

· 光电器件与材料 ·

## 用于高功率放大的光子晶体光纤特性研究

崔 苏, 魏 淮

(北京交通大学, 光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:** 稀土掺杂光子晶体光纤是制作高功率光纤激光器、光纤放大器的理想材料, 对稀土掺杂光子晶体光纤的研究尤为重要。提出了一种新型的空气孔八边形双排排列的光子晶体光纤, 并对其部分特性进行分析。研究了该种光纤的掺杂纤芯直径、掺杂折射率和波长的变化对有效模场面积和有效折射率的影响, 并计算了该稀土掺杂光纤作为光纤放大器时的重叠因子的特性。为以后更好的制作光纤放大器等光器件产生了一定的理论基础。

**关键词:** 纤芯掺杂; 光子晶体光纤; 有效模场面积; 有效折射率; 重叠积分因子

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-02-0027-04

## Research on Photonic Crystal Fiber Characteristics for High Power Amplifier

CUI Su, WEI Huai

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Rare earth-doped photonic crystal fiber (PCF) is a kind of ideal material to produce high power fiber lasers and amplifiers, which is particularly important to the research on rare earth-doped PCF. A new octagonal PCF with air hole and arranged in double rows is proposed. And the characteristics are analyzed. Influences from the changes of doped fiber coil diameters, doped refractive index and wavelength on effective model field areas and refractive index are researched. And overlap factor characteristics of the rare earth-doped fiber as a fiber amplifier are calculated. Theory bases of producing photonic apparatuses such as fiber amplifiers are established.

**Key words:** fiber coil Yb-doped; photonic crystal fiber (PCF); effective model field area; effective refractive index; overlap integral factor

在20世纪70年代以来,经过40多年的快速发展,光纤已经成为各种光电器件的主要材料。光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)有许多优秀的光学特性<sup>[1-3]</sup>:无截止单模输出、可控色散、低损耗和大模场面积等。利用这些特性,光子晶体光纤作为一种材料在光通信技术、光器件制造工业、军事和生物医疗等科技领域扮演了越来越重要的角色。

最近几年,稀土掺杂光纤有助于产生和传输高能量、高峰值功率的光脉冲<sup>[8-9]</sup>,因此成为国际上光纤领域的研究热点之一。稀土掺杂光纤的应用很广泛,利用光子晶体光纤结构的灵活设计,光子晶

体光纤在光器件的应用很普遍,如光纤光栅、激光器、拉曼放大器(raman amplifier)等。随着对光纤激光的功率、光束质量和亮度要求的提高,人们希望稀土掺杂光纤能有大的模场面积、高的输出光束质量和高重叠因子等优点。主要提出了作为光纤放大器、激光器材料的一种新型的纤芯掺杂的光子晶体光纤,并对其特性进行了分析。分析了这种光纤的掺杂纤芯直径、掺杂折射率和波长的变化对有效模场面积和有效折射率的影响以及该稀土掺杂光纤作为光纤放大器时的重叠因子。

收稿日期: 2013-12-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 崔苏(1988-),女,山东淄博人,硕士研究生,主要从事光纤通信、掺杂光纤的研究。

### 1 光子晶体光纤模型

光子晶体光纤具有周期性排列空气孔,所以PCF又被称为多孔光纤(hole fiber, HF)或微结构光纤(micro-structured fiber, MOF)<sup>[7]</sup>。提出的是一种新型的空气孔八边形双排排列的光子晶体光纤,利用COMSOL Multiphysics 软件对其模拟仿真分析特性。COMSOL起源于Matlab工具箱,其核心算法是有限元法。实际构建的光子晶体光纤如图1所示。光纤基底是纯石英材料,折射率为 $n=1.4446$ ,  $d_1=10\mu\text{m}$ ,  $n=1.4446$ ,  $d_1=10\mu\text{m}$ ,  $d_2=8\mu\text{m}$ ,  $d_1$ 、 $d_2$ 分别为内、外层空气直径,孔间距  $\Lambda=30\mu\text{m}$ , 掺镜纤芯直径  $d_{\text{dop}}=8\mu\text{m}$ , 掺杂折射率  $n_{\text{dop}}=1.4496$ 。

