C波段单泵浦光子晶体光纤拉曼放大器

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

2008-05-11 收稿, 2009-02-04 接受

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

摘要 为了克服传统光纤的拉曼增益效率系数低, 而且极不平坦给光纤拉曼放大器设计带来的复杂性和制造成本的提高, 本文提出了一种新型双芯光子晶体光纤, 通过该光子晶体光纤横截面结构的合理设计, 可使该光子晶体光纤在一定的波长范围内具有比传统光纤更高和更平坦的拉曼增益效率系数谱. 利用该光子晶体光纤设计了一个波长范围在 1530~1565 nm 的 C 波段拉曼放大器, 数值计算结果表明, 仅用一个泵浦的情况下, 该光子晶体光纤拉曼放大器的平均增益可达 8.7 dB, 且增益波动小于 0.9 dB, 比标准单模光纤构成的拉曼放大器性能有非常大的提高.

关键词

拉曼增益系数
拉曼增益效率
光子晶体光纤
拉曼放大器

光放大器在现代光纤通信系统中, 是极其重要的有源器件之一, 它可以克服光信号的传输损耗, 提高其中继传输的距离. 在众多的光放大器中, 光纤拉曼放大器(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)光纤通信系统的一种关键器件^[1~3]. FRA应用在WDM光纤通信系统中时, 在较宽的工作波段内具有较好的增益平坦度是对其的一个基本要求, 因为各路信号光增益的平坦度对光信噪比(OSNR)有重要影响. 另外, 各路信号光之间较大的功率差异会增加WDM信道解复用器输出端的串话, 所以应用在WDM光纤通信系统中的FRA都应该是宽带增益平坦的^[4~6].

当使用各类常规光纤作为FRA的增益介质时, 由于其拉曼增益系数 g_R 很小且非常不平坦, 其相对较为平坦的增益谱宽只有约 2.3 THz, 同时其有效纤芯面积 A_{eff} 基本不随波长变化, 从而其拉曼增益效率系数 $r_R = g_R/A_{\text{eff}}$ 非常不平坦^[7]. 因此仅用单个泵浦源不可能使 FRA 在较宽的波段内增益谱平坦, 所以一般采用多个泵浦源同时泵浦来实现增益谱平坦的目

标^[8~10]. 但这样势必因为泵浦和泵浦之间的相互作用关系而大大增加FRA设计的复杂性, 需要复杂的算法仔细选择各个泵浦的波长和功率^[11~13], 同时多个泵浦的使用也提高了制作成本. 为解决上述问题, 作者提出了一种新型光子晶体光纤(PCF), 并把它作为FRA的增益介质, 设计了一个波长范围在 1530~1565 nm的C波段拉曼放大器, 其性能比标准单模光纤(SSMF)构成的拉曼放大器有非常大的提高.

1 新型 PCF 结构与分析

由于PCF与传统光纤在结构上有着根本的区别, 所以有着许多重要特点, 比如奇异的色散^[14]、大范围可变的非线性^[15]、高度双折射^[16]、无限单模特性^[17]等. 因此, 它的出现引起了各国研究机构的浓厚兴趣. PCF有两种导光的机制, 分别是全内反射(TIR)机制和光子带隙(PBG)机制. 本文研究的是固体导光的TIR型PCF. 应用PCF作为FRA增益介质的最突出优点是可以利用其包层空气孔的灵活性设计, 使其有效纤芯面积 A_{eff} 可以很小, 从而导致其拉曼增益效率系数 $r_R = g_R/A_{\text{eff}}$ 比SSMF的拉曼增益效率有数量级上的提

引用格式: 姜海明, 谢康, 王亚非. C 波段单泵浦光子晶体光纤拉曼放大器. 科学通报, 2009, 54: 1927~1931

Jiang H M, Xie K, Wang Y F. C band single pump photonic crystal fiber Raman amplifier. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0296-y

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-13-1927>

高^[18]。但是由于目前PCF的制作材料和传统的各类光纤是相同的,基本都是石英或掺杂的石英,所以其 g_R 的大小和形状差别都不是很大,因此其 r_R 谱仍然不平坦。为了解决该问题,作者提出了一种新型双芯光子晶体光纤(NPCF),通过该NPCF横截面结构的合理设计,使其有效纤芯面积随波长的变化与拉曼增益系数的变化在指定波长范围内趋向同步变化,从而使其拉曼增益效率系数 r_R 除了在数值大小上有所提高之外,其谱特性也变得更加平坦,进而可为增益谱平坦宽带FRA提供优良的介质,降低宽带平坦增益谱FRA的设计复杂性和制造成本。

