

文章编号: 0253-2239(2005)12-1634-5

用于光纤拉曼放大器抽运源的单级光纤拉曼激光器*

张敏明 刘德明 王 英 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 抽运光源是光纤拉曼放大器应用于密集波分复用系统的关键技术,设计了一种紧凑型的 808 nm 激光二极管抽运的基于钕酸钇($\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$)晶体 1342 nm 固体激光器模块,提出利用上述 1342 nm 固体激光器抽运基于光纤光栅的单级全光纤型拉曼谐振器获得 1.4 μm 激光输出的光纤拉曼激光器,分析了固体激光器的阈值特性、性能优化方法和单级光纤拉曼谐振器的设计方法。上述 1342 nm 固体激光器模块在抽运功率 2 W 时获得了最大 655 mW 的激光输出功率和 42.6% 的斜率效率,单级拉曼谐振器的 1342 nm 到 1.4 μm 光功率转换斜率效率达 75%,在 1425 nm、1438 nm、1455 nm 和 1490 nm 处的输出功率达到 300 mW 以上。最后给出基于 1.4 μm 光纤拉曼激光器抽运的宽带平坦放大的光纤拉曼放大器的结构参量和性能测试结果。

关键词: 非线性光学; 受激拉曼散射; $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 固体激光器; 拉曼谐振器; 光纤拉曼放大器

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Single-Stage Fiber Raman Lasers for Pumping Fiber Raman Amplifiers

Zhang Minming Liu Deming Wang Ying Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: The pumping source is the key technology of fiber Raman amplifiers applied in dense wavelength division multiplexing systems. A compact 1342 nm $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ diode-pumped solid state laser (DPSSL) module pumped by 808 nm laser diodes is developed. A single-stage 1.4 μm fiber Raman laser is constructed by pumping a single-stage fiber Raman resonator based on fiber Bragg gratings with such 1342 nm diode-pumped solid-state laser module. The threshold property, the optimized setup of the diode-pumped solid-state laser module and the design scheme of the single-stage fiber Raman resonator are analyzed respectively. The diode-pumped solid-state laser module is presented with the total laser power of 655 mW and the slope efficiency of 42.6% pumped by a 2 W 808 nm laser diode. The light power conversion slope efficiency of the single-stage fiber Raman resonator achieves 75% and the total laser power at 1425 nm, 1438 nm, 1455 nm and 1490 nm achieves 300 mW each. Finally, a broadband, flat-gain distributed fiber Raman amplifier pumped by such lasers is presented.

Key words: nonlinear optics; stimulated Raman scattering; $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ solid-state laser; Raman resonator; fiber Raman amplifier

1 引 言

光纤拉曼放大器(FRA)是利用强抽运光通过光纤传输产生受激拉曼散射(SRS)效应实现光放大。它具有许多优良的特性:如增益带宽很宽且增益波长仅依赖于抽运光波长;可以在原有光纤基础上直接扩容;可以与其他光纤放大器级联用于超宽带波分复用系统等。拉曼放大器是目前可实现工作在光纤低损耗窗口 1.2~1.6 μm 波段最理想的光放大器,对于密集波分复用(DWDM)超长距离光传

输技术开发与应用具有重要意义。

抽运源是获得具有更长的中继距离和更宽的增益带宽的光纤拉曼放大器的关键技术之一。随着制作工艺的不断改进,输出功率在 200~300 mW 的高功率 1.4 μm 激光二极管(LD)已广泛应用于商用光纤拉曼放大器中^[1]。激光二极管抽运光源具有稳定、可靠、体积小等优点,但相对昂贵的价格和有限的激光输出功率限制了它的应用范围。1993 年 Dianov 等^[2]首次利用 Nd:YAG 激光器抽运掺硅光纤实现了

