

# 基于偏振串扰分析仪的 LiNbO<sub>3</sub> 集成 Y 波导的测试方法

邹欢欢<sup>1,2</sup>, 姚晓天<sup>1,3</sup>, 于超<sup>2,3</sup>, 朱益清<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>江南大学理学院, 江苏 无锡 214122;

<sup>2</sup>苏州光环科技有限公司, 江苏 苏州 215123;

<sup>3</sup>河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

**摘要** 结合分布式偏振串扰分析仪, 利用琼斯矩阵对 LiNbO<sub>3</sub> 集成 Y 波导进行理论建模分析, 并且得到了实验验证。实验证明, 偏振串扰分析仪能评估出 Y 波导的整体消光比, 且能够测试出 Y 波导内部的一个缺陷的串扰值, 弥补了强度型消光比测试仪的不足。最后用单偏振光纤验证了 Y 波导测试结果的合理性。分布式偏振串扰分析仪在实际应用中对筛选性能更加优异的 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学芯片有着重要意义。

**关键词** 集成光学; 光纤通信; 分布式偏振串扰测试; LiNbO<sub>3</sub> 集成 Y 波导; 光纤陀螺; 单偏振光纤

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0613001

## Test Method for LiNbO<sub>3</sub> Integrated Y-Waveguide Based on Polarization Crosstalk Analyzer

Zou Huanhuan<sup>1,2</sup>, Yao Xiaotian<sup>1,3</sup>, Yu Chao<sup>2,3</sup>, Zhu Yiqing<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

<sup>2</sup> Suzhou Optoring Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215123, China;

<sup>3</sup> College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China

**Abstract** In this paper, a theoretical modeling analysis of LiNbO<sub>3</sub> integrated Y-waveguide based on a distributed polarization crosstalk analyzer was conducted using the Jones matrix and experimentally verified. Results of experiments show that the polarization crosstalk analyzer can evaluate the overall extinction ratio of Y-waveguide and test the crosstalk value of a defect inside the Y-waveguide, which compensates for the deficiency of the intensity extinction ratio tester. Finally, the rationality of test results of the Y-waveguide was verified by single polarization fiber. The distributed polarization crosstalk analyzer has great significance for screening LiNbO<sub>3</sub> integrated optical chips with better performance in practical applications.

**Key words** integrated optics; optical fiber communications; distributed polarization crosstalk test; LiNbO<sub>3</sub> integrated Y-waveguide; fiber optic gyroscope; single polarized fiber

**OCIS codes** 130.3730; 060.2300; 120.3180; 060.2800

## 1 引 言

Y 波导作为光纤陀螺的重要器件之一, 具有分光、相位调制和偏振器的作用, 而 Y 波导的消光比是影响光纤陀螺精度的重要参数之一<sup>[1]</sup>。目前对于 Y 波导的制作已经有了较为成熟的工艺, 尤其在如何提高性能的方面, 但对于 Y 波导的偏振性能检测技术方面还有较大欠缺。目前发展较为成熟的检测方法是基于强度型的检测方法, 它根据测量出来的最大与最小光功率可以直接计算出 Y 波导的消光

比大小, 测试方法较为简单。其主要测试方法有日本科学家发明的起偏器 45°法、北京理工大学徐宏杰等发明的偏振控制器法、旋转波片法、消偏法等, 但这些方法易受外部因素的影响, 如光源的稳定性、光路的同轴性及准直性等<sup>[2]</sup>。同时由于一些器件本身受精度的限制, 对高消光比的 Y 波导测试具有一定的局限性, 且这些方法测试出来的消光比不仅包括 Y 波导的消光比, 还包括所用测试器件的消光比、Y 波导尾纤的偏振串扰、Y 波导内部的各种偏振串扰, 因此很难单独对 Y 波导芯片的偏振特性进行精确测

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2019-11-25; 录用日期: 2019-11-29

基金项目: 国际科技合作专项资助项目(2014DFA12930)

