

文章编号: 0258-7025(2006)06-0775-04

包层空气孔孔径的不均匀性对微结构光纤 非线性系数的影响

王 健^{1,2}, 余重秀¹

(¹ 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; ² 北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要 在基于微结构光纤(MOFs)的非线性装置中,光纤的非线性系数是一个很重要的参数,它受包层空气孔不均匀性的影响。用全矢量有限元法和误差理论分析了包层空气孔孔径的不均匀性对六角形高非线性微结构光纤非线性系数的影响。通过计算,得到了这种光纤 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模的非线性系数与每个空气孔孔径之间的关系,从而进一步得到了非线性系数的标准差与包层空气孔孔径标准差之间的关系。这样,在已知孔径的标准差时,很容易得到非线性系数的标准差。当孔径标准差与孔径设计值的比为 5% 时, HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模非线性系数标准差与均匀孔径情况下非线性系数值的比分别为 2.55% 和 3.06%。

关键词 光通信;微结构光纤;有限元法;非线性系数;标准差

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Effect of Hetero-Diameters of Cladding Air Holes on Nonlinearity Coefficient of Microstructured Optical Fibers

WANG Jian^{1,2}, YU Chong-xiu¹

(¹ School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

² School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The nonlinearity coefficient of microstructured optical fibers (MOFs) is a quantity of great importance in devices based on the nonlinearity of the fibers. The distribution asymmetry of the cladding air holes can make an impact on it. The effect of hetero-diameters of the cladding air holes on the nonlinearity coefficient of a highly nonlinear MOFs with a hexagonal lattice is analyzed by the full-vector finite element method and the error theory. The dependence of the nonlinearity coefficients of the HE_{11}^x and HE_{11}^y modes of the fiber on the diameter of cladding air hole is computed. Subsequently, the dependence of the standard error of the nonlinearity coefficients on the standard error of the diameters of the air holes is obtained. As a result, if the standard error of the diameters of the air holes is given, it is easy to obtain the standard error of the nonlinearity coefficients. When the ratio of the air hole diameter standard error to the designed diameter is 5%, the ratios of the nonlinearity coefficient standard errors of the HE_{11}^x and HE_{11}^y modes to the nonlinearity coefficient of the fiber with uniform cladding air holes are 2.55% and 3.06%, respectively.

Key words optical communication; microstructured optical fibers; finite element method; nonlinearity coefficient; standard error

1 引 言

微结构光纤(MOFs)的非线性系数可以达到普通光纤的 10~100 倍^[1],利用长度比普通光纤短得

多的微结构光纤可以产生足够强的非线性相互作用^[1~8]。因此利用高非线性的微结构光纤可以获得小巧、紧凑的光通信装置,如基于光纤非线性的光开关、波长变换器、光纤激光器和光纤放大器等。

收稿日期:2005-09-26;收到修改稿日期:2006-01-11

基金项目:国家 973 计划(2003CB314906)资助项目。

作者简介:王 健(1963—),男,天津人,北京交通大学理学院副教授,北京邮电大学电子工程学院博士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail:jianwang@science.njtu.edu.cn

在以往的理论分析中,总是把微结构光纤包层上的空气孔看成均匀的理想结构。但由于制造上的各种原因,使实际微结构光纤包层上空气孔孔径、孔距不可能严格相等,有时空气孔也不是规则的圆形。K. L. Reichenbach 等用多极法数值模拟了包层空气孔的非均匀性对双折射、损耗和色散的影响^[9]。

包层空气孔孔径的不均匀性使本来复杂的微结构光纤结构更加复杂。有限元法是一种对微结构光纤进行全矢量分析的精确、通用的计算方法^[10~13]。本文使用全矢量有限元法分析六角形高非线性微结构光纤包层空气孔孔径的不均匀性对其非线性系数的影响,得到的研究结果将对微结构光纤的制造和使用有一定的参考价值。

2 理 论

由麦克斯韦方程组可以得到微结构光纤中光波的亥姆霍兹方程为

$$\nabla \times (\epsilon_r^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) - k_0^2 \mathbf{H} = 0, \quad (1)$$

式中 \mathbf{H} 为磁场强度, ϵ_r 为相对电容率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, λ 为真空中的波长。(1) 式的泛函可写为

$$F(\mathbf{H}) = \int (\nabla \times \mathbf{H})^* \cdot ([\epsilon_r]^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) ds - k_0^2 \int \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{H} ds, \quad (2)$$