* 国家 863 高技术研究发展计划(2002AA31228Z)资助课题。

作者简介:张敏明(1977~),男,江西人,华中科技大学光电子工程系博士研究生,主要从事非线性光纤光学、光纤放大器与激光器的研究。E-mail: mmz@hust.edu.cn

收稿日期:2004-12-28;收到修改稿日期:2005-06-09

级联拉曼振荡,获得了波长 $1.24 \mu\text{m}$ 的三级斯托克斯 (Stokes) 光,标志着第一台级联光纤拉曼激光器问世。此后,级联光纤拉曼激光器获得了快速发展,并成功运用于抽运光纤拉曼放大器和远距离抽运掺铒光纤放大器^[3,4]。近年来,多波长同时输出的光纤拉曼激光器已应用于放大器抽运光源并取得了迅速的进展^[5,6]。高功率、波长可调谐、可多波长输出等优点使得光纤拉曼激光器发展成为光纤拉曼放大器重要的抽运方式之一。同样的,一般的光纤拉曼激光器用作抽运源也有其固有的缺点,如较高的相对强度噪声 (RIN)、较低的转换效率和庞大的体积等。

本文描述了一种新型结构的光纤拉曼放大器的抽运激光器,该激光器由一个基于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体的 1342 nm 激光二极管抽运的固体激光器 (DPSSL) 和一个单级拉曼谐振器组成,具有高输出功率、灵活的波长配置和高转换效率等特点。其中模块化的 1342 nm 激光二极管抽运固体激光器采用 2 W 808 nm 激光二极管抽运,最大输出光功率为 655 mW ,斜率效率为 42.6% ;其输出激光经过一个特殊设计的、耦合效率达 80% 的尾纤型 C-lens 耦合注入后一级的拉曼谐振器。通过选择掺锗或掺磷非线性光纤以及合适的光纤光栅对可获得所需的 $1.4 \mu\text{m}$ 激光输出。基于上述激光器我们搭建了一个 C+L 带分布式光纤拉曼放大器,其平均拉曼开关增益大于 10 dB ,增益平坦度小于 1.1 dB ,等效噪声指数小于 -3 dB ,具有优越的分布放大性能。

2 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 固体激光器抽运的单级 $1.4 \mu\text{m}$ 光纤拉曼激光器

2.1 基于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体的激光二极管抽运固体激光器模块

Nd^{3+} 掺杂的激光工作物质是目前最为成熟的固体激光工作物质, Nd^{3+} 的荧光有三条较强的谱线, $1.06 \mu\text{m}$, $1.34 \mu\text{m}$ 及 $0.914 \mu\text{m}$,其中 $1.06 \mu\text{m}$ 具有最大的荧光分支比,但是随着基质的不同, Nd^{3+} 的吸收谱、荧光谱的线宽和各种荧光的分支比也会有所不同。在 Nd^{3+} 掺杂的激光工作物质中,YAG 晶体和 YVO_4 晶体是最成熟和实用化的基质材料。 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体相对于 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 具有掺杂浓度高、受激辐射截面大、吸收带宽、热传导系数较小等特性^[7,8],尤其适用于激光二极管抽运的情况。

为了满足实际应用的需要,我们设计了一个紧凑型的基于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体的激光二极管抽运固

体激光器模块,其结构示意图如图 1 所示。

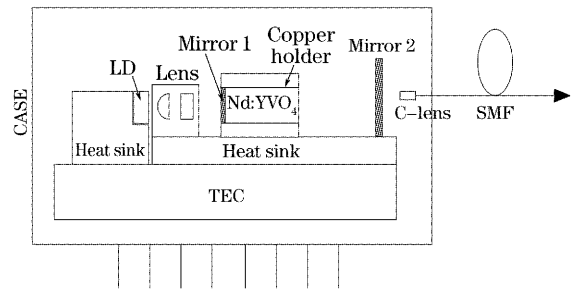


图 1 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 激光二极管抽运固体激光器模块结构原理图

Fig. 1 Layout of the $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ diode-pumped solid-state laser module

