

基于单准直透镜的阵列准直器研究*

袁志林[†] 杨睿 杨柳 宋丽丹 孙莉萍 马雨虹 王猛 陈定康 郭金平 唐丽红

(武汉光迅科技股份有限公司, 光纤通信技术与网络国家重点实验室, 武汉 430074)

(2011年12月9日收到; 2012年1月6日收到修改稿)

提出了一种基于单准直透镜和光纤阵列的阵列准直器, 深入研究了此种方案的光路无胶和光路有胶的两种实现方式; 并基于高斯光束传输矩阵和 q 参数相关理论, 从理论上详细地计算、推导了各变量之间的关系, 并进行了模拟仿真及实验验证, 得到了理论和实验一致的结果. 对两种实现方式的结构及封装设计也进行了初步的摸索和实验, 并制作出了性能良好的阵列准直器. 理论和实验表明, 该方案具有易加工、低成本、易封装、性能优等特点, 也易于扩展成多维阵列准直器, 可为可重构光分插复用器系统和光交叉连接系统的发展提供强有力的器件支撑.

关键词: 准直透镜, 阵列准直器, 智能光网络

PACS: 42.81.Qb, 42.79.Ag

1 引言

随着近年来通信业务的迅猛增长, 智能光网络进入高速发展的实用化阶段. 智能光网络具有动态可配置特点, 解决了目前 DWDM 系统组网灵活性较差、动态分配能力弱的问题. 智能光网络主要是由一系列具有高度灵活性的系统设备构成, 而可重构光分插复用器系统 (reconfigurable optical add-drop multiplexer, 简称 ROADM) 系统和光交叉连接 (optical cross-connect, 简称 OXC) 系统是最关键的节点设备, 支持纯光传输和交换, 可大大降低光网络的运营和维护成本^[1-12].

在 ROADM 系统和 OXC 系统中, 阵列准直器是其中不可或缺的器件, 所有的光传输和光交换都是基于阵列准直器^[13,14], 其性能直接影响到 ROADM 系统和 OXC 系统的整体性能. 目前, 实现阵列准直器的设计方案大都基于阵列透镜, 此设计方案在光学调试方面虽更易实现, 但对阵列透镜的指标和加工提出了很高的要求, 且指标一致性差、难封装、成本高.

本文提出了一种基于单准直透镜 (collimating lens, 简称 C-Lens) 和光纤阵列的阵列准直器, 将单

个 C-Lens 与光纤阵列中的任一光纤依次独立地调试、匹配及封装, 可有效地弥补光纤阵列和阵列透镜加工中的不一致性影响, 极大地提高阵列准直器的整体指标. 因为各个 C-Lens 调试的独立性, 此种方案易封装, 也更易扩展成多维阵列准直器; 同时, C-Lens 的加工非常容易, 成本相对阵列透镜而言, 要低得多. 因此, 相对于传统的基于阵列透镜的阵列准直器, 此种方案具有易加工、低成本、易封装、性能优、易扩展等特点.

针对 C-Lens 方案的调试及封装特性, 本文深入研究了光路无胶和光路有胶的两种实现方式, 对两种方式都进行了理论计算、模拟仿真和实验验证^[15-21], 得到了理论和实验一致的结果; 结合封装方面的摸索和实验, 制作出了性能良好的阵列准直器.

2 基于单 C-Lens 的阵列准直器的理论分析与计算

2.1 基于光路无胶方式的阵列准直器

光路无胶方式, 在 C-Lens 和光纤阵列之间不

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2009AA03Z443) 资助的课题.

[†] E-mail: zhilin.yuan@accelink.com

填充封装用胶,二者直接相互匹配,C-Lens通过辅助光学元件固定在基板上.阵列准直器的关键指标是束腰半径 ω_0 和工作距离 d_0 ,其相关设计就是根据上述两个指标计算出对应的参数,具体包括:C-Lens的折射率 n_c 、C-Lens的曲率半径 R_c 、C-Lens的轴心长度 L_c 、C-Lens与光纤阵列之间的轴心间距 L_1 .基于高斯光束传输矩阵和 q 参数相关理论,本文将推导出各参数与关键指标之间的函数关系,并根据实际指标要求,给出相应具体参数值.

