

文章编号: 0253-2239(2004)12-1607-5

多波长双向抽运光纤拉曼放大器的优化设计

崔 晟¹ 刘劲松² 马晓明³

1 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071
2 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074
3 深圳高等职业技术学院, 深圳 518055

摘要: 通过合理分析提出了便于计算多波长双向抽运光纤拉曼放大器信号及噪声功率的实用数值模型, 给出求解信号和噪声功率的快速算法。在定义抽运方向度为前向抽运功率与总抽运功率值的比值后, 通过对计算结果的分析发现信道平均放大自发辐射噪声功率随着抽运方向度的提高而单调递减; 而信道平均双重瑞利散射噪声功率相对抽运方向度的变化曲线始终成 U 字形。不同的增益下存在对应的最优抽运方向度, 在此抽运方向度下放大器总噪声最低。进而考虑在信号非线性失真的条件下提出了抽运方向度优化的衡量指标。优化后的多波长双向抽运方式不仅能保证对所有信道的平坦放大, 而且其综合性能明显高于后向抽运方式。

关键词: 导波与光纤光学; 光放大器; 双向抽运; 数值模型; 优化设计

中图分类号: TN723.3 文献标识码: A

Optimization of Multiple Wavelength Bidirectionally Pumping Fiber Raman Amplifier

Cui Sheng¹ Liu Jinsong² Ma Xiaoming³

1 School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071
2 State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science
and Technology, Wuhan 430074
3 Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055

(Received 23 October 2003; revised 3 June 2004)

Abstract: A novel numerical model and an efficient algorithm are developed to calculate the powers of signal and noise light waves in multiple wavelengths bidirectionally pumping fiber Raman amplifiers. The relationship between the noises, including the amplified spontaneous emission noise and the double Rayleigh backscattering noise, and the degree of pumping directionality is studied. According to the simulation results there exists an optimal degree of pumping directionality, at which the total noise power drops to its lowest value. Furthermore, an optimization of evaluating factor considering both the optical signal to noise ratio and nonlinear distortion impact is put forward. After optimization, fiber Raman amplifiers can achieve not only flat gain spectrum but also the best balance between optical signal to noise ratio and nonlinear distortion impact.

Key words: guided wave and fiber optics; optical amplifier; bidirectionally pumping; numerical model; optimal design

1 引 言

多波长抽运拉曼光纤放大器是一种理想的光纤

放大器, 具有放大带宽宽, 噪声低等优良性能。由于拉曼增益具有瞬时性和偏振敏感性, 其性能容易受到相对强度噪声 (Relative intensity noises, RIN)^[1] 和偏振依赖增益 (Polarization dependent gain, PDG)^[2] 的影响。而后向抽运 (backward pumping)

E-mail: bitartcs@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-10-23; 收到修改稿日期: 2004-06-03

方式可以将这些瞬时和局部的扰动平均消除^[3],因而得到较多的应用。但如果采用相对强度噪声较小的抽运光源和拉曼增益偏振依赖消除技术,双向抽运方式也可以保证良好的放大效果^[2,4]。而且与后向抽运方式相比,双向抽运方式可以更为有效地控制增益沿光纤的分布,利用此优点可以有效地减少噪声功率。这在对单波长双向抽运放大单信道的数值模拟研究中已经得到证实^[5]。对多波长双向抽运放大多信道的数值模拟研究,据作者所知目前还没

有报道。本文通过合理的分析,提出了便于求解信号和噪声功率的新型数值模型和快速算法。

2 数值模型和算法

在宽带多波长双向抽运拉曼光纤放大器的数值模型中必须考虑前后向抽运波间的功率交换,信号波间的功率交换,抽运波向信号波功率转移,瑞利散射和自发拉曼散射效应。文献[6]中的模型给出了描述光波间这些相互作用的微分方程:

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_{f,b}(z,\nu)}{dz} = & -\alpha(\nu)P_{f,b}(z,\nu) + \gamma(\nu)P_{b,f}(z,\nu) + \\ & \int_{\xi>\nu} \left\{ \frac{g_R(\nu-\xi)}{\rho A_{\text{eff}}} [P_f(z,\xi) + P_b(z,\xi)] [P_{f,b}(z,\nu) + 2h\nu(1+N_{\text{phon}})] \right\} d\xi - \\ & \int_{\xi<\nu} \left\{ \frac{\nu g_R(\nu-\xi)}{\xi \rho A_{\text{eff}}} P_{f,b}(z,\nu) [P_f(z,\xi) + P_b(z,\xi) + 2h\xi(1+N_{\text{phon}})] \right\} d\xi \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $P_{f,b}(z,\nu)$ 为距离光纤输入端 z 处频率为 ν 的前向或后向传输光功率, $\alpha(\nu)$ 为衰减系数, $\gamma(\nu)$ 为瑞利散射系数, $g_R(\nu-\xi)$ 为频率为 ν 和 ξ 的光波间的拉曼增益系数, A_{eff} 为光纤有效截面积, h 为普朗克常量, T 为光纤温度。(1) 式左边“+”号对应前向传输光波,“−”号对应后向传输光波。由于该方程中将同频的信号功率、放大自发辐射噪声功率[(1) 式右边两个积分项中的第二子项]和瑞利散射噪声功率[(1) 式右边第二项]统一表示为 $P_{f,b}(z,\nu)$, 因而不便于

信号和噪声光功率演化的数值模拟。下面通过合理分析,根据(1) 式分别给出信号和噪声光功率的传输方程。

2.1 信号和抽运光功率分布的计算

研究表明由于噪声光功率远远小于信号和抽运光功率,其对抽运光和信号光波的影响可以忽略^[7]。将频率按照升序排列,设 $\nu_k (k=1\sim m)$ 为信号光频率(m 为信道数), $\nu_k (k=m+1, m+n)$ 为抽运光频率(n 为抽运光频道数),由(1) 式可得

$$\frac{dP_f(\nu_k, z)}{dz} = -\alpha(\nu_k)P_f(\nu_k, z) + \sum_{j \neq k} g(\nu_k, \nu_j) [P_f(\nu_j, z) + P_b(\nu_j, z)] P_f(\nu_k, z), \quad (2)$$

$$\frac{dP_b(\nu_k, z)}{dz} = \alpha(\nu_k)P_b(\nu_k, z) - \sum_{j \neq k} g(\nu_k, \nu_j) [P_b(\nu_j, z) + P_f(\nu_j, z)] P_b(\nu_k, z), \quad (3)$$

式中 $P_{f,b}(\nu_k, z) (k=1\sim m+n)$ 代表距离光纤输入端 z 处前向或后向传输的信号光和抽运光功率,

$$g_{jk} = \begin{cases} \frac{1}{A_{\text{eff}}} g_{\nu_j}(\nu_j - \nu_k), & \nu_j > \nu_k \\ -\frac{1}{A_{\text{eff}}} \frac{\nu_k}{\nu_j} g_{\nu_k}(\nu_k - \nu_j), & \nu_j < \nu_k \end{cases} \quad (4)$$

式中 $g_{\nu_j}(\Delta\nu)$ 代表抽运光频率为 ν_j , 信号、抽运光频率差为 $\Delta\nu$ 时的拉曼增益系数。

$$g_{\nu_j}(\Delta\nu) = g_R(\Delta\nu) \cdot \nu_i / \nu_0,$$

$g_R(\Delta\nu)$ 是在抽运光频率为 ν_0 时测得的拉曼增益谱。初始条件为

$$P_f(\nu_k, 0) = P_{\text{input}}^f(\nu_k), \quad P_b(\nu_k, L) = P_{\text{input}}^b(\nu_k),$$

$k=1\sim m+n$, 假设信号光仅前向传输,因此 $P_b(\nu_k, L) = 0 (k=1\sim m)$ 。由于初始条件分别在光纤的两端给出不便于用传统的微分方程的龙格-库塔法求解。为此假设放大器运行在非饱和放大条件下,先计算前后向抽运光功率的分布。由于(2) 式、(3) 式互相耦合,故首先忽略(3) 式中含 $P_f(\nu_k)$ 项,利用已知边界条件 $P_b(\nu_k, L) = P_{\text{input}}^b(\nu_k)$ 求解(3) 式得到后向抽运光功率沿光纤的分布 $P_b^0(\nu_k, z)$ 。利用此分布和已知边界条件 $P_f(\nu_k, 0) = P_{\text{input}}^f(\nu_k)$, 求解(2) 式后可得到前向抽运光功率沿光纤的分布 $P_f^0(\nu_k, z)$ 。利用 $P_f^0(\nu_k, z)$ 和已知边界条件 $P_b(\nu_k, L) = P_{\text{input}}^b(\nu_k)$ 再次求解(3) 式,可得到修正后的后向抽运功率沿光纤的分布 $P_b^1(\nu_k, z)$ 。再将