该模块采用的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体横截面为 $3.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$,厚度为 5.0 mm ,掺杂浓度为 1.0% 。谐振腔采用平-平腔以获得高质量的基模光输出,其中一个腔镜 (Mirror 1) 直接镀在晶体入射端面,另一个腔镜 (Mirror 2) 则镀在一个输出平面镜上。腔镜 1 对抽运激光透射率为 98% ,对 1342 nm 反射率为 99.9% ;输出镜对 1342 nm 反射率为 92% ;为抑制 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 中增益最强的 $1.06 \mu\text{m}$ 谱线激光,两个腔镜对该波长的透射率均大于 96% 。为减小热效应的影响,晶体通过一个环绕型紫铜热汇安装在制冷器 (TEC) 上。抽运激光二极管最大输出功率为 2 W ,中心波长为 808.5 nm ,半峰全宽 (FWHM) 为 1.5 nm 。抽运光经过一对透镜整形后聚焦成一直径约为 $400 \mu\text{m}$ 的光斑后注入晶体。

图 2 是腔长 50 mm 时不同抽运功率下的输出激光功率曲线。其中三角形点的曲线对应输出透射率 8% 的情况;圆点曲线则对应输出透射率 5% 的情况。从图中可以看出 5% 透射率的谐振腔具有更好

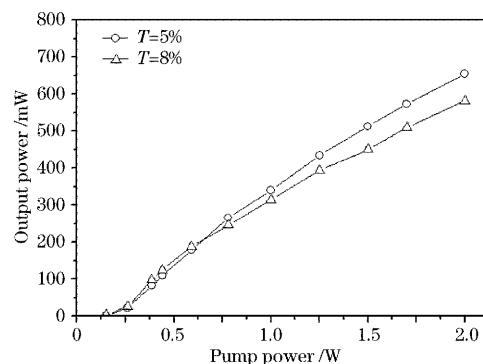


图 2 1342 nm $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 激光功率相对 808 nm 抽运激光功率曲线

Fig. 2 1342 nm $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ laser output power versus 808 nm pump power

的激光输出性能。其激光阈值约 230 mW,对应的斜率效率为 42.6%,光-光转换效率在抽运功率为 1.2 W 时达到最大,为 33.7%,当抽运功率继续增加时,激光器的光-光转换效率将因热透镜效应的影响而逐渐降低。在 808 nm 抽运功率达到最大 2 W 时,1342 nm 最大输出激光功率为 655 mW。输出激光经过一个特殊设计的尾纤型 C-lens 耦合注入后一级的拉曼谐振器,该 C-lens 在整个输出激光功率范围内的耦合效率可达到 80%以上。

端面抽运的激光器抽运功率阈值可表示为^[9]:

$$P_{th} = \frac{h\nu}{\sigma_n \tau \eta_p} \frac{\pi}{2} \frac{\delta}{2} (\omega_p^2 + \omega_s^2), \quad (1)$$

其中 $h\nu$ 为抽运光子能量, σ_n 为增益截面, τ 为 $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$ 晶体上能级粒子寿命, δ 为谐振腔损耗, η_p 为抽运量子效率, ω_p 和 ω_s 分别为抽运光斑直径和 TEM_{00} 模场直径。

谐振腔损耗可表示为^[9]

$$\delta = \eta_p \frac{\lambda_p}{\lambda_L} \frac{T}{\eta_s}, \quad (2)$$

其中 λ_p 和 λ_L 分别为抽运光波长和 $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$ 激光波长, T 为输出镜透射率, η_s 为斜率效率。

在我们的实验系统中, $T = 5\%$, $\eta_s = 42.6\%$, $\sigma_n = 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\tau = 95 \mu\text{s}$, $\lambda_p = 808.5 \text{ nm}$, $\lambda_L = 1342 \text{ nm}$ 且 $\omega_p \approx \omega_s \approx 0.4 \text{ mm}$ 。将上述参量代入 (1) 式, 计算得到理论抽运功率阈值为 183.9 mW, 非常接近实际测量的阈值功率 230 mW。这表明抽运光束与腔内激光模式匹配得很好。

