

# 基于数字图像的保偏光纤与 Y 型波导耦合损耗分析

李亮, 宋凝芳, 冯迪\*, 张春熹

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 主要研究了保偏光纤与 Y 型波导输入端的对准耦合。基于模场重叠积分法, 数值计算 5 个自由度上的对准偏差对耦合损耗的影响, 并设计了一种基于数字图像的实验方案。仿真与实验结果吻合较好, 证明该实验方案可行。结果表明: 横向位错  $X$  和  $Y$  对耦合损耗的影响最大, 纵向间距  $Z$  对耦合损耗的影响较小, 而角度  $\alpha$  和  $\beta$  变化时产生的耦合损耗主要是由附加横向位移引起的, 单纯的角度变化对耦合损耗的影响极小。若要求对准偏差损耗低于 0.5 dB, 则横向位错与纵向间距的容差范围分别为  $-1 \sim 1 \mu\text{m}$  和  $-20 \sim 20 \mu\text{m}$ 。本研究为后续自动耦合系统的研究提供参考。

**关键词** 光纤光学; 保偏光纤; Y 型波导; 耦合损耗; 对准偏差

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1106005

## Coupling Loss Analysis Between Polarization Maintaining Fiber and Y-Waveguide Based on Digital Image

Li Liang, Song Ningfang, Feng Di\*, Zhang Chunxi

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** Alignment coupling between polarization maintaining fiber and input end of Y-waveguide is studied. The influence of alignment deviation on coupling loss at five degrees of freedom is simulated by mode-field overlapping integral method, and an experimental scheme based on digital image is designed. The simulation results are consistent with the experimental data, which proves the feasibility of the experimental scheme. The results reveal that the transverse misalignments  $X$  and  $Y$  have the greatest influence on the coupling loss, while the vertical spacing  $Z$  has less influence on the coupling loss. And the coupling loss generated by the deflection angle  $\alpha$  or pitch angle  $\beta$  is mainly caused by additional transverse displacement, while the mere change of angle has minimal impact on coupling loss. When the coupling loss is required to be under 0.5 dB, the tolerance range of transverse misalignment and vertical spacing should be restricted within  $-1 \mu\text{m}$  to  $1 \mu\text{m}$  and  $-20 \mu\text{m}$  to  $20 \mu\text{m}$ , respectively. The conclusions provide references for subsequent research on automatic alignment system.

**Key words** fiber optics; polarization maintaining fiber; Y-waveguide; coupling loss; alignment deviation

**OCIS codes** 060.2800; 250.7360; 280.4788; 350.4600

## 1 引言

随着光纤陀螺技术在惯性导航领域的进一步发展, 人们对其精度、工程应用等方面提出了更高的要求。目前, 高精度光纤陀螺广泛采用保偏光纤与 Y 型波导器件耦合的方案, 其中保偏光纤与 Y 型波导耦合点处引入的插入损耗, 对高精度光纤陀螺的性能有着不可忽视的影响<sup>[1]</sup>。光纤-波导器件的总插入损耗主要由模场失配损耗、传输损耗、反射损耗和

对准偏差损耗 4 部分组成<sup>[2-3]</sup>, 本文主要研究各自由度对准偏差对耦合效率的影响。

光纤与波导的对准一般在亚微米量级, 其精度易受多个自由度干扰的影响, 故若采用手动对准需要花费大量的时间、人力。目前成熟的光纤波导自动对准方法主要有两种: 有源主动对准和无源被动对准。有源主动对准是一种借助光功率计检测反馈耦合光强变化, 并引导各自由度调节搜索最大耦合点的高精度位姿调整方法<sup>[4-7]</sup>。在光纤陀螺技术中

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-07-03; 录用日期: 2018-07-17

基金项目: 国家重大科学仪器专项(2013YQ040877)

\* E-mail: fengdi@buaa.edu.cn

多采用无源被动对准技术,该方法是通过控制 Y 型波导器件和光纤槽的加工工艺,固定波导通道与光纤槽的相对位置,实现光纤与波导的自对准<sup>[8]</sup>。近年来,机器视觉技术逐渐被引入光纤波导的对准耦合研究中,借助图像处理的方法,提取光纤和波导的边缘特征直线,分析两者的位姿关系<sup>[9]</sup>,实现了物理对准。

关于光纤与波导对准耦合的理论研究已有很多<sup>[10-15]</sup>,这些文献对光纤与波导的模场耦合原理进行了详细的描述,并针对特定参数模型进行了实验或仿真研究,提出了特定损耗的容差范围。本文将专门针对保偏光纤和 Y 型波导输入端的耦合对准进行仿真,求出在预定耦合损耗下各自由度的容差范围,分析结果并设计实验进行验证。