\* E-mail: zhuyq11@126.com

量,也难以准确判断 Y 波导内部是否有缺陷点。

用偏振串扰强度来评估 Y 波导的消光比具有极大的优越性<sup>[3]</sup>。但目前国内外对此方面的研究还较少,比较典型的研究有哈尔滨工程大学杨军等基于白光干涉法提出的光学相干域偏振测量仪系统<sup>[4]</sup>,该系统分为单通道和双通道<sup>[5]</sup>两种,单通道的系统每次只能检测 Y 波导的一支尾纤的偏振串扰,双通道的系统能同时检测两只 Y 波导尾纤的偏振串扰。该系统能检测出 Y 波导的消光比,以及波导与尾纤之间耦合点的串扰值大小,能够对 Y 波导本身的消光比进行评估,具有一定的优越性,但对 Y 波导内部缺陷情况未进行分析。

本文结合分布式偏振串扰分析仪,从测试原理上,利用琼斯矩阵对基于质子交换工艺由 LiNbO<sub>3</sub> 集成的 Y 波导<sup>[6]</sup>进行理论建模分析,并且得到了实验验证。实验结果证明,偏振串扰分析仪能评估出

Y 波导的整体消光比,且能够测试出 Y 波导内部的一个缺陷点的串扰值,弥补了强度型消光比测试仪的不足。最后利用与 Y 波导起偏特性相似的单偏振(PZ)光纤<sup>[7]</sup>,测试出 PZ 光纤存在的外部模拟缺陷点,验证了 Y 波导内部缺陷点测试结果的合理性。利用本文提出的方法,可以筛选出性能更加优异的 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学芯片,并且对 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学芯片制作工艺的提升有着重要意义。

## 2 测试原理

### 2.1 基于偏振串扰分析仪的测试光路分析

图 1 为偏振串扰分析仪测试波导的原理图,偏振串扰分析仪由低相干宽谱光源(SLD 光源)、0°起偏器、45°检偏器、耦合器、法拉第旋转镜、可变延迟线及信号解调输出系统组成<sup>[8]</sup>,其中 DUT 表示待测器件。

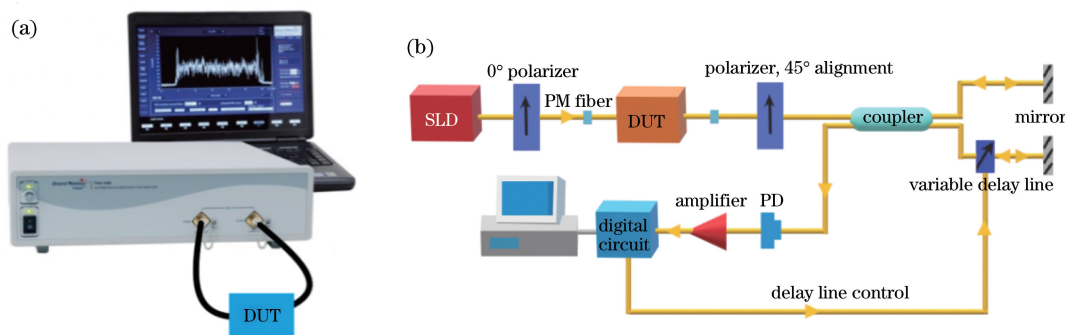


图 1 分布式偏振串扰分析仪。(a)装置图;(b)测试原理

Fig. 1 Distributed polarization crosstalk analyzer. (a) Set-up diagram; (b) test principle

分布式偏振串扰分析仪与光学相干域偏振测量仪系统的区别在于,光学相干域偏振测量仪系统采用的是马赫-曾德尔干涉仪,两臂之间采用了偏振控制器、环形器及自聚焦透镜,虽然该结构能够成倍增加两臂之间的光程差,抑制功率损耗的波动<sup>[9]</sup>,但其结构复杂,且测试出来的延时值会带入干涉仪本身的延迟量,当自聚焦透镜不能将光线完全准直时,也会引起测试误差;而偏振串扰分析仪系统内采用的是迈克耳孙干涉仪,干涉仪两臂的反射镜为法拉第旋转镜,由于法拉第旋转镜反射出来的光的偏振态会旋转 90°,因此该方式可以消除干涉仪中由每个臂单独引入的延迟量,使测试出来的延时值更加精确,且仅使用一个耦合器,结构简单。

用偏振串扰分析仪测试 Y 波导消光比的测试原理如图 2 所示。一束低相干宽谱光通过起偏角为 0°的起偏器耦合进入保偏光纤 PMF<sub>1</sub> 后,经过 Y 波导,从 PMF<sub>7</sub> 输出正交光束,再通过检偏角度为 45°

