动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.001

宇称-时间对称光电振荡器技术研究进展

张　铮[1]，滕义超[2*]，张　品[3]，刘亚文[3]

（1. 陆军军事交通学院 汽车士官学校，安徽 蚌埠 233011；
2. 国防科技大学 气象海洋学院，长沙 410073；3. 陆军工程大学 野战工程学院，南京 210007）

摘　要： 随着微波技术的不断进步，提升本振信号源的频率稳定度及相位噪声指标的需求尤为迫切。光电振荡器技术因具备极低的相位噪声以及良好的频率拓展性吸引了研究人员的广泛关注。但光电振荡器内部的长距离光纤大量增加了输出信号的边带，如何解决单模输出与相位噪声之间的矛盾成了光电振荡器领域研究的热点。宇称-时间对称方法在保证输出信号相位噪声的前提下可极大地优化输出信号的边带抑制，受到国内外研究团队的广泛关注。文章在对宇称-时间对称光电振荡器的工作原理和特性进行阐述和分析的基础上，对国内外研究团队设计的宇称-时间对称光电振荡器结构和方案进行了总结，分析比较了各种方案的基本原理及性能指标，讨论了宇称-时间对称光电振荡器技术的未来发展方向。

关键词： 光电振荡器；单模振荡；频率调谐；宇称-时间对称

中图分类号： TN752　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0451－07

Research Progress of Parity-time-symmetric Optoelectronic Oscillator

ZHANG Zheng[1], TENG Yichao[2], ZHANG Pin[3], LIU Yawen[3]

(1. Motor Sergeant School, Army Military Transportation Academy, Bengbu 233011, CHN;
2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, CHN;
3. Field Engineering College, Army Engineering University, Nanjing 210007, CHN)

Abstract: With the continuous progresses of microwave technology, it is urgent to improve the frequency stability and phase noise index of microwave signal source. Optoelectronic oscillator has attracted wide attention because of its extremely low phase noise and good frequency expansibility. However, the sideband of the output signal is greatly increased by the long fiber inside the optoelectronic oscillator. The method to solve the contradiction between single-mode output and phase noise has become a hot topic in the field of optoelectronic oscillator. Parity-time-symmetry method can greatly optimize the sideband suppression of the output signal on the premise of ensuring the phase noise of the output signal. Based on the description and analysis of the working principle and characteristics of parity-time-symmetric optoelectronic oscillator, the structure and schemes of parity-time-symmetric optoelectronic oscillator designed by domestic and foreign research teams are summarized, and the basic principles and performance indicators of various schemes are analyzed and introduced. And the future development directions of parity-time-symmetric optoelectronic oscillator technology are discussed.

Key words: optoelectronic oscillator; single mode oscillation; frequency tunable; parity-time-symmetric

收稿日期：2021－05－10.
基金项目：国防科技创新特区资助项目.
* **通信作者：**滕义超

0 引言

现阶段，雷达、通信以及电子战等微波系统通常使用一个本振信号源为系统提供高稳时间频率信号[1-3]。本振信号源需要保证具备良好的频率稳定度及相位噪声性能，而频率稳定度与相位噪声通常需要保证振荡器信号源具有较高的品质因数(Quality Factor，Q 值)[4]。传统的电子学本振信号源通常使用晶体振荡器，但其输出信号频率范围不大于 100 MHz[5]。为了产生高频微波毫米波信号，通常对晶体振荡器产生的信号进行倍频，倍频过程不可避免地会恶化信号的相位噪声性能[6]。

高频信号难以保证较低的相位噪声，为此，有研究团队提出基于低温蓝宝石晶体振荡器的微波产生方法[7]。该方法可以较好地平衡信号频率与相位噪声之间的关系，产生高频低相位噪声微波信号，但该方法需要低温冷却系统，实际应用场景受到明显限制。

随着光纤技术与光电子技术的发展，研究者们发现使用光学技术也可以有效实现微波毫米波信号的产生，具体包括“光注入锁定(Optical Injection Locked)[8]”、“光锁相环(Optical Phase Locked Loop)[9]”、“双波长激光器(Dual Wavelength Laser)[10]”、“外调制技术(External Modulation)[11]”以及“光电振荡器(Optoelectronic Oscillator，OEO)[12-17]”等研究方案。

其中，光电振荡器是一种将微波与光相结合的系统，该系统具有正反馈环路，由于环路中使用了长距离、低损耗的光纤，使用 20 km 的光纤只引入 4 dB 的插入损耗，该损耗可通过放大器实现补偿。长距离光纤保证了振荡器反馈环路的高 Q 值，进一步能够产生高频低相位噪声微波信号。自 1996 年首次提出光电振荡器以来[12]，研究人员已经通过多种方法来降低光电振荡器输出信号的相位噪声。在文献[13]中，光电振荡器输出的 10 GHz 信号相位噪声低至 −163 dBc/Hz@6 kHz。实验证明，提高光纤长度可以有效降低输出信号的相位噪声，但长距离光纤会使得输出信号存在大量紧密排列的纵模，模式间隔与光纤长度成反比[12]。当腔长为 10 km 时，输出信号的模式间隔仅为 20 kHz，为了抑制其他纵模信号的产生，腔体中滤波器的 Q 值需要大于 10^9，这使得光电振荡器难以实现稳定的单模振荡输出。为了提高光电振荡器输出信号的边模抑制比，可以利用游标效应，将传统光电振荡器的单一环路变为多个环路[14-17]，光电振荡器的输出信号需要同时满足多个环路振荡条件，整个光电振荡器的 Q 值由最长的反馈回路确定，而模式间隔由最短的反馈回路确定。因此在保证较低相位噪声的同时，可以抑制其他边带信号的产生。通过在 OEO 中使用双环结构，可以将模式间隔提高 10^3 倍[15]。但是，多回路 OEO 的结构较复杂，这将严重影响操作的稳定性。

