

文章编号:1004-4213(2011)11-1636-5

外应力对 Y 波导器件尾纤消光比的影响

刘福民,黄韬,李瑞龙,郑国康

(北京航天时代光电科技有限公司,北京 100094)

摘 要:本文研究了外应力对 Y 波导器件尾纤消光比及其温度稳定性的影响机理.在对保偏光纤固定部分进行应力分析的基础上,研究了外应力的方向、大小、方向对于光纤应力双折射及尾纤消光比的影响,并分析了消光比的全温稳定性.结果表明,外应力是影响消光比常温性能及全温稳定性的主要因素.当外应力的方向与光纤固有应力双折射的主轴不重合时,尾纤最大消光比会低于保偏光纤的固有消光比,并且耦合后波导芯片与光纤慢轴之间对轴失准.当温度变化时,外应力的变化将导致消光比随温度的波动.当外应力沿着保偏光纤固有双折射主轴方向时,能够确保尾纤在耦合过程中实现最大的消光比,并保证波导芯片偏振方向与光纤慢轴的严格对准,此时尾纤消光比具有最佳的温度稳定性.对 V 型槽和 U 型槽光纤固定块进行了尾纤消光比性能及其温度稳定性的比较分析,试验验证表明,V 型槽方案相对于难以保证外应力方向与光纤慢轴重合的 U 型槽固定块设计方案而言,可以有效改善消光比性能及其全温温度稳定性.

关键词:Y 波导器件;消光比;应力双折射

中图分类号:TN265

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114011.1636

0 引言

Y 波导器件是闭环干涉式光纤陀螺的关键元器件,它集成了光纤陀螺所需的分束/合束、偏振和相位调制功能,并通过保偏尾纤与光纤耦合器、光纤环相连,构成光纤陀螺光路.Y 波导器件的尾纤消光比(尾纤偏振串音)反映了器件综合的偏振性能,其大小直接影响光纤陀螺中的相位误差^[1],其稳定性也直接关系到光纤陀螺的零偏稳定性^[2],因而是一个非常非常重要的指标.

文献[2]中分析了 Y 波导器件尾纤消光比的影响因素,认为器件尾纤消光比取决于保偏光纤双折射主轴相对器件芯片偏振主轴的对轴误差,未讨论外应力对消光比的影响.然而工程实践表明,对轴误差可以通过保偏光纤定轴技术^[3-4]以及光纤-波导耦合过程中的信号实时反馈^[5]实现精确控制.器件尾纤所受外应力能够影响光纤的双折射,它对尾纤消光比及其温度稳定性的影响不容忽视.关于保偏光纤所受外应力对双折射影响的研究已有报道^[6-7]并在保偏光纤主轴的识别中有所应用^[6,8],但关于外应力对 Y 波导器件尾纤消光比影响的研究尚未见报道.本文从理论上分析了外应力对 Y 波导器件尾纤消光比及其温度稳定性的影响,给出外应力大小及方向与器件尾纤消光比之间的关系式,对两种方

案的光纤固定块进行了消光比稳定性分析,并给出试验验证结果.其结果对于提高 Y 波导器件的综合性能指标及环境适应性具有积极的意义.

1 波导-尾纤耦合工艺简介

在 Y 波导器件中,保偏尾纤的慢轴需要与铌酸锂波导芯片的偏振方向相对准,以确保最大的消光比.经过定轴的保偏尾纤用胶固定在固定块表面的凹槽内,然后光纤连同固定块一起被磨抛成特定的角度,通常为 15°,其目的是减少背向散射对陀螺光路的影响.带光纤固定块的尾纤如图 1.

