

# 宽带喇曼/EDFA 混合放大器的优化设计

常建华<sup>1,2</sup> 孙小菡<sup>1</sup> 张明德<sup>1</sup>

(1 东南大学电子工程系, 南京 210096)

(2 南京信息工程大学电子系, 南京 210044)

**摘要** 采用改进的模拟退火算法对 Raman/EDFA 混合放大器的增益谱进行了优化, 根据 EDFA 及 Raman 的功率传播方程获得了简洁的目标函数. 通过对模拟退火算法几个优化环节的改进, 使其能够更快速地应用于 Raman/EDFA 的多峰值问题的优化设计, 可以在短时间内获得最优的放大器参量. 计算结果表明选择合适的喇曼抽运波长和抽运功率, 仅用 4 个反向抽运的分布式喇曼放大器加 C 波段的 EDFA 就可以获得 C+L 波段约 70 nm 的带宽、开关增益达到 15 dB、最大增益波动小于 1.2 dB 的平坦增益谱, 而且无需额外的平坦滤波器.

**关键词** Raman/EDFA 混合放大器; 改进的模拟退火算法 (ISAA); 噪音指数 (NF)

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## 0 引言

随着现代通信业的发展, 需要交换的信息量成指数增长, 这就要求通信系统具备更高的传输容量, 即通信线路要具备更大<sup>[1]</sup>的带宽, 增加带宽有两种方法: 一是完全由光纤喇曼放大器 (FRA) 实现, 通过多泵浦的复用达到宽带放大的目的, 泵浦越多则带宽越大, 但泵浦数目的增多又给其实际应用带来了困难, 它不仅提高了系统成本, 同时使泵浦复用变得更加复杂. 另一种方法是利用已经成熟的掺铒光纤放大器 (EDFA) 技术, 将 FRA 和 EDFA 相结合构成宽带放大器<sup>[1]</sup>, 这样不但可大大减少所需抽运数目, 而且可以无需增益均衡器. 近年来的研究表明, 将 FRA 和 EDFA 结合起来构成混合放大器可以获得更为平坦的增益谱, 从而提高系统的带宽, 改善光

信噪比 (OSNR). 本文通过对混合放大器的增益和噪音特性的分析和优化, 实现了宽频带内低噪音的放大特性.

## 1 理论模型及优化算法

利用数值法对 FRA 和 EDFA 的传输方程进行求解并分别画出它们的功率谱, 可以看出对单独的 EDFA 或泵浦数目较少情况下的 FRA 而言, 它们的带宽并不宽, 但是若对它们的增益谱进行叠加 (使其增益互补), 就可以获得宽得多的带宽. 当然要对 FRA 所用的泵浦选择合适的波长、功率以及 EDFA 的 EDF 的长度和抽运源的功率进行优化, 使它们的增益谱能有效配合, 以实现最大限度的带宽和平坦度. 用 FRA 和 EDFA 构造的混合宽带放大系统框图如图 1.

