

## 光子带隙光纤准直器回波损耗研究

李彦, 赵远, 徐小斌, 蔡伟

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 研究了一种光子带隙光纤准直器。为了降低回波对光源的干扰, 通常光纤准直器的回波损耗不应低于 60 dB。由于带隙光纤端面没有反射, 因此满足这一条件的带隙光纤准直器 GRIN 透镜入射面的倾斜角与普通光纤准直器不同。从高斯光束通过光学系统的一般模型出发, 利用矩阵光学和高斯光束耦合理论, 推导了光线传输矩阵。结合实际应用中光纤及 GRIN 透镜的参数, 仿真分析了尾纤与 GRIN 透镜之间的间距及 GRIN 透镜的参数对准直器回波损耗的影响。结果表明, 镀有增透膜时, 当光子带隙光纤准直器的 GRIN 透镜入射面倾角等于  $3^\circ$  时, 回波损耗大于 60 dB。研究结果对进行光子带隙光纤准直器的设计具有指导意义。

**关键词:** 光纤准直器; 光子带隙光纤; 回波损耗

**中图分类号:** TN202 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0920002

## Return loss of photonic bandgap fibers collimator

Li Yan, Zhao Yuan, Xu Xiaobin, Cai Wei

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A photonic bandgap fiber collimator was proposed. To reduce the interference of light power from the echo, the return loss of fiber collimator should exceed 60 dB. There was no reflection in photonic bandgap fiber end face, thus the beveled angle of GRIN lens of photonic bandgap fiber collimator and ordinary fiber collimator satisfied the criterion were different. Based on the theory of matrix optics and Gaussian-beam coupling, the transform matrix was deduced from the general model of Gaussian-beam through a complex optical system. With the practical parameters of photonic bandgap fiber and GRIN lens, the influence of the distance between fiber tail and GRIN lens and the influence of the parameter of the GRIN lens on return-loss were both stimulated and analyzed. The results show that the return loss exceed 60 dB when the beveled angle of GRIN lens was  $3^\circ$ . The results may direct the design of PBF collimator.

**Key words:** fiber collimator; photonic bandgap fiber; return loss

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61575012, 61575013)

作者简介: 李彦(1975-), 女, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事光纤传感器、光纤陀螺等方面的研究。Email: li\_yan@buaa.edu.cn

通讯作者: 赵远(1990-), 男, 硕士生, 主要从事光子晶体光纤器件、光纤陀螺方面的研究。Email: zhao1111yuan@buaa.edu.cn

## 0 引言

光纤准直器是光纤通信及光纤传感的基础光无源器件,能够实现光纤出射光束的聚焦和准直,在光隔离器、环形器、耦合器等微光学器件中有着重要应用<sup>[1-3]</sup>。光子晶体光纤具有磁敏感性低、抗辐射性能强等特点<sup>[4]</sup>,用于光纤陀螺中可提高陀螺的稳定性<sup>[5]</sup>。由于熔接、拉锥、抛磨<sup>[6-7]</sup>等方法极易破坏二维光子晶体包层结构,从而引入大量损耗,不适宜光子带隙光纤器件的制作。基于光子带隙光纤准直器的微光学器件采用切割工艺,可以避免光纤拉锥、研磨等工艺对光子带隙光纤二维包层的结构破坏,对拓展光子带隙光纤的实用范围有着极其重要的意义。

准直器的回波会影响光源稳定性,是光纤准直器的一个重要参数,为满足回波损耗需求,GRIN 透镜入射面需要一定的倾斜角度,倾斜角越大,回波损耗越大,但同时插入损耗和偏振相关损耗也会增加,因此在满足回波损耗时,倾斜角越小越有利<sup>[8]</sup>。文中从高斯光束通过光学系统的一般变化出发,结合矩阵光学和高斯光束耦合理论,考虑到光子带隙光纤端面没有反射,不需要将光纤端面研磨成斜 $8^\circ$ ,光子带隙光纤准直器回波损耗大于 60 dB 时,所需要的 GRIN 透镜入射面的倾斜角将发生变化。仿真时考虑到子午面和弧矢面传输矩阵,分析了尾纤与 GRIN 透镜间距,光子带隙光纤参数及 GRIN 透镜参数对准直器回波损耗的影响。