2014 年以来宇称-时间(Parity-Time，PT)对称技术已被证明是振荡器中模式选择的简单而有效的解决方案，在集成光学环形激光器领域[18-20]，通过使用两个几何尺寸相同但增益相反的耦合谐振腔，即一个谐振腔中的增益等于另一个谐振腔的损耗，可以实现 PT 对称。通过控制两个谐振器之间的增益、损耗和耦合比，可以打破特定模式的 PT 对称性，与其他模式相比，PT 对称性具有更高的增益，可以实现稳定的单模式振荡。

在上述研究的基础上，2018 年加拿大渥太华大学姚建平研究团队首次提出宇称-时间对称光电振荡器(Parity-Time-Symmetric Optoelectronic Oscillator，PT-Symmetric OEO)，有效解决了输出信号低相位噪声与单一模式输出之间的矛盾[21]。近年来，国内外研究团队针对 PT-Symmetric OEO 方案开展了广泛深入的研究，本文重点对 PT-Symmetric OEO 技术相关的研究进展进行总结，首先介绍了 PT-Symmetric OEO 的基本原理，接着对国内外研究团队提出的其他 PT-Symmetric OEO 方案相关研究进展进行介绍，最后讨论了 PT-Symmetric OEO 未来的发展趋势。

1 宇称-时间对称光电振荡器结构与原理

2018 年，姚建平研究团队首次提出了 PT-Symmetric OEO，其基本原理是通过使用两个反馈环路来实现 PT 对称性，其中一个环路具有增益，而另一个环路具有相同幅度的损耗，此时 OEO 的环路总增益为 0。通过控制反馈环路的增益、损耗和耦合比，可以打破振荡模式的 PT 对称性，在环路总增益尽可能小的条件下实现单模振荡信号输出。

该方案的基本结构如图 1 所示，激光器用于产生光载波信号，光信号通过偏振控制器耦合到

MZM 调制器中。被调制光信号送入单模光纤中传输，为了实现 PT 对称性，将光纤输出的信号送入偏振分束器按照偏振方向分为两部分，构建了两个结构相同且相互耦合的反馈环路，在光电探测器前端加入光可调延迟线，延迟线的长度等于微波信号波长的一半，使得其中一个环路具有增益，另一个环路具有相同幅度的损耗。通过将调制后的光信号在双平衡探测器中分别检测为两个偏振方向的信号，构成两个结构相同、增益相反的反馈环路。拍频得到的两路微波信号合并放大反馈到 MZM 调制器，如图 1 所示。

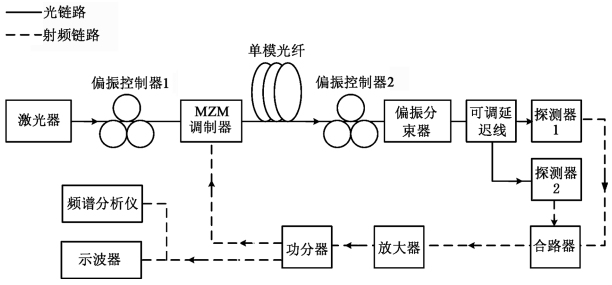


图 1　姚建平研究团队 2018 年提出的 PT-Symmetric OEO 结构方案

在 PT 对称的情况下，两个环路的增益和损耗大小相等。通过调整偏振控制器 2 来破坏环路存在的 PT 对称性，使得环路总增益略大于 0，这仅能保证具有最高增益的模式振荡，同时其他模式的环路增益小于 0，将被抑制，确保了 OEO 实现单模振荡输出。振荡输出信号工作在增益最高模式下，由于增益和损耗环路的长度相同，系统处于 PT 对称状态，PT 对称系统的本征频率可以写成：

$$\omega_n^{(1,2)}=\omega_n+\mathrm{i}\frac{\gamma_{a_n}+\gamma_{b_n}}{2}\pm\sqrt{\kappa_n^2-\left(\frac{\gamma_{a_n}-\gamma_{b_n}}{2}\right)^2} \tag{1}$$

其中，a_n 和 b_n 分别是增益和损耗环路中第 n 个模式的幅度；ω_n 是两个没有 PT 对称耦合环路的纵模第 n 个本征频率；κ_n 是第 n 个模式的两个回路之间的耦合系数；γ_{a_n} 和 γ_{b_n} 分别代表第 n 个模式的增益环路和损耗环路的增益系数和损耗系数。

