



·新型激光技术专题·综述·

自旋激光器的动力学特性及应用研究进展*

黄 于¹, 周 沛^{1,2}, 杨一功¹, 李念强^{1,2}, 李孝峰^{1,2}

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院, 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006; 2. 苏州大学 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 在半导体激光器中引入自旋极化载流子是实现室温自旋电子应用的新途径, 其超越了常规的磁阻效应。自旋极化载流子的注入导致自旋激光器具有丰富的动力学行为并展示出包括高频偏振振荡和偏振混沌动力学等特性, 使其在保密光通信、量子计算、光信息处理和数据存储、可重构光互联以及生物医学传感等领域具有巨大的应用潜力。梳理了近年来自旋激光器的动力学特性及其应用研究进展。介绍了自旋激光器丰富的动力学行为及混沌演变机制; 随后分析了自旋激光器的高频振荡特性; 归纳了基于自旋激光器动力学特性的最新应用研究进展。在此基础上, 展望了自旋激光器的发展趋势和面临的挑战, 为相关领域的研究和工程应用提供参考。

关键词: 自旋电子; 自旋激光器; 动力学行为; 偏振振荡; 偏振混沌

中图分类号: O43

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210323

Progress in research of dynamic properties and applications of spin-lasers

Huang Yu¹, Zhou Pei^{1,2}, Yang Yigong¹, Li Nianqiang^{1,2}, Li Xiaofeng^{1,2}

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: An alternative approach to realizing room temperature spintronic applications is introducing spin-polarized carriers in a semiconductor laser, which is beyond the usual magnetoresistive effects. Spin lasers have been widely applied in the fields of secure optical communication, quantum computing, optical information processing, and data storage, reconfigurable optical interconnection, and biomedical sensing because the injection of spin-polarized carriers results in the rich dynamic properties of spin lasers, including high-frequency polarization oscillations and polarization chaos regimes. In this paper, the research progress of the dynamic characteristics and applications of spin lasers in recent years is reviewed. Firstly, the dynamic behavior and chaotic evolution mechanism of spin lasers are introduced. Then the high-frequency polarization oscillation characteristics of spin lasers are analyzed. Furthermore, the latest research progress of applications based on the dynamic characteristics of spin lasers is summarized. Finally, the prospects and challenges of spin lasers are expected to enlighten fundamental researches and engineering applications in the relevant fields.

Key words: spintronic; spin laser; dynamic properties; polarization oscillation; polarization chaos

自旋电子学是以电子自旋作为信息载体的一个新兴研究领域, 近年来关于自旋电子的注入和输入机制以及自旋电子器件的应用开发等方面引起了广泛的关注。自旋激光器正属于此类重要的半导体自旋电子器件, 其自旋极化电子能通过铁磁接触进行电注入或者使用圆偏光产生光生载流子。相比于常规的激光器, 自旋激光器具有更优

* 收稿日期: 2021-07-27; 修订日期: 2021-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(62004135, 62001317, 61875143); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(20KJA416001); 江苏省自然科学基金项目(BK2018004); 江苏省高校优势学科建设工程

联系方式: 黄 于, hyphysics@163.com。

通信作者: 李念强, wan_103301@163.com;

李孝峰, xfli@suda.edu.cn。

的性能,包括更低的阈值、可控的偏振输出以及超快的动力学^[1-11],更为重要的是其能够将自旋极化信息转化为圆偏振光信息予以表达,使其在保密光通信、量子计算、光信息处理和数据存储、可重构光互联及生物医学传感等领域具有巨大的应用潜力。

自旋激光器和常规激光器均有3个主要的元素:增益介质,实现光放大;谐振腔,实现高质量高能量激光输出;泵浦(电或光),为激光过程提供能量。两者主要区别在于自旋激光器的有源区存在净载流子自旋极化(即自旋失衡),这将导致激光器的输出展现出独特的偏振可控特性^[10,12]。换句话说,这种自旋失衡导致了自旋激光器实现偏振光的发射,它是电子空穴复合过程中总角动量守恒的结果^[13-14]。载流子自旋失衡通过在自旋激光中以圆偏振光的形式传递给光子而在1 ns (< 1 μm)内丢失^[15],由此产生的自旋编码信号可以传播得更快更远,为信息传输提供了新的途径。随着一系列内在物理机制的发现以及材料结构和制备工艺的成熟,自旋激光器能够在不同类型的器件结构中实验实现^[4-5,7,9-10,15-24]。目前,自旋激光器主要的器件结构有2类:一类为垂直腔面发射激光器(VCSEL)^[25],其增益区域基于量子阱或量子点,使用电泵浦或者光泵浦产生自旋载流子。这些激光器类似于普通的发光二极管(LED),其中添加了谐振腔。另一类是在增益器件外部使用外部光学元件的谐振腔,称为垂直外腔表面发射激光器(VECSEL)^[23]。它们与VCSEL具有互补的性质,并可能为电子自旋注入提供优势。自旋激光器的实现具有2个重要的意义:一是为室温自旋电子器件提供了新的途径,其超越了传统的磁阻效应^[26-28],在数据存储等领域具有重要的意义。二是自旋激光器的研究不仅局限于自旋电子学,其能够突破传统半导体激光器的内在限制。例如,自旋激光器的信息传输速度比当前报道中最优的传统激光器快一个量级^[22],同时显著降低了能耗,这为未来高性能光互联提供了可能。

随着理论研究和实验水平的发展,自旋激光器展现出更多优异的特性以及在不同领域的应用潜力。早期的理论和实验研究主要集中在自旋VCSEL的稳态操作,如自旋VCSEL的偏振开关特性、阈值降低等^[4-5,11,29-30]。随着VCSEL的偏振混沌现象的发现^[31-32],自旋VCSEL的非线性动力学特性也引起了广泛的关注^[8,18,33-43]。本文梳理并总结了近几年自旋VCSEL的动力学及其相关应用的研究进展,包括自旋VCSEL动力学的演变及分岔分析、动力学特性与其应用研究等方面,旨在促进相关领域基础研究和工程应用的创新和突破。

