

文章编号: 0258-7025(2003)10-912-05

Raman+ EDFA 混合宽带放大器增益谱 优化的高效算法

童 治, 魏 淮, 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 采用遗传算法对 Raman+ EDFA 混合放大器的增益谱进行了优化, 根据二能级近似的 EDFA 模型及 Raman 功率耦合方程获得了简洁的适应度函数形式, 可以在短时间内获得最优的放大器参数。计算表明, 通过选择合适的拉曼抽运波长和抽运功率以及 EDFA 的平均反转度, 仅用三个抽运源反向抽运的分布拉曼放大器加 C 波段 EDFA 就可以获得在 1542~ 1602 nm 共 60 nm 带宽上最大增益波动小于 1 dB 的平坦增益谱而无需额外的平坦滤波器。并对混合放大器的设计进行了讨论。

关键词 通信技术; 光纤拉曼放大器; 增益波动; 遗传算法; 掺铒光纤放大器; 混合放大器; 平均粒子反转度

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Novel Method to Optimize Hybrid Amplifiers Consisting of Distributed Raman Amplifiers and EDFAs

TONG Zhi, WEI Huai, JIAN Shu-sheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A novel method is proposed to optimize EDFA+ Raman hybrid amplifiers based on genetic algorithm in this paper, and a simple fitness function is achieved according to Giles two-level approximation equations and Raman power coupled equations. The calculated results show that a flat gain profile from 1542 to 1602 nm, with a maximum gain ripple less than 1 dB can be obtained without any gain flatten filter, by using only three Raman pump diodes with proper power and wavelength. And some useful design principles are discussed.

Key words communication technique; fiber Raman amplifiers; gain ripple; genetic algorithm; EDFAs; hybrid amplifiers; average population inversion

1 引 言

光通信技术的飞速发展和对带宽需求的不断增长导致了传统的 C 波段(1530~ 1570 nm) EDFA 的增益带宽已远远不能满足超高速大容量光通信系统的需要, 因此对于宽带光纤放大器, 特别是 C + L (1570~ 1610 nm) 波段放大器的研究在近几年受到了越来越多的重视和研究。目前对于 C + L 波段光纤放大器主要有三种实现技术: 1) 利用普通 C 波段 EDFA 及增益位移 EDFA 分段增益实现宽带放大。2) 利用多波长抽运的拉曼光纤放大器实现 C + L

波段的增益。3) 采用传统 EDFA+ 分布式拉曼混合放大结构实现宽带增益。这几种方案各有优势, 其中混合式放大器更是结合了 EDFA 与拉曼放大器的长处, 可以通过简单的结构获得较大的增益, 较平坦的增益谱和较大的频谱利用范围。文献[1]报道了采用混合式放大器的传输实验, 取得了理想的效果。

虽然混合式放大器具有很多的优点, 但关于它的模拟及参数优化分析的研究还非常少。目前报道的实验以及数值模拟结果都采用了平坦滤波器以获得较平坦的宽带增益谱^[2,3], 这不仅提高了成本而且引入了额外损耗。本文采用遗传算法对混合放大

收稿日期: 2002-06-07; 收到修改稿日期: 2002-07-17

作者简介: 童治(1977—), 男, 江苏高邮人, 北方交通大学光波技术研究所在读博士生, 主要从事光纤通信、光放大器方面的研究。E-mail: zhtong@center.njtu.edu.cn

器的输出增益谱进行优化, 计算结果表明, 完全可以不用滤波器, 只用三个具有合适波长及功率的拉曼抽运源配合适当反转度的 C 波段 EDFA 就可以实现在 1542~ 1602 nm 带宽上小于 1 dB 波动的平坦增益谱, 这无疑对混合放大器的设计和应用具有重要的指导意义。对于带有平坦滤波器的混合放大器也进行了优化, 指出在平坦滤波器的辅助下, 可以更好地发挥 EDFA 的高增益特点, 获得了 72 nm 带宽上大于 8 dB 的净增益和小于 0.8 dB 的波动。最后给出了一些设计上的结论。

