

doi:10.3788/gzxb20154405.0506004

# 基于选择性填充的超高非线性纳米纤芯光纤特性

王冠军, 谭绪祥, 王志斌

(中北大学 信息与通信工程学院 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051)

**摘 要:** 为了改善纳米纤芯光纤的非线性与色散特性, 提出利用气孔填充非线性液体的新型纳米纤芯光纤结构来增强现有纳米纤芯光纤的非线性系数, 利用选择性填充方法来改进现有纳米纤芯光纤的特性调控能力, 实现改善光纤非线性和色散特性目的. 分析结果表明采用选择性气孔填充方式和适当的光纤参量有助于实现光纤单模单偏振工作, 可以大幅度地提升纳米纤芯光纤的非线性系数和改善光纤色散特性.

**关键词:** 光纤; 非线性仿真; 色散; 铋基; 光纤模式

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2015)05-0506004-6

## Nonlinearity of Dispersion Characteristics of Nano-core Fiber Based on the Selective Filling Method

WANG Guan-jun, TAN Xu-xiang, WANG Zhi-bin

(Shanxi Provincial Research Center for Opto-electronic Information and Instrument Engineering Technology, North University of China, Taiyuan, 030051, China)

**Abstract:** For improving the nonlinearity and dispersion properties of nano-core fiber, the idea of enlarging the nonlinearity and improving the dispersion characteristics of the present nano-core fiber by nonlinear fluid filling method is proposed. The special impact of selective fluid filling method on the fiber nonlinearity and dispersion is analyzed too. Calculation results show that the appropriate structure parameters and the specific selective filling method could help to enhance the nonlinearity and improve the fiber dispersion characteristics.

**Key words:** Fiber; Nonlinearity simulation; Dispersion; Bismuth; Fiber models

**OCIS Codes:** 006.0060;060.2310;060.4370;060.2400

## 0 引言

非线性光纤在光通信与光传感领域都具有重要的应用价值<sup>[1-5]</sup>. 如非线性光纤产生的高重频、多波长超连续谱可以作为分布式光纤流体传感系统中不可或缺的相干宽带光源<sup>[4]</sup>, 并且此类超连续谱还可以作为一种直接的传感机理, 用于流体物质的温度、折射率、浓度等特性检测<sup>[5]</sup>. 虽然在不同应用方面有不同的要求, 但是对光纤高非线性的要求却是共同的.

一方面, 光纤长度可以灵活控制, 在非线性和产生方

面具有优势. 另一方面, 利用普通非线性光纤产生的超连续谱的频率宽度仍然比较有限. 要想提高光纤非线性, 需要从采取高非线性光纤材料和压缩光场的有效模场面积两方面来改进. 目前已知具有高非线性折射率的材料已经非常多, 比如高分子有机材料、高掺杂玻璃、硅酸盐/硫化物玻璃等等<sup>[6-10]</sup>. 研究人员可以根据需要, 选择折射率(包括线性折射率和非线性折射率)合适的光纤基底材料. 另外, 也可以通过特殊设计光纤结构来减小模场面积和提高光纤非线性, 比如采用较小模场面积的锥形光纤<sup>[11]</sup>、纳米纤芯光纤<sup>[12]</sup>或者狭缝微

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目(No. 61405127)、山西省青年基金(No. 2014021023-1)和国家博士后基金(No. 2014M562202)资助  
**第一作者(通讯作者):** 王冠军(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: wangguanjun@163.com  
**收稿日期:** 2015-01-16; **录用日期:** 2015-03-28

结构光纤<sup>[13]</sup>等. 纳米纤芯光纤具有非常大的气孔/材料面积比, 易于压缩光模场面积, 从而产生超高的非线性系数. 利用狭缝结构超强的模式束缚能力也可制备具有超小模场面积的非线性光纤. 除此之外, 良好的色散特性也是实现光纤非线性效应的必要条件<sup>[14-18]</sup>. 在改善色散特性方面, 微结构光纤具有良好的调控能力. 由于高非线性微结构光纤基底材料与空气孔的折射率之差以及包层空气孔的参量具有很大的色散设计自由度, 所以经过优化设计的高非线性微结构光纤有可能满足产生非线性效应的色散要求.

