

硅基光开关切换延时线芯片延时测量稳定性研究

史上清, 刘鹏程, 恽斌峰*

东南大学先进光子学中心, 江苏 南京 210096

摘要 硅基光开关切换延时线芯片以其结构简单、瞬时带宽大等优点在微波光子波束形成领域中有着很好的应用前景, 但其高精度延时测量还存在很多难点, 影响片上延时测量稳定性的因素亟待研究。通过对基于光矢量网络分析的延时测试链路、参考直波导和延时线的延时稳定性进行对比测试, 实验分析了芯片延时测量稳定性的影响因素。结果表明, 芯片插损、输入/输出光栅耦合器封装和延时线内部残余的马赫-曾德尔干涉都将使硅基光开关切换延时线芯片的片上延时测量稳定性变差。

关键词 集成光学; 光开关切换延时线芯片; 光矢量网络分析; 延时测量; 稳定性

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2013001

Delay Measurement Stability of Silicon-Based Optical Switching Delay Line Chip

Shi Shangqing, Liu Pengcheng, Yun Binfeng*

Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China

Abstract Silicon-based optical switching delay line chip has a good application prospect in microwave photonic beamforming due to its simple structure and large instantaneous bandwidth. However, there are many difficulties in its high-precision delay measurement, and the factors affecting the delay measurement stability are needed to be studied. By comparing the delay measurement stabilities of a delay test link based on optical vector network analyzing system, alignment waveguide and delay line, the main factors affecting the delay measurement stability of silicon-based optical switching delay line are analyzed experimentally. Experimental results show that chip insertion loss, input/output grating coupler package and residual Mach-Zehnder interference of delay line chip will deteriorate the on-chip delay measurement stability.

Key words integrated optics; optical switching delay line chip; optical vector network analysis; delay measurement; stability

1 引言

在相控阵雷达系统中,传统电域移相器配置与微波信号频率有关,这使其瞬时带宽很窄。为实现大瞬时带宽,可采用光学真延时技术来代替电域移相器将微波信号调制到光域上,将光波导作为延时路径^[1]。基于光学真延时技术设计的延时线具有瞬时带宽大和抗电磁辐射干扰的优势,延时线经片上集成后还可以进一步减小器件的体积和重量^[2-5]。硅基片上集成的光开关切换延时线因其可与现有成熟的微电子加工工艺兼容而具有极大的成本优势,在微波光子波束形成系统中的多通道光学真延时领域中^[6-9]有很好的应用

前景,并且已经有很多硅基光开关切换延时线芯片相关的报道^[3,10-16]。

通常硅基光开关切换延时芯片是多个 2×2 光开关与多根不同长度的延时光波导级联构成的,通过光开关选择不同的片上延时路径来实现不同的延时量切换。硅基集成光开关的基本结构包括马赫-曾德尔干涉(MZI)结构和微环谐振器。与MZI结构相比,微环谐振器型光开关虽然尺寸较小、功耗较低,但是其对工艺敏感,且需要热调进行波长精确控制,对控制电路要求较高。另外,若采用可调微环谐振器来实现可调延时,相比光开关结构,其优点是延时量可以连续调谐。然而,由于微环是共振器件,其延时带宽很小,若要实

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-04-11; 录用日期: 2022-04-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2201800)、国家自然科学基金(62171118)

通信作者: *ybf@seu.edu.cn

现宽带延时,则需要多级级联微环,故控制难度增大,并且基于微环谐振器的延时带内波动较大。因此,本文选择采用MZI光开关切换光波导结构来实现可测延时线芯片。将硅基光开关切换延时线芯片用于波束形成系统之前,需要对光开关切换延时线的各延时状态的延时量进行高精度的测试。基于光矢量网络分析(OVNA)的光器件延时量测试技术因其具有高分辨微波频率扫描和高精度幅相检测的优点,故理论上可以实现亚皮秒级的分辨率,非常适用于光器件的高精度延时测量^[17-20]。然而,目前报道的基于OVNA的光开关切换延时线的延时量测试几乎都是针对分立式光纤延时线的^[21-22],鲜有片上集成光开关切换延时线延时量测试方法相关的报道。与分立式光纤延时线相比,片上集成光开关切换延时线的延时量测试主要存在以下三个难点:1)目前,硅基集成芯片的插入损耗较大,这会导致测试信噪比明显恶化,影响延时测量稳定性;2)若芯片通过光栅耦合器与光纤进行耦合封装,则光栅耦合器封装引起的干涉也将导致相位波动,从而影响OVNA的延时测量稳定性;3)光开关切换延时线中光开关的消光比更易受到加工工艺和热串扰的影响而降低,从而形成非对称MZI结构,该结构产生的干涉也将导致相位波动,从而影响OVNA的延时测量稳定性。以上这些因素都将对基于OVNA技术的片上延时的测量结果产生较大的影响。因此,阐明这些因素对OVNA测量片上延时的影响是非常有必要的,可以为光开关切换延时芯片的延时高精度测量和芯片性能优化提供参考,但是目前鲜有相关报道。