当调节偏振控制器 2 满足 PT 对称性条件，即 $\gamma_{a_n}=-\gamma_{b_n}=\gamma_n$ 时，式(1)可简化为

$$\omega_n^{(1,2)}=\omega_n+\sqrt{\kappa_n^2-\gamma_n^2} \tag{2}$$

从式(2)可以看出，当增益系数大于耦合系数时，即 $\gamma_n>\kappa_n$，两个环路表现出破坏的简并性，产生了一对共轭振荡模和衰减模，本征频率裂变为虚数，该模式对频率简并，即实现了单模振荡，此时该模式处于 PT 破缺状态。当增益系数小于耦合系数，即 $\gamma_n<\kappa_n$，任意一对本征模式都会发生有界中性振荡，该模式存在模式劈裂现象，此时该模式处于 PT 非破缺状态。

假设只有具有最大增益系数的第 0 个模式处于 PT 破缺状态，即 $\gamma_0>\kappa_0$，所有其他模式均处于 PT 非破缺状态，即 $\gamma_n<\kappa_n$，此时，只有第 0 个模式是一对共轭振荡模和衰减模，频率发生简并，实现单模振荡。而其他模式均发生有界中性振荡，并存在模式劈裂现象。所以只有第 0 个模式发生振荡，而其他模式均被抑制，保证了 PT 系统实现单模振荡。

姚建平研究团队对图 1 的 PT-Symmetric OEO 结构进行了实验验证，光信号的中心波长为 1 550 nm，光功率为 16 dBm，MZM 调制器工作在偏置正交点，环路中光纤长度为 9.1 km。

通过调整偏振控制器 2 来确保第一个环路具有增益，而第二个环路具有相同的损耗。分别测试光纤长度为 20.31 m，433.1 m 和 9.166 km 的光电振荡器输出信号，光纤长度分别对应的模式间隔为 10.26 MHz，481.0 kHz 和 22.73 kHz。对于具有三种不同环路长度的 PT 对称结构，OEO 均可实现稳定的单模振荡信号输出。OEO 产生微波信号的频率为 9.867 GHz。

图 2 为 OEO 产生的微波信号的频谱数据。当 PT 对称性不存在时，OEO 会产生多模振荡信号，通过调整偏振控制器 2，使两个环路中的增益和损耗大小相同，满足 PT 对称条件，可以实现 9.166 km 的长环路光纤的单模振荡。

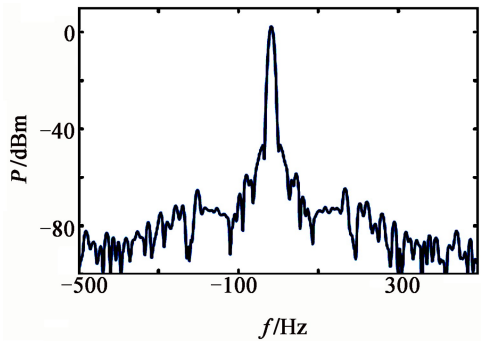


图 2　PT-Symmetric OEO 产生的微波信号的频谱数据

进一步将测量带宽减小到 1 kHz，可以看出，输出微波信号的带宽极窄，受限于频谱分析仪的测量精度，PT-Symmetric OEO 输出的微波信号带宽可能小于频谱分析仪的测量精度。同时，在 10 min 的

测量时间中，微波信号的频率漂移小于 100 Hz，输出信号频率稳定度较高。

PT-symmetric OEO 输出的微波信号相位噪声如图 3 所示。在 10 kHz 的偏移条件下，相位噪声为 −142.5 dBc/Hz。由 OEO 输出信号的相位噪声峰值可以推出其模式间隔为 22.73 kHz。与其相比，微波信号发生器(Agilent E8254A)和较短光纤环路条件下，对 PT-Symmetric OEO 产生的 9.876 GHz 信号的相位噪声也进行了测量，两个较短光纤环路长度分别为 20.31 和 433.1 m。在 10 kHz 的偏移条件下，20.31 和 433.1 m 环路长度的 OEO 的相位噪声分别为 −92.94 和 −103.4 dBc/Hz。腔长为 9.166 km 的 PT-Symmetric OEO 的相位噪声比微波信号发生器低 26.6 dB。

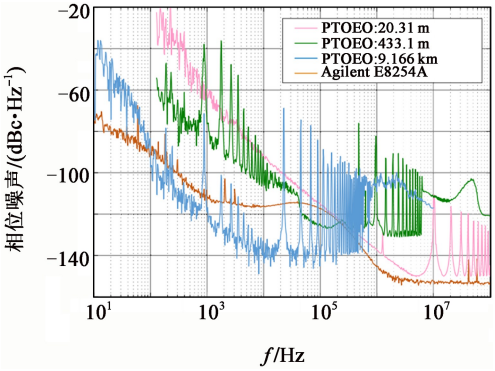


图 3 PT-Symmetric OEO 输出的微波信号相位噪声

2 其他宇称-时间对称光电振荡器方案介绍

2.1 基于受激布里渊散射效应的频率宽带调谐 PT-Symmetric OEO 方案

2019 年，华中科技大学张新亮研究团队提出了一种基于受激布里渊散射效应的频率宽带调谐 PT-Symmetric OEO 结构[22]，该结构如图 4 所示。在该结构中，只有选择的模式可以打破 PT 对称性输出信号，而其他模式既不衰减，也不增长。通过受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering，SBS)实现频率可调的微波光子滤波器，通过选择不同的模式来打破 PT 对称性，可以调谐 OEO 的振荡输出频率。

