

文章编号: 1001-3806(2007)05-0493-03

## 光子晶体光纤耦合损耗的数值研究

王润轩

(宝鸡文理学院 物理系, 宝鸡 721007)

**摘要:** 光子晶体光纤 (PCF) 与普通单模光纤 (SMF) 以及不同结构光子晶体光纤之间的耦合损耗是急待解决的问题, 采用光子晶体光纤的本地正交函数模型, 对光子晶体光纤与普通单模光纤以及不同结构光子晶体光纤之间的耦合损耗进行了分析计算, 得到了耦合损耗随光子晶体光纤结构参量以及波长的变化关系, 给出了最优耦合的光子晶体光纤的结构参量。结果表明, PCF 的孔距  $\Lambda$  是影响 PCF 与 SMF 耦合损耗的最主要因素, 当  $\Lambda$  为某个特定值时, PCF 与 SMF 的模场半径相等, 耦合损耗最小, 偏离这个特定值时的耦合损耗都会增大; PCF 之间的耦合损耗取决于它们孔距的差异; 此外由于模场半径与波长有关, 当波长为某个特定值时, PCF 与 SMF 模场半径相等, 此时耦合损耗也最小。因此, 在 PCF 设计过程中应综合考虑这些相关因素。

**关键词:** 光纤光学; 正交函数模型; 耦合损耗; 结构参量

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A

### Number study on the coupling loss of the photonic crystal fiber

WANG Run-xuan

(Department of Physics, Baoji College of Arts and Science, Baoji 721007, China)

**Abstract:** The coupling loss between photonic crystal fiber (PCF), single mode fiber (SMF), and other PCF with different structure is an urgent problem to be solved today. The local orthogonal functions model of PCF was applied to theoretical analysis of the coupling loss between PCF, SMF and PCF with different structures. The relation between coupling loss and the structural parameter of PCF and mode wavelength was obtained, and the optimal structural parameter was given. The result shows that (1) the main factor that affects the coupling loss between PCF and SMF is the hole space  $\Lambda$  of PCF. When the hole space is fixed to a certain value and the mode radii of PCF and SMF are the same, the coupling loss reaches its minimum value, i.e., any deviation from this value will increase the coupling loss. (2) The coupling loss between PCFs is determined by the difference of their hole spaces. As the mode radius depends on mode wavelength, the coupling loss will also be in its minimum value when wavelength keeps constant and the mode radii of PCF and SMF are the same. Therefore, the factors should be comprehensively considered in the design process of PCF.

**Key words:** fiber optics; orthogonal functions model; coupling loss; structural parameter

## 引 言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 通常由单质材料 (如纯石英玻璃等) 和一组沿光纤长度方向周期排列气孔构成, 在光纤的芯区引入缺陷 (实芯或空芯), 即能形成导光的纤芯, PCF 的导光机制有两种: 全内反射 (total internal reflection, TIR) 限制和光子带隙 (photonic bandgap guiding, PBG) 限制。全反射限制的 PCF 的导光原理与常规光纤依赖于光在纤芯包层界面全内反射的传输原理相似<sup>[1~3]</sup>; 而带隙限制的

PCF 中光的传播是基于二维折射率周期变化的介质结构所形成的光子带隙对缺陷 (实芯或空芯纤芯) 中的光实现约束。这种带隙效应对包层周期性结构的精度要求很高, 制造极其困难, 因此, 目前关于 PCF 的应用研究大多限于前一类光纤。PCF 拥有诸多普通光纤无法比拟的优良特性, 有着广阔的应用前景<sup>[4~9]</sup>。然而, 无论是用于传输还是多种特性 PCF 的结合使用、特种器件制作、乃至 PCF 自身特性的测量方面, 都将遇到 PCF 与普通光纤之间、不同结构 PCF 之间的耦合问题, 如何降低耦合损耗、寻求最佳耦合方案已成为当务之急。作者利用 PCF 的本地正交基函数模型<sup>[3]</sup>, 对光子晶体光纤与普通单模光纤以及不同结构光子晶体光纤之间的耦合损耗进行了分析计算, 得到了耦合损耗随光子晶体光纤结构参量以及波长的变化关系, 给出了最优耦合的光子晶体光纤的结构参量, 为 PCF 的

基金项目: 陕西省教育厅专项基金资助项目 (04JK121)