## 2 仿真模型与方案设计

### 2.1 耦合模型

保偏光纤与 Y 型波导输入端的对准耦合模型如图 1 所示,在 3 维(3D)空间中光纤与波导对准耦合,共有 6 个自由度需要考虑,分别是 3 个平移自由度(横向位错  $X$ ,横向位错  $Y$ ,纵向间距  $Z$ )和 3 个旋转自由度(偏转角  $\alpha$ ,俯仰角  $\beta$ ,滚动角  $\theta$ )。其中前 5 种自由度中任一个发生偏移,都会影响插入损耗,下面将主要研究这 5 个自由度偏差对耦合效率的影响。滚动角改变会引入偏振串音<sup>[16]</sup>,但不影响插入损耗,因此不作具体分析。同理,在仿真中将采用普通单模光纤代替保偏光纤。

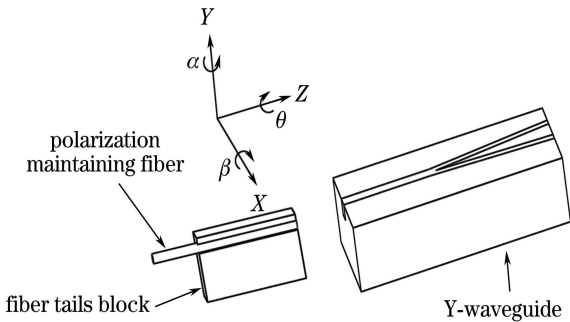


图 1 光纤-Y 型波导输入端对准耦合模型

Fig. 1 Alignment coupling model of fiber and input end of Y-waveguide

### 2.2 模场仿真

类比激光与光纤的耦合理论<sup>[12]</sup>,光纤与波导的耦合效率可以通过计算两者端面之间的任一平面的模场重叠区域积分得到,即

$$\eta = \frac{\left| \int_A \varphi_F \varphi_W^* dA \right|^2}{\int_A \varphi_F \varphi_F^* dA \cdot \int_A \varphi_W \varphi_W^* dA}, \quad (1)$$

式中: $\varphi_F$  和  $\varphi_W$  分别为光纤和波导的模场分布; $A$  为两者模场在光轴横截面的重叠区域面积。将单模光纤出射模场视为高斯光束,假设矩形波导模场在水平和垂直方向都是对称的高斯型分布,可以得到不同对准偏差下的耦合损耗理论解,如文献[12]所示。但是实际的光纤和波导的模场分布只是类高斯型分布,同时 Y 型波导的模场分布在垂直方向并不对称,所以首先使用 COMSOL 仿真得出不同对准偏差下光纤和波导的模场分布,然后通过模场图像求重叠积分来计算耦合损耗。

对保偏光纤和 Y 型波导通道进行模场仿真,仿真参数如下:波长  $\lambda = 1.55, 0.65 \mu\text{m}$ ,单模光纤纤芯半径  $D = 4.1 \mu\text{m}$ ,包层和纤芯折射率分别为 1.4628 和 1.4682;波导通道截面长×宽为  $6 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ ,铌酸锂基底和质子交换通道折射率分别为 2.21 和 2.23,上层为空气。COMSOL 进行网格划分时,设定光纤纤芯区域及波导通道区域最大单元为  $0.02 \mu\text{m}$ ,最小单元为  $0.0016 \mu\text{m}$ ,网格划分极为细密,保证输出场分布密度足够高。

仿真结果如图 2 所示。传播光波长为 1550 nm 时,单模光纤的模场为圆对称的类高斯光束;而矩形波导模场是类椭圆形,在水平和垂直方向分别为类高斯型分布,垂直方向不对称。这是由矩形波导的长宽比不为 1,且上下覆盖层物质分别为空气和铌酸锂晶体(两者的折射率不同)所造成的。波导模场的最大值位置为重心位置,它与波导的几何中心位置在垂直方向上并不重合。1550 nm 光模场的重心位置向下偏移  $0.39 \mu\text{m}$ 。在光纤中,650 nm 光模场分布与 1550 nm 光模场形状相近,模场直径相比前者较小。在波导通道中,相比于 1550 nm 光模场,650 nm 光模场更趋于矩形,其重心位置向下偏移  $0.13 \mu\text{m}$ 。

