

# 大功率双包层光纤准直器的建模与仿真分析

陆乔乔, 胡姝玲, 王鑫龙, 耿伟彪, 张春熹, 牛燕雄

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 研究了一种适用于大功率激光应用的双包层光纤准直器。考虑在制作准直器时, 双包层光纤尾纤和 C-lens 透镜端面  $8^\circ$  倾斜角度的影响, 从 Gaussian 光束通过复杂光学系统的一般模型出发, 利用矩阵光学的理论, 在光线传输的子午面和弧矢面上分别进行建模计算, 推导光线的传输变换矩阵。结合实际应用中光纤及 C-lens 透镜的相关参数, 仿真分析了尾纤与 C-lens 透镜间距及 C-lens 透镜参数对准直器工作距离和出射光束腰直径的影响。研究结果对进行大功率准直器的设计具有指导意义。

**关键词:** 光束准直; C-lens; 工作距离; 束腰直径

**中图分类号:** TN741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2055-06

## Modeling and stimulation of high-power double-clad fiber collimator

Lu Qiaoqiao, Hu Shuling, Wang Xinlong, Geng Weibiao, Zhang Chunxi, Niu Yanxiong

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

**Abstract:** A double-clad fiber collimator applied in high-power lasers was proposed. Considering the  $8^\circ$  wedge angle of C-lens and the tail of double-clad fiber in the process of production, at the same time to consider the coupling efficiency with double-clad fiber tail, the transform matrix was modeled and calculated from the general model of Gaussian-beam through a complex optical system, using the theory of matrix optics in meridian plane and sagittal plane respectively. Combined with practical applications in double-clad fiber and C-lens related parameters, the influence of the distance between fiber tail and C-lens and the influence of the parameters of the C-lens on working distance and beam waist diameter of collimator were both stimulated and analyzed. The results may be to direct the design of collimator in high-energy laser system.

**Key words:** beam collimating; C-lens; working distance; beam waist diameter

收稿日期: 2013-11-20; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(61074158)

作者简介: 陆乔乔(1988-), 男, 硕士生, 主要从事大功率激光应用研究。Email: feixiangwubian@163.com

导师简介: 胡姝玲(1971-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事大功率光纤激光器及放大器等方面的研究。

Email: hulxi@hotmail.com

## 0 引言

在光通信领域, 光纤准直器作为一种常用的光学器件被广泛应用于各种光无源器件中, 如光隔离器、光耦合器等, 对推动激光技术的应用与发展发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。它的典型结构由一段尾纤和准直透镜构成<sup>[2]</sup>。随着大功率激光技术的飞速发展, 光束能量加强, 光斑直径加大, 对光纤准直器提出了更高的要求。用普通的单模光纤做尾纤加工而成的光纤准直器, 光功率承受能力有限, 限制了光纤准直器在高功率激光上的应用。

双包层光纤具有传输大功率激光的优势, 纤芯部分可近似看作是单模光纤, 内包层直径大, 容纳光波模式多, 利于高能激光传输。C-lens 透镜(固定折射率透镜)与传统的 GRIN-lens 透镜(渐变折射率透镜)相比, 具有成本低、工作距离范围大、长工作距离时插入损耗低等优点<sup>[3-4]</sup>。选用双包层光纤与 C-lens 透镜组合构成准直器满足高功率、大范围、长工作距离需求, 适应高功率激光的发展。双包层光纤准直器的结构如图 1 所示。

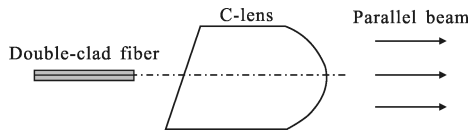


图 1 双包层光纤准直器的结构

Fig.1 Structure of double-clad fiber collimator

文中从高斯光束通过复杂光学系统的一般变换出发, 结合矩阵光学知识, 考虑实际应用中 C-lens 端面倾斜角对光束传输的影响, 在子午面和弧矢面上分别进行建模, 计算其变换矩阵。然后利用 Matlab 软件进行仿真分析, 得出尾纤与 C-lens 间距及 C-lens 准直透镜各参数对准直器工作距离及传输光束束腰直径的影响。

