doi:10. 13756/j. gtxyj. 2026. 250340.
光电子器件技术
段施奇,范金泽,陈海健,等. 基于VCSEL的偏振自稳定储备池结构[J]. 光通信研究, 2026(5):145–149.
Duan S Q, Fan J Z, Chen H J, et al. Self-stabilizing Polarization Reservoir Computing based on VCSEL[J]. Study on Optical Communications, 2026(5):145–149.

基于 VCSEL 的偏振自稳定储备池结构

段施奇[1], 范金泽[2],陈海健[1],刘 虎[1],梅 宁[1],万 迪[1],牛浩然[1],程孟凡[2]
(1. 国网湖北直流公司,湖北 宜昌 443005; 2. 华中科技大学 光学与电子信息学院,武汉 430074)

摘要:【目的】近年来,随着人工智能(AI)技术的飞速发展,模型训练所需的算力也快速增长。储备池神经网络作为一种可物理实现的光子学神经网络,以其训练成本低,易于硬件实现等特点,逐渐被广为关注,在时序信息处理中有着广泛的应用。储备池的非线性节点有丰富的光学非线性器件选择,垂直腔表面发射激光器(VCSEL)因有体积小、光束质量好、非线性丰富等特征,近年来开始被广泛用于储备池神经网络中。基于 VCSEL 的偏振复用储备池能够实现高速的任务并行处理,是一种高效的储备池计算方式。然而在偏振复用模型中,温度、应力等外界环境变化会显著改变光纤双折射,从而导致偏振态旋转,对储备池的计算稳定性带来了不可忽视的干扰。【方法】为解决此问题,文章提出了一种含有偏振自稳定结构的 VCSEL 偏振复用储备池,利用磁光效应原理以及光纤的互异性传输实现在时间延迟线上的偏振自稳定,减小光纤中双折射对偏振态引入的噪声。【结果】通过 Santa-Fe 时间序列预测、信道均衡、光电振荡器(OEO)混沌同步三个任务,验证了所提偏振自稳定结构的有效性。还通过信道均衡与 OEO 同步两任务并行处理的测试,验证了该结构在多任务并行处理中的适用性。【结论】该结构为将来进一步提升储备池容量和长期计算稳定性提供了可行的思路。
关键词:储备池计算;偏振稳定结构;时间序列预测;非线性信道均衡;混沌同步
中图分类号:TN929 **文献标志码**:A

Self-stabilizing Polarization Reservoir Computing based on VCSEL

DUAN Shiqi[1], FAN Jinze[2], CHEN Haijian[1], LIU Hu[1], MEI Ning[1], WAN Di[1], NIU Haoran[1], CHENG Mengfan[2]
(1. State Grid Hubei Direct Current Company, Yichang 443005, China; 2. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: 【Objective】 In recent years, the rapid advancement of Artificial Intelligence (AI) technology has significantly increased the computational power required for model training. Reservoir computing (RC), as physically realizable photonic neural networks, have garnered widespread attention due to their low training costs and ease of hardware implementation, demonstrating broad applications in temporal information processing. The nonlinear nodes in reservoirs offer diverse optical nonlinear device options. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs), characterized by compact size, high beam quality, and rich nonlinear dynamics, have recently been widely adopted in RC. Polarization-multiplexed VCSEL-based reservoirs enable high-speed parallel task processing, representing an efficient reservoir computing approach. However, in polarization-multiplexed systems, environmental variations such as temperature and stress can alter fiber birefringence, which leads to the polarization state rotation and brings non-negligible interference to the computational stability of the reservoir. 【Methods】To address this issue, this paper proposes a polarization-multiplexed VCSEL reservoir with a self-stabilizing polarization structure. By leveraging the magneto-optic effect and reciprocal fiber transmission, the design achieves polarization stabilization on time-delay lines, effectively reducing birefringence-induced polarization noise in optical fibers. 【Results】The effectiveness of the proposed structure is validated through three tasks: Santa Fe time series prediction, channel equalization, and opto-electronic oscillator(OEO)chaotic synchronization. The article also demonstrates the impact of the structure in multi-task parallel processing by testing the parallel processing of two tasks, channel equalization and OEO synchronization. 【Conclusion】This structure provides a feasible approach to further enhance reservoir capacity and long-term computational stability in future applications.
Key words: reservoir computing; self-stabilizing polarization; time series prediction; nonlinear channel equalization; chaotic synchronization