$P_b^i(\nu_k, z)$ 代入到(2)式可求得修正后的前向抽运功率分布 $P_f^i(\nu_k, z)$ 。这样反复迭代使计算结果逐渐自洽,直至 $P_{i,b}^i(\nu_k, z)$ 和 $P_{i,b}^{i+1}(\nu_k, z)$ 之差小于规定误差为止,从而得到非饱和放大下前后向抽运光功率的分布 $P_{i,b}^i(\nu_k, z)$ ($k = m+1 \sim m+n$)。再将此结果和信号输入功率 $P_f(\nu_k, 0) = P_{input}^i(\nu_k)$ ($k = 1 \sim m$) 代入(2)式求解,得到信号功率的分布 $P_f^i(\nu_k, z)$ ($k = 1 \sim m$)。如果信道数较多,对抽运功率产生明显的耗尽,则需要对此结果加以修正。同样采用反复迭代法直至结果自洽。该算法一般会很快收敛。在超宽带密集波分复用,由于抽运功率间的转移、信号对抽运功率的耗尽会非常显著,这样使得初始假定条件与实际情况差距较大,从而使循环次数增加,计算时间有所延长。但与直接采用

打靶法进行估算调整相比,该算法计算时间大大缩短。

2.2 放大自发辐射噪声功率和双重瑞利散射噪声功率的计算

自发拉曼散射产生的噪声光波在传输中不断得到放大,产生所谓的放大自发辐射噪声。信号光在光纤中传输时经历偶数次瑞利背向散射后会重新变为前向传输,由于受到延时,这部分光在探测器内会与信号非相干叠加,产生即所谓双重瑞利散射噪声^[8]。在光纤拉曼放大器中这两种噪声功率不仅与增益大小相关还与增益分布相关。将(1)式中的 $d\xi$ 替换为 $\Delta\nu$ ($\Delta\nu$ 即为数值计算的频率分辨力),由于放大自发辐射噪声和双重瑞利散射噪声功率较小,忽略它们间的受激拉曼散射和自发拉曼散射,从而得到

$$\begin{aligned} \pm dP_{ASE}^{i,b}(\nu_k, z)/dz = & -\alpha(\nu_k)P_{ASE}^{i,b}(\nu_k, z) + \gamma(\nu_k)P_{ASE}^{b,f}(\nu_k, z) + \\ & \sum_{j \neq k} g(\nu_k, \nu_j)[P_f(\nu_j, z) + P_b(\nu_j, z)]P_{ASE}^{i,b}(\nu_k, z) + \\ & \sum_{j \neq k} g(\nu_k, \nu_j)h\nu_k \Delta\nu \left[1 + \frac{1}{e^{h|\nu_j - \nu_k|/kT} - 1} \right] [P_f(\nu_j, z) + P_b(\nu_j, z)], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \pm dP_R^{i,b}(\nu_k, z)/dz = & -\alpha(\nu_k)P_R^{i,b}(\nu_k, z) + \gamma(\nu_k)P_f(\nu_k, z) + \gamma(\nu_k)P_R^{i,b}(\nu_k, z) + \\ & \sum_{j \neq k} g(\nu_k, \nu_j)[P_f(\nu_j, z) + P_b(\nu_j, z)]P_R^{i,b}(\nu_k, z), \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $P_{ASE}^{i,b}(\nu_k)$, $P_R^{i,b}(\nu_k)$ ($k = 1 \sim m$) 分别代表前、后传输的放大自发辐射噪声和瑞利散射噪声功率,对应前向或后向噪声光波(5)式、(6)式左边分别取“+”号或“-”号。(5)式右边第二项代表瑞利散射对放大自发辐射噪声的影响;第三项代表抽运光、信号光和放大自发辐射光间的受激拉曼散射;第四项代表抽运光和信号光的自发拉曼散射。(6)式右边第二项代表对信号的瑞利散射;第三项代表对瑞利散射光的再次瑞利散射;第四项代表抽运光、信号光和瑞利散射光间受激拉曼散射。由于描述前后向噪声光传输的方程相互耦合,可先忽略掉耦合项,利用前面得到的采用同解(2)式、(3)式一样的反复迭代法解(5)式、(6)式使得前后两次结果逐渐自洽,最后得到小于规定误差的计算结果。此时计算所得 $P_{ASE}^i(\nu_k, L)$ 考虑了瑞利散射对