## 1 双包层光纤准直器的建模和变换矩阵的计算

高斯光束通过复杂光学系统的传输变换关系如图 2 所示。在折射率  $n_1$  的物空间  $s_1$  处入射复参数  $q_1$  的高斯光束, 通过变换矩阵为  $M_T = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$  的复杂光学系统后, 在折射率  $n_2$  的像空间  $s_2$  处变换为复参数

为  $q_2$  的高斯光束。高斯光束由  $RP_1$  处至  $RP_2$  处, 遵从  $ABCD$  定律:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{C+D/q_1}{A+B/q_1} \quad (1)$$

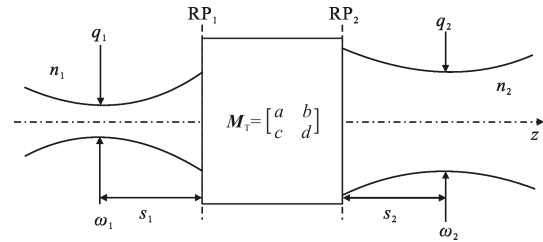


图 2 高斯光束通过复杂光学系统的传输示意图

Fig.2 Propagation of Gaussian beams through complex optical system

定义变换矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a+cs_2 & b+as_1+ds_2+cs_1s_2 \\ c & d+cs_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{1}{q_i} = \frac{1}{R_i} - j \frac{\lambda_i}{2\pi\omega_i} = X_i - Y_i \quad i=1, 2 \quad (3)$$

实际上, 考虑入射与出射高斯光束束腰间的变换关系, 即  $X_1=X_2=0$ , 此时,  $Y_i = \frac{\lambda_i}{2\pi\omega_i} = \frac{1}{Z_{0i}}$ 。设  $s_1 =$

$s_2, s_0=s_i$ , 当  $c \neq 0, n_1=n_2=1$  时, 即可得到高斯光束由空气介质入射, 经光学系统出射后, 束腰间的成像公式和物像比例公式<sup>[5]</sup>如下:

$$s_i = -\frac{a}{c} + \frac{(s_0+d/c)}{(d+cs_0)^2+c^2Z_{01}^2} \quad (4)$$

$$\omega_{02} = \frac{\omega_{01}}{[(d+cs_0)^2+c^2Z_{01}^2]^{1/2}} \quad (5)$$

双包层光纤准直器的模型如图 3 所示。结合实际应用情况, 为减小插入损耗, 增大回波损耗, 尾纤出光端和 C-lens 透镜入光端均有  $8^\circ$  斜角(图中  $\theta$  角)<sup>[6]</sup>。将双包层光纤准直器模型简化为折射率为  $n_1$ 、长为  $d_0$  的空气隙倾斜平板(平板左侧是折射率为  $n_0$  的介质, 平板右侧是折射率为  $n_2$  的介质)和一段折射率为  $n_2$ 、长为  $L$  的均匀介质平板, 最后为球面出射到折射率为  $n_1$  的介质中<sup>[7]</sup>。

