 0.3% 。当初始信号光功率较大(> -10 dBm)时,功率转换效率随初始信号光功率增加而快速增加,比如,初始信号光功率从 -10 dBm增加到 10 dBm,功率转换效率增加了约 24.7% 。理论上,当初始信号光功率持续增加时,功率转换效率可以大于 1 ,这个结论和文献[9]的结论一致,甚至更进一步(文献[9]指出当初始信号光功率较大时,FRA的抽运效率可达 60% ,优于掺铒光纤放大器的抽运效率。)。目前,光纤通信系统的入纤功率在 10 dBm左右,此时的功率转换效率对于分布式光纤放大器来说已经足够,所以FRA能够稳步走向应用。

此外,将上述结果和实验文献[6]、[12]的结果进行对比,发现上述结果和文献[12]的实验结果完全一致;上述结果和文献[6]的结果,其共同点是指出反向抽运FRA的功率转换效率与初始信号光功率有关;其不同点是文献[6]形成了结

论一反向抽运FRA的功率转换效率随着初始信号光功率的增加而呈下降趋势,而这里的结论正好相反,即反向抽运FRA的功率转换效率随着初始信号光功率的增加而增加。引起其结论完全相反的原因是功率转换效率的定义不同,文献[6]将功率转换效率定义为信号的开关增益与初始抽运光功率的比值。这里将功率转换效率定义为(3)式,在定义中就体现了初始信号光功率的影响。只是实验文献[6]中所用初始抽运光功率小于 100 mW,小于目前光纤通信系统常用的光纤放大器抽运源功率。而这里的分析过程中,所有参量取值为典型值,并且取值可以任意变化。

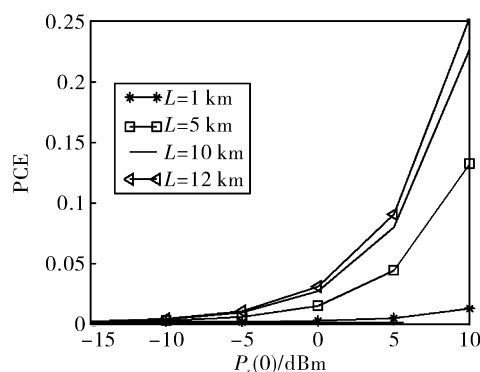


图2 初始信号光功率对功率转换效率的影响

Fig. 2 Effect of initial signal power on power conversion efficiency

2.3 初始抽运光功率 $P_p(L)$ 对功率转换效率的影响

图3表示不同初始信号光功率条件下不同初始抽运光功率与功率转换效率的关系。总体来说,功率转换效率和初始抽运光功率呈抛物线曲线关系,当初始信号光功率较大时(> 0 dBm),抛物线形状非常明显;当初始信号光功率较小时(< 0 dBm),抛物线形状在图上不明显,只在程序运行结果的数据上体现。功率转换效率先随着初始抽运光功率增加而增加,当增加至一个最大值后,功率转换效率就随着初始抽运光功率增加而缓慢减小。究其原因随着初始抽运光功率的增加,FRA器件的增益增加得越来越缓慢,最后趋近于饱和[11]。当增益达到饱和(即取得最大值)以后,根据功率转换效率的定义(3)式,当增益和初始信号光功率不变时,进一步增加初始抽运光功率,功率转换效率只会变小。这说明抽运光作为FRA的能量之源,并不是初始抽运光功率越大,FRA器件的功率转换效率就越高,而是存在一个功率转换效率处