1 动力学演变

相比于常规的激光器,自旋激光器无需任何外部扰动即可产生丰富的动力学行为,如稳态、单周期振荡、双周期振荡、多周期、类周期以及混沌等动力学行为。丰富的动力学行为在给自旋激光器的应用带来机遇的同时也带来众多的挑战。动力学的演变、稳定性边界以及背后隐藏的复杂物理机制等问题有待厘清。因此,深入研究自旋激光器的动力学行为及物理机制对于其应用研究具有重大意义。基于经典的四能级系统模型,建立自旋激光器仿真模型并研究自旋激光器的动力学演变是一种常见的手段。本节基于上述手段展示了常见的量子阱自旋VCSEL动力学演变。自旋VCSEL包含左旋圆偏振和右旋圆偏振,其自旋反转模型(SFM)具有以下形式^[44-46]

$$\frac{dE_{\pm}}{dt} = \kappa(N \pm m - 1)(1 + i\alpha)E_{\pm} - (\gamma_a + i\gamma_p)E_{\mp} \quad (1)$$

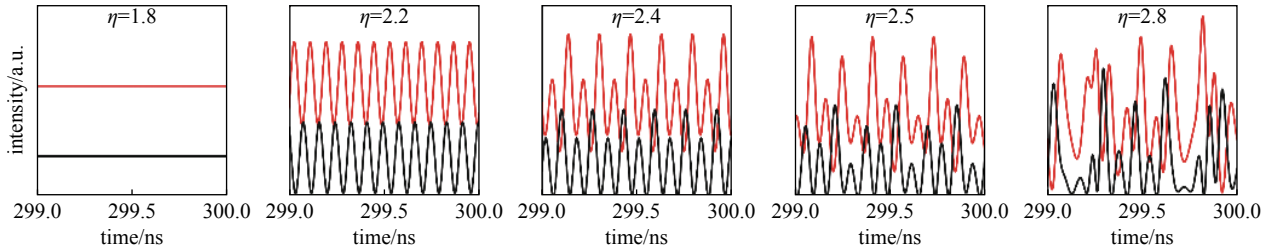
$$\frac{dN}{dt} = \gamma[\eta - (1 + |E_+|^2 + |E_-|^2)N] - \gamma[(|E_+|^2 - |E_-|^2)m] \quad (2)$$

$$\frac{dm}{dt} = \gamma P \eta - [\gamma_s + \gamma(|E_+|^2 + |E_-|^2)]m - \gamma(|E_+|^2 - |E_-|^2)N \quad (3)$$

式中: E_+ 和 E_- 分别为2个圆偏振模式分量的慢变复电场振幅; N 和 n 为归一化的载流子浓度, $N = (n_+ + n_-)/2$, $n = (n_+ - n_-)/(n_+ + n_-)$ (n_+ 为归一化的自旋向上载流子浓度, n_- 为归一化的自旋向下载流子浓度); κ 为腔内电场的衰减速率; γ 为 N 的衰减速率; γ_s 为自旋反转弛豫速率; α 为线宽增强因子; γ_a 为线性二向色性; γ_p 为线性双折射率;泵浦强度 η 和泵浦椭圆率 P 分别为自旋VCSEL的2个实验可控参数,其中,泵浦强度 $\eta = \eta_+ + \eta_-$,泵浦椭圆率 $P = (\eta_+ - \eta_-)/(\eta_+ + \eta_-)$ (η_+ 和 η_- 分别为泵浦的右旋圆偏振和左旋圆偏振分量)。

基于自旋VCSEL的速率方程,图1展示了自旋VCSEL的输出特性。从图1中不难看出,随着泵浦强度的增加,自旋VCSEL的输出开始逐步失稳,经历单周期、双周期、多周期振荡并最终进入混沌输出状态。

为了进一步了解自旋VCSEL失稳的过程,本课题组和英国埃塞克斯大学Adams课题组基于自旋反转模型研究了自旋VCSEL的稳定解和不稳定解以期确定自旋VCSEL的稳定性边界^[39]。所使用的方法建立在一般椭圆偏



optical field decay rate $\kappa=300 \text{ ns}^{-1}$; linear dichroism $\gamma_a=0$; linear birefringence $\gamma_p=10\pi \text{ ns}^{-1}$; spin-flip relaxation rate $\gamma_s=30 \text{ ns}^{-1}$; decay rate of N (N is normalized carrier concentration) $\gamma=1 \text{ ns}^{-1}$; linewidth enhancement factor $\alpha=3$; pump ellipticity $P=-0.1$. The other parameters of VCSEL are the same as those in Fig. 1

Fig. 1 Intensity time sequence of the spin-VCSEL

图 1 自旋 VCSEL 的时序图

振场稳态解的微扰基础上,其特点是左旋圆偏振和右旋圆偏振分量之间的相位差恒定。结果表明,自旋反转模型中存在两种类型的平衡,即同相和反相,对应相位差分别为 0 或者 π 的延续。通过这种方式求解得到的复数特征值能够确定自旋 VCSEL 的稳定性边界:特征值的实部(同相解或反向解)小于 0 ,则自旋 VCSEL 工作在稳态区间,其余情况则工作在周期振荡甚至混沌区间。由图 2(a)可以看出,当 $-1 < P < -0.55$ 时,同相解的特征值实部为负值且反相解的特征值实部为正值,自旋 VCSEL 的工作在稳态区间;当 $-0.52 < P < -0.14$ 时,同相解和反相解的特征值实部均为正值,自旋 VCSEL 工作在周期振荡区间;当 $-0.14 < P < 0$ 时,同相解的特征值实部为正值且反相解的特征值是实部为负值,自旋 VCSEL 再次进入稳态区间。在图 2(b)中,计算了自旋 VCSEL 的输出强度极大值与极小值的差值。从图 2(b)中能够看到,稳态区间和周期振荡区间与图 2(a)保持一致。以上结果表明,通过比较稳态解的特征值能够直观了解自旋 VCSEL 失稳的过程、稳定性的边界以及它们随模型参数变化的行为趋势。