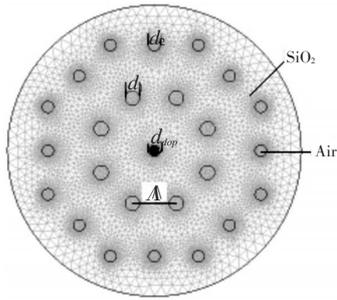


图1 光子晶体光纤中几何分布示意图

在理论研究中,光子晶体光纤的有效折射率由Sellmeier<sup>[4]</sup>公式给出

$$n = \sqrt{1 + \sum_{k \geq 1} \frac{A_k \lambda^2}{\lambda^2 - B_k}} \quad (1)$$

其中,  $n$  为介质的折射率;  $A_i$  和  $B_i$  是 Sellmeier 系数。模型通过计算得到有效折射率  $n_{\text{eff}}=1.44787$ 。

### 2 数值模拟结果及特性分析

作为光纤放大器纤芯掺杂的光子晶体光纤的材料,文中将对其部分特性进行分析。

#### 2.1 波长的变化对光子晶体光纤特性的影响

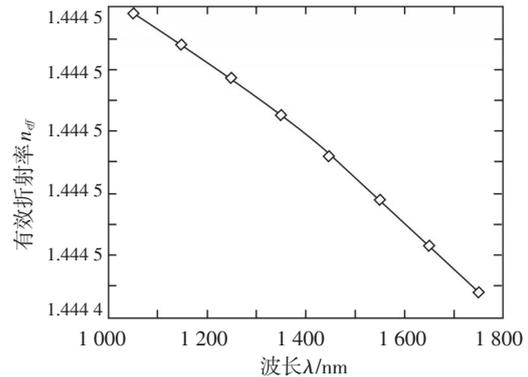
保持  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $\Lambda$ 、 $d_{\text{dop}}$ 、 $n_{\text{dop}}$  不变并且形状、气孔排列不变,计算波长  $\lambda$  在  $1000\sim 1550\text{nm}$  之间模场面积和有效折射率。

对于光子晶体光纤的有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  表达式为<sup>[5]</sup>

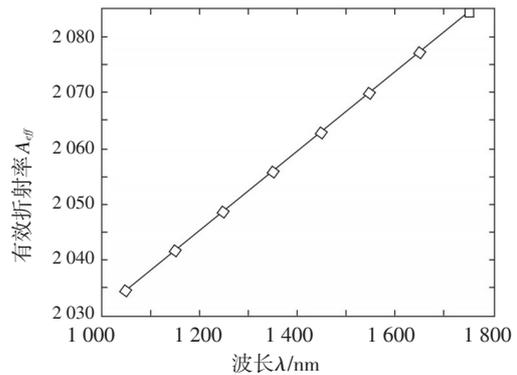
$$A_{\text{eff}} = \frac{[\iint |E(x,y)|^2 dx dy]^2}{\iint |E(x,y)|^4 dx dy} \quad (2)$$

其中,  $E(x,y)$  为光纤的横向电场分量。

在文中,光子晶体光纤在不同的波长  $\lambda$  下,有效折射率  $n_{\text{eff}}$  和有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  的关系图如图2所示,图2a为有效折射率和波长的关系图,图2b为有效模场面积和波长的关系图。



(a)有效折射率和波长的关系图



(b)有效模场面积和波长的关系图

图2 有效折射率  $n_{\text{eff}}$  和有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  关系图

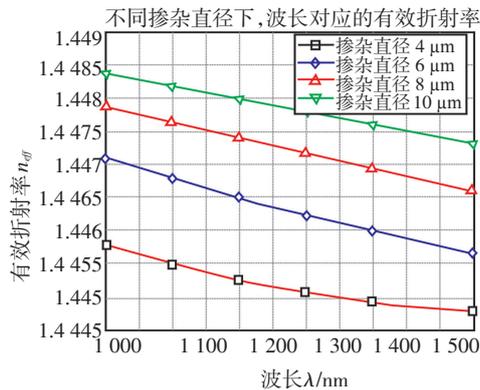
由图2a可以得出,有效折射率和输入波长近似为直线,随着输入波长的增大,光子晶体光纤的有效折射率不断减小。由图2b可以得出,随着输入波长的增大,光子晶体光纤的有效模场面积不断增大,有效模场面积和输入波长也近似为直线关系。