作者简介: 王润轩 (1953-), 男, 教授, 研究方向为非线性光纤光学等。

E-mail: wangrunxuan53629@163.com

收稿日期: 2006-08-01; 收到修改稿日期: 2006-09-08

设计、结合使用、特种器件制作提供了有价值的参考。

### 1 理论模型与计算方法

#### 1.1 正交函数模型

假设导模型 PCF中沿纵向 (z方向) 均匀, 忽略光纤损耗情况下, 其模式电场可以分解为:

$$\vec{E}(x, y, z) = [\vec{e}_x(x, y) + \vec{e}_z(x, y)] \exp(j\beta z) \quad (1)$$

式中,  $\vec{e}_x(x, y) = e_x \hat{x} + e_y \hat{y}$ ,  $\vec{e}_z(x, y)$  分别是电场的横向分量与纵向分量,  $\beta$  为传输常数。若不计光纤的衰减, 将模式电场的表达式 (1) 式代入矢量波方程, 可以得到横向模式电场  $e_x(x, y)$ ,  $e_y(x, y)$  的耦合波方程, 若不计两偏振模的耦合过程, 将得到:

$$\begin{cases} (\nabla_x^2 - \beta_x^2 + k^2 n^2) e_x = - \frac{\partial}{\partial x} e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} \\ (\nabla_y^2 - \beta_y^2 + k^2 n^2) e_y = - \frac{\partial}{\partial y} e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\beta_x, \beta_y$  分别是沿  $x, y$  方向的两个偏振模式的传播常数,  $n^2 = n^2(x, y)$  是光纤的横向折射率分布,  $k = 2\pi/\lambda$  是真空中波数,  $\nabla_x^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  为拉普拉斯算符的横向分量。为了解 (2) 式, 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, 选 Hemite-Gaussian 函数将模式电场展开, 即:

$$\begin{cases} e_x(x, y) = \sum_{a,b=1}^{F-1} \epsilon_{ab} \psi_a(x) \psi_b(y) \\ e_y(x, y) = \sum_{a,b=1}^{F-1} \epsilon'_{ab} \psi_a(x) \psi_b(y) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $F$  为展开式的项数,  $\epsilon_{ab}, \epsilon'_{ab}$  分别为  $x, y$  向展开系数,  $\psi_i(s)$  ( $i = a, b, s = x, y$ ) 是正交归一化 Hemite-Gaussian 函数, 定义为:

$$\psi_i(s) = \frac{2^{-i} \pi^{-1/4}}{\sqrt{(2i)! \omega}} \exp\left(-\frac{1}{2\omega^2} s^2\right) H_{2i}(s/\omega) \quad (4)$$

式中,  $H_{2i}(s/\omega)$  是  $2i$  阶 Hemite 函数,  $\omega$  为特征宽度。用叠加法将 PCF 横向折射率  $n^2$  和  $\ln n^2$  表示为:

$$\begin{cases} n^2(x, y) = \sum_{a,b=0}^{P-1} P_{ab} \cos \frac{2\pi ax}{l_x} \cos \frac{2\pi by}{l_y} + \sum_{a,b=0}^{D-1} D_{ab} \cos \frac{2\pi ax}{m l_x} \cos \frac{2\pi by}{m l_y} \\ \ln n^2(x, y) = \sum_{a,b=0}^{P-1} P'_{ab} \cos \frac{2\pi ax}{l_x} \cos \frac{2\pi by}{l_y} + \sum_{a,b=0}^{D-1} D'_{ab} \cos \frac{2\pi ax}{m l_x} \cos \frac{2\pi by}{m l_y} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P_{ab}, D_{ab}, P'_{ab}, D'_{ab}$  分别为两种周期性结构  $PC_1$  和  $PC_2$  的展开式项数,  $l_x, l_y$  分别是周期性折射率分布在  $x, y$  方向上的周期长度,  $m$  为  $PC_2$  与  $PC_1$  的周期比值, 也就是超格子的归一化尺寸。将 (3) 式代入 (2) 式, 可

得两个偏振模的特征方程<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} e_x : \sum_{c,d}^F \epsilon_{cd} [I_{abcd}^{(1)} + k^2 I_{abcd}^{(2)} + I_{abcd}^{(3)}] = \beta_x^2 \epsilon_{ab} \\ e_y : \sum_{c,d}^F \epsilon'_{cd} [I_{abcd}^{(1)} + k^2 I_{abcd}^{(2)} + I_{abcd}^{(3)}] = \beta_y^2 \epsilon'_{ab} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $I_{abcd}^{(1)}; I_{abcd}^{(2)}; I_{abcd}^{(3)}$  都有解析表达式, 限于篇幅而略去, 可参阅文献 [3]。通过给定波长求解 (6) 式即可得到模式电场分布, PCF 的模场面积定义为<sup>[5]</sup>:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\int \int E(x, y)^2 dx dy}{\int \int E(x, y)^4 dx dy} \quad (7)$$

