

## 用于高功率飞秒脉冲传输的空心单模 Bragg 光纤

李 杨<sup>1</sup>, 廖同庆<sup>1</sup>, 刘道军<sup>1,2</sup>, 井保密<sup>1</sup>, 吕晓光<sup>1</sup>, 严 艺<sup>1</sup>

(1. 安徽大学 电子信息工程学院, 安徽 合肥 230061;  
2. 安徽新华学院 电子通信工程学院, 安徽 合肥 230088)

**摘 要:** 针对超强能量密度的飞秒脉冲很难在传统光纤中传输的情况, 设计了一款用于高功率飞秒脉冲传输的空心单模 Bragg 光纤。首先基于一维光子晶体的光子禁带特性选择了制作空心 Bragg 光纤的材料, 接着利用光学软件 FDTD Solutions 分析了光纤各结构参数对光纤模式的影响, 并对传输特性进行了分析。随后, 通过在光纤包层中引入缺陷层的方法对其进行了进一步的优化, 有效调控了该款光纤的色散曲线分布。经全带宽扫描可知, 该款空心 Bragg 光纤单模传输的带宽达 100 nm, 完全满足了 100 fs 光脉冲的传输要求。

**关键词:** 空心 Bragg 光纤; 高功率飞秒脉冲; 单模传输

**中图分类号:** TN253    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0922005

## Hollow single-mode Bragg fiber for high power femtosecond pulse transmission

Li Yang<sup>1</sup>, Liao Tongqing<sup>1</sup>, Liu Daojun<sup>1,2</sup>, Jing Baomi<sup>1</sup>, Lv Xiaoguang<sup>1</sup>, Yan Yi<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230061, China;  
2. Electronic Communication Engineering College, Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China)

**Abstract:** It is very difficult to transmit femtosecond pulses with high energy density in traditional optical fiber. So, a hollow single-mode Bragg fiber was designed. First, the cladding of hollow Bragg fiber was prepared based on one-dimensional photonic crystal's bandgap characteristics. Then, the fiber structure parameters and transmission properties were analyzed by using the optical software FDTD Solutions. And then, the structure parameters were optimized to control dispersion curves through bringing in defect layer in cladding layer. It can be seen by full bandwidth scanning that the fundamental mode bandwidth achieve around 100 nm which can transmit 100 fs optical pulses.

**Key words:** hollow Bragg fiber; high-power femtosecond pulses; single-mode transmission

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究重大项目(KJ2015ZD04)

作者简介: 李杨(1991-), 男, 硕士生, 主要从事现代光通信方面的研究。Email: 18255102858@163.com

导师简介: 廖同庆(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事现代光通信方面的研究。Email: t.liao@ahu.edu.cn

## 0 引言

飞秒激光是一种超短脉冲的激光,具有超短时域宽度和和超强能量密度的特点,因此成为了激光科学里最强有力的新工具之一。飞秒激光最直接的应用是利用它作为光源,形成了多种时间分辨光谱技术和泵浦技术。飞秒激光技术的发展更是直接带动了物理、化学、生物、材料与信息科学的研究进入微观超快领域<sup>[1]</sup>。

飞秒激光技术一个重要研究方向就是飞秒脉冲的传输。传统的双包层光纤由于自身全反射导光的局限性,飞秒脉冲会在传输过程中积累非线性相移,造成脉冲的畸变,而且纤芯也无法承受超强功率密度的光能量传输。因此长期以来飞秒脉冲的发展受到了传输条件的制约。随着光纤技术的不断革新,以光子带隙为机理的光子晶体光纤的出现非常适合解决飞秒脉冲的传输问题<sup>[2]</sup>。光子晶体光纤的无截止单模特性能够提供大模场面积,降低了非线性效应<sup>[3]</sup>。在光子晶体光纤中,Bragg 光纤是一款典型的带隙导光型光纤。Bragg 光纤的基模  $HE_{11}$  模的电场分布呈高斯型分布,可耦合到大部分光学器件中<sup>[4]</sup>。空心 Bragg 光纤特有的空心结构是绝佳的高功率激光的导波系统。由于光能量被限制在空气纤芯中传输,也大大地降低了光纤的非线性效应,避免了飞秒脉冲在传输过程中不必要的脉冲展宽。空心 Bragg 光纤作为一款新型大功率导光光纤,相比于传统光纤具有损耗低,可调整参数多等优点,在超高强光物理,通信及传感领域拥有广阔的前景。