使用有限元原理可以得到上述泛函的本征值方程为

$$[\mathbf{A}]\{\mathbf{H}\} = n_{\text{eff}}^2 [\mathbf{B}]\{\mathbf{H}\}, \quad (3)$$

这里本征矢量 $\{\mathbf{H}\}$ 和本征值 n_{eff}^2 分别代表横截面上的磁场强度分布和模有效折射率的平方; $[\mathbf{A}]$ 和 $[\mathbf{B}]$ 为系数矩阵。基模的有效面积为^[14]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\iint I dx dy}{\iint I^2 dx dy}, \quad (4)$$

式中 I 为光强度分布。微结构光纤非线性系数 γ 为

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (5)$$

式中 n_2 为石英的非线性折射率。

通过求解(3)式可得到横截面是任意结构时光波的磁场强度分布和模有效折射率,再通过(4)和(5)式可求出微结构光纤的非线性系数。

按照误差理论,包层空气孔孔径的不均匀性可用孔径的标准差来表示。第 i 个孔孔径 d_i 偏离设计值 d 的标准差 S_{d_i} 的定义为

$$S_{d_i} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (d_k - d)^2},$$

式中 d_k 为此孔在第 k 次拉制过程中形成的孔径, m 为总的拉制次数。同样非线性系数所受的影响可以用非线性系数的标准差来表示,其定义与孔径的标准差类似。分析孔径的不均匀性对非线性系数的影响,实际上就是计算在给定孔径标准差的情况下求非线性系数的标准差。

非线性系数与许多参数有关,如空气孔间距、孔径、入射光的波长等。若取其他参量为常量,非线性系数仅是包层空气孔孔径的函数,对于包层空气孔孔径均匀的情况,可用统一的 d 表示孔径;对于非均匀的情况,孔径分别用 d_1, d_2, \dots, d_n 表示 (n 为包层空气孔的个数)。

考虑到高非线性六角形微结构光纤的能量主要集中在纤芯中,那么对非线性系数影响最大的是图 1 中最靠近纤芯的第一层 6 个空气孔孔径的改变,其他的空气孔对它的影响很小。为了简便,只考虑靠近纤芯 6 个空气孔孔径的改变对非线性系数的影响,而假设其他空气孔孔径是均匀的(后面的计算结果可以证明这种近似是可行的),这时非线性系数 γ 可以简化为这 6 个空气孔孔径的函数,即

$$\gamma = \gamma(d_1, d_2, \dots, d_6), \quad (6)$$

由误差传递公式, γ 的标准差 S_γ 与反映孔径非均匀性的标准差 S_{d_i} 之间的关系为

$$S_\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial d_1} S_{d_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial d_2} S_{d_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial d_6} S_{d_6}\right)^2}, \quad (7)$$

若每个孔径的标准差都相同,即 $S_{d_1} = S_{d_2} = \dots = S_{d_6} = S_d$;再考虑到孔 1 与孔 4 的孔径从设计值分别改变相同的值时,对模场面积的影响相同,由(4)式可知,两孔对非线性系数的影响应相同(计算表明确

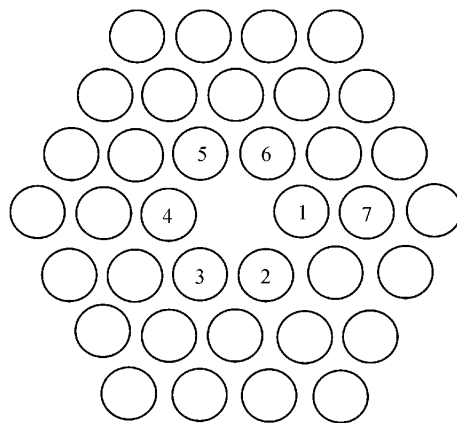


图 1 六角形微结构光纤截面图

Fig. 1 Cross section of MOFs with hexagonal lattice

实如此)。同理,孔 2,3,5 与孔 6 对非线性系数的影响也相同,那么(7)式可进一步写为

$$S_y = \sqrt{2\left(\frac{\partial\gamma}{\partial d_1}\right)^2 + 4\left(\frac{\partial\gamma}{\partial d_2}\right)^2} S_d, \quad (8)$$

这样通过有限元法计算出 $\partial\gamma/\partial d_1$ 和 $\partial\gamma/\partial d_2$, 就可以利用(8)式计算出非线性系数的标准差与空气孔孔径标准差之间的关系。