0 引 言

近年来,人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)在语音识别、图像处理和智能驾驶等领域内得到广泛应用,在光通信领域也展现出潜力[1-2]。储备池计算(Reservoir Computing, RC)是一种光子神经网络[3],通过固定输入层和隐藏层,只需训练输出层,相较与传统神经网络可显著降低训练成本。

早期 RC 依赖多个光电子器件构建非线性节

收稿日期:2025-10-30; 修回日期:2025-11-13; 纸质出版日期:2026-10-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(62175077)
作者简介:段施奇(1988–),男,湖北武汉人。高级工程师,本科,主要研究方向为光通信与电力通信系统。
通信作者:程孟凡,教授。E-mail:chengmf@hust. edu. cn
© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

点，对器件数量与探测精度要求较高，规模受限[4-6]。2011 年，Appeltant 等提出基于时延反馈的串行 RC 方案，大幅降低硬件成本与系统复杂度[7]。之后，基于马赫－曾德尔调制器（Mach-Zehnder Modulator，MZM）、半导体光放大器（Semiconductor Optical Amplifier，SOA）、半导体激光器（Semiconductor Laser，SL）、垂直腔表面发射激光器（Vertical Cavity Surface Emitting Laser，VCSEL）等的结构被相继提出[8-11]。此外，掩码过程、输出层算法等算法改进[10,12]，以及深度、并行等新型 RC 结构也相继被提出[13]。Guo 等提出的基于 VCSEL 的偏振复用 RC 为任务并行提供方案[14]。

然而，偏振复用系统中，外界环境扰动会改变光纤的双折射特性，引起偏振态旋转，进而导致系统计算性能不稳定。因此，本文提出了一种基于光纤互易性的自稳偏 VCSEL 储备池，通过对 Santa Fe 时间序列预测、非线性信道均衡以及光电振荡器（Opto-electronic Oscillator，OEO）混沌同步三类任务的仿真，证明偏振稳定结构的有效性。本文所提结构相较于原有偏振复用 RC 结构，具有更强的鲁棒性，能够使储备池长时间稳定工作，且实现简单，在实际应用中可行性较高，为进一步提升偏振复用 RC 的抗扰性及长期计算稳定性提供了一种可行的新思路。

1　理论与模型

1.1　偏振自稳定结构

在基于 VCSEL 的偏振复用储备池计算中，无论是平行偏振光反馈（Parallelly-Polarized Optical Feedback，PPOF）还是正交偏振光反馈，都需要保证训练与测试过程中光偏振态的长期稳定性。然而由于光纤制造工艺的限制，光纤中普遍存在偏振相关损耗以及双折射效应。在储备池场景下，偏振相关损耗对外界环境变化相对不敏感，且典型值较小，而双折射效应对温度、应力等外界环境条件非常敏感，瞬态变化可达 kHz 量级。因此本文假设偏振相关损耗相较于双折射效应在储备池场景下可以忽略不计。在实验室中，通常将光纤固定在实验平台上以减少环境抖动造成的影响，但在实际应用中仍缺乏有效稳偏方案。

本文提出的偏振自稳定结构利用法拉第磁光效应以及光纤传输的互异性，其结构示意图如图 1 所示。假设标准单模光纤的偏振相关损耗相较于双折射效应可以忽略不计，则光纤传输矩阵可表示为

$$\boldsymbol{U}=\begin{bmatrix} exp\left(-\mathrm{i}\frac{\theta_1}{2}\right)\cos(\phi) & exp\left(-\mathrm{i}\frac{\theta_2}{2}\right)\sin(\phi) \\ -exp\left(\mathrm{i}\frac{\theta_2}{2}\right)\sin(\phi) & exp\left(\mathrm{i}\frac{\theta_1}{2}\right)\cos(\phi) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中，i 为虚数单位，θ_1、θ_2、ϕ 为三个为描述双折射状态而引入的独立实变量[15]，会随环境因素而改变。由于光在光纤中传播速度快，可以认为在偏振光往返传输一次的过程中，θ_1、θ_2、ϕ 保持恒定。由于光纤为互易性器件，因此反向的传输矩阵可以写作正向传输矩阵的转置 $\boldsymbol{U}^T$。因此，从图 1 中 A 点到 A' 点的传输矩阵可表示为

$$\begin{aligned} T_{AA'} &= \alpha^2\boldsymbol{R}(45°)\boldsymbol{U}^T\boldsymbol{R}(45°)\boldsymbol{M}\boldsymbol{R}(45°)\boldsymbol{U}\boldsymbol{R}(45°) \\ &= \alpha^2\boldsymbol{R}(180°), \end{aligned} \tag{2}$$

