

基于光矢量网络分析的可调氮化硅微环延时测试研究

徐雪朦, 郑鹏飞, 李静, 洪红, 杨惠敏, 张若虎, 恽斌峰*

东南大学先进光子学中心, 江苏 南京 210096

摘要 通过高频率分辨率的光矢量网络分析法测试氮化硅微环的相位特性可以实现对延时量的间接测试。但测试系统中的相位噪声、激光载波频率波动、信噪比等因素会影响氮化硅微环芯片延时谱的测量稳定度。实验分析这些因素对氮化硅微环延时谱测量的影响, 并通过测试系统优化和数据处理实现了延时分辨率为 10 ps、消光比分辨率为 0.04 dB 的高分辨率测量, 为氮化硅微环在微波光子波束形成系统中的测试及应用提供了重要的参考价值。

关键词 集成光学; 氮化硅微环; 光矢量网络分析; 延时; 波束形成

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1113001

Delay Test of Tunable Silicon Nitride Micro-Ring Based on Optical Vector-Network Analysis

Xu Xuemeng, Zheng Pengfei, Li Jing, Hong Hong, Yang Huimin,
Zhang Ruohu, Yun Binfeng*

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

Abstract The tunable delay of the silicon nitride micro-ring can be indirectly obtained by measuring the phase characteristics with the high-frequency resolution optical vector-network analysis method. However, the delay-spectrum-measurement stability of the silicon nitride micro-ring is seriously affected by some factors such as phase noise, laser-carrier-frequency fluctuation, and signal-to-noise ratio of the measurement system. This study experimentally analyzes these effects on the delay spectrum measurement of the silicon nitride micro-ring. By optimizing the measurement system and data processing method, a high-resolution measurement is achieved with delay and extinction ratio resolutions of approximately 10 ps and 0.04 dB, respectively. This work provides important reference value for the silicon nitride micro-ring measurement and paves the way for its applications in microwave photonic beamforming systems.

Key words integrated optics; silicon nitride micro-ring; optical vector-network analysis; delay; beam forming

OCIS codes 130.0250; 130.3120; 130.6750

1 引 言

可调光学延迟线是微波光子波束形成网络的关键元件。全通滤波器(如氮化硅可调谐微环)因其具有芯片占用空间小和延时连续可调的特性,更利于波束形成网络的集成化^[1-5]。而将微环延时单元用于波束形成之前,需要对延时调谐特性进行测量。目前,测试光器件的振幅及延时响应主要有基于波长扫描和频率扫描 2 种方式。其中基于波长扫描的方法,如干涉测量法^[6-7]和调制相移法^[8],受限于激光器的波长精度和波长稳定性,该方法分辨率较低(约几百 MHz),无法实现高分辨测量,文献[9]中的

微环延时测量的频率分辨率为 200 MHz。而基于频率扫描的方法,如基于光学单边带调制的光矢量网络分析(OVNA)^[10-16]法,因其高分辨微波频率扫描和高精度微波幅相检测,实验上证明可实现几十 kHz 的分辨率,理论上可实现亚 Hz 的分辨率,更适用于测试高 Q 值的器件,如相移光纤光栅^[17-18]。但是,目前报道的 OVNA 测试还存在几个难点:1)测量的几乎全是光纤器件,器件插入损耗较小,信噪比高,因此分辨率较高;2)测量的全部是振幅和相位响应,而没有针对延时测量的报道,这主要因为测试系统的相位噪声、激光载波频率波动、信噪比都将导致延时测量波动,从而大大降低了测试系统的延时分

收稿日期: 2019-05-06; 修回日期: 2019-06-24; 录用日期: 2019-07-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2201800)、江苏省自然科学基金(BK20161429)

* E-mail: ybf@seu.edu.cn

辨率。另一方面,对于可调氮化硅微环等集成芯片,其插入损耗通常远大于光纤器件的插入损耗,而且由于氮化硅光波导的传输损耗比硅波导低 1 个数量级(约 0.2 dB/cm),因此可以实现更高品质因子(约 $10^5 \sim 10^6$)的微环,从而实现更窄的带宽(百 MHz 量级),这些都进一步增大了高分辨测量难度。因此,基于 OVNA 的可调氮化硅微环片的高分辨延时测量需要深入研究,但是目前还没有相关报道。本文针对测试系统相位噪声、激光载波频率波动、信噪比等影响因素,通过测试系统优化和数据处理,实现对可调氮化硅微环的高分辨延时测量,延时和消光比测量分辨率分别达到 10 ps 和 0.04 dB。