2 理论模型及优化算法

为精确模拟混合式放大器的增益及噪声特性, 采用可靠有效的模型对 EDFA 及拉曼放大器分别进行计算。这里采用基于二能级均匀展宽近似的 Giles 方程^[4]对 C 波段 EDFA 进行模拟, 其稳态公式为

$$N_2(z) = \frac{\sum_k \frac{\alpha_k}{h\nu_k\xi} [P_k^+(z) + P_k^-(z)]}{1 + \sum_k \frac{\alpha_k + g_k}{h\nu_k\xi} [P_k^+(z) + P_k^-(z)]} \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_k^\pm}{dz} = [(\alpha_k + g_k)N_2 - (\alpha_k + l_k)] \cdot P_k^\pm(z) + 2h\nu_k \Delta\nu_k N_2 \quad (2)$$

上两式中, N_2 表示上下能级粒子反转比, $P_k^\pm(z)$ 表示掺铒光纤中正反向传输的光功率, k 代表不同频率的光波, h, ν_k 分别表示 Planck 常数和光频率, $\Delta\nu$ 是等效 ASE 带宽。 α, g, ξ, l 是 Giles 模型中最重要的 4 个参数, 分别是掺铒光纤的吸收系数、增益系数、饱和参数和本征损耗。本模型中, 我们认为掺铒光纤的掺杂半径小于模场半径, 因此可以忽略光场与掺杂区域的重叠积分的波长依赖关系, 简化计算过程。

对于分布式多波长抽运拉曼放大器采用了文献 [5] 的功率耦合方程进行模拟, 在模型中考虑了抽运到信号、抽运到抽运、信号到信号之间的拉曼增益过程, 还包括了双向自发辐射噪声的产生以及后向瑞利散射的增益过程。其具体形式如下

$$\frac{dP^\pm(z, \nu)}{dz} = \mp \alpha(\nu) P^\pm(z, \nu) \pm \gamma(\nu) P^\mp(z, \nu) \pm$$

$$P^\pm(z, \nu) \cdot \sum_{\xi < \nu} \frac{g_r(\nu - \xi)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}(\xi)} \cdot$$

$$[P^\pm(z, \xi) + P^\mp(z, \xi)] \mp$$

$$h\nu \sum_{\xi < \nu} \frac{g_r(\nu - \xi)}{A_{\text{eff}}(\xi)} [P^\pm(z, \xi) + P^\mp(z, \xi)] \cdot$$

$$\left[1 + \frac{1}{e^{h(\xi - \nu)/kT} - 1} \right] \Delta\nu \mp P^\pm(z, \nu) \cdot \sum_{\xi < \nu} \frac{\nu}{\xi} \cdot \frac{g_r(\nu - \xi)}{A_{\text{eff}}(\nu) K_{\text{eff}}} \cdot [P^\pm(z, \xi) + P^\mp(z, \xi)] \mp 2h\nu P^\pm(z, \nu) \cdot \sum_{\xi < \nu} \frac{g_r(\nu - \xi)}{A_{\text{eff}}} \cdot \left[1 + \frac{1}{e^{h(\xi - \nu)/kT} - 1} \right] \Delta\nu \quad (3)$$

(3) 式中, ν, ξ 分别代表信道(或抽运)的频率, $P^\pm(z, \nu)$ 代表正反向不同波长的功率, $\alpha(\nu)$ 和 $\gamma(\nu)$ 分别为不同波长处的光纤损耗和后向瑞利散射系数, h, k, T 分别为 Planck 常数, Boltzman 常数和开氏温度, 而 $\Delta\nu$ 代表等效自发辐射带宽。另外 K_{eff} 是抽运和信号之间的偏振因子, 由于采用普通光纤且传输距离很长, 可以认为抽运和信号间偏振混乱, $K_{\text{eff}} = 2$ 。最后, $g_r(\nu - \xi)$ 为短波长到长波长的拉曼增益系数, 与两波长间的频率差和抽运波长有密切关系; $A_{\text{eff}}(\nu)$ 表示不同频率处的有效面积, 可以用高斯模场分布来近似计算。公式(1)右边第二项描述瑞利散射的影响, 第四项描述了自发拉曼散射噪声和自发热噪声的产生, 最后两项考虑了抽运(或信号)的拉曼消耗。需要指出的是, 由于拉曼放大器的宽带增益谱和很宽的抽运波长范围, 为了尽量减小模拟的误差, 应当将(1)中的每个参量都与频率建立关系, 否则会导致较大的误差。

