

文章编号: 1001-3806(2017)05-0759-05

掺  $\text{Yb}^{3+}$  铝硅酸盐玻璃纤芯的光子晶体光纤蔡辉剑<sup>1</sup>, 沈淑娟<sup>2</sup>, 刘献省<sup>3</sup>

(1. 鹤壁职业技术学院 机电工程学院, 鹤壁 458030; 2. 郑州大学 河南省激光与光电信息技术重点实验室, 郑州 450052; 3. 河南大学 河南省光伏材料重点实验室, 开封 475004)

**摘要:** 为了获得用于掺  $\text{Yb}^{3+}$  脉冲光纤激光器的具有反常色散的光子晶体光纤, 设计了一种掺  $\text{Yb}^{3+}$  铝硅酸盐玻璃纤芯的结构, 包层部分为普通的六边形结构, 分布着直径相同的空气孔, 其纤芯横截面为椭圆形, 在包层和纤芯之间设计了4个小椭圆空气孔。研究了包层的空气孔直径  $d$  与空气孔中心间距  $\Lambda$  以及二者的比值  $d/\Lambda$  这些参量变化时, 色散随波长变化的情况; 同时研究了4个小孔对色散和双折射的影响。结果表明, 这一结构的光子晶体光纤, 当  $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.5$  时色散呈现反常色散, 作为掺  $\text{Yb}^{3+}$  脉冲光纤激光器的增益部分是可行的。该研究对掺  $\text{Yb}^{3+}$  光子晶体光纤在脉冲光纤激光器方面的使用是有帮助的。

**关键词:** 光纤光学; 机械加工; 光纤激光器; 光子晶体光纤; 铝硅酸盐玻璃

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.05.028

Photonic crystal fiber with  $\text{Yb}^{3+}$ -doped aluminosilicate glass coreCAI Huijian<sup>1</sup>, SHEN Shujuan<sup>2</sup>, LIU Xiansheng<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebi Polytechnic, Hebi 458030, China; 2. Henan Key Laboratory of Laser and Optoelectric Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 3. Henan Key Laboratory of Photovoltaic Material, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** In order to get photonic crystal fiber with anomalous dispersion, which can be used as the gain part of a  $\text{Yb}^{3+}$ -doped pulse fiber laser, a structure of photonic crystal fiber (PCF) with  $\text{Yb}^{3+}$ -doped aluminosilicate glass core was designed. The cross-section of the core was oval, the cladding was the ordinary hexagonal structure with air holes in the same diameter, and there were four small air oval holes between the core and the cladding. The influences of air hole's diameter  $d$ , pitch  $\Lambda$  and the ratio  $d/\Lambda$  of the cladding on the relationship between dispersion and wavelength were studied, as well as the influence of four small air oval holes on the relationship between dispersion and birefringence. The results show that when  $\Lambda$  is  $2.3\mu\text{m}$  and  $d/\Lambda$  is 0.5, the anomalous dispersion is observed, and this photonic crystal fiber can be used as the gain part of a  $\text{Yb}^{3+}$ -doped pulse fiber laser as well. The research is helpful for the use of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped PCF as the gain part of a pulse fiber laser.

**Key words:** fiber optics; machining process; fiber laser; photonic crystal fiber; aluminosilicate glass

## 引 言

和传统激光器相对比, 光纤激光器具有体积小、重量轻、维护简单、价格低廉等优点。进入20世纪80年代以后, 稀土掺杂的光纤激光器的研究得到了较快的发展, 并一直持续为研究热点, 其中掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器在机械加工领域得到了快速发展。

对于掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤为增益介质的光纤激光器, 其输

基金项目: 鹤壁职业技术学院校本课题基金资助项目 (HZY-2015-77)

作者简介: 蔡辉剑(1963-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事激光与光纤光学方面的研究。

E-mail: caihj@126.com

收稿日期: 2016-10-20; 收到修改稿日期: 2017-01-04

出波长因具体实验条件的不同而有区别。SONG 等人于2008年报道了使用掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层大模场面积光纤, 输出波长为  $1079\text{nm}$  的激光<sup>[1]</sup>。CHEN 等人<sup>[2]</sup>在2009年报道了一种皮秒掺镱光纤激光器, 输出波长为  $1064\text{nm}$  的激光。TAN 等人<sup>[3]</sup>在2013年报道了一种全光纤结构耗散孤子被动锁模光纤激光器, 输出了波长为  $1067\text{nm}$  的激光。

