

# 高非线性低色散斜率光子晶体光纤设计

徐惠真\*, 杨兰

集美大学理学院, 福建 厦门 361021

**摘要** 为了提高光子晶体光纤的非线性系数,降低色散斜率和制作难度,提出了一种硅纳米纤芯光子晶体光纤,其纤芯和包层空气孔都为圆形。利用平面波展开法进行仿真,研究了硅纳米纤芯直径、包层空气孔直径、晶格常数三个参量分别对色散和非线性系数的影响。通过优化,最终得到零色散波长在 1550 nm 处,具有高非线性、低色散斜率的光子晶体光纤。1550 nm 处光纤的色散斜率低至  $0.251 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ ,非线性系数高达  $1.0 \times 10^5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,限制损耗为 0.39 dB/km。此外,该光纤结构简单、制作方便,在较小的工艺误差下仍能保持较好的性能。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 非线性; 色散; 色散斜率; 硅纳米晶

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0506004

## Design of Photonic Crystal Fiber with High Nonlinearity and Low Dispersion Slope

Xu Huizhen\*, Yang Lan

School of Science, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract** In this study, we propose a type of photonic crystal fiber with a silicon nanocrystal core exhibiting improved nonlinearity and reduced dispersion slope and fabrication difficulty. The core and cladding air holes are round. The effects of the core diameter, the diameter of the air holes in the cladding, and the lattice constant on dispersion and nonlinearity are investigated using the plane wave expansion method. A photonic crystal fiber with high nonlinearity and low dispersion slope can be obtained through optimization when considering a zero-dispersion wavelength of 1550 nm. Here, the dispersion slope of fiber at 1550 nm wavelength is as low as  $0.251 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ , whereas the nonlinear coefficient is as high as  $1.0 \times 10^5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . Further, the confinement loss is 0.39 dB/km. The structure of the photonic crystal fiber is simple and its fabrication is easy. In addition, it can maintain good performance even in the presence of small process errors.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; nonlinearity; dispersion; dispersion slope; silicon nanocrystal

**OCIS codes** 060.5295; 220.4000; 190.4370

## 1 引言

自从 1996 年第一根光子晶体光纤(PCF)实现以来<sup>[1]</sup>,光子晶体光纤就由于优越的性能和灵活的结构成为学术领域的热点之一。光子晶体光纤可

以设计成具有无截止单模<sup>[2]</sup>、高双折射<sup>[3]</sup>、高非线性<sup>[4]</sup>、超色散平坦<sup>[5]</sup>等特性,因此在色散补偿<sup>[6]</sup>、超连续谱展宽<sup>[7]</sup>、涡旋光<sup>[8]</sup>等诸多领域都有应用。高非线性光子晶体光纤在超连续谱产生、光参量放大、全光波长变换等领域都有应用。在波分复用系统

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-07-26; 录用日期: 2020-08-06

基金项目: 福建省科技厅中央引导地方科技发展专项(2019L3008)、集美大学培育计划(ZP2020061)