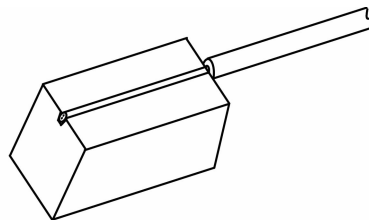


图 1 固定后的尾纤示意图

Fig. 1 Fiber fixed on a block

带固定块的尾纤在与波导芯片耦合连接时,首先在芯片中通入超辐射二极管(Super Luminescent Diode, SLD)宽谱光源,然后微调光纤的位置使从尾纤输出的光功率信号最大,同时微调光纤沿其轴向的旋转,使从尾纤末端测到的消光比(绝对值)最大.当光功率信号和消光比均达到最大时,则对光纤和

芯片进行点胶、固化,完成波导与尾纤的耦合。

2 保偏尾纤偏振性能分析

2.1 保偏光纤应力分析

在无外应力的情况下,保偏光纤的慢轴、快轴方向的折射率分别为 n_x 、 n_y ,则其固有双折射为^[9]

$$B_i = n_x - n_y = \lambda / L_B = \frac{n^3}{2E} (1 + \nu) (p_{12} - p_{11}) T_i \quad (1)$$

式中 n 为光纤纤芯的折射率, λ 、 L_B 分别为光波长及在该波长下光纤的拍长; $p_{12} = 0.27$, $p_{11} = 0.121$, 是熔融石英的弹光系数, $E = 7 \times 10^{10}$ Pa, 是石英的杨氏模量; $\nu = 0.16$ 是石英的泊松比; T_i 为保偏光纤固有的内应力, 对于 $1.3 \mu\text{m}$ 波长下拍长为 3 mm 的保偏光纤, 由式(1)可知, $T_i = 10.5 \times 10^7$ Pa。

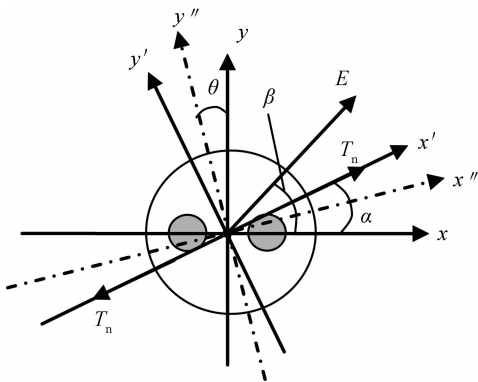


图 2 光纤外应力对双折射主轴的影响
Fig. 2 Effects of external stress on birefringent axes

在实际应用中,由于熔融石英与胶粘剂之间热膨胀系数之间的差异,固定后的保偏尾纤将受到一个横向外力 T_n 的作用,如图 2 所示,应力 T_n 与光纤慢轴所在的 x 轴方向的夹角为 α ,则应力 T_n 在光纤上产生外应力双折射 B_e ^[9]

$$B_e = \Delta n' = n'_x - n'_y = \frac{n^3}{2E} (1 + \nu) (p_{12} - p_{11}) T_n \quad (2)$$

式中 n'_x 和 n'_y 分别为在应力 T_n 作用下产生的两个光轴方向的折射率,在外应力作用下产生的双折射将改变光纤内双折射的大小和快、慢轴的方向,光纤内总双折射 B 的大小为^[6]

$$B = \sqrt{B_i^2 + B_e^2 + 2B_i B_e \cos(2\alpha)} \quad (3)$$

而总应力双折射 B 的主轴 x'' 、 y'' 相对于保偏光纤的固有应力双折射 B_i 的主轴 x 、 y 的夹角 θ 可以表示为^[6]

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{B_e \sin 2\alpha}{B_i + B_e \cos 2\alpha} \right) \quad (4)$$

图 3 给出了不同外应力水平下,总应力双折射偏转角度随外应力方向的变化情况,从图中可以看出,外应力方向在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内,应力双折射主轴偏转角出现极大值。在相同的作用方向上,应力越

大,总应力双折射快、慢轴相对光纤固有快慢轴的偏转角越大,当外应力作用方向沿着光纤的固有应力双折射快慢轴时,即 $\alpha = 0^\circ$ 或 $\alpha = 90^\circ$ 时,总应力双折射的快慢轴偏转角为 0° 。表明此时外应力只改变应力双折射的大小,不改变其快、慢轴的方向。