然而现有的高非线性光纤技术方面尚存在一些需要解决的问题. 如由于结构限制, 锥形非线性光纤的长度都比较短. 而纳米纤芯光纤和狭缝光纤长度虽然具有比较大的自由度, 但在通信波段的色散斜率比较大, 而且可调整的结构变量比较少, 导致不容易调整色散和非线性特性. 狭缝微结构光纤虽然可通过调整周围空气孔分布在一定程度上改善其色散特点, 但狭缝结构的超大负色散<sup>[6]</sup>也对光纤非线性效应造成不利影响. 2008年, 日本光纤研究团队提出使用具有更高折射率和非线性系数的铋系玻璃作为光纤基底材料, 并且在光纤中心使用一个狭长的填满高非线性液体二硫化碳(Carbon Disulfide, CS<sub>2</sub>)的椭圆孔形成狭缝结构的光纤结构, 最终分析得到的非线性系数可高达

11 000 W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>. 周期性气孔分布的非线性光纤<sup>[14]</sup>. 但是虽然其在通信波段具有较平坦的色散, 但由于其模场面积较大, 其非线性系数也难以大幅度提高.

所以, 研究具有良好非线性性和色散调整能力的新型非线性微结构光纤对提高和拓展微结构光纤的应用范围具有十分重要的意义. 针对以上目的, 本文研究了一种基于高非线性铋基(Bismuth)基底和二硫化碳(Carbon Disulfide, CS<sub>2</sub>)液体材料的纳米纤芯光纤的非线性性和色散特性. 并提出利用选择性填充方法来改进现有纳米纤芯光纤的特性调控能力, 实现改善光纤非线性性和色散特性目的.

## 1 仿真建模

本文仿真分析以 SC4-510/72 光纤结构为原型. 仿真所用到的非线性光纤结构如 1 图所示, 其由四个呈对称部分的气孔组成. 不同气孔之间连接纤芯与包层的支架为悬臂, 厚度为  $d$ . 四个气孔中间所嵌套的区域为纤芯结构, 纤芯半径为  $R$ , 纤芯半径定义为纤芯结构区域的最大圆半径. 光纤基底选择为铋基(Bismuth)材料, 铋基材料折射率(包括线性和非线性折射率)与波长的关系可由塞米尔(Sellmeier)公式求得<sup>[11]</sup>, 非线性系数为  $3.2 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$ .

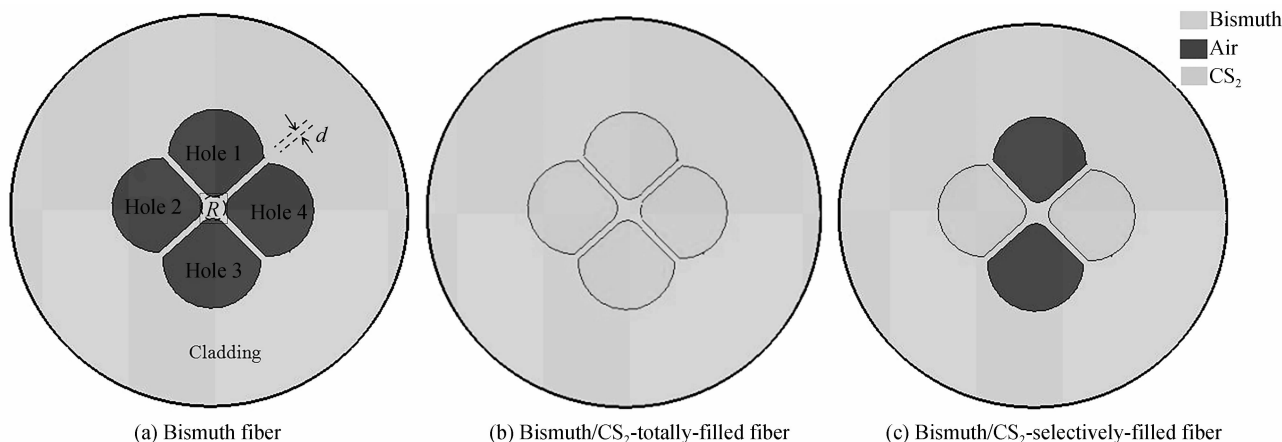


图 1 提出的非线性纳米纤芯光纤结构图

Fig. 1 Proposed nonlinear nano-core fiber configuration

为了增强光纤的非线性效果, 本文将在分析中假设气孔区域填充具有高非线性系数的 CS<sub>2</sub> 液体. CS<sub>2</sub> 折射率分布可参考文献 [7], 其非线性系数为  $3.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ .