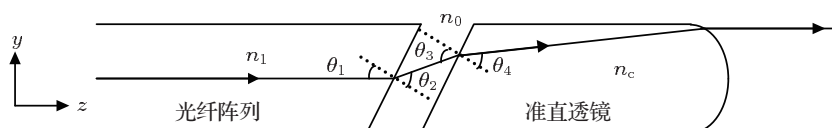


图1 基于光路无胶方式的阵列准直器光路结构原理图

由于光纤阵列和C-Lens的斜角结构,高斯光束在 x - z 平面和 y - z 平面的传输现象是不一样的,需分别计算.

2.1.1 x - z 平面内的高斯光束传播理论推导

光线在光纤阵列表面发生折射,得出

$$n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_2, \quad (1)$$

通过几何关系分析,得出

$$\theta_2 = \theta_3, \quad (2)$$

光线在C-Lens表面发生折射,得出

$$n_0 \sin \theta_3 = n_c \sin \theta_4. \quad (3)$$

光线在光纤阵列和C-Lens之间的实际传播距离 d_1 为

$$d_1 = \frac{L_1 \cos \theta_1}{\cos \theta_2}, \quad (4)$$

光线在C-Lens之内的实际传播距离 d_2 为

$$d_2 = \frac{L_c}{\cos(\theta_4 - \theta_1)}. \quad (5)$$

在 x - z 平面内,从光纤表面出射到C-Lens表面出射的整体传输矩阵 M_x 为

$$\begin{aligned} M_x = & \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_0 - n_c}{n_0 R_c \cos(\theta_4 - \theta_1)} & \frac{n_c}{n_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ & \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_0}{n_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_0} \end{pmatrix}. \quad (6) \end{aligned}$$

基于光路无胶方式的阵列准直器光路结构原理图如图1所示,光线传播的方向为 z 轴,平行于纸面且与 z 轴垂直的为 y 轴,垂直于纸面且与 z 轴垂直的为 x 轴.为达到回波损耗指标的要求,光纤阵列和C-Lens均采用斜角结构,定义空气折射率为 n_0 ,所传输光波在空气中的波长为 λ_0 ,光纤折射率为 n_1 ,光纤出射处的高斯光束束腰为 ω_1 ,光纤阵列和C-Lens的倾斜角度为 θ_1 ,光线在光纤表面的出射角度为 θ_2 ,在C-Lens表面的入射角度和出射角度分别为 θ_3 和 θ_4 .