与图 1 方案类似，该方案也通过偏振分束与双平衡探测器结构来满足振荡器的 PT 对称性。通过精确控制耦合腔内的增益、损耗和耦合比，保证仅有的峰值增益模式可以打破振荡器的 PT 对称性，进而实现光电振荡器单模振荡输出。

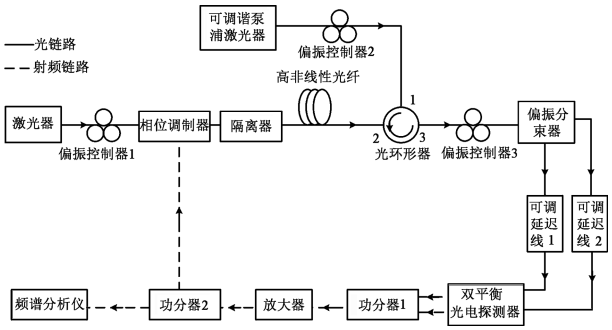


图 4 基于受激布里渊散射效应的频率宽带调谐 PT-Symmetric OEO 结构

此外，该方案使用频率调谐的微波光子滤波器具有较高的 Q 值，可以进一步增强选定的模式与 PT 对称系统中其他模式之间的增益差，与没有使用微波光子滤波器的 PT-Symmetric OEO 相比，该方法使得选定的模式更容易振荡。同时，与不具有 PT 对称性的情况相比，该方案的输出信号功率更加集中，最大输出功率提高了 12.91 dB。

研究团队根据图 4 的方案开展了相关实验，实验结果如图 5，6 所示。由于 PT 对称性具有良好的模式选择性，在 1 km光纤长度的条件下，实验在

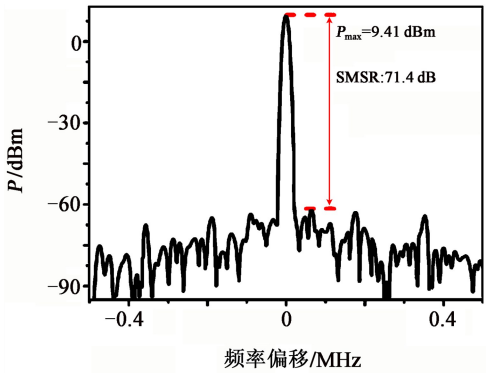


图 5 基于受激布里渊散射效应的频率宽带调谐 PT-Symmetric OEO 产生的 17.74 GHz 微波信号频谱

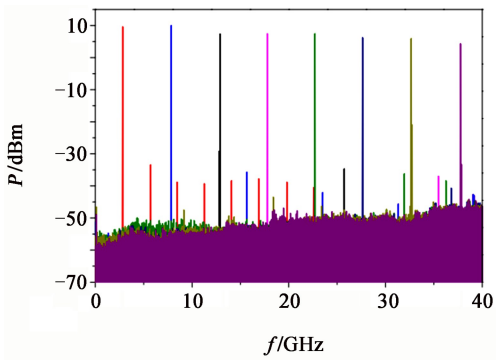


图 6 基于受激布里渊散射效应的频率宽带调谐 PT-Symmetric OEO 输出信号频率调谐过程

17.74 GHz 频率下获得 71.4 dB 的边模抑制比(Side Mode Suppression Ratio,SMSR)的单模微波信号。通过调节微波光子滤波器的中心频率可以选择不同的输出模式,实验中实现光电振荡器输出频率在 2.6～40 GHz 范围内调谐。

2.2　基于双平行马赫-曾德尔调制器的频率精细调谐 PT-Symmetric OEO 方案

2020 年,北京交通大学王目光研究团队提出了一种基于双平行马赫-曾德尔调制器的频率调谐 PT-Symmetric OEO 方案[23]。该方案与姚建平团队提出的偏振分束与双平衡探测器实现 PT 对称结构不同,其利用双平行马赫-曾德尔调制器(Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator,DPMZM)自身携带的两个射频端口结合视频放大器来实现两个结构相同的反馈环路,如图 7 所示。DPMZM 由两个子 MZM 和一个主 MZM 组成。具体来说,通过精确控制每个子 MZM 的偏置电压,可以保证一个子 MZM 工作在具有最高转换效率的正交偏置点,形成了增益环路。另一个子 MZM 工作在最大或最小偏置点附近,具有最小的转换效率,形成了损耗环路。这样通过调整用于 PT 对称的调制器的电光转换效率,就可以实现两个相同的反对称增益/损耗光电反馈环路。当 PT 对称性被破坏时,由于增益竞争效应,被破坏的 PT 振荡模式将获得最大增益。通过调整主 MZM 的偏置电压来改变光电振荡器环路的总相位,可以实现 PT-Symmetric OEO 输出信号频率的连续精细调谐。因此,基于 PT 对称性实现了不使用窄带滤波器的频率可调 OEO。