2 OVNA 测试原理

实验采取的测量链路如图 1 所示,矢量网络分析仪输出的频率扫描射频信号驱动推挽型强度调制器得到光学双边带调制信号,该信号可表示为^[19]

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

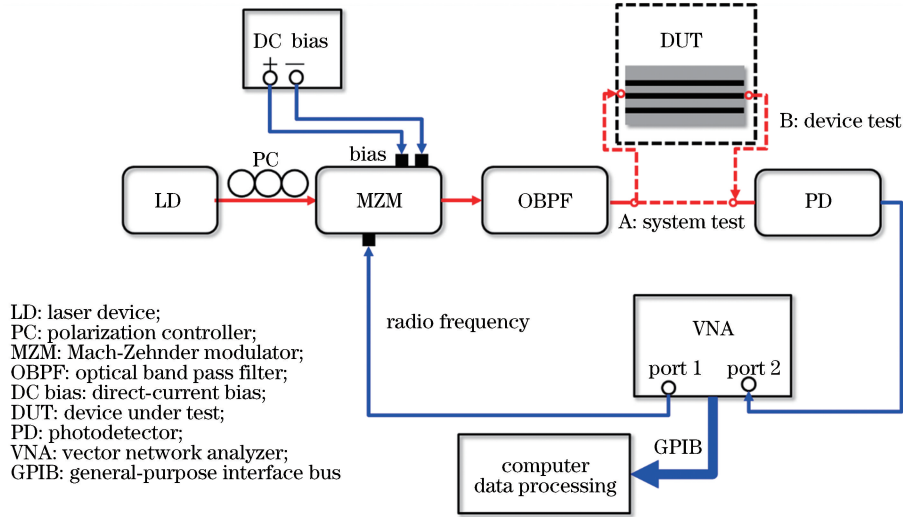


图 1 基于光学单边带调制的 OVNA 测试系统图

Fig. 1 Schematic of OVNA measurement system based on optical single sideband modulation

经可调谐滤波器滤除 -1 阶边带实现的光学单边带调制为

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

设待测光器件 (DUT) 的振幅衰减因子为

式中: E 为调制信号的电场, t 为时间, E_c 为光载波的振幅; ω_c 为光载波的频率; β 为相位调制系数; ω_c 为输入的射频频率; Φ 为直流偏置对调制器上下两臂产生的相位差; $\beta \cos(\omega_c t)/2$ 及 $-\beta \cos(\omega_c t)/2$ 分别为射频信号输入推挽型调制器后上下两臂产生的相移。

施加直流偏置使调制器工作在正交偏置点,则 $\Phi = \pi/2$ 。若忽略 ± 2 阶及以上的高阶边带,则 ± 1 阶边带及光载波的场分量表示为

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

式中: E_0, E_{-1}, E_{+1} 分别为光载波、-1 阶及 +1 阶的场分量; $J_0(\beta/2)$ 及 $J_1(\beta/2)$ 分别为第一类 0 阶和 1 阶贝塞尔函数。

$T(\omega)$, 相位传输因子为 $\varphi(\omega)$, 则器件的传输函数 $H(\omega)$ 为

$$H(\omega) = T(\omega) \cdot \exp[i\varphi(\omega)]. \quad (4)$$

则经 DUT 后,光电探测器转换得到的光电流 $I(\omega_c)$ 为

$$I(\omega_c) \propto T(\omega_c) T(\omega_c + \omega_c) \cos[\omega_c t + \varphi(\omega_c + \omega_c) - \varphi(\omega_c) - \pi]. \quad (5)$$

由(5)式可以得到射频信号经过微波光子链路后的相位变化 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \varphi(\omega_c + \omega_e) - \varphi(\omega_c) - \pi. \quad (6)$$

则射频信号经过测试链路后的延时为

$$\tau = \frac{d[\varphi(\omega_c + \omega_e) - \varphi(\omega_c) - \pi]}{d\omega_e} = \frac{d\varphi(\omega_c + \omega_e)}{d\omega_e} = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}. \quad (7)$$

