

基于光频域干涉的并行矢量光谱测试系统

李国泉¹, 李文琦¹, 史上清^{1,2}, 张 杰^{2*}, 恽斌峰^{1*}

(1. 东南大学 电子科学与工程学院, 南京 210096; 2. 装备发展部某中心, 北京 100034)

摘 要: 针对传统光器件测试方法难以兼顾光矢量信息(振幅/相位)检测与高效率测试的问题, 文章提出并验证了基于光频域干涉技术的光器件并行光矢量测试系统。设计了空分复用与时分复用两种并行测试结构, 分别通过空间上的结构分离以及时间上的时域信息分离, 成功实现了对光纤环形腔、光纤光栅和微环谐振的幅相响应并行提取。测试结果与基于光学单边带调制的光矢量网络分析测试数据高度吻合, 且频率分辨率可达 6.8 MHz。实验结果表明, 两种方案均能通过单次扫描完成多个器件幅相响应同步测试与表征, 可显著提升多器件矢量光谱表征的测试效率。

关键词: 光频域干涉技术; 并行测试; 矢量表征; 光器件

中图分类号: O439; TN247 **文章编号:** 1001-5868(2026)04-0780-07

Parallel Vector Spectroscopy Test System Based on Optical Frequency-Domain Interferometry

LI Guoquan¹, LI Wenqi¹, SHI Shangqing^{1,2}, ZHANG Jie², YUN Binfeng¹

(1. School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, CHN; 2. A Certain Center of The Equipment Development Department, Beijing 100034, CHN)

Abstract: In this study, a parallel testing system for optical devices, based on optical frequency-domain interferometry (OFDI), is developed to address the challenge associated with traditional testing methods in balancing high testing efficiency with the detection of vector information (amplitude/phase). Space-division and time-division multiplexing are implemented as two parallel testing structures that respectively realize parallel extraction of cavity amplitude-phase responses of fiber ring resonators, fiber gratings, and microring resonators via structural separation in space and information separation in the time domain. The measured results are highly consistent with those measured by optical vector network analysis based on optical single-sideband modulation, and the frequency resolution of the proposed approach can reach a value of 6.8 MHz. The effectiveness of the system was validated experimentally, and the results show that both schemes can characterize amplitude/phase responses of multiple optical devices in a single scan, thus improving the efficiency of the testing process significantly.

Key words: optical frequency-domain interferometry; parallel testing; vector characterization; optical components

收稿日期: 2026-04-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62171118).

* 通信作者: 张 杰, 恽斌峰

0 引言

近年来,硅光子学与光子集成电路(Photonic Integrated Circuits, PIC)的飞速发展推动了光器件向高集成度与多功能化演进,同时也对其性能表征提出了更为严苛的要求^[1-3]。为了精准表征光器件的频率响应特性,需同时获取其幅度与相位响应^[4-6]。其中,幅度响应直接反映器件的透射或反射率,而相位响应则决定了群时延与色散等核心关键参数。然而,传统基于光谱分析仪或可调谐激光器扫描的测试手段主要侧重于幅度响应的测量,难以直接、精准地提取器件相位信息^[7-8]。相比之下,光频域干涉(Optical Frequency Domain Interferometry, OFDI)^[9]技术凭借扫频干涉机制,能够实现光器件幅相矢量信息的高精度提取,且兼具卓越的系统稳定性、较高的频率分辨率以及较低的成本,已成为复杂光子器件矢量表征的关键技术。

围绕基于OFDI技术的矢量表征系统,国内外研究人员在抑制激光器的频率调谐非线性与拓展表征带宽等方面开展了大量工作^[10-13]。在系统架构与非线性校准方面,研究提出集成干涉方案与三路干涉仪架构,利用片上触发干涉仪有效消除了激光扫频非线性的影响,成功实现了硅基微环谐振器等器件的幅相矢量表征^[14-15]。针对多器件的高效表征,基于频域分析的光矢量测量方案通过构建级联时延结构与去啁啾映射,实现了光器件幅相响应的同步提取^[16]。在芯片级自校准方面,基于Kramers-Kronig关系与分数阶延迟算法优化了相位恢复机制,实现了可编程光子集成电路的高效自校准^[17-18]。面向大带宽与多波段的测试需求,基于外腔半导体激光器与相移光纤法布里-珀罗腔的绝对频率标尺的表征方案,成功实现了超宽带的矢量光谱分析^[7];而在测试频段的进一步拓展上,结合倍频技术的测量机制则将矢量光谱的覆盖范围延伸至可见光波段^[19]。这些研究为复杂光电子器件向大规模、高精度表征迈进奠定了重要基础。然而,这些系统大都只能单次测量一个器件,严重限制了规模化应用的测试效率。