改变光纤与波导的相对位姿,分别对不同偏差下光纤和波导的模场分布进行仿真,导出模场分布数据,在 MATLAB 中根据(1)式计算两者的重叠区域积分,即可得到光纤和波导的耦合效率  $P_i$ 。

## 3 实验方案

目前国内外基于输出光功率反馈主动对准的光纤波导耦合方法,普遍采用光功率计作为输出光的检测装置。在 Y 型波导后端接光功率计进行输出

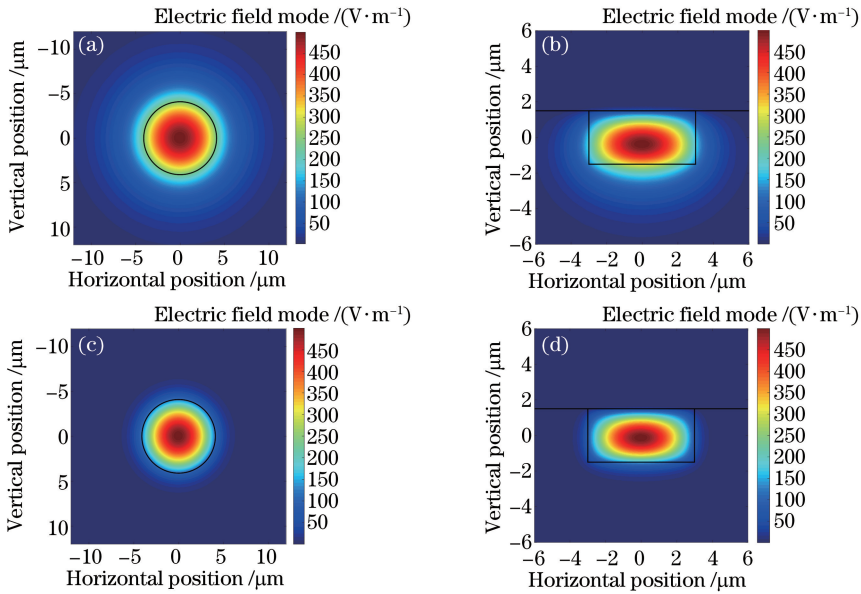


图 2 模场仿真图。(a) 光纤, 1550 nm; (b) 波导, 1550 nm; (c) 光纤, 650 nm; (d) 波导, 650 nm  
 Fig. 2 Simulation diagrams of mode field. (a) Fiber, 1550 nm; (b) waveguide, 1550 nm; (c) fiber, 650 nm; (d) waveguide, 650 nm

光强检测, 该过程需要涉及输出端与带尾纤衬块的耦合问题, 这在现阶段实验设计中暂不考虑。而且该实验方案所需仪器昂贵, 不易搭建。因此提出一种基于数字图像的输出光强检测方法。

### 3.1 实验平台

实验装置主体如图 3 所示, 使用两组显微镜——CMOS 相机分别对耦合点位置和 Y 型波导器件输出端进行显微成像, 传输到计算机。计算机分析数字图像, 计算偏差, 并发送指令到的 6 维 (6D) 电动位移台来控制带尾纤衬块在各自自由度的移动, 快速实现光纤与波导耦合的初通光及最佳耦合点的搜索。整套实验设备具有较高的集成性和实时性。由于 CMOS 相机图像传感器的探测波长范围有限, 选用 650 nm 波长的激光器作为对准耦合的激励光源, 而实际的单模光纤和 Y 型波导器件的单模传输波长为 1550 nm。分别对 1550 nm 波长光与 650 nm 波长光在光纤和波导中的模场分布进行仿真, 结果显示, 650 nm 波长光同样能够在此参数下的光纤和波导中稳定传输基模, 且模场分布与 1550 nm 波长光模场分布相近。

### 3.2 输出光强检测

使用垂直于耦合点放置的 CMOS 相机对耦合点侧面进行显微成像, 实验采集图像如图 4(a) 所示, 通过灰度化处理、阈值分割、边缘提取、直线拟合等操作提取带尾纤衬块与 Y 型波导的特征直线, 分析各自自由度的偏差并控制位移台移动消除偏差, 实

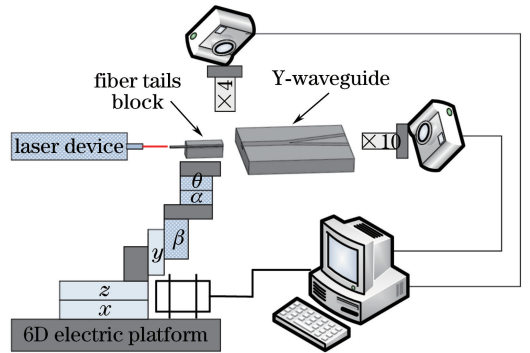


图 3 光纤-波导对准耦合实验平台示意图  
 Fig. 3 Schematic of experimental platform of alignment coupling between fiber and waveguide