放大自发辐射噪声的影响, $P_R^i(\nu_k, L)$ 即光纤输出端的双重瑞利散射噪声功率。

3 数值计算结果与分析

如图1所示:所用光纤为100 km标准单模光纤,衰减系数和瑞利散射系数在1550 nm处分别为0.2 dB/km和 $6 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ 。信道波长从1534~1567 nm,包含21个等间距信道,每个信道发射功率为0 dBm。抽运波长为1427 nm和1455 nm,从光纤两端输入。同波长前后抽运功率相同,不同波长的抽运功率采用优化比例(类似文献[9]中的优化算法)以保证尽可能平坦放大。信号光从光纤左端输入得到放大后由右端输出。如图2所示为开关增

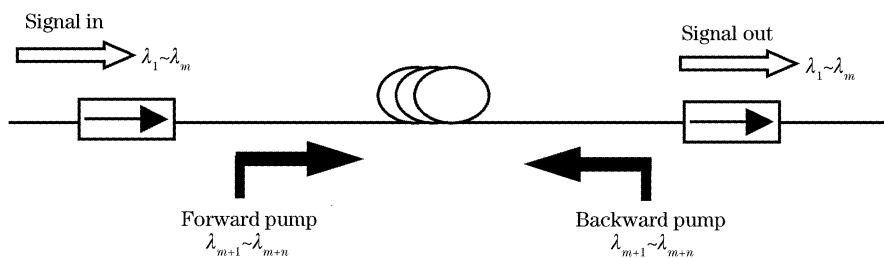


Fig. 1 Configuration of bidirectionally pumped fiber Raman amplifier

益为 20 dB 时计算得到不同抽运方向度 κ 下信道和抽运功率沿光纤的分布。由于对抽运功率进行了优化,除 $\kappa=1$ 的情况外光纤输出端所有信道增益差异在 1 dB 以内。从图 2 中可以明显看到抽运方向度对增益分布和信号功率分布的影响,因而可以推论抽运方向度也会对噪声功率和信号非线性失真的大

小产生影响。为了验证本模型和算法的可靠性,将图 2 的计算结果及噪声功率的计算结果同 VPIsystems 公司的光放大器设计软件的计算结果进行了比较,结果证实两种计算结果误差(定义为 $|r_{\text{proposed}} - r_{\text{VPI}}|/r_{\text{VPI}}$)在 0.1% 以内。

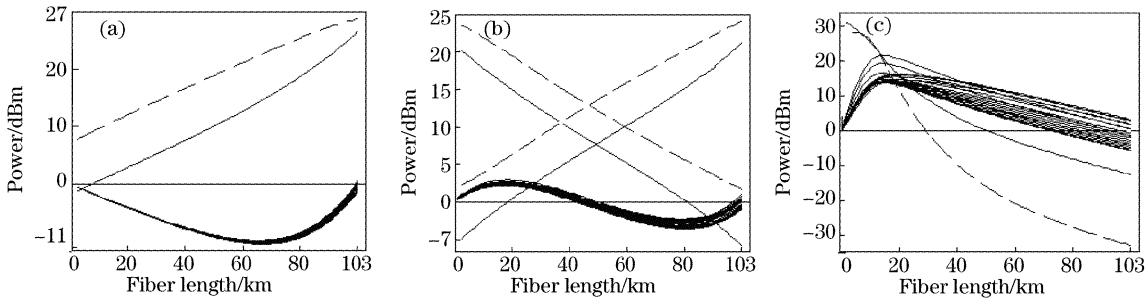


Fig. 2 Power distribution along the fiber for different pump directions (pump 1: dashed line, pump 2: solid line).
(a) $\kappa=0$, (b) $\kappa=50\%$, (c) $\kappa=100\%$

3.1 抽运方向度对多波长双向抽运拉曼光纤放大器噪声的影响

图 3 给出了利用第 2 节方法计算所得在增益分别为 8 dB、14 dB、20 dB 时信道平均放大自发辐射噪声和双重瑞利散射噪声功率随抽运方向度 κ 的变化。可见信道平均放大自发辐射噪声随着抽运方向度的增加而单调递减。但存在一个最佳的抽运方向度,在此值下信道平均双重瑞利散射噪声功率最低。从图 3 还可以看出总噪声功率在小增益情况下相对