因此,本文针对硅基光开关切换延时芯片的OVNA延时测量,实验研究了延时线芯片的插入损耗、输入/输出光栅耦合器封装和非对称MZI对片上延时测量波动的影响。实验结果表明,降低芯片插损、避免引入光栅耦合器和降低延时线内部干涉有助于提高硅基光开关切换延时线芯片的性能,可为硅基光开关切换延时线芯片的设计、加工和封装提供有益参考。

2 OVNA延时测量原理及测试链路

图1为搭建的基于光学双边带调制的OVNA延时测试链路。激光器发出的角频率为 ω_c 的光载波经过偏振控制器调节偏振后进入强度调制器,然后光载波经矢量网络分析仪发出的射频信号经调制产生光学双边带信号,该信号的光电场^[19]可以表示为

$$E(t) = \frac{1}{2} E_c \exp(i\omega_c t) \left\{ \exp\left[-i\frac{\beta}{2} \cos(\omega_e t)\right] + \exp\left[i\frac{\beta}{2} \cos(\omega_e t) + i\Phi\right] \right\}, \quad (1)$$

式中:系数1/2表示调制器的分光比为1:1; E_c 为光载波的振幅; β 为调制器调制臂的相位调制因子; ω_e 为矢量网络分析仪发出的射频信号的角频率; Φ 为调制器上下两臂的相位差; $\beta\cos(\omega_e t)/2$ 和 $-\beta\cos(\omega_e t)/2$ 分别为射频信号作用于调制器后调制器上下两臂产生的相移。

驱动调制器工作在正交偏置点,若只考虑光载波和 ± 1 阶边带,则调制器输出信号的光电场分布可以表示为

$$\begin{cases} E_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_c \exp(i\omega_c t) J_0\left(\frac{\beta}{2}\right) \exp\left(i\frac{\pi}{4}\right) \\ E_{+1} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_c \exp(i\omega_c t + i\omega_e t) J_1\left(\frac{\beta}{2}\right) \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right) \\ E_{-1} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_c \exp(i\omega_c t - i\omega_e t) J_{-1}\left(\frac{\beta}{2}\right) \exp\left(-i\frac{3\pi}{4}\right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: E_0 为光载波的场分量; $E_{\pm 1}$ 为 ± 1 阶边带的场分量; $J_0(\beta/2)$ 、 $J_1(\beta/2)$ 和 $J_{-1}(\beta/2)$ 分别为第一类0阶和 ± 1 阶贝塞尔函数。

将待测器件的光谱响应 $H(\omega)$ 展开成幅度谱 $T(\omega)$ 和相位谱 $\varphi(\omega)$ 的形式,则有

$$H(\omega) = T(\omega) \cdot \exp[i\varphi(\omega)], \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知,通过待测器件后,信号的光电场分布为

$$\begin{cases} E_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_c \exp(i\omega_c t) J_0\left(\frac{\beta}{2}\right) \exp\left(i\frac{\pi}{4}\right) H(\omega_c) \\ E_{+1} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_c \exp(i\omega_c t + i\omega_e t) J_1\left(\frac{\beta}{2}\right) \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right) H(\omega_c + \omega_e) \\ E_{-1} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_c \exp(i\omega_c t - i\omega_e t) J_{-1}\left(\frac{\beta}{2}\right) \exp\left(-i\frac{3\pi}{4}\right) H(\omega_c - \omega_e) \end{cases}。 \quad (4)$$