的检偏器,将两束相互垂直的光束进行合成,合成光束在一个轴上传输。实验方法为,在 B、C 之间接一段延长光纤,且只变化 B 点的熔接角度,其中 PMF<sub>1</sub> 和 PMF<sub>7</sub> 为系统内起偏器和检偏器尾纤,PMF<sub>2</sub> 和 PMF<sub>6</sub> 为保偏跳线,PMF<sub>4</sub> 和 PMF<sub>5</sub> 为 Y 波导尾纤,PMF<sub>3</sub> 为熔接的那段延长保偏光纤(为避免芯片消光对应的相干峰与测试用的光源的相干峰重合),A、G 点分别为偏振串扰分析仪的光输入和输出连接头所在位置,C、F 分别为保偏跳线与 Y 波导尾纤连接点, $\theta$  为 PMF<sub>2</sub> 和 PMF<sub>3</sub> 对轴角度。将 Y 波导通过保偏跳线与输入端尾纤 0°/90°熔接(若测试的 Y 波导的通光轴为慢轴则 0°熔接,若通光轴为快轴则 90°熔接),由于 Y 波导能抑制非通光轴上的光,经过 45°检偏器后两束光干涉现象的串扰值很低;当 Y 波导通过保偏跳线与输入端尾纤 45°熔接时,光功率被平均分配到 Y 波导的快慢轴上,经过 45°检偏器后两束光干涉现象的串扰值会比 0°/90°熔接时

高,通过解调干涉仪模块的光程扫描,可以获得 Y 波导芯片的起偏能力大小、Y 波导内部缺陷点串扰值和输入/输出尾纤的偏振串扰幅值,弥补了强度型

消光比测试仪的不足,为筛选出性能更加优异的 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学芯片提供了更可靠的方法,并且有利于 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学芯片制作工艺的提升。

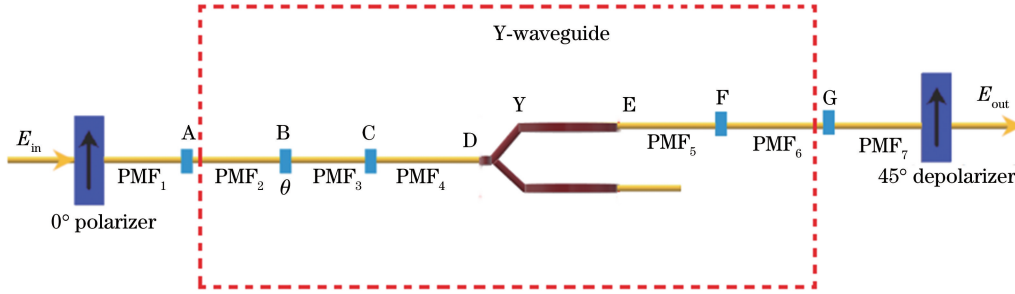


图 2 Y 波导测试原理图

Fig. 2 Schematic of Y-waveguide test

## 2.2 测试建模分析

结合偏振串扰分析仪原理,用琼斯矩阵法对波

导理论建模进行分析。当熔接角度  $\theta=0^\circ/90^\circ$  时,输出光强  $I_Y(\tau)$  为

$$I_Y(\tau) = \frac{1}{2}(1 - \rho_A^2)(1 - \rho_B^2)(1 - \rho_C^2)(1 - \rho_D^2)(1 - \rho_E^2)(1 - \rho_F^2)(1 - \rho_G^2) \times \left[ G(\tau) + \frac{\rho_G^2}{1 - \rho_G^2} G(\tau - \tau_7) + \frac{\rho_F^2}{1 - \rho_F^2} G(\tau - \tau_6 - \tau_7) + \frac{\rho_E^2}{1 - \rho_E^2} G(\tau - \tau_5 - \tau_6 - \tau_7) \right]. \quad (1)$$

