

文章编号:1001-5078(2007)05-0468-02

六角形空气芯光子晶体光纤的激活增益

袁宝国^{1,3}, 郑浩^{1,2}, 沈廷根^{1,3}

(1. 江苏大学应用物理研究所, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学通信系, 江苏 镇江 212013; 3. 江苏大学物理系, 江苏 镇江 212013)

摘要:应用全矢量模型分析了六角形空气芯光子晶体光纤的传输特性,研究了石英基质材料掺入激活杂质时,出现受激辐射增强的现象,有望用于制作高效率的光纤放大器。

关键词:光子晶体光纤;全矢量模型;受激辐射

中图分类号:TN253;O482.3 **文献标识码:**A

Properties of Stimulated Emission Gain in the Hexagonal Air Core PCF

YUAN Bao-guo^{1,3}, ZHENG Hao^{1,2}, SHEN Ting-gen^{1,3}

(1. Application Physics Graduate School, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

2. Department of Communication, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

3. Department of Physics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: A full vector model is used to analyze the transmission properties of hexagonal air core PCF. The phenomenon of stimulated emission improvement is studied when impurity of the activation substance mixed in the quartz substrate. It is hoped that can make great efficiency erbium-doped fiber amplifier.

Key words: photonic crystal fiber; full vector model; stimulated emission

1 前言

光子晶体光纤(PCF)是一种带有线缺陷的光子晶体,光子晶体光纤与传统光纤相比有许多“奇异”特性。无尽单模特性^[1]在可见光和近红外波段具有反常色散^[2],高模式双折射^[3]以及高非线性特性^[4]等,在光通信领域具有广泛的应用前景。

六角形空气芯光子晶体光纤是由晶格常数为光波长量级的二维光子晶体构成的,即规则排列着空气孔的硅光纤阵列构成光纤的包层,光纤的核心是由一个破坏了结构周期性的大的空气孔缺陷构成,通过作为包层的二维光子晶体的布拉格衍射,一定波长的光被陷获在作为核心的空气孔中。对于这种带隙型光子晶体光纤,在这种波导中,光波导向是通过波导周围介质的周期性结构(光子晶体)的布拉格衍射而实现的,它并不一定要求波导的折射率大于周围介质的折射率,因为光子带隙条件只依赖于包层的性质,光子带隙导向给予了额外的设计自由度,它能使光子被束缚在芯区附近。它在高功率光传输、气体非线性研究以及微观粒子传导等方面的

应用具有重要的价值。

目前关于空气芯光子带隙型 PCF 的可控光子流和激活增益特性很少有详细的报道,对 PCF 的传输特性的分析,需要一个高效数值方法,对于纵向(传播方向)均匀的 PCF,其横向折射率分布可以分为两部分:包层是由空气孔和石英组成的光子晶体结构;芯子由中心缺陷构成。本文根据 PCF 的特点,将 PCF 看成一个超元胞,在周期性边界条件的假设下,应用叠加方法构造超格子,采用全矢量模型分析 PCF 的传输特性,主要讨论了石英基质掺入激活杂质后能流大小随其等效折射率虚部的变化的关系。

2 全矢量模型

图 1 为六角形空气芯光子晶体光纤的结构和 $\Lambda = 4\mu\text{m}$ 的基模能流示意图,在石英基质材料中,按三角结构周期排列着圆空气柱,截面分为包层区和

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2004059)资助课题。

作者简介:袁宝国,男,江苏大学物理系教师,主要研究方向为光电技术。

收稿日期:2006-10-15

芯区,在包层区是由2层均匀圆空气柱形成结构;芯层由一个圆空气柱形成。光子晶体光纤的结构参量可以由孔距 Λ ,孔径 d 来表征,图中的中心区域为一个圆空气柱缺陷,其芯径为 R 。

对于纵向均匀的光波导,横向模式电场可分为 x, y 两个方向的偏振分量 $e_x(x, y), e_y(x, y)$,它们分别满足矢量波动方程^[5]:

$$\begin{aligned} (\nabla_t^2 - \beta_x^2 + k^2 n^2) e_x &= -\frac{\partial}{\partial x} \left[e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} \right] \\ (\nabla_t^2 - \beta_y^2 + k^2 n^2) e_y &= -\frac{\partial}{\partial y} \left[e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

