

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0050-04

# 基于光子晶体光纤的分立式拉曼放大器

陶在红 常建华 武旭华

(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要** 主要研究了基于光子晶体光纤的宽带分立式拉曼放大器的优化设计方法。简化了多波长抽运宽带光纤拉曼放大器的传输方程, 得到优化设计的模型及目标函数。对传统的优化算法进行了改进, 提出了一种新的遗传模拟退火算法, 该算法同时利用遗传算法和模拟退火算法的优点。设计了两个分立式光纤拉曼放大器, 一个采用双波长抽运, 另一个采用四波长抽运。仿真结果表明, 光子晶体光纤可以用来设计成为短长度、高效的分立式光纤拉曼放大器。

**关键词** 光纤光学; 光纤拉曼放大器; 平坦增益带宽; 遗传模拟退火算法; 光子晶体光纤; 有效面积

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0050

## Discrete Optical Raman Amplifier Based on Photonic Crystal Fiber

Tao Zaihong Chang Jianhua Wu Xuhua

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information and Science Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract** The optical design method for the wide-band fiber Raman amplifier(FRA) based on photonic crystal fiber (PCF) is presented in this paper. Power coupled equations for a multi-wavelength broadband Raman amplifier are reasonably simplified, so a simple object function is proposed. Meanwhile a new algorithm called genetic and simulated annealing algorithm is proposed through improving on the conventional algorithm, which is more advantageous than using the genetic algorithm or simulated annealing algorithm respectively. Two FRAs are designed using two pumps and four pumps in this paper. The simulative results verify that PCF is perfect choice of a small-sized and efficient discrete FRA.

**Key words** fiber optics; fiber Raman amplifier; flattened gain bandwidth; genetic and simulated annealing algorithms; photonic crystal fiber; effective area

## 1 引言

目前宽带光放大器可归纳为三种: 半导体光放大器、稀土掺杂光纤放大器、光纤拉曼放大器(FRA)。其中 FRA 已成为宽带放大器中最有前景的竞争者, 可分为两类: 分布式 FRA 和分立式 FRA。分布式 FRA 具有分布式放大、长距离、无中继、低噪声等优点, 一般用于远程传输系统, 它所用的光纤增益介质比较短, 一般在十公里以内, 因此主要用于放大一些掺铒光纤放大器(EDFA)不能放大的特殊波长。分布式放大器的应用范围远远超过分立式放大器<sup>[1,2]</sup>。

光子晶体光纤(PCF)是一种由单一材料构成,

包层中具有微米量级空气孔结构的新型光纤<sup>[3,4]</sup>。PCF 的出现大大促进了分立式 FRA 的应用。由于 PCF 与传统光纤的结构不同, 决定了 PCF 具有传统光纤无可比拟的特性。光子晶体光纤通过改变空气孔的排列和大小来控制其光学特性, 包层是由波长量级的空气孔在二维方向上周期性排列形成的, 其光场能量高度局域集中, 有效面积只有传统光纤的几分之一, 因而每单位长度可提供比传统光纤高几十倍的拉曼增益系数。因此, 光子晶体光纤可以设计成为短长度、高效的分立式 FRA。

FRA 的主要优点就是它能对任意波长进行放大, 即对波分复用(WDW)系统的各个信道都能放

**基金项目**: 南京信息工程大学科研项目(QD60)和江苏省高校自然科学基金(08KJD510004)资助课题。

**作者简介**: 陶在红(1973—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事光通信的研究。E-mail: njtzh126@126.com

大。在实际应用中,各个信道的信号光应有同等的增益,所以光放大器增益平坦度是 WDM 系统设计中的一个重要参量。增益不一致不仅限制了光信噪比,也将导致各信道的功率不一致,增加复用输出端的串话。本文主要研究了基于光子晶体光纤的宽带分立式拉曼放大器平坦增益带宽的优化设计方法。简化了多波长抽运宽带拉曼放大器的传输方程,得到优化设计的模型及目标函数。对传统的优化算法进行了改进,提出了一种新的遗传模拟退火算法,通过对已报道的光子晶体光纤进行模拟计算,并将结果与基于传统光纤的分布式 FRA 进行比较和分析。