当熔接角度  $\theta=45^\circ$  时,输出光强  $I_Y(\tau)$  为

$$I_Y(\tau) = \frac{1}{2}(1 - \rho_A^2)(1 - \rho_B^2)(1 - \rho_C^2)(1 - \rho_D^2)(1 - \rho_E^2)(1 - \rho_F^2)(1 - \rho_G^2) \times \left[ G(\tau) + \frac{\rho_A^2}{1 - \rho_A^2} G(\tau - \tau_1) + \frac{\rho_B^2}{1 - \rho_B^2} G(\tau - \tau_2) + \frac{\rho_C^2}{1 - \rho_C^2} G(\tau - \tau_3) + \frac{\rho_D^2}{1 - \rho_D^2} G(\tau - \tau_3 - \tau_4) + \frac{\rho_E^2}{1 - \rho_E^2} G(\tau - \tau_5 - \tau_6 - \tau_7) + \varepsilon^2 \rho_Y^2 G(\tau - \tau_3 - \tau_4 \pm \tau_{Y1}) + \frac{\rho_F^2}{1 - \rho_F^2} G(\tau - \tau_6 - \tau_7) + \frac{\rho_G^2}{1 - \rho_G^2} G(\tau - \tau_7) \right], \quad (2)$$

式中: $\tau_1 \sim \tau_7$  分别为 PMF<sub>1</sub>~PMF<sub>7</sub> 光纤的快慢轴延时差; $\tau_{Y1}$  表示图 2 中 D 点到 Y 点的快慢轴延时差, $\rho_A \sim \rho_G$  分别为图 2 上各点的耦合系数; $G(\tau)$  为光源的相干函数<sup>[10]</sup>。当  $\theta$  为  $0^\circ/90^\circ$  时,由于在 Y 波导上只能通过传输轴上的光,而与传输轴正交方向上的光会被 Y 波导抑制,因此检测不出 Y 波导前的串扰点;当熔接角度  $\theta$  为  $45^\circ$  时,可以测试出各个耦合点的串扰值。

## 3 实验验证

按照图 2 所示的原理图,将 Y 波导与 1550 nm 波段分布式偏振串扰分析仪相连接,共测试两只 Y 波导,编号分别为 Y1 和 Y2。表 1 为实验装置的参数设置,Y 波导 Y1 和 Y2 测试结果如图 3 所示。定义  $\Delta = \tau \times c$ ,  $c$  表示光速。图 3(a)、(b) 分别表示 Y1 上、下分支,图 3(c)、(d) 分别表示 Y2 上、下分支,图 3 中

虚线为保偏跳线 PMF<sub>2</sub> 与延长保偏光纤 PMF<sub>3</sub> 之间熔接角度  $\theta$  为  $90^\circ$  时的测试结果,实线为保偏跳线 PMF<sub>2</sub> 与延长保偏光纤 PMF<sub>3</sub> 之间熔接角度  $\theta$  为  $45^\circ$  时的测试结果,图 3 中标注的各点分别与图 2 原理中各点相对应。表 2 为图 3 中各标记点测试数据及分析,D 点串扰值表示 Y 波导的起偏能力。Y1 波导上、下分支 D 点测试串扰值分别为  $-53.35$  dB、 $-52.93$  dB,内部缺陷点 Y<sub>x</sub> 上、下分支测试串扰值分别为  $-59.12$  dB、 $-58.05$  dB;Y2 波导上、下分支 D 点测试串扰值分别为  $-56.72$  dB、 $-59.38$  dB,内部缺陷点 Y<sub>x</sub> 上、下分支测试串扰值分别为  $-56.68$  dB、 $-58.33$  dB。定义 Y 波导的整体消光比 (PER) 为  $R_{PE} = 10 \lg [10^{\frac{X_{\text{talk}}(\text{D})}{10}} + 10^{\frac{X_{\text{talk}}(\text{Y}_x)}{10}}]$ ,其中  $X_{\text{talk}}(\text{D})$  表示在 D 点的串扰值, $X_{\text{talk}}(\text{Y}_x)$  表示在 Y<sub>x</sub> 点的串扰值,计算得到 Y1 波导的上、下分支整体消光比分别为  $-52.33$  dB、 $-51.76$  dB, Y2 波导的上、下分支整体