其中, β_x, β_y 分别为沿 x, y 方向的两个偏振模式的传输常数; $n^2 = n^2(x, y)$ 为横向折射率分布; $k = 2\pi/\lambda$ 是真空波数。为了解方程(1),将电场和横向折射率分布用正交函数展开,由基模的对称性,利用 PCF 中场的局域性的特点,选取 Hermite - Gauss 函数将模式电场展开。将场和折射率的展开式代入波动方程(1),可以得到本征方程:

$$\begin{pmatrix} I_{abcd}^{(1)} + k^2 I_{abcd}^{(2)} + I_{abcd}^{(3)x} & I_{abcd}^{(4)x} \\ I_{abcd}^{(4)y} & I_{abcd}^{(1)} + k^2 I_{abcd}^{(2)} + I_{abcd}^{(3)y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} = \beta^2 \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中,交叠积分 $I^{(1)}, I^{(2)}, I^{(3)}, I^{(4)}$ 存在解析形式,通过给定波长,由求解矢量波动方程转换成求解本征值问题,具体的求解方法参见文献[6]和[7]。

通常求解本征方程的本征值可借助于数值方法。这样,通过求解本征值和本征矢量便可得到对应 x 偏振基模和 y 偏振基模的传输常数和相应的模场分布,由传输常数可计算出对应基模模式的等效折射率,可进一步分析光纤的传输特性。

光子晶体光纤采用小圆柱的半径 d 为 $1.75\mu\text{m}$,中心圆柱半径 R 为 $5.55\mu\text{m}$ 。圆柱均为空气折射率,我们让波长为 $2.85\mu\text{m}$ 的光通过光子晶体光纤,石英基质折射率实部为1.45,包层小圆柱的间距 $\Lambda = 4\mu\text{m}$,得到 z 方向能流 S_z 分布图如图1所示。

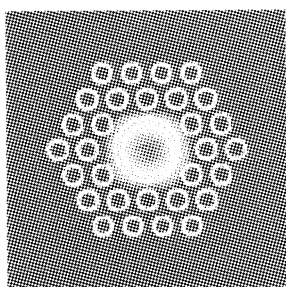


图1 $\Lambda = 4\mu\text{m}$ 纤芯的基模能流

3 石英基质区掺入激活杂质后能流大小随折射率负的虚部变化的关系

如果在光子晶体光纤的石英基质区掺入激活杂

质如 Er^{3+} ,其掺杂等效复折射率为^[8]:

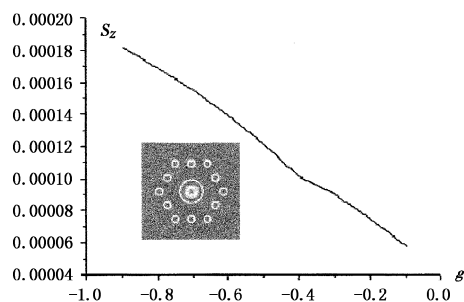
$$n_d = n(\omega) + ig(\omega) \quad (3)$$

其中,等效复折射率 n_d 的实部 $n(\omega)$ 描述石英基质区掺入激活杂质的等效色散性质,虚部 $g > 0$ 表示掺杂区的吸收;反之折射率负虚部($g < 0$)表示掺杂区的增益(由下面的论述可证明)。

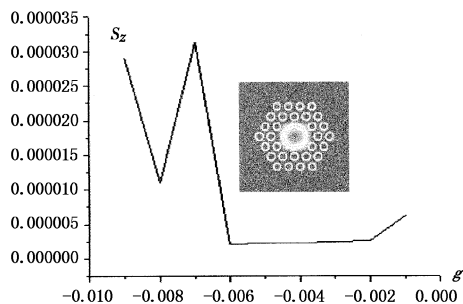
光子晶体光纤小圆柱的间隔为 $4\mu\text{m}$,小圆柱的半径为 $1.75\mu\text{m}$,中心圆柱半径为 $5.55\mu\text{m}$,圆柱均为空气折射率,我们让波长为 $2.85\mu\text{m}$ 的光通过石英基质等效折射率实部为1.45的光子晶体光纤。

包层为单层小圆柱结构石英基质折射率负虚部取值范围为 $0 \sim 1.0$,并以0.1为步长来修改折射率的虚部,基模也能存在,得到如图2(a)所示的纤芯的基模能流大小随折射率负的虚部变化的关系曲线;能流的强度随折射率负的虚部增大几乎为线性增长。

为了让基模也能存在,包层为双层小圆柱结构的石英基质折射率负虚部取值范围为 $0 \sim -0.010$,并以0.001为步长来修改折射率的虚部,得到如图2(b)所示的纤芯的基模能流大小随折射率负的虚部变化的关系曲线;能流的强度随折射率负的虚部增长在不同程度的变大。在折射率虚部变化为 -0.009 和 -0.006 时呈振荡形式;在折射率负的虚部为 -0.007 时,达到最大值;当有效折射率虚部在 $-0.006 \sim -0.002$ 变化时,能流小并变化平缓。



(a) 包层为单层



(b) 包层为双层

图2 石英基质区掺入激活杂质后,纤芯的基模能流 S_z 大小随石英基质折射率负的虚部 $g(g < 0)$ 变化的关系曲线

(下转第473页)