2001年, WADSWORTH 等人报道了第1台  $\text{Yb}^{3+}$  光子晶体光纤激光器<sup>[4]</sup>, 这是光子晶体光纤首次被应用到光纤激光器中, 抽运光源为  $915\text{nm}$  的钛宝石激光器, 输出波长为  $1040\text{nm}$ 。此外, 据报道, ZHANG 等人<sup>[5]</sup>在2012年使用掺  $\text{Yb}^{3+}$  大模场光子晶体光纤作为增益介质, 利用非线性偏振旋转以及滤光片提供的耗散作用实现了  $1038\text{nm}$ 、脉冲宽度  $1.03\text{ps}$ 、平均功率

10W 的稳定锁模。2012 年, XIE 等人<sup>[6]</sup> 搭建了高能量多通单元的耗散孤子锁模光纤振荡器, 平均功率达到 4.9W, 对应的单脉冲能量为 314nJ, 中线波长为 1038nm。2014 年, LI 等人<sup>[7]</sup> 使用半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 的锁模掺镱光子晶体光纤激光器, 输出波长为 1024nm。本文中就是一种可作为掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器增益部分的光子晶体光纤进行了研究。

### 1 结构的设计与理论分析

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 又称为微结构光纤 (micro-structured fibers, MSF), 是一种具有特殊色散和非线性结构的光纤。这个概念最早由 RUSSELL 在 1992 年提出。它分为两大类, 一类称为全内反射型光子晶体光纤 (total internal reflection photonic crystal fiber, TIR-PCF), 另一类称为光子带隙型光子晶体光纤 (photonic bandgap photonic crystal fiber, PBG-PCF)。前者的特点是纤芯的折射率比包层的折射率高, 这种光子晶体光纤也叫做折射率引导型光子晶体光纤。后者的特点是纤芯为空气或者由折射率比包层低的材料构成。

对于折射率引导型光子晶体光纤而言, 实现起来比较简单。其结构特点是在 2 维方向上紧密排列, 在 3 维方向上基本保持不变, 由空气孔构成包层。对于纤芯部分的设计, 为了达到特定的目的, 人们也在尝试改变其结构形态和材料, 如 WANG 等人<sup>[8]</sup> 为了控制光子晶体光纤的损耗而设计了一种圆内旋轮线型 Kogome 晶格纤芯的光子晶体光纤。YANG 等人<sup>[9]</sup> 为了研究模间色散, 提出了一种三芯光子晶体光纤。在材料方面, 常规光子晶体光纤纤芯部分的材料主要采用石英玻璃, 但是为了控制光子晶体光纤的特性, 也会选择其它材料。SUN 等人<sup>[10]</sup> 为了增强光子晶体光纤的非线性参量而在纤芯部分加入了 Ge。而 LIU 等人<sup>[11]</sup> 为了控制色散而设计了 Bi 掺杂的纤芯。WANG 等人<sup>[12]</sup> 在 2014 年报道, 以一种掺 Yb<sup>3+</sup> 硅酸盐材料作为 PCF 的纤芯, 纤芯形状为正六边形。

本文中研究的是一种椭圆纤芯的全内反射型光子晶体光纤, 如图 1 所示。光纤横截面分为包层和纤芯 (见图 1 中的 3), 包层内设有大空气孔 (见图 1 中的 1), 大空气孔均匀排列构成六角点阵的正六边形阵列, 相邻的 3 个大空气孔的中心组成正三角形, 包层的基质材料仍然为石英玻璃材料。纤芯位于由大空气孔组成的正六边形的中心, 材料由掺 Yb<sup>3+</sup> 铝硅酸盐玻璃构成, 纤芯的横截面形状采用椭圆形结构。靠近纤芯的包层空气孔和纤芯之间排列有 4 个椭圆形小空气孔