在 x - z 平面内,光纤出射处的高斯光束 q 参数 q_1 为

$$q_1 = i \frac{\pi \omega_1^2}{\lambda_0 / n_1}, \quad (7)$$

在 x - z 平面内,C-Lens出射处的高斯光束 q 参数 q_{2x} 为

$$q_{2x} = M_x \cdot q_1, \quad (8)$$

在 x - z 平面内,C-Lens出射处的高斯光束曲率半径 R_{2x} 为

$$R_{2x} = \frac{1}{\text{Re}(1/q_{2x})}, \quad (9)$$

在 x - z 平面内,C-Lens出射处的高斯光束光斑半径 ω_{2x} 为

$$\omega_{2x} = \sqrt{\frac{-\lambda_0}{\pi \text{Im}(1/q_{2x})}}, \quad (10)$$

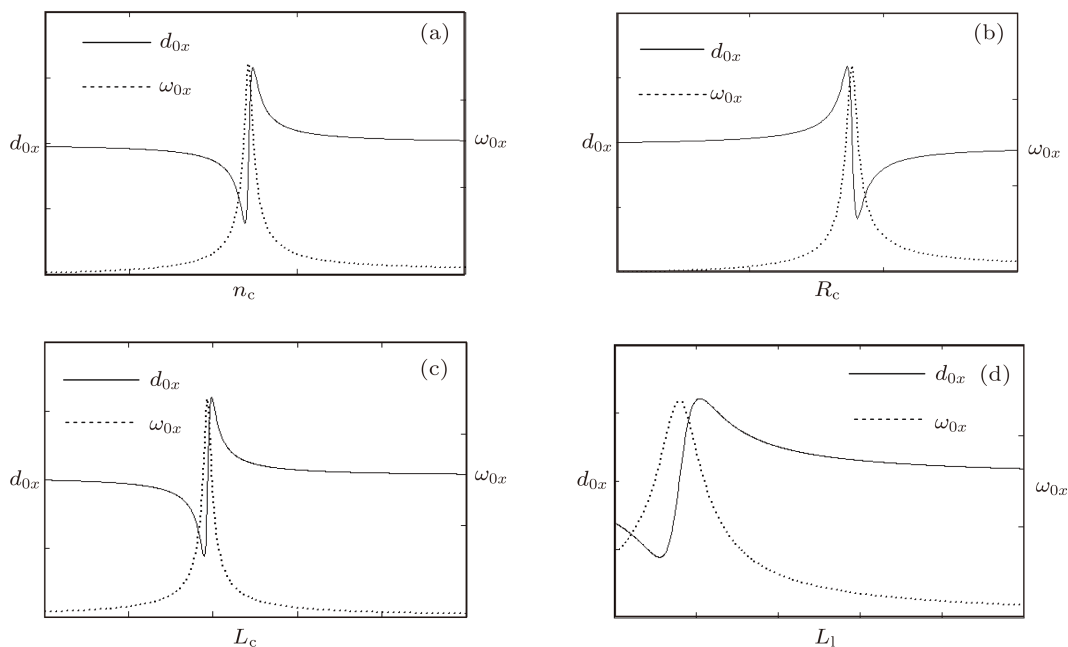
在 x - z 平面内,阵列准直器的束腰半径 ω_{0x} 为

$$\omega_{0x} = \frac{\omega_{2x}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\pi \omega_{2x}^2}{\lambda_0 R_{2x}}\right)^2\right]}}, \quad (11)$$

在 x - z 平面内,阵列准直器的工作距离 d_{0x} 为

$$d_{0x} = \left| \frac{R_{2x}}{1 + \left(\frac{\lambda_0 R_{2x}}{\pi \omega_{2x}^2}\right)^2} \right|. \quad (12)$$

利用所推导的方程,可以得出 ω_{0x} 、 d_{0x} 与各个变量之间的变化曲线,如图2所示.


 图2 ω_{0x}, d_{0x} 与各个变量之间的变化曲线 (a) n_c ; (b) R_c ; (c) L_c ; (d) L_1

从图2可以清楚地看出, ω_{0x}, d_{0x} 与各个变量之间都存在突变的关系, 不是简单的线性关系, 在决定各个变量具体值时, 需根据实际情况, 注意各个变量之间的互相调节, 选取 ω_{0x} 和 d_{0x} 曲线的交点附近, 取最优化解。

2.1.2 y - z 平面内的高斯光束传播理论推导

在 y - z 平面内, 从光纤表面出射到 C-Lens 表面出射的整体传输矩阵 M_y 为

$$\begin{aligned} M_y &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{(n_0 - n_c) \cos(\theta_4 - \theta_1)}{n_0 R_c} & \frac{n_c}{n_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_4}{\cos \theta_3} & 0 \\ 0 & \frac{n_0 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} & 0 \\ 0 & \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_2} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (13)$$

在 y - z 平面内, C-Lens 出射处的高斯光束 q 参数 q_{2y} 为

$$q_{2y} = M_y \cdot q_1, \quad (14)$$

在 y - z 平面内, C-Lens 出射处的高斯光束曲率半径 R_{2y} 为

$$R_{2y} = \frac{1}{\text{Re}(1/q_{2y})}, \quad (15)$$

在 y - z 平面内, C-Lens 出射处的高斯光束光斑半径 ω_{2y} 为

$$\omega_{2y} = \sqrt{\frac{-\lambda_0}{\pi \text{Im}(1/q_{2y})}}, \quad (16)$$

在 y - z 平面内, 阵列准直器的束腰半径 ω_{0y} 为

$$\omega_{0y} = \frac{\omega_{2y}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\pi \omega_{2y}^2}{\lambda_0 R_{2y}}\right)^2\right]}}, \quad (17)$$

在 y - z 平面内, 阵列准直器的工作距离 d_{0y} 为

$$d_{0y} = \left| \frac{R_{2y}}{1 + \left(\frac{\lambda_0 R_{2y}}{\pi \omega_{2y}^2}\right)^2} \right|. \quad (18)$$