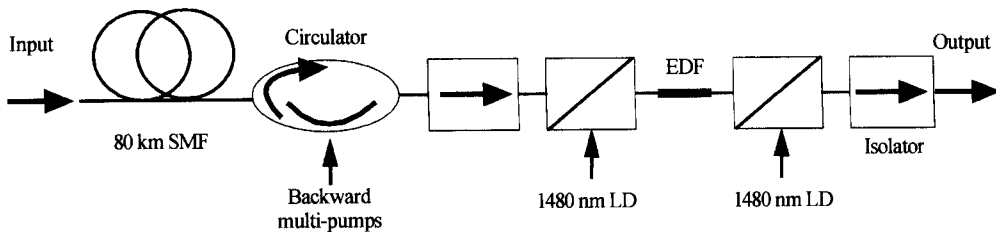


图 1 Raman/EDFA 混合放大器结构  
Fig. 1 Structure of Raman/EDFA hybrid amplifiers

### 1.1 FRA 的理论模型

分布式喇曼放大器的模型需综合考虑前后向的泵浦、信号和 ASE 噪音功率的分布, 其满足下面的方程<sup>[2,3]</sup>

$$\frac{dP^\pm(z, \nu_i)}{dz} = P^\pm(z, \nu_i) F(z, \nu_i) \quad (1a)$$

$$F(z, \nu_i) = \mp \alpha(\nu_i) \pm \eta(\nu_i) \mp \sum_{m=1}^{i-1} \frac{\nu_i}{\nu_m} \frac{g_R(\nu_i - \nu_m)}{\Gamma A_{eff}} \cdot [P^\pm(z, \nu_i) + P^\mp(z, \nu_i) + 2h\nu_i (1 + (e^{\frac{h(\nu_i - \nu_m)}{kT}} - 1))^{-1} \Delta\nu] \pm \sum_{m=i+1}^n \frac{g_R(\nu_m - \nu_i)}{\Gamma A_{eff}} [P^\pm(z, \nu_i) + P^\mp(z, \nu_i) + \frac{h\nu_i}{P^\pm(z, \nu_i)} (1 + (e^{\frac{h(\nu_m - \nu_i)}{kT}} - 1))^{-1} \Delta\nu] \quad (1b)$$

式中  $P^+(z, \nu_i)$  和  $P^-(z, \nu_i)$  分别表示在频率  $\nu_i$  附近很小带宽内的正向和反向传输光功率.  $\alpha, \eta, h, k, T$

分别表示光纤衰减系数、瑞利散射系数、普朗克常量、波尔兹曼常量和绝对温度.  $A_{\text{eff}}$  是光纤在频率  $\nu_m$  的有效面积,  $g_R$  是喇曼增益系数,  $\Gamma$  是偏振因子, 本文采用了龙格库塔法来进行求解<sup>[4,5]</sup>.

## 1.2 EDFA 的理论模型

迄今为止 EDFA 的所有建模方法是建立在传输方程和速率方程基础之上的. 这里采用同样的方法对 EDFA 进行分析研究. 对于 1480 nm 或者小于 1 W 的 980 nm 泵浦来说, 均匀展宽的两能级模型可以很精确地描述 EDFA 的增益和噪音特性. 依照频率等间隔的方式对光场进行取样, 在忽略激发态吸收(ESA)效应的条件下, 描述光功率沿掺铒光纤变化的传播方程可以表示为<sup>[6]</sup>

$$\pm \frac{dP_k^\pm}{dz} = [(\alpha_k + g_k^*)N_2 - (\alpha_k + l_k)]P_k^\pm + (2h\nu_k \Delta\nu_k g_k^*)N_2 \quad (3)$$

稳态条件下, 粒子数反转度的分布满足

$$N_2(z) = \frac{\sum_k \alpha_k [P_k^+(z) + P_k^-(z)] / (h\nu_k \xi)}{1 + \sum_k (\alpha_k + g_k^*) [P_k^+(z) + P_k^-(z)] / (h\nu_k \xi)} \quad (4)$$

式中,  $\alpha_k$ ,  $g_k^*$ ,  $l_k$  和  $\xi$  分别代表掺铒光纤的吸收系数、辐射系数、背景损耗和饱和参量; 粒子数反转度  $N_2(z)$  定义为上能级  $\text{Er}^{3+}$  离子的线密度和全部掺杂  $\text{Er}^{3+}$  离子的线密度之比;  $h$  是普朗克常量; 光功率  $P(z)$  上标的号代表光场沿掺铒光纤的传输方向; 下标  $k$  表示它对应的光信号中心频率为  $\nu_k$ ;  $\Delta\nu_k$  则是光场的取样频率带宽. 结合四阶龙格库塔法和打靶法可对式(3)和(4)进行求解<sup>[7]</sup>.

## 1.3 模拟退火优化算法

目前已有一些优化算法设计宽平坦增益谱的 FRA/EDFA 混合放大器, 其中绝大部分都是利用遗传算法(GA)优化其带宽. 遗传算法是将所求问题的解用二进制数码串表示, 然后基于“适者生存, 优胜劣汰”的进化论基本原则对其进行繁殖、交配、变异等遗传操作. 不断淘汰那些较差的解, 从而达到寻优目的. 相对而言利用模拟退火(SA)进行优化的研究比较少. 与前者比较, SA 更为简单, 且能够在全局范围内进行搜索而不容易落入局部最优解. 但是其优化速度受到初始“温度”影响较大, “温度”过高收敛速度很慢反之准确度偏低. 本文采用了改进的模拟退火算法来实现喇曼泵浦源的优化. 从两个方面作了改进, 一是对 SA 算法本身进行了改进, 比如退火方案、新解的产生机制以及迭代过程; 二是针对喇曼放大器的简化模型, 我们提出了新的目标函数. 从而使得退火算法的速度大为提高, 应用到光纤喇曼放大器的优化问题上取得了比较理想的结果<sup>[8]</sup>. 混合放大器的目标函数为