这里所要进行的增益谱优化就是要选择合适的拉曼放大器和 EDFA 参数, 如拉曼放大器的抽运个数、抽运波长、抽运功率以及 EDFA 的掺铒光纤长度和抽运功率等, 以获得在较宽增益范围内的平坦增益, 由于所要优化的问题是多参量、高度非线性的问题, 采用传统的基于导数的优化算法是很难得到最优解的, 甚至是无法优化的。这里选择遗传算法来优化混合放大器参数, 其通过模拟自然界生物竞争、繁殖的过程, 利用选择、交叉、变异等操作对目标进行优化, 具有搜索效率高, 收敛快, 适用于各种不可微、非确定性多项式(NP)难等问题的优点^[6]。利用遗传算法进行优化的关键是确定适应度函数, 这里我们很自然地采用输出增益谱的平坦度作为适应度函数, 但是如果直接求解(1), (2), (3)式则计算时间很长, 因此必须对适应度函数进行简化。

首先, 根据二能级均匀展宽模型, 在放大器饱和, ASE 可忽略的情况下, EDFA 各个信号波长的增益可以简化表示为

$$G_{k\text{EDFA}} = \exp\{[(\alpha_k + g_k) \cdot N_2 - (\alpha_k + l)] \cdot L_{\text{EDF}}\} \quad (4)$$

上式中 L_{EDF} 为掺铒光纤的长度, $N_2 = \frac{1}{L_{EDF}} \int N_2(z) dz$ 表示在掺铒光纤总长上的平均粒子反转数, 在信号功率和光纤长度确定的情况下可通过改变抽运功率来调节。其次, 对于多波长抽运拉曼放大器, 忽略 ASE 及多瑞利散射影响, 通过简单的推导, 其输出增益可表示为^[7]

$$G_{RAK} = \exp \left[\sum_{N_p} g_{rj, k} I_{pj} + \sum_{N_s} g_{sj, k} I_{sj} - \alpha_s L \right] \quad (5)$$

式中 $I_{pj} = \int_L P_{pj}(z) dz$, $I_{sj} = \int_L P_{sj}(z) dz$ 分别表示抽运和信号功率沿传输光纤的功率积分, N_p, N_s 则表示抽运和信号的个数。由此可见, 只要给定 N_2, L_{EDF}, I_p, I_s 参数即可得到输出增益谱, 从而实现简化的适应度函数表达。给定上述 4 个参数的取值范围(为找到理想的优化结果, 取值范围可适当放大, 如 I_p, I_s 可以在 $[0, 10 \text{ W}]$ 的范围内搜索), 利用基因算法的搜索流程可以获得优化的参数。需要指出的是, 得到了平均反转粒子数和功率积分后, 还需要通过数值方法利用 (1)~ (3) 式推出相对应的 EDFA 抽运功率和各个 Raman 抽运源的功率。为了获得精确的结果, 需要对所得的参数进行多次迭代直至收敛。

最后给出了在计算中所采用的主要数据。对于拉曼放大器, 采用文献[8]的 g_r/A_{eff} 的测量数据, 如图 1, 光纤参数为 Corning 的 SMF-28 的典型参数, 光纤长度 60 km。在 1.55 μm 的损耗为 0.2 dB, 在 1.45 μm 的损耗为 0.24 dB。瑞利散射系数在 1.6 μm 波长时为 $5.8 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ 。这里采用反向抽运的结构以减小抽运波动对信号造成的串话影响。而对于 EDFA, 其吸收系数和增益系数曲线如图 2, 掺铒光纤对 976 nm 抽运的吸收系数为 6.4 dB/m。饱和参数 $\xi = 3.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 本征损耗 $l = 0.01$

