

# 具有优良喇曼增益属性的新型非对称双芯光子晶体光纤

姜海明\*, 谢康, 王亚非

电子科技大学光电信息学院, 成都 610054

\* E-mail: [jianghm@uestc.edu.cn](mailto:jianghm@uestc.edu.cn)

收稿日期: 2008-11-06; 接受日期: 2009-02-13

国家自然科学基金(批准号: 60588502, 60607005, 60877033)、四川省科技攻关计划(批准号: 2006z02-010-3)和电子科技大学青年科技基金(批准号: JX0628)资助项目

**摘要** 提出了一种新型非对称双芯光子晶体光纤, 通过对其横截面结构的合理设计, 可以使该光子晶体光纤的喇曼增益系数  $g_R$  和其有效纤芯面积  $A_{\text{eff}}$  接近同步变化, 从而使其喇曼增益效率系数  $r_R = g_R/A_{\text{eff}}$  在一定的波长范围内接近常数, 进而可为增益谱平坦宽带光纤喇曼放大器提供优良的增益介质. 数值计算结果表明, 在 C 波段(1530~1565 nm)和 L 波段(1565~1625 nm), 该光子晶体光纤的喇曼增益效率系数  $r_R$  的波动率  $\Delta r_R$  分别约为 2.2% 和 5.7%.

**关键词**

喇曼增益  
光子晶体光纤  
有效纤芯面积  
喇曼放大器

在现代光纤通信系统中, 光纤的损耗使得光脉冲在传输过程中逐渐衰减变弱, 导致光纤通信系统误码率增加, 限制了光脉冲无中继传输的距离. 目前, 光纤的损耗系数已基本降低到了石英光纤的理论极限值, 如果没有光纤制造材料领域的研究突破, 其损耗值很难再进一步下降. 所以, 现代光纤通信系统中广泛采用光放大器来解决该问题. 在众多的光放大器中, 光纤喇曼放大器(fiber Raman amplifier, FRA)由于具有噪声系数低、增益波段灵活、可实现宽带放大等众多优点, 已成为现代波分复用(WDM)光纤通信系统的关键有源器件之一<sup>[1~3]</sup>. 尤其是近年来, 由于 FRA 泵浦激光器制造技术的成熟和传统掺铒光纤放大器(EDFA)在日益增长的光纤通信容量下所暴露出来的带宽和噪声等方面的局限性, FRA 已逐渐成为光放大器领域内的研究热点, 发表的相关文章和申请的专利数量逐年上升<sup>[4~6]</sup>.

但同时也应该注意到, 由于传统光纤的喇曼增益系数  $g_R$  非常不平坦, 如图 1 所示<sup>[7]</sup>, 并且其有效纤

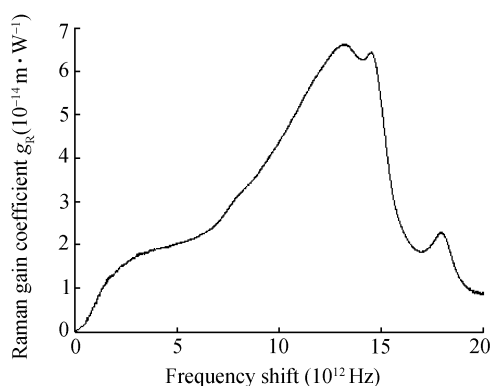


图 1 标准单模光纤的喇曼增益系数

芯面积  $A_{\text{eff}}$  基本不随波长变化, 所以其喇曼增益效率系数  $r_R = g_R/A_{\text{eff}}$  也同样非常不平坦, 进而导致当前的 FRA 存在着宽带增益谱难以平坦的重要缺陷. 目前, 广泛使用多个泵浦源同时泵浦的方式来解决该问题, 但由于光纤内同时存在着多路泵浦光和信号光非常复杂的非线性相互作用, 导致该方法需要用非常复杂的算法仔细地配置多个泵浦源的波长和功率<sup>[8~13]</sup>,

所以该方法大大增加 FRA 设计的复杂性, 同时多个泵浦源的使用也大大提高了 FRA 的制造成本. 为了解决上述问题, 作者提出了一种新型非对称双芯光子晶体光纤(ATC-PCF), 通过对该 ATC-PCF 横截面结构的合理设计, 使其有效纤芯面积  $A_{\text{eff}}$  随波长的变化与其喇曼增益系数  $g_R$  随波长的变化趋向同步, 从而使其喇曼增益效率系数  $r_R = g_R / A_{\text{eff}}$  变得平坦, 进而可为增益谱平坦宽带 FRA 提供优良的增益介质.