3 结果与讨论

文献[15]中的高非线性六角形微结构光纤的具体参数为:空气孔间距 $\Lambda = 1.1 \mu\text{m}$, 孔径 $d = 0.99 \mu\text{m}$, 石英的折射率 $n = 1.45$, 入射光的波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 石英的非线性折射率 $n_2 = 2.76 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

为了验证所使用的全矢量有限元法的正确性,首先计算包层空气孔孔径均匀且采用上述参数的情况下光纤的非线性系数,计算出的结果为 $\gamma = 75.5$ 。而文献[15]的图 3 中给出的非线性系数 γ 在 75 和 76 之间。通过计算发现,计算结果与文献中给出的结果一致性很好,说明本文的计算方法是可靠的。

另外,为了比较各层空气孔孔径改变对非线性系数的影响,还计算了仅第一层孔 1 孔径改变或第二层孔 7 孔径改变这两种情况下,非线性系数分别改变了多少。计算结果表明当两孔径都增大或减少 $0.07 \mu\text{m}$ 时,孔 1 孔径的改变使 HE_{11}^x 模的 γ 改变 0.8 左右,使 HE_{11}^y 模的 γ 改变 1.5 左右,而孔 7 孔径的改变使 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模的 γ 都改变 0.05 左右。这说明第一层空气孔孔径改变对非线性系数的影响要比第二层的影响大一个数量级以上。因此在计算孔径改变对非线性系数的影响时,只考虑第一层空气孔孔径改变的近似是正确的。

在其他孔孔径不变的情况下,非线性系数随孔 1 孔径的变化关系如图 2 所示。从这两条曲线可以得到 HE_{11}^x 与 HE_{11}^y 模的 $\partial\gamma/\partial d_1$ 的值分别为 21.8601 和 11.6845,可见孔 1 孔径的变化对 HE_{11}^x 模的非线性系数影响比 HE_{11}^y 模大一些。

在其他孔孔径不变的情况下,非线性系数随孔 2 孔径的变化关系如图 3 所示。从此图可以得到 HE_{11}^x 与 HE_{11}^y 模的 $\partial\gamma/\partial d_2$ 的值分别为 11.8250 和 21.8274,可见与孔 1 的情况正好相反,孔 2 孔径的变化对 HE_{11}^y 模的非线性系数影响比 HE_{11}^x 模要大一些。

对上面结论的解释是:当孔 1 孔径从均匀的值

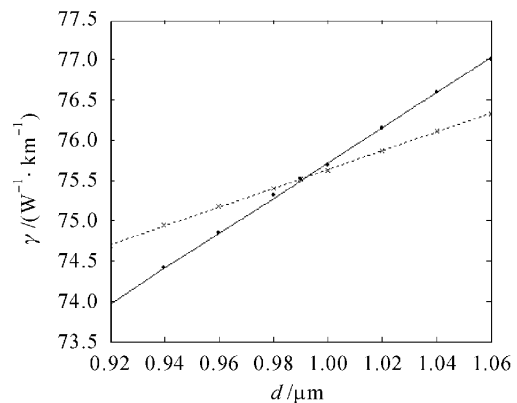


图 2 非线性系数随孔 1 孔径的变化关系

• 与 × 分别表示用有限元法计算出的 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模的非线性系数在不同孔径下的值,实线和虚线分别为 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模非线性系数随孔 1 孔径的变化关系的拟合曲线

Fig. 2 Nonlinearity coefficient as a function of the diameter of the air hole 1

• and × differently show nonlinearity coefficient computed values of HE_{11}^x and HE_{11}^y modes for the different diameters. The fitted curves (solid line and the dash line) represent nonlinearity coefficients of HE_{11}^x and HE_{11}^y modes, respectively, as a function of the diameter of the air hole 1

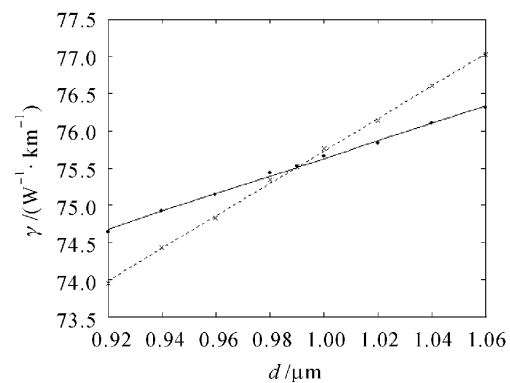


图 3 非线性系数随孔 2 孔径的变化关系

• 与 × 分别表示用有限元法计算出的 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模的非线性系数在不同孔径下的值,实线和虚线分别为 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模非线性系数随孔 2 孔径的变化关系的拟合曲线