2.2 单级 1.4 μm 光纤拉曼激光器

一般的 1.4 μm 光纤拉曼激光器采用 1100 nm 的掺钇包层抽运光纤激光器抽运一个 3~5 级的级联光纤拉曼谐振器来得到 1.4 μm 激光输出(如图 3 所示)。1100 nm 到 1.4 μm 的转换斜率效率一般为 30%~40%。在已报道的研究成果中, 掺磷光纤也会用作光纤拉曼以获得近 200 nm 宽的拉曼频移, 同时将级联级数降至 2~4 级^[4]。

本文中的光纤拉曼激光器如图 4 所示。因采用 1342 nm 固体激光器作为抽运, 整个激光器只需要单级拉曼谐振器就可获得需要的 1.4 μm 激光输出。我们可以根据具体的 1.4 μm 波长和拉曼频移量, 分别选择掺锗或掺磷光纤作为光纤拉曼。

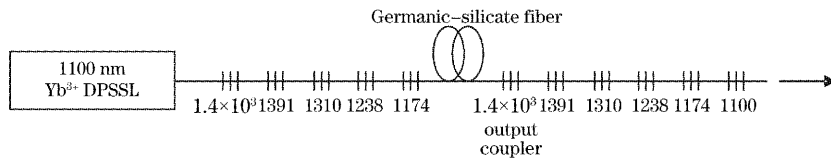


图 3 常规的多级拉曼谐振器的 1.4 μm 光纤拉曼激光器

Fig. 3 The common 1.4 μm fiber Raman laser with multi-stage cascaded Raman resonator

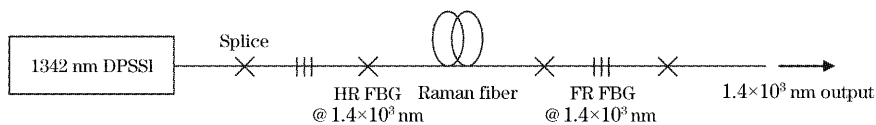


图 4 1342 nm 激光二极管抽运固体激光器抽运的单级 1.4 μm 光纤拉曼激光器

Fig. 4 Single stage 1.4 μm fiber Raman laser pumped by 1342 nm DPSSL

图 5 给出了上述光纤的归一化拉曼增益系数曲线。在我们的实验系统中, 采用高非线性掺锗光纤获得了 1425 nm 和 1438 nm 激光, 用掺磷光纤获得了 1455 nm 和 1490 nm 激光。最大输出功率分别为 336 mW、352 mW、318 mW 和 305 mW, 斜率效率分别为 80.7%、81.2%、76.2% 和 78.1%。

以 1425 nm 光纤拉曼激光器为例, 高非线性掺锗光纤长度为 200 m, 输出光纤光栅对激光波长反射率为 80%。图 6 是激光输出光谱, 图 7 是 1342 nm 不同抽运功率下的输出激光功率曲线。激光器抽运阈值为 227 mW, 最大输出功率为 336 mW, 斜率效率为