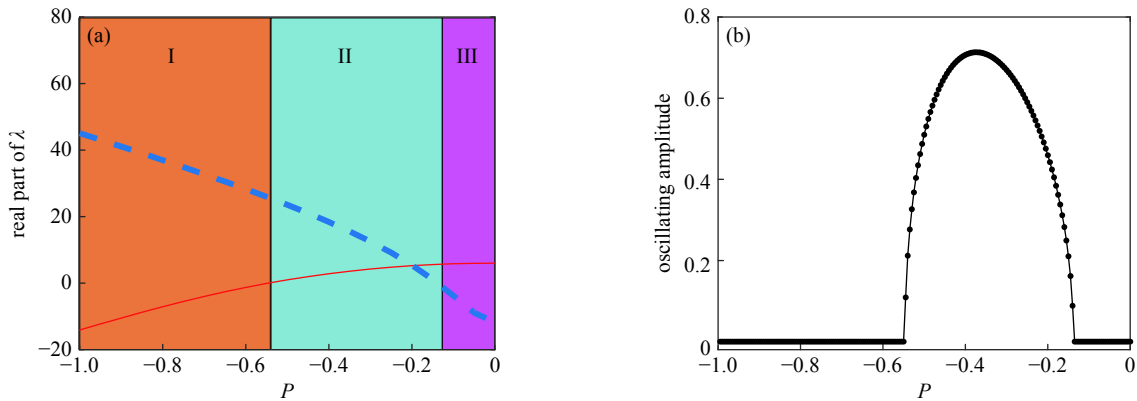


Fig. 2 The real parts of the critical eigenvalues λ for the in-phase (solid line) and out of phase (dashed line) solution as a function of P , where $\eta=1.8$

图 2 同相解和反相解的临界特征值的实部与 P 的关系

通过四阶龙格库塔算法直接求解速率方程得到的分岔图(图 3)可以更清晰地观察到失稳阈值和导致复杂动力学的进一步分岔情况。由图 3(a)可知,随着泵浦强度的增大,自旋 VCSEL 系统首先经历霍普夫分岔(稳定性边界),导致其输出从稳态演变成单周期振荡动力学。随着偏振椭圆率的减小,自旋 VCSEL 经历了更多的分岔,从稳态逐渐演变至单周期、双周期再次进入单周期状态,如图 3(b)所示。进一步减小偏振椭圆率至 $P=-0.1$ 时,自旋 VCSEL 经历了周期倍增过程,最终进入混沌动力学状态,如图 3(c)所示,这是一种典型的混沌演变的过程。图 3(d)展示了另一种完全不同的混沌演变过程,即自旋 VCSEL 系统经历准周期或环面分裂的途径进入混沌动力学。以上结果表明,自旋 VCSEL 的混沌动力学演变存在两种不同的实现路径。为了更清楚地研究自旋 VCSEL 的动力学演变过程,本课题组借助延拓工具深入研究了自旋 VCSEL 动力学的演变和分岔情形,并以此解释复杂动力学背后的物理机制^[34,39]。

通过泵浦光在自旋 VCSEL 中引入了 2 个附加自由度:泵浦强度和泵浦椭圆率。以上一维分岔图展示出了自旋 VCSEL 中引入的 2 个附加自由度(泵浦强度和泵浦椭圆率)对激光器动力学的显著影响。因此,本课题组研究了 2 个实验可控参数带来的系统动力学演变^[39]。图 4(a)展示了借助延拓工具绘制的二维分岔图,并显示出了多种常见的分岔边界。图中 H 代表霍普夫分岔,PD 代表周期倍增分岔,TR 代表环面分岔,LPC 代表极限环的鞍节点分岔。PD¹ 和 PD² 代表 1 个基本周期极限环的 2 个连续的周期加倍。白色、蓝色、浅蓝色分别代表自旋 VCSEL 的输

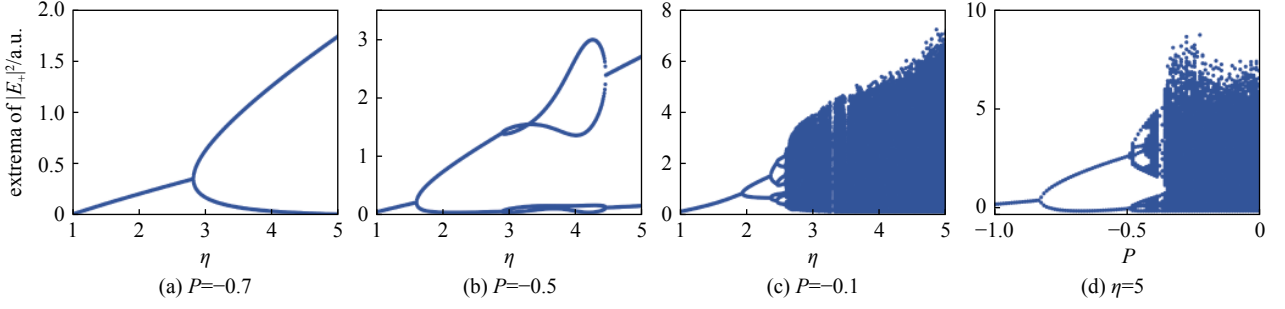


Fig. 3 Bifurcation diagram of the RCP intensity

图 3 一维分岔图(右旋圆偏振输出)

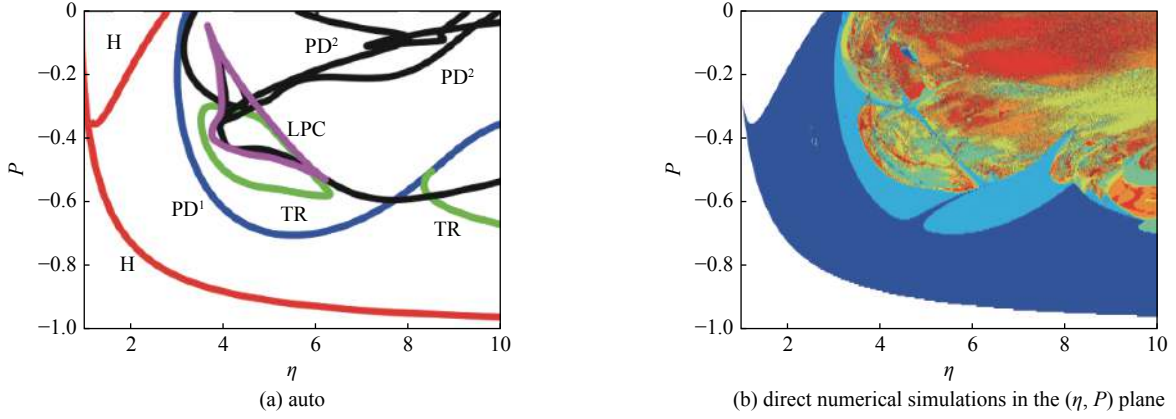

 Fig. 4 Bifurcation diagrams ($\kappa=230 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a=0$, $\gamma_p=8.8\pi \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s=30 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma=0.68 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha=4$, $P=-0.1$ ^[39])