现初通光。Y 型波导中耦合进光后, 后端面出现两个明亮的光点, 如图 4(b) 所示。程序控制 CMOS 相机自动调节曝光时间, 将这两个输出光点的最大光强控制在合适的范围内, 防止图像过度曝光导致光强检测有误。在降低输出点最大光强的同时, 可消除图像中其他干扰光, 使图像中只存在两个输出光点, 结果如图 4(c) 所示。

自动调节曝光时间后, 对采集图像中任一光点放大观察可以发现, 输出光点都有类似于仿真模场的形状和光强分布。提取该光点每个像素处的红色通道值, 记为  $p_{i,j}$ , 本实验采用 650 nm 红光光源, 因此, 只提取红色通道值可避免其他色光的干扰。分别作水平和垂直方向红色通道值关于像素点位置的扫描曲线, 如图 5(a) 和 5(b) 所示, 可看到输出光点

在水平和垂直方向上都呈类高斯型,可以认为,图像中所采集的光点即为输出点的基模。统计加和该输

出点每个像素点的红色通道值,得到该端面的输出光强  $P = \sum_{i,j} p_{i,j}$ 。

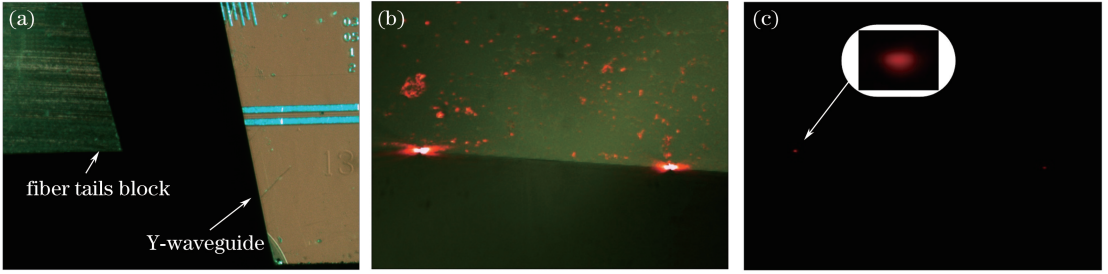


图 4 实验采集图像。(a)耦合点侧面图像;(b) Y 型波导输出光点图像;(c)调节光强后输出图像  
Fig. 4 Experimental images. (a) Side image of coupling point; (b) output image of Y-waveguide; (c) output image after adjusting light intensity

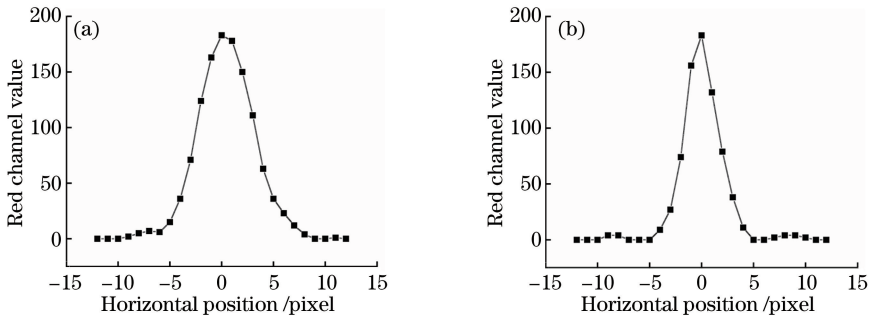


图 5 输出光点红色通道值分布图。(a)横向;(b)纵向

Fig. 5 Distributions of red channel values of output point. (a) Horizontal position; (b) vertical position

## 4 结果分析与讨论

根据前两节所述仿真和实验的模型及方案设计,分别制作 5 个自由度下耦合损耗关于对准偏差的关系曲线。本课题组主要研究耦合损耗关于偏移量的变化情况,因此,所采用数据为相对耦合损耗

$$\rho_i = -10\lg(P_i/P_{\max}), \quad (2)$$

式中: $P_i$  为某个点处仿真得到的耦合效率或实验所

得的输出光功率; $P_{\max}$  为该扫描范围内仿真或实验结果的最大值。本研究所述的耦合损耗均指此相对耦合损耗。

### 4.1 横向位错、纵向间距影响分析

图 6 为耦合损耗关于横向位错  $X$  和  $Y$  的变化曲线,可见,650 nm 仿真结果和实验结果吻合较好,变化趋势基本一致,表现出良好的单峰性。随着偏差距离的增大,耦合损耗呈指数型增加。横向位错