表 1 Y 波导参数设置  
Table 1 Y-waveguide parameters setting

Fiber	Length / m				Birefringence / $10^{-4}$				Optical path difference / mm			
	Y1		Y2		Y1		Y2		Y1		Y2	
	Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch
PMF <sub>1</sub>									0.887	0.887	0.887	0.887
PMF <sub>2</sub>	1.15	1.15	1.15	1.15	4.1	4.1	4.1	4.1	0.47	0.47	0.47	0.47
PMF <sub>3</sub>	4.5	4.5	6	4.5	7.24	7.24	7.24	7.24	3.25	3.25	4.34	3.25
PMF <sub>4</sub>	1.60	1.60	1.98	1.98	5.0	5.0	5.0	5.0	0.80	0.80	0.99	0.99
Y-waveguide	0.016		0.016		800		800		1.28	1.28	1.28	1.28
PMF <sub>5</sub>	1.85	2.05	2.15	2.03	5.0	5.0	5.0	5.0	0.92	1.02	1.07	1.01
PMF <sub>6</sub>	1.4	1.4	1.4	1.4	4.1	4.1	4.1	4.1	0.57	0.57	0.57	0.57
PMF <sub>7</sub>									1.003	1.003	1.003	1.003

\* PMF<sub>1</sub> and PMF<sub>7</sub> are the pigtailed of internal polarizer and analyzer, respectively, and the optical path difference  $\Delta$  is a fixed value.

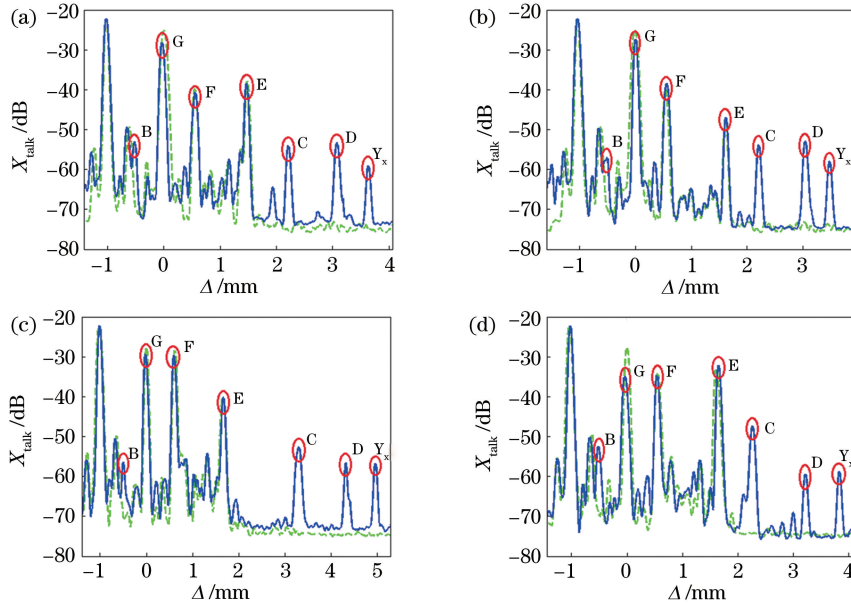


图 3 不同分支上 Y 波导的测试串扰图。(a) Y1 波导上分支；(b) Y1 波导下分支；(c) Y2 波导上分支；(d) Y2 波导下分支

Fig. 3 Test crosstalk diagrams of Y-waveguide with different branches. (a) Y1 waveguide upper branch; (b) Y1 waveguide lower branch; (c) Y2 waveguide upper branch; (d) Y2 waveguide lower branch

消光比分别为  $-53.69$  dB、 $-55.81$  dB。由表 2 和表 3 可知：根据内部缺陷点  $Y_x$  所在的具体位置，可推算出缺陷点的实际位置；根据实验结果可得内部缺陷点在 Y 波导内部拐点处。

#### 4 用单偏振光纤验证 Y 波导实验结论的合理性

由于 Y 波导内部结构较为复杂，只测试 Y 波导无法确定实验结果的合理性，因此用结构简单的单偏振光纤（其具有特殊结构，只能通过一个偏

振态上的光，而对于其正交偏振态有抑制作用，其消光比为  $45$  dB，与 Y 波导的特性相似）模拟出已知的缺陷点，进而对 Y 波导的测试结果进行交叉验证。

图 4(a) 为测试单偏振光纤原理图，与测试 Y 波导原理类似，将单偏振光纤两端与保偏跳线分别进行  $45^\circ$ 、 $0^\circ$  熔接。图 4(b) 为单偏振光纤的测试结果，其中虚线为未对单偏振光纤施加压力的测试结果，实线为对单偏振光纤中一点施加压力的测试结果。当单偏振光纤外部有压力点时（模拟