图 4 二维分岔图

出强度极值数目为 0, 2, 4, 此时, 自旋 VCSEL 的输出为连续波、单周期和双周期; 其余的颜色代表自旋 VCSEL 的输出为复杂动力学。与直接数值模拟的结果相比(图 4(b)), 延拓得到的分岔图与直接数值模拟得到的分岔图吻合度较好。在图 4(a)中, 动力学分岔边界能够被清晰地展示, 这有助于更好地了解自旋 VCSEL 动力学行为及其背后的物理机制。

2 高频特性分析

圆偏振光注入 VCSEL 产生自旋极化载流子, 由于自旋载流子和光子自旋之间的耦合作用, 自旋 VCSEL 展示出双折射依赖的偏振振荡, 其振荡的频率远超弛豫振荡频率^[47]

$$f_R = [2\kappa\gamma_n(\eta - 1)]^{1/2}/(2\pi) \quad (4)$$

在 VCSEL 中, 增益腔的各向异性是造成双折射率的主要原因, 主要表现为: (1) 折射率各向异性引起的线偏振发射 $n_x \neq n_y$; (2) 2 个正交模式之间产生频率分裂 $\Delta f \approx \gamma_p/\pi - (\alpha/\pi)\gamma_a$, α 为线宽增强因子, γ_a 为二向色性。一般来说, 2 个正交模式之间的弱耦合导致了激光器不稳行为, 进一步表现为常见的偏振开关和电场的周期性演变。通过推广常规的 VCSEL 的模型和速率方程, 并考虑光学各项异性的影响, Žutić 等人通过理论分析揭示了偏振振荡与常规 VCSEL 中强度振荡相似的共振行为, 但是振荡频率有所不同^[14, 22]

$$\tilde{f}_R = \frac{\gamma_p}{\pi} - \frac{\gamma_r s_0}{4\pi(\gamma_s^2 + 4\gamma_p^2)\tau_p} (\alpha\gamma_s - 2\gamma_p) - \frac{\varepsilon_p s_0}{4\pi} \quad (5)$$

式中: γ_r 表示载流子复合速率; $\gamma_s=1/\tau_{sn}$ 表示自旋反转速率; ε_p 表示相位饱和增益。当 γ_p 足够大时, 式(5)后面两项可忽略, 即, $\tilde{f}_R \approx \gamma_p/\pi$, 该频率远超传统激光器的弛豫振荡频率。由于 VCSEL 的光学各向异性由 γ_p 决定, 因此正交偏振模式之间频率分裂 Δf 和振荡频率之间的关系可近似为 $\Delta f \approx \tilde{f}_R \approx \gamma_p/\pi$ 。

2010 年, Lee 等人通过使用光电混合泵浦 VCSEL, 在短脉冲的激励下, VCSEL 发射出频率为 11.6 GHz 的偏振振荡信号^[48]。通过减小双折射率, 偏振振荡能够被减弱。然而, 此振荡仅可在激光器工作在阈值附近时获得, 否则 VCSEL 的偏振振荡只能持续 1~2 ns。通过控制电流进一步降低二向色性, 偏振振荡的频率能持续到 5 ns^[38]。该课题组通过使用可变延迟的光泵浦脉冲控制振荡开关, 实现了频率为 10.3 GHz 的偏振振荡。Schires 等人在室

温下使用连续光泵浦 GaInNAs 量子阱 VCSEL 产生自连续的偏振振荡,其振荡频率范围为 8.6~11 GHz^[7,16]。Lindemann 等人通过施加机械应力调控 VCSEL 的双折射率,实现了可调的振荡频率,调谐范围约为 34 GHz。以上研究结果表明,自旋 VCSEL 的偏振振荡频率主要由双折射率主导,呈现近似线性的关系^[18]。为了实现更高的振荡频率,不同的调控 VCSEL 双折射率的方式被提出并验证。Panajotov 等人基于弹光效应实现了~80 GHz 的双折射率^[49]。Pusch 等人利用热效应和机械应力方式分别实现了~60 GHz 和~259 GHz 的双折射率^[50-51]。Pusch 等人还提出使用铁磁吸附效应在集成表面光栅实现了~98 GHz 的双折射率^[52]。高双折射率的实现使得自旋激光器在不同的领域具有巨大的应用潜力。

3 自旋激光器的应用

基于自旋激光器丰富的动力学特性和高频特性,近年来自旋激光器已被提出应用于不同的领域。目前已报道的自旋激光器的应用主要包括高速光通信、微波光子学、储备池计算、混沌保密通信等领域。

3.1 高速光通信

早期,自旋载流子的注入大多使用光电混合泵浦(脉冲光泵浦),产生的偏振振荡持续时间较短(~ns)^[10,38]。基于自旋 VCSEL 双折射诱导的偏振振荡特性,德国波鸿鲁尔大学 Gerhardt 课题组、美国纽约州立大学布法罗分校 Žutić 课题组和日本东北大学 Yokota 课题组提出使用自旋偏振调制机制来突破传统弛豫振荡的限制^[21-22],从而增强调制带宽,实现高速、低能耗光通信。自旋偏振调制下调制响应的共振行为示意图如图 5 所示。VCSEL 一般在台面区域具有线性双折射,因此显示出 2 个正交线偏振模式之间的频率分裂。由于 2 种模式具有一定的增益/损耗差,VCSEL 倾向于在单一单线偏振模式中发射。即使当增益不利模式由于相位-振幅耦合而产生激光时,其他偏振模式仍然不产生激光。外部注入调制信号时,产生与发射偏振态正交的调制边带。当调制频率 f_m 与频率分裂相当时,调制边带可以与非激发偏振腔模式耦合。因此,基于自旋 VCSEL 能够产生具有调制灵敏度高的宽调制带宽。