为了提高光器件的测试效率,本文基于非平衡马赫-曾德尔干涉器(Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer, AMZI)构建了进行光矢量表征分析的并行测试系统。通过空分复用与时分复用两种

结构成功实现了对光器件的多通道并行幅相矢量表征,极大提高了光器件测试效率。

1 系统架构与工作原理

1.1 基于空分复用的并行测试系统

光频域干涉技术因其高分辨率、低成本等优势,在光器件表征领域得到广泛应用。为进一步提升测试效率,本文基于AMZI构建了空分复用的并行测试系统,系统结构如图1所示。该系统由多个并行AMZI构成,分别为包含待测器件(Device Under Test, DUT)的DUT-MZI,以及用于激光频率扫描非线性校准的触发MZI干涉仪(Trigger MZI, TRIG-MZI)。可调谐激光器(Tunable Laser Source, Santec TSL-710)输出扫频激光信号,经过耦合器C0分别注入TRIG-MZI和DUT-MZI。TRIG-MZI用于生成触发干涉信号,实现TSL扫频非线性的频率校准。DUT-MZI由多个AMZI通过 $1 \times N$ 的分束器C1并联构成,DUT置入并联的AMZI中。为了实现并行光信号的同步采集,系统在DUT-MZI后配置多个平衡光电探测器(Balanced Photodetector, BPD, DPD200MA),不同AMZI产生的拍频信号被对应的BPD接收,并传输至数据采集卡(DAQ, National Instruments PXIe-4310)的不同通道,实现多通道的并行测试。

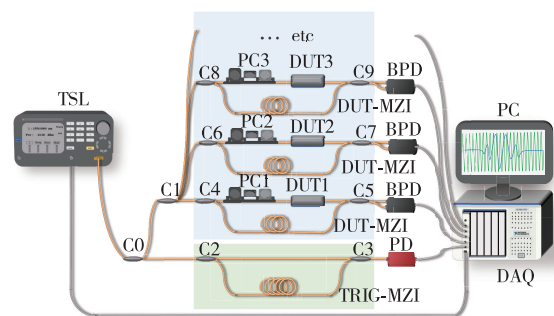


图1 基于空分复用的并行测试系统结构示意图

为阐明该系统获取器件幅相矢量响应的核心机制,可抽取DUT-MZI结构中的任意单一测试通道(如图2所示)进行理论分析。

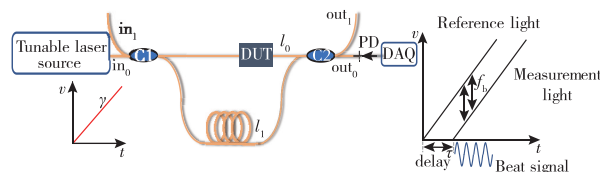


图2 AMZI结构示意图

在图2所示的AMZI中,不包含DUT的下臂的光场可表示为:

$$E_{\text{lower}} \propto \exp[i2\pi f_0(t-\tau) + i\gamma(t-\tau)^2/2] \quad (1)$$

式中, f_0 是初始光频率, γ 为激光器的调谐速率, τ 为AMZI两臂之间由于臂长差引入的时延差。包含DUT的上臂中光场则可以表示为:

$$E_{\text{upper}} \propto \exp[i2\pi f_0 t + i\gamma t^2/2 + i\varphi(t)] \quad (2)$$

式中, $\varphi(t)$ 为DUT引入的相移。因此,光电探测器的输出可以表示为:

$$I(t) \propto \text{Re}(E_{\text{upper}} E_{\text{lower}}^*) = A \cos[\gamma \Delta \tau \cdot t + \varphi(t)] \quad (3)$$