## 1 PCF 及等效折射率分析方法

PCF 又称为“多孔光纤”或“微结构光纤”, 最早是由 Russell 等人于 1992 年提出的, 并于 1996 年在英国南安普敦大学拉制成功世界上第一根 PCF<sup>[14]</sup>. PCF 有 2 种导光的机制, 分别是全内反射(total internal reflection, TIR)机制和光子带隙(photonic band gap, PBG)机制, 本文研究的是固体导光的 TIR 型 PCF.

目前已经存在多种 PCF 的分析方法, 例如等效折射率法<sup>[15]</sup>、多极法、平面波展开法等. 其中, 包层等效折射率法是广泛应用的重要方法之一, 该方法在空气填充率不是很高的情况下具有较好的精度, 同时该方法具有较明晰的物理意义.

下面简单介绍一下 PCF 的等效折射率模型. 如图 2(a)所示的 PCF, 其横截面可划分为由纯石英柱构成的半径为  $r$  的等效纤芯区和在石英衬底上按照三角形周期排列的直径为  $d$ 、间距为  $\Lambda$  的空气孔所构成的等效包层区. 等效折射率模型的基本思想是将带有规则周期性空气孔的包层等效为折射率是  $n_{\text{cl-eff}}$  的介质, 那么对于 PCF 的各种分析, 就可以利用传统折射率阶跃型光纤的分析方法和分析结果. 等效折射率方法的关键是求出所谓基空间填充模式(fundamental space-filling mode, FSM)的传输常数  $\beta_{\text{FSM}}$ , 它也是包层中允许的最大传播常数. 为了得到  $\beta_{\text{FSM}}$ , 可以将 PCF 的包层近似为无限大的周期性结构, 包层的一个单元(原胞), 如图 2(b)所示, 在空气孔直径  $d$  不是很大的时候, 可以将其正六边形边界近似为半径是  $r_{\text{eff}}$  的圆, 如图 2(c)所示, 那么根据等效面积原则, 可得

$$r_{\text{eff}} = \left[ \sqrt{3} / 2\pi \right]^{1/2} \cdot \Lambda. \quad (1)$$

这样, 在一个周期性单元中, 根据光波导理论<sup>[16]</sup>, 可以得到如下基模传输条件下的本征方程

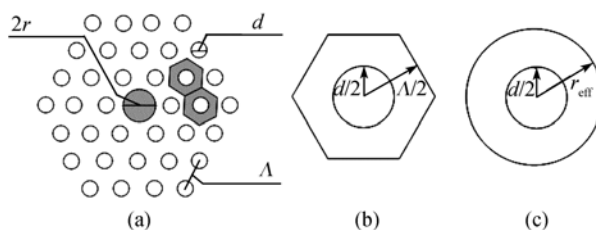


图 2 PCF 横截面结构和包层等效过程示意图

(a) PCF 横截面; (b) 单个原胞; (c) 等效原胞

$$\frac{uI_0(w)}{wI_1(w)} = \frac{J_1(ur_{\text{eff}}/a)N_0(u) - J_0(u)N_1(ur_{\text{eff}}/a)}{J_1(u)N_1(ur_{\text{eff}}/a) - J_1(ur_{\text{eff}}/a)N_1(u)}, \quad (2)$$

其中,  $J, I, N$  分别是熟知的贝塞尔函数、第一类变形贝塞尔函数和诺埃曼函数,  $w$  满足  $w^2 = a^2(\beta^2 - k_0^2 n_{\text{air}}^2)$ ,  $u$  满足  $u^2 = a^2(k_0^2 n_0^2 - \beta^2)$ ,  $a = d/2$ ,  $k_0$  为真空中的波数,  $n_{\text{air}}$  为空气的折射率,  $n_0$  为石英纤芯的折射率. 该本征方程的最大  $\beta$  根就是  $\beta_{\text{FSM}}$ . 该方程没有解析解, 要用数值方法求解. 得到  $\beta_{\text{FSM}}$  后, 就可以利用  $n_{\text{cl-eff}} = \beta_{\text{FSM}} / k_0$  计算得到 PCF 包层的等效折射率, 有了包层的等效折射率  $n_{\text{cl-eff}}$  之后, 就可以利用传统折射率阶跃型光纤的各种分析方法和分析结果.