本文光纤模式分析均基于有限元法和软件 COMSOL3. 5a 数值计算得到. 根据软件计算的模场分布情况可进一步计算出光纤中各个模式的有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  以及与其相对应的光纤非线性系数. 光纤模式的群速度色散  $D$  也可根据模式有效折射率对波长求导计算得到<sup>[11]</sup>, 所选取的波长范围从 500 nm 至

2 000 nm. 本文所涉及的有效模场面积、非线性系数及模式的群速度色散为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right)}{\iint_{NR} |E(x, y)|^4 dx dy} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}) \quad (2)$$

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \lambda^2} \quad (3)$$

式中,  $n_{\text{eff}}$  为计算模式的有效折射率,  $\lambda$  为传输波长,

$E(x, y)$  为计算模式的电场分布,  $n_2$  为材料的非线性系数, NLR 为非线性材料区域.

本文所用到的铋基材料和二硫化碳色散塞米尔公式及数据为<sup>[13]</sup>

$$n_{\text{eg}} = (A_{20} + A_{21}x_0 + B_{21}x_0 / (\lambda^2 - C_{20} - C_{21}x_0) - D_{20}\lambda^2)^{0.5} \quad (4)$$

$$n_{\text{es2}} = d_1 + d_2/\lambda^2 + d_3/\lambda^4 + d_4/\lambda^6 + d_5/\lambda^8 \quad (5)$$

式中,  $A_{20} = 1.90598$ ;  $x_0 = 0.55$ ;  $A_{21} = 5.78900$ ;  $A_{22} = -2.22010$ ;  $B_{21} = 0.16995$ ;  $C_{20} = 0.02116$ ;  $C_{21} = 0.09230$ ;  $D_{20} = 0.01857$ ;  $d_1 = 1.580826$ ;  $d_2 = 1.52389 \times 10^{-2}$ ;  $d_3 = 4.8578 \times 10^{-4}$ ;  $d_4 = 8.2863 \times 10^{-5}$ ;  $d_5 = 1.4619 \times 10^{-5}$ .

上述仿真数据重点参考了文献[13], 仿真所涉及的 1 000~1 600 nm 波段铋基材料和二硫化碳材料吸收较小, 所以本文所提及的方案具有实际应用可行性.

## 2 仿真结果及讨论

本文首先分析了未填充非线性液体  $\text{CS}_2$  情况下, 光纤的非线性、色散特性与光纤纤芯尺寸的关系, 如图 2 所示. 纤芯半径  $R$  范围设定为 100 nm~500 nm. 悬臂厚度为 20 nm. 图 2(a)、(b) 显示了 TM、TE 偏振方向的模场特性(纤芯半径 350 nm), 可见由于结构的对称性, 使得两偏振方向的模场等特性完全简并, 所以在后面的非线性、色散等特性分析中将不再明确说明偏振方向.