$$\text{ripple} = g_1 \frac{1}{G_{\text{expected}}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [G_{\text{expected}} - G(\nu_{si}, P)]^2} + g_2 \left( \frac{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}}{G_{\text{ave}}} \right) \quad (5)$$

式中  $g_1, g_2$  是权重,  $G_{\text{expected}}$  是期望的增益,  $G_{\text{max}}, G_{\text{min}}, G_{\text{ave}}$  分别是信号增益的最大值、最小值以及平均值.  $(G_{\text{max}} - G_{\text{min}})/G_{\text{ave}}$  即为相对增益波动.

## 2 混合放大器的优化设计

对于 EDFA 模型, 本文直接采用快速龙格库塔迭代算法求解其二能级均匀展宽模型; 对于 FRA 模型, 在忽略 ASE, 后向瑞利散射等因素可以得到文献[8]中的简化模型, 采用“广义损耗系数法”<sup>[9]</sup> 求解速度非常快, 无需采用文献[10]中给出“两步法”. 直接将 FRA 和 EDFA 的增益谱进行叠加其效果显然不能令人满意, 为了能获得大的带宽和足够平坦的增益谱, 需对 FRA 的增益谱进行整形使之与 EDFA 的增益谱“相配合.” 本文主要是针对四个后向泵浦的喇曼放大器进行优化, 固定 EDFA 的增益谱. 只要取得一组合适的泵浦功率及其相应的波长的配置, 就可以实现混合放大器的宽频带、高平坦度的增益谱. 仿真计算时 FRA 的参量为: WDM 信道间隔为 2 nm, 每信道的输入功率为 -30 dBm、在 80 km 光纤传输段中的损耗系数为 0.2 dB/km; EDFA 参量为: 前后泵浦均采用 1480 nm, 其中正向泵浦的功率为 30 mW, 反向泵浦功率为 60 mW, 所用掺铒光纤长度 6 m. 掺杂浓度为  $N_0 = 1.63 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ . 优化仿真的目标: 在 C+L 波段 70 nm 的增益带宽上的最大波动小于 2 dB 的平坦增益谱, 期望开关增益为 15 dB.

由于 EDFA 在 1530 nm 附近的有一个增益峰, 这一部分带宽是很难通过少量的抽运源补偿平坦<sup>[11]</sup>, 一般情况下在优化时人们都是考虑 1540 nm 以后的带宽. 本文采用改进的模拟退火算法, 用四个后向泵浦成功地平坦了 1530 nm 附近的本征峰, 实现了近 70 nm 的平坦增益谱, 且最大增益波动小于 1.2 dB. 图 2、3 给出了 EDFA 和 FRA 的独立增益谱, 图 4(a) 是混合放大器的优化输出谱线, 其优化的泵浦波长和功率分别为: 1411.56 nm(11.29 mW), 1440.69 nm(399.59 mW), 1460.32 nm(73.02 mW) 和 1490.17 nm(444.12 mW). 需要指出的是为了保证总增益谱线的平坦, EDFA 的增益不能很高, 否则喇曼增益谱的斜率不能很好地匹配 EDFA 的增益谱斜率. 如图 4(b), 当期望增益值设定为 20 dB 时, 优化增益谱曲线的平坦度明显降低, 增益波动超过了 3 dB. 因此为了获得更高的增益, 在提高