\*E-mail: elimshee@jmu.edu.cn

中,对于光纤中具有四波混频效应的全光波长变换技术,为了得到高效的宽带波长变换,不仅要求所使用的光纤长度短,而且光纤必须具有低色散值、低色散斜率及高非线性的特性;而为了产生超宽带、超平坦的连续谱,要求非线性光纤不仅具有高非线性,还要具有平坦的色散曲线;此外,提高非线性有利于进一步降低光学器件的功耗。因此,具有高非线性、低色散值、低色散斜率的光子晶体光纤有利于推动光子晶体光纤在非线性和光通信等领域的应用。目前为止,已经有很多关于高非线性光子晶体光纤的研究被报道。由于纯石英的非线性折射率很低,大约为  $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ,因此石英纤芯的光子晶体光纤的非线性系数一般比较低。许多研究人员通过在纤芯中采用更高非线性折射率的材料,如  $\text{As}_2\text{S}_3$ <sup>[9]</sup>、掺铈<sup>[10]</sup>等,来提高光纤的非线性系数。Amin等<sup>[11]</sup>提出一种磷化镓(GaP)纳米棒为纤芯的光子晶体光纤,该光纤的非线性系数在  $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$  波长内都达到了  $10^4 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  量级。Paul等<sup>[12]</sup>也将 GaP 纳米棒作为纤芯,  $1 \mu\text{m}$  波长处  $x$  和  $y$  方向的非线性系数分别高达  $62448.64 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  和  $63435.74 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。但是,该 GaP 纳米棒为正六边形形状,制作过程中很难保证其角度为完美的  $120^\circ$ 。Liao等<sup>[13-14]</sup>分别利用椭圆形硅纳米柱来获得高非线性和高折射率,但椭圆形的结构同样会为制作过程带来困难,其质量也无法保证。为了提高非线性,近年来有些研究人员又提出一种将两根高非线性介质柱隔开纳米级别的距离形成纳米级空气沟槽作为纤芯的方法,此方法可以极大地提高光纤的非线性。Liao等<sup>[15]</sup>利用两根硅(Si)介质柱隔开形成的空气沟槽作为纤芯,准横磁波(TM)在  $1.55 \mu\text{m}$  波长处的非线性系数达  $3.5739 \times 10^4 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,但是并未对限制损耗进行讨论。Li等<sup>[16]</sup>也利用该纤芯结构配合 4 个椭圆形空气孔作为纤芯,获得了高折射率和高双折射,  $1.55 \mu\text{m}$  波长处的非线性系数高达  $2.4 \times 10^6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。虽然将两根高非线性介质柱隔开纳米级别的距离形成纳米级空气沟槽作为纤芯的方法可以极大地提高光纤的非线性,但是所用的介质柱都是矩形的,  $90^\circ$  的矩形角同样会为制作过程带来困难,光纤的质量自然无法得到保证。

基于以上问题,本文提出一种将圆形的硅纳米棒为纤芯、具有六角晶格的光子晶体光纤,在提高光纤非线性的同时,还可以降低光纤拉制的难度,保证光纤的质量和性能。对该光纤的色散、色散斜率、非

线性系数、限制损耗、制作缺陷等都进行了讨论。该光纤结构简单、制作方便,仅需对纤芯直径、晶格常数、包层空气孔直径 3 个结构参数进行控制,有利于推广光子晶体光纤在非线性、光通信等领域的应用。

## 2 光纤结构设计 with 基本理论

由于硅材料具有较强的非线性和较高的折射率,有利于提高光纤的非线性,增强纤芯对场的束缚能力,因此本论文的纤芯材料采用纳米级别的硅材料。图 1 为所设计的高非线性光子晶体光纤截面图,纤芯由直径为  $d_0$  的纳米级硅介质柱构成,包层由直径为  $d$  的空气孔以六角晶格结构排列而成,晶格常数为  $\Lambda$ ,基底材料为  $\text{SiO}_2$ 。硅纳米纤芯及  $\text{SiO}_2$  基底的折射率分别由 Sellmeier 公式<sup>[17-18]</sup>给出。利用平面波展开法对光纤的模式进行分析。经过仿真模拟可得到该光纤的一些特性,色散  $D$  的表达式为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \times \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为波长;  $c$  为光速;  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的实部。对色散  $D$  进行求导,则可进一步得到色散斜率  $S = dD/d\lambda$ 。有效模场面积  $A_{\text{eff}}$ 、非线性系数  $\gamma$  及限制损耗  $L_c$  这三个参数的公式为

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

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

$$L_c = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (4)$$

式中:  $n_2$  分别为 Si 纳米棒和  $\text{SiO}_2$  材料的非线性折射率, Si 纳米棒的非线性折射率取为  $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ <sup>[13,19]</sup>;  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的虚部。