抽运方向度单调下降,但随着增益的增加其变化曲线逐渐成为 U 字形。究其原因这是由于双重瑞利散射噪声功率相对抽运方向度的变化曲线始终成 U 字形,随着增益的增加双重瑞利散射噪声功率不断增加,导致这种变化趋势逐渐影响到总噪声的变化趋势,最终使得总噪声相对抽运方向度的变化曲线也成 U 字形。由此可以得出结论:不同增益下,存在的对应的最佳抽运方向度,在此抽运方式下多波长双向拉曼光纤放大器的总噪声功率达到最低。

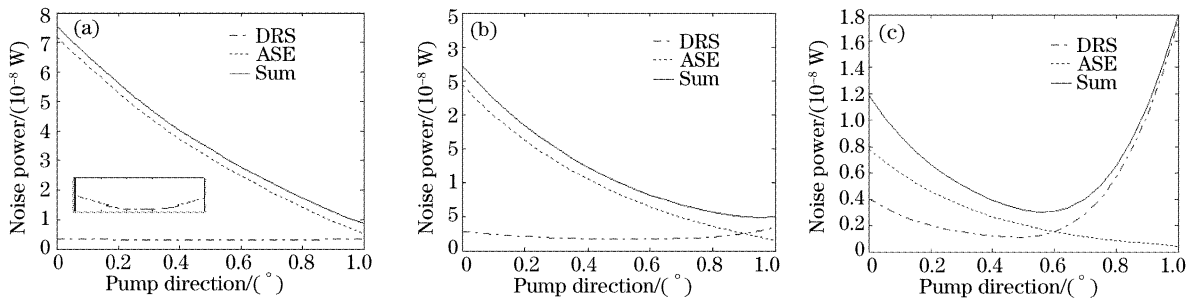


Fig. 3 Noise power against degree of pumping directionality. On-off gain (a) 8 dB, (b) 14 dB, (c) 20 dB

3.2 考虑信号非线性失真下抽运方向度的优化

光纤通信系统的性能还受到非线性效应的限制^[10]。因此在降低多波长双向抽运拉曼光纤放大器噪声的同时还必须考虑到信号非线性失真的影响。信道受到的非线性失真可以用积累非线性相位(integrated nonlinear phase, INP)来表示^[11]:

$$\phi(\nu_k) = \int_0^L \gamma(\nu_k, z) P(\nu_k, z) dz = \int_0^L \frac{2\pi n_2(z) \nu_k}{c A_{\text{eff}}} P(\nu_k, z) dz, \quad (7)$$

式中 c 为光速, n_2 为光纤的非线性折射率, $P(\nu_k, z)$ 为频率为 ν_k 的信道功率沿光纤的分布。若取 $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $A_{\text{eff}} = 80 \text{ } \mu\text{m}^2$, 则对应 1534 ~ 1567 nm 信号来说 $\gamma(\nu_k) = 1.33 \sim 1.30 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 。因此 $\gamma(\nu_k)$ 可以近似看作一个常量,此时信道平均积累非线性相位可写为

$$\bar{\phi} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \phi(\nu_k) = \frac{1}{m} \gamma \sum_{k=1}^m \int_0^L P(\nu_k, z) dz = \frac{1}{m} \gamma \sum_{k=1}^m P_{\text{av}}(\nu_k), \quad (8)$$

其中 $P_{av}(\nu_k) = \int_0^L P(\nu_k, z) dz$ 为信道(频率为 ν_k)的沿光纤的平均功率。

图 4 为增益分别为 20 dB, 14 dB 和 8 dB 下信道平均 $P_{av}(\nu_k)$ 随抽运方向度的变化曲线。可见随着增益和抽运方向度的增加信道的非线性失真也不断增加。