光电探测器探测到的光电流 I_{PD} 为

$$I_{PD} \propto (E_{+1}^* E_0 + E_{+1} E_0^* + E_{-1}^* E_0 + E_{-1} E_0^*) \propto \cos\left[\omega_e t + \frac{\varphi(\omega_c + \omega_e) - \varphi(\omega_c - \omega_e)}{2}\right], \quad (5)$$

式中: $E_{+1}^* E_0$ 、 $E_{+1} E_0^*$ 、 $E_{-1}^* E_0$ 和 $E_{-1} E_0^*$ 为拍频后的各阶场分量。由式(5)可知,射频信号经过待测器件后的相

位变化为

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi(\omega_c + \omega_e) - \varphi(\omega_c - \omega_e)}{2}. \quad (6)$$

通过相位谱对角频率求导可以得到延时谱, 射频信号经过待测器件后的延时为

$$\tau = \frac{d\left[\frac{\varphi(\omega_c + \omega_e) - \varphi(\omega_c - \omega_e)}{2}\right]}{d\omega_e} = \frac{1}{2} \frac{d\varphi(\omega_c + \omega_e)}{d\omega_e} - \frac{1}{2} \frac{d\varphi(\omega_c - \omega_e)}{d\omega_e} = \frac{1}{2} \frac{d\varphi(\omega_c + \omega_e)}{d(\omega_c + \omega_e)} + \frac{1}{2} \frac{d\varphi(\omega_c - \omega_e)}{d(\omega_c - \omega_e)} = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}, \quad (7)$$

可知, 基于 OVNA 的方法, 通过矢量网络分析仪测试

链路的相位响应关于频率的导数, 可以得到光器件的延时量。

在实验中, 使用可调谐激光器 (Santec, TSL710)、强度调制器 (EOSpace, AX-DS5-10)、直流电压源 (Keithly)、矢量网络分析仪 (Keysight, N5242A)、高速光电探测器 (OPTILAB, PD-40-M) 和低噪声放大器 (南京全波微波电子科技有限公司, MWLA-1966) 搭建如图 1 所示的延时测试链路。在以下所有延时测量中, 为了提高测试系统的信噪比, 将激光器波长设置为 1560 nm (在 1560 nm 波长附近时延时线的插损最小), 矢量网络分析仪采用的频段为 8~12 GHz, 频率采集点数为 4001, 中频带宽为 10 kHz, 矢量网络分析仪输出的射频信号功率为 5 dBm。

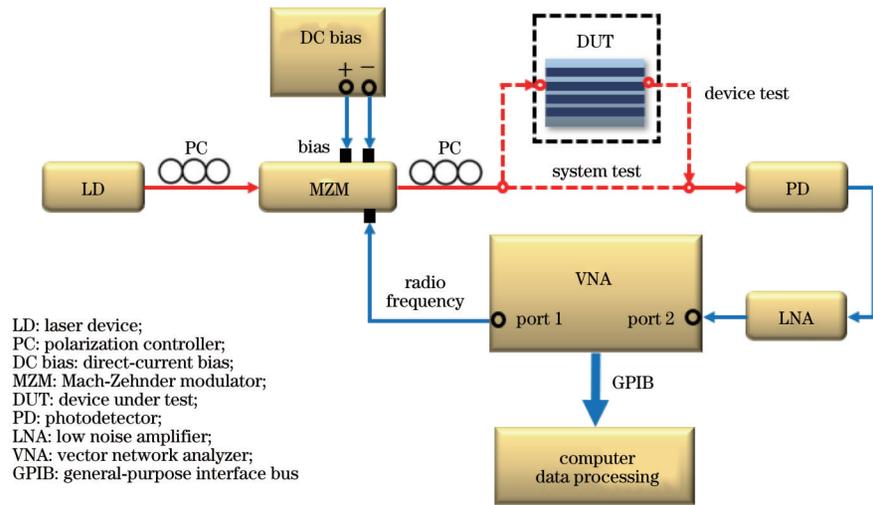


图 1 基于光学双边带调制的 OVNA 延时测试链路结构图

Fig. 1 Structural diagram of OVNA delay measurement link based on optical double sideband modulation