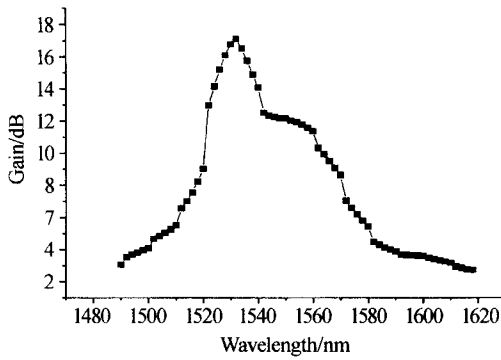


图 2 EDFA 的独立增益谱  
Fig. 2 Gain spectrum of EDFA

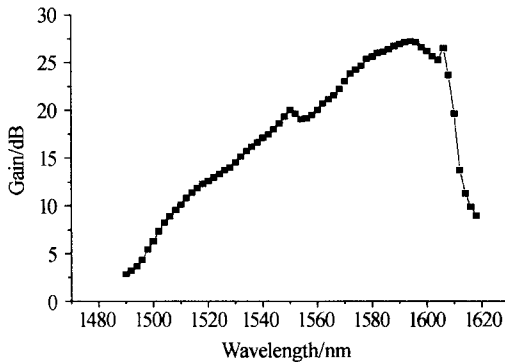


图 3 FRA 的独立增益谱  
Fig. 3 Gain spectrum of FRA

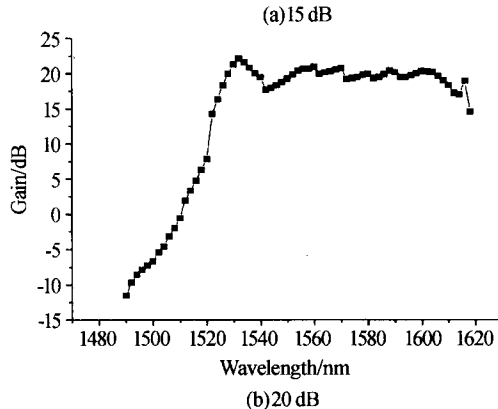
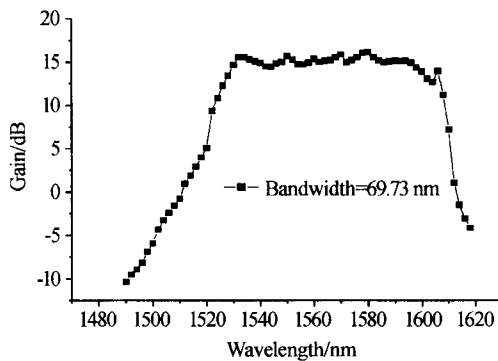


图 4 Raman/EDFA 混合增益谱  
Fig. 4 Gain spectrum of Raman/EDFA

EDFA 增益的同时喇曼增益谱已经无法补偿 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基本与前面的方法一致,只要将滤波器的损耗谱函数加入

优化目标函数中,一起参加优化即可.文献[11]给出了采用成熟的长周期光纤光栅作为平坦滤波器的透射谱函数及其优化结果.

在相同的仿真条件下,对采用三个后向泵浦的情形也进行了优化,结果如图 5.由图可以看出,虽然增益达到了 15 dB,增益波动同样小于 1.2 dB,但是增益带宽只有 62.31 nm.这充分说明了在相同增益、相同增益波动的情况下,随着泵浦数的增加增益谱带宽也随着增加.图 6 给出了三个后向泵浦功率沿传输光纤的分布,可以看出最短波长的功率并非最大,主要原因是本章优化的是混合放大器的增益谱,FRA 的增益谱本身并不平坦,而是与 EDFA 的谱正好形成互补.文献[11]采用遗传算法在 3 个泵浦时优化得到了 60 nm 的平坦增益带宽,与本文提出的模拟退火算法优化的结果基本一致.说明本文提出的方法优化的结果是比较准确的,这就为 EDFA/Raman 混合增益谱的优化设计提供了一种新的优化方案.