式中，α 为光纤中的单程损耗。$\boldsymbol{R}(\theta)$ 为偏振旋转的琼斯矩阵。$\boldsymbol{M}$ 为反射镜的琼斯矩阵。计算可知，光纤偏振态在往返传播后旋转了 180°，输出偏振态只与输入偏振态有关，而与光纤的双折射传输矩阵无关，从而实现偏振自稳定传输。

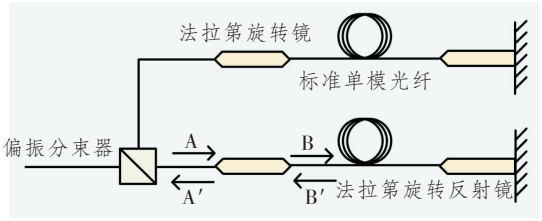
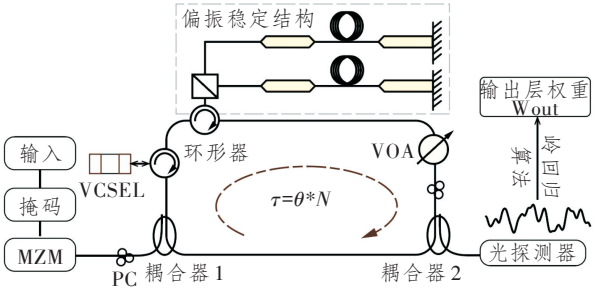


图 1　偏振自稳定结构示意图

Figure 1　Schematic of self-stabilizing polarization structure

1.2　储备池模型

本文采用的储备池以 VCSEL 为非线性节点，同时将 1.1 中的偏振自稳定结构引入该储备池计算模型中，得到如图 2 所示结构示意图。



注：MZM 为马赫－曾德尔调制器；VOA 为可调光学衰减器；PC 为偏振控制器；τ 为反馈环路的延迟时间；θ 为虚拟节点之间的间隔；N 为储备池节点数量。

图 2　含偏振自稳定结构的 VCSEL 偏振复用储备池结构

Figure 2　VCSEL polarization multiplexing reservoir containing a self-stabilizing polarization structure

以 PPOF 反馈形式为例，VCSEL 内部动态可以由以下非线性方程组表示。其中，下标 x,y 分别代表 VCSEL 的 XP 与 YP 模式。E 为缓变电场振幅，N 为载流子数，n 为自旋方向相反的载流子数差异。κ_d 和 κ_{inj} 分别表示任务中的反馈强度和注入强度。

$$\frac{\mathrm{d}E_x}{\mathrm{d}t}=\kappa(1+\mathrm{i}\alpha)(NE_x-E_x+\mathrm{i}nE_y)-(\gamma_a+\mathrm{i}\gamma_p)E_x+\kappa_dE_x(t-\tau_d)exp(-\mathrm{i}\omega_y\tau_d)+\kappa_{inj}\varepsilon(t), \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}E_y}{\mathrm{d}t}=\kappa(1+\mathrm{i}\alpha)(NE_y-E_y+\mathrm{i}nE_x)+(\gamma_a+\mathrm{i}\gamma_p)E_y+\kappa_dE_y(t-\tau_d)exp(-\mathrm{i}\omega_x\tau_d)+\kappa_{inj}\varepsilon_2(t), \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}=\gamma_N[\mu-N(1+|E_x|^2+|E_y|^2)+in(E_xE_y^*-E_yE_x^*)], \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}=-\gamma_sn-\gamma_N[n(|E_x|^2+|E_y|^2)+\mathrm{i}N(E_yE_x^*-E_xE_y^*)], \tag{6}$$