文中针对超强能量密度的飞秒脉冲会击穿常规光纤纤芯导致无法传输的情况,设计了一款空心的单模 Bragg 光纤。首先基于一维光子晶体的光子禁带特性<sup>[5]</sup>选择合适的材料制作空心 Bragg 光纤的包层,接着利用光学软件 FDTD Solutions 分析光纤各结构参数对光纤模式的影响,最后对空心 Bragg 光纤进行了传输特性分析和优化设计。

## 1 包层的设计与特性分析

### 1.1 包层材料的选取

如图 1 所示,空心 Bragg 光纤由高低折射率层交替周期排列的包层和空心的纤芯组成。空心 Bragg

光纤以一维光子晶体特有的光子带隙将光能量限制在光纤的纤芯中。

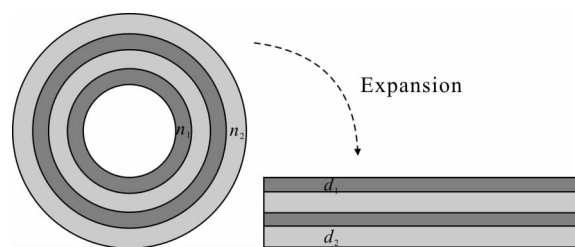


图 1 Bragg 光纤的横向截面图及包层结构展开后近似的一维光子晶体结构

Fig.1 Transverse section of Bragg fiber and 1D photonic crystal structure after the expansion of the cladding

由图 1 可知,包层结构近似的一维光子晶体由折射率不同的两种介质材料周期交叠构成,其中高折射率( $n_1$ )介质的厚度为  $d_1$ ,低折射率( $n_2$ )介质层的厚度为  $d_2$ ,周期  $\Lambda=d_1+d_2$ 。

在包层的设计中,根据参考文献[6]可知选择高低折射率材料厚度的条件为: $n_1d_1=n_2d_2=\lambda/4$ ,其中  $\lambda$  是需要确定的一维光子晶体的禁带的中心波长。

文中设计的空心单模 Bragg 光纤的中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ,根据厚度条件公式,选用的材料及相关参数如表 1 所示,分别以氟化镁、普通玻璃、重火石玻璃为低折射率材料,其他材料分别为高折射率材料,构成不同的一维光子晶体,其中高低折射率比  $X=d_2/d_1$ ,一维光子晶体的高低折射率层的层数为 20。利用 Matlab 仿真得到不同材料的一维光子晶体透射光谱如图 2 所示。

表 1 空心单模 Bragg 光纤包层参数表

Tab.1 Cladding parameters table of hollow single-mode Bragg fiber

Name of material	Reflectivity $n$	Thickness $d/\mu\text{m}$
MgF <sub>2</sub>	1.38	0.280 8
SiO <sub>2</sub>	1.55	0.251 4
ZF <sub>6</sub>	1.75	0.221 4
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.184 5
ZnS	2.4	0.161 5
CuO	2.71	0.143 0
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	2.8	0.138 4