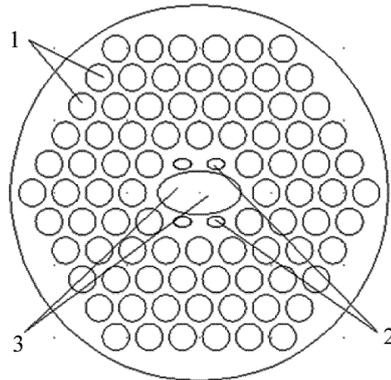


Fig. 1 Cross-section of PCF with four small oval air holes

(见图 1 中的 2), 4 个小空气孔以椭圆形纤芯的长轴为对称轴分布在纤芯两侧, 小空气孔的中心与大空气孔的中心位于一致的点阵位置。

对于这种结构的包层系数计算按下面公式: 总色散系数  $D(\lambda) =$  材料色散系数  $D_m(\lambda) +$  波导色散系数  $D_w(\lambda)$ 。材料色散系数  $D_m(\lambda)$  在短波区域很大, 占支配地位, 而在长波区材料色散系数随波长的增加而减小, 二者可以有互相抵消的情形。 $D_m(\lambda)$  可由 Sellmeier 公式计算得到。对于椭圆纤芯处材料为铝硅酸盐玻璃, 其材料色散关系由 Sellmeier 公式<sup>[13]</sup> 表示:

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B}{1 - C/\lambda^2} + \frac{D}{1 - E/\lambda^2} \quad (1)$$

式中,  $n$  为材料折射率;  $A, B, C, D, E$  可由实验数据拟合得到。 $A, B, C, D$  的数值见表 1。

Table 1 Coefficient of Sellmeier formula

A	B	C	D	E
1.4136733	0.9503994	$1.3249011 \times 10^{-2}$	0.9044591	?

$E$  的数值和温度有关, 可利用表 2 中的数据<sup>[14]</sup> 得到。表 2 中的第 1 列为波长  $\lambda$ , 第 2 列是由实验得到的铝硅酸盐玻璃在 28℃ 时的折射率  $n$ , 第 3 列是根据前两列数据由上面的 Sellmeier 公式, 连同已知的  $A, B, C, D$  的数值, 计算得到的  $E$  的相应数值。

Table 2 Coefficient E of Sellmeier formula

$\lambda/\mu\text{m}$	$n$	$E(\lambda, n, A, B, C, D)$
0.54607	1.551	101.59854
0.578	1.54928	99.362136
1.01398	1.53854	100.22775
1.12866	1.53699	99.556230
1.36728	1.53419	100.64881
1.47	1.53292	99.435454
1.52952	1.53224	99.728875
1.66	1.53078	100.96798
1.701	1.53014	99.402531
1.981	1.52648	99.464789

将  $E$  的 10 个计算值取平均后得到: 100.03092,

由此得到研究纤芯色散所需的 Sellmeier 公式的全部拟合系数,见表 3。

Table 3 Whole coefficient of Sellmeier formula

A	B	C	D	E
1.4136733	0.9503994	1.3249011 × 10 <sup>-2</sup>	0.9044591	100.03932

为了计算光子晶体光纤包层部分硅玻璃的色散,需要利用的 Sellmeier 公式为:

$$n^2(\lambda_1) = 1 + \sum_{i=1}^m \frac{A_i \lambda_{i+1}^2}{\lambda_{i+1}^2 - \lambda_i^2} \quad (2)$$

其拟合系数见表 4<sup>[15]</sup>。

Table 4 Coefficient of Sellmeier formula of cladding

A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>
0.6961663	0.4079426	0.8974794	0.0684043	0.1162414	9.896161

原则上得到 Sellmeier 公式的具体形式后,利用公式  $D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2}$  对 Sellmeier 公式求 2 阶导即可计算出光子晶体光纤的材料色散系数  $D_m(\lambda)$ 。实际上可以在计算基模的有效折射率时将 Sellmeier 公式考虑进去,得到的有效折射率  $n_{eff}$  既包含了波导对色散的贡献,又包含了材料对色散的贡献。用下式<sup>[16]</sup>即可计算出光子晶体光纤的总色散系数  $D(\lambda)$  :

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

式中,  $Re(n_{eff})$  是基模有效折射率  $n_{eff}$  的实部,  $c$  为光速。

## 2 模拟与结果分析

基模是光纤中传输的最低阶模式,激光的绝大部分能量以基模的形式传播,所以只对基模的色散进行研究。综合考虑材料色散和波导色散,基模的色散是波长的函数,同时也是光子晶体光纤结构的函数。在波长 900nm ~ 1200nm 的范围内,改变光子晶体光纤的参量观察色散的情况。