为提取DUT的相位信息 $\varphi(t)$, 通过希尔伯特变换构造解析信号, 提取复合相位 $\Phi(t)$, 即:

$$\Phi(t) = \gamma \Delta \tau \cdot t + \varphi(t) = -\arctan \frac{\mathcal{H}[I(t)]}{I(t)} \quad (4)$$

对于微环谐振腔(Micro Ring Resonator, MRR)、光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)等光器件而言, 在远离谐振的区域, 器件的相位响应项 $\varphi(t)$ 可视为常数, 对 $\Phi(t)$ 进行一次函数拟合, 可得到斜率 $\gamma \tau$ 。根据 $\varphi(t) = \Phi(t) - \gamma \tau \times t$ 便可提取相位 $\varphi(t)$, 通过频率校准后可得到DUT的相位响应 $\varphi(f)$ 。由此便可通过对DAQ采集到的各通道拍频信号进行处理, 实现多通道的光器件并行表征。

1.2 基于时分复用的并行测试系统

基于时分复用的并行测试系统结构如图3所示, 该系统采用四臂AMZI作为DUT-MZI, 各臂长度($l_0 \sim l_3$)不同, 使不同DUT的响应信号在时域上自然分离。TSL发出的扫频信号经C0分别注入DUT-MZI和TRIG-MZI。一路经C0传输至TRIG-MZI用于生成触发干涉信号, 实现TSL扫频非线性频率校准。另一路注入DUT-MZI中, 输入光经1×4耦合器C1分为四路, 分别通过不同长度($l_0 \sim l_3$)的光纤传输后, 在4×1耦合器C3处会束并产生拍频信号。各臂中可分别置入DUT, 实现器件的并行测试。单个BPD接收所有干涉信号, 经DAQ采集后, 通过信号处理在时域分离各DUT的响应。

为了阐明该系统获取器件幅相响应的机制, 现对图3的DUT-MZI进行理论分析。上述四臂AMZI包括四条不同的传播路径, 可以用一个四维矩阵形式来描述, 归一化的输入光场可通过矩阵表示为 $E_{\text{in}} = [1]$ 。假设1×4的光耦合器C0的输出端功率均匀分配, 且相邻端口具有固定的相位差 $\pi/2$, 那么传输矩阵可表示为:

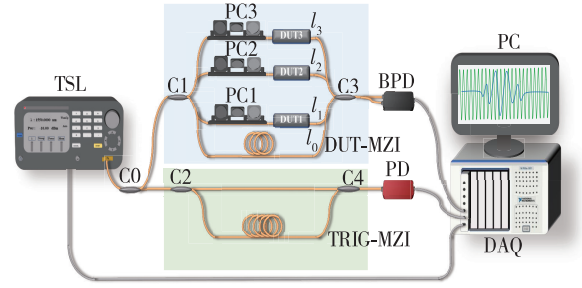


图3 基于时分复用的并行测试系统结构示意图

$$\hat{M} = \frac{\sqrt{\gamma}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ -1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, γ 表示耦合器功率传输系数, 四臂AMZI的四个臂中的光传输矩阵可表示为:

$$\hat{P}_{1,4} = \begin{pmatrix} e^{-\frac{\alpha l_0}{2}} e^{-i\beta l_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\alpha l_1}{2}} e^{-i\beta l_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\alpha l_2}{2}} e^{-i\beta l_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\frac{\alpha l_3}{2}} e^{-i\beta l_3} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, α 为光纤的衰减系数, β 表示光纤模式的传播常数。

根据传输矩阵建模, 可以得出四臂AMZI输出端的光场 E_{out} 为:

$$E_{\text{out}} = \hat{M}_{1,4}^\dagger \hat{P}_{1,4} \hat{M}_{4,1} E_{\text{in}} = \frac{\gamma}{4} \cdot \left[e^{-\frac{\alpha l_0}{2}} e^{-i\beta l_0} + e^{-\frac{\alpha l_1}{2}} e^{-i\beta l_1} + e^{-\frac{\alpha l_2}{2}} e^{-i\beta l_2} + e^{-\frac{\alpha l_3}{2}} e^{-i\beta l_3} \right] \quad (7)$$