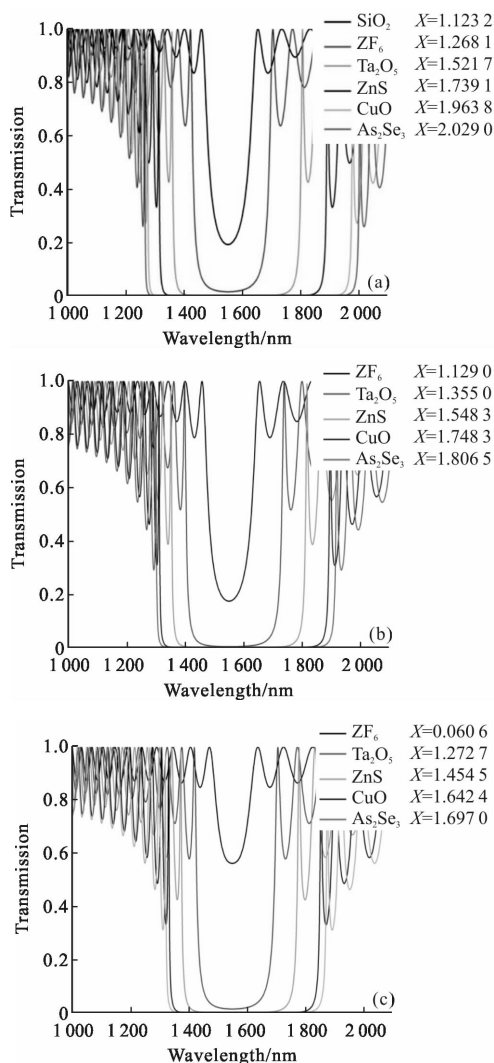


图 2 不同一维光子晶体的透射光谱

Fig.2 Transmission spectra of different 1D photonic crystals

从图 2 可以看出,随着高低折射率比的增大,禁带的透射率也越接近于零,禁带的形成也就越完美,并且一维光子晶体禁带的宽度也随之增大<sup>[7]</sup>。

### 1.2 HE<sub>11</sub> 模损耗特性分析

利用图 2 所示的材料构成空心 Bragg 光纤的包层,纤芯的半径设为  $1.7\Lambda$ ,包层数为  $N=10$ ,利用 FDTD Solutions 仿真软件分析相应 Bragg 光纤的 HE<sub>11</sub> 模的传输损耗。在中心波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  处不同折射率材料构成的 Bragg 光纤 HE<sub>11</sub> 模的传输损耗如图 3 所示。

从图 3 可以看出随着折射率比的增加,中心波长  $1.55\ \mu\text{m}$  处的 HE<sub>11</sub> 模的传输损耗也逐渐减小。结合图 2 和图 3 可看出当高低折射率比高于 1.6970 时,不同材料组成的空心 Bragg 光纤的 HE<sub>11</sub> 模传输损耗

都相对较小。因为所设计的空心 Bragg 光纤为单模传输,太宽的禁带存在的光纤模式也会增多,所以在保证损耗较低的情况下,应选用合适宽度禁带的材料制造空心 Bragg 光纤的包层。接下来,以玻璃-氧化铜组合制作空心 Bragg 光纤的包层为例,讨论其参数的设置并进行分析。

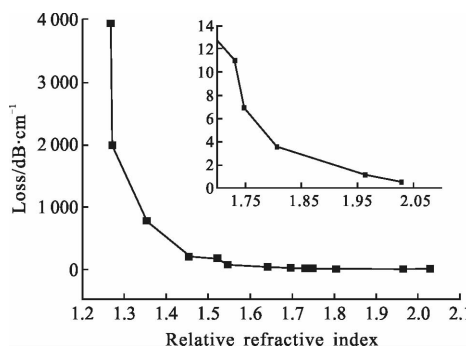


图 3 不同折射率比 Bragg 光纤 HE<sub>11</sub> 模的损耗

Fig.3 Loss of HE<sub>11</sub> mode of Bragg optical fiber with different refractive index

## 2 光纤参量的设置

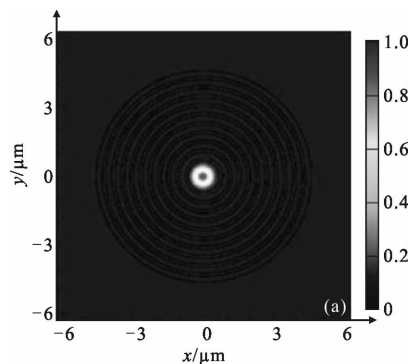
### 2.1 纤芯半径的选择

各项参数为:包层中高折射率层折射率  $n_1=2.71$ ,厚度为  $d_1=0.25\ \mu\text{m}$ ,包层中低折射率层折射率  $n_2=1.55$ ,厚度为  $d_2=0.143\ \mu\text{m}$ ,纤芯折射率  $n_0=1$ (空心),包层数为  $N=10$ 。设定纤芯半径  $R$  值以包层的周期  $\Lambda=d_1+d_2$  为单位递增。利用 FDTD Solutions 仿真软件在中心波长  $1.55\ \mu\text{m}$  处的仿真结果如下所示:

(1)  $R \leq 1.5\Lambda$ , 禁带内中心波长  $1.55\ \mu\text{m}$  处无传输模式存在。

(2)  $1.5\Lambda < R < 1.9\Lambda$ , 出现 HE<sub>11</sub> 模,其模式图及电场分布如图 4 所示。

从图 4 可以看出,HE<sub>11</sub> 模的能量聚集在纤芯处,并在包层内迅速衰减,是传输模<sup>[7]</sup>。



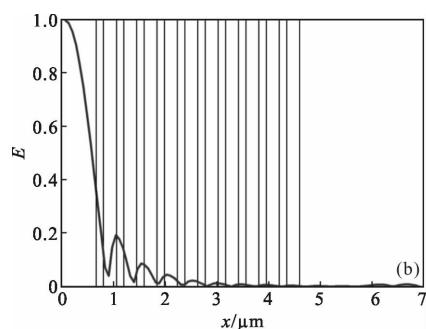


图 4 HE<sub>11</sub> 模的模式图(a)及光纤纵向截面右半部的电场(b)  
Fig.4 Mode field diagram of HE<sub>11</sub> mode (a) and electric field map of the right half of the longitudinal section of the fiber (b)