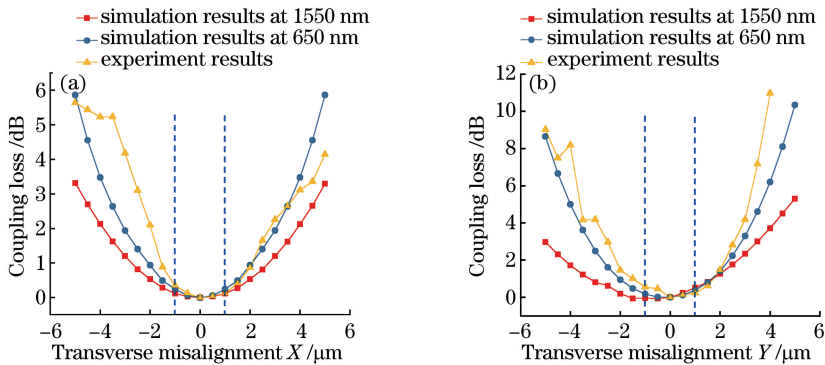


图 6 耦合损耗与横向位错关系曲线。(a)横向位错  $X$ ;(b)横向位错  $Y$

Fig. 6 Relation curves between coupling loss and transverse misalignment. (a) Transverse misalignment  $X$ ; (b) transverse misalignment  $Y$



X 的仿真曲线中心对称,而横向位错 Y 的仿真曲线不对称,且耦合损耗最低点偏离几何中心位置,实验曲线有所波动但表现出相同的特征。这是由 Y 型波导通道的上下层物质折射率不同,及模场分布不对称造成的。

实验位移台各轴向之间存在一定的串扰,因此随着偏差距离的增大,实验曲线逐渐脱离仿真曲线,但在一定的偏差范围内,两者的耦合损耗差别较小。横向位错 X 偏差距离范围为  $-1 \sim 1 \mu\text{m}$  时,仿真和实验所得耦合损耗都低于 0.5 dB 且两者相差不超过 0.1 dB。横向位错 Y 偏差距离范围为  $-1 \sim 1 \mu\text{m}$  时,仿真耦合损耗低于 0.5 dB,实验结果在  $1 \mu\text{m}$  处低于 0.5 dB,在  $-1 \mu\text{m}$  处为 0.55 dB。

在图 6(b)中,耦合损耗最小点位置并不重合,这是由两种波长的波导模场重心位置的偏移量不同导致的。两者重心偏差约为  $0.26 \mu\text{m}$ ,仿真结果显示,  $0.26 \mu\text{m}$  的垂直偏移所带来的损耗远小于 0.1 dB。在实际对准耦合操作中,可以在搜索到最大耦合位置之后再下移  $0.26 \mu\text{m}$  进行补偿。

图 7 为耦合损耗关于纵向间距 Z 的变化曲线,仿真与实验曲线都表现出随着间距 Z 增大,耦合损耗增大的趋势,但增长速度较慢。纵向间距为  $20 \mu\text{m}$  时,仿真所得耦合损耗不到 0.1 dB,实验结果为 0.5 dB,可见纵向间距 Z 对于耦合损耗的影响远小于横向位错。当 Z 增大时,实验曲线增长越来越快,这是由实验平台的串扰导致的。

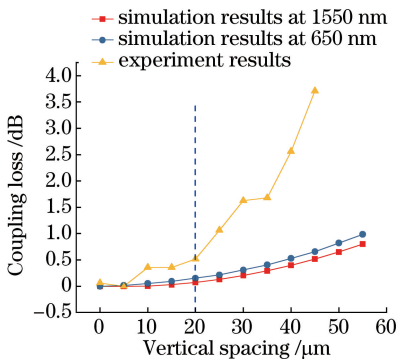


图 7 耦合损耗关于纵向间距 Z 关系曲线  
Fig. 7 Relation curves between coupling loss and vertical spacing Z

#### 4.2 角度偏转影响分析

本课题组着重研究角度旋转对耦合效率的影响,存在偏转角  $\alpha$  时光纤与 Y 型波导输入端的对准耦合模型如图 8 所示。在大部分文献中,当光纤出现角度偏转时,默认以光纤端面为旋转中心,旋转臂长为纵向间距 Z。但在实际操作中,很难将光纤顶