利用所推导的方程, 可以得出 ω_{0y}, d_{0y} 与各个变量之间的变化曲线, 如图3所示。

因为光纤端面存在倾斜角度, 所以, 对同样的 ω_0 值和 d_0 值, x - z 平面内和 y - z 平面内对应的变量值是不一样的, 因此, 在实际选取各变量值时, 需要定下一种关系, 用以均衡 x - z 平面内和 y - z 平面内的各个变量值. 通过比较图2和图3, 可以发现, ω_{0x}, d_{0x} 和 ω_{0y}, d_{0y} 随各个变量的变化趋势是一致的, 所以, 通过取两个平面内均值的方式, 可以决定实际的各个变量值。

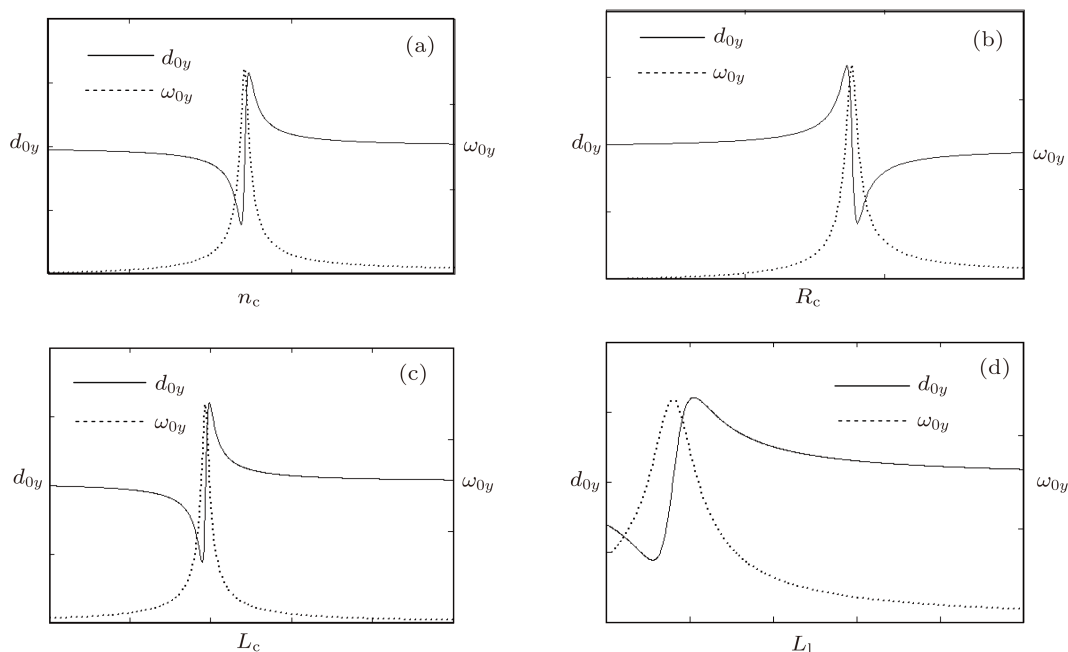


图3 ω_{0y}, d_{0y} 与各个变量之间的变化曲线 (a) n_c ; (b) R_c ; (c) L_c ; (d) L_1

2.2 基于光路有胶方式的阵列准直器

光路有胶方式, 与光路无胶方式的结构类似, 只是光纤阵列和 C-Lens 之间的空气隙替换成了封装用胶, 光路结构原理如图 4 所示, 其中灰色区域代表胶层部分. 同样, 需要根据关键指标束腰半

径 ω_0 和工作距离 d_0 计算出以下参数: C-Lens 的折射率 n_c 、C-Lens 的曲率半径 R_c 、C-Lens 的轴心长度 L'_c 、胶层厚度 L'_1 .

本部分的理论计算与光路无胶方式的理论计算类似, 可参照上述部分, 此处不列出详细计算过程.

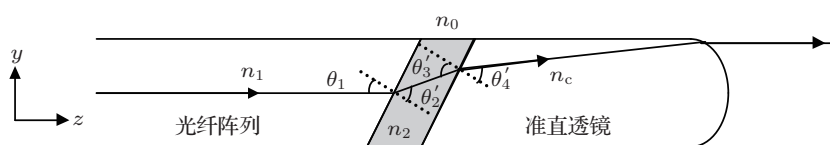


图4 基于光路有胶方式的阵列准直器光路结构原理图

3 模拟和实验验证

本文需研制出下述阵列准直器: 束腰半径 $\omega_0 = 230 \mu\text{m}$; 工作距离 $d_0 = 66 \text{mm}$. 取常量如下: 传输光波在空气中的波长 $\lambda_0 = 1545 \text{nm}$; 光纤折射率 $n_1 = 1.44$; 光纤出射处的高斯光束束腰半径 $\omega_1 = 5 \mu\text{m}$. 下面, 将利用推算公式, 计算出两种实现方式对应的各种变量值.