(3)  $1.9\lambda \leq R < 3.1\lambda$ , 开始出现 LP<sub>21</sub> 模, 其模式图如图 5 所示。

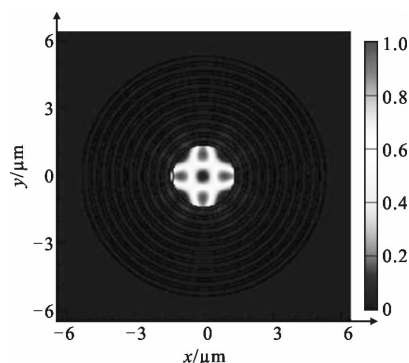


图 5 LP<sub>21</sub> 模的模式图  
Fig.5 Mode field diagram of LP<sub>21</sub> mode

(4)  $R \geq 3.1\lambda$ , 开始出现 TE<sub>01</sub> 模及各种高阶模。HE<sub>11</sub> 模在禁带内中心波长 1.55 μm 处截止<sup>[8]</sup>。

从上述分析得出纤芯半径取值范围在  $1.5\lambda < R < 1.9\lambda$  内可以实现在中心波长 1.55 μm 处 HE<sub>11</sub> 模的单模传输。在这个范围内, 随着纤芯半径 R 值的增大, 在中心波长 1.55 μm 处 HE<sub>11</sub> 模传输损耗的变化曲线如图 6 所示。

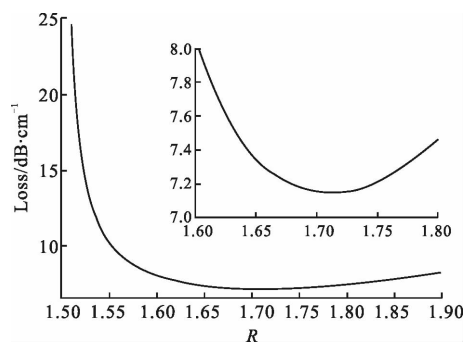


图 6 中心波长 1.55 μm 处 HE<sub>11</sub> 模传输损耗随 R 值的变化曲线  
Fig.6 Curve of HE<sub>11</sub> mode transmission loss with the R value at center wavelength of 1.55 μm

从图 6 可以看出当纤芯半径  $R=1.7\lambda$  时, 在中心波长 1.55 μm 处 HE<sub>11</sub> 模传输损耗最小。造成此结果的原因是 HE<sub>11</sub> 模进入导带时, 纤芯半径越大, 能量越集中, 泄露到包层外的能量越少, 当纤芯半径超过  $1.7\lambda$  时, HE<sub>11</sub> 模开始逐渐脱离导带, 损耗开始逐渐增大。因此选取纤芯半径为  $1.7\lambda$ 。

### 2.2 包层周期数对传导模式的影响

在纤芯半径  $R=1.7\lambda$  时, 包层数 N 对中心波长 1.55 μm 处 HE<sub>11</sub> 模的传输损耗的影响如表 2 所示。

表 2 具有不同包层数的该款 Bragg 光纤在 1.55 μm 中心波长处的 HE<sub>11</sub> 模的传输损耗值

Tab.2 HE<sub>11</sub> mode transmission loss at central wavelength of 1.55 μm with different cladding numbers

N	Loss /dB·cm <sup>-1</sup>	N	Loss /dB·cm <sup>-1</sup>	N	Loss /dB·cm <sup>-1</sup>
4	3 345.3	18	0.001 7	30	1.840 4e-8
8	70.860	20	2.070 9e-4	32	2.052 0e-10
10	5.625 6	22	2.733 5e-5	34	2.420 4e-10
12	0.625 0	24	2.760 3e-6	36	2.608 0e-10
14	0.080 1	26	3.712 0e-7	38	2.787 7e-10
16	0.011 58	28	6.223 8e-8	40	2.869 9e-10