仿真中用到的参数的定义与值如表 1 所示。

表 1　仿真参数

Table 1　Parameters of simulation

参数	含义	值
κ	场衰减速率/ns^{-1}	300
α	线宽增强因子	3
γ_N	N 的衰减速率/ns^{-1}	1
γ_s	自旋翻转率/ns^{-1}	50
γ_a	线性二向色性/ns^{-1}	0.1
γ_p	线性双折射/ns^{-1}	10
$\omega_{x,y}$	$X(Y)P$ 角频率	$\omega_0\pm\alpha\gamma_a\mp\gamma_p$
ω_0	中心角频率/$\pi c/\lambda$	2
λ	中心波长/nm	850
τ_d	储备池时延/ns	10
μ	归一化注入电流	1.01

2　仿真与分析

首先在单任务处理中测试该结构的性能。本文采用 Santa-Fe 时间序列预测任务进行仿真。对 MATLAB 中的 Santa-Fe 数据集进行归一化处理，使其值分布在[0,1]。用归一化均方根误差(Normalized Root-Mean-Square Error, NRMSE)衡量 Santa-Fe 时间序列预测任务的效果。

数据从 X 偏振方向注入，设置训练长度为 2 000，测试长度为 1 000，储备池节点个数为 100，在偏振方向对准的情况下，得到在该任务中时间序列预测任务的 NRMSE 为 0.003。该任务的预测效果如图 3 所示。

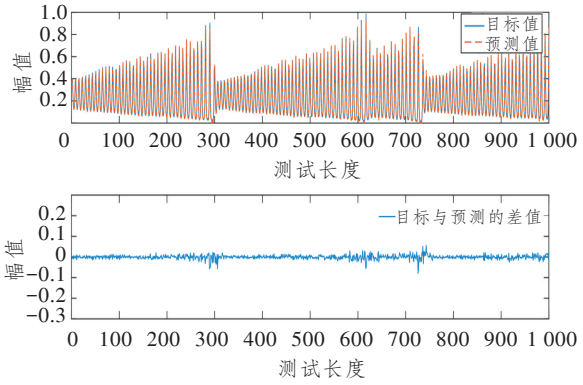


图 3　偏振对准情况下 Santa-Fe 时间序列预测任务处理效果

Figure 3　Effect of Santa-Fe time series prediction task processing under polarization alignment

由于外界环境不稳定，光纤中双折射在持续变化，将会导致训练和测试过程中，反馈注入到 VCSEL 的光偏振方向存在旋转。假设光的偏振方向整体旋转的角度为 θ_p，仿真得到该角度对预测任务的影响如图 4 所示。偏转角严重影响了预测能力，θ_p 大于 5°后可以认为该模型已经基本失去预测功能。

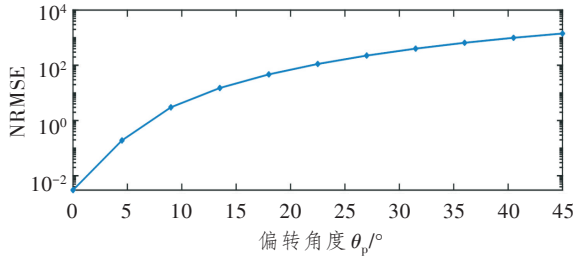


图 4　预测效果(以 NRMSE 表示)随偏振旋转角度的变化

Figure 4　Prediction results (represented by NRMSE) as a function of polarization rotation angle

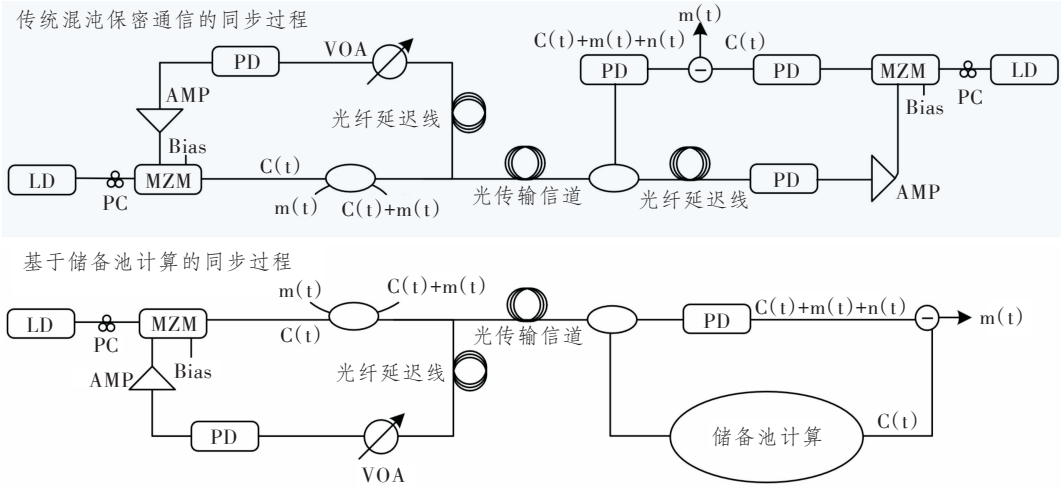
下面将在两任务并行处理中验证所提出偏振稳定结构的有效性。X 偏振态进行非线性信道均衡任务，Y 偏振态进行 OEO 混沌保密通信的同步任务。非线性信道均衡任务是储备池的基准任务之一。该任务需要从接收的信号 $u(n)$中重现信号 $d(n)$。$d(n)$是幅值为{−3,−1,1,3}的 PAM4 信号，首先通过一个线性通道得到 $q(n)$，$q(n)$再经过非线性函数的作用，得到接收信号 $u(n)$。

