

# 带输入、输出端口的双芯光纤偏振分束器研究

毛艳萍 季敏宁 解清明 刘 珍

(上海大学光纤研究所, 上海 201800)

**摘要** 双芯光纤偏振分束器是一类基于模式干涉的偏振分束器,是以双芯光纤作为定向耦合器,经过双芯光纤的耦合区域后实现的偏振选择性输出,因而其输入、输出端的形状和尺寸会影响光的输出功率及特性。基于椭圆双芯光纤,在分束器的输出消光比满足一定要求(大于 20 dB)的情况下,借助于 RSOFTE 软件的 Beamprop 模块,研究双芯光纤偏振分束器输入、输出端口的形状和尺寸以及输入光的波长和线偏振角度对偏振选择特性的影响,及其可能的工作带宽和制作容差。结果表明,双芯光纤偏振分束器形状为 S-Bend, X 和 Z 方向的尺寸分别为 40  $\mu\text{m}$  和 4000  $\mu\text{m}$  的端口,输入光的工作带宽可以大于 7.5 nm,对应的耦合区长度较短,约为 209.87 mm。

**关键词** 光纤光学;偏振分束器;RSOFTE 软件;消光比;双芯光纤

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0505001

## Research of Twin-Core Optical Fiber Polarization Beam Splitter with Input and Output Waveguides

Mao Yanping Ji Minning Xie Qingming Liu Zhen

(Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Based on modes interference, twin-core optical fiber polarization beam splitter can spatially separate different polarized incident lights according to the coupling length difference of the two orthogonal polarization states. Making the dual-core optical fiber as a directional coupler, the power and polarization selectivity of the twin-core optical fiber polarization beam splitter are affected by the shape and size of the input and output waveguides when the light goes through the twin-core coupling area. Based on an elliptical twin-core optical fiber beam splitter and the RSOFTE-Beamprop numerical calculation, the effects of the shape and size on the polarization selectivity, the bandwidth and fabrication tolerance are researched under the required extinction ratio ( $\geq 20$  dB). The results show that the shape of twin-core optical fiber beam splitter is S-Bend, the input and output waveguide size is 40  $\mu\text{m}$  and 4000  $\mu\text{m}$  in the transversal X and longitudinal Z direction, respectively. Bandwidth of input light can greater than 7.5 nm and its coupled length is as comparatively short as about 209.87 mm.

**Key words** fiber optics; polarization beam splitter; RSOFTE software; extinction ratio; twin-core optical fiber

**OCIS codes** 060.2340; 230.1360; 260.5430

## 1 引 言

常规光纤是由单根纤芯和包层材料构成,双芯光纤则是一种新型的包含一对平行纤芯的特种光纤,它利用光的消逝场在两根纤芯之间耦合,实现对光功率、波长和偏振态等的功能选择<sup>[1]</sup>。与常规光纤相比,双芯光纤由于具有特殊的结构,既可以作为光传输介质,又可用于制备新型的光纤波导器件。

另外,双芯光纤还具有灵活性,可以通过调整长度、纤芯参数及拉伸等方法<sup>[2-3]</sup>来调谐其光谱特性,使双芯光纤可以根据具体的需求改变自身的特性。

偏振分束器是光网络组件中的重要器件,它将输入光分解成两束正交的输出光。随着光纤通信及光纤传感测量技术的迅猛发展,偏振分束器变得越来越重要,在光通信、光存储、集成光路中都有潜在

**收稿日期:** 2013-11-04; **收到修改稿日期:** 2013-11-23

**基金项目:** 上海市教委创新基金(09YZ31)

**作者简介:** 毛艳萍(1989—),女,硕士研究生,主要从事光纤偏振分束器方面的研究。E-mail: myp0513@126.com

**导师简介:** 季敏宁(1964—),男,博士,教授,主要从事特种光纤理论与技术等方面的研究。

E-mail: jmn2001@shu.edu.cn

的应用价值<sup>[4-5]</sup>。现在,微型化光纤波导偏振分束器已成为光通信器件领域的研究热点<sup>[6]</sup>。双芯光纤偏振分束器继承了双芯的特殊优势,是一类基于模式干涉的偏振分束器,它根据耦合长度的不同将两种偏振态分离开来。这一类分束器具有设计灵活、体积小、价格低廉、应用广泛等优点。