在最大值附近的初始抽运光功率范围。只有设置初始抽运光功率处在功率转换效率最大值附近的数值,才能实现 FRA 器件成本的最低化。

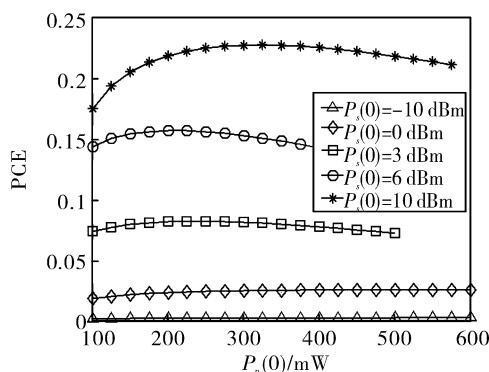


图3 初始抽运光功率对功率转换效率的影响

Fig. 3 Effect of initial pump power on power conversion efficiency

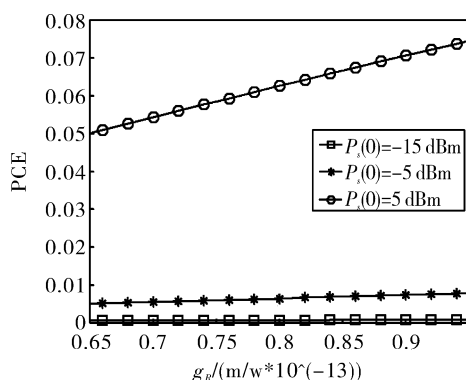


图4 g_R 对功率转换效率的影响

Fig. 4 Effect of g_R on power conversion efficiency

2.4 光纤拉曼增益系数 g_R 对功率转换效率的影响

图4表示不同初始信号光功率时 g_R 与功率转换效率的关系。这里界定 g_R 的取值范围为 $0.6 \times 10^{-19} \sim 1 \times 10^{-19}$ km/mW。从图4可得,功率转换效率随着 g_R 的数值增加而增加,当初始信号光功率较大(>0 dBm)时,这种总体趋势非常明显;当初始信号光功率较小(<0 dBm)时,这种总体趋势在图中不明显,只在程序运行的数值上体现。理论上而言, g_R 是 FRA 放大信号的直接动力,所以图4得出的结论(g_R 与功率转换效率呈正向关系)与理论是相符合的。因此,在实际制作 FRA 时,尽量选取 g_R 大的光纤可以提高器件的功率转换效率,节约成本。

2.5 光纤有效面积 A_{eff} 对功率转换效率的影响

图5表示不同初始抽运光功率时 A_{eff} 与功率

转换效率的关系。可以得出,功率转换效率随着 A_{eff} 的数值增加而减小。虽然由于数值模拟时采取的初始信号光为小信号(-20 dBm),导致功率转换效率的绝对值较小,但是从功率转换效率和 A_{eff} 的反向变化关系可知,要提高 FRA 的功率转换效率,必须减小光纤有效面积。这对于业界希望设计特殊类型光纤(比如光子晶体光纤)用来制作分立式 FRA 是有理论根据的。

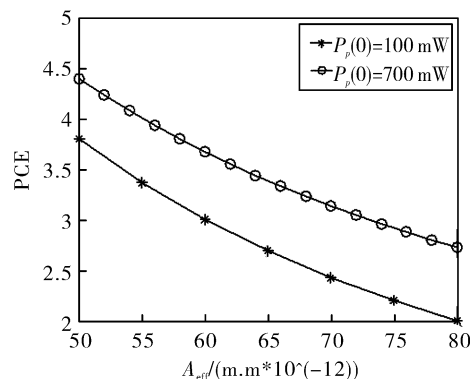


图5 A_{eff} 对功率转换效率的影响

Fig. 5 Effect of A_{eff} on power conversion efficiency

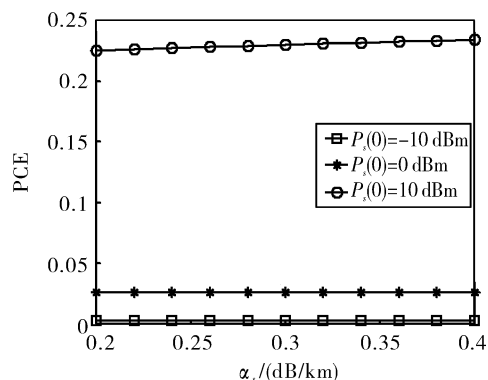


图6 信号光损耗系数对功率转换效率的影响

Fig. 6 Effect of α_s on power conversion efficiency

2.6 信号光损耗系数 α_s 对功率转换效率的影响

图6为不同初始信号光功率时 α_s 与功率转换效率的关系图,由此可知: α_s 增加,功率转换效率亦增加,二者呈正向关系,这一趋势在初始信号光功率较大时明显,在初始信号光功率较小时不明显,只在程序运行结果的数值上体现。比如,初始信号光功率为 10 dBm 时, α_s 从 0.2 dB/km 增加至 0.4 dB/km,功率转换效率总的增加值为 0.009 ;而初始信号光功率为 -10 dBm 时, α_s 从 0.2 dB/km 增加至 0.4 dB/km,功率转换效率几乎不增加。此外,当初始信号光功率依次沿 -10 dBm、