对半导体激光器而言,超越调制带宽的内在限制是实现高性价比、高性能的高速数据通信光发射机的关键。在传统半导体激光器中,由载流子-光子共振引起的弛豫振荡限制了电流调制下的调制带宽。由于弛豫振荡频率取决于激光器的光子和载流子的寿命以及注入电流,因此激光器的实际带宽小于 30 GHz^[53-55]。基于自旋 VCSEL 的高频偏振振荡特性,可通过操纵自旋载流子实现大的调制带宽,有效突破弛豫振荡的限制,为高速光通信提供了可能。

Yokota 等人从理论和实验上研究了 InAlGaAs 量子阱 VCSEL($\lambda=1550$ nm)的自旋偏振调制特性,以期能获得适合高速数据通信的调制带宽^[21]。实验中,光电混合泵浦方式被用来激发量子阱 VCSEL,通过连续(CW)光注入产生自旋载流子,并且采用应力方式调节双折射率为 17.5, 19.4 和 45.8 GHz。受限于测试设备的带宽,Yokota 等人实现了 23 GHz 的调制带宽,VCSEL 对应的双折射率为 19.4 GHz。另外他们在实验中发现,当双折射率为 45.8 GHz 时,测量的射频信号展示了明显的信噪比下降,这极大地降低了调制带宽,这一现象发生的原因可能是由应变过程中电子自旋弛豫时间的显著变化导致的。此外,通过理论仿真,Yokota 等人展示了调制响应下沉的现象。仿真结果表明,通过缩短自旋弛豫时间有助于调制带宽的提升。Yokota 等人的工作在 1550 nm VCSEL 上实现了偏振调制,该波长是最合适长距离通信的发射波长,验证了偏振动力学和自旋不平衡在激光器中的重要性。

Žutić 和 Gerhardt 等人利用短脉冲(ps)结合电注入方式研究了 AlGaAs 量子阱 VCSEL($\lambda=850$ nm)的偏振调制特性以及其在数字光通信领域的潜在应用^[22,56]。他们还利用机械应力方式改变 VCSEL 的双折射率,其振荡频率最大可达 212 GHz(VCSEL 弯曲接近损伤阈值)。为了更清晰地展示自旋 VCSEL 偏振调制和常规强度调制的区别,结合自旋反转模型,采用小信号分析手段,对比分析了自旋 VCSEL 强度调制和偏振调制动力学。从图 6(a)中可以看出,随着泵浦电流的增大(即增大光子密度),调制响应频率逐渐增大,其峰值频率与弛豫振荡频率相当。当泵浦电流增大至 9 倍阈值电流时,调制带宽(-3 dB 带宽)依旧不超过 20 GHz。图 6(b)展示了偏振调制,由图 6(b)可

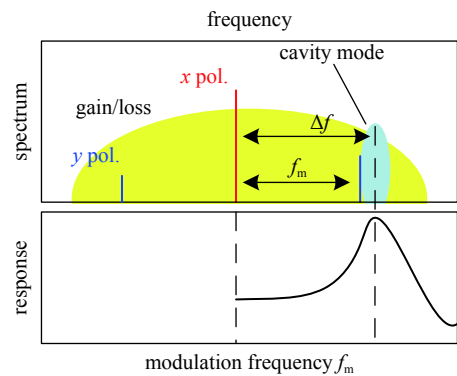


Fig. 5 Schematics of spin polarization modulation

图 5 自旋偏振调制机理示意图

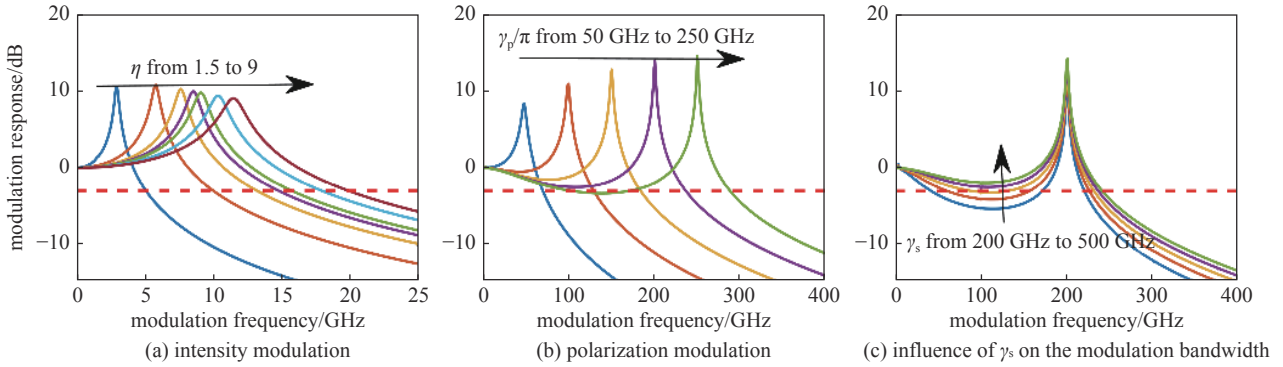


Fig. 6 Simulated intensity modulation and polarization modulation ($\kappa=325 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a=0$, $\gamma_s=450 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma=1 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha=5$, $P=0$ [22])

图 6 强度调制、偏振调制和自旋反转弛豫速率的影响

可以看出，调制响应频率直接依赖 VCSEL 的双折射率。当 $\gamma_p = 200\pi \text{ GHz}$ 时，调制带宽约为 240 GHz。为了量化数字数据传输性能，模拟了一个二进制伪随机数传输。在强度调制情形下，当数据传输速率为 20 Gb/s 时，眼图处于闭合状态，意味着传输信息不能有效恢复。然而，在偏振调制情形下，数据传输速率为 200 Gb/s 时，眼图清晰地张开，进一步增大传输速率至 240 Gb/s 时，依旧保持相对张开的状态，在一定技术手段下，信息能够被恢复 [22]。偏振调制下的信息传输速率相比常规激光器强度调制能够提升一个数量级。同时，相比于常规的方案，基于自旋 VCSEL 的自旋偏振调制能够显著降低能耗。由于未来的能耗主要由互联和信息传输而不是由晶体管和信处理决定，因此，这在未来高性能光互联中是非常重要的。