## 1 理论分析和建模

基于 GRIN 透镜的光纤准直器如图 1 所示,其主要指标为回波损耗与插入损耗,通常要求准直器的回波损耗大于 60 dB<sup>[8]</sup>。回波损耗是由各元器件和空气折射率失配形成反射引起的,由 GRIN 透镜的倾斜角度、尾纤与透镜之间的距离、镀膜指标、光纤模场等决定。

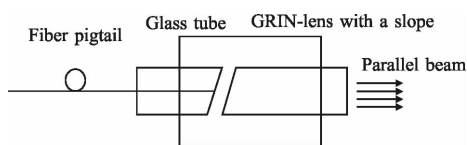


图 1 G-lens 光纤准直器

Fig.1 Structure of G-lens collimator

光子带隙光纤包层空气孔的周期排列结构产生带隙效应,能阻碍某段频率的光在其中传播,而纤芯作为该周期性结构的一个缺陷,该段频率光波将被限制在缺陷中传播<sup>[9]</sup>。

如图 2 所示,光子带隙光纤中的光束是在光纤中心的大空气孔(即缺陷)中传播。光在光子带隙光纤中的传播可以近似认为高斯光束<sup>[10]</sup>。

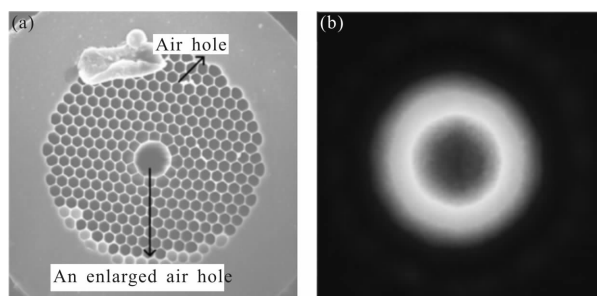


图 2 光子带隙光纤端面图

Fig.2 Photonic bandgap fiber end face

光子带隙光纤准直器的模型如图 3 所示,根据参考文献[11]中介绍,空气的孔模式有效折射率非常接近 1,基模在端面反射约为  $10^{-6}$  数量级。但是根据 LUNA 的 OBR4600 实测,光子带隙光纤的端面反射和普通光纤的斜 $8^\circ$ 反射是一个数量级,因此光子带隙光纤的端面发射可以忽略,反射光主要由 GRIN 透镜前后两个端面 1、2 组成。

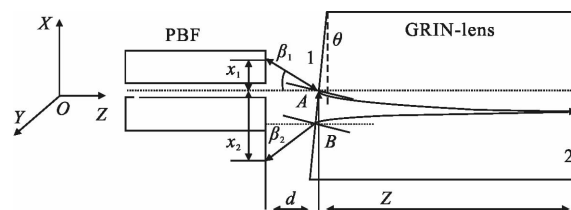


图 3 光子带隙光纤准直器回波示意图

Fig.3 Return-wave of photonic bandgap fiber collimator

不同于普通光纤准直器,在 XOY 平面内和 YOZ 平面内由于平行平板的作用,传输矩阵不同,光子带隙光纤在光纤和 GRIN 透镜之间的传输介质可近似认为均为空气,因此在上述两个平面内的传输矩阵均为:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

采用径向 GRIN 透镜的传输矩阵为:

$$G = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{A} Z) & \sin(\sqrt{A} Z)/\sqrt{A} \\ -\sin(\sqrt{A} Z) & \cos(\sqrt{A} Z) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:A 为聚焦常数;Z 为透镜长度。

由于 GRIN 透镜入射面前后介质不同,在计算时要加入介质变换矩阵,假设空气的折射率为  $n_1$ ,GRIN 透镜轴上折射率为  $n_2$ ,光线正向传播时对应矩阵为:

$$G_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

光线反射回来的矩阵为:

$$G_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_2}{n_1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

GRIN 透镜后端面反射对应矩阵为:

$$G_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

由上述分析可知光线在  $XOZ$  和  $YOZ$  平面内的传输矩阵相等,因此经 GRIN 透镜后端面反射的光线从 GRIN 透镜前端面出射的传播矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = G_2 \cdot G \cdot G_3 \cdot G \cdot G_1 \cdot T \quad (6)$$