0 dBm、10 dBm递增时,功率转换效率大致以 10 倍的速度递增。

2.7 抽运光损耗系数 α_p 对功率转换效率的影响

图 7 为不同初始信号光功率时 α_p 与功率转换效率的关系图,由此可知: α_p 增加,功率转换效率减小,二者呈反向关系,这种趋势在初始信号光功率较大时很明显,在初始信号光功率较小时不太明显,只在程序运行结果的数值上体现。比如,初始信号光功率为 10 dBm 时, α_p 从 0.2 dB/km 增加至 0.4 dB/km,功率转换效率总的减小值为 0.038;而初始信号光功率为 -10 dBm 时, α_p 从 0.2 dB/km 增加至 0.4 dB/km,功率转换效率总的减小值不到 0.001。此外,当初始信号光功率依次沿 -10 dBm、0 dBm、10 dBm 递增时,功率转换效率大致以 10 倍的速度递增。

总结 α_s 、 α_p 与功率转换效率的关系可得,相对来说, α_s 、 α_p 对功率转换效率的影响较弱,但是随着波分复用系统中的入纤功率越来越高 (> 10 dBm),在优化设计 FRA 时,考虑它们对功率转换效率的影响也是必要的。

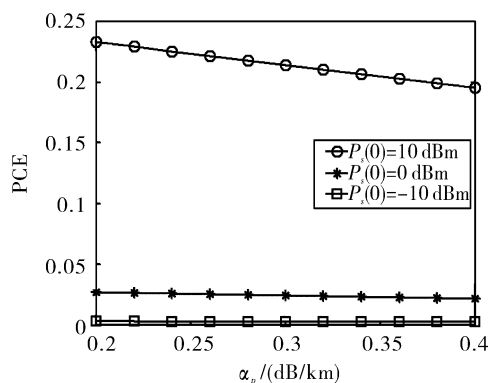


图 7 抽运光损耗系数对功率转换效率的影响

Fig. 7 Effect of α_p on power conversion efficiency

2.8 v_p/v_s 对功率转换效率的影响

图 8 表示 v_p/v_s 与功率转换效率的关系图。经过理论计算,无论是 S 波段、C 波段的 FRA,还是 L 波段的 FRA, v_p/v_s 的取值总在 1~2 之间,这样就限定了 v_p/v_s 的取值范围。从图 8 可得,总体来说,功率转换效率随着 v_p/v_s 的比值增加而接近匀速地减小。而且,相对于其他因素, v_p/v_s 对功率转换效率的影响较小, v_p/v_s 从 1 增加到 1.7 的过程中,功率转换效率总的减小量约为 0.02。这表明设计 FRA 时应该使得抽运光和信号光的频

率尽量接近。

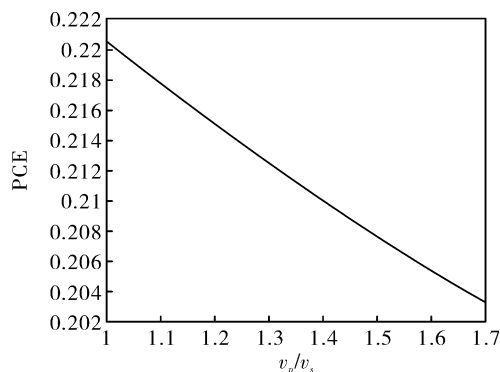


图 8 v_p/v_s 对功率转换效率的影响

Fig. 8 Effect of v_p/v_s on power conversion efficiency

3 结论

采用龙格库塔算法和打靶法相结合的数值模拟方法分析了所有参量对反向抽运 FRA 功率转换效率的影响,结果表明:1) 功率转换效率先随着光纤长度增加而增加,当增加到最大值时数值保持不变;2) 功率转换效率随着 $P_s(0)$ 、 g_R 、 α_s 数值增加而增加,随着 A_{eff} 、 α_p 、 v_p/v_s 数值增加而减小;3) 小信号时,初始信号光功率对功率转换效率的影响较弱;大信号时,功率转换效率随着初始信号光功率增加而快速增加;4) 功率转换效率和初始抽运光功率呈抛物线曲线关系;5) 抽运光与信号光的频率比增加时,功率转换效率减小。并且 v_p/v_s 取值尽量为 1 附近时,功率转换效率将得到最大值。