目前已经存在多种PCF的分析方法,例如包层等效折射率法^[17]、多极法、有限元法、时域有限差分法、束传播法等。其中,包层等效折射率法是广泛应用的重要方法之一,较之完全的数值计算方法,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。本文所涉及的NPCF空气填充率不高,所以完全可以使用该方法,其核心是求包层等效折射率,然后等价于普通单模光纤求解,具体请参见文献^[17],篇幅关系,这里不再赘述。

本文提出的NPCF横截面结构如图1所示,根据包层等效折射率理论,该NPCF可以看成具有两个平行纤芯的PCF,其中一个纤芯1由A区构成,另一个纤芯2由B区构成。通过调整其结构参数,可使两个纤芯各自独立时分别支持单模传输,那么根据超模理论^[19],此时该光纤至少支持一个偶超模的传输。另外,通过恰当的参数设置,可使两个纤芯的独立模在某一波长处具有相同的传播常数,该波长称为相位匹配波长(PMW)。在远离PMW处,偶超模的有效折射率分别非常接近两个纤芯各自所传播模式的有效折射率,所以当光波的波长小于PMW时,所有光的偶超模被紧紧地限制在A区纤芯1中,此时有效交叠面积值较小,当光波的波长逐渐增大到超过PMW时,光波的能量逐渐扩散到B区纤芯2中,导致有效的交叠面积增大。可见,通过对NPCF的合理设计,可以使泵浦和信号光的有效交叠面积与拉曼增益系数的变化趋势相一致,从而实现我们的目的。有效交叠面积的定义如下:

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \int_A \psi_p^2 r dr \int_A \psi_s^2 r dr / \int_A \psi_p^2 \psi_s^2 r dr, \quad (1)$$

其中, $\psi_p(r, \varphi)$, $\psi_s(r, \varphi)$ 分别为泵浦光和信号光各自的模场分布, r, φ 为极坐标, A 为光纤横截面积。

图1 NPCF横截面结构示意图

(a) NPCF 全图; (b) B 区及附近区域放大图

2 NPCF 参数确定方法及仿真结果

从前面的定性分析可知,要使泵浦光和信号光的有效交叠面积和拉曼增益系数的变化趋势相一致,核心问题就是要找到合适的 PMW。而该问题又归结为确定 NPCF 的结构参数,其中包括 A_1 , A_2 , d_1 , d_2 , Dist 等参数,它们分别为纤芯 1 和纤芯 2 包层的空气孔间距,包层的空气孔直径,两个纤芯的中心距离。虽然上面的定性分析指出了 PMW 存在的可能性,但是由于 NPCF 的本征方程不能解析求解,导致了确定上述参数的困难性。理论上讲,上述每个参数都可以连续变化,所以其可能组合有无穷多种,尽管可以在一定的各自范围内离散化,使参数的组合数量有所减少,但是在保证精度的情况下各个参数的组合仍然可能产生所谓的“组合爆炸”,导致用常规的穷举法来搜索合适的参数变得十分困难,甚至是不可能的。所以本文采用近些年来才兴起的一种智能优化算法-粒子群优化(PSO)来解决 NPCF 的结构参数的优化搜索问题。

PSO是由Kennedy和Eberhart等人于1995年提出的一种进化计算技术^[20],其基本思想源于对鸟群捕食行为的研究,经过数年的发展与完善,该算法已广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控制等众多领域^[21~23]。本文采用改进的PSO算法^[24]来完成具体的优化任务,该算法数学上可进行如下描述:假设在一个 D 维的目标搜索空间中,有 m 个粒子组成一个群落,其中第 i 个粒子的位置可以表示为一个 D 维的向量, $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, $i=1, 2, \dots, m$ 。 $\mathbf{x}_i$ 就是所求问题的一个潜在解。将 $\mathbf{x}_i$ 带入一个目标函数就可以计算出其适应值,根据适应值的大小来衡量 $\mathbf{x}_i$ 的优劣。第 i