当束腰半径为  $\omega$  的高斯光束从光纤端面出射,参数  $q$  表示为  $q = i\pi\omega^2/\lambda$  后端面反射回的高斯光束遵循 ABCD 变化定律:

$$q_1 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D} \quad (7)$$

经 GRIN 透镜前端面出射后的高斯光束束腰大小可表示为:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\frac{-\pi}{1.55 \times 10^{-3}} \cdot \text{Im}\left(\frac{1}{\text{Im}(q_1) \cdot i}\right)}} \quad (8)$$

束腰与透镜中心的距离可表示为:

$$L_1 = -\text{Re}(q_1) \quad (9)$$

如图 3 所示,光束中心的初始位置 A 点坐标  $r_0' = 0$ ,根据折射定律得到 A 点初始斜率

$$r_0' = -\tan[\theta - \arcsin(\sin\theta/n_2)] \quad (10)$$

光束从 GRIN 透镜前端面入射后,后端面反射回光线经 GRIN 透镜前端面 B 点的位置参数可由下式求得:

$$\begin{pmatrix} r'' \\ t'' \end{pmatrix} = G \cdot G_3 \cdot G \cdot \begin{pmatrix} r' \\ t' \end{pmatrix} \quad (11)$$

GRIN 透镜后端面回波经入射面后出射光束束腰相对光纤的纵向偏移  $z$ 、角度偏移  $\beta$ ,横向偏移  $x$  为:

$$\begin{cases} \beta_0 = n_2 \sin(\arctan t'' + \theta) - \theta \\ z_0 = d - L_1 \\ x_0 = r'' + d \cdot \sin\beta_0 \end{cases} \quad (12)$$

GRIN 透镜前端面回波相对光纤的纵向偏移  $z_1$ 、角度偏移  $\beta_1$ ,横向偏移  $x_1$  为:

$$\begin{cases} z_1 = d + \frac{d}{\cos(2\theta)} \\ x_1 = d \cdot \tan(2\theta) \\ \beta_1 = 2\theta \end{cases} \quad (13)$$

高斯光束与单模光纤之间错开角度和错开距离发生在同一平面内,则两高斯光束耦合为:

$$\eta_i = k_i \cdot \exp \cdot \left\{ -k_i \left[ \frac{x_i}{\omega_i} \left( \frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{\omega_i^2} \right) + \pi^2 \beta_i^2 \frac{\omega_i(z)^2 + \omega^2}{2\lambda^2} - \frac{x_i z_i \beta_i}{\omega_i} \right] \right\} \quad (14)$$

式中:  $k_i, \omega_i$  可由公式(15)求出:

$$\begin{cases} k_i = 4[(\omega_0/\omega_i + \omega_i/\omega_0)^2 + (\pi\omega_0\omega_i/\lambda)^2(1/R_1)^2]^{-1} \\ \omega_i^2(z) = \omega_i^2 [1 + (\lambda z_i/\pi\omega_i^2)^2] \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $R_1 = z_i [1 + (\pi\omega_i^2/\lambda z)^2]$ ,  $z_i$  是高斯光束束腰到光纤端面的传输距离,  $i=0$  或  $1$ 。

将公式(12)和(13)以及由公式(8)得到的 GRIN 透镜后端面回波在物空间的模场半径  $\omega_0$  以及  $\omega_1 = \omega$  分别代入公式(14)就可以得到前后端面回波与光纤的耦合效率  $\eta_1, \eta_2$ ,这样就可以求出回波损耗(Return Loss, RL)为:

$$RL = -10 \log(R_1 \eta_1 + R_2 \eta_2) \quad (16)$$

式中:  $R_1$  和  $R_2$  是前后两个端面的反射效率。

## 2 仿真及分析

根据公式(15)求解回波损耗,设置相关仿真参数说明:波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,光子带隙光纤模场半径  $\omega = 5 \mu\text{m}$ ,GRIN 透镜采用 NSG 公司的宽视场型 SLW-1.8,其聚焦常数  $A = 1.063$ ,GRIN 透镜的长度为  $Z = 0.23P = 0.23 \cdot 2\pi/\sqrt{A} = 4.432 \text{ mm}$ ,GRIN 透镜轴上折射率  $n_0 = 1.590188^{[9]}$ ,尾纤与 GRIN 透镜入射面之间的距离  $d = 0.243 \text{ mm}$ ,GRIN 透镜前后两个端面反射率未镀膜时按照  $R = 0.05$  计算,GRIN 透镜的前端面倾斜角为  $\theta$ 。