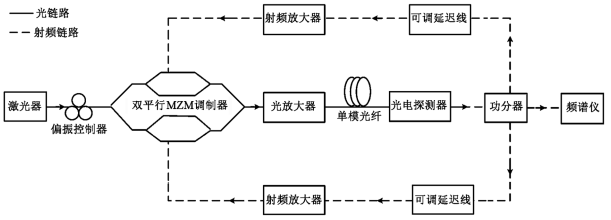


图 7　基于 DPMZM 的频率精细调谐 PT-Symmetric OEO 方案图

研究团队根据图 7 的方案开展了相关实验,实验实现了振荡频率为 4.2 GHz,SMSR 为 60 dB 的 PT-Symmetric OEO,如图 8 所示。在光纤环路长度为 6 m 的条件下,频率调谐范围约为 1.4 MHz。在 10 kHz 频率偏移条件下,测量相位噪声小于 −108 dBc/Hz,如图 9 所示。测量输出信号的频率稳定度,在 5 min 的测试过程中,频率漂移约为 3 kHz,如图 10 所示。

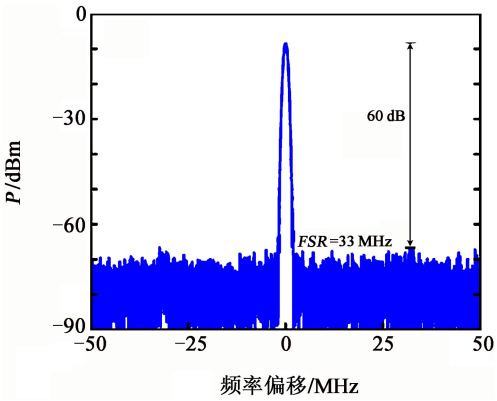


图 8　光纤长度 6 m 条件下,基于双平行马赫-曾德尔调制器的频率精细调谐 PT-Symmetric OEO 方案输出信号频谱

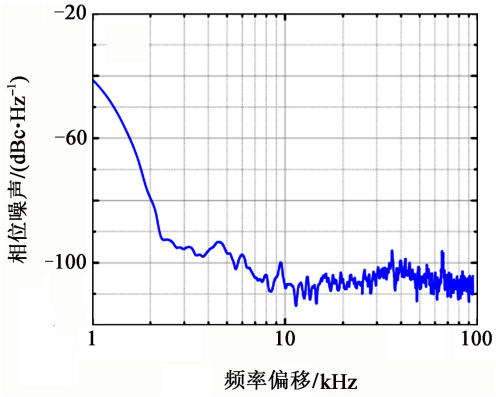


图 9　环路长度为 2 km 时,4.2 GHz 振荡信号的相位噪声

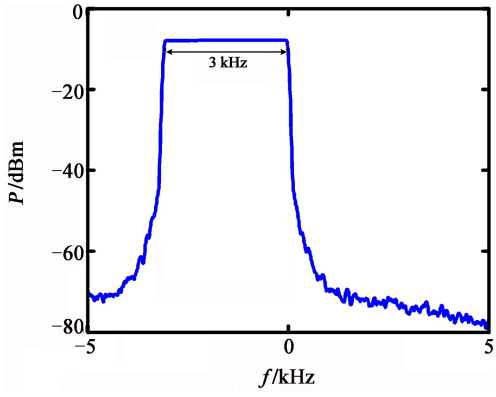


图 10　5 min 的测试条件下,输出信号频率漂移情况

2.3　基于单偏振 Sagnac 环路结构的频率调谐 PT-Symmetric OEO 方案

2020 年,姚建平研究团队提出了一种基于单偏振 Sagnac 环路结构的频率调谐 PT-Symmetric OEO 方案[24],如图 11 所示。该方案与前期的双偏振方案不同,仅使用一个偏振相关的 Sagnac 环路,通过在 Sagnac 环路中合并偏振分束器,可以实现具有相同几何形状的两个等效环路,通过调整注入

PBS 的光波的偏振态，可以精确控制两个等效环路的增益和损耗系数。通过控制增益、损耗和耦合系数，使 OEO 破坏 PT 对称性，保证单频振荡信号产生。因此简化了 PT 对称的实现过程，提高了系统稳定性。