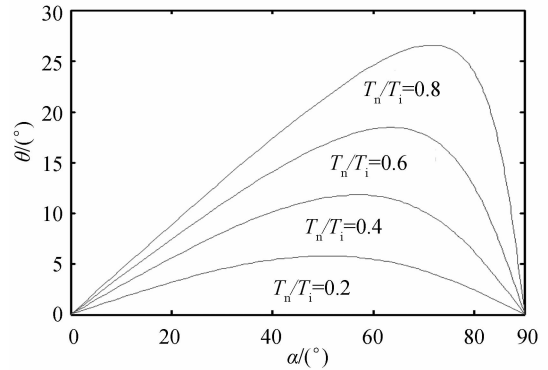


图 3 总双折射旋转角度与外应力方向关系曲线
Fig. 3 Azimuth angle of the total birefringent axes versus stress direction

2.2 外应力对尾纤消光比的影响

由第 1 节可知,保偏尾纤与 Y 波导芯片偏振轴的对准是通过监测消光比信号最大来实现的。在外应力存在的情况下,其产生的附加应力双折射将使双折射快慢轴发生旋转,两个偏振态之间产生交叉耦合,外应力作用的效果等效于在波导芯片与保偏尾纤之间插入了一个线双折射相位延迟片,将会影响尾纤消光比的测试。

假设从 Y 波导芯片出射进入光纤的光信号的电场 E 与光纤慢轴夹角为 β (如图 2),则耦合到线双折射相位延迟片的两个光轴的电场为

$$E_x = E \cos(\beta - \theta) \quad (5)$$

$$E_y = E \sin(\beta - \theta) \quad (6)$$

两个垂直偏振的光信号 E_x 、 E_y 经过应力作用区后,将产生一个相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi BL}{\lambda} \quad (7)$$

式中 L 为应力作用长度,并假设外应力 T_n 在光纤固定长度范围内是均匀的。耦合进入自由光纤的慢轴和快轴中的光场为

$$E_x = E_x \cos \theta e^{-i\Delta\varphi} - E_y \sin \theta =$$

$$E \cos(\beta - \theta) \cos \theta e^{-i\Delta\varphi} - E \sin(\beta - \theta) \sin \theta \quad (8)$$

$$E_y = E_x \sin \theta e^{-i\Delta\varphi} + E_y \cos \theta =$$

$$E \cos(\beta - \theta) \sin \theta e^{-i\Delta\varphi} + E \sin(\beta - \theta) \cos \theta \quad (9)$$

考虑到尾纤的长度远大于光源的消偏长度,并且考虑到保偏光纤的固有消光比,保偏尾纤的消光比可以表示为

$$ER = 10 \log \left[\frac{|E_x|^2 (1 - \epsilon^2) + |E_y|^2 \epsilon^2}{|E_y|^2 (1 - \epsilon^2) + |E_x|^2 \epsilon^2} \right] \quad (10)$$

式中 ϵ 为尾纤全长度内振幅耦合比, 对于一段消光比为 40 dB 的保偏光纤, $\epsilon=0.01$. 将式(8)、(9)代入式(10)中可得

$$ER=10\log\left[\frac{(1-\epsilon^2)\cos^2\beta+\epsilon^2\sin^2\beta+\gamma(1-2\epsilon^2)}{(1-\epsilon^2)\sin^2\beta+\epsilon^2\cos^2\beta-\gamma(1-2\epsilon^2)}\right] \quad (11)$$

式中

$$\gamma=\frac{1}{2}\sin(2\beta-2\theta)\sin(2\theta)(1-\cos\Delta\varphi) \quad (12)$$

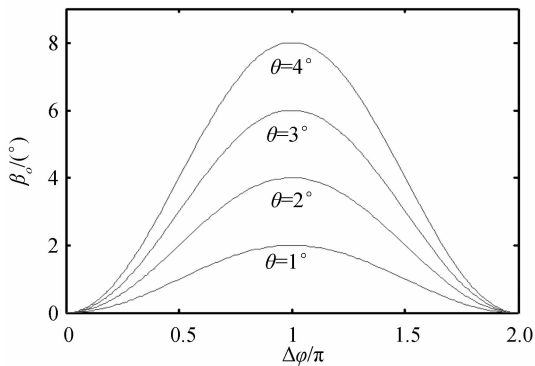


图4 最佳耦合角度偏差与相位差 $\Delta\varphi$ 关系曲线
Fig. 4 Optimal deviation angle versus $\Delta\varphi$