式中,  $E(x, y)$  为模式电场分量, 由 (7) 式可算出与波长有关的模场半径。

#### 1.2 耦合损耗的计算方法

光子晶体光纤与普通单模光纤 (single mode fiber, SMF) 进行耦合时, 影响耦合损耗的因素主要有: 光纤间的模场失配、横向偏移、以及轴向倾斜等。由于 PCF 的模场分布与 SMF 的差别很大, 且随结构参数的变化而变化, 因此模场失配产生的耦合损耗不仅影响最大, 而且是影响耦合损耗最主要因素。光纤耦合损耗可由下式计算, 而三角格子 PCF 的基模可近似为高斯模场分布, 因此同样适用于 PCF 的耦合损耗计算:

$$\alpha_{\text{loss}} = -10 \lg \left[ \frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right]^2 \quad (8)$$

式中,  $w_1$  和  $w_2$  分别为 PCF 和 SMF 的模场半径。

### 2 计算结果与分析

#### 2.1 PCF 结构参量对 PCF 与 SMF 耦合损耗的影响

计算中波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , SMF 的模场半径  $w_2 = 5.2 \mu\text{m}$ , 图 1a 为 PCF 模场半径随孔距  $\Lambda$  的变化关系。

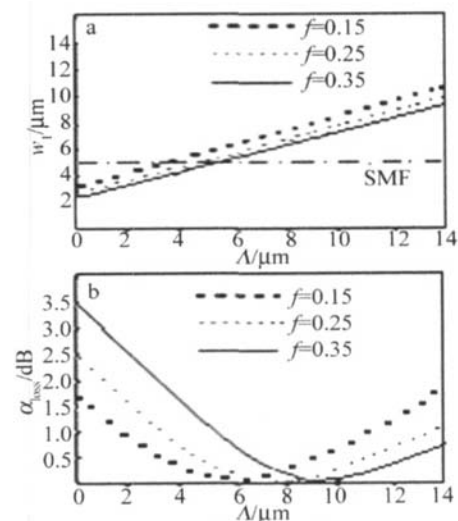


Fig 1 a—the mode field radius with the variation of hole distance b—the coupling loss with the variation of hole distance

空气孔的直径用  $d$  表示,当填充比  $f = d/\Lambda$  一定时,即纤芯与包层等效折射率差一定,可以理解为等效包层对光场约束能力一定,因此,增大  $\Lambda$  相当于增大 PCF 的横向折射率分布,模场半径也随之同比的增大,这里的理论分析与图 1 的计算结果是相符的。由图 1a 还可看出,随着填充比的减小,曲线位置上移,也正好说明等效包层对光场约束能力减小,导致模场半径增大。图 1b 是对于不同的填充比  $f$ , PCF 与 SMF 耦合损耗随 PCF 孔距  $\Lambda$  的变化关系同于 SMF 耦合的特点。

按照传统光纤理论,入射光为高斯光束时,由图 1a 和图 1b 可知,当  $\Lambda$  较小时,PCF 的模场半径比 SMF 的模场半径小得多,两光纤间的耦合损耗较大,随着  $\Lambda$  的增大,PCF 的模场半径随之增大,两光纤间的耦合损耗逐渐减小。当  $\Lambda$  增大到某个值时(如 0.15, 0.25, 0.35 时,  $\Lambda$  约为  $6.35\mu\text{m}$ ,  $7.35\mu\text{m}$ ,  $8.4\mu\text{m}$ ), PCF 的模场半径与 SMF 的模场半径相等,这时二者之间的耦合损耗最小。当  $\Lambda$  继续增大时,由于 PCF 的模场半径大于 SMF 的模场半径,耦合损耗随着  $\Lambda$  的增大而增大。因此,对于给定的填充比  $f$ ,只有  $\Lambda$  为某一特定值时,两光纤间才有最佳耦合,亦即有最小的耦合损耗,否则,将会招致大的耦合损耗。 $f_1 = d_1/\Lambda_1 = 0.25$ 。计算结果表明,当  $\Lambda$  增大时,耦合损耗受  $f$  差异的影响逐渐在减弱。