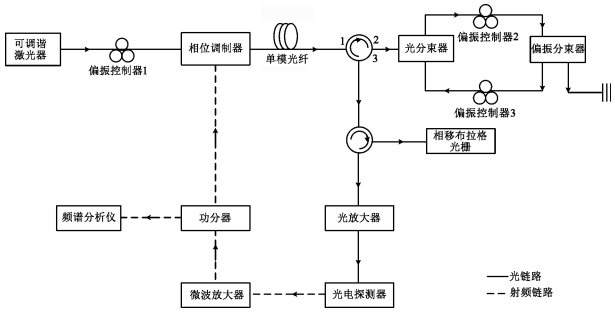


图 11 基于单偏振 Sagnac 环路结构的频率调谐 PT-Symmetric OEO 方案结构图

为了实现输出频率调谐，在该振荡环路中集成了相移布拉格光栅（Phase-Shifted Fiber Bragg Grating，PS-FBG）。相位调制器、PS-FBG 和光电探测器共同组成了一个可调谐微波光子滤波器。滤波器的中心频率可通过控制可调激光器的输出波长来调控。研究团队基于图 11 的方案开展了相关实验，实验结果如图 12 所示，可以看出，基于单偏振 Sagnac 环路结构的 PT-Symmetric OEO 方案实现了单模振荡，输出信号的 SMSR 为 47 dB，光电振荡器输出信号频率可调范围为 2～12 GHz。

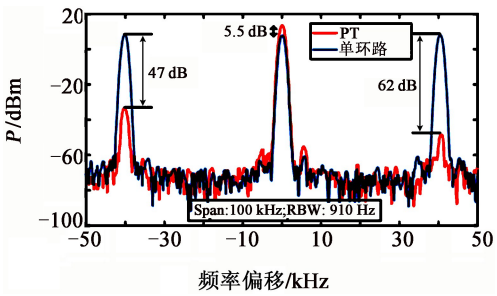


图 12 5 km 光纤长度条件下 PT-Symmetric OEO 输出微波信号频谱

2.4 基于微盘谐振腔结构的频率调谐 PT-Symmetric OEO 方案

2020 年，姚建平研究团队又提出了一种基于微盘谐振腔结构的频率调谐 PT-Symmetric OEO 方案[25]，方案结构如图 13 所示。实现单模振荡输出的关键是实现 PT 对称，该方案通过共用微盘谐振腔（Microdisk Resonator，MDR）形成的两个相互耦合的光电环实现。由于 MDR 中光传播的互易性，两个环路具有完全相同的几何结构。通过控制两端注入 MDR 的光信号的偏振态，可以控制两个环路的增益和损耗系数。当特定振荡模式的 PT 对称性被破坏时，可以在该频率实现稳定的单模振荡。

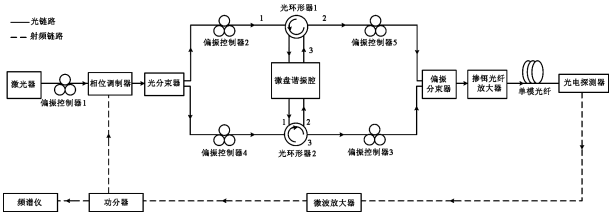
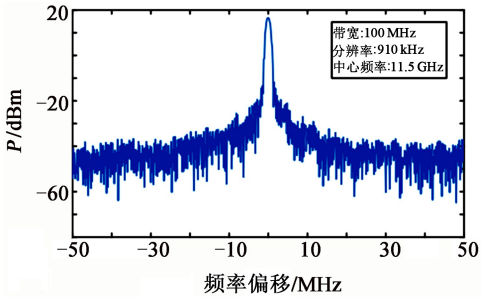
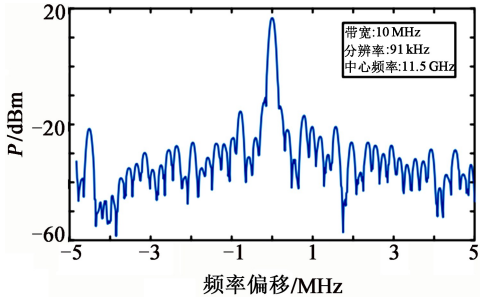


图 13 基于微盘谐振腔结构的频率调谐 PT-Symmetric OEO 方案结构图

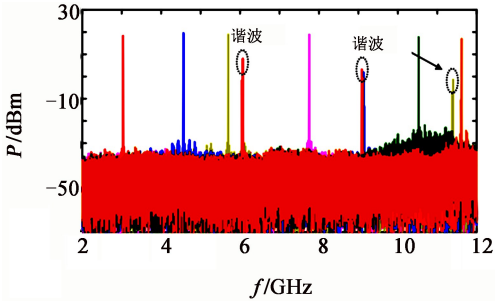
结构中使用了相位调制到强度调制转换的可调微波光子滤波器方案，以保证光电振荡器输出信号的频率可调，通过改变 MDR 的温度可以改变微波光子滤波器的中心频率，进而控制 PT-Symmetric OEO 的输出信号频率。研究团队根据图 13 的方案开展了相关实验，实验结果如图 14 所示。实验证明



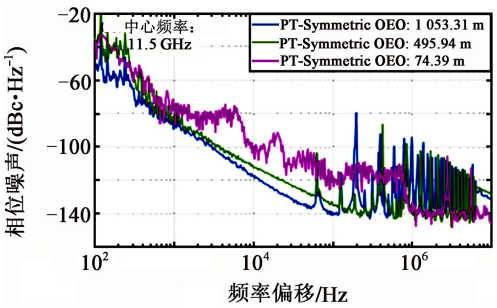
（a） 测量带宽为 100 MHz 时输出信号频谱



（b） 测量带宽为 10 MHz 时输出信号频谱



（c） 输出信号频率调谐



(d)　输出信号相位噪声

图 14　基于微盘谐振腔结构的频率调谐 PT-Symmetric OEO 方案

了该方案的可调范围为 2～12 GHz，输出信号边带抑制明显。在 10 kHz 频偏下，在 11.5 GHz 处生成的微波信号的相位噪声为－117.3 dBc/Hz。