由 $I = |E|^2$ 求得输出端的光场强度的大小, 包含四项直流项与六项交流项, 交流项为:

$$I_{\text{ac}} = |E_{\text{out}}|^2 = \sum_{i < j} 2\sqrt{P_i P_j} \cos[\beta(l_i - l_j)] \quad (8)$$

其中, $P_i = \gamma^2 e^{-\alpha l_i/2}/4$, ($i, j = 0, 1, 2, 3$) 此时得到的拍频信号如图4(a)所示, 并记 $I_{ij} = 2A_i A_j \cos[\beta(l_j - l_i)]$ 为第 i 条臂与第 j 条臂产生的拍频信号, 其中 $A_i = e^{-\alpha l_i/2}$ ($i = 0, 1, 2, 3$)。上述公式(8)的交流项共有六项, 分别表示每两条臂之间的光信号干涉, 对其中的交流项进行傅里叶逆变换可得:

$$\mathcal{F}^{-1}\{I_{\text{ac}}\} = \sum_{i < j} \sqrt{P_i P_j} [\delta(t - \tau_{ij}) + \delta(t + \tau_{ij})] \quad (9)$$

式中, τ_{ij} 为两臂之间的时延差。此时得到的时域响应示意图如图4(b)所示, 包含多个对称的时域峰, 时域中不同时延位置对应不同干涉臂的组合。通过设计合适的臂长便可在时域中将其分离。

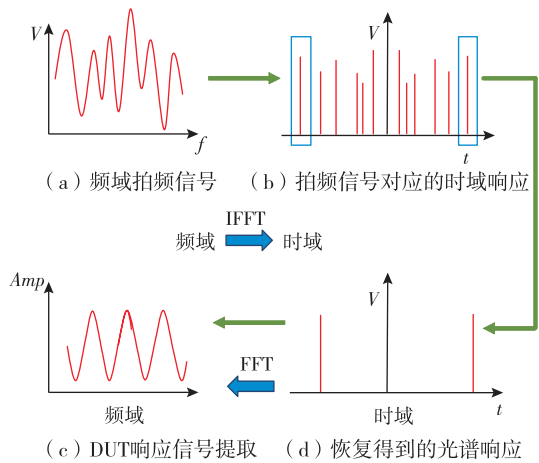


图4 时分复用原理示意图

如图4(b)~(c),通过将不同DUT在响应在时域上分开,并裁剪对应DUT的信息,随后按如图4(c)~(d)所示恢复待测器件的光谱响应。

以DUT1为例进行说明,需要对包含DUT1的臂(l_1)与参考臂(l_0)的拍频信号进行处理,引入DUT1的传递函数 $H_1(\lambda)$,即:

$$H_1(\lambda) = |H_1(\lambda)| \exp(-i\beta_1 l_{D1}) \exp[i\phi_1(\lambda)] \quad (10)$$

式中, l_{D1} 为DUT1的长度。对公式(9)中参考臂与DUT1所在臂产生的时延信号进行傅里叶变换便可得到:

$$\mathcal{F}\left\{\sqrt{P_0 P_1} [\delta(t - \tau_{01}) + \delta(t + \tau_{01})]\right\} = 2|H_1| \sqrt{P_0 P_1} \cos[\beta(l_{D1} + l_1 - l_0) + \phi_1(\lambda)] \quad (11)$$

通过公式(3)~(4)可得到DUT1的相位,DUT2与DUT3的相位信息获取方法同理。

2 系统功能验证

2.1 基于空分复用的并行测试系统功能验证

搭建图1所示的并行测试系统,实验中选择的各个DUT-MZI的长度差约为2 m,TRIG-MZI的长度差为30 m。此时,TRIG-MZI输出拍频信号的频率约为DUT-MZI输出拍频信号的频率的十倍,满足奈奎斯特采样准则,对应的系统频率分辨率约为6.8 MHz。

实验验证分为两部分:首先,对多个相同类型器件进行并行表征,以验证系统在一致性与重复性方面的性能;其次,对不同类型器件进行同步测量,以验证系统在多功能器件混合测试场景下的适用性。

