

文章编号:1001-5078(2007)12-1311-04

掺锗微结构光纤的非线性特性研究

孙婷婷,王 志,开桂云,袁树忠,董孝义
(南开大学现代光学研究所,天津 300071)

摘 要:由于二氧化锗材料的非线性折射率高于石英,因此可以通过在纤芯中掺杂二氧化锗来进一步提高纯硅微结构光纤的非线性系数。采用全矢量有限单元方法,本文理论计算和分析了纤芯掺杂微结构光纤的非线性系数、模场分布、色散等特性。结果表明,在几乎不影响模场分布和色散的情况下,光纤非线性系数得到了大幅提高。此外,还讨论了掺杂浓度和掺杂半径对光纤非线性系数的影响。

关键词:微结构光纤;非线性系数;掺锗;非线性折射率

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Study on Nonlinearity of Microstmcture Fiber with Germanium Doping in the Core Region

SUN Ting-ting, WANG Zhi, KAI Gui-yun, YUAN Shu-zhong, DONG Xiao-yi
(Institute of Modem Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Germanium doping in silica can enhance the effective nonlinear index of refraction, since it is not equal for GeO_2 and SiO_2 . Properties of enhanced nonlinearity, effective mode area, and chromatic dispersion in microstructure fiber (MF) with a GeO_2 -doped core are theoretically investigated by using an all-vector finite element method. With little difference in mode field distribution compared to the pure silica situation, the nonlinearity of PCF is greatly enhanced by doping Ge in the core region. Further more, the effect of doping concentration and radius of doped area on fiber's nonlinearity is studied.

Key words: microstructure fiber; nonlinear coefficient; Ge-doping; nonlinear index of refraction

1 引 言

近年来,微结构光纤一度成为人们所关注的热点。此类光纤通常由硅和空气构成,沿光纤轴向均匀地排列着空气孔,其结构可以灵活设计,因此具有许多普通光纤所不可比拟的优点^[1]。对于折射率传导型微结构光纤,光场主要分布在石英构成的纤芯中,其非线性效应的产生机制与普通光纤类似。但是,利用微结构光纤却可以观察到比普通光纤更强的非线性效应,这主要归因于它的两个特殊性质:小模场面积以及可设计的色散曲线。利用石英和空气较大的折射率差,可以获得比普通光纤小几十倍的有效模场面积,从而使光纤获得更高的非线性系数^[2-6]。此外,其可设计的色散特性使得我们可以灵活设计零色散点的位置和色散曲线的形状,进一步促进了这类光纤在非线性和光学方面的广泛应用^[7-9]。但是,当纤芯直径减小到小于波长的尺度

时,能量已不能很好地被约束在石英纤芯中,而是向周围的空气孔中渗透。因此,要想得到更高的非线性系数,仅靠减小纤芯直径是有限的,必须考虑提高光纤材料的非线性折射率。研究表明,对于普通光纤,通过提高纤芯中锗的掺杂浓度,光纤的非线性系数可以提高10倍以上^[10]。而且,随着制作工艺的不断进步和完善,已经可以在光纤中实现较高的掺杂浓度。因此,该方法也适用于微结构光纤,来进一步提高光纤的非线性。

采用全矢量有限单元分析方法,我们理论分析

基金项目:国家“973”计划项目(2003CB314906);天津市自然科学基金项目(06YFJZJC00300)资助。

作者简介:孙婷婷(1981-),女,南开大学现代光学所博士研究生,主要从事现代光通信与功能器件的研究。E-mail: nksuntingting@gmail.com

收稿日期:2007-08-05

了纤芯中掺杂二氧化锗对微结构光纤非线性系数的影响,计算了不同掺杂浓度和掺杂区域半径下,微结构光纤的非线性系数、模场分布和色散等性质。结果表明,通过合理选择光纤参数,在不影响模场分布和色散的情况下,在纤芯中掺锗可以使光纤非线性系数得到大幅提高。