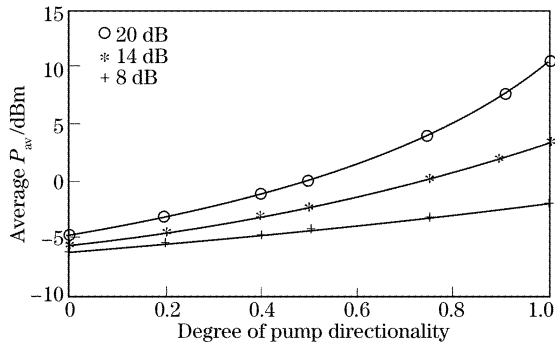


Fig. 4 Averaged P_{av} against degree of pumping directionality

在文献[5]中采用 $R_k = \frac{1}{\phi(\nu_k)} \frac{P_{sig}(\nu_k, L)}{P_{ASE}(\nu_k, L)}$ 来综合权衡光信噪比和非线性失真对多波长抽运拉曼光纤放大器性能的影响。为了将双重瑞利散射噪声考虑在内,定义

$$R'(\nu_k) = \frac{P_{sig}(\nu_k, L)}{P_{ASE}^f(\nu_k, L) + P_{DRS}^f(\nu_k, L)}, \quad (9)$$

$(k = 1 \sim m)$

采用
$$R = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{R'(\nu_k)}{\phi(\nu_k)}, \quad (10)$$

为优化指标对双向抽运方式进行优化。设后向抽运方式($\kappa = 1$)下计算所得 R 为 R_b 。图 5 给出了按 R_b 归一化后的 R 随抽运方向度的变化曲线。可见存在

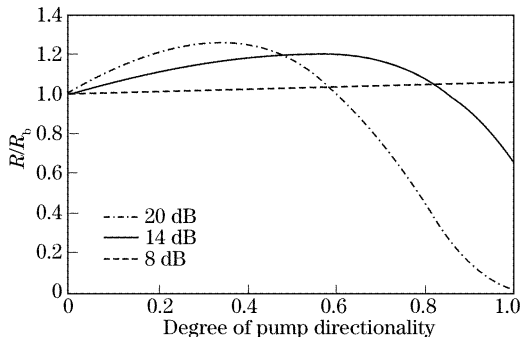


Fig. 5 Normalized R against degree of pumping directionality

明显的最优抽运方向度 κ 使得光信噪比和信号的非线性失真达到最佳平衡,在此抽运方向度下 R 的数值比后向抽运方式下显著提高。

结论 给出了多波双向抽运光纤拉曼放大器信号及噪声功率计算的新型实用数值模型和算法。通过对计算结果的分析发现存在一个最优的抽运方向度使得多波长抽运光纤拉曼放大器的总噪声最低。在最优的抽运方向度下多波长双向抽运方式不仅能保证对信号波段的平坦放大,其噪声及非线性失真综合性能也明显高于后向抽运方式。

参 考 文 献

- 1 Fludger C R S, Handerek V, Mears R J *et al.*. Pump to signal RIN transfer in Raman fibre amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(8): 1140~1148
- 2 Lin Q, Agrawal G P. Statistics of polarization-dependent gain in fiber-based Raman amplifiers. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4): 227~229
- 3 Winzer P J, Sherman K, Zirngibl M. Time-division multiplexed Raman pump experiment using a tunable c-band laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(6): 789~791
- 4 Kado S, Emori Y, Namiki S *et al.*. Broadband flat-noise Raman amplifier using low-noise bidirectionally pumping sources. *Opt. Commun.*, 2001, **6**(1): 38~39
- 5 Nissov M, Rottwitt K, Kidorf H D *et al.*. Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifiers. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12): 997~998
- 6 Kidorf H, Rottwitt K, Nissov M *et al.*. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(5): 530~532
- 7 Perlin V E, Winful H G. Optimizing the noise performance of broad-band WDM systems with distributed Raman amplification. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1199~1201
- 8 Mei Jinjie, Liu Deming, Huang Dexiu. Two novel methods for analyzing multipath interference in distributed fiber Raman amplifiers. *Chin. J. Lasers (中国激光)*, 2003, **30**(6): 537~540 (in Chinese)
- 9 He Jingsuo, Guo Tongwen, Lei Bo *et al.*. Optimal design of multiwave pumped fiber Raman amplifier with simplified model. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2003, **23**(7): 819~822 (in Chinese)
- 10 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. 3rd ed. San Diego, CA: Academic, 2001. 63~184
- 11 Hainberger R, Kumasako J, Nakamura K *et al.*. Optimum span configuration of Raman-amplifier dispersion-managed fibers. *Proc. OFC2001*, 2001. MI15 1~2