3　展望与结语

宇称-时间对称光电振荡器技术发展非常迅速，不断有新型高性能指标的结构出现，但在实现工程中的大规模推广还需要解决一些关键技术问题：

(1)宇称-时间对称光电振荡器的光电混合集成。现有宇称-时间对称光电振荡器均基于分立元件实现，未来需要在保证输出信号参数不明显下降的前提下，实现光电混合集成的光电振荡器，显著降低其体积与功耗。

(2)现有宇称-时间对称光电振荡器方案大多基于单一频率信号产生，未来需要与任意波形发生器相结合，产生宽带调控多波形信号，以拓展宇称-时间对称光电振荡器技术的应用领域。

(3)目前的宇称-时间对称光电振荡器方案大多使用偏振分束器实现，系统本身受到偏振影响极大，广泛推广面临较多阻碍，如何克服偏振波动的影响也是一个值得探索的方向。

本文对宇称-时间对称光电振荡器的结构和原理进行了介绍，分析比较了各种宇称-时间对称光电振荡器的性能指标，讨论了制约其广泛应用的因素。随着许多关键技术问题的解决，宇称-时间对称光电振荡器技术将会在相关领域得到广泛应用。

参考文献：

[1] Yao J. Microwave photonics[J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27(3): 314-335.

[2] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. J. of Lightwave Technol., 2006, 24(12): 4628-4641.

[3] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photon., 2007, 1(6): 319-330.

[4] Nguyen N M, Meyer R G. Start-up and frequency stability in high-frequency oscillators[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 1992, 27(5): 810-820.

[5] Ottaviani A, Palacios P, Zweipfennig T, et al. Evaluation of high-temperature high-frequency GaN-based LC-oscillator components[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2020, 67(11): 4587-4591.

[6] Abouelez A E. Photonic generation of millimeter-wave signal through frequency 12-tupling using two cascaded dual-parallel polarization modulators[J]. Optical and Quantum Electron., 2020, 52(3): 1-20.

[7] Giordano V, Fluhr C, Dubois B. Magnetic sensitivity of the microwave cryogenic sapphire oscillator[J]. J. of Appl. Phys., 2020, 127(18): 184101.

[8] Lau E K, Wong L J, Wu M C. Enhanced modulation characteristics of optical injection-locked lasers: A tutorial[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2009, 15(3): 618-633.

[9] Ristic S, Bhardwaj A, Rodwell M J, et al. An optical phase-locked loop photonic integrated circuit[J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 28(4): 526-538.

[10] Soltanian M R K, Ahmad H, Pua C H, et al. Tunable microwave output over a wide RF region generated by an optical dual-wavelength fiber laser[J]. Laser Phys., 2014, 24(10): 105116.

[11] Zhu Z, Zhao S, Zheng W, et al. Filterless frequency 12-tupling optical millimeter-wave generation using two cascaded dual-parallel Mach-Zehnder modulators[J]. Appl. Opt., 2015, 54(32): 9432-9440.

[12] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic oscillator for photonic systems[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1996, 32(7): 1141-1149.

[13] Maleki L. The optoelectronic oscillator[J]. Nature Photon., 2011, 5(12): 728-730.

[14] Yao X S, Maleki L. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2000, 36(1): 79-84.

[15] Shumakher E, Eisenstein G. A novel multiloop optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2008, 20(22): 1881-1883.

[16] Yang J, Yu J L, Wang Y T, et al. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2007, 19(11): 807-809.

[17] Bánky T, Horváth B, Berceli T. Optimum configuration of multiloop optoelectronic oscillators[J]. JOSA B, 2006, 23(7): 1371-1380.

[18] Feng L, Wong Z J, Ma R M, et al. Single-mode laser by parity-time symmetry breaking[J]. Science, 2014, 346(6212): 972-975.

(下转第 468 页)

surface plasmon[J]. Nanoscale Research Lett., 2014, 9(1): 519.

[6] Hamamatsu Corporation. Si photodiodes selection guide 2018 [EB/OL]. https://www.hamamatsu.com/resources.

[7] Excelitas Technologies Corp. Photon detection solutions for consumer, health, safety and security applications-3.0[EB/OL]. https://www.excelitas.com/.

[8] First Sensor Company. Sensor solutions by first sensor[EB/OL]. https://www.first-sensor.com/en/.

[9] 张安元. 湿法刻蚀制备黑硅及性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 15-20.
Zhang Anyuan. Preparation of black silicon by wet etching and its properties[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011: 15-20.