2 理论

2.1 全矢量有限单元方法

有限单元方法是一种成熟而且实用范围非常广泛的数值计算方法,它不受结构复杂性的限制,可以被用于深入的研究分析。利用有限单元方法分析微结构光纤的基本思想是:将连续的求解区域离散为一组数量有限、按一定方式相互连接在一起的组合体;利用在每一个单元内假设的近似函数分片表示整个求解区域上待求的场函数,然后利用泛函或 Galerkin 方法,把磁场的波动方程转化为代数特征值方程,求解方程从而得到微结构光纤的传输模式和场分布。

2.2 微结构光纤的非线性系数

普通光纤中,光纤的非线性系数通常被定义为:

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \quad (1)$$

其中, A_{eff} 为光纤的有效模场面积; n_2 为石英的非线性折射率^[11]。对于由石英和空气构成的微结构光纤而言,由于模场主要分布于石英纤芯内,模场分布区的材料具有均一的非线性折射率,因此仍可以用上式来计算光纤的非线性系数。而对于纤芯掺杂情形,公式(1)不再适用。这是因为纤芯经掺杂后,掺杂区域和非掺杂区域的材料具有不同的非线性折射率,因此在计算光纤的非线性系数时,必须对式(1)进行改进。在此引入等效模场面积的概念:

$$A_{\text{eff}}^* = \frac{n_2 (\iint E(x,y) \cdot E^*(x,y) dx dy)^2}{\iint \tilde{n}_2(x,y) [E(x,y) \cdot E^*(x,y)]^2 dx dy} \quad (2)$$

其中, $E(x,y)$ 是横向电场强度; $\tilde{n}_2(x,y)$ 表示点 (x,y) 处材料的非线性折射率^[3]。根据文献[12],掺锗石英的非线性折射率可以用经验公式 $\tilde{n}_2 = 2.507 + 0.505 \times \delta$ 来表示, δ 是掺杂后石英的折射率 n_1 与纯石英的折射率 n_0 之差,定义为 $\delta = (n_1^2 - n_0^2)/2n_1^2$ 。上述经验公式是在波长为 1550nm 时得到的,当波长变化时, $\tilde{n}_2$ 值略有变化,但不超过百分之几的水平。因此在计算中,通常不考虑 $\tilde{n}_2$ 随波长的变化。

3 光纤模型和参数

计算中使用的光纤横截面如图 1 所示,空气孔

为六角形结构,均匀地排列在光纤包层中。 A 表示空气孔的半径, d 表示两个空气孔之间硅壁的厚度。光纤通过缺失中心的一个空气孔引入缺陷形成高折射率的纤芯,将能量限制在其中传导。掺杂区域为与光纤轴同心的圆形区域,其半径用 r_0 表示;由于掺杂引起的折射率变化用 δ 表示。在计算中,取 $a = 1.2\mu\text{m}$, $d = 0.12\mu\text{m}$, 此时能量可以很好地被限制在高折射区域,而不渗透到周围的空气中造成泄漏。

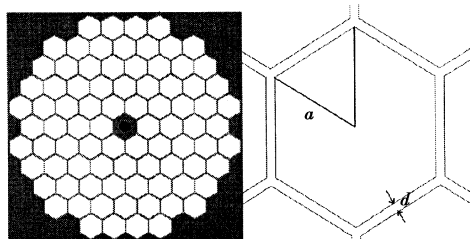


图1 微结构光纤横截面示意图
Fig.1 the transverse section scheme of GeO_2 -doped microstructure fiber

4 计算结果和分析

4.1 纤芯掺 Ge 对光纤非线性系数的影响

保持光纤几何参数不变,首先来研究掺杂浓度对于光纤非线性系数的影响。固定掺杂区域的半径为 $0.8\mu\text{m}$,通过计算得到折射率差 δ 分别为 0, 2%, 4%, 6% 时光纤的非线性系数随波长的变化,如图 2 所示。实心的黑点为 $\delta = 0$ 的曲线,对应纯石英光纤的情形。可以看到,随着掺杂浓度的提高,对计算范围内的所有波长,光纤的非线性系数都得到提升。并且,在短波区域提升的幅度要明显大于长波区域。当掺杂区域一定时,对于特定波长,一方面掺杂浓度的提高增加了掺杂区和非掺杂区的线性折射率差,可以将更多能量限制在掺杂区域。另一方面,掺杂浓度的提高也提升了掺杂区域的非线性折射率,由式(2)可以得到更小的等效模场面积。因此,光纤非线性系数随掺杂浓度的提高而增大;而且,由于短波区域模场分布更为集中,因此受掺杂区域的影响要大于长波区。