在以往的研究中，自旋 VCSEL 大都使用光电混合泵浦，只考虑了偏振椭圆率 $P_0=0$ 的情形。Schires 等人实验验证了全光泵浦（连续光泵浦）的 GaInNAs 量子阱自旋 VCSEL ($\lambda=1300 \text{ nm}$) [7] 和 InAsGa 量子点自旋 VCSEL ($\lambda=1300 \text{ nm}$) [9]。在光泵浦自旋激光器中，偏振椭圆率能够通过偏振控制器实时控制。因此，本课题组进一步研究了自旋 VCSEL 偏振调制中 $P_0 \neq 0$ 的情形，如图 7 所示 [57]。从图 7 中可以发现，当偏振椭圆率 $P_0 \neq 0$ 时，自旋 VCSEL 的偏振调制响应展示出 2 个响应峰，一个调制响应峰值接近弛豫振荡频率，另一个调制响应峰接近偏振振荡频率。此外，从图 7 中还能够看出，自旋弛豫速率不仅仅影响调制响应曲线的下沉，同时也会影响弛豫振荡峰的强度。如图 7(a2) 所示，当自旋弛豫速率 γ_s 增大时，第一个调制响应峰趋向于负值，进一步增大 γ_s 会导致调制带宽的降低。

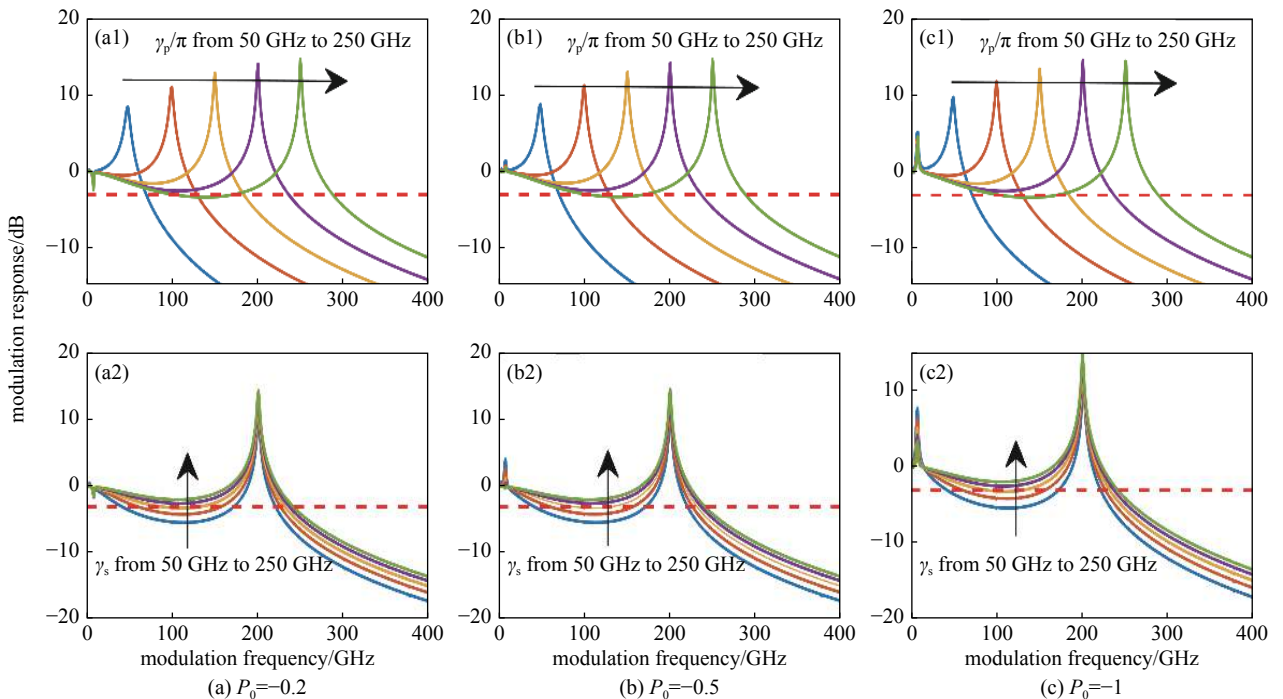


Fig. 7 Polarization modulation response at various polarization ellipticity ($\kappa=325 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a=0$, $\gamma_s=450 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma=1 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha=5$, $\eta=5.4$ [22])

图 7 不同偏振椭圆率下的偏振调制

因此,合理地调节自旋弛豫速率在自旋激光器高速光通信领域中具有重要的意义。

此外,通过提升光子晶体或者使用其他量子阱 VCSEL 能够进一步增大其双折射率^[58],调制带宽可以进一步提升,有望实现 THz 量级的调制带宽。Drong 等人提出了具有局部光学各向异性的自旋 VCSEL 的半经典模型。该模型考虑了电场的空间变化及其矢量性质,以及腔内的局部各向异性^[59],并在高对比度光栅的自旋 VCSEL 结构设计和优化中,理论实现了 THz 量级的偏振调制。这一研究表明,自旋 VCSEL 在超高速光通信领域具有巨大的应用潜力。然而,在 Žutić 和 Gerhardt 等人的研究中发现,AlGaAs 量子阱自旋 VCSEL 在足够的双折射率情形下,依旧表现出明显的调制响应下沉,降低了调制带宽^[22]。通过图 6(c)理论验证,短的自旋弛豫时间更有利于获得大的调制带宽。因此,在未来实现 THz 量级的调制带宽应选择合适的有源区材料。特别是 (In, Ga)As 器件中能够获得更高的自旋弛豫速率以满足 THz 量级的调制带宽^[60-61],如 GaAs 基 VCSEL 能够在室温下获得高的自旋弛豫速率 $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$ ^[61],理论上能够实现超过 500 GHz 的调制带宽。

基于自旋激光器的高频调制特性,Yokota 等人提出将其应用于光载无线通信(ROF)系统^[62],如图 8 所示。在这个系统中,分别调制电流和电子自旋极化来产生数据信息和毫米波载波。偏振器将偏振振荡转换为强度调制,从而将数据信息与毫米波载波结合。Yokota 等人基于自旋反转模型理论验证了 ROF 系统的可行性,并在 $\Delta f = 24 \text{ GHz}$ 的 VCSEL 器件中测试了 ROF 系统,通过光外差探测成功得到周期为 6.4 ns 的方波信号。