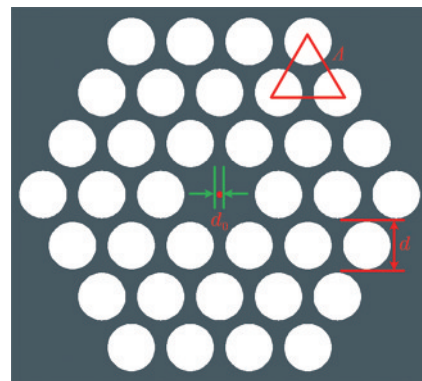


图 1 高非线性 PCF 截面图

Fig. 1 Cross section of PCF with high nonlinearity

### 3 仿真结果分析及讨论

为了方便设计,首先考察纤芯直径 $d_0$ 、晶格常数 $\Lambda$ 及包层空气孔直径 $d$ 三个结构参数对所设计光纤的色散、非线性系数等特性的影响。图2为硅纳米纤芯直径 $d_0$ 对色散曲线及非线性系数的影响,其中 $\Lambda=2\ \mu\text{m}$ , $d=1.6\ \mu\text{m}$ 。由图2可以看出,纤芯直径对光纤特性的影响很大。从图2(a)可以看出:在同一波长处,随着纤芯直径不断增大,色散值减小,色散曲线斜率变化很大;硅纳米纤芯的直径越大,色散曲线越陡峭;纤芯直径对短波波段的色散影响较大,而对长波波段的色散影响较小;如果硅纳米纤芯直径太小(如 $d_0=0\ \text{nm}$ 和 $d_0=80\ \text{nm}$ ),在所考察的波长范围内不存在零色散波长;而如果硅纳米

纤芯过大(如 $d_0=240\ \text{nm}$ ),则色散为全正常色散,也不会存在零色散波长;而只有 $d_0$ 选在 $160\ \text{nm}$ 附近,才会在所考察波段内存在色散曲线; $d_0=0\ \text{nm}$ 曲线代表纤芯为纯石英,没有纳米硅介质柱的情况,色散曲线较为平缓,色散值较小。但是纤芯为纯石英时,光纤的非线性极弱,纳米硅纤芯可以极大地提高光纤的非线性,如图2(b)所示。这个除了因为纳米硅的非线性折射率远远高于纯石英之外,还因为硅纳米纤芯介质的折射率高于石英的折射率,因此增强了纤芯对传输场的束缚能力,减小了有效模场的面积,非线性自然就得到了提高。从图2(b)可以看出:非线性系数与波长呈反比关系;增大硅纳米纤芯的直径 $d_0$ ,可以增大光纤的非线性系数。

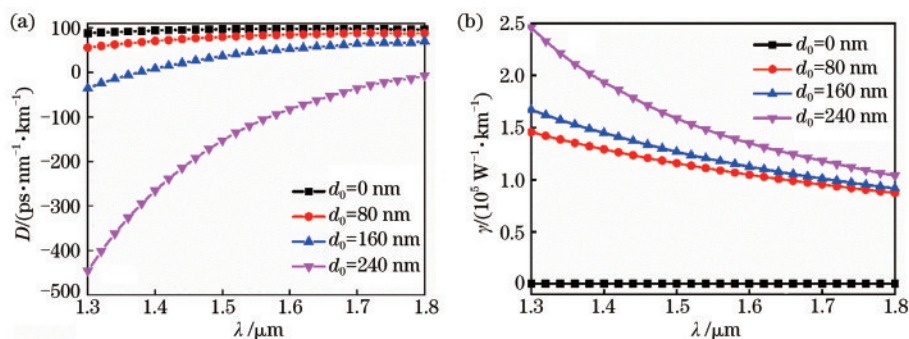


图2 硅纳米纤芯直径对色散和非线性系数的影响。(a)色散;(b)非线性系数

Fig. 2 Influence of diameter of silicon nanocrystal core on dispersion and nonlinear coefficient. (a) Dispersion; (b) nonlinear coefficient

图3为晶格常数 $\Lambda$ 对色散及非线性系数的影响,其中 $d_0=200\ \text{nm}$ , $d=1.6\ \mu\text{m}$ 。图3(a)显示晶格常数对色散曲线并无太大影响,尤其是在长波波段,4条色散曲线几乎重叠在一起。而从图3(b)可以看出,晶格常数增大会使非线性系数曲线整体下