个粒子的“飞翔”速度也是一个 D 维向量,记为 $v_i=(v_{i1},v_{i2},\dots,v_{iD})$.记第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置为 $p_i=(p_{i1},p_{i2},\dots,p_{iD})$,整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为 $p_g=(p_{g1},p_{g2},\dots,p_{gD})$,则粒子群优化算法的计算公式为:

$$v_{id}=wv_{id}+c_1r_1(p_{id}-x_{id})+c_2r_2(p_{gd}-x_{id}), \quad (2)$$

$$x_{id}=x_{id}+v_{id}, \quad (3)$$

其中 $d=1,2,\dots,D$, w 是非负的常数,称为惯性因子, c_1,c_2 是非负的常数,称为学习因子, $r_1,r_2\in[0,1]$,是随机数.在实际的应用中,如果是有界问题,一般还有如下的约束条件: $v_{id}\in[v_{dmin},v_{dmax}]$, $x_{id}\in[x_{dmin},x_{dmax}]$,其中 v_{dmin} , v_{dmax} , x_{dmin} 和 x_{dmax} 为预先设定的常数,当 v_{id} 或(和) x_{id} 超出预定的边界时, v_{id} 或(和) x_{id} 就等于相应边界值.在优化NPCF时,被优化的变量是 A_1 , A_2 , d_1 , d_2 和Dist,上述约束条件的设置要保证孔间距 A_1 , A_2 分别大于 d_1 , d_2 ,并且Dist大于 A_1+A_2 ,这样才能使NPCF中的空气孔不相交,使优化的结构参数具有实际的物理意义.

确定NPCF的结构参数之前,需首先利用拉曼增益系数谱和信号光的波长范围确定泵浦波长.为了有效利用拉曼增益系数谱的高增益部分,本文泵浦波长取为 $\lambda_p=1464.3$ nm,信号波长 λ_s 介于1530 nm和1565 nm之间.利用已知参数和PSO算法,以有效纤芯面积和拉曼增益系数同步变化为被优化的目标函数,优化得到了如表1所示的NPCF结构参数.具体优化过程简述如下:首先在NPCF的5个结构参数 A_1 , A_2 , d_1 , d_2 和Dist的问题空间随机初始化一组参数,然后根据(2)和(3)式不断地更新上述5个参数,每更新一次参数就重新计算一次其所决定的有效纤芯面积谱曲线,直到该谱曲线和拉曼增益系数谱曲线足够地接近,此时的参数就是寻找到的优化参数.上述2条谱曲线的接近程度采用如下步骤确定:首先在信号波长范围内每隔1.0 nm对有效纤芯面积谱曲线和拉曼增益系数谱曲线的幅度分别进行采样,然后对各采样点的2条曲线的幅值差别的绝对值求均方根.可见,均方根值越小表明2条谱曲线的差别越小.

表1 NPCF 结构参数优化结果

参数符号	A_1	A_2	d_1	d_2	Dist
数值/ μm	4.00	2.85	2.14	0.88	15.90

在上述结构参数下,NPCF的有效纤芯面积和拉曼增益系数谱如图2所示.由图可见,在所研究的波段,拉曼增益系数变化幅度很大,从1530 nm到1565 nm,其值约增大了1倍,同时有效纤芯面积也变化了近1倍.从图2可见,两者随波长的变化趋势非常一致.为了进一步考查两者的同步变化情况,图3画出了NPCF的拉曼增益效率系数谱,可见其拉曼增益效率系数谱很平坦.为了和标准单模光纤(SSMF)进行比较,SSMF的拉曼增益效率系数谱也一并画在了图3中.NPCF的拉曼增益效率系数谱和SSMF的拉曼增益效率系数谱比较起来有两点非常明显的优点,第一是波动非常小,NPCF的相对波动为3.3%,而SSMF的相对波动则高达49.6%,相对波动定义为: $\Delta r_R=(r_{Rmax}-r_{Rmin})/r_{Rmax}$,其中 r_{Rmax} 和 r_{Rmin} 分别是 r_R 的最大值和最小值.第二是数值上有明显的提高,长波长方向提高约1.3倍,短波长方向更有约2.7倍的提高,这两个优点势必给FRA的设计带来极大的好处.