## 2 新型 ATC-PCF 的设计与分析

本文提出的 ATC-PCF 横截面结构如图 3 所示. 根据前面介绍过的分析 PCF 的包层等效折射率理论, 该结构可以看成具有 2 个平行纤芯的 PCF, 其中一个纤芯 1 由 A 区构成, 另一个纤芯 2 由 B 区构成, 纤芯 1 和纤芯 2 的直径大小不同, 而且包围它们的空气孔的直径大小及其孔的间距也不同, 并且一个纤芯在整个光纤的中心, 另一个纤芯偏心地分布. 显然, 通过调整其结构参数, 可以使 2 个纤芯各自独立地分别

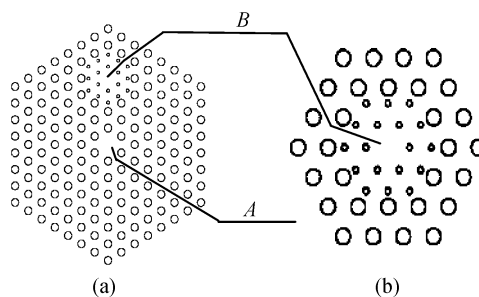


图 3 ATC-PCF 横截面结构图

(a) 全图; (b) B 区及附近区域放大图

支持单模传输, 那么根据光波导的超模(supermodes)传输和弱耦合理论<sup>[17]</sup>, 该结构光纤中至少支持一个偶超模, 它的模场分布可由下式决定

$$\psi(x, y) = \psi_1(x, y) + a\psi_2(x, y), \quad (3)$$

其中,  $\psi_1(x, y)$ 和 $\psi_2(x, y)$ 分别是两纤芯各自在单模传输条件下的模场, 系数 $a$ 由两纤芯的结构和耦合情况决定. 理论上, 超模的模场也可由下式导出

$$\{\nabla_t^2 + k_0^2 n^2(x, y) - \beta^2\} \psi(x, y) = 0, \quad (4)$$

$\beta$ 对应 $\psi(x, y)$ 的传播常数, 也对应超模的有效折射 $n_{\text{eff}}$ ,  $\nabla_t$ 为二维 Laplace 算符,  $n(x, y)$ 为光纤横截面的折射率分布, 这里可以看到, 光波的模场分布完全由光纤横截面的折射率分布情况 $n(x, y)$ 决定. 根据有效纤芯面积 $A_{\text{eff}}$ 的如下定义

$$A_{\text{eff}} = \frac{\iint \psi_p^2 dx dy \iint \psi_s^2 dx dy}{\iint \psi_p^2 \psi_s^2 dx dy}, \quad (5)$$

其中,  $\psi_p(x, y)$ 和 $\psi_s(x, y)$ 分别为泵浦光和信号光各自的模场. 可见, 信号光与泵浦光的有效交叠纤芯面积也由光纤的横截面折射率的分布来决定. 在本文提出的这种 ATC-PCF 结构中, 通过恰当的参数设置, 可使两根光纤的独立基模在某一波长(该波长称为相位匹配波长 phase-matching wavelength, PMW)处具有相同的传播常数, 这样, 后面会看到在远离 PMW 处, 偶超模的有效折射率曲线分别非常接近2个纤芯各自基模单独传播时模式的有效折射率曲线, 所以当光波的波长小于 PMW 时, 所有泵浦光和信号光的偶超模被紧紧地限制在A区纤芯1中, 导致它们有效的交叠面积较小, 当信号光的波长增大到超过 PMW 后, 光波的部分能量逐渐扩散到B区纤芯2中, 导致泵浦光和信号光的有效交叠面积增大. 可见, 完全可以通过光纤横截面上的折射率分布控制泵浦光和信号光有效交叠纤芯面积的大小, 使其变化趋势和喇曼增益系数的变化趋势一致.

### 3 数值仿真结果与讨论

根据以上分析, 在L波段(1565~1625 nm)选取如下的 ATC-PCF 参数进行数值仿真:  $A_1=3.71 \mu\text{m}$ ,  $A_2=2.82 \mu\text{m}$ ,  $d_1=1.74 \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.77 \mu\text{m}$ ,  $D=15.15 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_p=1516.7 \text{ nm}$ ,  $1565 \text{ nm} \leq \lambda_s \leq 1625 \text{ nm}$ , 其中 $A_1$ ,  $A_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ 分别为纤芯1和纤芯2的空气孔间距和包层的