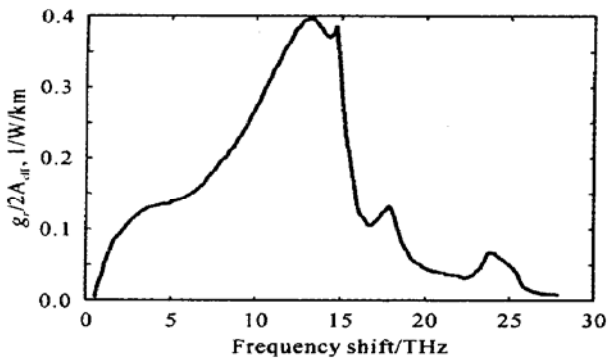


图 1 普通单模光纤使用 1.45 μm 抽运波长在不同频移处的 Raman 增益系数 $g_r/2A_{eff}$

Fig. 1 Raman gain coefficient $g_r/2A_{eff}$ of SMF at different frequency shift using 1.45 μm pump

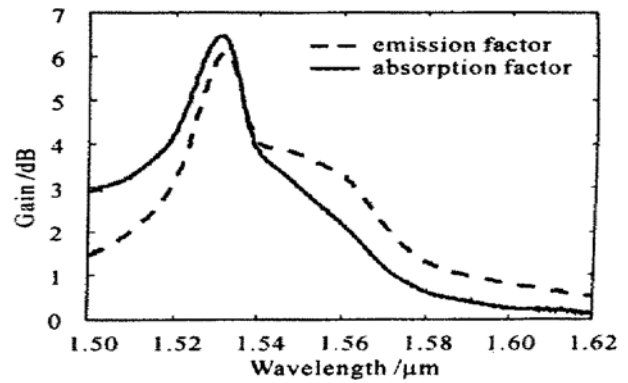


图 2 掺铒光纤放大器在不同波长处的吸收和发射系数
Fig. 2 EDFA absorption and emission factor versus wavelength

dB/m。为了精确地模拟 EDFA 的输出增益谱特性, 设置了 100 个信道, 信道频率范围从 196.72 THz 到 186.91 THz(相当于 1.525~ 1.605 μm), 信道间隔 100 GHz, 每信道入纤功率为 -10 dBm, 在这种情况下, 信道间的拉曼串扰也对输出增益谱有一定的影响, 在计算中必须考虑。

3 混合放大器的优化实例

EDFA+ 拉曼混合式放大器的结构如图 3 所示, 由一个分布式多波长反向抽运拉曼放大器及一个 C 波段 EDFA 组成, 所要达到的目标是获得在 C + L 波段大于 60 nm 的增益带宽上最大波动小于 1 dB 的平坦增益谱, 对此目标如上节所述用遗传算法进行了优化计算。由于 EDFA 在 1530 nm 附近具有本征的、比较陡峭的增益峰, 这一部分带宽很难只用少量的拉曼抽运源补偿平坦(采用平坦滤波器是比较好的方案), 因此可考虑带宽位于 1540 nm 以后。在本文中, 采用的是浮点型的遗传算法, 每次计算 200 代, 每代种群为 80, 如此反复迭代计算直到适应度达到要求。一次完整的优化过程在 PIII 1 GHz 计算机上只需要 1000 s 左右。通过计算, 发现完全可以不用平坦滤波器, 仅仅采用三个反向拉曼抽运源和一段较短的掺铒光纤就可以实现在 1540~ 1605 nm 带宽上小于 1 dB 波动的平坦增益谱, 净增益大于 1 dB(开关比增益大于 13 dB), 并且采用拉曼抽运源越多, 优化的自由度越大, 所获得的增益谱效果越好, 增益也越大。图 4 给出了不同拉曼抽运个数下在 1540~ 1602 nm 范围内对应的最小增益谱平坦度, 可见 3~ 4 个抽运源已经完全可以满足实际应用的需要。图 5 给出了采用三个拉曼抽运时