以光路无胶方式为例, 推算出各个变量的数值. 因 ω_0 和 d_0 对应的变量比较多, 需先预设几个变量的值, 然后定最后一个变量的最优化值. 本文采用

中国玻璃库中的 H-Laf3 玻璃, 折射率 $n_c = 1.72$; 取标准的 C-Lens 曲率半径 $R_c = 1.75 \text{mm}$; 根据实际封装工艺要求, 取空气隙厚度 $L_1 = 0.18 \text{mm}$, 分别绘出 $x-z$ 平面内和 $y-z$ 平面内的最优化 C-Lens 轴心长度 L_c , 如图 5 所示.

在保证 ω_0 和 d_0 尽量接近目标值的前提下, 取二者曲线的交点作为 L_c 的最优化值, 从图 5 可以得出: 1) $x-z$ 平面内, L_c 最优化值为 3.95; 2) 和 1) $y-z$ 平面内, L_c 最优化值为 3.86. 取两个平面内对应值的平均值, 得到 $L_c = 3.905 \text{mm}$, 考虑到实际加工的精度, 实际取 $L_c = 3.9 \text{mm}$. 同理, 得出光路有

胶方式时的各变量具体数值, 结果详见表 1.

其中, 光路有胶方式中, 胶层厚度 0.01 mm 是根据实际工艺而定的数值.

利用表 1 的平均值再反推计算出两种实现方

式在不同平面内束腰半径和工作距离, 如表 2 所示.

将表 1 中的平均值输入到光学设计模拟软件 Zemax 进行模拟验证, 模拟计算出两种方式在不同平面内束腰半径和工作距离, 如表 3 所示.

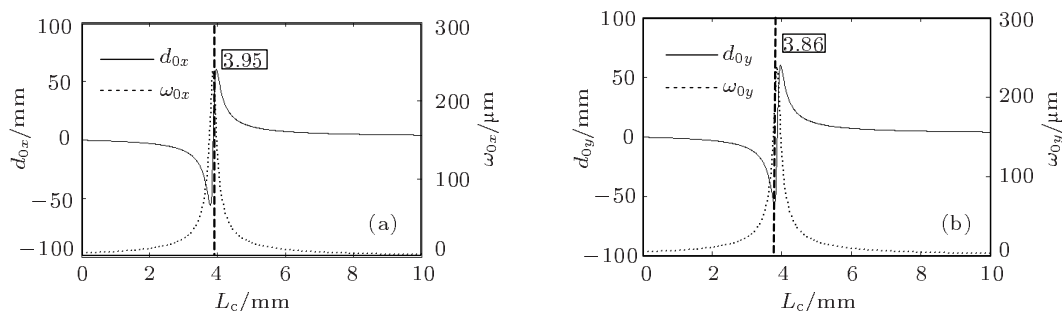


图 5 光路无胶方式, L_c 在不同平面内的最优化值 (a) x - z 平面; (b) y - z 平面

表 1 阵列准直器的对应变量计算值

光路无胶方式		光路有胶方式	
空气折射率	1	胶折射率	1.49
C-Lens 折射率	1.72	C-Lens 折射率	1.72
空气隙厚度	0.18 mm	胶层厚度	0.01 mm
C-Lens 中心距	3.9 mm	C-Lens 中心距	4.2 mm
C-Lens 曲率半径	1.75 mm	C-Lens 曲率半径	1.75 mm

表 2 由各变量平均值反推出的束腰半径和工作距离

光路无胶方式		光路有胶方式	
束腰半径 (x - z 平面)	229.6 μm	束腰半径 (x - z 平面)	228.4 μm
束腰半径 (y - z 平面)	230.5 μm	束腰半径 (y - z 平面)	231.2 μm
工作距离 (x - z 平面)	68.6 mm	工作距离 (x - z 平面)	69.0 mm
工作距离 (y - z 平面)	65.3 mm	工作距离 (y - z 平面)	64.9 mm