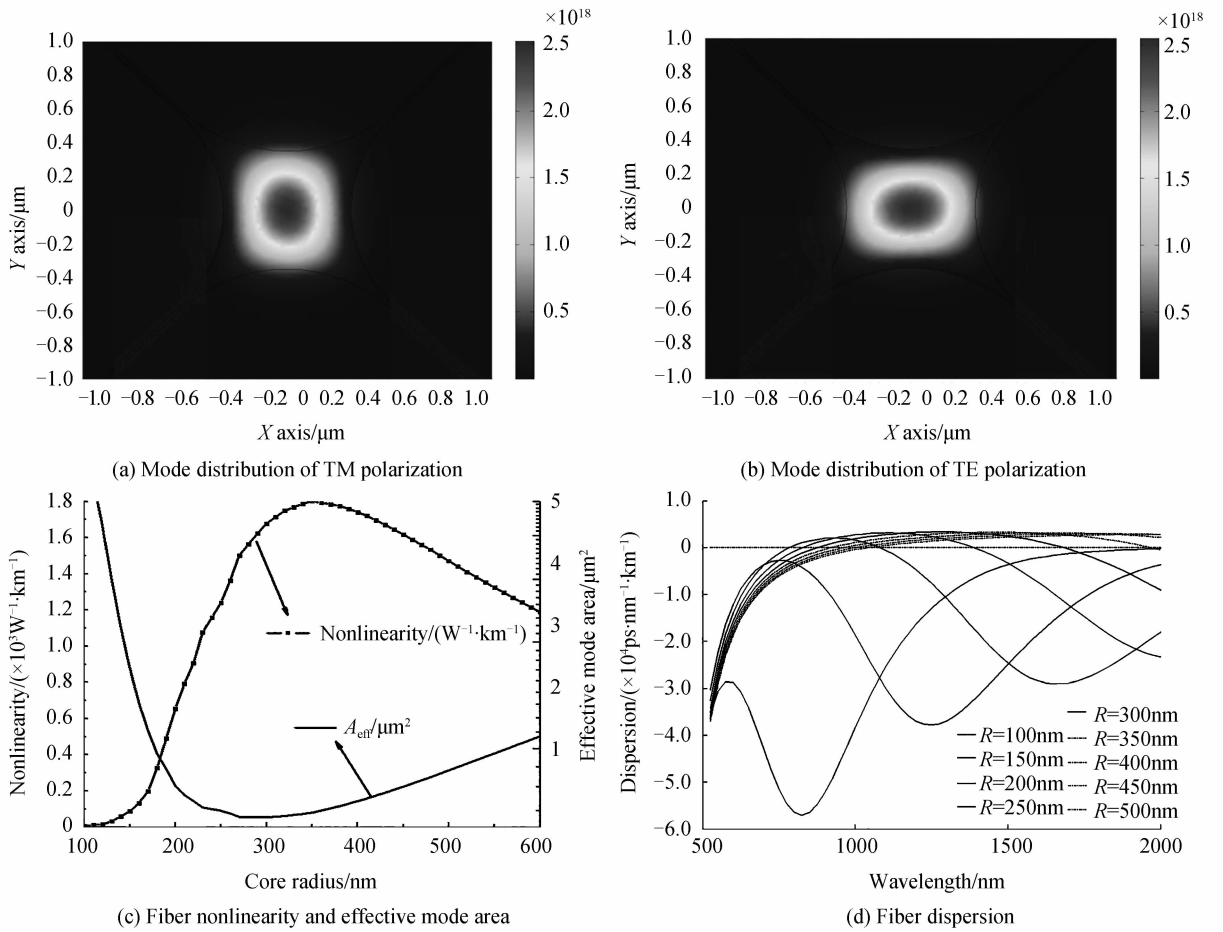


图 2 未填充液体的非线性纳米纤芯光纤的光场分布、有效模场面积、非线性、色散特性

Fig. 2 Mode distribution, effective, nonlinearity and dispersion characteristics of nonlinear nano-core fiber without fluid filling

图 2(c) 显示了光纤的非线性系数、有效模场面积与纤芯半径的关系. 从图 2 可知, 当纤芯半径在 350 nm 附近时, 非线性系数达到最大, 约为  $1.800 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ . 过大或过小的纤芯半径均会造成非线性系数降低. 有效模场面积与纤芯半径之间也存在一最优化关系, 并且该最小模场面积情况下的纤芯半径约为 280 nm 附近, 略小于最佳非线性系数条件下的纤芯半径. 这是因为在将纤芯半径从 280 nm 适当增加至 350 nm 过程中, 虽然有效模场面积变化比较平缓, 但是由纤芯半径

增大导致的纤芯面积的增加将有助于提高能量在非线性光纤纤芯内部的比例, 从而提升非线性系数. 图 2(d) 也给出了色散与纤芯半径之间的关系, 可看出, 当纤芯在 300 nm 至 500 nm 之间时, 光纤在 1 550 nm 通信波段存在一定程度的平坦正色散, 这对实际非线性应用比如超连续谱产生具有积极的作用. 但是必须注意到, 相对于已报道的非线性光纤, 此类光纤最大非线性系数 ( $1.800 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ) 仍比较低.

为了有效地增大非线性系数, 本文对在气孔区域

内添加非线性液体 CS<sub>2</sub> 对光纤非线性、色散的影响也进行了分析. 分析结果如图 3 所示. 其中, 图 3(a)、(b) 显示了 TM、TE 偏振方向的模场特性 (纤芯半径 350 nm), 可看出同样由于结构的对称性, 两偏振方向的模场等特性完全简并, 所以在随后的对该结构的非线性、色散等特性得分析中将不再明确指明偏振方向. 从图 3(c) 可见当气孔区域加入非线性系数较高的液体 CS<sub>2</sub> 后, 光纤的非线性系数将有明显的增加, 最大的非

线性系数大约为 6 050 W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>, 是未添加 CS<sub>2</sub> 时的非线性系数的 3 倍多, 而此时纤芯半径却缩小至 230 nm 附近. 同时会发现此时最小有效模场面积情况下的纤芯半径约为 300 nm, 略大于未填充非线性液体时的纤芯半径 280 nm, 这是由于在气孔区域填加折射率较高的非线性液体将会降低纤芯/气孔折射率对比度, 使得满足最佳模式束缚能力情况下的纤芯半径有所增大, 而最小有效模场面积与纤芯/气孔折射率对比

