集成光学移相器波长相关性的比较研究

丁君珂[1],陈 浩[1],蒋建光[1],孟浩然[2],刘欣悦[2],郝寅雷[1*]

(1. 浙江大学 信息与电子工程学院,浙江 杭州 310027;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要:移相器是一种常用的集成光学结构,其相移值的波长相关性决定了移相器的工作波长范围。针对移相器的波长相关性,文中对两种集成光学移相器设计方案(长度差方案和折射率差方案)所设计的二氧化硅基集成光学移相器进行了实验研究。在马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的两干涉臂之间,采用两种移相方案分别设计制作 180°移相器,通过测试 MZI 的插入损耗与波长的依赖关系对两种移相器的波长相关性进行了比较。研究结果显示,折射率差方案所设计移相器的工作波长范围大约是长度差方案的 1.8~1.9 倍。这一实验结果与理论计算吻合,证明了折射率差方案设计的移相器的相移值波长相关性更小,因而具有更宽的工作波长范围。

关键词:集成光学; 移相器; MZI; 插入损耗; 波长相关性

中图分类号:TN256 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0520001

Comparison of wavelength dependence of integrated optical phase shifter

Ding Junke[1], Chen Hao[1], Jiang Jianguang[1], Meng Haoran[2], Liu Xinyue[1], Hao Yinlei[1*]

(1. College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Phase shifter is one of basic integrated optical structures, and wavelength dependence of its phase shift value determines operation wavelength range of devices. An experimental investigation was conducted on silica-based integrated optical phase shifter designed respectively in two different regimes, length difference regime (LDR) and refractive index difference regime (RIDR), aiming at wavelength dependence of phase shifter. Phase shifters of 180° were respectively designed in the two regimes and inserted between two interference arms of Mach-Zehnder interferometers (MZI). Based on these two structures, a quantitative comparison on phase shift wavelength dependence was made by measuring wavelength dependence of MZI insertion loss. Experimental results show that the operation wavelength range of phase shifters designed in the RIDR was approximately 1.8-1.9 times that designed in the LDR. Analysis shows that the experimental results are in agreement with the theoretical calculations, which proves that phase shifter designed in RIDR possesses weaker wavelength dependence and thus wider operation wavelength range.

Key words: integrated optics; phase shifter; MZI; insertion loss; wavelength dependence

收稿日期:2018-12-10; **修订日期**:2019-01-20

基金项目:浙江省自然科学基金(LY17F050007);深圳市科技计划项目(JCYJ20170816172409618)

作者简介:丁君珂(1991-),男,硕士生,主要从事集成光学器件方面的研究。Email: dingjunke@zju.edu.cn

导师简介:郝寅雷(1974-),男,副教授,博士,主要从事集成光学器件方面的研究。Email: haoyinlei@zju.edu.cn

0 引 言

19 世纪60 年代末,美国贝尔实验室 Miller 博士提出了集成光学的概念,自那时起,集成光学理论与集成光器件制备技术得到了快速发展。时至今日,多种平面集成光波导器件,如功分器、光开关、光调制器、波分复用器等已经实现批量化生产并在光信息网络中获得规模化应用,使数据传输的带宽得到大幅提升,有力推动了信息技术的发展[1-4]。

移相器是一种基本的集成光学结构,其功能是在不同光波导之间引入相位差。在阵列波导光栅[5]、光混频器[6]以及光开关[7]等器件中,移相器都是不可少的结构。目前,在不同光波导之间引入相位差的方案主要有两种:第一种是长度差方案(Length Difference Regime, LDR),即保持两波导有效折射率相同,通过在两波导之间产生长度差而引入相位差[7];另一种方案是折射率差方案(Refrctive Index Difference Regime, RIDR),即保持两波导长度相同,改变其中一条波导的有效折射率(譬如通过改变波导的宽度)而引入相位差[8]。