### 2.1 比值 $d/\Lambda$ 一定时,基模色散系数 $D_b$ 随 $\Lambda$ 变化的情况

对于 PCF,选择椭圆纤芯的半长轴为 2.86μm,半短轴为 1.5μm。包层与纤芯之间的 4 个小椭圆孔的半

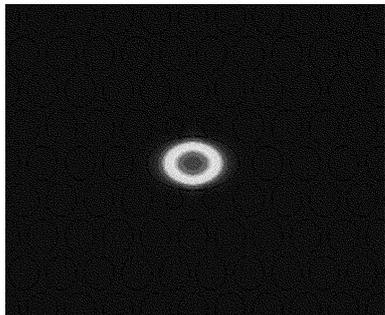


Fig. 2 Distribution of fundamental mode field

长轴与半短轴分别为 0.6μm 和 0.36μm。包层部分空气孔中心间距  $\Lambda$  取值为 1.9μm, 2.1μm, 2.3μm, 2.5μm,  $d/\Lambda = 0.8$ 。此时的模场形状如图 2 所示,色散曲线如图 3 所示。对比发现,当  $d/\Lambda$  比值保持不变时,随着间距  $\Lambda$  的增大,基模色散系数  $D_b$  呈现减小的趋势。

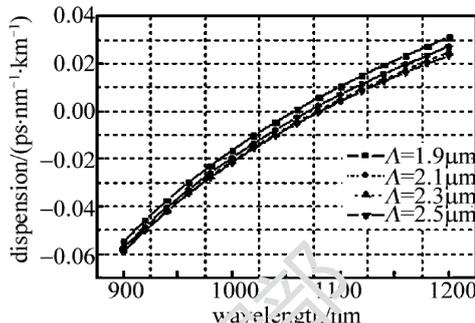


Fig. 3 Relationship between dispersion and wavelength with different values of  $\Lambda$  when  $d/\Lambda = 0.3$

当取包层空气孔直径  $d$  与气孔中心间距  $\Lambda$  的比值  $d/\Lambda = 0.5$ 、空气孔中心间距取 2.1μm, 2.3μm, 2.5μm 时,色散曲线如图 4 所示。结果显示:就 2.1μm 和 2.5μm 而言,仍然有色散随着间距增大而减小的特征,但是包层空气孔中心间距  $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$  时,色散曲线的形状比较特殊,在 980nm ~ 1220nm 的区间,色散呈现反常的平坦色散。而掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器输出波长范围通常位于这一区间的 1000nm ~ 1100nm 波段。

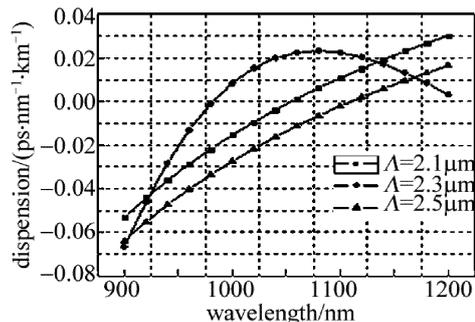


Fig. 4 Relationship between dispersion and wavelength with different values of  $\Lambda$  when  $d/\Lambda = 0.5$

### 2.2 $\Lambda$ 一定时,基模色散系数 $D_b$ 随比值 $d/\Lambda$ 变化的情况

同样选择椭圆纤芯的半长轴为 2.86μm,半短轴

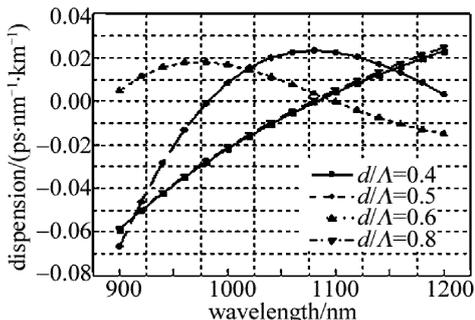


Fig. 5 Relationship between dispersion and wavelength with different values of  $d/\Lambda$  when  $\Lambda = 2.3$