光束传播法(BPM)通过列出单色波的波动方程,模拟单向传播波场,给出光场在空间分布的数值解,它是一种求解电磁场亥姆霍兹方程的数值方法<sup>[7]</sup>。在实际光波导回路设计中,光的传播并不都是直线,此时 BPM 是一种有效的数值模拟方法。BPM 利用数值方法求解波动方程,模拟分析光在设定波导回路中的传播情况,其特点是原理简单、计算区域较大、计算量小,因此在光波导回路的模拟中得到了广泛的应用。

本文基于椭圆双芯光纤<sup>[8-10]</sup>,借助 RSOFTE 软件研究加入了输入、输出端口的双芯光纤的偏振分束特性、入射光带宽以及制作容差等要素。

## 2 偏振分束原理及端口分析

双芯光纤偏振分束器是利用光的消逝场在两根纤芯之间发生耦合来实现对光的偏振态的选择<sup>[11-13]</sup>,也就是两个正交模式中一个偏振模式耦合到另一纤芯的功率为零(耦合比为 0),另一个偏振模式完全耦合(耦合比为 100%),以达到偏振分束的效果。双芯光纤两纤芯实际上构成一对平行光波导,满足弱耦合条件,可以利用传统的耦合模理论分析其耦合特性<sup>[14]</sup>。由耦合模理论可知,当归一化功率为 1 的光从一纤芯入射,经过长度  $Z$  之后,到达另一纤芯的光功率为

$$P_j = \sin^2(C_j Z) \quad (j = x, y). \quad (1)$$

当  $P_x = 1, P_y = 0$  时,  $X$  偏振光完全被耦合到另一纤芯,而  $Y$  偏振光仍保留在原纤芯中,此时分束器达到最佳效果。从(1)式知,最佳分束需满足条件

$$C_x L = n\pi + \frac{\pi}{2}, \quad C_y L = m\pi. \quad (2)$$

由文献<sup>[15]</sup>可知,耦合系数与入射波长、光纤相对折射率差、光纤归一化频率以及两纤芯间的归一化距离( $\bar{d} = d/a$ )等参数有关。

基于双芯光纤的偏振分束器,是以双芯光纤作为定向耦合器,经过双芯光纤的耦合区域来实现的。偏振选择性输出,而输入、输出端光纤的长度和形状会影响光的输出功率及消光比(ER)等特性。图 1 为加入输入、输出端口的偏振分束器模型,其中平行

部分为双芯光纤的两个芯子,弯曲部分为两个芯子的输入、输出端口。仿真中主要采用以下三种形状: S-Bend, cosine S-Bend, raised sine S-Bend。S-bend 是由两个圆弧组成, cosine S-Bend 的方程为

$$f(z') = \frac{1}{2}[1 - \cos(\pi z')]. \quad (3)$$

Raised sine S-Bend 的方程为

$$f(z') = z' - \frac{\sin(2\pi z')}{2\pi}, \quad (4)$$

式中  $z'$  为归一化位置,定义为:  $z' = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0}$ ,  $z_0$  和  $z_1$  为起点和终点在  $Z$  轴的坐标。

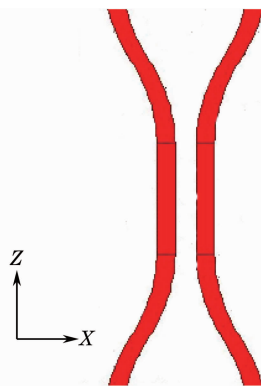


图 1 加入输入、输出端口的偏振分束器模型  
Fig. 1 Polarization beam splitter model with input and output waveguides