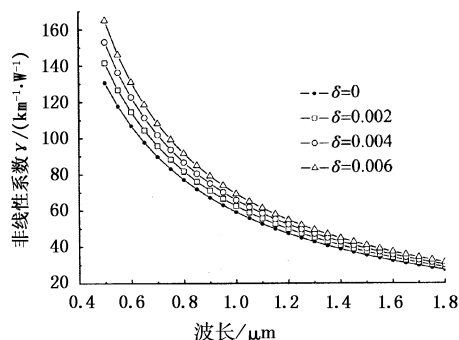


图2 不同掺杂浓度下微结构光纤的非线性系数随波长的变化
($a = 1.2\mu\text{m}$, $d = 0.12\mu\text{m}$, $r_0 = 0.8\mu\text{m}$)

Fig.2 fiber nonlinear coefficient as a function of the wavelength for different δ values

图3是掺杂浓度一定、掺杂区域半径分别为 $0.4\mu\text{m}$ 、 $0.8\mu\text{m}$ 和 $1.2\mu\text{m}$ 时,光纤非线性系数随波长的变化曲线。从图中看出,对于较短波长,光纤非线性系数随掺杂半径的减小而增大,而对其他波长并非如此,特别是长波区域。这就表明,并不是对所有波长,都可以通过减小掺杂区域的面积来获取更高的非线性系数。为了更进一步地分析特定波长下掺杂半径变化对光纤非线性系数的影响,我们计算了波长分别为 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1.0\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 时,光纤非线性系数随掺杂区域大小的变化,如图4所示。由图看出,对于固定波长,随着掺杂区域半径的增加,非线性系数都表现出先增大后减小的趋势,存在一个最佳值。由公式(1)、(2)可知,光纤的非线性系数不仅与材料非线性折射率系数分布有关,还与能量的分布有关,只有当二者交叠积分达到特定值时,才对应最大的非线性系数。值得注意的是,当波长增大时,光纤非线性系数对掺杂区域半径的变化变得不敏感,并且最佳掺杂区域半径值随波长的增加而增大。综上所述,提高掺杂区域二氧化锗的浓度可以有效提高光纤的非线性系数,但同时要根据实际应用来考虑最佳掺杂区域半径的选取。

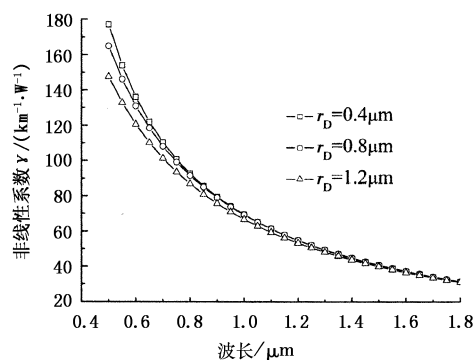


图3 掺杂区域半径不同时微结构光纤的非线性系数随波长的变化
($a=1.2\mu\text{m}$, $d=0.12\mu\text{m}$, $\delta=6\%$)

Fig.3 fiber nonlinear coefficient as a function of the wavelength for different r_D values

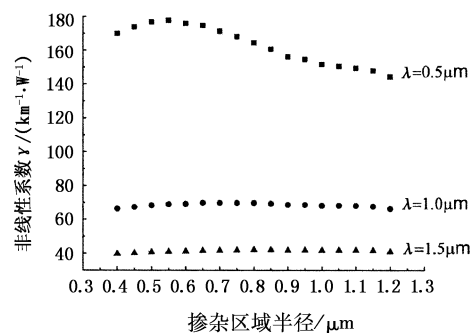


图4 波长为 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1.0\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 时,掺杂区域半径变化对光纤非线性系数的影响($a=1.2\mu\text{m}$, $d=0.12\mu\text{m}$, $\delta=6\%$)

Fig.4 fiber nonlinear coefficient as a function of r_D for special operating wavelength