为  $1.5\mu\text{m}$ 。包层部分空气孔中心间距  $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$ ，空气孔直径与间距比分别取  $0.4, 0.5, 0.6, 0.8$  时，色散曲线如图 5 所示。比较发现，当比值为  $0.5$  与  $0.6$  时，色散曲线较为特殊。在  $900\text{nm} \sim 1080\text{nm}$  的波长范围内，呈现反常色散。对比发现，当  $d/\Lambda$  为  $0.4$  和  $0.8$ ，而间距  $\Lambda$  不变的情况下，在大于  $980\text{nm}$  的很大波长区间内， $d/\Lambda$  比值大时，色散也较大。

### 2.3 4 个小椭圆孔的影响

为了研究纤芯与包层间 4 个小椭圆空气孔的影响，将图 1 所示的 4 个小孔去掉，如图 6 所示。两图所示的 PCF 的横截面的其它参量相同，椭圆纤芯的半长轴为  $2.86\mu\text{m}$ ，半短轴为  $1.5\mu\text{m}$ 。包层部分空气孔中心间距为  $2.3\mu\text{m}$ ，包层空气孔直径  $d$  与气孔中心间距  $\Lambda$  的比值  $d/\lambda = 0.5$ 。

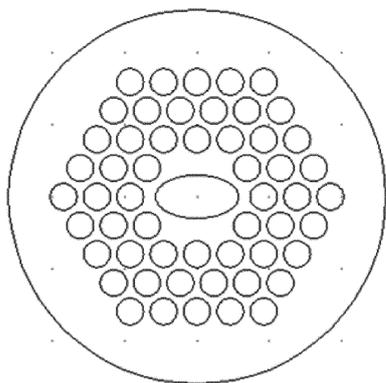


Fig. 6 Cross-section of PCF without four small oval air holes

图 7 是有无 4 个小椭圆孔时，色散曲线的对比情况。标示 yes 的曲线为有 4 个小椭圆孔时 PCF 的色散曲线在  $900\text{nm} \sim 1200\text{nm}$  区间的形状，而标示 no 的曲线是没有 4 个小椭圆孔的横截面对应情况。对比发现，当有这 4 个小椭圆孔时，在激光输出范围  $1000\text{nm} \sim 1100\text{nm}$  的区间色散为反常色散，没有 4 个小椭圆孔时色散在这一区间为正常色散。

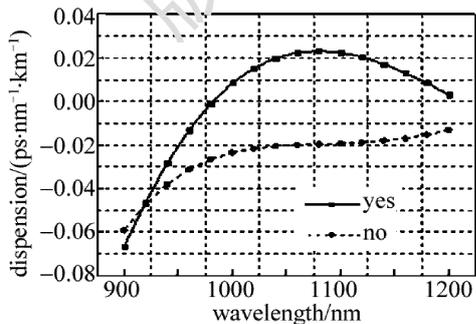


Fig. 7 Relationship between dispersion and wavelength with the structures of Fig. 1 and Fig. 6

图 8 为有无 4 个小椭圆孔时双折射的曲线图。yes 曲线表示的是有 4 个小椭圆孔时的双折射曲线，no 曲线表示的是没有时的双折射曲线。对比发现，当有

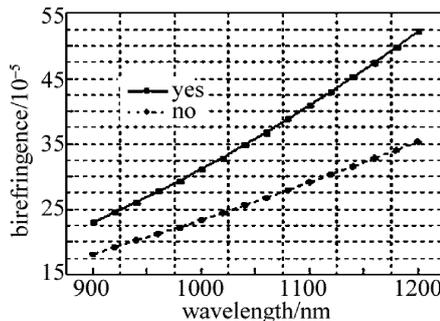


Fig. 8 Relationship between birefringence and wavelength with the structures of Fig. 1 and Fig. 6

4 个小孔时，在波长区间为  $900\text{nm} \sim 1200\text{nm}$  的范围内双折射值较大。

### 3 结论

研究结果显示，当包层空气孔间距  $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$ 、空气孔直径与空气孔中心间距比  $d/\Lambda = 0.5$  时，色散在  $1000\text{nm} \sim 1100\text{nm}$  的范围内呈现反常色散。对椭圆纤芯周围 4 个小孔的研究表明，小孔的存在影响着色散的数值，而且对双折射也有明显的影响。