耦合过程中是通过监测消光比达到最大值来确定 β 的最佳值的, 图4给出了式(11)达到最大值时所对应的最佳角度 β_0 与相位差 $\Delta\varphi$ 的关系曲线. 从中可以看出, 一般情况下, β_0 可能为 $0\sim 2\theta$ 之间的任何值. β_0 所对应的最大消光比与相位差 $\Delta\varphi$ 的关系曲线见图5, 可以看出, 随着 θ 的增大, 消光比的最大值逐渐减小. 通常要求常温的尾纤消光比大于 30 dB, 从图5中可以看出, 即使是 $\theta=2^\circ$ 的情况下, 就已经在 $\Delta\varphi$ 的部分取值范围内达不到 30 dB.

分析可知, 一般情况下, 外应力的作用将降低尾纤消光比并导致保偏光纤的慢轴与芯片偏振方向无法对准. 在温度变化的情况下, 外应力 T_n 的大小和方向将随温度而变化. ANSYS 软件分析表明, 在低温下外应力的量级为 10^7 Pa 量级, 已经接近光纤固有内应力, 其影响是不容忽略的. 由式(3)、(4)、(7)可知, θ 和 $\Delta\varphi$ 必然会随外应力的变化而改变, 由式(11)可知, 尾纤消光比必然随温度而波动. 在 θ 和 $\Delta\varphi$ 的取值在特定范围内时, 尾纤消光比会降低至 20 dB 以下甚至更低, 这在光纤陀螺应用中是不允许的.

从图4和图5中可以看出, 随着 θ 的减小, 最佳角度 β_0 在逐渐减小, 同时消光比的最大值也会随之增大. 因此只要把 θ 值控制在足够小的范围内, 就能够保证在耦合过程中能够通过微调 β 来得到足够大的消光比, 并且耦合后芯片的偏振方向也尽可能靠近光纤的慢轴.

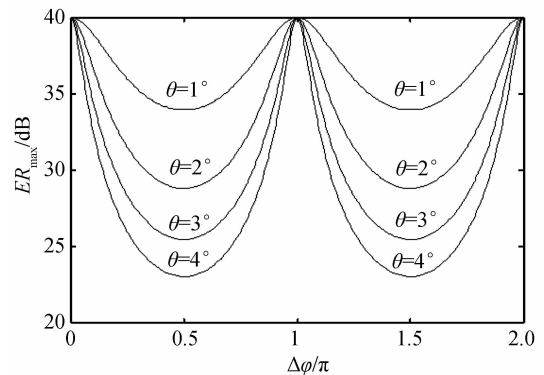


图5 最大消光比与相位差 $\Delta\varphi$ 关系曲线

Fig. 5 Maximum extinction ratio versus $\Delta\varphi$

3 试验验证

试验中采用两种不同结构的光纤固定块进行光纤定轴固定, 进行了尾纤消光比性能的对比试验. 其中一种结构为硅 V 型槽(如图6(a)), 另一种结构为硅 U 型槽(如图6(b)). 为便于对比, 两种槽型的结构尺寸应确保光纤埋入槽内的深度基本一致.

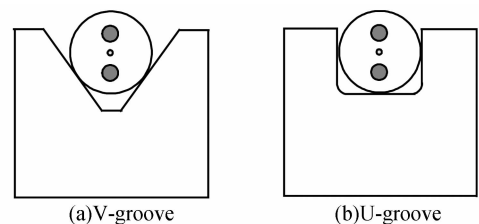


图6 V型槽和U型槽固定光纤示意

Fig. 6 Fixed PM fiber with V-groove and U-groove

硅 V 型槽通过湿法腐蚀工艺形成, 其宽度和深度应确保光纤的纤芯落入槽内, 并且光纤与槽的侧壁相切. 由于 V 型的特殊结构决定了光纤用胶粘在 V 型槽内时, 其纤芯位于槽的对称中心线上, 决定了光纤受到的应力是沿着其对称中心线的. 光纤的慢轴垂直于固定块上槽所在的面, 保证了外应力与光纤固有应力双折射轴的重合, 即 $\alpha=0$. 由式(4)可知, 受外界应力后的总应力双折射不发生旋转, $\theta=0$. 因此在耦合过程中可以通过调节光纤的轴向旋转, 得到最大消光比, 此时波导芯片的偏振方向与光纤慢轴方向一致, 即 $\beta=0$.