## 2 理论模型

在设计 WDM 系统的光纤放大器时,如何实现最好的增益平坦度是研究与设计的关键。目前主要采用两种方法<sup>[5]</sup>:一种是用 EDFA 与 FRA 相结合的方法;另一种是利用多波长抽运 FRA 的方法。本设计主要是研究多波长抽运 FRA 的宽平坦增益谱的优化设计算法。影响多波长宽带拉曼放大器性能的因素很多,主要是抽运光波长的分布与功率的大小。一个完备的多波长抽运的拉曼放大器的传输方程<sup>[6]</sup>包括拉曼增益、抽运波的损耗、瑞利散射、光纤损耗、自发拉曼散射噪声及温度噪声。但在设计拉曼放大器时,并不需考虑所有项,其中光纤损耗和增益项是很重要的。而瑞利散射变化不明显,噪声相对很小,所以这些项对放大器增益谱的形状影响不大。所以在不考虑瑞利散射和噪声的情况下,多波长抽运拉曼放大器的理论模型可简化为:

$$\frac{dP_{\nu}^{\pm}}{dz} = -\alpha_{\nu}P_{\nu}^{\pm} + P_{\nu}^{\pm} \sum_{\mu > \nu} \frac{g_{\mu\nu}}{K_{\text{eff}}A_{\text{eff}}} (P_{\mu}^{+} + P_{\mu}^{-}) - P_{\nu}^{\pm} \sum_{\mu < \nu} \frac{\nu}{\mu} \frac{g_{\nu\mu}}{K_{\text{eff}}A_{\text{eff}}} (P_{\mu}^{+} + P_{\mu}^{-}) \quad (1)$$

式中,  $\mu, \nu$  均为光频率,上标“+”与“-”分别表示前向与后向传输波,  $P_{\nu}$  是在频率  $\nu$  附近极小带宽内的光功率,  $\alpha_{\nu}$  为光纤的衰减系数,  $A_{\text{eff}}$  为光纤的有效面积,  $K_{\text{eff}}$  为偏振系数,  $g_{\mu\nu}$  为频率为  $\nu$  的光波在频率为  $\mu$  的光波的抽运下的拉曼增益。(1)式右边第一项表示光纤损耗,后面两项表示信号光与抽运光、信号光与信号光、抽运光与抽运光之间的拉曼增益。

拉曼放大器按抽运方式分三种结构:前向抽运、后向抽运和双向抽运。由于拉曼过程是瞬时发生,如果采用前向抽运,抽运噪声将严重地对 WDM 信道产生影响。当拉曼抽运功率有轻微的功率波

动,个别的数据位放大将出现异常,导致放大过程的波动。如果采用反向放大,拉曼抽运功率的波动就会被平均。另外,采用后向抽运的拉曼放大器的偏振态相关增益较小。所以本文设计的拉曼放大器采用多波长后向抽运。为了方便计算,假设有  $n$  个抽运波、 $m$  个信号波,且各个波的波长按升序排列,这样便可以得到一个新的方程:

$$\pm \frac{dP_k}{dz} = -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{jk}}{K_{\text{eff}}A_{\text{eff}}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{\nu_k}{\nu_j} \frac{g_{kj}}{K_{\text{eff}}A_{\text{eff}}} P_j P_k \quad k = 1, 2, \dots, n+m \quad (2)$$

平坦增益是针对信号光的,所以只对信号光求解。对(2)式两边进行积分便可得  $k$  通道的信号光的增益为:

$$G_k = \frac{P_k(L)}{P_k(0)} = \exp(-\alpha_k L + \sum_{j=1}^{n+m} g'_{jk} \int_0^L P_j dz) \quad k = n+1, \dots, n+m \quad (3)$$

式中,  $L$  为光纤长度,当  $j > k$  时,  $g'_{jk} = -\nu_k g_{kj} / (\nu_j A_{\text{eff}} K_{\text{eff}})$ 。当  $j < k$  时,  $g'_{jk} = g_{jk} / (K_{\text{eff}} A_{\text{eff}})$ 。对于多波长抽运拉曼放大器,常用开关增益来衡量其增益特性,定义为在放大器输出端增加抽运时的信号光的增加<sup>[7]</sup>,即

$$G_k = \frac{P_k(L)}{P_k(0) \exp(-\alpha_k L)} = \exp\left(\sum_{j=1}^{n+m} g'_{jk} \int_0^L P_j dz\right), \quad (4)$$

由于信号光的功率相对抽运光较小,所以信号光之间的相互作用可忽略不计,并记  $\int_0^L P_j dz = I_j$ ,

由(4)式可得

$$\sum_{j=1}^n g'_{jk} I_j = \lg(1/G_k). \quad (5)$$

对某一通道  $k$ , (5)式可看成是一个未知数个数为  $2n$  的方程,这样的方程是没有精确解的,所以必须采用数学的优化算法,找到一组最适合的解。于是把(5)式改写成

$$f = \sum_{j=1}^n g'_{jk} I_j - \lg(1/G) \quad (6)$$

(6)式便是优化 FRA 的目标函数,本文从这个目标函数出发,选择最佳优化算法来寻找一组最优解,即寻找最佳抽运光波长及其功率。

## 3 优化算法

对于目标函数,目前已有多种算法来进行优化,

其中最突出的便是利用遗传算法和模拟退火算法<sup>[8,9]</sup>。这两种算法在优化问题上是有区别的。遗传算法对整个自由度空间进行了非常彻底地搜索,计算灵活、效率也较高,但为了达到理想的精度,染色体的总数目需要很大,这样计算很费时,有时却不能得到最优解。模拟退火算法则可得到全局最优解,但该算法强烈地依赖退火速度和初试条件等参量,且固有的随机性使搜索的效率较低。在实际的应用中希望同时得到两者的优点,因此本文提出一种新的算法,即遗传模拟退火算法。