2.1.1 相同器件并行测试

选取三个商用FBG(记为FBG1,FBG2,FBG3)作为待测器件置于图1所示基于空分复用的并行测试系统,且其中心波长均在1 550 nm附近,激光器设置扫频范围为1 549~1 551 nm,足以覆盖器件完整的光谱响应。

经OFDI并行测试系统测试得到的三个FBG的振幅与相位响应如图5(a)~(c)所示,其中黑线和红线分别为透射谱和相位响应,测试得到透射谱与FBG产品标称指标符合较好。

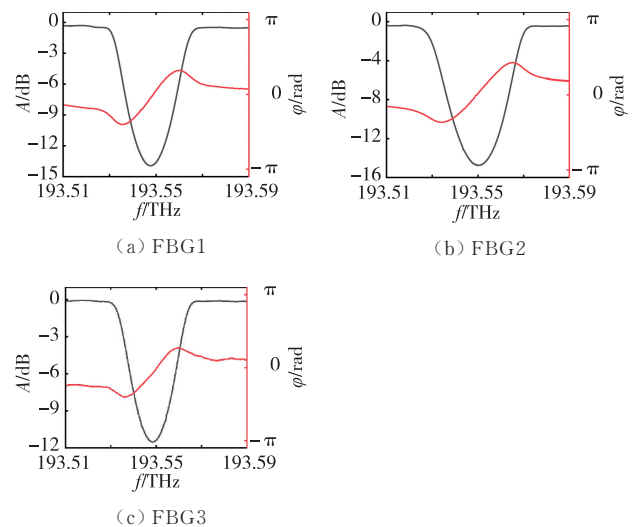


图5 测试得到FBG的光谱响应与相位响应

2.1.2 不同器件并行测试

选择光纤环形腔(Fiber Ring Resonator, FRR)与微环谐振腔(Micro-ring Resonator, MRR)作为DUT,置于图1所示的基于空分复用的并行测试系统中的两个测试通道,激光器设置扫频范围为1 549~1 551 nm。

测试得到FRR在193.525 9 THz频率附近的振幅与相位响应分别如图6(a)与图6(b)中黑线所示。为了验证OFDI并行测试系统测试结果的正确性,同时采用基于光学单边带(Optical Single Sideband, OSSB)调制的光矢量网络分析技术(Optical Vector Network Analyze, OVNA)对FRR的振幅和相位响应进行同步测试,结果如图6(a)和(b)中红线所示。可以看出,OFDI并行测试系统测得FRR的振幅和相位响应与OVNA测试结果相符合,这证明了所提方案的有效性。

同时,对另一个测试通道中的MRR进行了光矢量表征,结果如图7所示。图7(a)为测试得到的

透射光谱,共包含P1,P2,P3及P4四个谐振,它们的幅度和相位响应放大图分别如图7(b)~(e)所示。其中,P1和P3谐振处于“过耦合”状态,而P2和P4谐振处于“欠耦合”状态。并且,得益于系统的高频率分辨率(6.8 MHz),由于腔内顺时针和逆时针谐振模式耦合引起的模式劈裂现象也得到了有效的分辨。