4.2 掺 Ge 后微结构光纤的模场分布

为了更全面地分析掺杂对微结构光纤特性的影响,我们还研究了有效模场面积随掺杂浓度和掺杂区域半径的变化。图5是掺杂区域半径为 $0.8\mu\text{m}$ 时,不同掺杂浓度下光纤的有效模场面积。随着掺杂浓度的提高,纤芯和包层的折射率差变大,对能量分布的限制作用加强,因此有效模场面积表现出减小的趋势,并且在短波区域更为明显。当掺杂浓度一定时,改变掺杂区域的半径,得到不同 r_D 值下光纤有效模场面积随波长的变化,如图6所示。在短波区域,能量主要集中于掺锗的高折射率区域,模场分布随掺杂区的减小而减小。但是对于长波区域,随着掺杂区域面积的减小,有效模场面积减小到一定程度时反而出现增大趋势。这是因为,对于长波,当掺杂区域减小到一定面积时,已经不能将大部分能量限制在掺锗的高折射率区,所以模场扩散到未掺杂的石英区域中,模场面积反而增大。但总的来说,与纯石英的情形相比,掺杂后光纤的有效模场面积并没有发生显著变化。

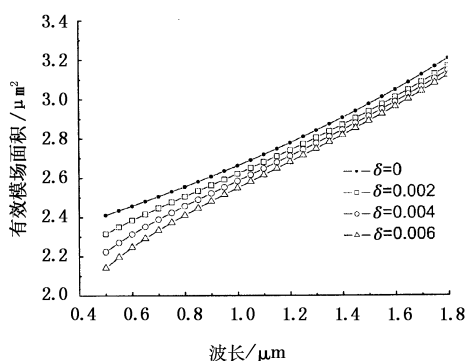


图5 不同掺杂浓度下微结构光纤的有效模场面积随波长的变化
($a=1.2\mu\text{m}$, $d=0.12\mu\text{m}$, $r_D=0.8\mu\text{m}$)

Fig.5 mode field area as a function of the wavelength for different δ values

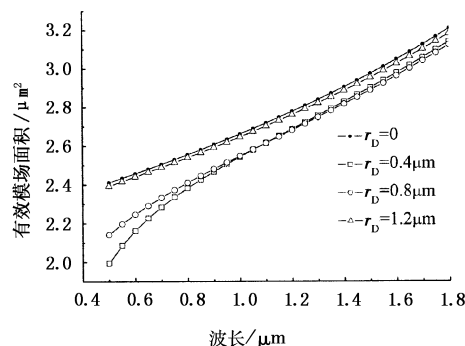


图6 掺杂区域半径不同时 MF 有效模场面积随波长的变化
($a=1.2\mu\text{m}$, $d=0.12\mu\text{m}$, $\delta=6\%$)

Fig.6 mode field area as a function of the wavelength for different r_D values

4.3 光纤掺 Ge 对色散的影响

在高非线性光纤中,色散参量作为光纤的一个

物理量显得尤为重要。对于微结构光纤,通过合理选取纤芯直径、空气孔间距和大小等参数,可以设计所需要的零色散点位置和色散曲线的形状^[7-9]。关于微结构光纤色散特性和设计方面的研究,已有许多文献报道,在此不予详细讨论,而将研究重点放在掺杂对光纤色散的影响上。

由于大多数非线性现象都发生在零色散波长附近,因此我们重点关注零色散波长附近的色散变化情况。取 $a = 1.2\mu\text{m}$, $d = 0.12\mu\text{m}$, 分别改变光纤的掺杂浓度和掺杂区域半径,所得光纤色散曲线如图7和图8所示。可以看到,在零色散波长附近40nm

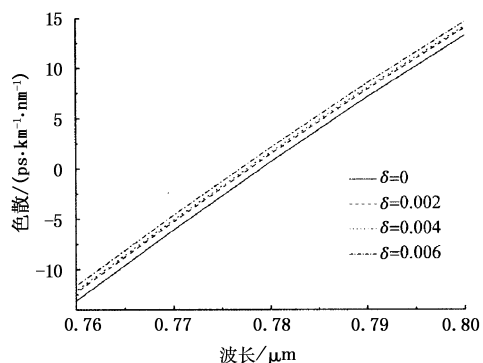


图7 不同掺杂浓度下微结构光纤的色散曲线
($a = 1.2\mu\text{m}$, $d = 0.12\mu\text{m}$, $r_D = 0.8\mu\text{m}$)