遗传模拟退火算法也是从一组随机产生的初始解开始全局最优解的搜索过程,它先通过遗传操作来产生一组新的个体,然后再独立地对所产生出各个个体进行模拟退火过程,以其结果作为下一代群体中的个体。该算法在优化设计多波长抽运 FRA 中应用的具体步骤:

1) 初始化。进化代数计数器初始化:  $t = 0$ 。给出初始化温度  $T_0$ 、温度终值  $T_{\text{end}}$ 、目标函数的阈值  $\epsilon$ 。

2) 随机产生初始群体  $P(t)$ 。

3) 评价群体  $P(t)$  的适应度。

4) 运用遗传算法的个体交叉操作和个体的变异操作,得  $P'(t)$ 。

5) 对  $P'(t)$  进行模拟退火算法,得  $P''(t)$ 。

6) 评价  $P''(t)$  的适应度。

7) 个体选择和复制操作,产生下一代  $P(t)$ 。

8) 终止条件判断。若不满足条件,继续进行进化。若满足终止条件,则输出结果。

该算法是在遗传算法中增加模拟退火算法,同时利用遗传算法和模拟退火算法的优点,使优化过程更优越、更快速。

## 4 计算结果及分析

按照遗传模拟算法对 PCF 进行了模拟计算。

选择 PCF 的参数为<sup>[10,11]</sup>:  $g_R = 3.28 (\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$ ,  $A_{\text{eff}} = 25 \mu\text{m}^2$ ,  $L = 6.5 \text{ km}$ , 偏振系数为  $K_{\text{eff}} = 2$ , 各信号光的输入功率为  $-3 \text{ dBm}$ , 采用 50 个信号通道, 通道间隔为 200 GHz, 光纤衰减系数为  $\alpha = 0.8 \text{ dB/km}$ 。根据以上的条件, 设计了一个具有四个抽运波的拉曼放大器系统和一个双抽运波的拉曼放大器系统, 经过计算可得信号光的净增益如图 1 所示, 图中所示的波长和功率即为所设计的抽运光的波长及功率。

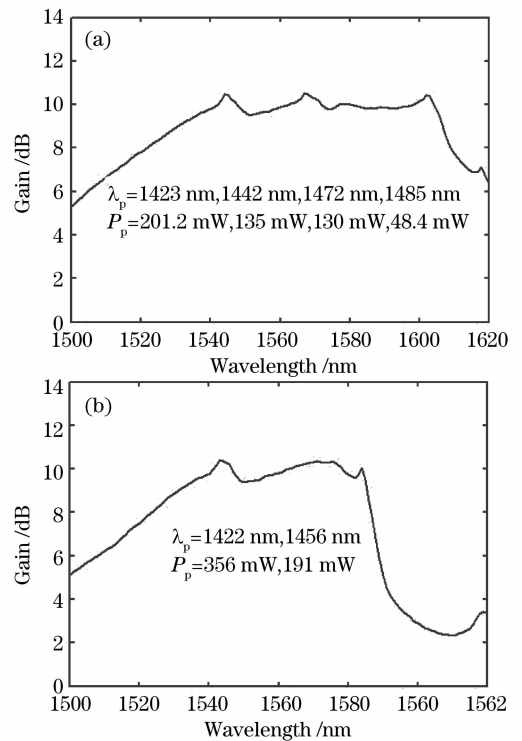


图 1 四抽运(a)和双抽运(b)拉曼净增益曲线  
Fig. 1 Raman net gain with four pump (a) and two pumps(b)

由图 1 可见,设计的两个系统都得到了比较好的平坦增益带宽,其增益不平坦度均小于 1 dB,都适合于 WDM 系统;具有四个抽运波的 FRA 系统的平坦增益带宽可达 80 nm,而具有二个抽运波的 FRA 系统的平坦增益带宽也达到了 50 nm。因此抽运波的个数越多,所得平坦增益带宽越宽,但是抽运个数越多,价格便会越高,计算量也越大。所以必须根据具体要求,选择合适的抽运个数,并在抽运个数一定的情况下,得到最好的优化结果。

为了比较 PCF 和传统光纤在光纤拉曼放大器应用中的不同,采用遗传模拟算法对传统光纤也进行了模拟计算,其拉曼增益分布及光纤损耗如图 2 所示,有效面积为  $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$ , 光纤长度  $L = 50 \text{ km}$ , 偏振系数为  $K_{\text{eff}} = 2$ , 入射条件同上述 PCF。计算结果如图 3 所示。