根据理论研究结果，光孤子容易在反常色散中实现保型传输<sup>[17]</sup>。而光纤激光器的自洽也需要引入反常色散，以补偿脉冲在正常色散光纤中自相似演化积累的正啁啾<sup>[18]</sup>。当中心波长位于反常色散区时，群速度产生的负啁啾与初始正啁啾相互补偿，与非线性效应相互作用时，会使脉冲压缩得更窄、峰值更高<sup>[19]</sup>。因此这种结构的光子晶体光纤，将有助于孤子脉冲的传输，可以用作掺  $\text{Yb}^{3+}$  脉冲光纤激光器的增益部分。而高端机械加工中小功率切割用的光纤激光器一般选用脉冲类型的，所以这一结构在高端机械加工中可能有很好的应用前景。

感谢南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所王志教授对本工作的指导。

### 参 考 文 献

- [1] SONG Y J, HU M L, LIU Q W, et al. A mode-locked  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad large-mode-area fiber laser [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5045-5048 (in Chinese).
- [2] CHEN S P, LIN D F, HOU J, et al. Passively mode locked Yb-doped fiber laser with nearly 2W average output power [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 2817-2821 (in Chinese).
- [3] TAN F Z, LIU J, SUN R Y, et al. All-normal-dispersion passively mode-locked Yb-doped fiber laser with multimode interference effect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0402010 (in Chinese).
- [4] WADSWORTH W J, KNIGHT J C, RUSSELL P J, et al. Large mode area photonic crystal fiber laser [J]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2001, 23(60): 319-322.
- [5] ZHANG D P, HU M L, XIE C, et al. A high power photonic crystal fiber laser oscillator based on nonlinear polarization rotation mode-loc-

- king [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(4): 044206 (in Chinese).
- [6] XIE C, HU M L, ZHANG D P, *et al.* High energy dissipative soliton mode-locked fiber oscillator based on a multipass cell [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 054203 (in Chinese).
- [7] LI P X, YANG C, ZHAO Z Q, *et al.* 1027nm large-mode-area double-cladding photonic crystal fiber mode-locked laser based on SESAM [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0502007 (in Chinese).
- [8] WANG Y Y, WHEELER N V, COINY F, *et al.* Low loss broadband transmission in hypocycloid-core Kagome hollow-core photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 669-671.
- [9] YANG J, LIU M, ZHU M, *et al.* Three-core photonic crystal fiber with zero intermodal dispersion [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 528-532 (in Chinese).
- [10] SUN T T, KAI G Y, WANG Z, *et al.* Enhanced nonlinearity in photonic crystal fiber by germanium doping in the core region [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(2): 93-95.
- [11] LIU X, HAN L H, JIA X Y, *et al.* Design of hybrid-core PCF with nearly-zero flattened dispersion and high nonlinearity. [J] Chinese Optics Letters, 2015, 13(1): 010602.
- [12] WANG L L, GUO Y Y, TAN F, *et al.* Preparation of ytterbium-doped photonic crystal fiber core material and numerical simulation of optical fiber [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3718-3723 (in Chinese).
- [13] GORACHAND G, MICHYUKI E, TAKASHI I. Temperature-dependent Sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some optical fiber glasses [J]. Journal of Lightwave Technology 1994, 12(8): 1338-1342.
- [14] WRAY J H, NEU J T. Refractive index of several glasses as a function of wavelength and temperature [J]. Journal of the Optics Society of America, 1969, 59(6): 774-776.
- [15] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics (fourth edition) [M]. London, UK: Academic Press, 2007: 6.
- [16] WANG Y M, ZHANG X, REN X M. Design and analysis of a dispersion flattened and highly nonlinear photonic crystal fiber with ultralow confinement loss [J]. Applied Optics, 2010, 49(3): 292-297.
- [17] WANG D S. Study on theory of self-similar pulse generation and transition based on passively mode-locked fiber laser [D]. Changchun: Jilin University, 2016: 69 (in Chinese).
- [18] SONG Y J. Research on the characteristics of the mode-locked Yb<sup>3+</sup>-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 5 (in Chinese).
- [19] LI A P, ZHENG Y, ZHANG X F, *et al.* The supercontinuum generation in a photonic crystal fiber pumped at the anomalous dispersion region [J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 50-52 (in Chinese).