#### 2.2 掺杂半径的变化对光子晶体光纤特性的影响

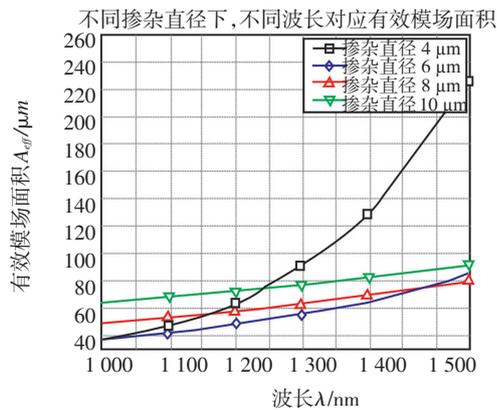
由于掺杂半径的变化,会引起纤芯和包层的相对折射率差的变化,影响光纤对光的束缚能力,使得光子晶体光纤的特性产生变化。

### 2.2.1 掺杂半径的变化对有效折射率的影响

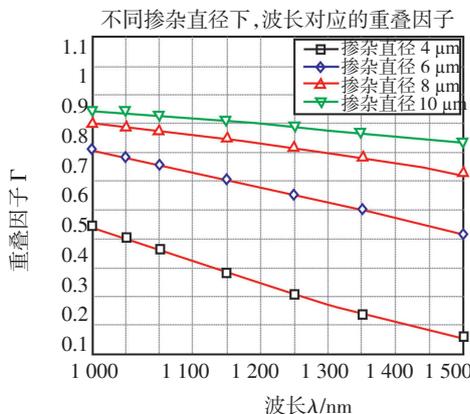
为了验证不同的掺杂半径下对基模的有效折射率分布的影响,设定掺杂折射率、空气孔直径和孔间距不变,通过改变掺杂直径来观察有效折射率分布。不同的掺杂直径下对应的有效折射率分布如图3a所示。由图3a可看出,分别取掺杂直径为: $d_{\text{dop}}=4\ \mu\text{m}$ 、 $6\ \mu\text{m}$ 、 $8\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 时,有效折射率随着波长的增加而减小。在同一波长时,随着掺杂直径的增大,有效折射率随着增大。并且掺杂直径越



(a) 掺杂直径与有效折射率的关系图



(b) 掺杂直径与有效模场面积的关系图



(c) 掺杂直径与重叠积分因子的关系图

图3 掺杂半径的变化对光子晶体光纤特性的影响

小,有效折射率随着波长的变化越明显。

### 2.2.2 掺杂半径的变化对有效模场面积的影响

通过改变掺杂半径来观察有效模场面积的变化,不同的掺杂直径下对应的有效模场面积分布如图3b所示。在图3b中可以看出,有效模场面积随着波长的增加而增大。随着掺杂直径的增大,有效模场面积随之减小。掺杂直径越小,有效模场面积随着波长的变化越明显,这是由于随着掺杂直径的减小,纤芯和包层的相对折射率差降低,光纤的限光能力相对减弱,导致光场向包层泄露,有效模场面积变大。并且在长波长区域光纤的限光能力要比短波长区域弱,这样也会使得有效模场面积的变大,所以掺杂直径越小的光纤,其有效模场面积越大。

### 2.2.3 掺杂半径的变化对重叠积分因子值的影响

光纤放大器的性能与掺杂光纤在泵浦和信号波长处的重叠积分因子值有着密切的联系。因此,有必要研究纤芯掺杂的光子晶体光纤的各个参量对重叠积分因子值的影响。

重叠积分因子 $|\Gamma|$ (overlap factor)的定义为:在整个横截面上,光功率在掺杂区域和光功率在全域的比例,也就是归一化的纵向光功率流密度在掺杂区域上的积分值。

$$\Gamma = \iint_{\text{doped}} i(x,y) dx dy \quad (3)$$

其中, $i(x,y)$ 是光场基模的归一化光功率密度。定义为 $^{[10]}$

$$i(x,y) = \frac{I_{\text{doped}}(x,y)}{I(x,y)} \quad (4)$$

其中, $I_{\text{doped}}(x,y)$ 是掺杂纤芯的光功率; $I(x,y)$ 是光子晶体光纤的总光功率。

通过改变掺杂半径来分析重叠积分因子,不同的掺杂直径下对应的重叠积分因子分布如图3c所示。由图3c可以得出,重叠因子 $\Gamma$ 值随着波长的增大而减小的趋势变缓。在相同的波长条件下,重叠因子 $\Gamma$ 随着掺杂直径的增大而增大。在同一掺杂直径,重叠因子 $\Gamma$ 随着掺杂直径的增大而较小。掺杂直径越小,随着波长的增大,对应的 $\Gamma$ 值变化趋势越明显。这是由于重叠积分因子是光功率的函数,随着掺杂直径的减小,纤芯和包层的相对折射率差降低,光纤的限光能力相对减弱,导致光场向包层泄露,光功率降低,从而 $\Gamma$ 值减小。