移,同一波长处,晶格常数增大,非线性下降。这是由于晶格常数增大则包层空气孔之间的距离增大,包层的等效折射率跟着增大,因此纤芯和包层之间的折射率差减小,纤芯对场的束缚能力减弱,有效模场面积增大,非线性系数自然就减小了。

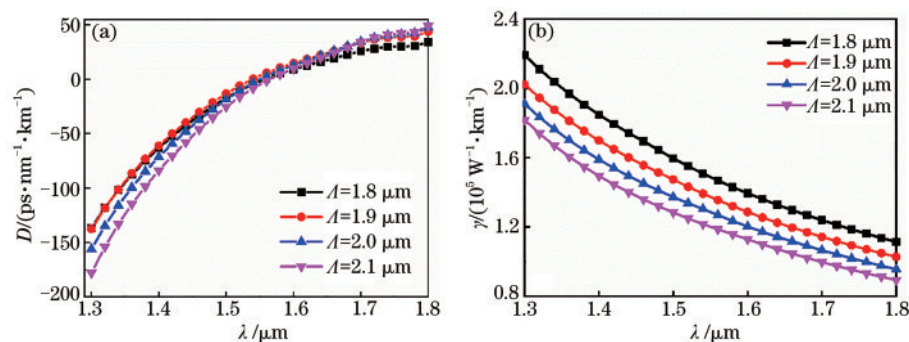


图3 晶格常数对色散和非线性系数的影响。(a)色散;(b)非线性系数

Fig. 3 Influence of lattice constant on dispersion and nonlinear coefficient. (a) Dispersion; (b) nonlinear coefficient

图4为包层空气孔直径 $d$ 对色散及非线性系数的影响,其中 $d_0=200\ \text{nm}$ , $\Lambda=2\ \mu\text{m}$ 。图4(a)显示包

层空气孔直径对色散曲线的影响很小,4条色散曲线几乎重叠在一起,只在长波波段稍微分开。而从

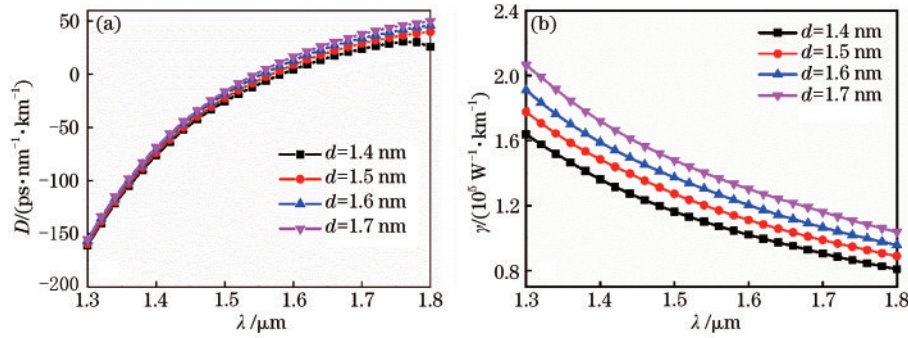


图 4 包层空气孔直径对色散和非线性系数的影响。(a)色散;(b)非线性系数

Fig. 4 Influence of air hole diameter in the cladding on dispersion and nonlinear coefficient. (a) Dispersion; (b) nonlinear coefficient

图 4(b)可以看出,非线性系数曲线会随着包层空气孔直径增大而整体上移,同一波长处,包层空气孔直径增大,非线性系数增加。这是由于包层空气孔增大,包层等效折射率减小,纤芯和包层间折射率差增大,有效模场面积减小,非线性系数显然就增大了。

基于以上结论,首先通过调整硅纳米纤芯的直径,将零色散波长调整到 1550 nm 附近,再微调包层空气孔的直径及晶格常数,在这过程中,要同时考虑色散斜率和非线性系数。最终得到的色散曲线和色散斜率(S)如图 5(a)所示,零色散波长在 1550 nm 处,其中  $d_0=190$  nm,  $\Lambda=2.05$   $\mu$ m,  $d=1.38$   $\mu$ m。在