Fig. 3 Nonlinearity coefficient as a function of the diameter of the air hole 2

• and × differently show nonlinearity coefficient computed values of HE_{11}^x and HE_{11}^y modes for the different diameters. The fitted curves (solid line and the dash line) represent nonlinearity coefficients of HE_{11}^x and HE_{11}^y modes, respectively, as a function of the diameter of the air hole 2

增大时,本来圆形的芯区近似变成了 x 轴方向短, y 轴方向长的椭圆,长轴方向 HE_{11}^y 模的有效折射率大

于短轴方向 HE_{11}^x 模的有效折射率,因此在离开芯区的中心位置时,芯区中 HE_{11}^x 模场减小的速度比 HE_{11}^y 模的慢些,从而使 HE_{11}^x 模的有效面积较大,非线性系数较小。孔 1 孔径从均匀值减小时的情况正好与增大时的相反。 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模的非线性系数随孔 2 孔径的变化也可以进行类似的解释。

将上面计算出的 HE_{11}^x 与 HE_{11}^y 模的 $\partial\gamma/\partial d_1$, $\partial\gamma/\partial d_2$ 值代入(8)式,可得到 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模非线性系数的标准差与空气孔径标准差之间的关系分别为

$$S_y = 38.92S_d, \quad (9)$$

$$S_y = 46.68S_d, \quad (10)$$

当已知光纤拉制过程中因各种原因造成空气孔孔径不均匀的标准差时,可由(9),(10)两式得到两种模非线性系数的标准差。于是这种光纤的 HE_{11}^x 与 HE_{11}^y 模非线性系数最终可分别表示为 $\gamma = 75.5 \pm 38.92S_d$, $\gamma = 75.5 \pm 46.68S_d$ 。按目前的工艺,孔径标准差与孔径设计值的比为 5% 左右,根据(9),(10)两式, HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模非线性系数的标准差与均匀孔径情况下非线性系数值的比应分别为 2.55% 和 3.06%。

4 结 论

用全矢量有限元法和误差理论分析了六角形高非线性微结构光纤包层空气孔孔径的不均匀性对非线性系数的影响。本文的分析、计算方法和结论为高非线性微结构光纤的制造和使用提供了一定的理论依据。

参 考 文 献

- Z. Yusoff, J. H. Lee, W. Belardi *et al.*. Raman effects in a highly nonlinear holey fiber; amplification and modulation [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6):424~426
- J. H. Lee, Z. Yusoff, W. Belardi *et al.*. Investigation of Brillouin effects in small-core holey optical fiber; lasing and scattering [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(11):927~929
- X. Liu, C. Xu, W. H. Knox *et al.*. Soliton self-frequency shift in a short tapered air-silica microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6):358~360
- 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
- J. E. Sharping, M. Fiorentino, A. Coker *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14):1048~1050
- J. H. Lee, W. Belardi, K. Furusawa *et al.*. Four-wave mixing based 10-Gb/s tunable wavelength conversion using a holey fiber with a high SBS threshold [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3):440~442
- Jingyuan Wang, Mingyi Gao, Chun Jiang *et al.*. Design and parametric amplification analysis of dispersion—flat photonic crystal fibers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7):380~282
- Ni Yi, Wang Qing, Zhang Lei *et al.*. Simulation of optical parametric amplification using holey fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):310~312
- 倪屹,王青,张磊等.光子晶体光纤参量放大的理论模拟[J].中国激光,2004,**31**(3):310~312
- K. L. Reichenbach, C. Xu. The effects of randomly occurring nonuniformities on propagation in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8):2799~2807
- M. Koshiha, K. Saitoh. Numerical verification of degeneracy in hexagonal photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12):1313~1315
- A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti *et al.*. Holey fiber analysis through the finite-element method [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(11):1530~1532
- Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng. Analysis of the microstructure fiber by the finite element method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1337~1342
- 胡明列,王清月,栗岩峰.微结构光纤的有限元分析算法[J].中国激光,2004,**31**(11):1337~1342
- Li Zhizhong, Hu Yongming, Yang Huayong *et al.*. Finite-element analysis of birefringence in circular-core side-hole fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1013~1018
- 李智忠,胡永明,杨华勇等.圆芯型边孔光纤双折射的有限元分析[J].光学学报,2005,**25**(8):1013~1018
- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd ed.. New York: Academic Press, 2001. 39~45
- R. Hainberger, S. Watanabe. Impact of the wavelength dependence of the mode field on the nonlinearity coefficient of PCFs [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1):70~72