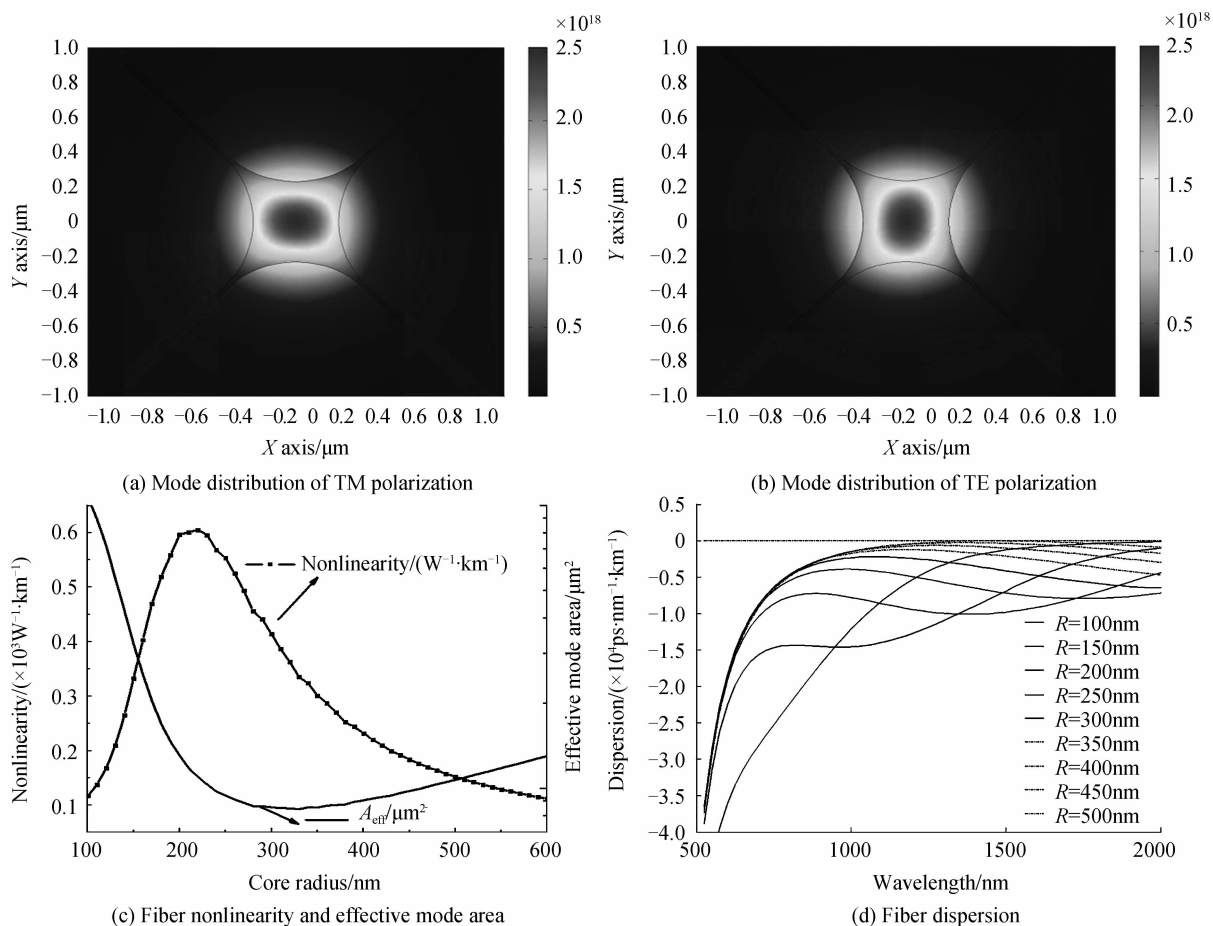


图 3 完全填充非线性液体的纳米非线性光纤的光场分布、有效模场面积、非线性、色散特性

Fig. 3 Mode distribution, effective, nonlinearity and dispersion characteristics of CS<sub>2</sub> totally-filled nonlinear nano-core fiber

度和模式束缚能力密切相关, 呈正向关系, 所以也使得最小有效模场面积情况下的纤芯半径有所增加. 另外因为相对于铋基材料, CS<sub>2</sub> 非线性系数比其高一个数量级, 所以缩小纤芯半径至最小模场面积所需的纤芯半径后, 仍适当缩小纤芯半径虽然会造成有效模场面积的增加, 但也使得能量更多地分布在非线性系数更多的 CS<sub>2</sub> 液体填充区域, 使得非线性系数进一步增加, 达到最大值. 图 4 绘出了两种情况下的有效模场面积情况, 也可以明确看出, 填加非线性液体后的光纤最小有效模场面积 (0.845 μm<sup>2</sup>) 将大于未添加非线性液体情况下的最小有效模场面积 (0.710 μm<sup>2</sup>).