在光信息网络中,由于波分复用技术的引入和大规模应用,工作波长范围成为光学器件的一项关键性能指标。对移相器来说,受到材料色散和波导色散的影响,其相移值的波长相关性决定了移相器的工作波长范围。近年来,研究者们已经开始关注上述两种方案所设计移相器相移值波长相关性的差别。Pierre Labeye[9]小组研究认为:长度差方案和折射率差方案所设计的移相器波长相关性具有明显不同:与长度差方案相比,折射率差方案所设计的移相器的相移值波长相关性更小,因此折射率差方案可以获得工作波长范围更宽的移相器。陈浩等[10]对两种方案所设计的二氧化硅基移相器相移值波长相关性的模拟计算表明,折射率差方案所设计的移相器的工作波长范围是长度差方案的 2.8~3.1 倍。然而,截至目前,人们对两种移相器方案中相移值波长相关性之间差异的研究限于理论或者数值仿真,缺乏相关的实验证据。

文中作者对两种方案所设计移相器相移值的波长相关性进行了实验研究。通过干涉法测量了两种方案所设计移相器的波长相关性。文中报道了对两种移相器的波长相关性上的分析和测量结果。

1 原理及方法

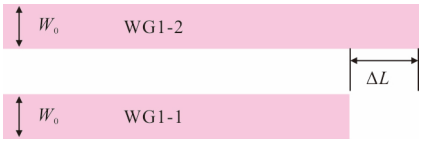
文中采用干涉法实验研究了两种集成光学移相器波长相关性的差异。在马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的两干涉臂之间,分别采用两种移相器方案设计了 180°移相器,通过测试 MZI 的插入损耗与波长之间的依赖关系对两种移相器相移值的波长相关性进行了比较。

1.1 移相器方案

两种移相器方案如图 1 所示。对于长度差方案,在两波导(WG1-2 和 WG1-1)之间产生的相移值可以表示为:

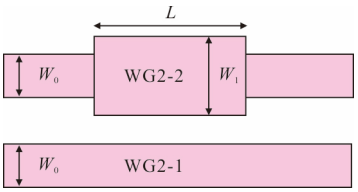
$$\varphi_1(\lambda)=\frac{2\pi}{\lambda}\cdot N_{\mathrm{eff}}(W_0,\ \lambda)\cdot\Delta L \tag{1}$$

式中:λ 为光波长;W_0 为波导宽度;$N_{\mathrm{eff}}(W_0,\lambda)$为波导的有效折射率;$\Delta L$ 为 WG1-2 和 WG1-1 之间的长度差。



(a) 长度差方案

(a) Length difference scheme



(b) 折射率差方案

(b) Refractive index difference scheme

图 1 两种移相器方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of the two phase shifting schemes

对于折射率差方案,在两波导 (WG2-2 和 WG2-1)之间产生的相移值可以表示为:

$$\varphi_2(\lambda)=\frac{2\pi}{\lambda}\cdot\left[N_{\mathrm{eff}}(W_1,\ \lambda)-N_{\mathrm{eff}}(W_0,\ \lambda)\right]\cdot L \tag{2}$$

式中:L 为移相器长度;W_1 为移相器波导(WG2-2)的宽度。

1.2 马赫-曾德尔干涉仪设计

用于测试两种移相器波长相关性的 MZI 结构如图 2 所示。用不同相移方案在 MZI 的两干涉臂之

间分别设计并制作 180°移相器，其中左图中移相器采用长度差方案，右图中采用折射率差方案。

对于长度差方案，在中心波长为 λ_0，要使 MZI 两干涉臂（对应于移相器两波导）之间产生 180°相移，MZI 两干涉臂长度差可以表示为：

$$\Delta L_\pi=\frac{1}{2}\frac{\lambda_0}{N_{\mathrm{eff}}(W_0,\ \lambda_0)} \tag{3}$$

这种情况下，移相器的相移值与工作波长 λ 的关系为：

$$\varphi_1(\lambda)=\frac{2\pi}{\lambda}\cdot\Delta L_\pi\cdot N_{\mathrm{eff}}(W_0,\ \lambda) \tag{4}$$