注意到倾斜介质平板和准直透镜右端出射球面透镜在子午面( $XOZ$  平面)和弧矢面( $YOZ$  平面)上的

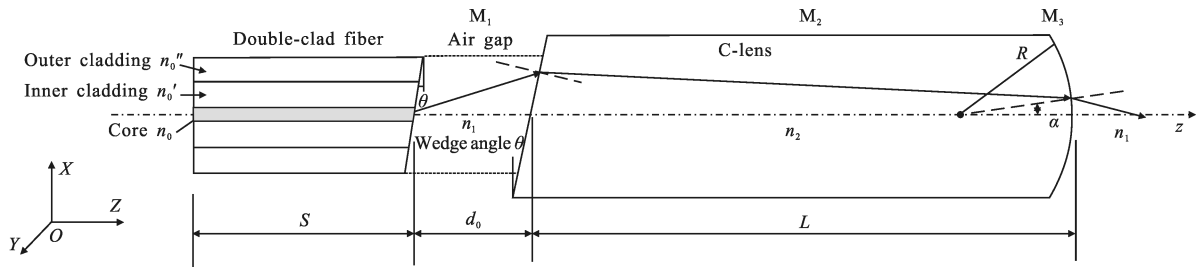


图 3 双包层光纤准直器模型

Fig.3 Model of double-clad fiber collimator

变换矩阵不同, 对此应分别进行求解分析。例如, 计算通过倾斜介质平板变换矩阵的光路图, 在子午面

上和弧矢面上分别如图 4(a)、(b)所示<sup>[8]</sup>。

分别计算各部分的变换矩阵  $M_{1X}, M_{1Y}, M_{2X}, M_{2Y}$ ,

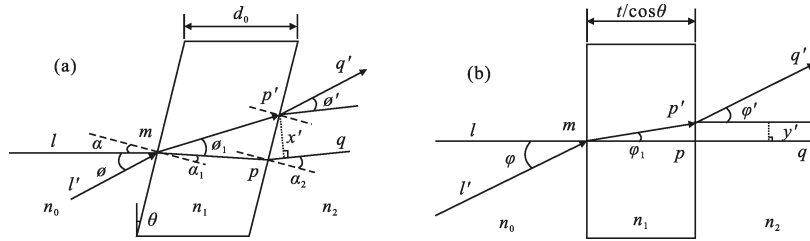


图 4 光通过倾斜介质平板时子午面和弧矢面上的计算光路图

Fig.4 Optical path for calculation in meridian plane and sagittal plane when beam through inclined medium plate

$M_{3X}, M_{3Y}$ (下标 X 表示子午面上, 下标 Y 表示弧矢面上, 公式中已将  $n_1=1$  代入)。近轴条件下, 有  $\sin\theta \approx \theta$ ,

$\sin\alpha \approx \alpha, \sin\theta \approx \cos\alpha \approx 0$ 。则由尾纤出射的光经过光纤准直器时, 在子午面和弧矢面上的变换矩阵分别为:

$$\begin{aligned}
 M_X &= M_{3X} \cdot M_{2X} \cdot M_{1X} = \begin{bmatrix} \frac{n_2}{(n_2^2 - \alpha)^{1/2}} & 0 \\ -\frac{n_2[1 - (n_2^2 - \alpha)^{1/2}]}{R(n_2^2 - \alpha)^{1/2}} & (n_2^2 - \alpha)^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_0 \cos^2 \theta \sqrt{n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \theta}}{n_2(1 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} d_0 \\ 0 & \frac{n_0 \cos \theta}{\sqrt{n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \theta}} \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} \frac{n_2}{(n_2^2 - \alpha)^{1/2}} & \frac{n_0 d_0 \sqrt{n_2^2 - n_0^2 \theta^2}}{(n_2^2 - \alpha)^{1/2} (1 - n_0^2 \theta^2)^{3/2}} + \frac{n_0 n_2 L}{(n_2^2 - \alpha)^{1/2} \sqrt{n_2^2 - n_0^2 \theta^2}} \\ -\frac{n_2[1 - (n_2^2 - \alpha)^{1/2}]}{R(n_2^2 - \alpha)^{1/2}} & -\frac{n_0 d_0 [1 - (n_2^2 - \alpha)^{1/2}] \sqrt{n_2^2 - n_0^2 \theta^2}}{R(n_2^2 - \alpha)^{1/2} (1 - n_0^2 \theta^2)^{3/2}} - \frac{n_0 n_2 L [1 - (n_2^2 - \alpha)^{1/2}]}{R(n_2^2 - \alpha)^{1/2} \sqrt{n_2^2 - n_0^2 \theta^2}} + \frac{n_0 (n_2^2 - \alpha)^{1/2}}{\sqrt{n_2^2 - n_0^2 \theta^2}} \end{bmatrix} \\
 M_Y &= M_{3Y} \cdot M_{2Y} \cdot M_{1Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1 - (n_2^2 - \alpha)^{1/2}}{R} & n_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_0 \cos \theta}{(1 - n_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} d_0 \\ 0 & \frac{n_0}{n_2} \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_0 d_0}{(n_2^2 - \alpha)^{1/2}} + \frac{n_0 L}{n_2} \\ -\frac{1 - (n_2^2 - \alpha)^{1/2}}{R} & -\frac{n_0 d_0 [1 - (n_2^2 - \alpha)^{1/2}]}{R(1 - n_0^2 \theta^2)^{1/2}} - \frac{n_0 L [1 - (n_2^2 - \alpha)^{1/2}]}{n_2 R} + n_0 \end{bmatrix} \quad (6)
 \end{aligned}$$