图 4 中曲线 1、2 分别是 GRIN 透镜倾斜角度  $\theta$  对 GRIN 透镜前、后端面回波损耗的影响,可以看出,倾斜角对前后两个端面回波损耗的影响不同。在未镀膜增透膜情况下,前端面在  $\theta > 1.6^\circ$  即可满足回波损耗大于 60 dB,后端面的回波损耗较小,在 GRIN 透镜入射面倾斜角  $\theta = 0^\circ$  时,后端面的回波损耗只有

13 dB,这是因为 GRIN 透镜入射面没有倾斜角时,尾纤端面位于 GRIN 透镜焦点处,后端面回波理论上能够完全耦合进光纤。在  $\theta=3.45^\circ$  时,GRIN 后端面回波损耗为 60 dB,与普通光纤准直器类似,GRIN 透镜的后端面回波损耗最小,因此光子带隙光纤准直器的回波损耗主要受后端面影响。通常 GRIN 透镜前后端面镀 0.01% 的增透膜,降低插入损耗,增加了回波损耗。

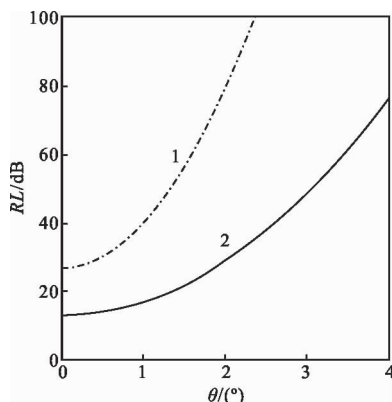


图 4 GRIN 透镜前后端面回波损耗与倾斜角的关系

Fig.4 Front and end faces of GRIN lens return loss versus beveled angle

将公式(15)中  $R$  换成增透膜的反射率可求出在镀有增透膜时光子带隙光纤准直器的总回波损耗,图 5 是在镀有反射率为 0.01% 增透膜情况下的回波

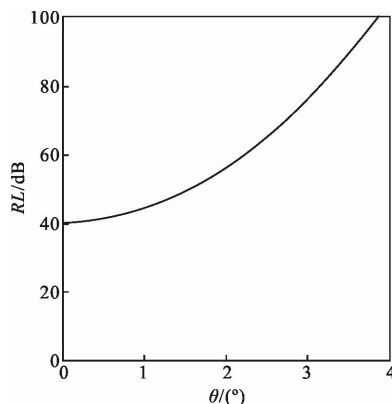


图 5 光纤准直器总回波损耗镀增透膜时与倾斜角的关系

( $R=0.01\%$ ,  $d=0.243\text{ mm}$ ,  $\omega=5\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda=1\ 550\ \mu\text{m}$ )

Fig.5 Fiber collimator total return loss versus beveled angle in the case of coated coating( $R=0.01\%$ , $d=0.243\text{ mm}$ , $\omega=5\ \mu\text{m}$ , $\lambda=1\ 550\ \mu\text{m}$ )

损耗,当 GRIN 透镜入射面倾斜角  $\theta=2.25^\circ$  时,回波损耗为 60 dB,由于 GRIN 透镜倾斜角存在制造公差

等原因,应用中取  $\theta=3^\circ$  更合适,此时对应的回波损耗理论值为 75 dB。

图 6 是光子带隙光纤模场半径对回波损耗的影响,可以看出,随着模场增加,回波损耗减小,模场半径  $\omega=2.5\sim 6\ \mu\text{m}$  时,回波损耗  $RL=65\sim 170\ \text{dB}$ ,变化非常明显。模场半径  $\omega<6.7\ \mu\text{m}$  时,回波损耗大于 60 dB,由于光子带隙光纤设计灵活,模场普遍小于单模光纤(SMF-28 在波长  $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$  时,对应模场直径  $D_M=10.4\ \mu\text{m}$ ),通常可以满足应用需求。