图2 有效纤芯面积和拉曼增益系数随波长变化

图3 拉曼增益效率随波长变化

图 4 拉曼增益谱

图 5 拉曼增益谱

3 C 波段单泵浦 NPCF-FRA 设计结果

FRA 是根据受激拉曼散射原理来工作的, 其机制可用各路光波在光纤中相互作用的强度耦合方程来描述, 当光纤中同时传输多路泵浦光和多路信号光时, 不但泵浦光和信号光之间发生能量的耦合和转移, 同时不同波长的泵浦光与泵浦光、信号光与信号光之间也存在着能量的耦合和转移。所以, 多波长泵浦宽带 FRA 的数学模型可以表示成下面的形式^[12]:

$$\pm \frac{dP_j}{dz} = \sum_{v_i > v_j} \frac{g_R (v_i - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_i P_j - \sum_{v_j > v_k} \frac{v_j}{v_k} \frac{g_R (v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \alpha_j P_j \quad (j=1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

其中 P_i , P_j , P_k 分别是第 i , j , k 路光波的功率, n 为总的光波路数, 包括泵浦光波和信号光波, “+”号代表沿

光纤正向传输, “-”号代表沿光纤反向传输。 g_R 是所用光纤介质的拉曼增益系数, v 是各路光的频率, α_j 为光纤介质对第 j 路光的损耗系数, z 为各路光的传输正方向, K_{eff} 是偏振相关因子, 一般取 2.0, A_{eff} 是泵浦光和信号光的有效交叠面积, 由 (1) 式定义。上式的含义是, 当多路泵浦光波和信号光波沿着光纤传输时, 除光纤的损耗外, 由于受激拉曼散射效应, 所有频率大于 v_j 的光波向第 j 路光波转移能量。同样, 所有频率小于 v_j 的光波从第 j 路光波吸收能量。通常情况下 (4) 式没有解析解, 只能用数值计算的方法进行求解, 本文应用四阶龙格——库塔法^[25]对该式进行数值求解, 计算时的光纤步长取 35 m。

C 波段单泵浦 FRA 的数值仿真中, 泵浦波长和 NPCF 的结构参数如前文所述, 另外, 信号光共 36 路, 在 C 波段每 1.0 nm 取一个波长点, 每路信号光的功率为 0.1 mW, 光纤的长度为 5.0 km。结果如图 4 和图 5 中实线所示, 对于 NPCF 来说, 仅用单个功率 $P=0.78$ W 的泵浦源就实现了在 C 波段内 8.7 dB 的平均增益, 且其增益波动小于 0.9 dB。如果采用同样的泵浦源和光纤长度参数, 如图 4 中虚线所示, 对于 SSMF 来说, 其平均增益仅为 4.7 dB, 且其增益波动高达 2.8 dB。要想取得更高的增益, 必须加大泵浦源的功率, 当泵浦源的功率提高到 1.02 W 时, 如图 4 中长划线所示, 其平均增益也不过 7.3 dB, 且其增益的不平坦度更是高达 4.2 dB。正像在引言部分中指明的那样, 要想在 SSMF 中实现宽带平坦的拉曼增益谱, 就要使用多个泵浦源并仔细地配置它们的波长和功率。经过我们仔细地配置泵浦源的个数、功率和波长, 最终找到了一组上述参数下取得和 NPCF 同样平均增益和平坦度的泵浦参数。具体配置泵浦源的详细方法和步骤可参考文献^[26], 得到的具体参数为: $P_1=0.49$ W, $P_2=0.95$ W, $\lambda_1=1426.8$ nm, $\lambda_2=1455.4$ nm, 它们分别是 2 个泵浦的功率和波长。上述泵浦源在 SSMF 中所产生的增益谱如图 5 中虚线所示。从图 5 可见, 实现基本相同的增益谱, NPCF 较 SSMF 不但节省了泵浦源的个数, 同时也降低了所需要的泵浦总功率。在本例中, NPCF 仅需一个泵浦, 且其所用总功率约为 SSMF 所用总功率的一半。

4 结论

将 NPCF 作为 FRA 的增益介质, 充分利用 NPCF 包层空气孔设计的灵活性, 选择合适的结构参数, 一

方面可以使其有效纤芯面积 A_{eff} 比传统光纤大幅减小, 从而提高其拉曼增益效率系数 r_R 的大小, 另一方面还可以使有效纤芯面积 A_{eff} 随波长变化的趋势和 g_R 随波长变化的趋势接近同步, 从而使拉曼增益效率系数 r_R 在一定的波长范围内接近常数, 使得宽带平坦增益谱 FRA 的设计更加容易, 同时还可以减少泵