### 2.2 不同结构 PCF 之间的耦合损耗

图 2a 为耦合的两侧 PCF 的  $\Lambda$  相等,耦合损耗随  $f$

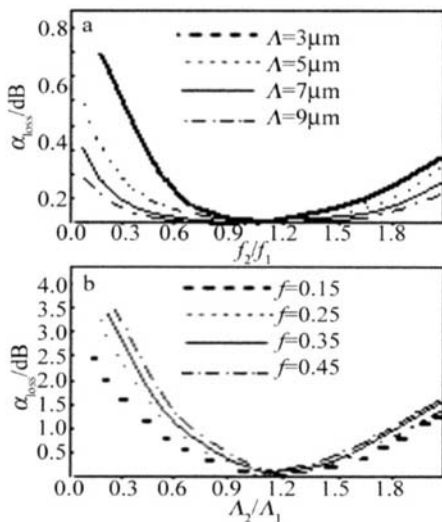


Fig 2 a—the coupling loss with the variation of  $f_2/f_1$  b—the coupling loss with the variation of  $\Lambda_2/\Lambda_1$

差异的变化关系曲线,设  $f_1 = 0.25$ 。结果表明,当  $\Lambda$  较大时,耦合损耗受  $f$  差异的影响不明显。图 2b 为耦合的两侧 PCF 有着相等的填充比  $f$ ,而其间耦合损耗随其  $\Lambda$  的差异而变化关系,其中  $\Lambda_1 = 7\mu\text{m}$ 。由图可见,随着  $\Lambda$  的差异的增大,其间耦合损耗的变化幅度较大,但是,对于不同的填比  $f$ ,耦合损耗曲线的差异并不

太大,且随着填充比  $f$  的增大这种差异会更小。这足以说明影响两种不同结构的 PCF 之间耦合损耗大小的主要参量是 PCF 的  $\Lambda$  差异。

### 2.3 波长对 PCF 与 SMF 耦合损耗的影响

图 3a 和图 3b 分别是  $\Lambda = 7.35\mu\text{m}$ 、填充比  $f =$

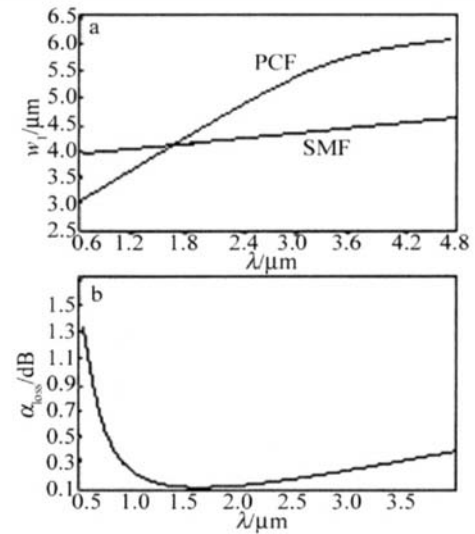


Fig 3 a—the mode field radius with the variation of wavelength  $\lambda$  b—the coupling loss with the variation of wavelength  $\lambda$

0.25 时, PCF 的模场半径  $w_1$  (见图 3a) 和耦合损耗系数  $\alpha_{\text{loss}}$  (见图 3b) 随波长的变化关系。由图 3a、图 3b 可知,当波长较小时, PCF 的模场半径比 SMF 的大得多,二者之间耦合损耗较大,随着波长增大, SMF 的模场半径比 PCF 的增加得更快,二者间模场半径差距变小,耦合损耗也随之减小。当波长增大到某个特定值 ( $1.65\mu\text{m}$ ) 时, PCF 与 SMF 模场半径相等,此时耦合损耗也最小,当波长继续增大时, SMF 模场半径将大于 PCF 模场半径,耦合损耗也随之增大。由此可见,对于给定的结构参量,仅在特定波长处才有最小耦合损耗,因此,在设计 PCF 时应考虑波长对耦合损耗的影响。

### 3 小结

应用 PCF 的本地正交基函数模型,对 PCF 与 SMF 以及不同 PCF 之间的耦合损耗进行了分析计算,得到了耦合损耗随 PCF 结构参量以及波长的变化关系,给出了最优耦合的光子晶体光纤的结构参量。研究表明: PCF 的孔距  $\Lambda$  是影响 PCF 与 SMF 耦合损耗的最主要因素,当  $\Lambda$  为某个特定值时, PCF 与 SMF 的模场半径相等,耦合损耗最小,偏离这个特定值时的耦合损耗都会增大; PCF 之间的耦合损耗取决于它们孔距的差异;由于模场半径与波长有关,当波长为某个特定值时, PCF 与 SMF 模场半径相等,此时耦合损耗也最小。因此,在 PCF 设计过程中应综合考虑这些相关因素。

(下转第 521 页)