但是, 从图 3(d) 色散特性与纤芯半径、波长关系来看, 纤芯半径在 200 nm 至 300 nm 之间的色散均处

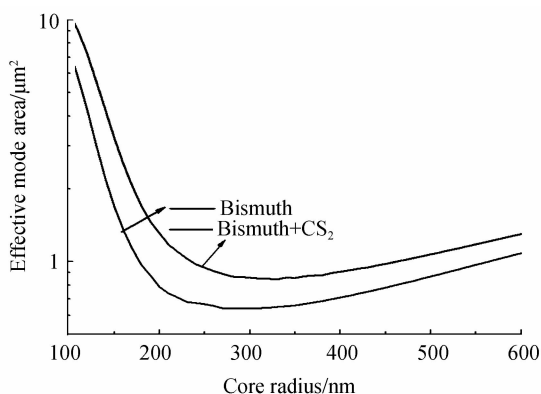


图 4 加或不加非液体时的非线性光纤有效模场面积特性  
Fig. 4 Comparison of effective mode area of nonlinear fiber with and without fluid filling

于负色散范围,说明填充非线性液体方法虽有利于提升光纤的非线性特性,但也有可能影响到原来的色散特性.而如何选择光纤结构以取得最佳的非线性系数和色散值则需要根据实际情况进行取舍.

考虑到选择性填充某些气孔的方法相对于填充所有气孔的完全填充方法更有助于缩小光场的有效模场面积,同时有可能改变模场分布,使得能量更多地分布在填充区域.这启发本文考虑是否可以利用选择性填充方法来进一步增强非线性系数和有效调控色散.所以本文也对选择性填充方法对纳米纤芯光纤的非线性、色散特性影响进行了分析.

图5分析了对称双孔填充方法产生的效果(假设气孔2、4填充非线性液体,而气孔1、3内仍为空气).

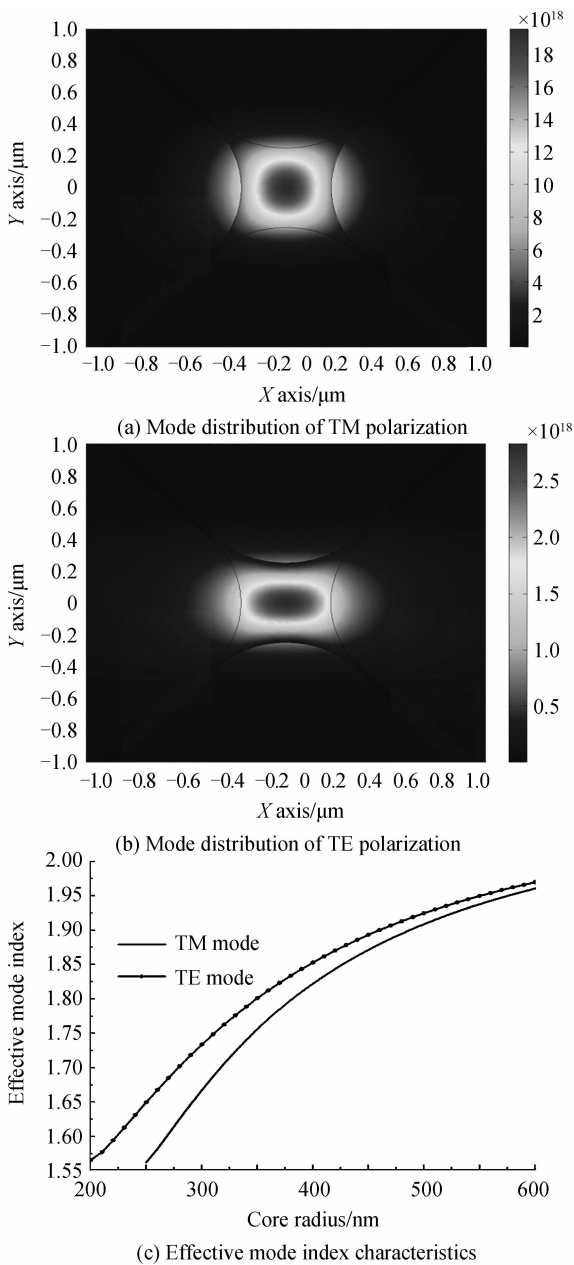


图5 选择性选择填充的非线性光纤的模式分布  
Fig. 5 Mode characteristic of selectively filled nonlinear fiber