分别将公式(6)中  $M_x, M_y$  的对应元素代入公式(4)和公式(5)中,即可分别得到子午面上和弧矢面上,束腰间的成像公式和物像比例公式。

## 2 仿真及分析

以上推导的双包层光纤准直器的变换矩阵较为复杂,结合实际应用中双包层光纤及 C-lens 透镜的相关参数,可借助 Matlab 软件进行仿真分析。

相关仿真参数说明:光波长  $\lambda=1\ 060\ \text{nm}$ ,基模高斯光束模场半径  $\omega_0=8.653\ \mu\text{m}$ ,尾纤出光端和 C-lens 入光端斜面倾斜角  $\theta=8^\circ$ ,C-lens 透镜偏心角  $\alpha$ ,双包层光纤纤芯折射率  $n_0=1.456$ ,C-lens 透镜折射率  $n_2=1.744$ ,空气隙长度  $d_0$ ,C-lens 透镜长  $L$ ,出射球面曲率半径  $R$ ,出射高斯光束束腰直径  $2\omega_{0x}, 2\omega_{0y}$ ,准直距离选取  $2S_{ix}, 2S_{iy}$ 。应用中考考虑  $d_0, R, L, \alpha$  和束腰直径及准直距离的关系。分别进行仿真、分析参数之间的关系。

图 5 为  $d_0$  对子午面和弧矢面上工作距离和束腰直径的影响比较。可以看出,  $d_0$  对子午面上和弧矢面上的工作距离和束腰直径的影响并不相同,导致准直器出射光斑为椭圆高斯光束。与子午面上相比,  $8^\circ$  倾斜角对工作距离和束腰直径的影响在弧矢面上更大。

以图 5 中的参数为参考,为得到较大的工作距

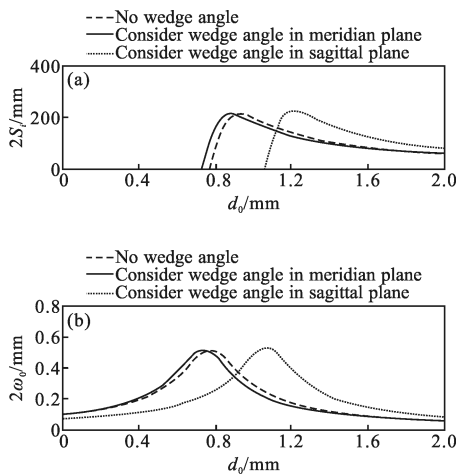


图 5 有无倾斜角时子午面和弧矢面上工作距离和束腰直径的比较( $L=10\ \text{mm}, R=-4.8\ \text{mm}, \alpha=8^\circ$ )

Fig.5 Comparison of working distance and diameter of beam waist considering wedge angle in meridian plane and sagittal plane or no wedge angle( $L=10\ \text{mm}, R=-4.8\ \text{mm}, \alpha=8^\circ$ )

离及束腰直径,  $d_0$  的大小在  $1.1\sim 1.2\ \text{mm}$  之间,可以保证子午面和弧矢面上的工作距离在  $100\ \text{mm}$  以上。当  $d_0$  一定时,子午面上工作距离更小,保证子午面上工作距离可保证弧矢面上的工作距离,且各参数对子午面和弧矢面上的影响相似,以下仅分析子午面上的情况。

从图 6 中可以看出,当 C-lens 透镜球面端偏心角度  $\alpha$  在  $0^\circ\sim 10^\circ$  之间变化时,工作距离的变化范围为  $110\sim 133\ \text{mm}$ ,束腰直径的变化范围为  $0.135\sim 0.163\ \text{mm}$ ,影响较小。说明在安装 C-lens 透镜时,偏心角度在  $10^\circ$  的变化范围内对工作距离和束腰直径的影响不大。

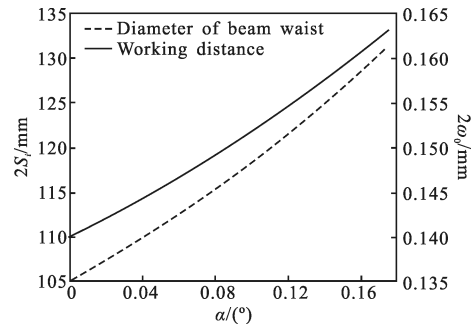


图 6 偏心角  $\alpha$  从  $0^\circ\sim 10^\circ$  对工作距离和束腰直径的影响 ( $d_0=1.2\ \text{mm}, L=10\ \text{mm}, R=-4.8\ \text{mm}, \alpha=8^\circ$ )