由于端口处和耦合区域光纤的间距不同,导致两区域的功率耦合具有不同的特点——耦合强弱不同。在端口处区域,两光纤纤芯间距较远,有几十微米级的间隙,两纤芯之间基本上没有功率交换,纤芯之间的耦合属于弱耦合;而在耦合区域,两纤芯之间间距为几微米,耦合强度增大。两区域光纤的横截面尺寸相同决定了两区域的光纤本征模相同,因此两区域之间不存在功率的大幅度损耗。这一点与融锥光纤耦合器不同:在融锥的过程中光纤的横截面一直在发生着缓慢的变化,使光纤的本征模发生变化,导致输入光的功率损耗<sup>[16-17]</sup>。由于该器件实现偏振分束的主要结构在耦合区,耦合区的几何参数是目前设计时最关注的参数,这里选取纤芯包层折射率差值为 0.0055,椭圆纤芯长短轴比例为 5,两纤芯间归一化距离为 2,以此作为偏振分束器的优化参数。

## 3 数值模拟结果及讨论

基于 RSOFTE 光波导仿真软件中的 BeamPROP 模块设计的偏振分束器,可实现 TE、TM 偏振光分

别从纤芯 1、纤芯 2 输出。在纤芯包层折射率差、长短轴比以及两纤芯间归一化距离保持不变的情况下,讨论在不同输入、输出端形状和尺寸下,两纤芯输出消光比大于 20 dB 时,最佳的光纤耦合区长度以及制作容差,并研究当输入不同角度的线偏振光时,两纤芯输出的消光比的变化以及入射波可能的工作带宽。

在之后的结果分析中会用到消光比,消光比的定义为:如果在双芯光纤的一端口耦合进一束线偏振光,在光纤的一输出端的  $x$  轴和  $y$  轴方向上测得的光功率分别为  $P_x$  和  $P_y$ ,则消光比表示为:

$$f_{ER} = 10 \lg \frac{P_x}{P_y}, \quad (5)$$

$|f_{ER}|$  越大,偏振分束器的偏振效果越好。当  $f_{ER} > 0$  dB 时,TE 偏振光功率大于 TM 偏振光, $f_{ER} > 20$  dB 时,可近似为 TE 输出;而若  $f_{ER} < 0$  dB 时, TM 偏振光功率大于 TE 偏振光,当  $f_{ER} < -20$  dB 时,可近似为 TM 输出。因此可选取  $|f_{ER}| > 20$  dB,作为选取光纤耦合区长度的重要条件。

图 2 为当选择三种不同输入和输出端的形状时,最佳的光纤耦合区的长度  $L_B$  随输入和输出端口的尺寸变化示意图。横坐标为对应端口  $x$  和  $z$  方向的 4 种不同尺寸。可以看出,不同的形状和尺寸的端口由于端口弯曲的曲率、长度的不同对应的耦合长度也不同,其中形状为 raised sine-S-Bend 的最佳光纤耦合区的长度最短,其次为 S-Bend,最长的为 cosin S-Bend,但 S-Bend 和 cosin S-Bend 的差异较小。三种不同形状的端口,最佳光纤耦合区的长度随横坐标呈现一致的变化,即随着端口的长度的加长,其对应的最佳光纤耦合区的长度变短。

表 1 是光纤两纤芯输出消光比大于 20 dB 且输

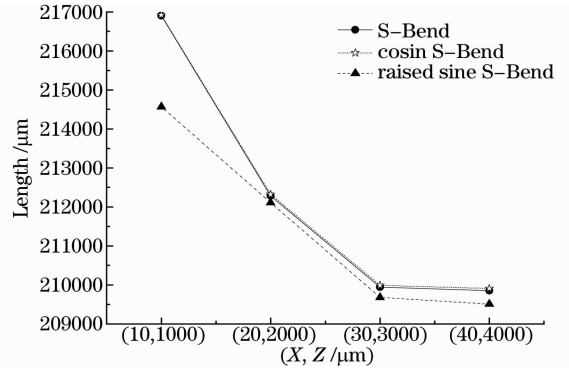


图 2 光纤耦合区的长度随端口形状及尺寸的变化

Fig. 2 Optical fiber coupling length along with the shape and size of the input and output waveguides