$$q(n)=0.08d(n+2)-0.12d(n+1)+d(n)+0.18d(n-1)-0.1d(n-2)+0.09d(n-3)-0.05d(n-4)+0.04d(n-5)+0.03d(n-6)+0.01d(n-7), \tag{7}$$

$$u(n)=q(n)+0.026q(n)^2-0.011q(n)^3+F(n), \tag{8}$$

式中，$F(n)$为一个信噪比为 24 dB 的高斯白噪声。

OEO 混沌保密通信同步任务是指用储备池神经网络进行载波恢复，取代传统混沌保密通信过程中的接收端结构，其同步任务图如图 5 所示。

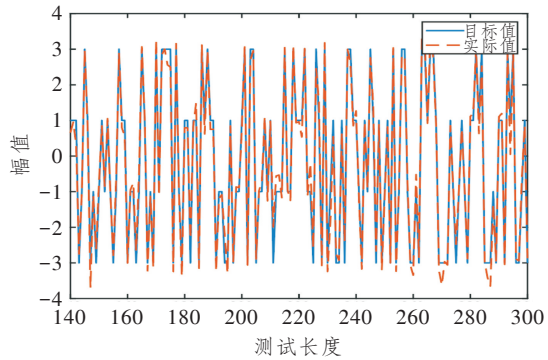


注：LD 为激光二极管；Bias 为偏置；AMP 为放大器；PD 为光电二极管；C(t)为混沌载波；m(t)为明文信号；n(t)为噪声。

图 5　OEO 混沌保密通信同步任务示意图[16]

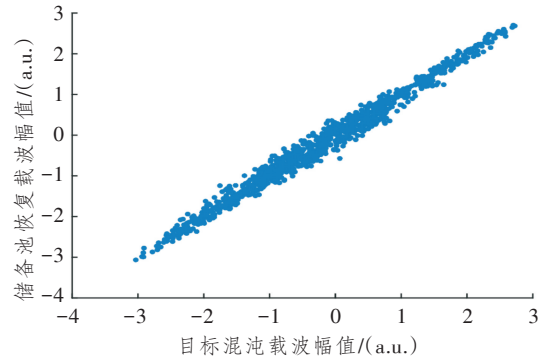
Figure 5　Process of the OEO chaotic secure communication synchronization task

两任务均采用 3 000 个点训练，1 000 个点测试。当训练与测试过程中偏振方向可以准确对齐的情况下，两任务的效果如图 6 所示：



(a) 均衡任务的预测与目标结果

(a) Prediction and target results of the equalization task



(b) 混沌同步恢复载波-目标载波散点图

(b) Scatter plot of the recovered carrier versus the target carrier in chaotic synchronization

图 6　VCSEL 并行任务处理性能

Figure 6　VCSEL parallel task processing performance

由于外界环境不稳定，光纤中双折射在持续变化，以 X 和 Y 偏振光整体旋转的角度 $\theta_p=\pi/6$ 为例，均衡任务以及同步任务的结果均有极大劣化，可以认为该储备池完全失去了处理能力。有无自稳偏效果的任务处理结果如表 2 所示。通过两次任务效果的对比，说明了偏振稳定功能对储备池长期稳定工作具有重要意义。