表 3 Zemax 模拟出的束腰半径和工作距离

光路无胶方式		光路有胶方式	
束腰半径 (x - z 平面)	221.1 μm	束腰半径 (x - z 平面)	227.0 μm
束腰半径 (y - z 平面)	232.1 μm	束腰半径 (y - z 平面)	231.7 μm
工作距离 (x - z 平面)	70.4 mm	工作距离 (x - z 平面)	69.6 mm
工作距离 (y - z 平面)	61.3 mm	工作距离 (y - z 平面)	63.5 mm

将表 2 中的理论反推结果和表 3 中的模拟结果分别与目标值比较, 都在指标合格范围之内, 取得了理想的结果. 将所有光学元件按照理论计算的尺寸加工完成, 并采用精密微调结构和紫外封装用胶工艺, 制作出了两种方式的阵列准直器, 三维封装结构如图 6 和图 7 所示. 同时, 利用光斑测试装置, 分别测试出两种阵列准直器的束腰半径和工作

距离, 结果如表 4 所示.

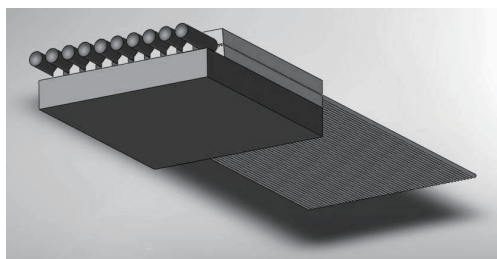


图 6 基于光路无胶方式的阵列准直器

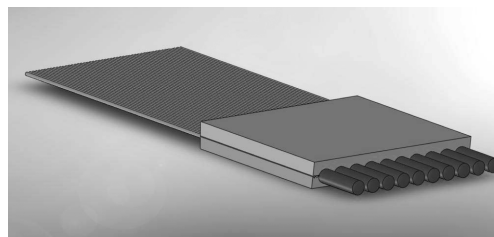


图 7 基于光路有胶方式的阵列准直器

从表 4 中的测试结果可以得出, 两种方式的阵列准直器指标均达到指标要求; 而且, 将两种方式的阵列准直器都在 ROADM 系统相关光器件 (波长选择开关等) 和 OXC 系统相关光器件 (光开关) 进行了初步的应用, 完全达到系统的性能要求, 充分说明了基于单准直透镜方案的可行性.

表 4 实际调试出的阵列准直器的束腰半径和工作距离

光路无胶方式		光路有胶方式	
束腰半径 ($x-z$ 平面)	218.2 μm	束腰半径 ($x-z$ 平面)	220.6 μm
束腰半径 ($y-z$ 平面)	229.1 μm	束腰半径 ($y-z$ 平面)	226.6 μm
工作距离 ($x-z$ 平面)	80.8 mm	工作距离 ($x-z$ 平面)	71.3 mm
工作距离 ($y-z$ 平面)	70.3 mm	工作距离 ($y-z$ 平面)	67.2 mm

4 结论

本文提出了一种基于准直透镜的阵列准直器设计方案, 有光路无胶和光路有胶两种实现方式, 分别从理论、模拟和实验三个方面进行了深入的研究, 验证了此种方案的可行性, 并结合结构设计和封装工艺, 制作出了性能优良的阵列准直器, 可满足 ROADM 系统和 OXC 系统的要求.

两种实现方式共同具有以下特征: 易加工、低成本、易封装、性能优, 也易于扩展成多维阵列准直器. 二者相互比较, 有以下区别: 因胶层对

高功率的敏感性, 光路有胶方式不适合高功率的设计, 光路无胶方式可满足高功率的设计; 在封装方面, 因光路无胶方式需要另外辅助的光学元件, 需要更长的封装时间, 也需要更难的封装工艺, 相对而言, 光路有胶方式会较容易. 因此, 在实际应用时, 可根据系统本身, 采用最适合的实现方式.

本文所采用的光学元件都是普通加工的光纤阵列和 C-Lens, 如果采用腐蚀技术等工艺对光纤阵列和 C-Lens 进行精细加工, 未来可以制作出超小尺寸的阵列准直器.