同样地,考虑光电流的振幅项,记为 $A(I)$,由(5)式可得

$$A(I) \propto T(\omega_c)T(\omega_c + \omega_e). \quad (8)$$

将 $A(I)$ 对 ω_e 求导,可得

$$\begin{aligned} \frac{d[A(I)]}{d(\omega_e)} &\propto \frac{d[T(\omega_c)T(\omega_c + \omega_e)]}{d(\omega_e)} = T(\omega_c) \times \\ &\frac{d[T(\omega_c + \omega_e)]}{d(\omega_e)} = T(\omega_c) \times \\ &\frac{d[T(\omega_c + \omega_e)]}{d(\omega_c + \omega_e)} = T(\omega_c) \times \frac{d[T(\omega)]}{d(\omega)}. \end{aligned} \quad (9)$$

由(7)式及(9)式可得,基于光学单边带调制的OVNA法测得微波群延时、振幅响应与DUT的光学延时、振幅响应一致,即该方法可用于测试光器件的振幅及延时响应。

3 可调谐氮化硅微环延时测试

采用可调谐激光器(WSL-100)、偏振控制器、推挽型强度调制器(EOSpace-20 GHz)、可调谐带通滤

波器(santec,OTF-980)、矢量网络分析仪(Keysight N5242A)、光电探测器(FINISAR XPDV2120RA)、可编程电压源(Keithly)搭建如图1所示的测试链路,设置矢量网络分析仪输出射频功率为5 dBm,扫频范围为8~18 GHz,扫频点数为4001,激光器的输出波长为1550 nm,输出光功率为15 dBm,调制器和滤波器的插入损耗分别为3.5 dB和5 dB。基于荷兰Lionix公司的低损耗氮化硅光波导流片平台,设计并制作如图2所示的可调氮化硅微环,其中微环长度为3600 μm ,加热电极的长度为500 μm ,损耗因子 α 为0.9838。基于氮化硅的热光效应,通过改变该微环中heater上的电压(加在图2的A、B点)可以改变加热电极所在干涉臂波导的模式有效折射率,进而改变干涉仪上下两臂的相位差,两臂的光在定向耦合器2干涉后输出,使得定向耦合器2的分光比改变,即耦合系数 k 和透射系数 t_r 改变,从而实现消光比及延时调谐。首先对未接氮化硅微环的测试系统进行标定,然后接入氮化硅微环进行测试,从而得到氮化硅微环的振幅及延时响应谱。

首先对未接待测微环的测试链路进行测试,系统延时稳定性的测试结果如图3所示。可以看出,测试系统的相位噪声导致延时波动,测量延时值与平均值的偏差范围为-26.637~23.841 ps。