端恰好与旋转台的中心重合,且偏移量一般大于微米量级。实际的光纤旋转中心到波导端面的距离称之为旋转臂,长度记为 L。图 9 为耦合损耗关于偏转角  $\alpha$  和俯仰角  $\beta$  的变化曲线,设定  $L = 2000 \mu\text{m}$  时,仿真结果与实验结果吻合较好。

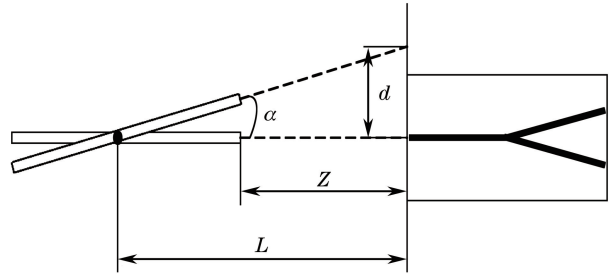


图 8 偏转角  $\alpha$  下光纤与 Y 型波导对准耦合模型  
Fig. 8 Alignment coupling model of fiber and Y-waveguide under deflection angle  $\alpha$

如图 9 所示,当光纤发生角度偏转时,由于旋转臂的存在,产生一个横向的附加位移 d,偏转角  $\alpha$  较小时,  $\tan \alpha \approx \alpha$ ,则附加位移  $d = L\alpha$ 。由文献[12]中(3)~(5)式可以推算,当 L 较大时,水平位移 d 所贡献的耦合损耗远大于偏转角  $\alpha$  所贡献的耦合损耗。为了进一步研究这两者之间的关系,分别作耦合损耗关于单纯角度的变化曲线,和设定 L 为不同值时耦合损耗关于偏转角的变化曲线,如图 10 所示。

图 10(a)和 10(b)为设定  $L = 0 \mu\text{m}$  时的关系曲线,不考虑附加位移的影响,保证偏转角或俯仰角变化时光纤和波导的模场中心始终重合(这种情况在现实中是不存在的)。可以看到,在一定范围内单纯的角度变化所引起的耦合损耗极小,当偏转角或俯仰角偏移小于  $20^\circ$  时,耦合损耗低于 0.1 dB。图 10(a)中,偏转角约等于  $\pm 15^\circ$  时,出现了耦合损耗的极小值,这是由于随着角度变化,光纤模场逐渐拉长为椭圆形,与波导模场匹配度提高。图 10(c)为设定一系列不同旋转臂 L 时耦合损耗关于偏转角的关系曲线。图 10(c)中,耦合损耗的增长速度,随着旋转臂 L 的增加而急剧变大。当偏转角为  $0.25^\circ$  时,  $2000 \mu\text{m}$  旋转臂下的耦合损耗已超过 8 dB,而  $100 \mu\text{m}$  旋转臂下的耦合损耗仍接近于 0 dB。因此可以认为,在一定角度范围内,角度偏转对耦合效率的影响主要是由附加横向位错引起的,单纯的角度变化对模场耦合影响可忽略不计。对俯仰角  $\beta$  进行仿真也得到类似的结论。有文献称角度偏差会影响到横向位错的耦合容差限<sup>[4]</sup>,但通过文献中的数据可得,当同时存在  $10^\circ$  的偏转角和俯仰

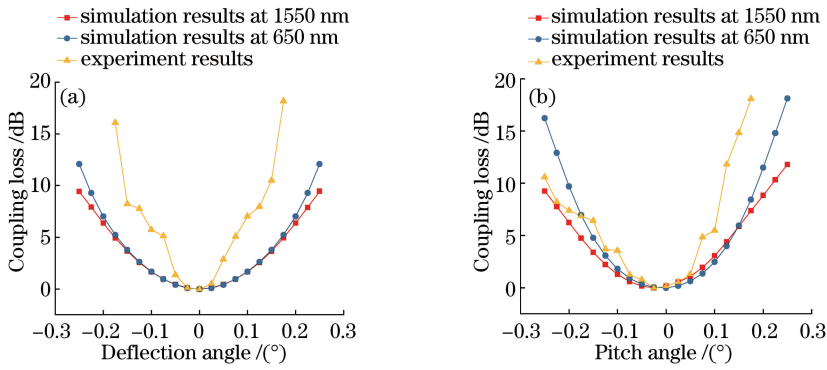


图 9 耦合损耗与角度偏转关系曲线。(a)偏转角  $\alpha$ ; (b)俯仰角  $\beta$

Fig. 9 Relation curves between coupling loss and angle deflection. (a) Deflection angle  $\alpha$ ; (b) pitch angle  $\beta$