作为对比, 使用了 U 型槽来进行了保偏尾纤固定试验. U 型槽通过划切工艺形成, 由于在实际加工过程中槽的宽度会略宽于光纤直径, 因此很难保证光纤位置居中, 造成光纤偏离槽对称轴, 破坏了结构整体的对称性. 因此光纤受到的合应力, 不一定与光纤慢轴重合.

试验采用上述两种结构的光纤固定块对保偏光纤进行了固定并进行端面抛光, 将抛光后的尾纤与波导芯片进行耦合, 测试了其消光比及其在 -45°C

~+70 °C 温度范围内的波动情况. 采用 V 型槽结构固定块的尾纤消光比的典型数据见表 1. 采用 U 型槽的尾纤消光比典型测试数据如表 2. 从中可以看出, 使用 V 型槽的保偏尾纤的消光比性能普遍高于使用 U 型槽的保偏尾纤, 虽然使用 V 型槽的保偏尾纤的消光比也会随温度波动, 主要是由定轴时存在角度误差, 光纤慢轴与 V 型槽的对称轴不完全重合造成的.

表 1 采用 V 型槽的尾纤消光比典型测试数据

Table 1 Typical extinction ratio data in full temperature range for fibers fixed with V-groove

No.	25 °C	-45 °C	-25 °C	0 °C	50 °C	70 °C	40 °C	20 °C
1	32.4	30.7	31.5	32.0	33.2	33.2	33.9	32.5
2	31.8	28.6	29.3	31.0	30.7	29.3	31.1	31.0
3	32.3	34.7	35.3	34.2	29.9	29.4	31.5	32.9
4	32.1	28.1	27.8	30.1	34.4	33.6	34.2	33.2

表 2 采用 U 型槽的尾纤消光比典型测试数据

Table 2 Typical extinction ratio data in full temperature range for fibers fixed with U-groove

No.	25 °C	-45 °C	-25 °C	0 °C	50 °C	70 °C	40 °C	20 °C
1	20.5	13.3	14.9	17.1	28.1	33.2	23.0	19.0
2	23.6	16.5	17.9	20.1	32	34	25.8	21.3
3	28.3	18.8	20.5	23.3	30.1	29.8	28.6	26.3
4	32.8	15.8	17.8	19.9	27.2	30.4	24.5	22.6

为进一步说明使用 V 型槽相对于 U 型槽对消光比的改善, 统计了两种状态保偏尾纤全温最低消光比的分布情况, V 型槽和 U 型槽的统计样本分别为 200 根, 统计结果见图 7. 从中可见, 使用 V 型槽的尾纤全温最低消光比明显优于 U 型槽. 目前 V 型槽光纤固定块已经大量用于 Y 波导器件的批量生产中, 使器件筛选合格率得到大幅提高.

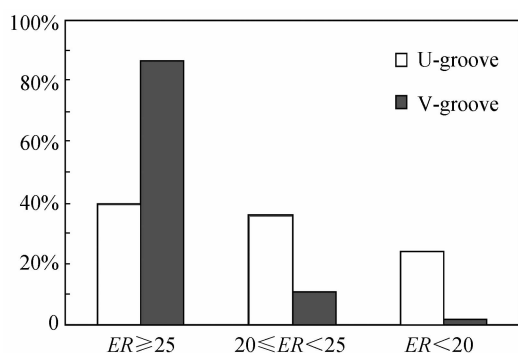


图 7 两种状态尾纤全温最低消光比分布比较

Fig. 7 Distribution of Minimum ER in full temperature range for PM fibers fixed with U-groove and V-groove

4 结论

本文研究了外应力对于 Y 波导集成光学器件

尾纤消光比的影响, 给出了器件常温消光比与外应力大小、方向之间的关系式, 并分析了消光比的温度稳定性. 当外应力沿着保偏光纤固有应力双折射的快慢轴时, 外应力对尾纤消光比没有影响. 通过采用两种不同结构固定块的尾纤消光比性能对比进行了试验验证. 结果表明, 采用 V 型固定槽可以最大限度保证外应力与光纤固有应力轴重合, 因而能够减小外应力对尾纤的影响, 能够有效提高器件尾纤的常温消光比及其温度稳定性.