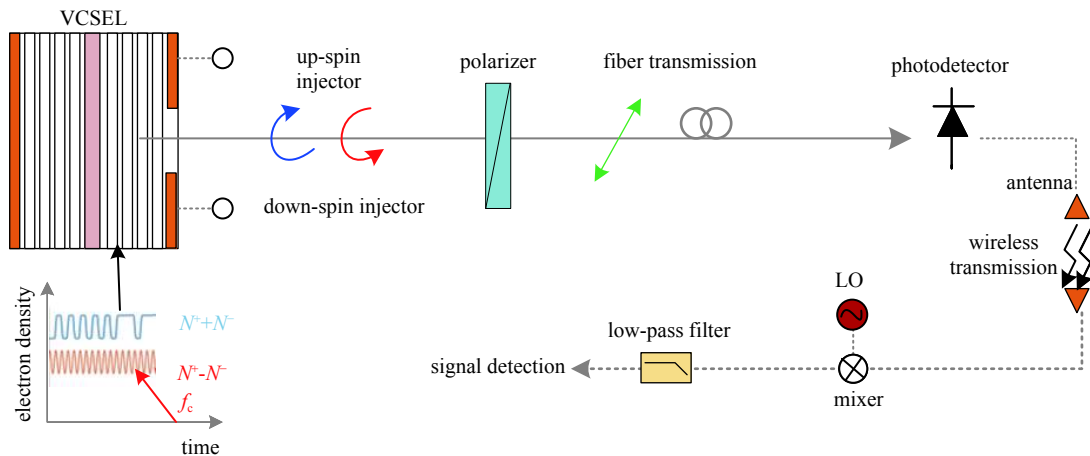
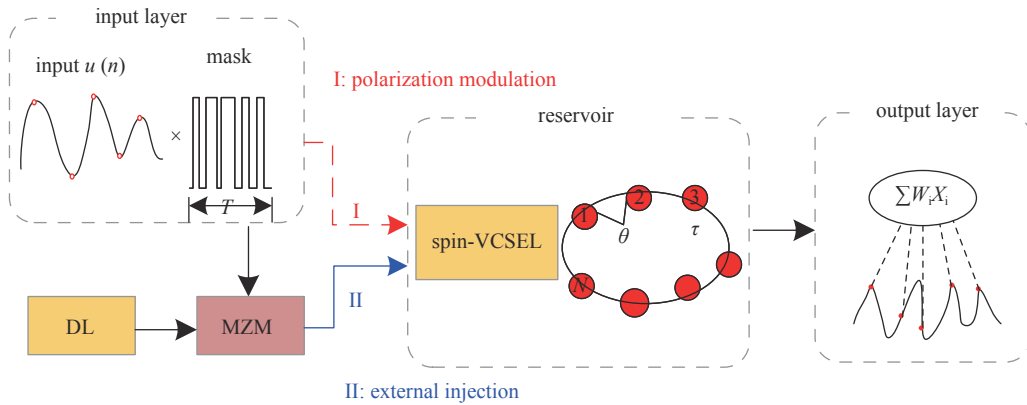


Fig. 8 Schematic model of spin-injected birefringent VCSEL toward analog radio-over-fiber systems^[62]

图 8 面向模拟光载无线通信系统的自旋注入双折射 VCSEL 模型^[62]

3.2 储备池计算

储备池计算(RC)是一种衍生自循环神经网络的机器学习结构,相比于其他类型神经网络,它具有训练简单的突出优点。近年来,基于单个具有延时反馈环的非线性节点构建而成的时延型储备池因极大简化了 RC 系统结构以及降低了 RC 物理实现难度而得到了广泛关注,光学领域中技术较为成熟的调制器、光放大器和半导体激光器等器件也被用作非线性节点成功实现了时延型 RC。上述光学非线性器件中,半导体激光器的高能效、高带宽及外部扰动下丰富的非线性动力学等特性使其在时延型 RC 中极具吸引力,且多类半导体激光器(如 VCSEL、纳米激光器、半导体环形激光器等)均被证明可凭借激光器独特性质对 RC 系统各方面性能进行优化^[63-65]。光泵自旋 VCSEL 与传统 VCSEL 相比具有偏振模式稳定、偏振可控、阈值电流低等特点,将自旋 VCSEL 应用于构建时间延迟型储备池计算系统将有助于提升系统的稳定性、可控性并降低能耗,更为重要的是,利用自旋 VCSEL 的超快偏振动力学,以自旋 VCSEL 作为非线性节点有望使 RC 的计算速率得到进一步提升。因此,本课题组提出了基于自旋 VCSEL 的储备池计算系统,利用自旋 VCSEL 中稳定且可调的左、右 2 个椭圆偏振模式,成功实现了高速度的单任务处理与多任务并行处理^[66],如图 9 所示。在该 RC 系统中,经过预处理的信息以光注入形式分别加载到自旋 VCSEL 的 2 个偏振模式并进行处理。本课题组通过 2 个基准任务(Santa Fe 时间序列预测任务和波形识别任务)分别对储备池计算系统的预测能力和分类能力进行了评估。结果表明,由于其固有的快速响应,基于自旋 VCSEL 的 RC 系统能够通过减少反馈延迟时间和虚拟节点间隔显著提高信息处理速率,单任务处理下速率可达 20 Gb/s,而并行处理条件下速率可达 10 Gb/s。除本课题组外,Harkhoe 等人通过自旋偏振调制方式加载信息,基于自旋 VCSEL 实现了单任务时延型 RC,在性能最佳时对应处理速率可达 5 Gb/s^[67]。



DL: drive laser. The masked input data was injected into the reservoir by using spin polarization modulation^[67] or external injection^[66]

Fig. 9 Schematic of reservoir computing based on a spin-VCSEL with delayed feedback