## 2.3 掺杂折射率的变化对光子晶体光纤特性的影响

掺杂折射率的变化,必然引起纤芯和包层的相对折射率差的变化,从而使得光子晶体光纤的特性产生变化。

### 2.3.1 掺杂折射率的变化对有效折射率的影响

为了验证不同的掺杂折射率下对有效折射率分布的影响,设定掺杂直径、空气孔直径和孔间距不变,通过改变掺杂折射率来观察有效折射率分布。为了记录方便,设定 $\Delta=n_{\text{core}}-n_{\text{clad}}$ 。掺杂折射率与有效折射率的关系如图4a所示。在图4a中,分别取掺杂折射率为: $n_{\text{dop}}=1.4466$ 、 $1.4496$ 、 $1.4546$ 时,有效折射率随着波长的增加而减小。在同一波长时,有效折射率随着掺杂折射率的增大而增大。并且掺杂折射率越小,有效折射率随着波长的变化越不明显。掺杂折射率越大,有效折射率随着波长的变化越明显。

### 2.3.2 掺杂折射率的变化对有效模场面积的影响

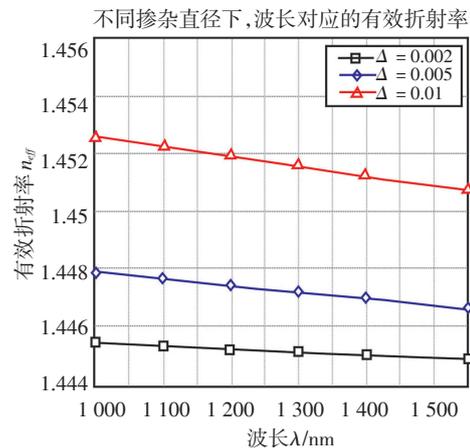
为了分析掺杂折射率的变化对有效模场面积的影响,设定掺杂直径、空气孔直径和孔间距不变,通过改变掺杂折射率来观察有效模场面积的分布。图4b是在不同的掺杂折射率下对应的有效模场面积分布图。由图4b可以看出,有效模场面积随着波长的增加而增大。在同一波长下,随着掺杂折射率的增大, $\Delta=n_{\text{core}}-n_{\text{clad}}$ 越大,有效模场面积变小。反之,有效模场面积变大。掺杂折射率越小,有效模场面积随着波长的变化越明显。这是由于纤芯和包层的相对折射率差降低,光纤的限光能力相对减弱,导致光场向包层泄露,有效模场面积变大,并且在长波长区域光纤的限光能力要比短波长区域弱,这样也会使得有效模场面积的变大,故在长波区域掺杂折射率越小的光纤,有效模场面积越大。

### 2.3.3 掺杂折射率的变化对重叠积分因子的影响

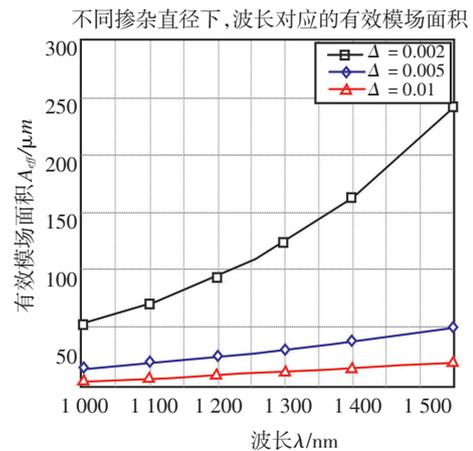
设定纤芯和包层的折射率差 $\Delta=0.002$ 、 $0.005$ 、 $0.01$ ,掺杂直径、空气孔直径和孔间距不变,通过改变掺杂折射率来观察对重叠积分因子的影响。掺杂折射率与重叠积分因子的关系如图4c所示。

由图4c可以看出,随着折射率差 $\Delta$ 增大,重叠因子 $\Gamma$ 值随着波长的增大而减小的趋势变缓。在相同的波长条件下,重叠因子 $\Gamma$ 随着掺杂折射率的增大而增大。在同一掺杂直径,重叠因子 $\Gamma$ 随着掺杂折射率的增大而增大。掺杂折射率越大,折射率差