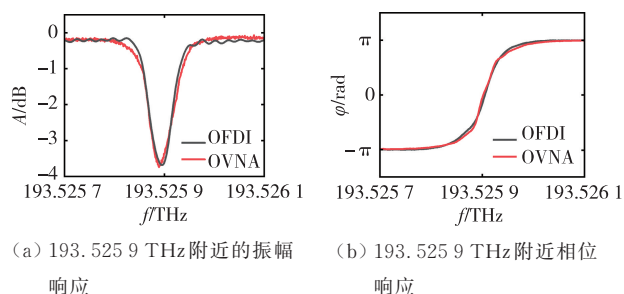


图6 FRR幅度/相位响应测试结果

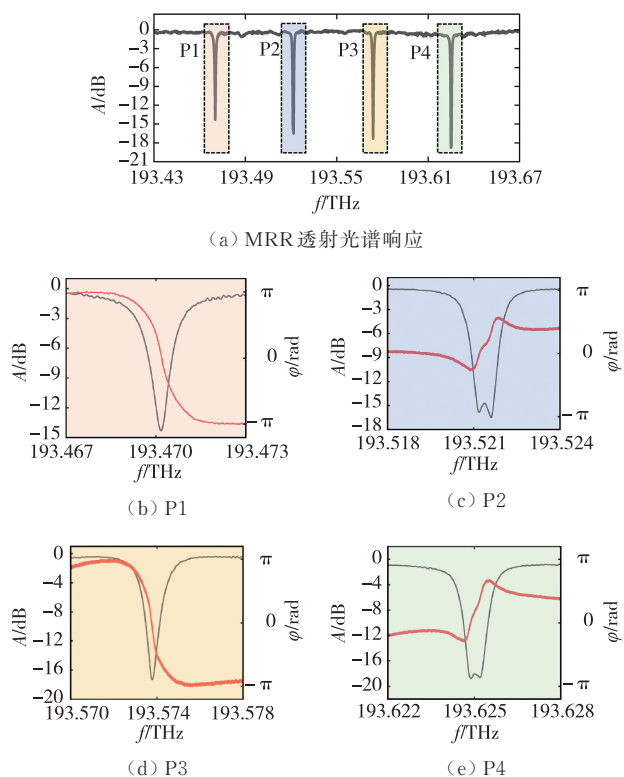


图7 MRR幅度/相位响应测试结果

2.2 基于时分复用的并行测试系统功能验证

搭建如图3所示的基于时分复用的并行测试系统,并对其进行实验验证。首先,对多个相同类型器件进行并行表征,以验证系统在一致性与重复性方面的性能;其次,对不同类型器件进行同步测量,以验证系统在多功能器件混合测试场景下的适用性。

2.2.1 相同器件并行测试

选择图3中DUT-MZI中四个臂的相对长度差分别为0 m,3 m,4 m,5 m,TRIG-MZI的长度差为 $\Delta l'=30$ m。选取三个中心波长均在1 550 nm附近的商用FBG作为DUT,激光器设置扫频范围为1 549~1 551 nm,足以覆盖器件完整的光谱响应。

测试得到如图8(a)所示的时域响应,可以观察到在时域内有多个关于时间 $t=0$ s对称的峰。为了清晰地提取并分析DUT信息,图8(a)中虚线标出正时域响应($t>0$)区域,并在图8(b)中进行了局部放大,在正时域响应内可以清晰地分辨出六个显著的时域响应峰(依次标记为T1~T6),每一个峰均代表了光信号在干涉仪中经历的特定传输路径。这与四臂AMZI中任意两臂相互干涉产生的六个干涉信号相吻合,并且相邻峰之间的时间间隔与AMZI的各个臂的相对长度相对应。根据上述设置的四个臂的长度可知,T4,T5,T6为包含DUT的响应,T1,T2,T3为无关干涉项的时域响应。通过提取时域响应内包含DUT的峰并进行处理,即可实现对多个DUT幅相响应的同步解调。

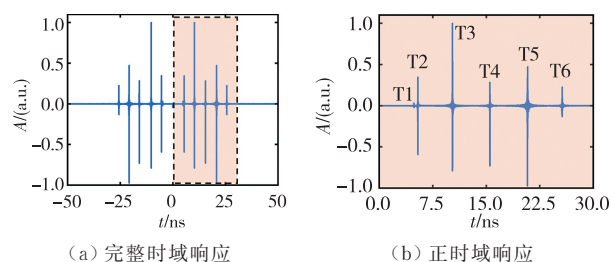


图8 时域响应

在时域上分别对T4,T5和T6这三个特征响应峰施加时间窗口进行信号提取,将分离后的时域信号重新进行傅里叶变换映射至频域,可重建出三个FBG的幅度/相位响应,如图9所示,与FBG产品标称指标符合得较好。

2.2.2 不同器件并行验证

采用一个FBG与一个MRR作为DUT,插入基于时分复用的并行测试系统中的两个DUT-MZI通道,并选择三个干涉臂的相对长度差分别为0 m,4 m,6 m,TRIG-MZI的长度差为 $\Delta l'=30$ m。

测试得到如图10(a)所示的时域响应,可以观察到在时域内有多个关于时间 $t=0$ s对称的峰。为了清晰地提取并分析DUT信息,图10(a)中虚线标出正时域响应($t>0$)区域,并在图10(b)中进行了局