对于折射率差方案，在 MZI 器件设计过程中，为了减少因波导横截面尺寸的突变而带来的损耗，在宽度为 W_0、W_1 的两段波导间加入锥形波导。在锥形波导段产生的相移可以表示为：

$$\Delta\varphi_2(\lambda)=\frac{2\pi}{\lambda}\int_0^l\{N_{\mathrm{eff}}[W(x),\ \lambda)]-N_{\mathrm{eff}}(W_0,\ \lambda)\}\mathrm{d}x \tag{5}$$

式中：x 为锥形波导长度变量；l 为锥形波导的长度；$W(x)$ 为 x 处的波导宽度，波导在 x 处的有效折射率 $N_{\mathrm{eff}}[W(x),\ \lambda)]$ 是 x 的复合函数，如图 2 所示。

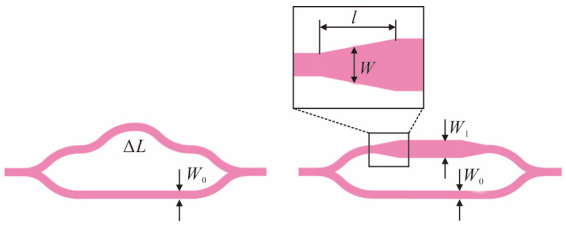


图 2 马赫-曾德尔干涉仪结构示意图

Fig.2 Schemes of Mach-Zehnder interferometer structure

图 2 中所示包含锥形波导的移相器的相移值可以表示为：

$$\varphi_2(\lambda)=\frac{2\pi}{\lambda}[N_{\mathrm{eff}}[W_1,\ \lambda)]-N_{\mathrm{eff}}(W_0,\ \lambda)]\cdot L'+2\Delta\varphi_2(\lambda) \tag{6}$$

式中：L' 为宽度为 W_1 的波导长度。在中心波长为 λ_0，两波导间产生 180°相移时，L' 为：

$$L_\pi'=\frac{\lambda_0[\pi-2\Delta\varphi_2(\lambda_0)]}{2\pi[N_{\mathrm{eff}}(W_1,\ \lambda_0)-N_{\mathrm{eff}}(W_0,\ \lambda_0)]} \tag{7}$$

移相器的相移与工作波长 λ 的关系可以表示为：

$$\varphi_2(\lambda)=\frac{2\pi}{\lambda}(N_{\mathrm{eff}}(W_1,\ \lambda)-N_{\mathrm{eff}}(W_0,\ \lambda))\cdot L_\pi'+2\Delta\varphi_2(\lambda) \tag{8}$$

1.3 器件制作与测试

文中的光波导芯片采用基于等离子增强化学气相沉积(PECVD)的二氧化硅基光波导技术制作。器件工作中心波长 λ_0 为 1 550 nm。波导芯层材料为掺杂 Ge 的 SiO_2，芯层与包层的相对折射率差为0.45%。波导芯部高度 6.5 μm，宽度 W_0、W_1 分别取 6.5、7 μm，保证波导工作在单模状态。为了验证两种移相器性质之间差异的普遍性，对工作波长为 1 550 nm 附近的其它波长，分别采用长度差和折射率差方案设计制作了 180°移相器及对应的 MZI 结构。为减小锥形波导的传输损耗，锥形波导的锥度取 0.005。器件设计过程中，波导芯部和包层的折射率由 Sellmeier 公式获得，不同波长和宽度下的波导的有效折射率通过在对应条件下求解 Maxwell 方程获得。

对制作完毕的晶圆进行划片、端面研磨抛光之后，采用集成光芯片插入损耗测试系统对 MZI 插入损耗对波长的依赖关系进行测试。首先利用端面耦合平台对芯片进行光学对准，然后采用可调谐激光器(型号 TLS 150D，波长范围 1 530~1 607 nm)对器件在不同波长下的插入损耗进行测试。

2 结果与讨论

图 3 给出了根据公式(4)和公式(8)对两种 180°移相器波长相关性的计算结果。从图中可以看出：两种移相器方案中相移值与波长均呈线性关系，其随波长的变化速率分别为-0.12、-0.036 (°)/nm，长度差方案所设计移相器随波长的变化速率是折射率差方案的 3.3 倍。