空气孔直径,  $D$ 为2个纤芯的中心距离,  $\lambda_p$ 为泵浦光波长,  $\lambda_s$ 为信号光波长. 在信号区间等间隔选取60个波长进行计算. 另外, 石英纤芯的折射率大小由 Sellmeier公式<sup>[18]</sup>确定. 图4画出了2个纤芯独立时各自基模的有效折射率和双芯结构的偶超模的有效折射率随波长的变化情况. 由图4可见, 当波长小于 PMW 时, 偶超模的有效折射率和纤芯1独立传输时的基模有效折射率非常接近, 此时, 泵浦光和信号光的大部分功率被紧紧地束缚在纤芯1内传播, 导致信号光和泵浦光的有效交叠面积较小. 当波长大于 PMW 后, 偶超模的有效折射率和纤芯2独立传输时的基模有效折射率逐渐接近, 此时, 信号光的一部分功率逐渐扩散到纤芯2中, 导致信号光和泵浦光的有效交叠面积变大.

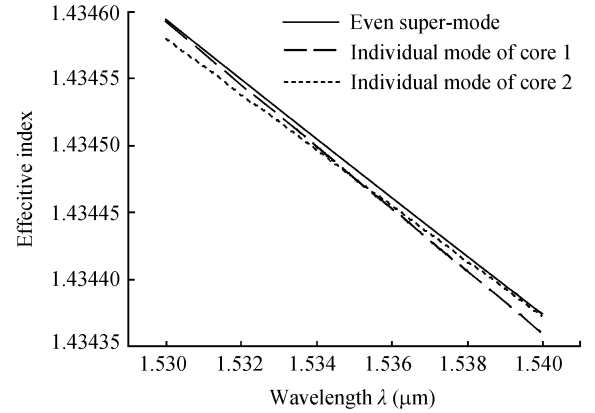


图4 模式有效折射率随波长变化

图5为喇曼增益系数和有效纤芯面积随波长的变化情况. 其中喇曼增益系数根据图1取得. 由图5可见, 在本文所设计的参数下, 泵浦光和信号光的有效交叠面积从1565 nm时的  $34.95 \mu\text{m}^2$  增长到了1625 nm时的  $103.92 \mu\text{m}^2$ , 其变化趋势和前面理论预期的变化趋势符合的很好. 另外可见, 喇曼增益系数从1565 nm时的  $2.21 \times 10^{-14} \text{ m/W}$  增长到了1625 nm时的  $6.62 \times 10^{-14} \text{ m/W}$ , 变化很大, 接近3倍. 但是应该注意到, 在所设定的参数下, 喇曼增益系数和泵浦光与信号光的有效交叠面积两者的变化趋势非常一致. 为了更清晰地表明两者变化趋势的一致性, 可以把两者都归一化, 如图6所示, 它们归一化值的差别小于4.37%.