参考文献

- [1] YANG Xue-li, WANG Xue-feng, ZHANG Wei, *et al.* Effect of the principal axes angle offsets on fiber optic gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7):1658-1661.
杨学礼, 王学峰, 张蔚, 等. 保偏光纤的对轴误差对光纤陀螺输出的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7):1658-1661.
- [2] WANG Jun-long, WANG Wei, XU Yu-xin. Influence of characteristics of integrated optic circuit on fiber optic gyro 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.
- [3] WANG Dong-yun, LIU Cheng, SHU Xiao-wu, *et al.* Accurate alignment of PM fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3):345-348.
王冬云, 刘承, 舒晓武, 等. 保偏光纤精确定位方法的研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(3):345-348.
- [4] ZHEN Zong-min, YANG Yuan-hong. On-line adjusting axes technology of polarization maintaining fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1060-1063.
甄宗民, 杨远洪. 保偏光纤在线定轴技术研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9):1060-1063.
- [5] XU Xiao-bin, YI Xiao-su, YANG De-wei. A method for alignment of proton-exchanged LiNbO₃ waveguide and polarization maintaining pigtail[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9):1852-1855.
徐小斌, 伊小素, 杨德伟. 一种质子交换铌酸锂波导与保偏光纤对轴方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9):1852-1855.
- [6] CARRARA S L A, KIM B Y, SHAW H J. Elasto-optic alignment of birefringent axes in polarization-holding optical fiber[J]. *Optics Letters*, 1986, **11**(7):470 - 472.
- [7] GUO Ning, QIN Fu-xiang, MENG Qing-you, *et al.* Analysis on stress birefringence of panda polarization-maintaining optical fiber with external force [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(5):38-41.
郭宁, 覃付祥, 孟庆友, 等. 外力作用下熊猫型保偏光纤应力双折射分析[J]. *光学与光电技术*, 2008, **6**(5):38-41.
- [8] GAO Hong-yu, CHEN Cai-he, CUI Yu-ming, *et al.* Locating the positions of the slow and fast birefringent axes by elasto-optic effect[J]. *Chines Journal of Sensors and Actuators*, 2005, **18**(1):184-187.
高洪宇, 陈才和, 崔宇明, 等. 光弹效应法测定保偏光纤快慢轴[J]. *传感技术学报*, 2005, **18**(1):184-187.
- [9] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010:186.

Effects of External Stress Applied to PM Fiber-pigtail on Extinction Ratio of a Y-branch Multi-functional Integrated Optical Device

LIU Fu-min, HUANG Tao, LI Rui-long, ZHENG Guo-kang

(Beijing Aerospace Times Optical-electronic Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: Effects of external stress applied to polarization-maintaining (PM) fiber pigtail of a Y-branch multi-functional integrated optical device on extinction ratio as well as its temperature stability are researched. Based on the analysis of stress on the fiber, expression of extinction ratio as a function of the magnitude and direction of the stress is deduced, and the temperature stability of extinction ratio is discussed. Results show that the external stress is the main factor which affects extinction ratio and its stability. When the direction of stress is at an angle from the birefringent axes of a free PM fiber, the maximum extinction ratio achieves during fiber-chip coupling is smaller than that of a free fiber. As a result, the polarizing direction of the chip and the slow axis of the fiber will be mis-aligned. The change of the stress in magnitude and direction caused by temperature results in the fluctuation of the extinction ratio. While the stress is along the birefringent axes of the fiber, it has no effect on extinction ratio, and the polarizing direction of the chip and the slow axis of the fiber can be precisely aligned. Fiber pigtails fixed with a V-groove and with a U-groove are analyzed in comparison, and test results show that a fixing block with a V-groove can improve extinction ratio and its stability effectively.

Key words: Y-branch multi-functional integrated optical device; Extinction ratio; Stress-induced birefringence