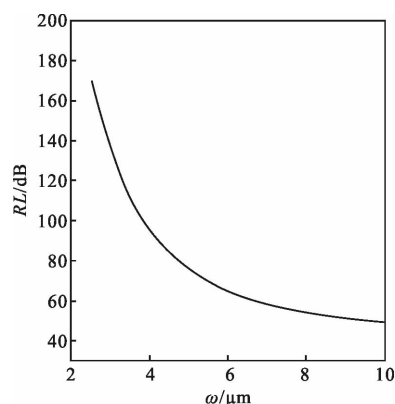


图 6 光纤准直器总回波损耗与模场半径的关系( $R=0.01\%$ ,  $d=0.243\text{ mm}$ ,  $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ ,  $\theta=3^\circ$ )

Fig.6 Fiber collimator total return loss versus mode field radius ( $R=0.01\%$ , $d=0.243\text{ mm}$ , $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ , $\theta=3^\circ$ )

由以上计算取倾斜角  $\theta=3^\circ$ ,图 7 是尾纤与 GRIN 透镜入射面之间距离对回波损耗的影响。从图 7 可

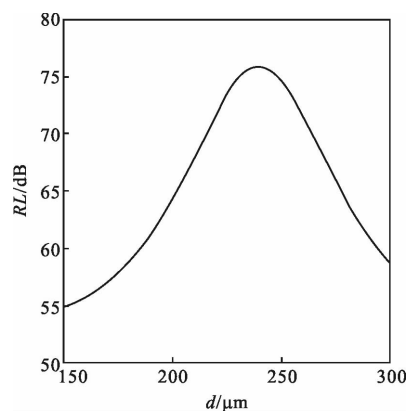


图 7 光纤准直器总回波损耗与间距  $d$  的关系( $R=0.01\%$ ,  $\theta=3^\circ$ ,  $\omega=5\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ )

Fig.7 Fiber collimator total return loss versus distance  $d$ ( $R=0.01\%$ ,  $\theta=3^\circ$ , $\omega=5\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ )

以看出回波损耗有个极大值,极大值位于 SLW-1.8

的焦点处附近,  $d=190\sim 285\ \mu\text{m}$  时满足回波损耗大于 60 dB, 光纤准直器尾纤与 GRIN 透镜的间距通常是使尾纤位于 GRIN 透镜焦点处附近, 对应 SLW-1.8 的间距  $d=0.243\ \text{mm}$ , 满足回波损耗需求。

图 8 是回波损耗与波长的关系, 随着波长的增加, 回波损耗逐渐减小, 但变化不是很明显, 在  $\lambda=0.4\sim 10\ \mu\text{m}$  的带宽内, 回波损耗减小了 5 dB 左右。

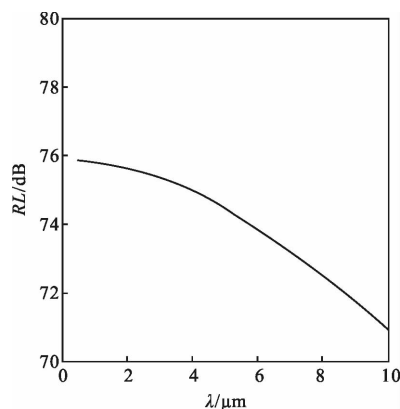


图 8 光纤准直器总回波损耗与波长的关系 ( $R=0.01\%$ ,  $\theta=3^\circ$ ,  $d=0.243\ \text{mm}$ ,  $\omega=5\ \mu\text{m}$ )

Fig.8 Fiber collimator total return loss versus wavelength ( $R=0.01\%$ ,  $\theta=3^\circ$ ,  $d=0.243\ \text{mm}$ ,  $\omega=5\ \mu\text{m}$ )

图 9 是 GRIN 透镜倾斜角度  $\theta$  与 GRIN 透镜与尾纤之间的距离  $d$  同时对回波损耗的影响, 不同倾斜角  $\theta$  都是在透镜焦距  $d=0.243\ \text{mm}$  处使回波损耗达到最大, 可为尾纤端面不在 GRIN 透镜焦点处的回波损耗提供指导。

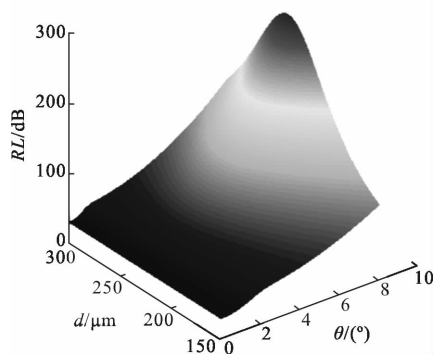


图 9 光纤准直器回波损耗与间距  $d$  及倾斜角  $\theta$  的关系 ( $R=0.01\%$ ,  $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ ,  $\omega=5\ \mu\text{m}$ )