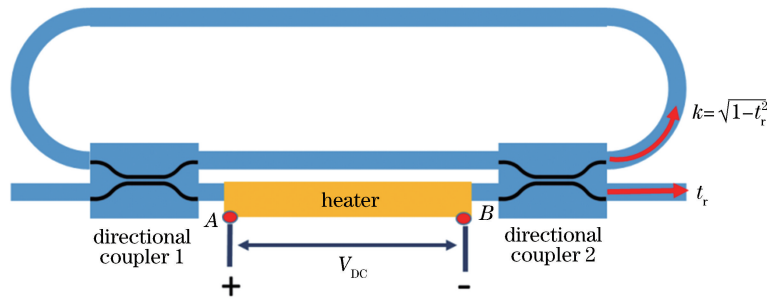


图2 可调氮化硅微环结构示意图

Fig. 2 Schematic of tunable silicon nitride micro-ring

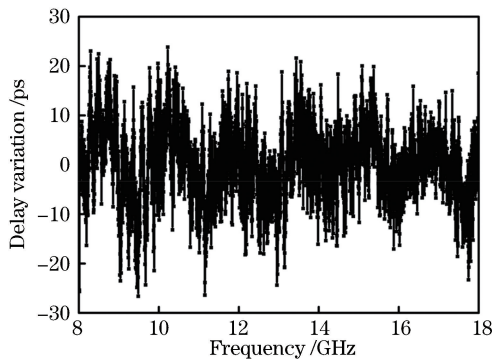


图3 实测OVNA系统延时值与平均值的偏差

Fig. 3 Variation between measured delay and average delay of OVNA system

由于延时测试受相位噪声的影响较大,提高测量稳定度方法中较为直接的方法是对多次测量的结果取平均。但是由于激光器输出波长具有不稳定性(激光器WSL-100的频率稳定度为 ± 0.25 GHz),多次测量的延时谱会出现如图4所示的谐振峰偏移的现象。若直接对多次测量的结果取平均则会引起较大的误差,如图5所示,谱线展宽及峰值降低明显。其中:纵坐标的归一化延时为实测延时量减去待测芯片两端的外接光纤(不包括在标定系统内)延时量后得到的绝对延时;由于谐振峰偏移的影响,单次测试与多次测量取平均的谐振峰的位置会有偏

差,为便于对比,将谐振频率归一化至同一频率下。下文中的归一化延时、归一化频率及归一化波长均可作此理解。

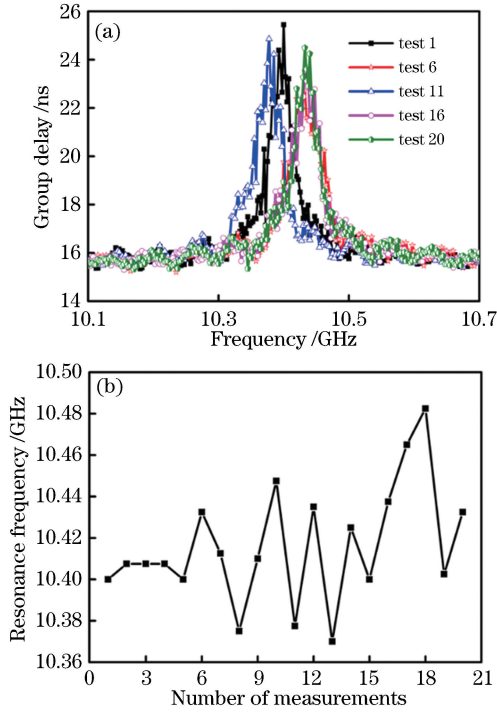


图 4 谐振峰偏移测试。(a)多次测试得到的微环延时谱;(b) 20 次测试得到的谐振频率波动
Fig. 4 Test of resonance peak deviation. (a) Micro-ring delay spectra of multiple measurements; (b) resonance frequency fluctuation of 20 measurements

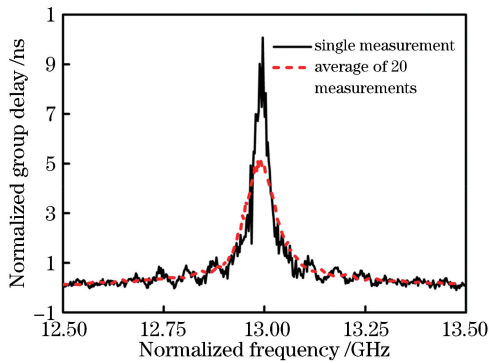


图 5 单次测量与 20 次测量平均的延时谱对比
Fig. 5 Comparison between delay spectrum of single measurement and average delay spectrum of 20 measurements

为降低激光波长不稳定带来的实验误差,先将多次测试得到的延时谱在频域对准后取平均,对准后的结果如图 6(a)所示,平均后得到的结果如图 6(b)所示。可以看出相比单次测试,多次测试后噪声明显下降,且延时值基本相同。