从图5(a)可以看出,这种填充方法使得光纤出现模式双折射.图5给出了给出了两偏振方向有效折射率差值随纤芯变化的关系,可见纤芯半径越小,有效折射率差及双折射将越明显.当半径在200 nm~250 nm之间时实现了单模单偏振运转(波长为1 550 nm),这种单模单偏振运转状态在非线性应用中具有特殊的价值.也可以看到这种选择填充方法使得光场能量在纤芯、气孔以及非线性液体填充区域产生重构.相对于完全填充式结构,能量分布在气孔1、3内能量的比例有所降低,这有助于压缩有效模场面积.这将有可能影响到纤芯模式的非线性和色散特性.

图6分析了上述填充结构情况下的有效模场面积

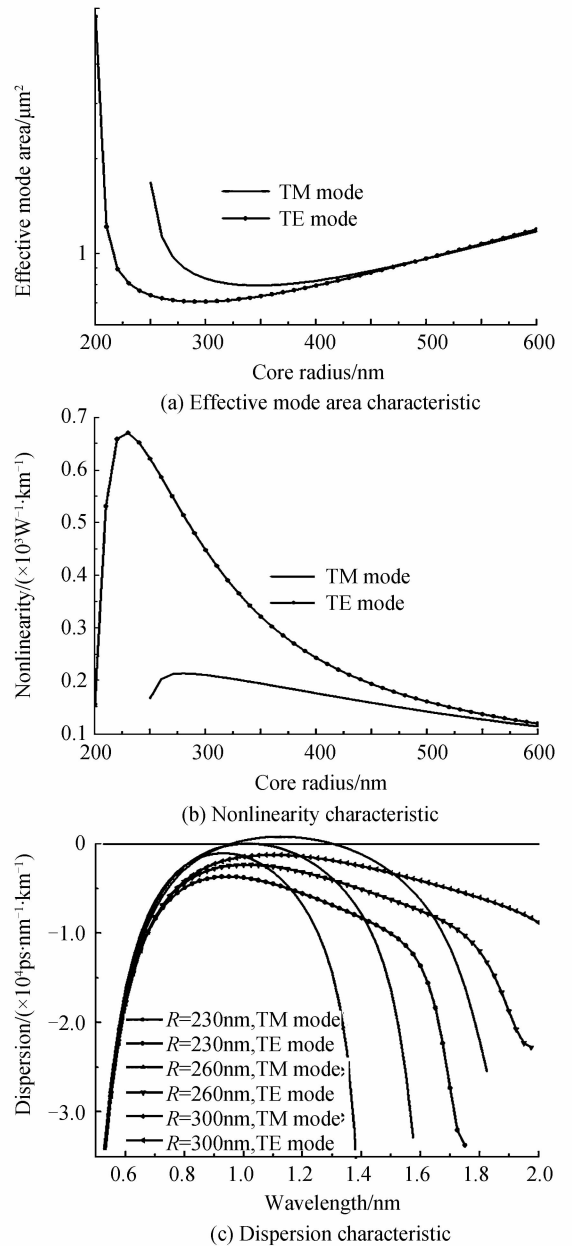


图6 选择填充的非线性光纤的有效模场面积、非线性及色散特性  
Fig. 6 Effective mode area, nonlinearity and dispersion characteristics of CS2 selectively-filled nonlinear fiber

和非线性特性.可见,TE偏振受到的影响比较明显.选择性填充方法使得有效模场面积得到进一步压缩至 $0.70\ \mu\text{m}^2$ .相对于完全填充 $\text{CS}_2$ 液体的铋基光纤,模场面积约减小 $0.14\ \mu\text{m}^2$ ,相应导致非线性系数增加至 $6707\ \text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ,相当于增加11%.

此外,本文也对此填充条件下的色散特性进行了分析,可以看出,基于选择性填充技术产生的超高非线性光纤TE模式在1000 nm至1600 nm波段仍将具有比较平坦的负色散,而且色散值比较低.而且在相同光纤参量条件下,采用长波长光源在选择性填充情况下容易实现TE模式单模单偏振运转,而具体波长与纤芯参量密切相关.