出端口的  $x$  和  $z$  方向的尺寸分别为  $(10 \mu\text{m}, 1000 \mu\text{m})$ ,  $(20 \mu\text{m}, 2000 \mu\text{m})$ ,  $(30 \mu\text{m}, 3000 \mu\text{m})$ ,  $(40 \mu\text{m}, 4000 \mu\text{m})$  时,耦合区光纤长度的变化范围,即制作容差。当端口  $x$  和  $z$  方向的长度分别为  $10 \mu\text{m}$  和  $1000 \mu\text{m}$  时,对应的三种形状端口的制作容差分别为 70、80、70  $\mu\text{m}$ 。当端口  $x$  和  $z$  方向的长度分别为  $20 \mu\text{m}$  和  $2000 \mu\text{m}$  时,对应的三种形状端口的制作容差均为 60  $\mu\text{m}$ 。当端口  $x$  和  $z$  方向的长度分别为  $30 \mu\text{m}$  和  $3000 \mu\text{m}$  时,对应的三种形状端口的制作容差分别为 40、50、40  $\mu\text{m}$ 。当端口  $x$  和  $z$  方向的长度分别为  $40 \mu\text{m}$  和  $4000 \mu\text{m}$  时,对应的三种形状端口的制作容差分别为 40、50、40  $\mu\text{m}$ 。当端口尺寸大小相等时,raised sine S-Bend 形状的光纤对应的耦合区光纤长度最短,而未加入输入、输出端口的偏振分束器长度,其模拟计算结果为 222900  $\mu\text{m}$ 。由此可以看出,加入输入、输出端口后,两纤芯平行部分的长度变短,这可以理解为在平行耦合区末端附近,两端口间距较近,仍存在两纤芯之间的光功率耦合,即与未加端口的偏振分束器相比增加了功率交换的过渡区域。

表 1 光纤耦合区的制作容差随端口形状及尺寸的变化

Table 1 Fabrication tolerance along with the shape and size of the input and output waveguides

Shape of waveguide / $\mu\text{m}$	(10,1000)	(20,2000)	(30,3000)	(40,4000)
S-Bend / $\mu\text{m}$	216900~216970	212280~212340	209940~209980	209850~209890
Cosin S-Bend / $\mu\text{m}$	216920~217000	212320~202380	209990~210040	209910~209960
Raised sine-S-Bend / $\mu\text{m}$	214570~214640	212110~212170	209680~209720	209510~209550

图 3 中的四张图分别对应三种端口形状、四种端口尺寸且中心波长均为  $0.85 \mu\text{m}$  的偏振分束器的输出端两纤芯的消光比随入射光波长的变化关系。取两纤芯消光比绝对值均大于 20 dB 时的入射波长的变化范围为偏振分束器的工作带宽。从图 3(a)中可以看出,在中心波长两边,两纤芯的消

光比绝对值均急剧下降,且小于中心波长消光比,其带宽均小于 5 nm;从图 3(b)可以看出,在入射波长为小于中心波长的  $0.845 \mu\text{m}$  时,三种形状端口的纤芯 2 的消光比绝对值均大于入射波长为中心波长处的消光比,端口形状为 raised sine S-Bend 的纤芯 1 消光比大于 20 dB,所以 raised sine S-Bend 带宽

大于 5 nm。端口形状为 S-Bend 和 cosin S-Bend 时,纤芯 1 的消光比小于 20 dB,所以 S-Bend 和 cosin S-Bend 形状端口的偏振分束器带宽小于 5 nm;从图 3(c)可以看出,三种形状端口的两纤芯的消光比变化趋势相同,带宽略小于 5 nm。从图 3(d)可以看出,在入射波长为小于中心波长的 0.845  $\mu\text{m}$ 时,端口形状为 S-Bend 的两纤芯消光比绝对值均大于 20 dB,带宽大于 7.5 nm。端口形状

为 cosin S-Bend 和 raised sine S-Bend 的两纤芯消光比绝对值均小于 20 dB,带宽小于 5 nm。从图 3(b)、(c)、(d)三幅图还可以看出,raised sine S-Bend 形状端口的偏振分束器入射波的工作带宽随着端口长度的增加而变窄,而 S-Bend 形状端口的偏振分束器入射波的工作带宽随着端口尺寸的变大而加宽,即端口形状为 S-Bend, $x$ - $z$  方向的尺寸为 (40  $\mu\text{m}$ , 4000  $\mu\text{m}$ )时,对应的带宽最宽。