所考察的 1.3~1.55  $\mu$ m 波段,色散斜率保持为 0~1 ps·nm<sup>-2</sup>·km<sup>-1</sup>,具有较低的色散斜率;而在 1550 nm 波长处的色散斜率仅为 0.251 ps·nm<sup>-2</sup>·km<sup>-1</sup>,C 波段的色散斜率为 0.24~0.272 ps·nm<sup>-2</sup>·km<sup>-1</sup>。从图 5(b)可以看出:该光纤具有较好的模场束缚能力,限制损耗  $L_c$  较小,1550 nm 波长处的限制损耗仅为 0.39 dB/km;随着波长增大,纤芯对场的束缚能力减弱,限制损耗增大;由于使用了硅纳米纤芯,光纤的非线性系数可以大大得到提高,在  $10^4 \sim 10^5$  W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup> 的量级。1550 nm 波长处的非线性系数达  $1.0 \times 10^5$  W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>,高于文献 [11-15] 所报道的结果。

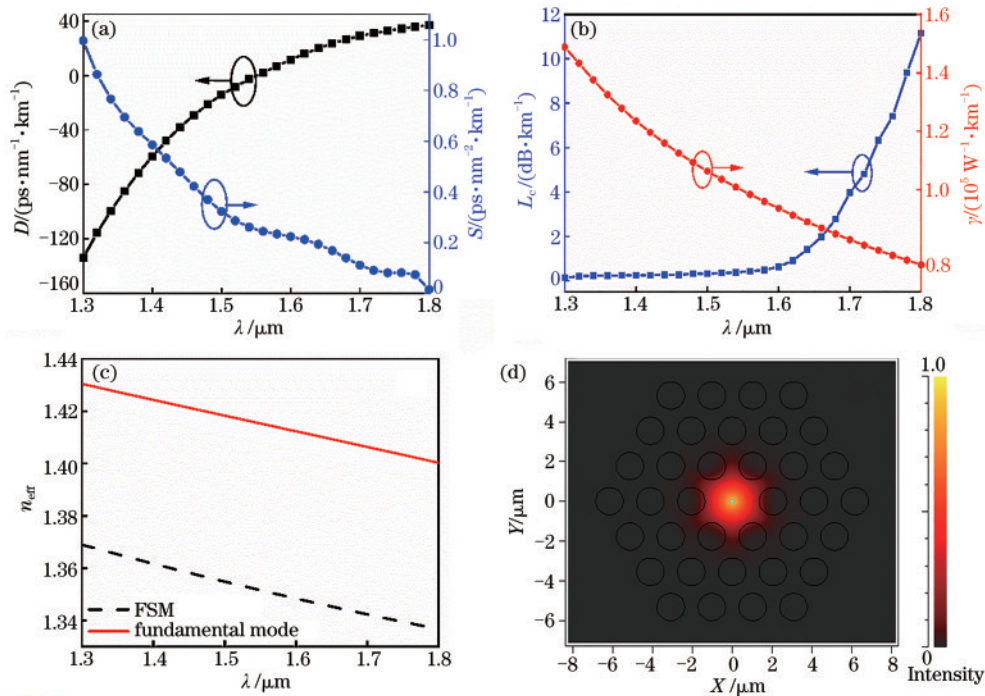


图 5 优化后的高非线性 PCF 的性能。(a)色散和色散斜率;(b)限制损耗和非线性系数;(c)单模特性;(d)1550 nm 处的模场分布图

Fig. 5 Properties of optimized PCF with high nonlinearity. (a) Dispersion and dispersion slope; (b) confinement loss and nonlinear coefficient; (c) single mode property; (d) mode field distribution at 1550 nm wavelength

为了考察所设计的高非线性光纤是否能够支持单模传输,对基模的有效折射率与包层空间填充模(FSM)的有效折射率进行比较,如图5(c)所示。可以看出,基模的有效折射率在 $1.3\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 波段都是高于FSM模的,由此可以判断出,所设计的高非线性光纤在该波段是支持单模传输的。图5(d)为 $1550\ \text{nm}$ 处的模场分布图,可以看出,模场可以很好地束缚在光纤纤芯中。