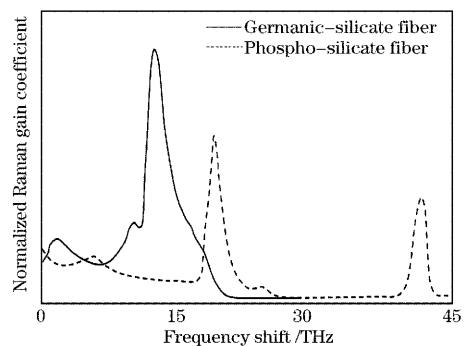


图 5 归一化的拉曼增益系数剖面

Fig. 5 Normalized Raman gain coefficient profile

80.7%，半峰全宽为 1.1 nm。

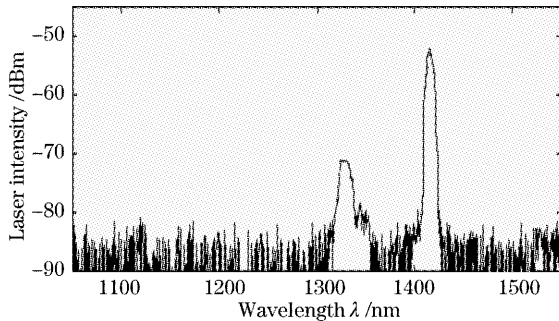


图 6 1425 nm 输出激光光谱

Fig. 6 Spectrum of the 1425 nm output laser

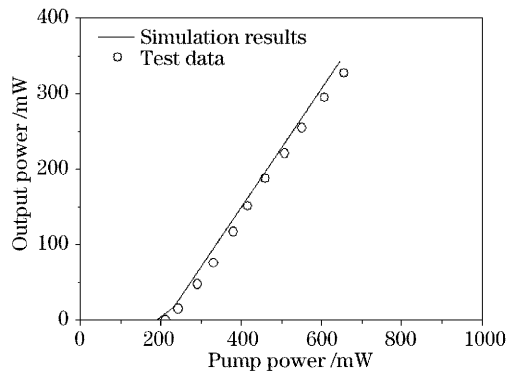


图 7 1425 nm 激光输出功率相对 1342 nm 抽运激光功率曲线

Fig. 7 The 1425 nm laser output power versus the 1342 nm pump power

3 分布式拉曼放大器实验

利用本文论述的单级光纤拉曼激光器，搭建了一个 C+L 带分布式光纤拉曼放大器^[1,10]，如图 8 所示。其中标准单模光纤长度为 100 km，光纤损耗

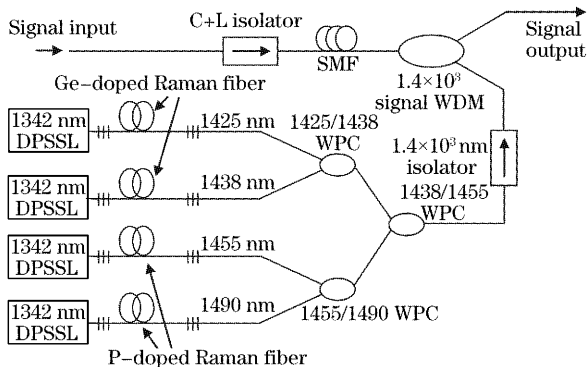


图 8 1.4 μm 光纤拉曼激光器抽运的 C+L 带分布式光纤拉曼放大器

Fig. 8 C+L band distributed fiber Raman amplifier pumped by four 1.4 μm fiber Raman lasers

在 1550 nm 处为 0.23 dB/km，在 1455 nm 处为 0.68 dB/km。放大器采用后向抽运方式。四个 1.4 μm 抽运激光器通过三个抽运合波器和一个波分复用器注入传输链路。

图 9 为拉曼增益曲线和等效噪声指数 (NF_{eff}) 曲线。其中圆点曲线和三角形点曲线分别是实际测试增益和等效噪声指数曲线；实线和虚线则分别是理论计算的增益和等效噪声指数曲线。四个抽运光纤拉曼激光器的中心波长分别是 1425 nm，1438 nm，1455 nm 和 1490 nm，抽运功率分别是 174 mW，123 mW，98 mW 和 155 mW。放大器平均拉曼开关增益大于 10 dB，增益平坦度小于 1.1 dB，增益带宽达到 90 nm。在仿真分析中^[11,12]，在传输光纤实测的归一化拉曼增益系数曲线的基础上，通过微调增益系数逼近实测拉曼开关增益的方法得到了精确的拉曼增益系数曲线。在单波长抽运的情况下，利用该曲线计算得到的拉曼开关增益与实测值可以精确吻合，其相对误差在 ±4% 以内。