比较图 1,图 3 以及两类光纤的参量可见,利用 PCF 和传统光纤作为增益介质均可得到 80 nm 的平坦增益带宽,但在相同的入射条件下,由于光子晶体光纤具有较高的拉曼增益系数和较小的有效面积,故其在较短的距离能达到较高的增益,具有较好的效率。因此,光子晶体光纤是一种很好的分立式光纤拉曼放大器介质。

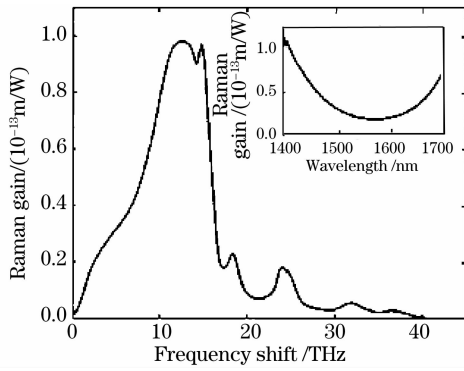


图2 增益曲线及光纤损耗(插图)

Fig.2 Raman gain spectrum and linear attenuation spectrum(Inset shows)

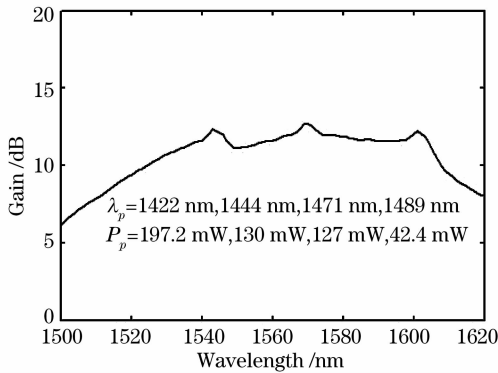


图3 传统光纤的拉曼净增益曲线

Fig.3 Raman net gain for conventional fiber

## 5 结 论

研究了基于光子晶体光纤的分立式光纤拉曼放大器的优化设计方法。在设计过程中,采用的光子晶体光纤的长度为 6.5 km,在抽运功率不是很高的情况下就得到了 9 dB 的净增益。而对于传统光纤,要得到 9 dB 的净增益,光纤长度至少为 50 km。目前 PCF 的损耗还很高,达到 0.8 dB/km。随着工艺水平的提高,PCF 的损耗可降到较低的水平,这样基于 PCF 的光纤拉曼放大器可得到更高的增益,使

光纤拉曼放大器的集成度进一步提高。提出的遗传模拟退火算法是优化 FRA 的一种有效的优化设计方法,该算法同时利用遗传算法和模拟退火算法的优点,使优化过程更优越,更快速

## 参 考 文 献

- 1 K. Rottwitz, J. H. Polsen. Analyzing the fundamental properties of Raman amplification in optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3597~3605
- 2 Xin Xiangjun, Yu Chongxiu, Zhang Ru *et al.*. The influence of configuration of Raman fiber amplifier on performance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 140~143.  
忻向军,余重秀,张茹等.拉曼光纤放大器结构对性能的影响[J].*光子学报*,2003,**32**(2):140~143
- 3 N. Florous, K. Saitoh, M. Koshiba. The role of artificial defects for engineering large effective mode area, flat chromatic dispersion, and low leakage losses in photonic crystal fibers towards high speed reconfigurable[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 912~913
- 4 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks. Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. *Science*, 1998, **282**(5393): 1476~1478
- 5 Mei Jinjie, Liu Deming, Huang Dexiu. Advances in research of wideband and gain-flattened fiber Raman amplifiers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, **22**(5):304~307  
梅进杰,刘德明,黄德修.宽带增益平坦光纤 RAMAN 放大器的研究进展[J].*半导体光电*,2001,**22**(5):304~308
- 6 Shu Namiki, Yoshihiro Emori. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2001, **7**(1): 3~16
- 7 Jake Bromage. Raman amplification for fiber communication systems[J]. *Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1):79~91
- 8 V. E. Perlin, H. G. Winful. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers[J]. *Lightwave Technol.*, 2002, **20**(3):250~254
- 9 P. C. Xiao, Q. J. Zeng, J. Huang *et al.*. A new optimal algorithm for multipump sources of distributed fiber Raman amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2):206~208
- 10 N. Yi, Z. Lei, A. Liang *et al.*. Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4):1516~1518
- 11 K. Suzuki, H. Kubota, S. Kawanishi *et al.*. High speed bi-directional polarization division multiplexed optical transmission in ultra low-loss polarization maintaining photonic crystal fiber [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(23): 1399~1401