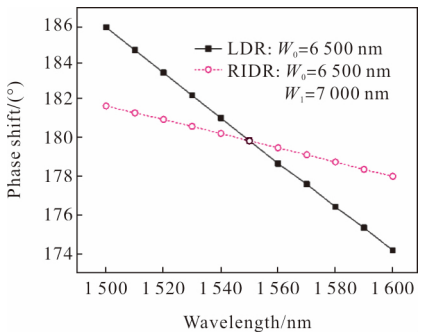


图 3 两种方案相移与波长的关系

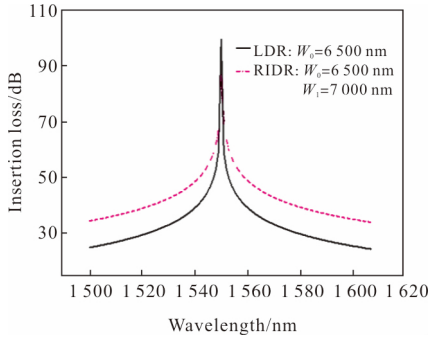
Fig.3 Dependence of phase shift on wavelength in the two schemes

对于马赫-曾德尔干涉仪，其插入损耗与两干涉臂之间的相位差可由下式计算：

$$IL(\mathrm{dB})=-10\lg\left[\frac{1+\cos\varphi_i(\lambda)}{2}\right] \tag{9}$$

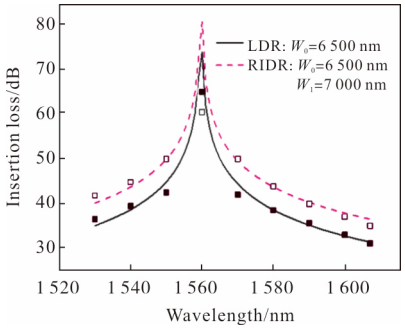
式中：i=1,2，分别对应，图 2 所示两种干涉仪中与波长相关的相移。

图 4 给出了两种 180°移相器方案设计的 MZI 插入损耗与波长相关性的理论计算和测试结果。从图中可以看出，理论计算与实验测试结果吻合：含有折射率差移相器方案的 MZI 具有更大的插入损耗，意味着这种移相器方案的相移值随波长变化更小，因而具有更大的工作波长范围。定义 $\Delta\lambda(IL_0)$为 MZI 的插入损耗大于 IL_0 时对应的波长范围，表 1 给出了两种移相器的 $\Delta\lambda(IL_0)$的理论计算和实验结果的对比。从表中理论计算结果可以看出，折射率差方案所设计移相器的工作波长范围是长度差方案的 2.9~3.0 倍，与图 3 所获的结论一致。测试结果表明，折射率差方案所设计移相器的工作波长范围是长度差方案的 1.8~1.9 倍。测试结果与理论结果基本吻合，两者之间的偏差归因于插入损耗测试结果的误差，以及波导模拟折射率参数与实际参数之间的偏离。



(a) 理论计算结果

(a) Theoretical calculation result



(b) 测试结果

(b) Test result

图 4 两种方案对应的 MZI 插入损耗与波长的关系

Fig.4 Relationship between MZI insertion loss and wavelength for two schemes

表 1 两种移相器方案工作波长范围比较

Tab.1 Comparison of operation wavelength ranges for two phase shifter schemes

	Theoretical calculation		Test	
Phase shifter schemes	LDR/nm	RIDR/nm	LDR/nm	RIDR/nm
$\Delta\lambda$(40 dB)	19.26	57.92	33.97	60.96
$\Delta\lambda$(60 dB)	1.98	5.84	3.27	6.17

值得指出的是，图 4 中 MZI 测试结果最大插入损耗对应波长在 1 560 nm 附近，中心波长相对设计值发生了偏离。这一偏离归因于波导实际的几何尺寸和折射率与设计值之间的偏差。