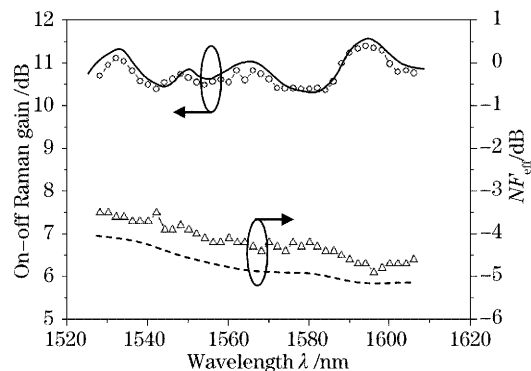


图 9 分布式光纤拉曼放大器的拉曼增益谱和有效噪声指数曲线

Fig. 9 Raman gain profiles and effective noise figure profiles of the distributed fiber Raman amplifier

4 结 论

本文描述了一种新型结构的光纤拉曼放大器抽运激光器，该激光器由一个基于 Nd:YVO₄ 晶体的 1342 nm 激光二极管抽运的固体激光器和一个单级拉曼谐振器组成，具有高输出功率、灵活的波长配置和高转换效率等特点。其中模块化的 1342 nm 激光二极管抽运固体激光器采用 2W 808 nm 激光二极管抽运，最大输出光功率为 655 mW，斜率效率为 42.6%；其输出激光经过一个特殊设计的、耦合效率达 80% 的尾纤型 C-lens 耦合注入后一级的拉曼谐振器。通过选择掺锗或掺磷非线性光纤以及合适的

光纤光栅对可获得所需的 $1.4 \mu\text{m}$ 激光输出,且从 1342 nm 到 $1.4 \mu\text{m}$ 的转换效率大于 75% ,最大激光功率高于 300 mW 。基于上述激光器我们搭建了一个 C+L 带分布式光纤拉曼放大器,其平均拉曼开关增益大于 10 dB ,增益平坦度小于 1.1 dB ,等效噪声指数小于 -3.1 dB ,具有优越的分布放大性能。

参 考 文 献

- 1 Shu Namiki, Yoshihiro Emori. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 2001, **7**(1): 3~16
- 2 Zhou Jun, Lou Qihong, Li Tiejun *et al.*. High power fiber lasers for Raman amplification[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2000, **39**(8): 40~46 (in Chinese)
周 军,楼祺洪,李铁军 等. 用于光纤拉曼放大的高功率光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2000, **39**(8): 40~46
- 3 S. V. Chernikov, Y. Zhu, R. Kashyap *et al.*. High-gain, monolithic, cascaded fiber Raman amplifier operating at $1.3 \mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(6): 472~473
- 4 Z. Xiong, N. Moore, Z. G. Li *et al.*. 10-W Raman fiber lasers at 1248 nm using phosphosilicate fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2377~2381
- 5 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
- 6 Do Ti Chang, Dong Sung Lim, Min Yong Jeon *et al.*. Cascaded Raman fiber laser for stable dual-wavelength operation [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(12): 740~741
- 7 Gilles Feugnet, Claude Bussac, Christian Larat. High-efficiency TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser longitudinally pumped by a high-power array[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(3): 157~159
- 8 Kintz G J, Baer T. Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(9): 1457~1459
- 9 T. Y. Fan, M. R. Kokta. End-pumped Nd:LaF₃ and Nd:LaMgAl₁₁O₁₉ lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(8): 1845~1849
- 10 Seung Kwan Kim, Sun Hyok Chang, Jin Soo Han *et al.*. Distributed fiber Raman amplifiers with localized loss [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1286~1293
- 11 Victor E. Perlin, Herbert G. Winful. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **20**(2): 250~254
- 12 Minming Zhang, Deming 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