Fig.9 Fiber collimator return loss versus distance  $d$  and beveled angle  $\theta$  ( $R=0.01\%$ ,  $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ ,  $\omega=5\ \mu\text{m}$ )

### 3 结束语

综合以上分析可得结论:

(1) 基于 GRIN 透镜的光子带隙光纤准直器由于光纤端面反射非常小, 要求 GRIN 透镜入射面倾斜角度小于普通光纤准直器, 镀有增透膜的情况下普通光纤准直器需要将光纤研磨成斜  $8^\circ$ , GRIN 透镜的入射面也需要斜  $8^\circ$ ; 光子带隙光纤只需要将光纤切割成近似垂直, GRIN 透镜前端面倾斜角为  $3^\circ$  即可满足回波损耗大于 60 dB。

(2) 光子带隙光纤准直器的模场通常比较小, 由上述求解可知, 模场越小回波损耗越大, 因此上述 GRIN 透镜前端面  $\theta=3^\circ$  时满足模场半径小于  $5\ \mu\text{m}$  的光子带隙光纤回波损耗。

文中设计的光子带隙光纤准直器可以应用于微光学光子带隙光纤光器件的制作, 能较好地解决光器件的低插入损耗和高回波损耗, 且不需要对光纤进行拉锥、熔融、研磨等处理, 避免了光子带隙光纤二维包层结构的破坏, 对光子带隙光纤应用的拓展具有很好的指导作用。

### 参考文献:

- [1] Lin Xuehuang. Optical Passive Devices [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 1998: 164-171. (in Chinese)  
林学煌. 光无源器件 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998: 164-171.
- [2] Tian Yanning, Fang Qiang, Wang Yongchang. Structure and characteristics of a double function optical circulator with double fiber tip and lens twice [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1398-1402. (in Chinese).  
田燕宁, 方强, 王永昌. 双通道光环形器结构的设计及理论分析[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1398-1402.
- [3] Yu Peidong, Wang Guozhong, Chen Minghua, et al. Recent progress in optical switching [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, 22(3): 149-154. (in Chinese)  
禹培栋, 王国忠, 陈明华, 等. 光开关技术进展[J]. 半导体光电, 2001, 22(3):149-154.
- [4] Li Yan, Sun Yanfeng, Song Jingming, et al. Magnetic-field sensitivity of air-core photonic crystal fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4051-4055. (in Chinese)  
李彦, 孙彦凤, 宋镜明, 等. 空芯光子晶体光纤磁敏感性研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4051-4055.

- [5] Li Jing, Wang Wei, Wang Xuefeng, et al. Scale factor of photonic crystal fiber-optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4082–4087. (in Chinese)  
李晶, 王巍, 王学锋, 等. 光子晶体光纤陀螺标度因数特性研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4082–4087.
- [6] Kim H, Kim J, Paek U C, et al. Tunable photonic crystal fiber coupler based on a side-polish technique [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(11): 1194–1196.
- [7] Jaroszewicz L R, Stasiewicz A K, Marc P, et al. Broadband photonic crystal fiber coupler with polarization selection of coupling ratio [C]//SPIE, 2010, 7653: 76533W.
- [8] Wang Suqin, Ruan Yu, Yin Dongliang, et al. The calculation and analyzing of the RL of C-lens collimator[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2003, 16 (1): 24–28. (in Chinese)  
王素芹, 阮玉, 殷东亮, 等. C-lens 准直器回波损耗的理论计算与分析[J]. 大气与环境光学学报, 2003, 16(1): 24–28.
- [9] Zhang Hu. Structure design and property research of hollow-core photonic bandgap fibers[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009. (in Chinese)  
张虎. 空芯光子带隙光纤的结构设计和特性研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
- [10] Hirooka T, Hori Y, Nakazawa M. Gaussian and Sech approximations of mode field profiles in photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(4): 1071–1073.
- [11] Dangui Vinayak, Digonnet M J, Kino G S. Determination of the modal reflection coefficients in air-core photonic-bandgap fiber terminations [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2006 and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2006: 1–2.