通过以上分析可以看到,采用选择性填充的方法有助于实现进一步压缩光纤的有效模场面积和提高光纤非线性系数,同时有利于调整色散.而且此选择性填充方法非常容易操作,无需另行制备光纤.说明基于选择性填充方法具有明显的操作可行性,利于相关研究人员参考借鉴.

### 3 结论

本文提出利用选择气孔填充非线性液体的纳米纤芯光纤结构来增强现有纳米纤芯光纤的非线性系数并改善其色散特性.本文分析该结构的光场模式特性与非线性光纤参量之间的关系;研究了通过选择性填充非线性液体对光纤模式、有效模场面积、非线性和色散等参量的影响.分析结果表明采用适当的选择气孔填充方式以及纤芯尺寸有助于实现光纤单模单偏振工作,并且可以大幅度地提升纳米纤芯光纤的非线性系数.

#### 参考文献

- [1] ZHONG Xian-qiong, XIANG An-beng, CHENG Ke. Propagation of optical wave with phase perturbed by continuous spectrum and generation of pulse trains in optical fibers with quintic nonlinearity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1328-1332.
- [2] CHEN Xin-yi, WU Bao-Jian, YUAN Hao. Research on regeneration characteristics of optical pulse in active non-linear fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0106021.
- [3] EN Xing-ming. Nonlinear optical fiber channel capacity estimation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(Sup1): 14-17.
- [4] NAN Yin-bo, LI Huo, LOU Cai-yun. Combination of highly nonlinear fiber, an optical bandpass filter, and a Fabry-Perot filter to improve the signal-to-noise ratio of a supercontinuum continuous-wave optical source[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(15): 3045-3050.
- [5] OTT J R, HEUCK M, AGGER C, *et al.* Label-free and selective nonlinear fiber-optical biosensing [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(25): 20834-20847.
- [6] 安琳. 全光信号处理方法及器件设计研究[D]. 北京航空航天大学博士论文, 2009.
- [7] CUBEDDU R, ZARAGA F. Nonlinear refractive index of  $\text{CS}_2$  in small scale filaments[J]. *Optics Communications*, 1971, **3**(5): 310-311.
- [8] LEE J H, BELARDI W, FURUSAWA K, *et al.* Four wave mixing based 10-gb/s tunable wavelength conversion using a holey fiber with a high SBS threshold[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(3): 440-442.
- [9] LEONG J Y Y, PETROPOULOS P, ASIMAKIS S, *et al.* A lead silicate holey fiber with  $\gamma=1860\ \text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$  at 1550 nm [C]. 2005 Conference on Optical Fiber Communication, Washington DC: Optical Soc. America, 2005: PDP22.
- [10] SAITOH K, KOSHIBA M, *et al.* Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(8): 843-852.
- [11] RYASNYANSKIY A, LIN A, BELWALKAR A, *et al.* Nonlinear frequency conversion in bismuth-doped tellurite suspended core fiber[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(16-17): 3977-3979.
- [12] MAGI E C, FU L B, NGUYEN H C, *et al.* Enhanced kerr nonlinearity in sub-wavelength diameter  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fiber tapers[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(16): 10324-10329.
- [13] SAITOH K, KAKIHARA K, VARSHENEY S, *et al.* Nonlinearity enhancement and dispersion management in bismuth microstructured fibers with a filled slot defect[C]. 2008 Conference on Lasers and Electro-Optics & Quantum Electronics and Laser Science Conference, New York: IEEE, 2008, 1-9: 2585-2586.
- [14] ASIMAKIS S, PETROPOULOS P, POLETTI F, *et al.* Towards efficient and broadband four-wave-mixing using short-length dispersion tailored lead silicate holey fibers[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 596-601.
- [15] ALMEIDA V R, XU Q, BARRIOS C A, *et al.* Guiding and confining light in void nanostructure [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(11): 1209-1211.
- [16] WIEDERHECKER G S, CORDEIRO C M B, *et al.* Field enhancement within an optical fibre with a subwavelength air core [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(1): 115-118.
- [17] AN Lin, ZHENG Zheng, LI Zheng, *et al.* Dispersion-flattened holey fiber with an ultra-small mode area using a high index slot structure [C]. 2009 Conference on Lasers and Electro Optics. Washington DC: Optical Soc. America, 2009: JThE71.
- [18] RICHARDSON D J, POLETTI F, TSE M L V, *et al.* Recent advances in highly nonlinear microstructured optical fibers and their applications [C]. Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference (AOE 2008), Shanghai, China, Optical Society of America, 2008, paper SuB1.