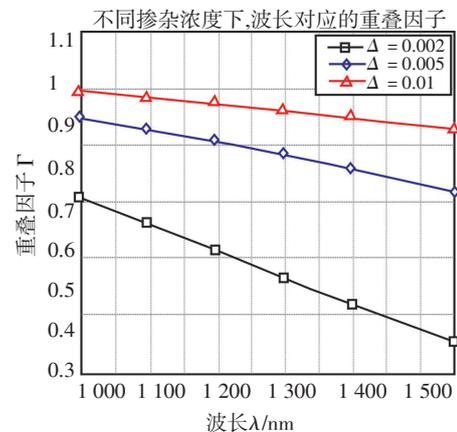
$\Delta$ 也增大,在长波长区域对应的 $\Gamma$ 值越大。随着波长的增大,掺杂折射率越小,对应的 $\Gamma$ 值减小趋势越明显。这是由于纤芯和包层的相对折射率差降低,光纤的限光能力相对减弱并且在长波长区域光纤的限



(a) 掺杂折射率与有效折射率的关系图



(b) 掺杂折射率与有效模场面积的关系图



(c) 掺杂折射率与重叠积分因子的关系图

图4 掺杂折射率的变化对光子晶体光纤特性的影响

(下转第56页)

理方法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(5): 710-713.

- [16] 顾铮, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展[J]. 中国激光, 2009 (6): 1317-1326.
- [17] 孟展, 陈瑞霞, 金何, 等. 基于双材料悬臂梁的光纤光栅应力与温度传感器[J]. 光电子·激光, 2011, 22 (3): 343-346.
- [18] 曾虹, 乐淑萍, 刘月明. 高温光纤布拉格光栅“T”型应变片技术研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26 (3):

338-341.

- [19] 安佳丽, 梁厚慧, 金永兴, 等. 基于倾斜光纤光栅的温度不敏感振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39 (B06): 402-406.
- [20] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 182-185.
- [21] 蔡怀崇, 闵行. 材料力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 93-96.

(上接第30页)

光能力要比短波长区域弱, 光场向包层泄露, 光功率降低, 从而 $\Gamma$ 值减小趋势越明显。

### 3 结论

通过对气孔八边形排列的光子晶体光纤进行数值模拟计算发现, 掺杂纤芯直径、掺杂折射率是影响掺杂光子晶体光纤的关键因素。掺杂纤芯直径、掺杂折射率的变化会引起纤芯和包层的相对折射率差的变化, 从而使得光功率分布发生变化, 引起掺杂光子晶体光纤的特性变化。这些规律对使用光子晶体光纤构建高功率光纤激光器、光纤放大器提供了必要的理论指导。

### 参考文献

- [1] 王伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. 激光与光电子学进, 2008, 45(2): 43-58.
- [2] Cucinotta A, Selleri S, Vincetti L, et al. Holey fiber analysis through the finite-element method [J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2002, 14(11):1530-1532.

- [3] 关春颖, 苑立波. 基于有限元方法的光子晶体光纤特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(4):532-535.
- [4] 吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 267-269.
- [5] Haxha S, Ademgil H. Novel design of photonic crystal fibers with low confinement losses, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area[J]. Opt. Communications, 2008, 281 (2) 278-286.
- [6] Beeker P C, Olsson N A, SimPson J R. Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology[M]. San Diego: Academic Press, 1999:140-144.
- [7] 李书婷. 光子晶体光纤的数值模拟[D]. 西安: 西北大学, 2006.
- [8] Lim H, Ilay F, Wise F. Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control [J]. Opt. Express, 2002, 10(25):1497-1502.
- [9] 宋有建, 胡明列, 张弛, 等. 高脉冲能量大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器[J]. 科学通报, 2008, 53(13):1511-1515.
- [10] Randy C Gile, Emmanuel Desurvire. Modeling Erbium-doped fiber amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9 (2):271-283.

(上接第45页)

- [2] 阎石. 数字电子技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 475-477.
- [3] 谢自美. 电子线路设计[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003: 105-109.
- [4] 李运涛, 王庸贵, 刘继平. 一种实时数据采集与监控系统[J]. 中国测试技术, 2004, 30(1): 25-28.
- [5] 罗苑棠. CPLD/FPGA 常用模块与综合系统设计实例精

讲[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 22-25.

- [6] 高健. 动态参数检测与虚拟仪器综合系统[J]. 国外电子元件, 2006, 14(2): 60-61.
- [7] 赵俊超. 集成电路设计VHD教程[M]. 北京: 希望电子出版社, 2002: 47-49.
- [8] 李红旗, 李东光, 李世义. 基于CPLD的弹载高速存储测试系统关键技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 72(1): 1-3.