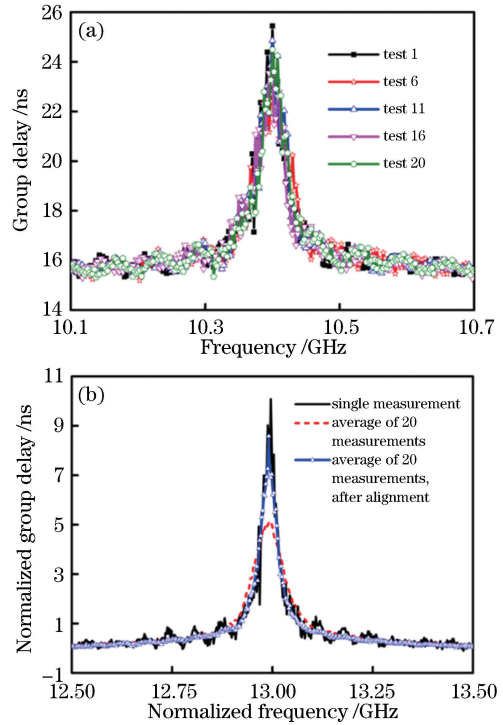


图 6 频域对准后的延时谱对比。(a)多次测量延时谱;(b)单次测试、20 次测试平均及 20 次测试并频域对准平均的延时谱

Fig. 6 Comparison of delay spectra after frequency-domain alignment. (a) Delay spectra of multiple measurements; (b) delay spectrum of single measurement, average delay spectrum of 20 measurements, and average delay spectrum of 20 measurements after frequency-domain alignment

为进一步降低延时测量噪声,采用 Savitzky-Golay 滤波拟合法对曲线进行平滑处理。同时,为验证 OVNA 测试结果的正确性,将 OVNA 测试得到的氮化硅微环振幅谱与安捷伦光波测试系统(LMS, Agilent 8164A, 波长分辨率 1 pm)测试得到的光谱图进行对比,如图 7(a)所示。可以看出 2 种方法测试得到的振幅谱基本一致,其中 S_{21} 为矢量网络分析仪测得的 S 参数,用于表征信号经过器件后被放大的倍数(或衰减量),即增益(或损耗)。在此基础上,结合微环传输矩阵模型^[20],对 LMS 测试得到的微环透射谱进行多参数拟合,结果如图 7(b)所示。并将拟合得到的微环损耗因子 α 、透射系数 t_r 、初始相位 φ_0 和耦合损耗 L_{loss} ,代入微环振幅传输函数得到相位谱,然后通过求导得到微环延时谱。OVNA 测试延时谱与拟合的延时谱对比如图 8 所示,从图中可以看出,经 OVNA 测试和数据处理后得到的延时谱与氮化硅微环的理论延时谱基本一致。

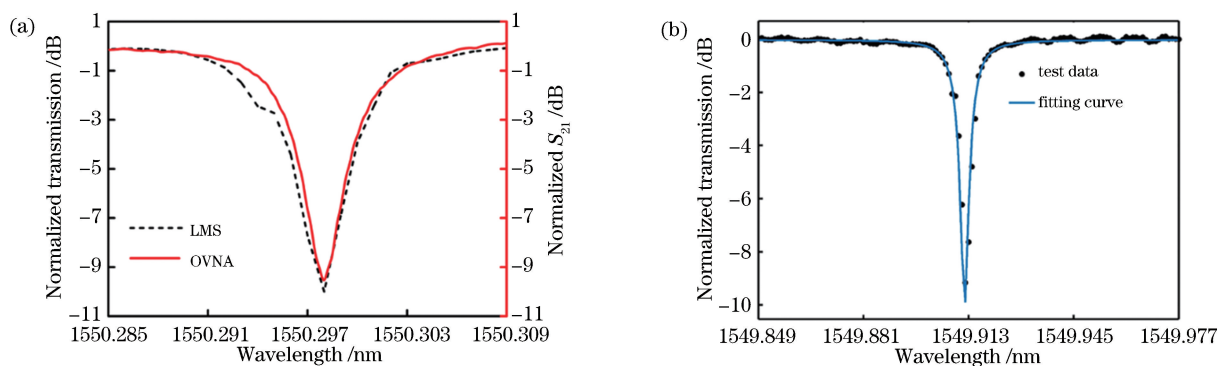


图 7 微环振幅谱测试及拟合。(a)光波测试系统(LMS)和 OVNA 测试得到的微环振幅谱;(b)微环透射光谱的拟合
Fig. 7 Measurement and fitting for micro-ring amplitude spectra. (a) Micro-ring amplitude spectra measured by LMS and OVNA; (b) fitting of micro-ring transmission spectrum