3 实验结果与分析

基于中国科学院微电子所硅光流片平台, 本课题组设计并制作了四通道 5-bit 硅基光开关切换延时线芯片, 该芯片由 4 条相同的延时线和 1 根参考直波导构成^[16]。待测试的光开关切换延时线芯片中每条延时线的结构如图 2(a) 所示, 由 6 个 2×2 的 MZI 型光开关与 5 组不同长度的延时光波导对级联而成, 其中 TP 为探测端口。连接 2 个光开关的公共光波导的长度为 $L = 500 \mu\text{m}$, 延时硅波导的截面尺寸为 $450 \text{ nm} \times 220 \text{ nm}$, 其基模的群折射率 n_g 的理论值为 4.12, 最小延时步进对应的光波导长度为 $\Delta L = 214.364 \mu\text{m}$, 对应的延时步进的表达式为

$$\Delta\tau = \frac{n_g \cdot L}{c}, \quad (8)$$

式中: c 为真空中的光速。由式 (8) 计算可得, 延时步进为 $\Delta\tau = 2.95 \text{ ps}$ 。同时, 在每两级光开关间的公共光波导处加入一个分光比为 99:1 的定向耦合器用于引出部分光信号, 对每级光开关的直通状态和交叉状态的电压进行标定。通过在光开关上加载直通状态的电压或交叉状态的电压来切换延时线中 6 个光开关的状

态, 可以在延时线中实现 32 种不同的传输路径, 即实现 $0 \sim 31\Delta\tau$ 共 32 种不同的延时状态。对于制备的参考直波导, 结构如图 2(b) 所示, 两端采用光栅耦合器作为光输入/输出端口。图 2(c)、(d) 分别为四通道 5-bit 硅基光开关切换延时线芯片的流片版图和芯片耦合封装模块图, 其中 TEC 和 NTC 分别为半导体制冷器和负温度系数热敏电阻。

首先通过改变激光器输出激光的光功率, 在不同射频增益下对 OVNA 延时测试链路、参考直波导和延时线 (控制延时线中光开关的状态, 使光载波沿着延时线的最短路径传播) 进行延时测试, 测试结果如图 3(a) 所示。可以看出, 测得的相对延时量随时间波动, 使用标准偏差来表征相对延时量波动的程度, 得到的射频增益 (G_{RF}) 与相对延时量标准偏差的关系如图 3(b) 所示。可以看出, 随着射频增益的降低, OVNA 延时测试链路、参考直波导和延时线的延时测量抖动增大、稳定性逐步恶化。以延时线为例, 当射频增益分别为 -28 dB , -34 dB , -40 dB , -46 dB 时, 延时线的相对延时量波动范围分别为 $-0.622 \sim 0.759 \text{ ps}$, $-1.008 \sim 0.732 \text{ ps}$, $-1.707 \sim 1.006 \text{ ps}$, $-2.790 \sim 1.883 \text{ ps}$, 相对延时量波动的标准偏差分别为 0.347,

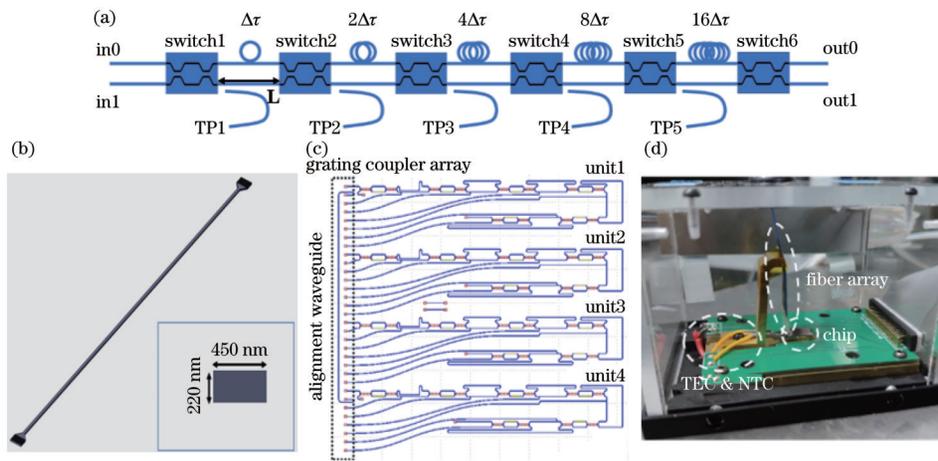


图2 硅基光开关切换延时线芯片和模块结构示意图。(a) 5-bit 光开关切换延时线结构示意图；(b) 参考直波导结构示意图；(c) 延时线芯片流片版图；(d) 芯片耦合封装模块图