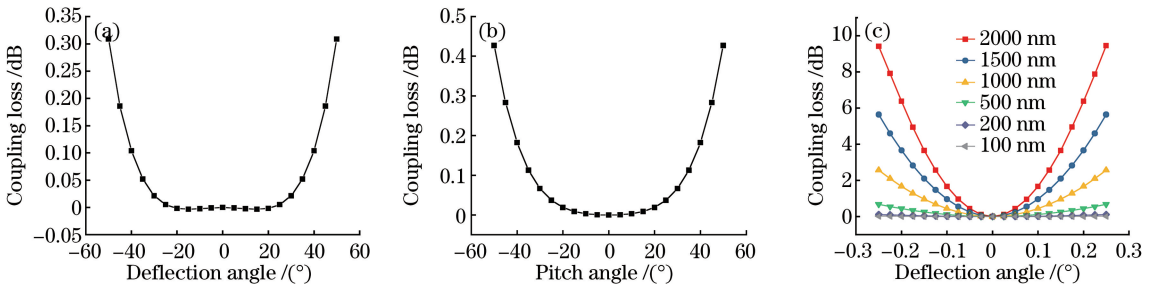


图 10 耦合损耗与角度偏转关系曲线。(a)偏转角  $\alpha$ ; (b)俯仰角  $\beta$ ;

(c)  $L=100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 \mu\text{m}$  时耦合损耗与偏转角  $\alpha$  的关系

Fig. 10 Relation curves between coupling loss and angle deflection. (a) Deflection angle  $\alpha$ ; (b) pitch angle  $\beta$ ;

(c) deflection angle  $\alpha$  with  $L=100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 \mu\text{m}$

角偏差时, 0.3 dB 的耦合损耗容差范围缩小不到  $0.1 \mu\text{m}$ , 可见角度偏差的存在对横向位错的对准耦合影响并不大。

由图 6、图 7 及图 9 可见, 650 nm 波长光仿真结果与 1550 nm 波长光仿真结果能较好地符合, 变化趋势基本吻合。虽然因为两者模场直径不同, 导致耦合损耗曲线增长速度有所差别, 但在较小的偏差范围内耦合损耗差别并不大。同时实验结果与 650 nm 波长光仿真结果能较好地吻合。因此, 在实验中采用 650 nm 激光作为激励光源进行对准耦合是可行的, 本研究所提出的基于数字图像的实验方案也是可行的。

### 4.3 5 个自由度的综合分析

总结以上分析内容, 可以认为, 在影响耦合损耗的这 5 个自由度中, 横向位错  $X$  和  $Y$  对耦合损耗的影响最大, 纵向间距  $Z$  次之, 而角度偏转  $\alpha$  和  $\beta$  引起的耦合损耗主要是由其附加横向位移带来的, 单纯的角度偏差对耦合效率的影响极小。因此, 在实际的光纤波导对准耦合过程中, 可以首先借助数字图像处理或平台尺寸控制的方法将两种角度偏差控制在较小的范围内, 然后缩小纵向间距至  $10 \mu\text{m}$  左

右(需要留出一定空间供横向对准及滴加胶液时使用), 最后基于 Y 型波导末端图像反馈的输出光强进行横向位错  $X$  和  $Y$  的精确对准, 将偏差控制在预定耦合损耗的容差范围内。该对准思路, 将 5 维对准的过程分为三个部分, 有效降低了自动搜索过程的复杂度, 同时可有效避免耦合搜索陷入局部最优。

## 5 结 论

本研究提出的基于数字图像的输出光强检测方法及使用 650 nm 波长光进行对准的实验方案可行, 实验结果与仿真结果能较好地吻合; 在光纤和波导对准过程中, 保偏光纤角度旋转所带来的耦合损耗主要由附加横向位移引起, 单纯的角度变化对耦合损耗的影响很小; 在光纤和波导对准过程中, 主要考虑横向位错与纵向间距的影响, 其中横向位错对耦合损耗的影响较大, 纵向间距对耦合损耗的影响较小。当对准偏差耦合损耗为 0.5 dB 时, 横向位错和纵向间距的容差范围分别为  $-1 \sim 1 \mu\text{m}$ ,  $-20 \sim 20 \mu\text{m}$ 。