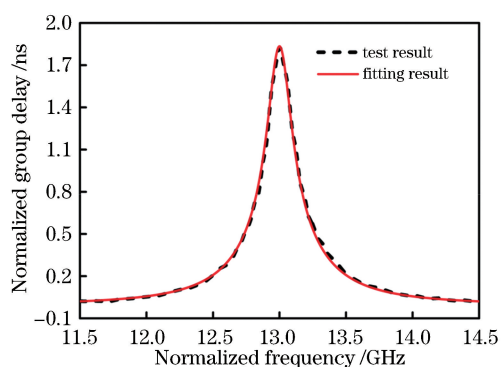


图 8 OVNA 测试得到延时谱与理论拟合延时谱对比
Fig. 8 Comparison of delay spectra obtained by OVNA measurement and theoretical fitting

为验证该测试系统的延时分辨率,对可调谐微环的驱动电极施加不同的驱动电压(1.11 ~ 1.19 V),并采用 LMS 和 OVNA 分析法分别进行了测试。LMS 测试得到不同驱动电压下的透射光谱如图 9(a)所示,对应的理论拟合延时谱,如图 9(b)所示。

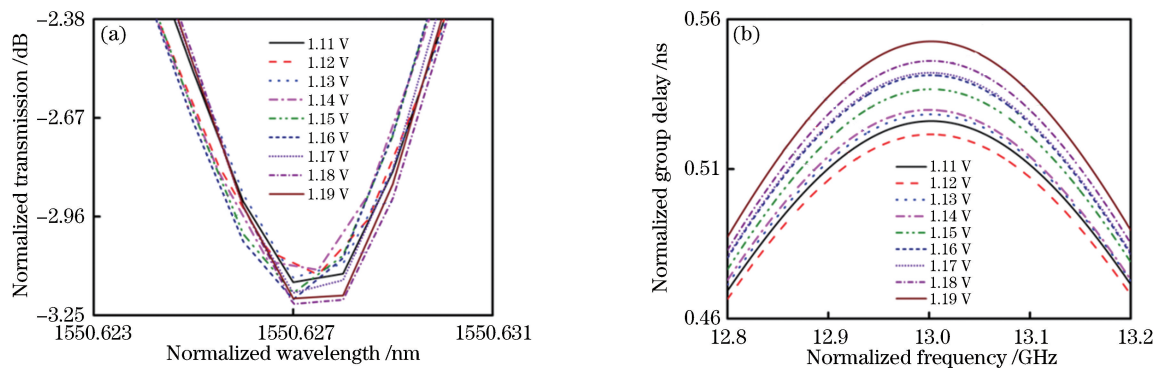


图 9 不同驱动电压下的微环透射谱及延时谱。(a) LMS 测得的微环透射光谱;(b)透射光谱对应的理论拟合延时谱
Fig. 9 Transmission and delay spectra of micro-ring under different driving voltages. (a) Micro-ring transmission spectra measured by LMS; (b) theoretical fitting delay spectra corresponding to transmission spectra

同理,利用 OVNA 法直接测试不同驱动电压下的归一化振幅响应谱,并将得到的消光比与 LMS 测试得到的消光比进行对比,结果如图 10(a)所示。另外,也将 LMS 测得微环透射谱对应的理论拟合延时量与 OVNA 法测试结果进行对比,如图 10(b)所示。从图中可以看出:1)2 种方法测试得到的结果具有相同的趋势,即微环消光比和延时量随驱动电压的增大而增加;2) LMS 由于频率分辨率不足,导致高 Q 值氮化硅的消光比随驱动电压变化产生非单调变化,测试误差较大,而 OVNA 法由于频率分辨率高,误差相对较小。图 10(b)中 OVNA 法测试得到的微环延时虽然整体变化趋势正确,但是局部产生了较大的非单调变化,这主要是测试微环的延时变化量很小,此时延时测试受测试系统噪声影响相对较大导致的,可以通过增大激光功率、降低器件插入损耗等方案改善;3)OVNA 法测试的消光比和延时分辨率分别达到了约 0.04 dB 和 10 ps。