具有足够的熔覆层厚度,确保修复余量。

采取防塌陷工艺后,齿面激光熔覆修复效果如图 7 所示。齿顶处的熔覆层约 0.7mm,使齿顶高增大也就是实际后加工量约 0.3mm,保证了加工余量。

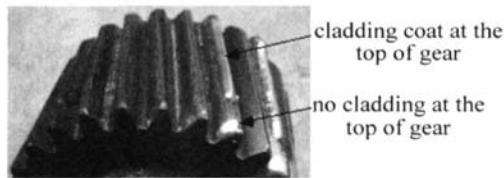


Fig 7 Laser cladding coat at the top of gear with the craft of preventing from collapsing

## 4 结 论

以实验为依据,针对齿面激光修复中容易出现的边界塌陷问题,提出了有效可行的解决方法。

由于齿面激光熔覆中,进出端面以及齿顶的塌陷情况不尽相同,因此在样块实验的基础上,针对这两种情况分别提出了不同的解决方法,即在进出端面采取外接物体使边缘地带移至基体之外,以及对齿顶采取包覆的方法,解决了边缘塌陷的问题。实验结果证明,该方法是有效的。其中对端面采取外接物体的方法具有较强的可移植性,可适用于其它零件的激光熔覆。

### 参 考 文 献

[1] HUANG R F, LUO J M, WANG Ch Q. Application and developments

of laser cladding technology [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28 (4): 57~58 (in Chinese).

- [2] XIAO H J, PENG Y, MA Ch Y. Surface modification of laser [J]. Surface Technology, 2005, 34 (5): 10~12 (in Chinese).
- [3] ZHOU X W, WANG X Zh. Application of the laser processing technology in industry [J]. Journal of Zhongzhou University, 2005, 22 (4): 110~111 (in Chinese).
- [4] LU J B, WANG Zh X, XI Y J. Calculation of temperature field in laser cladding using FEM [J]. Journal of Zhongyuan Institute of Technology, 2005, 16 (6): 58~60 (in Chinese).
- [5] HUANG Y L, ZOU D N, LANG G Y. Numerical simulation on cladding track, fluid flow field and temperature field in laser cladding process with power feeding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32 (5): 330~334 (in Chinese).
- [6] ZENG D W, XIE Ch Sh. A numerical simulation for two dimensional quasi-state fluid flow field and temperature field in the molten pool of laser cladding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35 (6): 604~610 (in Chinese).
- [7] LI Sh, HU Q W, ZENG X Y. Effect of laser mode on the quality of laser cladding layers [J]. Laser Technology, 2005, 29 (6): 667~669 (in Chinese).
- [8] HUANG Y L, LI G, LANG G Y. Effect of powder feeding rate on interaction between laser beam and powder stream in laser cladding process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34 (10): 1520~1523.
- [9] WU G, SHI J, DAI Zh S. The scanning techniques and technology for gear laser harden [J]. Applied Laser, 1998, 18 (4): 151~154 (in Chinese).
- [10] SONG G M, WU G, HUANG W J. Cracking control in laser cladding process with unidirectional powder feeding and double scanning [J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30 (5): 26~28 (in Chinese).

(上接第 495 页)

### 参 考 文 献

[1] PENG W, GAO S J, ZHANG L *et al*. Influence of the change of refractive index in the cladding of photonic crystal fiber on photonic bandgap [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22 (5): 777~780 (in Chinese).

[2] DENG Y L, YAO J Q, RUAN Sh Ch *et al*. High power photonic crystal fiber laser and key issues [J]. Laser Technology, 2005, 29 (6): 596~598 (in Chinese).

[3] RENG G B, WANG Zh, LOU Sh Q *et al*. Localized orthogonal function model of the photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (8): 1130~1136 (in Chinese).

[4] WANG R X, DOU Ch Sh, ZHOU Ch L *et al*. Dispersion characteristics of photonic crystal fiber [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26 (3): 249~252 (in Chinese).

[5] LEE J H, BELARD I W, FURUSAWA K *et al*. Fourwave mixing based

10Gbit/s tunable wavelength conversion using a holey fiber with a high SBS threshold [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15 (3): 440~442.

- [6] PETROPULOS P, HE DEPR IEM H E, FNAZZIV *et al*. Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers [J]. Optical Express, 2003, 11 (13): 3568~3573.
- [7] LU B, LI H, HUANG D X *et al*. Study on dispersion properties of photonic crystal fiber with orthogonal function methods [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2006, 19 (1): 29~33 (in Chinese).
- [8] FANG H, LOU Sh Q, REN G B. Theoretical analysis on splice loss of photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26 (6): 806~811 (in Chinese).
- [9] LI Ch L, SHENG Q Q. The relation between the nonlinear coefficient of PCF and its geometry parameters and the optical wavelength [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35 (5): 734~737 (in Chinese).