[1] Feuer M D, Kilper D C, Woodward S L 2008 *Optical Fiber Telecommunications VB: Systems and Network* (Amsterdam: Elsevier Inc.) p293
 [2] Eldada L, Fujita J, Radojevic A 2006 *Proceedings of the 31th OFC/NFOEC California USA* March 5–10 2006 p4

[3] Kaman V, Yuan S, Jerphagnon O 2006 *Proceedings of Photonics in Switching Conference San Diego CA USA* October 16–18 2006 p1
 [4] Hu Q G, Liu D M, Sun L P 2008 *Proceedings of SPIE 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology Bei-*

- ing China November 16–19 2008 p7136
- [5] Mala M, Miller J M, McKinnon G 2005 *U.S. Patent* US6934439
- [6] Darvish G, Moravvej-Farshi M K, Zarifkar A, Saghafi K 2008 *Appl. Opt.* **47** 5140
- [7] Li W, Liu D M, Yang C Y 2006 *Chinese J. Lasers* **33** 351 (in Chinese) [李蔚, 刘德明, 杨春勇 2006 中国激光 **33** 351]
- [8] Xiao F, Juswardy B, Alameh K, Lee Y 2008 *Opt. Express* **16** 11703
- [9] Pei L, Ning T G, Li T J, Dong X W, Jian S S 2004 *Acta Phys. Sin.* **54** 1630 (in Chinese) [裴丽, 宁提纲, 李唐军, 董小伟, 简水生 2004 物理学报 **54** 1630]
- [10] Zhang J Z, Wang A B, Wang Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **58** 3793 (in Chinese) [张建忠, 王安帮, 王云才 2008 物理学报 **58** 3793]
- [11] Hu Q G, Liu D M, Zhang D, Yuan Z L, Zhang B 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 1168 (in Chinese) [胡强高, 刘德明, 张灼, 袁志林, 张博 2010 光学学报 **30** 1168]
- [12] Hu Q G, Liu D M 2010 *Study on Optical Communications* **4** 52 (in Chinese) [胡强高, 刘德明 2010 光通信研究 **4** 52]
- [13] Corem Y, Cohen G, Frenkel B 2008 *U.S. Patent* US20080030-867A1
- [14] Kikuchi J, Mizushima Y, Takahashi H, Takeuchi Y 2002 *U.S. Patent* US20020097956A1
- [15] Yuan S F, Riza N A 1999 *Appl. Opt.* **38** 3214
- [16] Gao H W, Zhang C M, Zhao B C 2011 *Optik* **122** 2110
- [17] Zhang C M, Wu Q M, Mu T K 2011 *Appl. Opt.* **50**
- [18] Gao H W, Zhang C M 2011 *Proceedings of SPIE* Orlando, FL, USA April 25–26, 2011 p8032
- [19] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [20] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
- [21] Zhou B K, Gao Y Z, Chen C R, Chen J H 2009 *Laser Principle* (Beijing: National Defence Industry Press) p91 (in Chinese) [周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 陈家骅 2009 激光原理 (北京: 国防工业出版社) 第 91 页]

Study of collimator array based on single collimating lens*

Yuan Zhi-Lin[†] Yang Rui Yang Liu Song Li-Dan Sun Li-Ping Ma Yu-Hong
Wang Meng Chen Ding-Kang Guo Jin-Ping Tang Li-Hong

(State Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Accelink Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

(Received 9 December 2011; revised manuscript received 6 January 2012)

Abstract

A new collimator array based on single collimating lens and fiber array is proposed in the paper. An in-depth study is conducted on the two realizing methods, one is with glue in the optical path and the other is without glue in the optical path. Based on Gauss optics transmission matrix and q parameter theory, the relationship among the variables is deduced and computed theoretically, simulated virtually and confirmed experimentally. Good agreement between theoretical results and simulation, experimental results is obtained. The mechanical and packaging designs of the two realizing methods are first studied, then the proposed collimator arrays, with good performance are made. Both the theoretical and experimental results show that the scheme has the merits of easy-to-make, low cost, easy-to-package, good performance, good scalability, etc., which can strongly support the development of reconfigurable optical add-drop multiplexer system and optical cross-connect system.

Keywords: collimating lens, collimating lens, agile optical network

PACS: 42.81.Qb, 42.79.Ag

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA03Z443).

[†] E-mail: zhilin.yuan@accelink.com