#### 4 工艺误差对性能的影响分析

基于已报道的硅光子晶体光纤成果,本光纤可以通过先拉制出包层和纤芯为圆形空气孔的光子晶体光纤,然后利用高压化学气相沉积法(HPCVD)在纤芯的空气孔中沉积硅<sup>[20-21]</sup>,也利用熔芯拉拔技术<sup>[21]</sup>拉制得到。但是在拉制过程中,光子晶体光纤的空气孔和纤芯尺寸非常小及技术等原

因,光纤的结构参数会产生偏差,因此还需讨论参数误差对光纤性能的影响。图6为工艺误差对色散曲线、色散斜率和非线性系数的影响,所有的结构参数都在优化值的基础上同时变化 $\pm 2\%$ 。实际上,并非所有参数都以相同的方式偏离其最佳值,可能会出现一些平均效应,因此总体参数的同时变化可提供制造缺陷严重性的上限。由图6(a)、(b)可以看出,工艺误差对色散曲线和色散斜率的影响并不大,随着波长的增大影响更小。图6(a)显示:工艺误差会使零色散波长发生偏移,当所有参数减小 $2\%$ 时,零色散波长移动到了 $1.52\ \mu\text{m}$ 波长处;而当所有参数都增大 $2\%$ 时,零色散波长则移动到 $1.57\ \mu\text{m}$ 波长处。色散斜率则仍为 $0\sim 1.1\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$ 。从图6(c)可以看出, $\pm 2\%$ 的工艺误差对非线性系数几乎没有影响,3条曲线几乎重合。从以上分析可以看出,微小的工艺误差对于所设计的光纤并无太大影响,光纤仍然能够保持较好的性能。

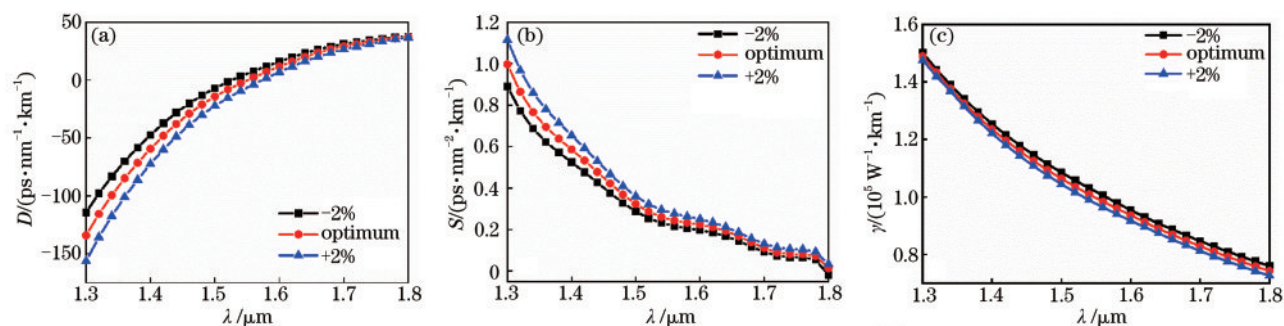


图6 工艺误差造成的影响。(a)色散曲线;(b)色散斜率;(c)非线性系数

Fig. 6 Influence of process errors. (a) Dispersion curve; (b) dispersion slope; (c) nonlinear coefficient

#### 5 结 论

利用硅纳米纤芯来提高光子晶体光纤的非线性,仅通过控制硅纳米纤芯直径、包层空气孔直径、晶格常数3个参数,即可在提高非线性的同时减小色散斜率。所设计光纤的零色散波长在 $1550\ \text{nm}$ 波长处,该波长处的色散斜率仅为 $0.251\ \text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$ ,非线性系数高达 $1.0\times 10^5\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。对于微小的工艺误差,所设计的光纤也能保持较好的性能。此外,由于所有的空气孔都为圆形,结构简单、制作方便,该光纤可应用于全光波长变换、超连续谱产生等领域。

#### 参 考 文 献

[1] Knight J C, Birks T A, St J Russell P, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.