为了验证移相器相移的设计值偏离 180°时两种移相器设计方案之间的差别，在同一晶圆上制作了 180°附近其它相移值的移相器，并用前述方法对移相器的工作波长范围进行了测试。图 5 是相应 MZI 插入损耗与波长关系的测试结果，表 2 给出了这些器件 $\Delta\lambda$(60 dB)值。从这些可以看出，同一种设计方

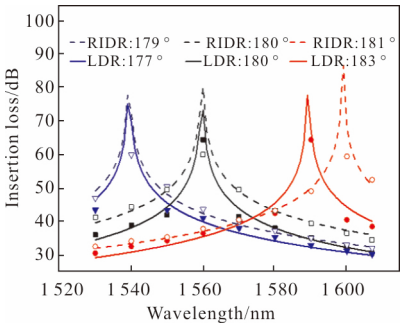


图 5 180°相移附近插入损耗与波长的关系

Fig.5 Dependence of insertion loss on wavelength near 180° phase shift

表 2 两种移相器方案在 180°相移附近工作波长范围比较

Tab.2 Comparison of working wavelength range of two phase shifter schemes near 180° phase shift

Phase shifter schemes	LDR			RIDR		
Phase shift/(°)	177	180	183	179	180	181
$\Delta\lambda$ (60 dB) /mm	3.25	3.27	3.40	5.80	6.17	6.06

案所设计移相器的波长相关性接近，两种方案所设计移相器的波长相关性差别明显。进一步验证了两种移相器设计方案之间的差别。

3 结 论

采用干涉法，通过测量 MZI 插入损耗对波长依赖关系，对两种移相器设计方案(长度差方案和折射率差方案)所设计的二氧化硅基集成光学移相器波长相关性之间的差异进行了实验研究。测试结果显示，折射率差方案所设计是长度差方案的 1.8~1.9倍。文中的研究给出了两种方案所设计移相器的相移值波长相关性之间的差别的实验证据，证明了折射率差方案所设计移相器相移值随波长变化更小，具有更宽的工作波长范围。

参考文献：

[1] Ye Jiayu, Li Lijing, Chen Wen, et al. Study on the characteristics of novel optical phased array based on wave-guide [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(6): 0620003. (in Chinese)

[2] Chen Zhaoxi, Wen Haokang, Yu Hao, et al. Silicon-based tantalum pentoxide ridge waveguide with high erbium concentration [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(8): 0821002. (in Chinese)

[3] Gao Feng, Qin Li, Chen Yongyi, et al. Reseach progress of bent waveguide and its applications [J]. ***Chinese Optics and Applied Optics Abstracts***, 2017,10 (2): 176-193. (in Chinese)

[4] Li Tong , Zhang Meiling, Wang Fei, et al. Fabrication of optical waveguide amplifiers based on bonding-type NaYF_4: Er nanoparticles-polymer [J]. ***Chinese Optics***, 2017,10(2): 219-225. (in Chinese)

[5] Matsuda N, Nishi H, Karkus P, et al. Generation of entangled photons using an arrayed waveguide grating [J]. ***Journal of Optics***, 2017, 19(12): 124005.

[6] Jeong S H, Morito K. Optical 90° hybrid with broad operating bandwidth of 94 nm [J]. ***Optics Letters***, 2009, 34(22): 3505-3507.

[7] Zheng C T, Ma C S, Yan X, et al. Design of wide-spectrum polymer Mach -Zehnder interferometer electro-optic switches using two symmetric N-th order phase-generating couplers [J]. ***Optics Communications***, 2010, 283(20): 3962-3969.

[8] Lorenzo R M, Llorente C, Abril E J, et al. Method of achieving phase delay with wide optical bandwidth in multimode interference devices[J]. ***Optics Letters***, 1998, 23(22): 1748-1750.

[9] Labeye P. Integrated optical components for interferometry astronomy [D]. Grenoble: Grenoble Institute of Technology, 2008.

[10] Chen H, Meng H, Liu X, et al. Comparison of integrated optical phase shifters designed in different regime[C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018, 173: 01034.