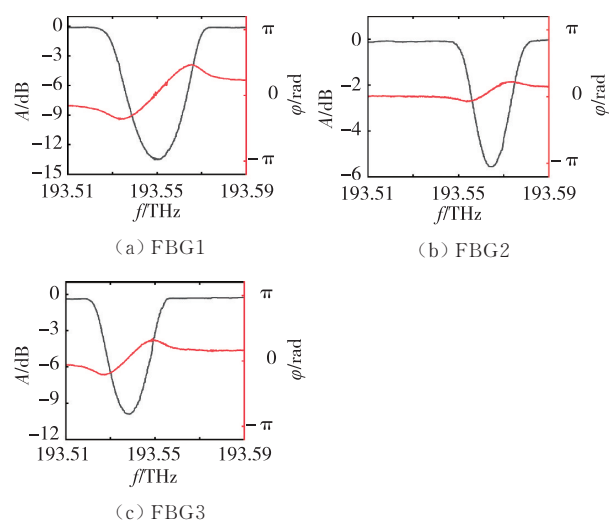


图9 幅度响应与相位响应

部放大。可以清晰地分辨出三个显著的时域响应峰(依次标记为T1,T2,T3),每一个峰均代表了光信号在干涉仪中经历的特定传输路径。这与三臂AMZI中任意两臂相互干涉产生三个不同的干涉信号相吻合,并且相邻峰之间的时间间隔应与AMZI的各个臂的相对长度相对应。根据上述设置的三个干涉臂的长度可知,T2,T3分别为包含FBG和MRR的时域响应,T1为无关干涉项的时域响应。

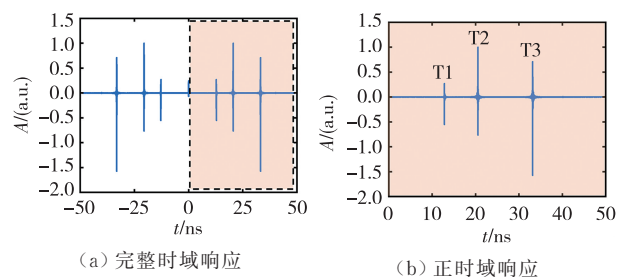


图10 时域响应

同理,对T2进行加窗信息提取和傅里叶变换后得到了FBG振幅和相位响应,如图11所示。

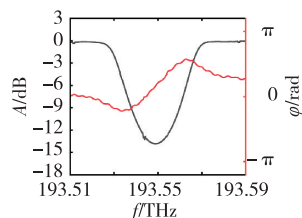


图11 FBG的光谱响应与相位响应

对T3进行加窗信息提取和傅里叶变换后得到了MRR振幅和相位响应,如图12所示。其中,图12(a)为透射光谱,共包含四个谐振,分别记为P1,

P2,P3和P4,图12(b)~(e)分别为P1~P4谐振的幅度和相位响应。其中,P1与P3均为“过耦合”状态,相位有着 2π 的跳变,P2与P4均为“欠耦合”状态。