[2] Birks T A, Knight J C, Russell P S. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 1997, 22(13): 961-963.

[3] Yang T, Ding C, Ziolkowski R W, et al. Circular hole ENZ photonic crystal fibers exhibit high birefringence [J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17264.

[4] Ding S M, Yang S G, Yang Y, et al. Interaction of acoustic phonons and photons in highly nonlinear photonic crystal fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508027.

丁思明, 杨四刚, 杨益, 等. 高非线性光子晶体光纤中的声光相互作用[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508027.

[5] Huang Y L, Zhou N N, Li Q, et al. Design of all-solid W-type index fluorotellurite fibers with near-zero-flattened chromatic dispersion for optical frequency comb generation[J]. Applied Optics, 2019, 58(32): 8852-8857.

- [6] Xu H Z, Wang X L, Huang X J, et al. All-solid photonic crystal fiber for dispersion compensation over S+C+L wavelength bands [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(17): 1499-1502.
- [7] Zhang T T, Shi W H. Numerical research on ultraviolet supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0301012.  
张甜甜, 施伟华. 光子晶体光纤产生紫外超连续谱的数值研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0301012.
- [8] Wei W, Zhang L X, Zhang Z M, et al. Design of three vortex photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0906006.  
魏薇, 张羚翔, 张志明, 等. 三种涡旋光光子晶体光纤的设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0906006.
- [9] Zhang X D, He M H, Chang M, et al. Dual-cladding high-birefringence and high-nonlinearity photonic crystal fiber with  $As_2S_3$  core [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 396-402.
- [10] Xu H Z, Zhou C J. Highly nonlinear all-solid photonic crystal fibers with low dispersion slope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1106001.  
徐惠真, 周昌杰. 全固高非线性低色散斜率光子晶体光纤设计[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1106001.
- [11] Amin M N, Faisal M. Highly nonlinear polarization-maintaining photonic crystal fiber with nanoscale GaP strips [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(35): 10030-10037.
- [12] Paul B K, Golam Moctader M, Ahmed K, et al. Nanoscale GaP strips based photonic crystal fiber with high nonlinearity and high numerical aperture for laser applications[J]. *Results in Physics*, 2018, 10: 374-378.
- [13] Liao J F, Sun J Q, Du M D, et al. Highly nonlinear dispersion-flattened slotted spiral photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(4): 380-383.
- [14] Ghunawat A K, Chandra R, Tiwari M, et al. Design optimization of a highly birefringent and highly nonlinear silicon photonic crystal fiber[M]// Janyani V, Tiwari M, Singh G, et al. *Optical and wireless technologies. Lecture notes in electrical engineering*. Singapore: Springer, 2018, 472: 301-308.
- [15] Liao J F, Huang T Y. Highly nonlinear photonic crystal fiber with ultrahigh birefringence using a nano-scale slot core[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 22: 107-112.
- [16] Li F, He M H, Zhang X D, et al. Ultra-high birefringence and nonlinearity photonic crystal fiber with a nanoscale core shaped by an air slot and silicon strips[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102082.
- [17] Spano R, Galan J V, Sanchis P, et al. Group velocity dispersion in horizontal slot waveguides filled by Si nanocrystals [C]//2008 5th IEEE International Conference on Group IV Photonics, September 17-19, 2008, Cardiff, UK. New York: IEEE Press, 2008: 237-240.
- [18] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [19] Koos C, Jacome L, Poulton C, et al. Nonlinear silicon-on-insulator waveguides for all-optical signal processing [J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5976-5990.
- [20] Won D J, Ramirez M O, Kang H, et al. All-optical modulation of laser light in amorphous silicon-filled microstructured optical fibers [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(16): 161112.
- [21] Peacock A C, Sparks J R, Healy N. Semiconductor optical fibres: progress and opportunities [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 53-72.