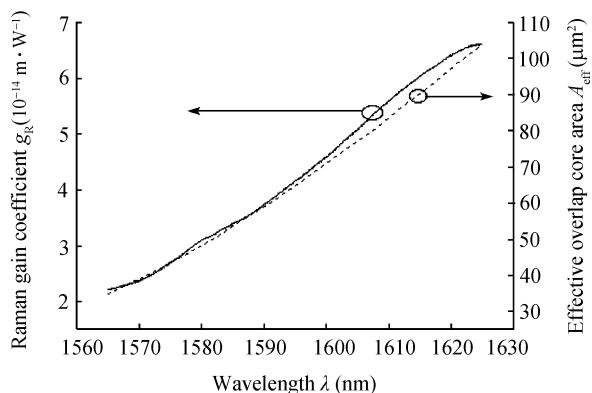


图 5 喇曼增益系数和有效纤芯面积随波长变化

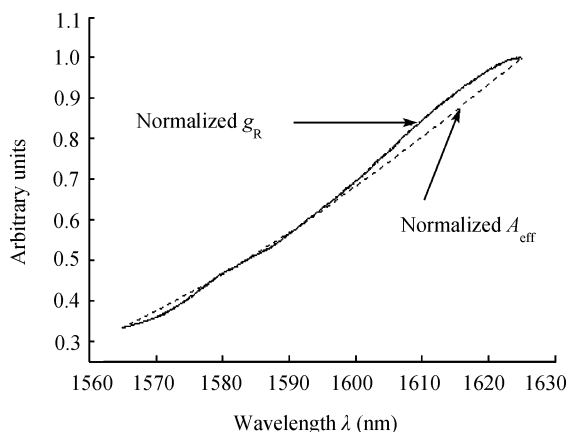


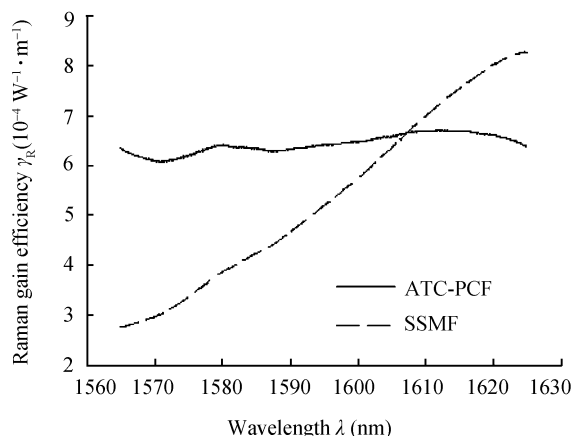
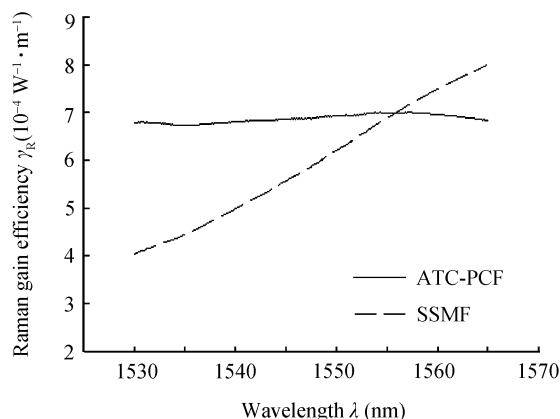
图 6 有效纤芯面积和喇曼增益系数归一化值随波长变化

另外, 为了和常规光纤进行比较, 根据图 1 和图 5 以及模拟参数可得到图 7, 图 7 画出了  $L$  波段 ATC-PCF 和标准单模光纤(SSMF)喇曼增益效率系数随波长的变化情况. 可见, 在  $L$  波段内, SSMF 的喇曼增益效率系数随着波长的增大而近似线性地增大, 而 ATC-PCF 的喇曼增益效率系数在整个波长范围内变化很小, 这是由于所设计的 ATC-PCF 的有效纤芯面积和喇曼增益系数具有相同变化趋势的结果. 在短波长端时, ATC-PCF 有效纤芯面积比 SSMF 的有效纤芯面积小, 而喇曼增益系数相同, 所以导致喇曼增益效率系数较大. 随着波长的增加, ATC-PCF 有效纤芯面积逐步增大, 而 SSMF 的有效纤芯面积基本不变, 到长波长端时, ATC-PCF 有效纤芯面积已经大于 SSMF 的有效纤芯面积, 导致喇曼增益效率系数较小. 正是这种 ATC-PCF 有效纤芯面的变化平衡了喇曼增益系数的变化, 才有喇曼增益效率系数谱的平坦. 为了定量衡量这种平坦性, 定义喇曼增益效率系数谱

的不平坦度  $\Delta r_R$  如下式

$$\Delta r_R = \max(r_{R\_max} - r_{R\_mean}, r_{R\_mean} - r_{R\_min}) / r_{R\_mean}, \quad (6)$$

其中,  $r_{R\_max}$ ,  $r_{R\_mean}$ ,  $r_{R\_min}$  分别为  $r_R$  的最大值, 平均值和最小值,  $\max()$  表示取 2 个自变量中大者的函数. 由图 7 可见, 在  $L$  波段内, 本文提出的 ATC-PCF 的喇曼增益效率系数谱非常平坦, 其  $\Delta r_R$  约为 5.7%. 而 SSMF 的喇曼增益效率系数谱变化很大, 其最大值约是最小值的 3 倍. 同时, ATC-PCF 的喇曼增益效率系数  $r_R$  的平均值也大于 SSMF 的  $r_R$  平均值. 值得指出的是, 只要选取合适的结构参数和泵浦波长, 提出的 ATC-PCF 同样适用于其他信号波段的喇曼放大. 例如, 在  $C$  波段(1530~1565 nm)选取如下参数:  $A_1=3.33 \mu\text{m}$ ,  $A_2=2.99 \mu\text{m}$ ,  $d_1=1.36 \mu\text{m}$ ,  $d_2=1.03 \mu\text{m}$ ,  $D=14.2 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_p=1464.3 \text{ nm}$ ,  $1530 \text{ nm} \leq \lambda_s \leq 1565 \text{ nm}$  进行计算, 结果如图 8 所示. 在所研究的  $C$  波段内,  $\Delta r_R$  约为 2.2%,