Fig. 7 dispersion of MF for different δ values

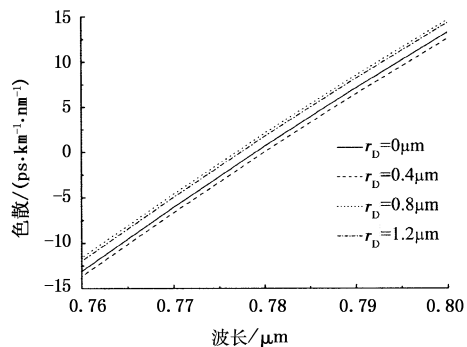


图8 掺杂区域半径不同时微结构光纤的色散曲线
($a = 1.2\mu\text{m}$, $d = 0.12\mu\text{m}$, $\delta = 6\%$)

Fig. 8 dispersion of MF for different r_D values

范围内,由于掺 Ge 引起的色散变化比较均匀。当掺杂区域一定时,光纤色散随掺杂浓度的升高而增大;而当掺杂浓度一定时,光纤色散随掺杂半径的增大表现出先减小、后增大、再减小的复杂趋势。这说明,光纤色散不仅受光纤结构的影响,而且受掺杂浓度、掺杂区域面积以及掺杂区域分布的影响。但是,在本文所取的光纤参数和掺杂浓度下,零色散波长附近区域内色散在 $\pm 2.5\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 范围内浮动,并未表现出显著变化。为了获得更高的非线性系数,当掺杂浓度进一步提高时,对光纤色散必将带来更大的影响。因此,在采用纤芯掺锗的方法提高光纤的非线性系数时,还应综合考虑对色散的影响,

从而合理地选取光纤的参数,实现性能的优化。

5 结 论

通过上述计算和分析可以看出,在微结构光纤纤芯中掺杂二氧化锗可以有效地提高光纤的非线性系数。光纤几何参数一定时,掺杂浓度和掺杂区域半径是影响光纤非线性系数的两个因素。与纯石英微结构光纤相比,掺杂后光纤的有效模场面积略微减小,并未发生显著变化。而且,在掺杂浓度不太高的情形下,零色散波长附近区域内色散变化量也很小。随着掺杂浓度的提高,光纤的非线性系数也得到进一步提升,但是对色散造成的影响也逐渐增大。因此,在设计光纤时,应综合考虑各种因素来选取合适的参数,满足实际应用的需要。

参考文献:

- [1] J C Knight, T A Birks, P St Russell, et al [J]. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. Opt. Lett., 1996, 21: 1547 - 1549.
- [2] T M Monro, et al. New possibilities with holey fibers [C]//Proc. OFC, 2000, 3: 106 - 108.
- [3] V Finazzi, T M Monro, D J Richardson. The role of confinement loss in highly nonlinear silica holey fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1246 - 1248.
- [4] V Finazzi, T M Monro, D J Richardson. Small-core silica holey fibers: nonlinearity and confinement loss trade-offs [J]. Opt. Soc. Am. B, 2003, 20: 1427 - 1436.
- [5] N G R Broderick, T M Monro, P J Bennett, et al. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities [J]. Opt. Lett., 1999, 24: 1395 - 1397.
- [6] J Laegsgaard, A Bjarklev. Photonic crystal fibres with large lon-linear coefficients [J]. J. Opt. A: Pure Appl. Opt, 2004, 6: 1 - 6.
- [7] 刘兆伦,等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的研究 [J]. 激光与红外, 2006, 36(1): 47 - 50.
- [8] 刘洁,等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构 [J]. 光学学报, 2006, 26(10): 1569 - 1567.
- [9] 王子涵,等. 800nm 附近具有平坦色散的光子晶体光纤的计算与设计 [J]. 量子电子学报, 2005, 22(5): 771 - 776.
- [10] S X Dai, et al. Progress of bismuth glass fiber with high nonlinearity [J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2007, 2: 5 - 10.
- [11] 阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 549.
- [12] K Nakajima, M Ohashi. Dopant dependence of effective nonlinear refractive index in GeO_2 - and F-doped core single-mode fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(4): 492 - 494.