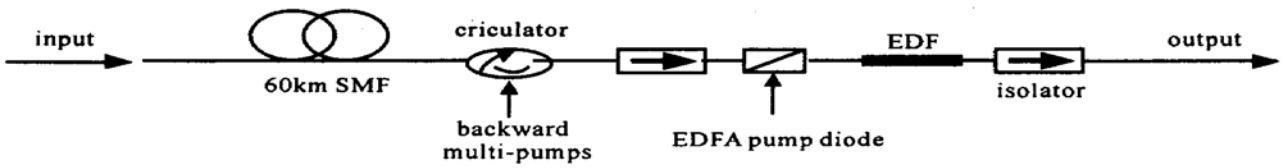


图 3 EDFA+ Raman 混合放大器的结构图

Fig. 3 Structure of EDFA+ Raman hybrid amplifiers

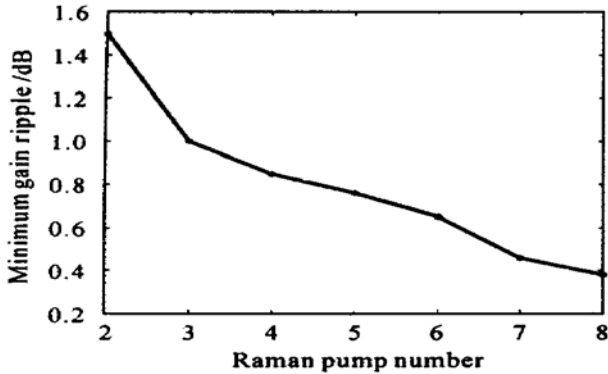


图 4 不同 Raman 抽运个数情况下由遗传算法优化的最小增益波动

Fig. 4 Genetic algorithm optimized minimum gain ripple versus Raman pump number

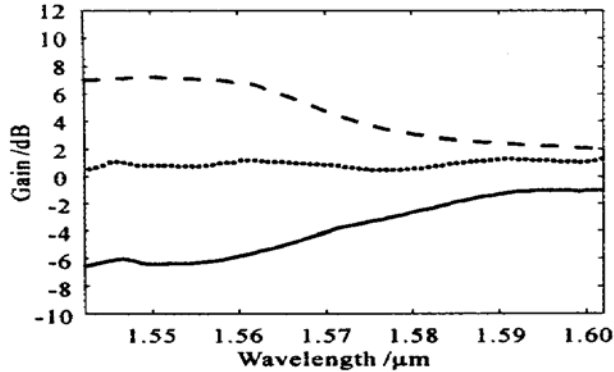


图 5 使用 3 个 Raman 抽运时用遗传算法优化得到的混合放大器增益以及 EDFA 和 Raman 的独立增益谱

Fig. 5 Genetic algorithm optimized Raman+ EDFA hybrid amplifier's gain spectra by using 3 pump diodes

—: Raman gain spectra; ----: EDFA gain spectra;: hybrid output gain spectra. EDFA pump power: 27.4 mW; EDF length: 4.45 m; Raman pump wavelength: 1437 nm, 1488 nm, 1500 nm; Raman pump power: 142.9 mW, 262.7 mW, 55.3 mW

的混合放大器优化输出增益谱, 需要指出的是为了保证总增益谱的平坦, EDFA 的增益不能很高, 否则拉曼增益谱的斜率不能很好地匹配 EDFA 的增益谱斜率。为了获得更高的增益, 需要提高 EDFA 的增益, 此时由于拉曼增益谱已无法补偿 EDFA 的增

益曲线, 必须采用平坦滤波器进行辅助。对于带有平坦滤波器的混合放大器的优化思路与前述一致, 只要将滤波器的损耗谱函数加入适应度函数中并对其参数一起优化即可, 关键是选择合适的滤波器函数。这里采用已经比较成熟的长周期光纤光栅作为平坦滤波器, 单个长周期光纤光栅的透射谱特性可以解析表示为

$$T = \cos^2(\sqrt{k_{01-0v}^2 + \delta^2}L) + \frac{1}{1 + (k_{01-0v}^2 + \delta^2)} \sin^2(\sqrt{k_{01-0v}^2 + \delta^2}L) \quad (6)$$