浦源的个数, 降低 FRA 的制造成本, 克服因为传统光纤的拉曼增益效率系数 r_R 低而且极不平坦所带来的缺点. 在 C 波段, 使用本文提出的 NPCF, 仅用单个泵浦就可以实现较高的增益谱和较好的增益平坦度. 实现基本相同的增益谱, NPCF 较 SSMF 不但节省了泵浦源的个数, 同时也降低了所需要的泵浦总功率.

参考文献

- 1 Kaewplung P, Kikuchi K. Simultaneous cancellation of fiber loss, dispersion, and Kerr effect in ultralong-haul optical fiber transmission by midway optical phase conjugation incorporated with distributed Raman amplification. *J Lightwave Technol*, 2007, 25: 3035—3050[doi]
- 2 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: 328—330[doi]
- 3 Weisser 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: 1320—1322[doi]
- 4 Islam M N. Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2002, 8: 548—559[doi]
- 5 Namiki S, Seo K, Tsukiji N, et al. Challenges of Raman amplification. *Proc IEEE*, 2006, 94: 1024—1035[doi]
- 6 Bromage J. Raman amplification for fiber communications systems. *J Lightwave Technol*, 2004, 22: 79—93[doi]
- 7 Stolen R H, Ippen E P. Raman gain in glass optical waveguides. *Appl Phys Lett*, 1973, 22: 276—278[doi]
- 8 Zhou J, Chen J, Li X, et al. A novel pump adjustment method for WDM pumped optical Raman amplifier. *Opt Commu*, 2005, 248: 407—413[doi]
- 9 Zhou X, Lu C, Shum P, et al. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13: 945—947[doi]
- 10 Emori Y, Tanaka K, Namiki S. 100 nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalised by 12-wavelength-channel WDM laser diode unit. *Electron Lett*, 1999, 35: 1355—1356
- 11 Liu X, Lee B. Optimal design of fiber Raman amplifier based on hybrid genetic algorithm. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16: 428—430[doi]
- 12 Perlín V E, Winful H G. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers. *J Lightwave Technol*, 2002, 20: 250—254[doi]
- 13 Perlín V E, Winful H G. On distributed Raman amplification for ultrabroad-band long-haul WDM systems. *J Lightwave Technol*, 2002, 20: 409—416[doi]
- 14 Mogilevsev D, Birks T A, Russell P S J. Group-velocity dispersion in photonic crystal fibers. *Opt Lett*, 1998, 23: 1662—1664[doi]
- 15 Broderick N G R, Monro T M, Bennett P J, et al. Nonlinearity in holey fibers: Measurement and future opportunities. *Opt Lett*, 1999, 24: 1395—1397[doi]
- 16 Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers. *Opt Lett*, 2000, 25: 1325—1327[doi]
- 17 Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt Lett*, 1997, 22: 961—963[doi]
- 18 De Matos C J S, Hansen K P, Taylor J R. Experimental characterisation of Raman gain efficiency of holey fibre. *Electron Lett*, 2003, 39: 424—425[doi]
- 19 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
- 20 Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*. 1995, Oct 4-6, Nagoya. Piscataway: IEEE, 1995. 39—43
- 21 Laskari E C, Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Particle swarm optimization for minimax problems. In: *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, 2002, May 12-17, Honolulu. Piscataway: IEEE, 2002. 1576—1581
- 22 Mendes R, Cortez P, Rocha M, et al. Particle swarms for feed forward neural network training. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2002, May 12-17, Honolulu. Piscataway: IEEE, 2002. 1895—1899
- 23 Esmin A A A, Aoki A R, Lambert-Torres G. Particle swarm optimization for fuzzy membership functions optimization. In: *Proceedings of the International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2002, Oct 6-9, Yasmine Hammamet. Piscataway: IEEE, 2002. 106—111
- 24 Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer. In: *Proceedings of the International Congress on Evolutionary Computation*, 1998, May 4-9, Anchorage. Piscataway: IEEE, 1998. 69—73
- 25 邓建中, 刘之行. 计算方法, 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 226—230
- 26 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: 1190—1193