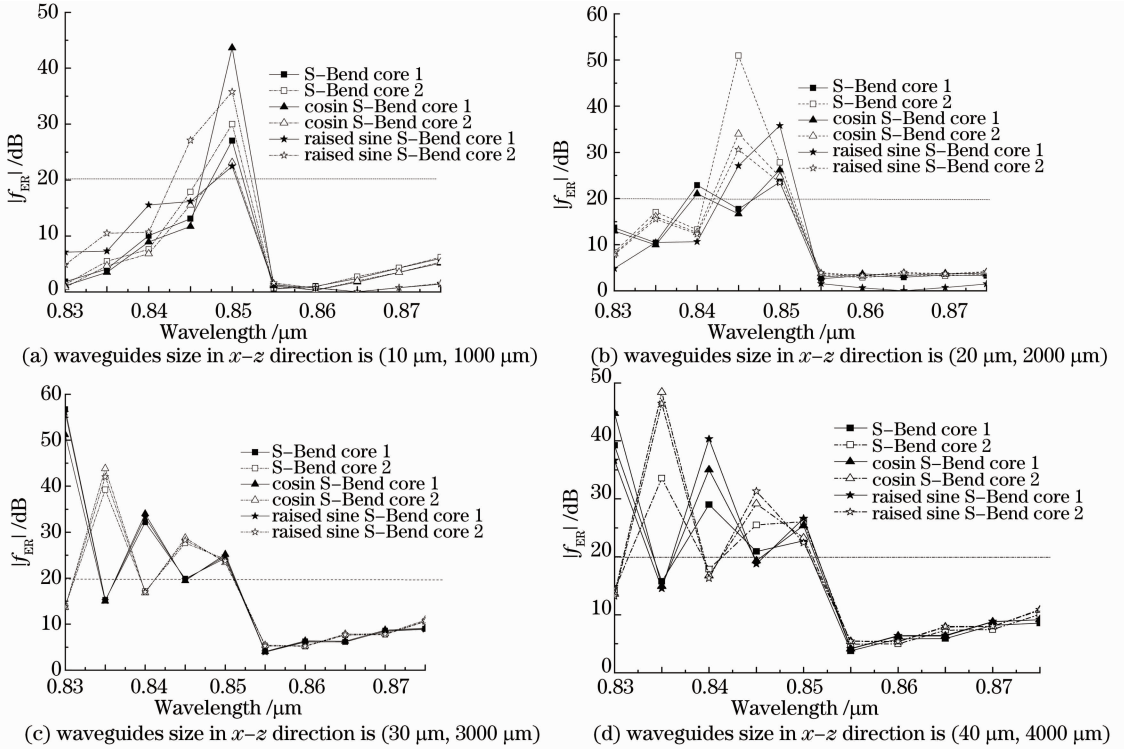


图 3 不同端口形状、尺寸的两纤芯消光比随入射波长的变化

Fig. 3 Two-cores extinction ratio of different shapes and sizes of the waveguides along with the incident wavelength

图 4 为基于 S-Bend 形状, X-Z 方向尺寸为 (40  $\mu\text{m}$ , 4000  $\mu\text{m}$ )的端口的两纤芯输出光消光比绝对值随入射光偏振角度的变化关系图。可以看出,

在  $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的输出光消光比绝对值呈现以  $90^\circ$ 线偏振为轴的轴对称。当  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 的线偏振光,即为纯 TE、TM、TE 光偏振光输入时,两纤芯消光比均比较大,在理想的情况下可以达到 100 dB,但是这三种情况的光输入没有实际意义。当入射的光为  $30^\circ$ 、 $150^\circ$ 线偏振时,纤芯 2 的消光比小于 20 dB,当入射光为  $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 线偏振时,两纤芯的消光比大于 20 dB。当入射的光为  $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 线偏振时,两纤芯的消光比略大于 20 dB。