表 2　偏振旋转前后任务效果对比

Table 2　Comparison of task effects before and after polarization rotation

	均衡任务		同步任务	
	BER	NRMSE	BER	CC
含自稳偏结构	0.001	0.020	0.060	0.991
不含自稳偏结构	0.480	9.276	0.450	0.206

注：BER 为误码率，CC 为最大互相关系数。

3　结束语

本文提出了一种具有偏振自稳定结构的储备池计算系统。通过 Santa-Fe 时间序列预测任务、非线性信道均衡任务、混沌同步任务分别验证了基于 VCSEL 偏振复用的储备池在单任务和多任务处理时对偏振态的敏感性。证明了使用偏振自稳定结构后储备池性能的提升，为储备池在实际场合中的稳定应用提供了解决方案。

参考文献：

[1] 贾科军,牛振,于凯,等. 基于SSA-ELM神经网络的室内可见光定位系统[J]. 光通信研究,2025(1)：230154.
Jia K J, Niu Z, Yu K, et al. Indoor Positioning System based on SSA-ELM Neural Network for Visible Light[J]. Study on Optical Communications, 2025(1)：230154.

[2] 马愈昭,张岩峰,冯帅. 基于神经网络的侧向激光雷达信号去噪算法[J]. 光电工程,2023,50(6)：220341.
Ma Y Z, Zhang Y F, Feng S. A Denoising Algorithm based on Neural Network for Side-scatter Lidar Signal[J]. Opto-Electron Eng, 2023, 50(6)：220341.

[3] 项水英,宋紫薇,张雅慧,等. 光子神经网络研究进展[J]. 光电工程, 2024, 51(7)：240101–240124.
Xiang S Y, Song Z W, Zhang Y H, et al. Progress in the Research of Optical Neural Networks [J]. Opto-Electron Engineering, 2024, 51(7)：240101.

[4] Vandoorne K, Dambre J, Verstraeten D, et al. Parallel reservoir Computing using Optical Amplifiers[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(9)：1469–1481.

[5] Mesaritakis C, Papataxiarhis V, Syvridis D. Micro Ring Resonators as Building Blocks for an All-optical High-speed Reservoir-computing Bit-pattern-recognition System[J]. JOSA B, 2013, 30(11)：3048–3055.

[6] Vandoorne K, Mechet P, Van Vaerenbergh T, et al. Experimental Demonstration of Reservoir Computing on a Silicon Photonics Chip[J]. Nature Communications, 2014, 5(1)：3541.

[7] Appeltant L, Soriano M C, Van Der Sande G, et al. Information Processing Using a Single Dynamical Node as Complex System [J]. Nature Communications, 2011, 2(1)：468.

[8] Larger L, Soriano M C, Brunner D, et al. Photonic information Processing beyond Turing：an Optoelectronic Implementation of Reservoir Computing[J]. Optics Express, 2012, 20(3)：3241.

[9] Duport F, Schneider B, Smerieri A, et al. All-optical Reservoir Computing[J]. Optics Express,2012,20(20)：22783.

[10] Nakayama J, Kanno K, Uchida A. Laser Dynamical Reservoir Computing with Consistency：an Approach of a Chaos Mask Signal[J]. Optics Express, 2016, 24(8)：8679.

[11] Vatin J, Rontani D, Sciamanna M. Enhanced Performance of a Reservoir Computer using Polarization Dynamics in VCSELs[J]. Optics Letters, 2018, 43(18)：4497.

[12] Dong Y, Shi Y, Feng J, et al. Equalization of Short-reach IMDD Transmission with Enhanced Reservoir Computing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(3)：1212–1221.

[13] Hasegawa H, Kanno K, Uchida A. Parallel and Deep Reservoir Computing using Semiconductor Lasers with Optical Feedback[J]. Nanophotonics, 2023, 12(5)：869–881.

[14] Guo X X, Xiang S Y, Zhang Y H, et al. Polarization Multiplexing Reservoir Computing based on a VCSEL With Polarized Optical Feedback[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(1)：1–9.

[15] Takushima Y, Yamashita S, Kikuchi K, et al. Polarization-stable and Single-frequency Fiber Lasers. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(4)：661–669.

[16] Lavrov R, Jacquot M, Larger L. Nonlocal Nonlinear Electro-Optic Phase Dynamics Demonstrating 10 Gb/s Chaos Communications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(10)：1430–1435.