表 2 Y1 波导测试结果分析  
Table 2 Analysis of Y1-waveguide test results

Peak	Theoretical position	Original position	Original value /mm		Experimental value /mm		$X_{\text{talk}}/\text{dB}$		Meaning
			Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch	
			B	$\Delta_2$	$\Delta_2 - \Delta_7$	-0.53	-0.53	-0.52	
C	$\Delta_3$	$\Delta_3 - \Delta_7$	2.25	2.25	2.21	2.20	-54.01	-53.96	Waveguide input pigtail and PMF <sub>3</sub> fusion joint
D	$\Delta_3 + \Delta_4$	$\Delta_3 + \Delta_4 - \Delta_7$	3.05	3.05	3.07	3.03	-53.35	-52.93	Waveguide input pigtail and waveguide connection point
E	$\Delta_5 + \Delta_6 + \Delta_7$	$\Delta_5 + \Delta_6$	1.49	1.59	1.46	1.62	-38.66	-46.99	Waveguide output pigtail and waveguide connection point
F	$\Delta_6 + \Delta_7$	$\Delta_6$	0.57	0.57	0.55	0.55	-40.78	-38.60	Waveguide output pigtail and jumper fusion joint
G	$\Delta_7$	0	0	0	0	0	-28.23	-27.36	Polarization crosstalk analyzer port
Y <sub>x</sub>	$\Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_{Y1}$	$\Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_{Y1} - \Delta_7$	3.69	3.69	3.63	3.57	-59.12	-58.05	Y-waveguide internal defect point

表 3 Y2 波导测试结果分析  
Table 3 Analysis of Y2-waveguide test results

Peak	Theoretical position	Original position	Original value /mm		Experimental value /mm		$X_{\text{talk}}/\text{dB}$		Meaning
			Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch	Upper branch	Lower branch	
			B	$\Delta_2$	$\Delta_2 - \Delta_7$	-0.53	-0.53	-0.51	
C	$\Delta_3$	$\Delta_3 - \Delta_7$	3.34	2.25	3.29	2.26	-52.63	-47.34	Waveguide input pigtail and PMF <sub>3</sub> fusion joint
D	$\Delta_3 + \Delta_4$	$\Delta_3 + \Delta_4 - \Delta_7$	4.33	3.24	4.32	3.22	-56.72	-59.38	Waveguide input pigtail and waveguide connection point
E	$\Delta_5 + \Delta_6 + \Delta_7$	$\Delta_5 + \Delta_6$	1.64	1.58	1.67	1.65	-40.28	-32.16	Waveguide output pigtail and waveguide connection point
F	$\Delta_6 + \Delta_7$	$\Delta_6$	0.57	0.57	0.59	0.54	-29.38	-34.67	Waveguide output pigtail and jumper fusion joint
G	$\Delta_7$	0	0	0	0	0	-29.40	-34.92	Polarization crosstalk analyzer port
Y <sub>x</sub>	$\Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_{Y1}$	$\Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_{Y1} - \Delta_7$	4.97	3.88	4.96	3.83	-56.68	-58.33	Y-waveguide internal defect point

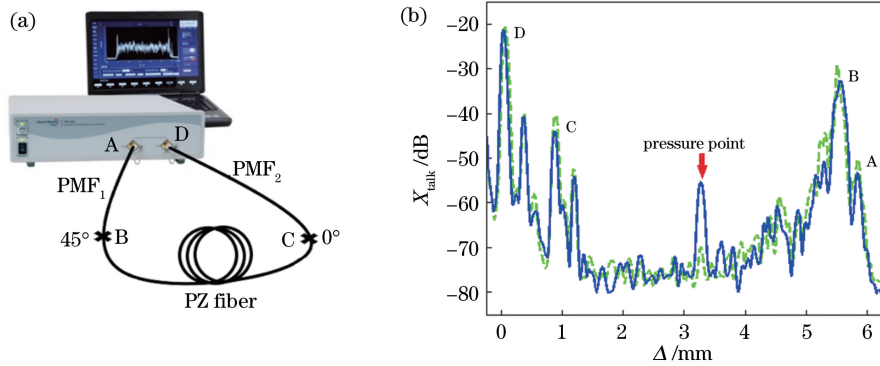


图 4 单偏振光纤的原理图与测试结果。(a)原理图;(b)测试结果

Fig. 4 Schematic diagram and test results of the single polarized fiber. (a) Schematic diagram; (b) test results