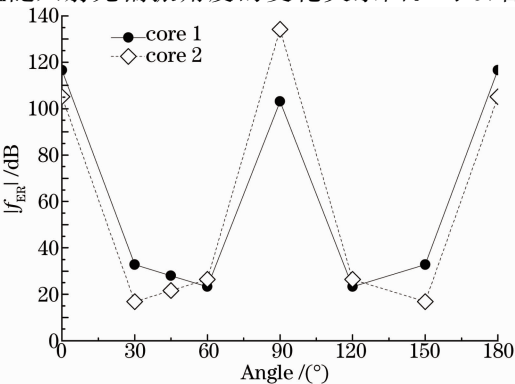


图 4 输出光消光比随入射光偏振角度的变化

Fig. 4 Output light extinction ratio along with the incident light polarization angle

图 5 为两纤芯的分光比随入射光偏振角度的变化图示,分光比定义为:输出端的其中一纤芯的功率占两纤芯总功率的比值。从图中可以看出,消光比也呈现以  $90^\circ$ 线偏振为轴的轴对称。所设计的偏振分束器,最终将实现 TE 偏振光从纤芯 1 输出, TM 偏振光从纤芯 2 输出,所以当入射光为  $0^\circ$ 或  $180^\circ$ 的

## 参 考 文 献

- Zou Yi, Dong Xiaopeng, Li Weiwen, *et al.*. Demodulation of the FBG temperature sensor with the tunable twin-core fiber[C]. OFCI, 2007. 355-358.
- 邹毅, 董小鹏, 李伟文, 等. 采用可调双芯光纤解调的光纤光栅温度传感研究[C]. 全国第13次光纤通信暨第14届集成光学学术会议论文集, 2007. 355-358.
- B Ortega, L Dong. Characteristics of mismatched twin-core fiber spectral filters[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(7): 991-993.
- Yasuji Murakami, Shoichi Sudo. Coupling characteristics measurements between curved waveguides using a two-core fiber coupler[J]. Appl Opt, 1981, 20(3): 417-422.
- Wen Ke, Wang Jingyuan, Wang Rong. Polarization splitter based on two-core rectangular-lattice photonic crystal fibers[J]. Chinese J Quantum Electronics, 2008, 25(4): 505-508.
- 文科, 汪井源, 王荣. 矩形晶格结构双芯光子晶体光纤偏振分束器的研究[J]. 量子电子学报, 2008, 25(4): 505-508.
- Qingyi Guo, Xun Li, Jianwei Mu, *et al.*. Planar waveguide polarization beam splitter based on form birefringence[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1834-1837.
- Jungsheng Chiang, Naihsiang Sun, Shihchiang Lin, *et al.*. Analysis of an ultrashort PCF-based polarization splitter[C]. J Lightwave Technology, 2010, 28(5): 707-713.
- Li Anying, Yang Yapei. Review of the new development of beam propagation method for analysis of optical waveguide[J]. Laser Technology, 2008, 24(4): 236-240.
- 李安英, 杨亚培. 光波导光束传输法数值分析新进展[J]. 激光技术, 2008, 24(4): 236-240.
- Li Dan, Liu Min, Jian Duo, *et al.*. Characteristics of highly birefringent dual-core photonic crystal fibers [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405005.
- 李丹, 刘敏, 简多, 等. 高双折射双芯光子晶体光纤特性[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405005.
- R Hereth, G Schiffner. Broad-band optical directional couplers and polarization splitters[J]. J Lightwave Technology, 1989, 7(6): 925-930.
- Jianqiang Lin, Zhidong Shi, Ye Bai, *et al.*. Influence of cores' shape on coupling length of dual-core fiber[C]. SPIE, 2009, 76302I.
- Keji Huang, Shuangyang Yang, Limin Tong. Modeling of evanescent coupling between two parallel optical nanowire[J]. Appl Opt, 2007, 46(9): 1429-1434.
- Geng Kaisheng, Guan Jianfei. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber with rectangular lattice[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305007.
- 耿开胜, 关建飞. 矩形晶格双芯光子晶体光纤的耦合特性[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305007.
- Li Rongmin, Cao Ye, Tong Zhengrong. Short length polarization splitter based on dual elliptical-core photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005004.
- 李荣敏, 曹晔, 童峥嵘. 短长度的双椭圆纤芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005004.
- H A Haus, W P Huang, S Kawakami, *et al.*. Coupled-mode theory of optical waveguides[J]. J Lightwave Technology, 1987, 5(1): 16-23.
- Govind P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 318-322.
- 阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 318-322.
- Wei Daoping, Zhao Yucheng, Zhang Jingsong, *et al.*. A novel fabrication method for biconically fused fiber polarization beamsplitters[J]. J China Railway Society, 1999, 121(1): 58-61.
- 魏道平, 赵玉成, 张劲松, 等. 熔锥型光纤偏振分束器的一种新型制作方法[J]. 铁道学报, 1999, 121(1): 58-61.
- Katsumi Morishita, Katsuyoshi Takashina. Polarization properties of fused fiber couplers and polarizing beamsplitters[J]. J Lightwave Technology, 1991, 9(11): 1503-1507.