图 7  $L$  波段喇曼效率系数随波长变化图 8  $C$  波段喇曼效率系数随波长变化

优于  $L$  波段的  $\Delta r_R$  约为 5.7%, 且  $C$  波段平均喇曼增益效率系数  $r_R$  的值也略大于  $L$  波段的值, 这是因为  $C$  波段的带宽为 35 nm, 小于  $L$  波段的 60 nm 带宽的缘故。所以不难看出, 本文提出的 ATC-PCF 和 SSMF 相比, 具有非常优良的喇曼增益属性。

## 4 结论

本文利用光子晶体光纤包层空气孔排列的灵活性, 设计了一种具有非对称双芯结构的光子晶体光纤, 该光纤的 2 个纤芯直径不相等, 包层中空气孔的直径和空气孔的间距也不相等, 一个纤芯在整个光纤的中心, 另一个纤芯偏心地分布。通过横截面结构参数的合理设计, 可以使 2 个纤芯独立传输时的基模

信号光在某一波长处(相位匹配波长)具有相等的传播常数, 从而使偶超模的场分布随着波长的变化而变化, 进而不同波长信号光和泵浦光的有效交叠纤芯面积也随着波长变化, 如果其变化趋势和喇曼增益系数的变化趋势接近一致, 那么就可以使有效喇曼增益效率系数谱在指定的波长范围内非常平坦。利用该光纤进行光纤喇曼放大器的设计与制作时, 可以仅仅使用单个泵浦光源就能实现在  $C$  波段或  $L$  波段的平坦增益谱, 从而避免了在使用多个泵浦光源设计光纤喇曼放大器时要使用的复杂算法, 提高了设计的效率, 同时更大大降低了制造成本。所以, 该光纤在光纤喇曼放大器的设计与制作中具有潜在的广阔应用前景。

## 参考文献

- 1 Reichmann K C, Iannone P P, Zhou X, et al. 240 km CWDM transmission using cascaded SOA Raman hybrid amplifiers with 70 nm bandwidth. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(2): 328—330[doi]
- 2 Weissner S, Ferber S, Raddatz L, et al. Single and alternating polarization 170 gb/s transmission up to 4000 km using dispersion managed fiber and all Raman amplification. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(12): 1320—1322[doi]
- 3 Islam M N. Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2002, 8(3): 548—559[doi]
- 4 Bolognini G, Faralli S, Chiuchiarelli A, et al. High-power and low-RIN lasers for advanced first and higher-order Raman copumping. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(15): 1591—1593[doi]
- 5 Namiki S, Seo K, Tsukiji N, et al. Challenges of Raman amplification. *Proc IEEE*, 2006, 94(5): 1024—1035[doi]
- 6 Bromage J. Raman amplification for fiber communications systems. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(1): 79—93[doi]
- 7 姜海明, 王亚非. 光纤喇曼增益系数的简捷测量. *光子学报*, 2004, 33(6): 666—668
- 8 姜海明, 谢康, 王亚非. 基于粒子群算法的拉曼光纤放大器的多抽运源优化. *光电子·激光*, 2004, 15(10): 1190—1193
- 9 Zhou J, Chen J, Li X, et al. Robust, compact, and flexible neural model for a fiber Raman amplifier. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(6): 2362—2367[doi]
- 10 Giltrelli M, Santagiustina M. Semianalytical approach to the gain ripple minimization in multiple pump fiber Raman amplifiers. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(11): 2454—2456[doi]
- 11 Cui S, Liu J, Ma X. Novel efficient optimal design method for gain-flattened multiwavelength pumped fiber Raman amplifier. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(11): 2451—2453[doi]
- 12 Xiao P, Zeng Q, Huang J, et al. A new optimal algorithm for multipump sources of distributed fiber Raman amplifier. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(2): 206—208[doi]
- 13 Perlin V E, Winful H G. On distributed Raman amplification for ultrabroad-band long-haul WDM systems. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(3): 409—416[doi]
- 14 Knight J C, Birks T A, Russell P S J, et al. All silica single-mode optical fibre with photonic crystal cladding. *Opt Lett*, 1996, 21(19): 1547—1549[doi]
- 15 Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt Lett*, 1997, 22(13): 961—963[doi]
- 16 吴重庆. 光波导理论. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2000. 27—31
- 17 阿莫·亚里夫. 现代通信光电子学. 第 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2002. 398—402
- 18 Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *J Opt Soc Amer*, 1965, 55(10): 1205—1209[doi]