了自己的改进算法,首先将参考图像和待配准图像进行小波分解及二值化,然后以互信息作为衡量测度进行配准,参数搜索过程中的优化采用不同的策略,在小波图像的最高级采用 SPSA 算法搜索配准参数,在之后每一级都使用 Powell 算法搜索,这样将 SPSA 算法的全局优化能力强和 Powell 算法的计算速度快的优点很好地结合起来。和文献[6]所提的方法相比,本方法在保证精度的同时,极大地减少了算法消耗的时间,同时配准过程不需要任何人工干预,实验验证了其有效性。

参考文献:

- [1] 杨枝灵,王开. Visual C++ 数字图像获取、处理及实践应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003:409-412.
- [2] Brown Gottesfeld L. A survey of image registration techniques[J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4):325-376.
- [3] Averbuch A, Keller Y. FFT based image registration [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Orlando: IEEE Press,

2002:3608-3611.

- [4] Barnea D I, Silverman H F. A class of algorithm for fast digital image registration[J]. IEEE Transaction on Computing, 1972, (21):179-186.
- [5] 田捷,包尚联,周明全. 医学影像处理与分析[M]. 北京:电子工业出版社,2003:111-113.
- [6] Arlene A Cole-Rhodes, Kisha L Johnson, Jacqueline LeMoigne, et al. Multiresolution registration of remote sensing imagery by optimization of mutual information using a stochastic gradient[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(12):1495-1511.
- [7] Le Moigne J, Campbell W J, Crompt R F. An automated parallel image registration technique based on the correlation of wavelet features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8):1849-1864.
- [8] J C Spall. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992, 37(3):332-341.
- [9] 谢可新,韩立兴,林友联. 最优化方法[M]. 天津:天津大学出版社,1997.

(上接第 469 页)

借助于数值方法,我们选取了石英基质折射率负的虚部为 -0.007 时,得到波长 λ 在 $1.500\mu\text{m}$ 到 $1.700\mu\text{m}$ 变化时,纤芯的基模能流大小 S_z 随波长 λ 变化的关系曲线,如图 3 所示。

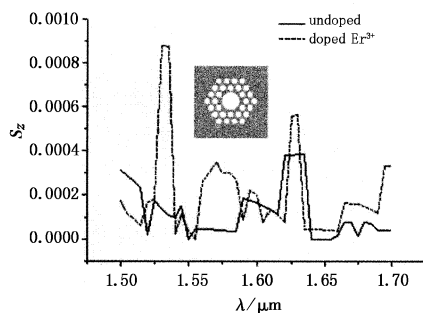


图3 纤芯的基模能流大小 S_z 随波长 λ 变化的关系曲线

从图 3 我们可以看到,由于场的频域能量的局域特性,在某些波长处($\lambda = 1.53\mu\text{m}$ 处等)具有增益,我们认为这是频域能量的重新分配和光和原子相互作用而导致自发辐射的结果。

5 结论

我们可以看到掺入激活杂质后信号能流比没有引入折射率负的虚部时增大了,这意味着当光通过激活介质时必定从抽运源中吸收能量,光不但不会被吸收反而得到放大。它使光被高度局域,相应的光子态密度将大大增强,因此可有效控制光子流,优化光子晶体光纤的传输特性,这使得微结构光纤可以在更低的泵浦功率和更短的光纤长度下得到和普通光纤相同的增益。

实际上,受激辐射场和物质之间的相互作用是普遍存在的,通过控制制作光子晶体光纤的参量,可以有效地控制辐射场与物质的相互作用,使希望的受激辐射大大增强,这意味着掺杂光子晶体光纤可应用于密集波分复用(DWDM)光放大通信系统。

参考文献:

- [1] T A Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. Opt. Lett., 1997, 22(13):961-963.
- [2] J C Knight, J Arriaga, T A Birks, et al. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(7):807-809.
- [3] A Ortigosa-Blanch, J C Knight, W J Wadsworth, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. Opt. Lett., 2000, 25(18):1325-1327.
- [4] P Petropoulos, T M Monro, W Belardi, et al. 2R-regenerative all-optical switch based on a highly nonlinear holey fiber [J]. Opt. Lett., 2001, 26(16):1233-1235.
- [5] A W Snyder. Optical waveguide theory [M]. New York: Chapman and Hall, 1983:45.
- [6] W Zhi, R Chlobin, L Shuqin, et al. Supercell lattice method for photonic crystal fibers [J]. Opt Express, 2003, 11(9):980-991.
- [7] R Guobin, W Zhi, L Shuqin, et al. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers [J]. Opt Express, 2003, 11(11):1310-1321.
- [8] Nian-hua Liu, Shi-Yao Zhu, Hong Chen, et al. Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect [J]. Physical Review, 2002, E65:0466071-8.