Fig. 2 Structural diagrams of silicon based optical switching delay line chip and modules. (a) Structural diagram of 5-bit optical switching delay line; (b) structural diagram of alignment waveguide; (c) mask layout of delay line chip; (d) picture of chip coupling package module

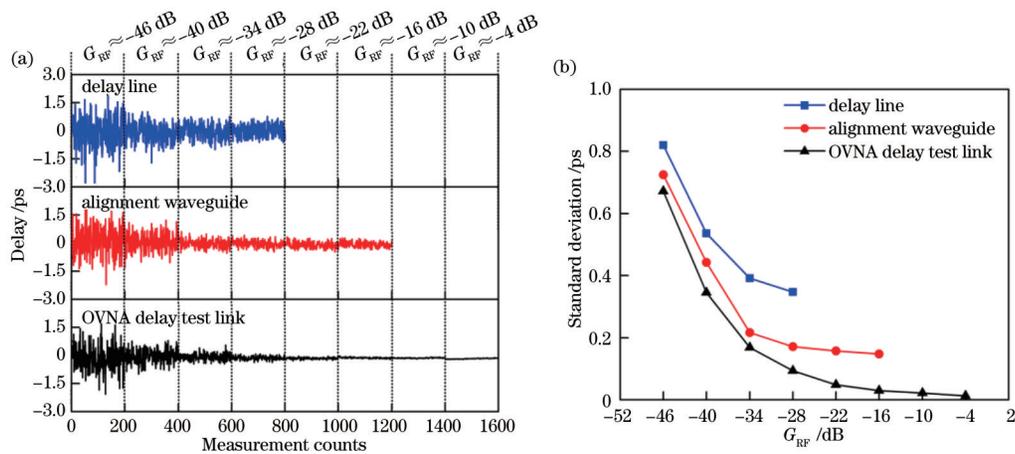


图3 OVNA 延时测试链路、参考直波导和延时线的相对延时量测试结果。(a) 相对延时波动与 G_{RF} 的关系；(b) 相对延时量波动的标准偏差与射频增益的关系

Fig. 3 Delay measurement results of OVNA delay test link, alignment waveguide and delay line. (a) Relation between delay fluctuation and G_{RF} ; (b) relation between standard deviation of delay fluctuation and G_{RF}

0.391, 0.536, 0.820 ps。当激光器输出激光的光功率固定时,测试系统的射频增益由器件的插损决定,器件的插损越大,射频增益越小。器件插损的增大会导致测试系统信噪比的恶化,从而影响延时测量的稳定性。

另外,由图3也可以看出,当射频增益一致时,OVNA 延时测试链路、参考直波导和延时线的延时测量稳定性是逐渐恶化的。为了排除芯片插损使信噪比降低的影响,将测试链路的射频增益调为一致,以射频增益为 $G_{RF} \approx -28$ dB 时为例,OVNA 延时测试链路、参考直波导和延时线的相对延时量波动范围分别为 $-0.377 \sim 0.077$ ps, $-0.479 \sim 0.281$ ps, $-0.622 \sim 0.759$ ps, 相对延时量波动的标准偏差分别为 0.093, 0.171, 0.347 ps。与 OVNA 延时测试链路相比,在参考直波导延时测量过程中,其两端光栅耦合器封装引起的干涉导致的相位波动增大了延时测量波动,降低

了测量的稳定性。同样,对比参考直波导和延时线,在相同的射频增益条件下,芯片插损的影响可以忽略,且延时线两端使用了与参考直波导相同的耦合光栅,因此耦合光栅封装引起的干涉影响也可忽略。除此之外,延时线中光开关有限的消光比将会导致延时线中非对称 MZI 结构的形成,这些额外干涉导致的相位波动将会进一步恶化延时测量的稳定性。综上所述,耦合光栅封装和延时线内部的非对称 MZI 结构引起的干涉是除了插损外,影响延时线芯片延时测量稳定性的主要因素。

为了验证耦合光栅封装和延时线内部的非对称 MZI 结构引起的干涉的影响,测试了 OVNA 延时测试链路、参考直波导和延时线在 1560 nm 波长附近的透射光谱,测试结果如图4所示。