将这些结论和理论、实验文献[5]、[6]、[8]、[9]进行了对比和分析,发现这里所得结论更全面,与实际情况更接近,适应性也更广。基于典型数据的前提条件下,既研究了反向抽运 FRA 功率转换效率与 L 、 $P_s(0)$ 、 $P_p(L)$ 的关系,又研究了功率转换效率与 g_R 、 A_{eff} 、 α_s 、 α_p 以及 v_p/v_s 的关系。可以根据各个参数对功率转换效率的影响对 FRA 器件进行优化设计。对反向抽运 FRA 功率转换效率的进一步研究以及 FRA 的其他相关研究有重要参考意义。

参考文献:

- [1] Long Qingyun, Wu Tingwan, Hu Sumei, et al. Threshold characteristics of forward-pumped fiber Raman amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 030603-1-4.

- 龙青云,吴庭万,胡素梅,等. 同向抽运光纤拉曼放大器的阈值特性[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3):030603-1-4.
- [2] Leng Jinyong, Wu Wuming, Chen Shengpin, et al. Suppression of stimulated brillouin scattering in single-frequency Raman fiber amplifiers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9):2334-2339.
冷进勇,吴武明,陈胜平,等. 单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射的抑制[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2334-2339.
- [3] Deng Huaqiu, Long Qingyun. Theoretical analysis on SRS in single-mode fibers pumped by laser of 1 064nm[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(1): 46-50.
邓华秋,龙青云. 1 064 nm 激光抽运单模光纤受激喇曼散射的理论分析[J]. 光子学报, 2008, 37(1): 46-50.
- [4] Deng Huaqiu, Long Qingyun. Analysis of the gain characteristics of backward-pumped fibre Raman amplifier [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(10): 1534-1537.
邓华秋,龙青云. 反向抽运光纤喇曼放大器增益特性分析[J]. 光子学报, 2006, 35(10):1534-1537.
- [5] Mei Jinjie, Liu Deming, Huang Dexiu. Analysis of power conversion efficiency of fiber Raman amplifier [J]. Laser Technology, 2003, 27(4):349-351.
梅进杰,刘德明,黄德修. 光纤拉曼放大器的功率转换效率分析[J]. 激光技术, 2003, 27(4):349-351.
- [6] Liu Qiang, Cheng Xinlu, Xin Xiangjun, et al. Analysis of Raman fiber amplifier's power conversion efficiencies base on experiment [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(6):12-23.
刘强,程新路,忻向军,等. 喇曼放大器功率转换效率实验分析[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(6): 12-23.
- [7] Rekas M, Zimer H, Tünnermann A. Over 200 W average power tunable Raman amplifier based on fused silica step index fiber[J]. Applied Physics B, 2012, 107:711-716.
- [8] Chestnut D A, Dematos C J S, Reeves-hall P C, et al. High efficiency, dual-wavelength fibre Raman pump laser for U-band fibre Raman amplifiers[J]. OpticL Quantum Electronics Letters, 2002, 34: 1025-1030.
- [9] Islam M N. Raman amplifiers for telecommunications[J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(3):548-559.
- [10] Long Qingyun. Design of fibre Raman amplifier in ultra long haul system[J]. Journal of Maoming University, 2007, 17(6):49-51.
龙青云. 超长距离系统中光纤拉曼放大器的设计[J]. 茂名学院学报, 2007, 17(6):49-51.
- [11] Deng Huaqiu, Long Qingyun, Wu Junfang. Gain characteristics of forward pumped Raman fiber amplifier [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 33(10): 44-47.
邓华秋,龙青云,吴俊芳. 同向泵浦喇曼光纤放大器的增益特性[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2005, 33(10):44-47.
- [12] Xu Jia, Wang Lei, Liu Jiang, et al. Narrow line-width 1653 nm Raman fiber amplifiers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602001-1-5.
徐佳,汪磊,刘江,等. 1 653 nm 窄线宽拉曼光纤放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(6):0602001-1-5.