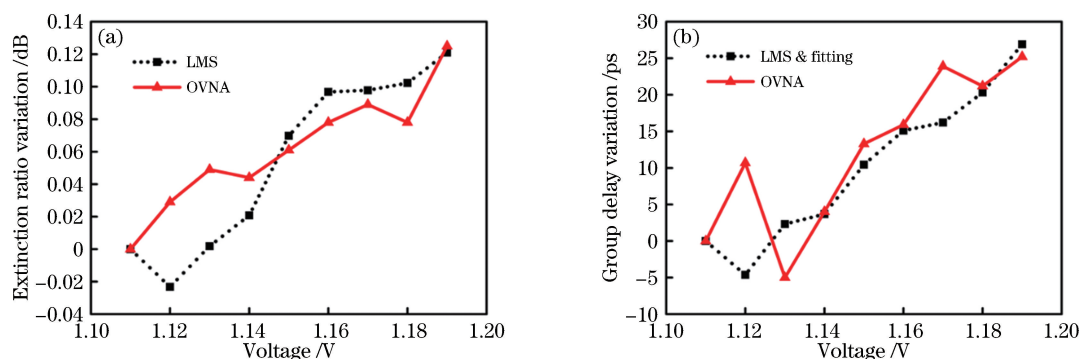


图 10 不同驱动电压下的消光比及延时测试。(a) LMS 和 OVNA 测得消光比;(b)理论拟合延时与 OVNA 测得延时
Fig. 10 Extinction ratio and delay measurement under different driving voltages. (a) Extinction ratio measured by LMS and OVNA; (b) delay obtained by theoretical fitting and OVNA measurement

4 结 论

基于光矢量网络分析法测量氮化硅微环芯片的延时,因受测试系统中的相位噪声、激光载波频率波动、信噪比等因素的影响,延时测试的稳定性较低。通过测试系统优化和数据处理,提高了氮化硅微环延时谱测试的信噪比,同时氮化硅微环消光比的测量分辨率高达 0.04 dB,延时量的测量分辨率高达 10 ps。

参 考 文 献

- [1] Xie J Y, Zhou L J, Zou Z, *et al.* Continuously tunable reflective-type optical delay lines using microring resonators[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 817-823.
- [2] Cardenas J, Foster M A, Sherwood-Droz N, *et al.* Wide-bandwidth continuously tunable optical delay line using silicon microring resonators [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26525-26534.
- [3] Liu Y, Wichman A, Isaac B, *et al.* Single ring resonator delays for integrated optical beam forming networks [C] // 2016 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 31-November 3, 2016, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2016: 321-324.
- [4] 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.
- [5] 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] van Wiggeren G D, Motamedi A R, Barley D M. Single-scan interferometric component analyzer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(2): 263-265.
- [7] 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.
- [8] Niemi T, Uusimaa M, Ludvigsen H. Limitations of phase-shift method in measuring dense group delay ripple of fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(12): 1334-1336.
- [9] Liu Y, Wichman A, Isaac B, *et al.* Tuning optimization of ring resonator delays for integrated optical beam forming networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(22): 4954-4960.
- [10] Román J E, Frankel M Y, Esman R D. Spectral characterization of fiber gratings with high resolution [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(12): 939-941.
- [11] Tang Z Z, Pan S L, Yao J P. A high resolution optical vector network analyzer based on a wideband and wavelength-tunable optical single-sideband modulator[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6555-6560.
- [12] Xue M, Pan S L. Influence of unwanted first-order sideband on optical vector analysis based on optical single-sideband modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(13): 2580-2586.
- [13] 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.
- [14] Pan S L, Xue M. Ultrahigh-resolution optical vector

- analysis based on optical single-sideband modulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(4): 836-845.
- [15] Li W, Liu J G, Zhu N H. Optical vector network analyzer with improved accuracy based on polarization modulation and polarization pulling [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1679-1682.
- [16] Li W, Sun W H, Wang W T, *et al.* Reduction of measurement error of optical vector network analyzer based on DPMZM [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(9): 866-869.
- [17] Xue M, Pan S L, Zhao Y J. Accurate optical vector network analyzer based on optical single-sideband modulation and balanced photodetection [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 569-572.
- [18] Xue M, Pan S L, Zhao Y J. Accuracy improvement of optical vector network analyzer based on single-sideband modulation [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3595-3598.
- [19] Devgan P S, Brown D P, Nelson R L. RF performance of single sideband modulation versus dual sideband modulation in a photonic link [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(9): 1888-1895.
- [20] Lenz G, Eggleton B J, Madsen C K, *et al.* Optical delay lines based on optical filters [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(4): 525-532.