Fig.6 Influence on working distance and diameter of beam waist when bias-angle range from  $0^\circ$  to  $10^\circ$  ( $d_0=1.2\ \text{mm}, L=10\ \text{mm}, R=-4.8\ \text{mm}, \alpha=8^\circ$ )

根据前文推导的传输矩阵,绘制了在其他参数一定( $d_0=1.2\ \text{mm}, \alpha=8^\circ$ )时,C-lens 透镜长度  $L$ 、球面端曲率半径  $R$  对工作距离和束腰直径的影响关系,如图 7 所示。三维图形绘制有利于确定在特定的透镜长度下选择合适的曲率半径,有利于透镜参数的设计。例如,当要求工作距离大于  $100\ \text{mm}$  时,在图 7(a)中,利用 Matlab 绘图工具,可以得到透镜长度  $L=10\ \text{mm}$ 、 $-5.1\ \text{mm}<R<-4.6\ \text{mm}$  时可满足要求;此时,若同时要求束腰直径在  $0.4\sim 0.5\ \text{mm}$  之间,在图 7(b)中,可以得到  $-5.27\ \text{mm}<R<-5.05\ \text{mm}$ 。综合以上两点,可以得到当透镜长度  $L$  为  $10\ \text{mm}$ 、球面端曲率半径  $R$  的范围为  $-5.1\ \text{mm}<R<-5.05\ \text{mm}$  时,可实现设计准直器的工作距离大于  $100\ \text{mm}$ ,束腰直径在  $0.4\sim 0.5\ \text{mm}$  之间。同样,也可以根据光束束腰直径的要求先确定  $R$  的范围,再确定透镜的长度  $L$  来确定 C-lens 透镜的

设计参数。

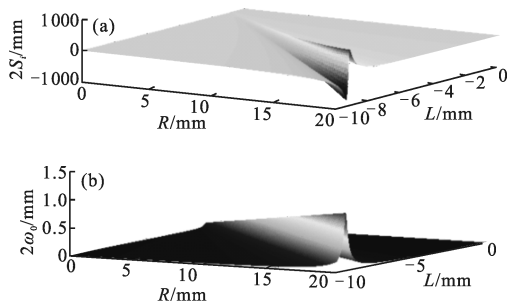


图7 C-lens 参数  $L$ 、 $R$  对工作距离和束腰直径的影响  
( $d_0=1.2\text{ mm}$ ,  $\alpha=8^\circ$ )

Fig.7 Influence on working distance and diameter of beam waist within length  $L$  and curvature radius  $R$  of C-lens  
( $d_0=1.2\text{ mm}$ ,  $\alpha=8^\circ$ )

光纤模场半径  $\omega_0$  对工作距离和出射束腰直径的影响,如图8所示。

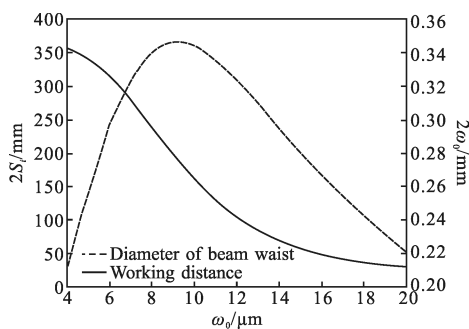


图8 模场半径  $\omega_0$  从  $4\sim 20\ \mu\text{m}$  对工作距离和出射束腰直径的影响( $d_0=0.9\text{ mm}$ ,  $R=-4.8\text{ mm}$ ,  $L=10\text{ mm}$ ,  $\alpha=8^\circ$ )

Fig.8 Influence on working distance and diameter of beam waist when mode field radius  $\omega_0$  range from  $4\sim 20\ \mu\text{m}$   
( $d_0=0.9\text{ mm}$ ,  $R=-4.8\text{ mm}$ ,  $L=10\text{ mm}$ ,  $\alpha=8^\circ$ )