栏目编辑: 韩峰

线偏振光(TE 偏振输入)时,光功率几乎全集中在纤芯 1 中,当入射光为  $90^\circ$  的线偏振光(TM 偏振输入)时,光功率几乎全集中在纤芯 2 中。当入射光为  $45^\circ$  和  $135^\circ$  偏振光时,入射光在 TE 和 TM 方向上偏振光的功率分配相等,所以输出光功率在两纤芯中近似平均分配。结合图 4 可知,当入射  $45^\circ$  或  $135^\circ$  的线偏振光时,在两纤芯中可以分别获得功率近似相等且消光比均大于 20 dB 的 TE 和 TM 偏振光。

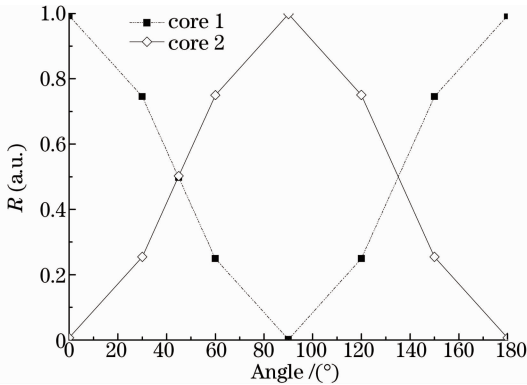


图 5 纤芯分光比随入射光偏振角度的变化

Fig. 5 Splitting ratio along with the incident light polarization angle

## 4 结 论

通过讨论在不同输入、输出端口形状和尺寸下,两纤芯输出消光比大于 20 dB 时,最佳的光纤耦合区的长度、制作容差,以及输入不同角度的线偏振光时,两纤芯输出的消光比变化和入射波工作带宽等要素,得出以下结论:在 X-Z 方向端口尺寸相同、制作容差要求相差不大的情况下,Raised sine-S-Bend 形状的端口,其光纤平行耦合区的长度最短;当入射光为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  的线偏振光时,两纤芯输出的消光比绝对值远高于 20dB,即为纯 TE 或 TM 波;当入射光为  $45^\circ$  或  $135^\circ$  的线偏振光时,在两纤芯中可以分别获得功率近似相等的较好的 TE 和 TM 波;在端口形状为 S-Bend 时,偏振分束器的带宽随着端口长度的增加而加宽,当 X-Z 方向的尺寸为  $(40 \mu\text{m}, 4000 \mu\text{m})$  时,可以有 7.5 nm 的带宽。结合表 1 结果可知,形状为 S-Bend, X-Z 方向的尺寸为  $(40 \mu\text{m}, 4000 \mu\text{m})$  的端口,输入光在其 7.5 nm 的工作带宽内时,对应的耦合区长度相对较短,约为 209.87 mm。且当偏振角度为  $45^\circ$ 、 $135^\circ$  的入射光输入时,该形状和尺寸的端口对应的双芯光纤偏振耦合器的两纤芯消光比均大于 20 dB。