由图4可以看出,OVNA 延时测试链路、参考直

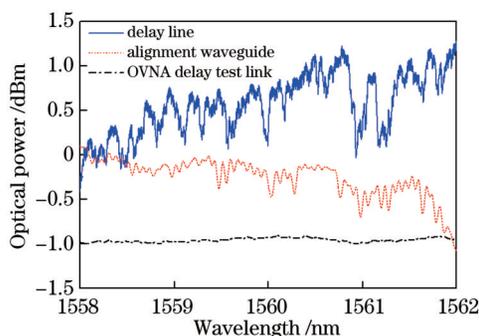


图4 OVNA 延时测试链路、参考直波导和延时线在 1560 nm 波长附近的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra of OVNA delay test link, alignment waveguide and delay line near wavelength of 1560 nm

波导和延时线的透射光谱的干涉程度依次增强。OVNA 延时测试链路在 1560 nm 波长附近的功率起伏不明显,约为 0.05 dB。参考直波导透射光谱在

1560 nm 波长附近的功率起伏增大,约为 0.3 dB。延时线透射光谱在 1560 nm 波长附近的干涉现象非常明显,功率起伏约为 0.7 dB。基于 OVNA 的延时测量方法是通过测量系统的相位响应来获得系统的延时量的,干涉导致的相位波动将导致延时测量稳定性恶化,进一步验证了耦合光栅封装和延时线内部的非对称 MZI 结构引起的干涉会使得延时线芯片延时测量稳定性恶化的结论。

最后,改变施加在光开关上的驱动电压,对延时线的 32 个延时状态的相对延时量进行连续测试。保持系统射频增益为 -28 dB,对延时线的 32 个延时状态的相对延时量均测试 10 次,测试结果如图 5(a) 所示。各延时状态下测试得到的 10 次延时量波动的标准偏差如图 5(b) 所示,波动范围为 0.148~0.414 ps,平均标准偏差为 0.2974 ps,各延时状态延时量波动的标准偏差接近,表明延时线延时波动的标准偏差大小与延时状态关系不大。

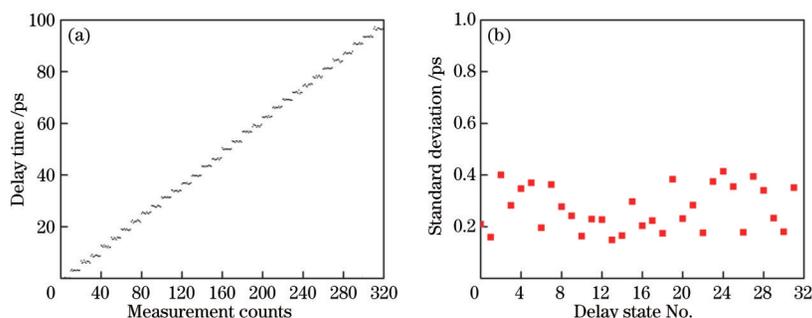


图5 5-bit 硅基光开关切换延时线芯片延时测量结果。(a) 32 个延时状态的相对延时量;(b) 32 个延时状态的延时量波动的标准偏差
Fig. 5 Delay measurement results of 5-bit silicon based optical switching delay line chip. (a) Relative delay values of 32 delay states; (b) standard deviations of delay fluctuations of 32 delay states

4 结 论

基于 OVNA 延时测试方法,对测试链路、参考直波导和延时线芯片的延时测量稳定性进行对比测试。测试结果表明,与传统的分立式光纤延时线相比,片上集成的光开关切换延时线芯片中芯片插损、光栅耦合器封装干涉、延时线内部残余非对称 MZI 将大大恶化 OVNA 延时测量的稳定性。对于硅光芯片端面水平对准的倒锥形耦合器,通过优化其结构可以实现更小的耦合损耗,且耦合损耗的波长相关性较小。采用绝缘体上硅(SOI)倒锥形端面耦合器可以一定程度地提高硅基光开关切换延时芯片的延时测量稳定性,但是倒锥形端面耦合器与光纤耦合封装后,其与光纤间形成的法布里-珀罗干涉和延时线芯片内部残余的 MZI 对延时测量稳定度的影响依旧存在。因此,除了降低芯片与光纤的耦合损耗,提高芯片内光开关的消光比以降低延时线芯片内部残余 MZI 和在封装过程中尽量减小光纤与芯片间的法布里-珀罗干涉强度也十分重要。降低芯片插损、降低封装导致的额外干涉和提高光开关消光比来降低延时线内部的干涉可以优化硅基光开关切换延时线芯片的延时稳定性,为该类芯片