从表 2 中可以看出, 随着包层数的增多, 包层禁带的效果越好, 因此在中心波长 1.55 μm 处 HE<sub>11</sub> 模的传导损耗也在逐步的减小<sup>[9]</sup>。在 20 层之前传输损耗变化剧烈, 在 32 层之前传输损耗以一个量级在递减, 在 32 层之后达到最小并趋于稳定。针对不同情况, 可以选定不同的传输损耗要求的包层。当包层数  $N=24$  时, 传输损耗大小可以满足传输要求。

### 3 色散特性的优化与传输特性分析

利用上述参数通过 FDTD Solutions 仿真可得上述设计的空心 Bragg 光纤在 1.55 μm 波长处色散值为, 色散值过大不满足传输要求, 因此需要优化空心 Bragg 光纤的色散特性<sup>[10]</sup>。优化的方法是改变光纤周期包层中介质层的厚度。

如果空心 Bragg 光纤包层一维周期结构出现缺陷层, 将会产生包层缺陷模, 导模与包层缺陷模发生耦合, 从而有效地改变导模的色散特性<sup>[11]</sup>。

为引入包层缺陷模, 可选取包层的某一层高折

射率层进行加厚处理,加厚的部分即为缺陷层。由于缺陷层两侧为一维光子晶体,可形成类 F-P 腔的结构<sup>[12]</sup>,因此光可在缺陷层结构中形成沿纵向传播的谐振模式,此模式为缺陷模。包层缺陷层的出现会导致光能量的泄露,为约束光能量需保证包层缺陷层外拥有足够数量的包层。为了减少包层的增加量,可在包层第二层引入包层缺陷层,设定包层缺陷层外围包层的数量为 23,通过 FDTD Solutions 仿真可得优化后的 Bragg 光纤的导模传输损耗为 2.3 dB/km。通过改变缺陷层的厚度来研究 Bragg 光纤的色散特性,如图 7 所示。

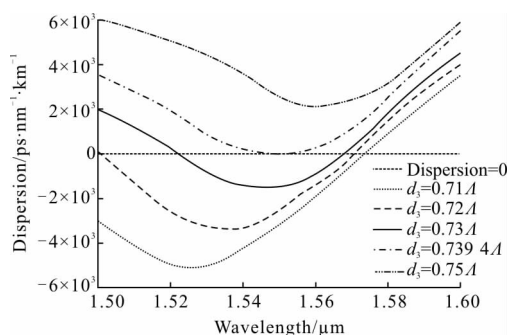


图 7 不同厚度缺陷层 Bragg 光纤中 HE<sub>11</sub> 模的色散  
Fig.7 Dispersion of the fundamental HE<sub>11</sub> mode in Bragg fiber with different thickness of defect layer

从图 7 可知,随着高折射率层厚度的增大,最低色散值向长波方向移动并逐渐大,通过改变高折射率层厚度调节色散曲线,可以同时实现零色散和零色散斜率。当  $d_3=0.7394\lambda$  时,最低色散值正好处于色散零点处,并且色散零点处于 1.55  $\mu\text{m}$  波长处。

根据 2.1 小节讨论的结果,设置空心 Bragg 光纤的半径为  $1.7\lambda$  (HE<sub>11</sub> 模单模传输且损耗最小),包层数为 23 (HE<sub>11</sub> 模传输损耗为 2.3 dB/km)。1.50  $\mu\text{m}$  和 1.60  $\mu\text{m}$  处的模场如图 8 所示,都是 HE<sub>11</sub> 模单

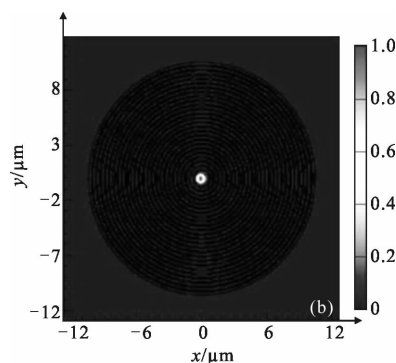


图 8 在 1.50  $\mu\text{m}$ (a)和 1.60  $\mu\text{m}$ (b)波长处的模场图  
Fig.8 Mode field diagram at wavelength of 1.50  $\mu\text{m}$  (a) and 1.60  $\mu\text{m}$ (b)

模传输。接着对优化过的空心 Bragg 光纤使用 FDTD Solutions 软件进行全带宽的扫描,扫描结果可知,在 1.50~1.60  $\mu\text{m}$  的带宽范围内,可维持的传输模都是 HE<sub>11</sub> 模。因而,该款 Bragg 光纤在 1.50~1.60  $\mu\text{m}$  的 100 nm 带宽内都可以维持 HE<sub>11</sub> 模单模传输,完全满足了 100 fs 光脉冲的传输带宽要求<sup>[13]</sup>。