缺陷点),利用分布式偏振串扰分析仪可测试出其缺陷点的位置及缺陷点的大小,即验证了分布式偏振串扰分析仪可检测出 Y 波导内部缺陷点的结论。

## 5 结 论

结合分布式偏振串扰分析仪,从测试原理上,利用琼斯矩阵对 LiNbO<sub>3</sub> 集成光学芯片进行理论建模



分析,并且得到了实验验证。实验结果表明,偏振串扰分析仪能评估出 Y 波导的整体消光比,且能够测试出内部的一个缺陷点的串扰值,Y1 波导上、下分支 D 点测试串扰值分别为  $-53.35$  dB、 $-52.93$  dB,内部缺陷点  $Y_x$  上、下分支测试串扰值分别为  $-59.12$  dB、 $-58.05$  dB;Y2 波导上、下分支 D 点测试串扰值分别为  $-56.72$  dB、 $-59.38$  dB,内部缺陷点  $Y_x$  上、下分支测试串扰值分别为  $-56.68$  dB、 $-58.33$  dB。则 Y1 波导的上、下分支整体消光比分别为  $-52.33$  dB、 $-51.76$  dB;Y2 波导的上、下分支整体消光比分别为  $-53.69$  dB、 $-55.81$  dB。证明了理论推导的正确性,弥补了强度型消光比测试仪的不足,并对哈尔滨工程大学的光学相干域测量仪中未提及的部分进行了补充。最后利用单偏振光纤,测试出了单偏振光纤的缺陷点,进一步验证了测试的 Y 波导结果的合理性。总之,分布式偏振串扰分析仪能检测出由  $\text{LiNbO}_3$  集成的 Y 波导内部的缺陷,在实际应用中能筛选出性能更加优异的  $\text{LiNbO}_3$  集成 Y 波导,对制作更高精度的光纤陀螺有着重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Yang J, Yuan Y G, Yu Z J, et al. Optical coherence domain polarimetry technology and its application in measurement for evaluating components of high precision fiber-optic gyroscopes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328007.  
杨军,苑勇贵,喻张俊,等. 光学相干域偏振测量技术及其在高精度光纤陀螺器件测量中的应用[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328007.
- [2] Xu H J, Qin B K, Chen S F. Measurement for extinction ratio of fiber-optic polarizer [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(5): 419-421, 426.  
徐宏杰,秦秉坤,陈淑芬. 光纤型偏振器消光比测试方法研究[J]. *光学技术*, 2002, 28(5): 419-421, 426.
- [3] Wang X Q, Guo L Q, Liu C, et al. Testing technology of gyroscope optical devices based on white light interference[C]//China Inertial Technology Society Annual Conference. [S. l.: s. n.], 2015: 156-158.  
王学勤,郭礼芹,刘充,等. 基于白光干涉的陀螺光学器件测试技术[C]//中国惯性技术学会第七届学术年会论文集. [出版地不详:出版者不详], 2015: 156-158.
- [4] Chai J. Research on Y waveguide device testing method based on white light interference [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015: 32-38.  
柴俊. 基于白光干涉原理的 Y 波导器件测试方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015: 32-38.
- [5] Li C, Yuan Y G, Yang J, et al. Inconsistency measurement between two branches of  $\text{LiNbO}_3$  integrated optic Y-junction [J]. *Optics Communications*, 2016, 369: 152-158.
- [6] Alcázar de V A, Rams J, Cabrera J M, et al. Proton exchange of quasistoichiometric  $\text{LiNbO}_3$  [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(10): 4752-4757.
- [7] Thorlabs. Thorlabs China-PZ fiber[EB/OL]. [2019-07-19]. [https://www.thorlabschina.cn/newgroupage9.cfm?objectgroup\\_id=6100](https://www.thorlabschina.cn/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=6100).
- [8] Li Z H, Yao X S, Chen X J, et al. Complete characterization of polarization-maintaining fibers using distributed polarization analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(2): 372-380.
- [9] Yu Z J, Yang J, Yuan Y G, et al. Distributed measurement of polarization characteristics for a multifunctional integrated optical chip: a review[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(5): 1543-1553.
- [10] Li Z Z, Li Z H, Yao X T, et al. Research on influence of polarization crosstalk on the zero drift and random walk of fiber optic gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206001.  
李子忠,李志宏,姚晓天,等. 偏振串扰对光纤陀螺零漂及随机游走影响的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206001.