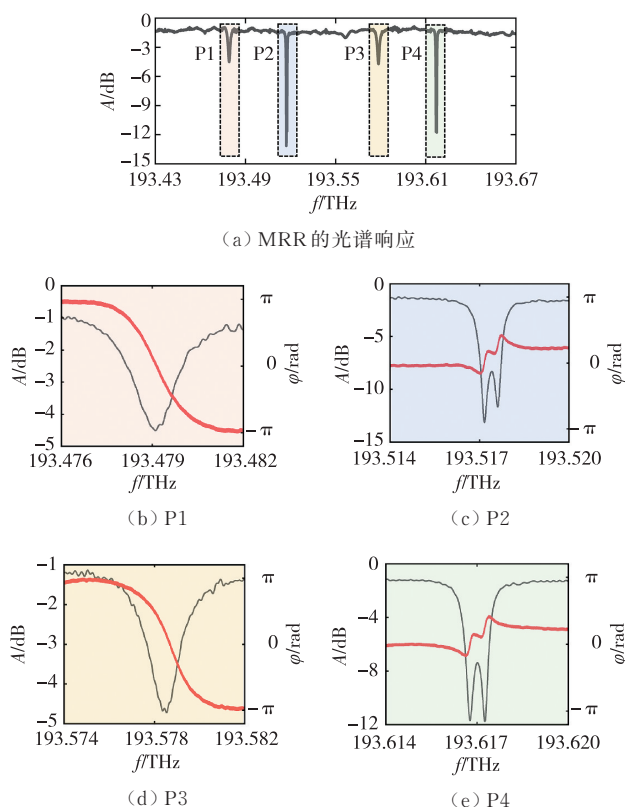


图12 MRR的光谱响应与相位响应

3 结论

本文提出了一种基于空分复用和时分复用的OFDI的并行测试系统。通过空间上的结构分离以及时间上的时域信息分离,成功实现了对光纤环形腔、光纤光栅、微环谐振腔幅相响应的多通道并行表征测试。与基于光学单边带调制的光矢量分析结果对比表明,两种测试系统的测试结果具有很高的吻合度,验证了该多通道测试系统的有效性和正确性。因此,本文提出的并行测试系统能准确实现多个光器件幅度与相位响应的同时表征,提高了光器件的测试效率,为未来复杂光子链路与大规模集成器件的高效表征提供了可行方案。

参考文献:

- [1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] Heck M J R. Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering

- [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(1): 93-107.
- [3] Sun C, Wade M T, Lee Y, et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light[J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 534-538.
- [4] Bulus Rossini L A, Costanzo Caso P A, Paulucci E, et al. Phase and amplitude measurements for high bandwidth optical signals[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(4): 403-408.
- [5] Hua S, Divita E, Yu S, et al. An integrated large-scale photonic accelerator with ultralow latency[J]. *Nature*, 2025, 640(8058): 361-367.
- [6] Wang J, Xu X, Zhang H, et al. Robust characterization of photonic integrated circuits[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(3): 2400942.
- [7] Luo Y H, Shi B, Sun W, et al. A wideband, high-resolution vector spectrum analyzer for integrated photonics[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 83.
- [8] Kawanishi T, Sakamoto T, Izutsu M. Fast optical frequency sweep for ultra-fine real-time spectral domain measurement[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(17): 999-1000.
- [9] 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.
- [10] He Z, Sun C, Xiong B, et al. Simple and accurate dispersion measurement of GaN microresonators with a fiber ring[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(8): 2182-2185.
- [11] Zhang X, Lin G, Sun T, et al. Dispersion engineering and measurement in crystalline microresonators using a fiber ring etalon[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(11): 2222.
- [12] Twayana K, Ye Z, Helgason Ó B, et al. Frequency-comb-calibrated swept-wavelength interferometry [J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 24363.
- [13] Feng Y, Xie W, Meng Y, et al. High-performance optical frequency-domain reflectometry based on high-order optical phase-locking-assisted chirp optimization [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(22): 6227-6236.
- [14] Bru L A, Pastor D, Muñoz P. Integrated optical frequency domain reflectometry device for characterization of complex integrated devices [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30000.
- [15] Bru L A, Pastor D, Muñoz P. Advanced and versatile interferometric technique for the characterization of photonic integrated devices [J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36503.
- [16] Wang B, Fan X, Zhao S, et al. Ultrahigh-resolution optical vector analyzer for multiple parallel measurements based on frequency-domain analysis[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2318-2321.
- [17] Xu X, Ren G, Feleppa T, et al. Self-calibrating programmable photonic integrated circuits [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(8): 595-602.
- [18] Xu X, Ren G, Dubey A, et al. Phase retrieval of programmable photonic integrated circuits based on an on-chip fractional-delay reference path [J]. *Optica*, 2022, 9(12): 1401.
- [19] Shi B, Zheng M Y, Hu Y, et al. A hyperfine-transition-referenced vector spectrum analyzer for visible-light integrated photonics[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 7025.

作者简介:

李国泉(2000—),男,河北省沧州市人,硕士研究生,研究方向为光频域干涉技术;

张杰(1993—),男,江苏省南京市人,工程师,主要从事光电子技术工程管理;

恽斌峰(1979—),男,江苏省常州市人,教授、研究员,主要从事微波光子技术与光电集成技术研究。