[10] 来五星, 廖广兰, 史铁林, 等. 反应离子刻蚀加工工艺技术的研究[J]. 半导体技术, 2006, 31(6): 414-417.
Lai Wuxing, Liao Guanglan, Shi Tielin, et al. Study of reaction ion etching processing technique[J]. Semiconductor Technology, 2006, 31(6): 414-417.

[11] 刘光友, 谭兴文, 姚金才, 等. 电化学制备薄黑硅抗反射膜[J]. 物理学报, 2008, 57(1): 514-518.
Liu Guangyou, Tan Xingwen, Yao Jincai, et al. "Black silicon" antireflection thin film prepared by electrochemical etching[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(1): 514-518.

[12] 张安元, 吴志明, 赵国栋, 等. 利用湿法刻蚀的方式制备黑硅[J]. 现代电子技术, 2011, 34(18): 133-136.
Zhang Anyuan, Wu Zhiming, Zhao Guodong, et al. Preparation of black silicon by means of wet etching[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(18): 133-136.

[13] 王维彪, 金长春, 赵海峰, 等. 干法刻蚀和湿法刻蚀制备硅微尖的比较[J]. 发光学报, 1998, 19(3): 272-274.
Wang Weibiao, Jin Changchun, Zhao Haifeng, et al. Comparison of dry etching and wet etching to prepare silicon microtip[J]. J. of Luminescence, 1998, 19(3): 272-274.

[14] 巩 晨, 王新泽, 张荣跻, 等. 湿法刻蚀调节分裂栅存储器的浮栅层形貌研究[J]. 微电子学, 2020, 50(4): 574-578.
Gong Chen, Wang Xinze, Zhang Rongji, et al. Adjusting profile of floating gate layer in split gate memory by wet etching [J]. Microelectronics, 2020, 50(4): 574-578.

[15] Sheehy M A, Tull B R, Friend C M, et al. Chalcogen doping of silicon via intense femtosecond-laser irradiation [J]. Materials Science and Engin. B, 2007, 137(1/3): 289-294.

[16] Pedraza A J, Fowlkes J D, Guan Y F. Surface nanostructuring of silicon[J]. Appl. Phys. A, 2003, 77(2): 277-284.

[17] Kim T G, Warrender J M, Aziz M J. Strong sub-band-gap infrared absorption in silicon supersaturated with sulfur[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88(24): 241902.

[18] Crouch C H, Carey J E, Shen M, et al. Infrared absorption by sulfur-doped silicon formed by femtosecond laser irradiation[J]. Appl. Phys. A, 2004, 79: 1635-1641.

[19] Carey J E, Crouch C H, Shen M, et al. Visible and near-infrared responsivity of femtosecond-laser microstructured silicon photodiodes[J]. Opt. Lett., 2005, 30(14): 1773-1775.

[20] Kuboyama S, Ikeda N, Hirao T, et al. Enhanced avalanche multiplication factor and single-event burnout [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2004, 50(6): 2233-2238.

[21] Mills D, Kolasinski K W. Laser-etched silicon pillars and their personification[J]. J. Vaccum Science & Technol. A: Vaccum Surface & Films, 2004, 22(4): 1647-1651.

[22] Sarnet T, Halbwax M, Torres R. Femtosecond laser for black silicon and photovoltaic cells[J]. Proc. of SPIE, 2008, 6881: 688119-688119-15.

[23] Sheehy M A, Tull B R, Friend C M, et al. Chalcogen doping of silicon via intense femtosecond-laser irradiation [J]. Materials Science and Engin. B, 2007, 137(1/3): 289-294.

[24] Huang Z, Carey J E, Liu M, et al. Microstructured silicon photodetector[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(3): 516.

作者简介:

黄 建(1984—),男,重庆人,博士,高级工程师,主要从事硅光电器件研究。

(上接第 457 页)

[19] Hodaei H, Miri M A, Heinrich M, et al. Parity-time-symmetric microring lasers[J]. Science, 2014, 346(6212): 975-978.

[20] Liu W, Li M, Guzzon R S, et al. An integrated parity-time symmetric wavelength-tunable single-mode microring laser [J]. Nature communications, 2017, 8(1): 1-6.

[21] Zhang J, Yao J. Parity-time-symmetric optoelectronic oscillator[J]. Science Advances, 2018, 4(6): eaar6782.

[22] Tang H, Yu Y, Zhang X. Widely tunable optoelectronic oscillator based on selective parity-time-symmetry breaking [J]. Optica, 2019, 6(8): 944-950.

[23] Ding Q, Wang M, Zhang J, et al. A precisely frequency-tunable parity-time-symmetric optoelectronic oscillator[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(23): 6569-6577.

[24] Dai Z, Fan Z, Li P, et al. Frequency-tunable parity-time-symmetric optoelectronic oscillator using a polarization-dependent Sagnac loop[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(19): 5327-5332.

[25] Fan Z, Zhang W, Qiu Q, et al. Hybrid frequency-tunable parity-time symmetric optoelectronic oscillator[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(8): 2127-2133.

作者简介:

张 铮(1985—),男,河南郑州人,硕士,讲师,主要研究方向为测绘科学与技术,微波技术;

滕义超(1989—),男,辽宁鞍山人,博士,讲师,主要研究方向为微波光子雷达技术。