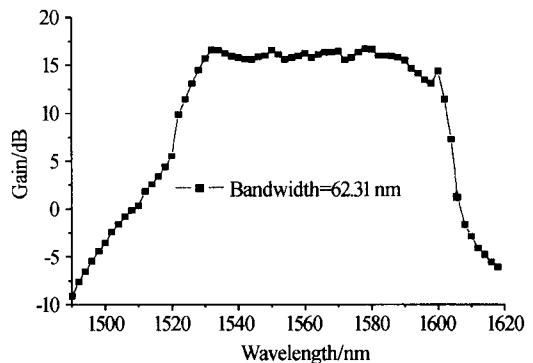


图 5 三泵浦混合放大器增益谱  
Fig. 5 Gain of the hybrid amplifier with 3 pumps

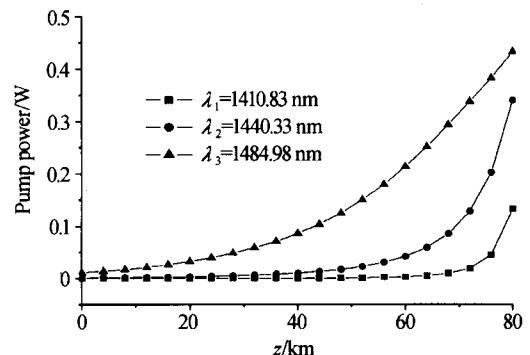


图 6 泵浦功率沿光纤分布  
Fig. 6 Evolutions of pump powers upon propagation through the fiber

光放大器的噪音特性一般用噪音系数(NF)来衡量.分布式喇曼放大器引入的 ASE 噪音与 EDFA 相比有很大程度的改善.一般情况下喇曼放大器的噪音系数很低,且由于它位于混合放大器的第一级放大,能够有效的改善放大器的噪音特性,从而提高系统的整体性能.噪音系数定义为放大器的

输入端信噪比和输出端信噪比的比值, 即  $NF = SNR_{in}/SNR_{out}$ , EDFA 的噪声系数可以用下式来表示

$$NF = \frac{1}{G} \left[ \frac{S_{ASE}^+(\nu_s, L)}{h\nu_s} + 1 \right] \quad (6)$$

式中,  $G$  是信号的增益,  $\nu_s$  是信号频率,  $h$  是普朗克常量,  $S_{ASE}^+(\nu_s, L)$  是在  $L$  处频率为  $\nu_s$  的 ASE 光功率谱密度. 类似的, FRA 的噪声系数也可以用上式来计算, 所不同的是 FRA 中的噪音主要来自于自发喇曼散射, 详细计算公式可以参见文献[11]. 对于不含增益均衡的混合放大系统, 整个噪声系数主要有两个部分组成<sup>[12]</sup>

$$NF_{\text{hybrid}} = NF_{\text{Raman}} + \frac{NF_{\text{EDFA}} - 1}{G_{\text{Raman}}} \quad (7)$$

$NF_{\text{hybrid}}$ ,  $NF_{\text{Raman}}$ ,  $NF_{\text{EDFA}}$  分别是混合放大器、Raman 和 EDFA 的噪声系数. 计算得到如图 7, 在整个增益平坦区内  $NF < 3.5$  dB. 图 8 给出了喇曼放大器的噪声系数谱, 很容易看出两条曲线基本相似, 所以混合放大器的噪声系数主要由前置的喇曼放大器决定. 因此, 通过加入前置喇曼放大器, 可以很好的改善整个混合放大器的噪音特性, 有利于提高整个系统的传输性能.