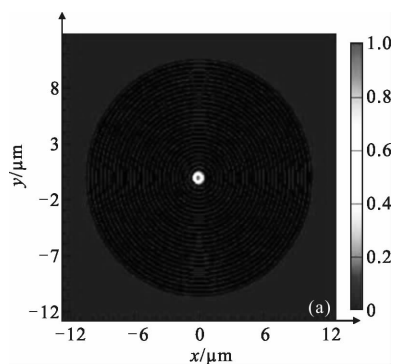
## 4 结论

利用 Bragg 光纤包层的带隙限光特性,设计了一款空心 Bragg 光纤。通过仿真优化,得到了中心波长位于 1.55  $\mu\text{m}$  处的可传输高功率飞秒脉冲的低损耗、单模空心 Bragg 光纤。仿真结果表明该款 Bragg 光纤的芯径在  $1.5\lambda\sim 1.9\lambda$  的范围内以 HE<sub>11</sub> 模单模传输,且芯径为  $1.7\lambda$  时传输损耗最小。通过引入缺陷层,利用包层缺陷模和导模的耦合作用,实现了 1.55  $\mu\text{m}$  波长处的零色散光传输。引入缺陷层所带来的能量泄露可以通过增加包层层数来降低损耗,当包层总数为 23 层时可将传输损耗降为 2.3 dB/km。并且该款 Bragg 光纤 HE<sub>11</sub> 模单模传输的带宽达 100 nm,完全满足低损耗传输 100 fs 的光脉冲。

## 参考文献:

[1] Dong Zhiwei, Zhang Weibin, Zheng Liwei, et al. Processing of diamond applying femtosecond and nanosecond laser pulses[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2015, 44(3): 893-896. (in Chinese)  
董志伟, 张伟斌, 郑立威, 等. 利用飞秒激光和纳秒激光脉冲加工金刚石[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 893-896.

[2] Ouyang G, Xu Y, Yariv A. Comparative study of air-core



- and coaxial Bragg fibers: single-mode transmission and dispersion characteristics. [J]. *Optics Express*, 2001, 9(13): 733–747.
- [3] Cao Jihong, Chen Wei.  $\infty$ -type tunable all-optical delay line on flat broadened spectrum [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1827–1833. (in Chinese)  
曹继红, 陈伟.  $\infty$ 型平坦展宽频谱可调全光时延线 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 1827–1833.
- [4] Ji Minning, Peng Gangding, Luo Y. Spin effect on a single-mode single-polarization optical fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(2): 17–22.
- [5] Zhao Y L, Ma F H, Jiang B, et al. Preparation and properties of ITO/Ag photonic crystal thin films [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1516–1522.
- [6] Yuan Wei, Zhang Jianqi, Qin Yuwei, et al. Near-infrared spectral region photonic crystal band gaps and KTP defect [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45 (1): 0104005. (in Chinese)  
袁卫, 张建奇, 秦玉伟, 等. 近红外光谱区光子晶体禁带与KTP缺陷研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0104005.
- [7] Alam I, Sakai J I. Classification and properties of radiation and guided modes in Bragg fiber [J]. *Optics Communications*, 2005, 250(1): 84–94.
- [8] Subhasis Chaudhuri, Justin R Sparks. Hollow core silicon-silica Bragg fiber [C]//2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2015, 1(2): 1–2.
- [9] Chen Yueyue, Feng Xunli, Xu Zhizhan, et al. Bragg reflection in a quantum periodic structure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(12): 84–88.
- [10] Frank M, Jelínek M, Kubeček V, et al. Air and silica core Bragg fibers for radiation delivery in the wavelength range 0.6–1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, 31(16): 36–41.
- [11] Gao Z, Gao F, Zhang B. Guiding, bending, and splitting of coupled defect surface modes in a surface-wave photonic crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(4): 2059–2062.
- [12] Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu, et al. Light propagation characteristics of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1086–1089. (in Chinese)  
段晓峰, 牛燕雄, 张雏, 等. 一维光子晶体的光学传输特性分析[J]. *光子学报*, 2003, 32(9): 1086–1089.
- [13] Dostal J, Dudzak R. Synchronizing single-shot high-energy iodine photodissociation laser PALS and high-repetition-rate femtosecond Ti: sapphire laser system [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(4): 045109.