本研究所做的工作, 包括基于数字图像的实验方案的设计及对各自由度的耦合损耗影响分析, 可

用来指导设计保偏光纤与 Y 型波导输入端自动对准耦合系统,实现快速、高精度的自动耦合。这也是本课题组接下来将要的工作。

## 参 考 文 献

- [1] Wang J L, Wang W, Xu Y X. Influence of index of integrated optic circuit on FOG performance [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(4): 52-57.  
王军龙, 王巍, 徐宇新. 集成光路技术指标对光纤陀螺性能的影响 [J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(4): 52-57.
- [2] Hu W S, Zeng Q J. Misalignment induced excess loss in gradient index rod lens collimating systems [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(3): 221-224.  
胡卫生, 曾庆济. 自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析 [J]. 中国激光, 1999, 26(3): 221-224.
- [3] Tang Z, Zhang R, Shi F G. Effects of angular misalignments on fiber-optic alignment automation [J]. Optics Communications, 2001, 196: 173-180.
- [4] Tseng C Y, Wang J P. Automation of multi-degree-of-freedom fiber-optic alignment using a modified simplex method [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(10): 1109-1119.
- [5] Mizukami M, Hirano M, Shinjo K. Simultaneous alignment of multiple optical axes in a multistage optical system by using Hamiltonian algorithm [C] // 1996 Proceedings 46th Electronic Components and Technology Conference, May 28-31, 1996, Orlando, FL, USA. New York: IEEE, 2002: 1284-1288.
- [6] Sha H J, Chen B X, Chen L, *et al.* Research of fiber-waveguide automatic alignment system [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1773-1777.  
沙慧军, 陈抱雪, 陈林, 等. 光波导-光纤耦合对接自动化系统的研究 [J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1773-1777.
- [7] Zhang R, Shi F G. A novel algorithm for fiber-optic alignment automation [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2004, 27(1): 173-178.
- [8] Tian Z J, Cai W F, Wu H, *et al.* Research on direct coupling of PM fiber coil and Y-branch LiNbO<sub>3</sub> waveguide chip [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(1): 57-60.  
田自君, 蔡文峰, 吴昊, 等. 保偏光纤环与 Y 波导芯片直接耦合技术研究 [J]. 半导体光电, 2017, 38(1): 57-60.
- [9] Lü W, Zheng Y, Wang L J, *et al.* High-precision line detection of optical waveguide devices edge [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(7): 1734-1740.  
吕文, 郑煜, 王丽军, 等. 光波导器件边缘的高精度直线检测 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(7): 1734-1740.
- [10] Zheng Y, Duan J A. Coupling analysis between planar optical waveguide and fiber array [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(3): 681-686.  
郑煜, 段吉安. 平面光波导与阵列光纤耦合分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(3): 681-686.
- [11] Wang L A, Su C D. Tolerance analysis of aligning an astigmatic laser diode with a single-mode optical fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(12): 2757-2762.
- [12] Guo F Y, Li L H, Wang M H. Gaussian approximation for mode field distribution of dielectric planar waveguide TE<sub>0</sub> mode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 235-239.  
郭福源, 李连煌, 王明华. 介质平面光波导 TE<sub>0</sub> 模模场分布的高斯近似 [J]. 中国激光, 2008, 35(2): 235-239.
- [13] Wen Z L, Jin G L, Ying Z S, *et al.* The influence of 5-dimension butting error in optic fiber-waveguide-fiber on coupling loss [J]. Opto-Electronic Engineering, 2000, 27(5): 37-39.  
闻震利, 金国良, 应再生, 等. 光纤-波导五维对接误差对耦合损耗的影响 [J]. 光电工程, 2000, 27(5): 37-39.
- [14] Xu J Y, Li Q, Wu X F, *et al.* Research on end fire coupling between single-mode optical fiber and single-mode planar waveguide [J]. Chinese Journal of Lasers, 1983, 10(10): 719-722.  
徐敬舆, 李劬, 吴旭峰, 等. 单模光纤与单模平面波导端面激励耦合的研究 [J]. 中国激光, 1983, 10(10): 719-722.
- [15] Qian C J, Xie X, Yang J N, *et al.* Coupling of two-dimensional slab photonic crystal micro-cavities and waveguides [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 030001.  
钱琛江, 谢昕, 杨静男, 等. 二维平板光子晶体微腔与波导的耦合 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030001.
- [16] Liao H Q, Luo R Y, Deng S, *et al.* Characteristics of light source based on dual polarization fiber optic gyroscope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505009.  
廖恢齐, 罗荣亚, 邓圣, 等. 双偏振光纤陀螺光源特性研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505009.