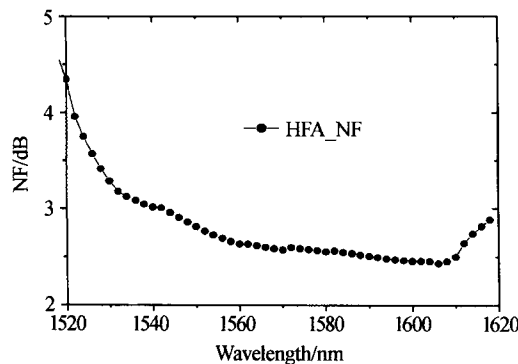


图 7 Raman/EDFA 噪声系数谱

Fig. 7 Noise figure of Raman/EDFA

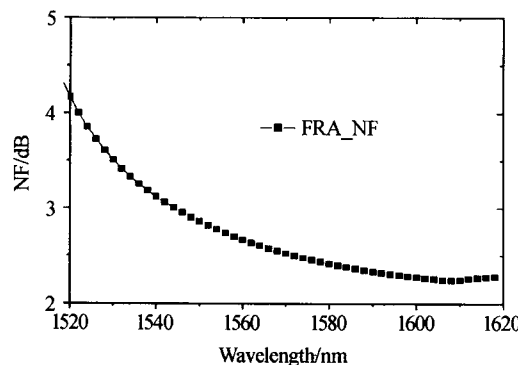


图 8 FRA 的噪声系数谱

Fig. 8 Noise figure of FRA

增益谱特性进行了优化, 根据 EDFA 和 FRA 功率耦合方程对目标函数进行了改进, 建立了一套高效的优化算法. 计算结果表明, 在固定 EDFA 增益谱的同时通过选择合适的喇曼抽运波长和功率完全可以不用采用平坦滤波器就可以实现宽平坦的输出增益谱, 同时噪音特性也有了较大的改善.

#### 参考文献

- Masuda H. Review of wide-band hybrid amplifiers. Washington D. C.: OFC2000, 2000
- Namiki S, Emori Y. Ultrabroad-band raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes. *IEEE J Selected Topics Quantum Electronics*, 2001, **7**(1): 3~16
- 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
- 陶在红, 常建华, 孙小菡, 等. 一种新颖的宽带光纤喇曼放大器的优化设计方法. *光子学报*, 2004, **33**(4): 435~438  
Tao Z H, Chang J H, Sun X H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 435~438
- Chang J H, Zhang M D, Sun X H. An improved calculation method for fiber raman amplifier equations with multiwavelength-pumping. *Chinese Optics Letters*, 2004, **2**(8): 441~444
- Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifier. *J Lightwave Technol*, 1991, **9**(2): 271~282
- Yamashita S, Nishihara M. L-band erbium-doped fiber amplifier incorporating an inline fiber grating laser. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2001, **7**(1): 44~48
- 常建华, 孙小菡, 张明德. 宽带喇曼放大器的快速优化设计方法. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1397~1400  
Chang J H, Sun X H, Zhang M D. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1397~1400
- Wang S H, Zhang L, Fan C C. Generalized attenuation coefficients and their application in counter-pumped fiber Raman amplifier simulation, *Communication Technology Proceedings*, 2000. WCC-ICCT 2000, **2**: 1550~1553
- Perlin V E, Winful H G. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifier. *J Lightwave Technol*, 2002, **20**(2): 250~254
- 童志, 魏淮, 简水生. Raman+EDFA 混合宽带放大器增益谱优化的高效算法. *中国激光*, 2003, **30**(10): 912~916  
Tong Z, Wei H, Jian S S. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(10): 912~916
- 陈健, 张巍, 刘小明, 等. Raman+EDFA 宽带混合光放大器的实现和设计优化. *电子学报*, 2002, **30**(9): 1302~1304  
Chen J, Zhang W, Liu X M, et al. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(9): 1302~1304

## 4 结论

采用改进的模拟退火算法首次对混合放大器的

## Optimal Design for Broad-band Raman/EDFA Hybrid Amplifier

Chang Jianhua<sup>1,2</sup>, Sun Xiaohan<sup>1</sup>, Zhang Mingde<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

<sup>2</sup> Department of Electronics, Nanjing Information Engineering University, Nanjing 210044

Received date: 2005-02-16

**Abstract** A novel method was proposed to optimize Raman/EDFA hybrid amplifiers based on an improved simulated annealing algorithm (ISAA) in this paper, and a simple object function was achieved according to power-coupled equations of erbium doped fiber Amplifier (EDFA) and fiber Raman Amplifier (FRA). The proposed ISAA can effectively solve the multimodal optimization including both global and local optima in the hybrid amplifier. Optimization results show that, under the conditions of the ON-OFF gain of 15 dB, an amplifier bandwidth at about 70 nm and the maximum gain ripple less than 1.2 dB have been achieved with 4 pumps by using the optimization of the ISAA. Comparing with other existing methods, the ISAA can attain a required low gain ripples and larger bandwidth without any gain flatten filter.

**Keywords** Raman/EDFA hybrid amplifier; Improved Simulated Annealing Algorithm (ISAA); Noise Figure (NF)



**Chang Jianhua** received his B. E. degree in 2000 from the Department of Electronic Engineering Southeast University, where he is currently working toward his Ph. D. degree. His research interests are high speed optical communication system, optical amplifiers and related topics.