式中 L 为光栅的长度, δ 为相位失配度, k_{01-0v} 为基模和包层模间的互耦合系数, 参数的具体定义可参考文献[9]。利用多个不同的长周期光栅的透射谱叠加可以获得所需要的滤波特性, 而通过调节写入状态参数可以获得所需要透射特性的光栅^[10]。为了进一步扩大使用带宽, 可以用长周期光栅将 1530 nm 处 EDFA 的增益峰也进行平坦。图 6 给出了采用两组级联长周期光栅滤波后四个拉曼抽运源的输

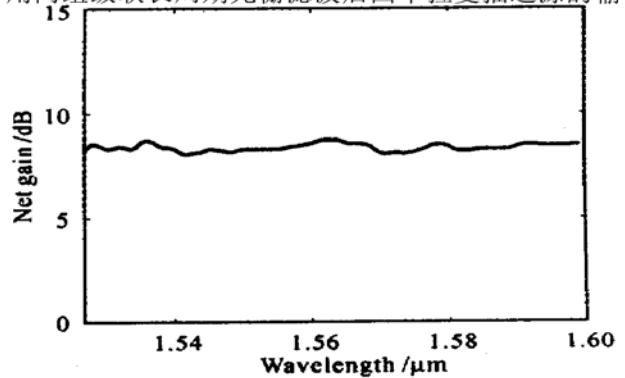


图 6 使用 4 个 Raman 抽运以及长周期光栅平坦滤波器后优化得到的输出增益谱

Fig. 6 Optimized output gain profile by using 4 Raman pump diodes and long-period grating gain equalization filter

EDFA pump power: 150 mW; EDF length: 6 m; Raman pump wavelength: 1430 nm, 1465 nm, 1486 nm, 1495 nm; Raman pump power: 230 mW, 90 mW, 158 mW, 200 mW; LPG peak wavelength: 1530 nm, 1533 nm, 1562 nm; LPG peak loss: 2.2 dB, 2.2 dB, 1.4 dB

出优化增益谱,其增益带宽已扩展到 72 nm(1528~1600 nm),净增益大于 8 dB(开关比增益大于 20 dB),最大增益波动小于 0.8 dB。

综上所述,在实际设计中,应当根据具体要求选择实现方案,对于要求增益不大、成本较低的系统,推荐采用第一种方案;而对于要求增益余量较大的情况则应当采用带平坦滤波器的结构充分利用 EDFA 的增益优势。

4 结 论

采用遗传算法对混合放大器的增益谱特性进行了优化,根据二能级近似的 Giles 方程及 Raman 功率耦合方程对适应度函数进行了简化,建立了一套高效的优化算法。计算表明,通过选择合适的拉曼抽运波长和功率以及 EDFA 的平均反转度,完全可以不采用平坦滤波器就可以获得宽带平坦的输出增益谱。如果要求较大的增益,则在提高 EDFA 增益的同时必须采用平坦滤波器辅助,可以获得大于 8dB 的净增益,并且可用带宽可以进一步扩大到 72 nm。

参 考 文 献

- 1 H. Masuda, K. Shingo. Wide-band and gain-flattened hybrid fiber amplifiers consisting of an EDFA and a multiwavelength pumped Raman amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 647~ 649
- 2 M. Karasek, M. Menif, A. Bellemare. Design of wideband hybrid amplifiers for local area networks [J]. *IEE Proc. Opto-Electronics*, 2001, **148**(3): 150~ 155
- 3 H. Masuda, S. Kawai, K. Aida. Ultra-wideband hybrid amplifier comprising distributed Raman amplifier and erbium doped fibre amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1342~ 1343
- 4 C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271 ~ 282
- 5 H. Kidorf, S. Rottwitt, M. Nissov *et al.*. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(5): 530~ 532
- 6 Z. Michalewics. Genetic Algorithm + Data Structure = Evolution Programs [M]. New York: Springer-Verlag, 1992
- 7 V. E. Perlin, H. Winful. Optimal design of flat-gain wideband fiber Raman amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 250~ 254
- 8 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
- 9 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~ 1294
- 10 Zhi Tong, Huai Wei, Muguang Wang *et al.*. Study on long period fiber gratings in H₂-loaded fiber [C]. *SPIE*, 2001, **4579**: 146~ 150