的设计、加工和封装提供有益参考。

参 考 文 献

- [1] Zhuang L M, Roeloffzen C G H, Meijerink A, et al. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas. Part II: experimental prototype[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(1): 19-31.
- [2] Xie J Y, Zhou L J, Li Z X, et al. Seven-bit reconfigurable optical true time delay line based on silicon integration[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22707-22715.
- [3] Moreira R L, Garcia J, Li W Z, et al. Integrated ultra-low-loss 4-bit tunable delay for broadband phased array antenna applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(12): 1165-1168.
- [4] Chung C J, Xu X C, Wang G C, et al. On-chip optical true time delay lines featuring one-dimensional fishbone photonic crystal waveguide[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(7): 071104.
- [5] 申芳芳, 苏鑫鑫, 杨思成, 等. 基于反谐振波导微环的光控波束延时网络设计[J]. 光学学报, 2019, 39(2):

0213001.
Shen F F, Su X X, Yang S C, et al. Design of time delay network for optical beamforming based on anti-resonant waveguide micro-rings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0213001.
- [6] Maram R, Kaushal S, Azana J, et al. Recent trends and advances of silicon-based integrated microwave photonics [J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 13.
- [7] Yao J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [8] Tsokos C, Andrianopoulos E, Raptakis A, et al. True time delay optical beamforming network based on hybrid InP-silicon nitride integration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(18): 5845-5854.
- [9] Zhu C, Lu L J, Shan W S, et al. A silicon integrated microwave photonic beamformer[J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1162-1170.
- [10] Sancho J, Bourderionnet J, Lloret J, et al. Integrable microwave filter based on a photonic crystal delay line[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1075.
- [11] Wang J J, Ashrafi R, Adams R, et al. Subwavelength grating enabled on-chip ultra-compact optical true time delay line[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30235.
- [12] Goutzoulls A P, Davies D K, Zomp J M. Prototype binary fiber optic delay line[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(11): 1193-1202.
- [13] Zhou L J, Wang X Y, Lu L J, et al. Integrated optical delay lines: a review and perspective[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(10): 101301.
- [14] Zheng P F, Wang C Q, Xu X M, et al. A seven bit silicon optical true time delay line for Ka-band phased array antenna[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 5501809.
- [15] Chen Z L, Zhou L J, Chen J P. Analysis of a silicon reconfigurable feed-forward optical delay line[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 6(1): 6600111.
- [16] Zheng P F, Xu X M, Lin D D, et al. A wideband 1×4 optical beam-forming chip based on switchable optical delay lines for Ka-band phased array[J]. *Optics Communications*, 2021, 488: 126842.
- [17] Wang M G, Yao J P. Optical vector network analyzer based on unbalanced double-sideband modulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(8): 753-756.
- [18] Gifford D K, Soller B J, Wolfe M S, et al. Optical vector network analyzer for single-scan measurements of loss, group delay, and polarization mode dispersion[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(34): 7282-7286.
- [19] 徐雪朦, 郑鹏飞, 李静, 等. 基于光矢量网络分析的可调氮化硅微环延时测试研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1113001.
Xu X M, Zheng P F, Li J, et al. Delay test of tunable silicon nitride micro-ring based on optical vector-network analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1113001.
- [20] 潘磊, 丁玟, 陈萧恩, 等. 基于光采样的微波光子矢量网络分析仪设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(13): 1312002.
Pan L, Ding M, Chen X E, et al. Design of microwave photonic vector network analyzer based on optical sampling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(13): 1312002.
- [21] 欧阳竑, 王侠, 韦幕野, 等. 光纤延时测量技术研究[J]. *光电技术应用*, 2020, 35(4): 41-44.
Ouyang H, Wang X, Wei M Y, et al. Research on optical fiber delay measurement[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2020, 35(4): 41-44.
- [22] 梁旭, 瞿鹏飞, 张羽, 等. 宽温宽带高精度可调光纤延时线的设计与研究[J]. *半导体光电*, 2021, 42(3): 332-335, 341.
Liang X, Qu P F, Zhang Y, et al. Design and research of high-precision tunable wideband optical fiber delay line over wide temperature range[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(3): 332-335, 341.