从图8中可以看出,当光纤模场半径从  $4\ \mu\text{m}$  增大到  $20\ \mu\text{m}$  时,工作距离从  $355\text{ mm}$  左右下降至约  $30\text{ mm}$ ,束腰直径在  $0.2\sim 0.35\text{ mm}$  间变化。即当其他参数一定时,为保证较长的工作距离,双包层光纤的纤芯半径不能过大。

经过测试,基于这种双包层光纤结构的光纤准直器,在纤芯直径为  $20\ \mu\text{m}$  时,测试其能够承受的光功率在  $100\text{ W}$  左右,故能够满足百瓦量级激光应用的需求。

### 3 结论

综合上述分析,可得出以下结论:

(1) 尾纤和 C-lens 端面的  $8^\circ$  倾斜角对准直器的出射光在子午面和弧矢面上的影响并不相同,对弧矢面上光束的影响更大一些,导致准直器出射光为椭圆高斯光束。由于椭圆高斯光束的远场发散角是各向异性的,在分析其光束传输质量时,应在子午面上和弧矢面上分别进行计算。当将椭圆高斯光束应用于测距和定位等远距离工作环境时,子午面上和弧矢面上的远场发散角往往相差很大(甚至有数量级之差),给应用带来不便,可利用望远系统进行椭圆高斯光束的再准直,获得接近理想情况的圆高斯光束<sup>[9]</sup>。

(2) 尾纤与 C-lens 的间距  $d_0$ 、C-lens 的长度  $L$ 、球面端曲率半径  $R$  的变化对准直器的工作距离和出射光束束腰直径影响较大。这三个参数可依据具体使用要求实现相互匹配。相对而言,C-lens 偏心角度  $\alpha$  的变化对准直器的工作距离和束腰直径影响较小,给安装和应用带来方便。

(3) 为保证较大的工作距离,双包层光纤纤芯的模场半径不应过大。

文中通过求解一种适用于大功率条件应用的光纤准直器的变换矩阵及相关的仿真分析,得出了双包层光纤纤芯模场半径、尾纤与 C-lens 间距、C-lens 透镜长度、球面出光端曲率半径、C-lens 透镜偏心角度等参数对工作距离和束腰直径的影响,对设计百瓦量级大功率激光应用的光纤准直器具有很好的指导意义。

### 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] Xia Lei, Zhao Ronghua, Li Guorui. On the structure and technology of optical fiber collimator [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 1991, 14(3): 99-104. (in Chinese)  
夏磊, 赵荣华, 李国瑞. 光纤准直器件的结构和工艺研究 [J]. 北京邮电学院学报, 1991, 14(3): 99-104.
- [3] Gong Wenjie. Study of the C-lens collimator characteristics [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2006: 2-16. (in Chinese)  
龚文杰. C-Lens 准直器特性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨

- 工业大学, 2006: 2-16.
- [4] Yang Qun, Yi Youmin, Yu Qiang, et al. Studies on a new type of fiber collimator [J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2006, 30(2): 59-63. (in Chinese)  
杨群, 易佑民, 俞强, 等. 一种新型光纤准直器的研究[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(2): 59-63.
- [5] Wei Guanghui, Yan Jixiang, Ha Liuzhu, et al. Matrix Optics [M]. Beijing: Weapons Industry Press, 1995: 33-48. (in Chinese)  
魏光辉, 阎吉祥, 哈流注, 等. 矩阵光学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995:33-48.
- [6] Wang Suqin, Ruan Yu, Yin Dongliang, et al. The calculation and analyzing of C-lens collimator [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 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]. *光电子技术与信息*, 2003, 16(1): 24-28.
- [7] Hu Hailei, Chen Rong, Lai Aiguang, et al. Analysis of C-lens collimating property [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 21(1): 36-40. (in Chinese)  
胡海蕾, 陈荣, 赖爱光, 等. C-lens 准直特性分析[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 21(1): 36-40.
- [8] Chen Shufen, Lu Yaxiong, Yang Yapei. Laser Beam Transmission and Transformation Technology [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 1999: 114-118. (in Chinese)  
陈淑芬, 卢亚雄, 杨亚培. 激光束传输与变换技术 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999: 114-118.
- [9] Zhang Xiaohui. The collimation of elliptical Gaussian beam [J]. *Laser Technology*, 1989, 13(5): 55-60. (in Chinese)  
张晓晖. 椭圆高斯光束的准直[J]. *激光技术*, 1989, 13(5): 55-60.