图9 基于延迟反馈自旋 VCSEL 储备池计算示意图

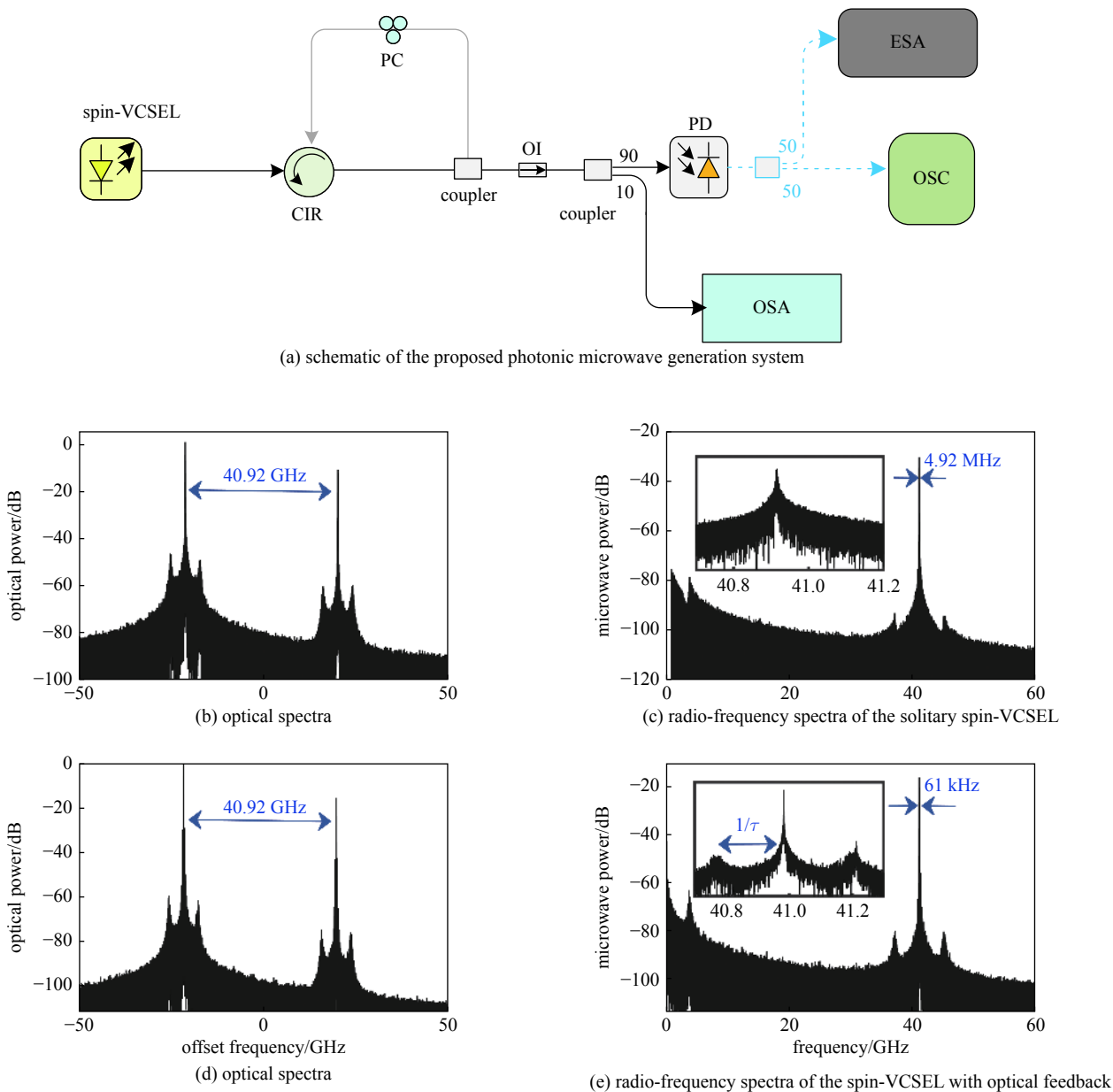
3.3 微波光子学

Schires 等人在光泵自旋 VCSEL 中实现了自连续的偏振振荡, 结合理论仿真表明, 偏振振荡与自旋弛豫速率、偏振椭圆率和双折射率密切相关, 并且预测其不同领域(数据通信、光谱学)存在巨大的应用潜力^[19]。本课题组基于自旋 VCSEL 的高频振荡特性, 提出了基于自旋 VCSEL 的微波信号产生方法^[40]。如图 10(a)所示, 光泵自旋 VCSEL 产生高频振荡信号, 经光电探测器(PD)转换后生成微波信号。此时, 参数设置为 $\kappa=300 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a=0$, $\gamma_s=30 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p=40\pi \text{ ns}^{-1}$, $\gamma=1 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha=3$, $\eta=2$, $P=-0.5$ 。图 10(b)展示了微波信号产生的示例, 此时 VCSEL 的双折射率 $\gamma_p=40 \text{ GHz}$, 从图中能够看出自旋 VCSEL 的正交偏振模式分裂频率约为 40 GHz , 两者拍频产生微波信号, 如图 10(c)所示。所产生的微波信号频率为 40 GHz , 远超弛豫振荡频率 (3.06 GHz)。然而, 由于半导体激光器内在的自发辐射噪声, 导致产生的微波信号性能不理想, 具体表现为较宽的线宽 ($\sim 5 \text{ MHz}$)。为了提升微波信号的质量, 本课题组引入光反馈以降低所产生微波信号的线宽, 如图 10(d)和图 10(e)所示。此时, 反馈强度为 1.1 ns^{-1} , 反馈延迟为 4 ns 。从图中能够看出光反馈能够显著的降低微波信号的线宽 ($\sim 61 \text{ kHz}$)。此外, 还深入地研究了反馈参数对微波信号质量的影响, 结果表明, 增加光反馈强度和反馈时延能够有效地降低微波的线宽。由于自旋 VCSEL 的可调频率的偏振振荡, 结合光反馈可实现窄线宽、高频率的微波信号。相比较于传统的微波信号产生方式^[68-70], 如光注入方式, 基于自旋 VCSEL 的微波信号产生提供了一种更简单、更高频率的微波信号生成方案。

3.4 混沌保密通信

基于半导体激光器产生的混沌信号具有带宽大、保密性高等优点, 可以与信息加密、传输和解密而实现安全性增强的高速保密光通信, 因此在网络空间安全、国家安全以及日常通信领域具有重要的应用价值。目前, 混沌光源多是分立器件构成。此类系统尺寸过大, 难以满足现代通信批量化、实用化和商用化的要求。当前先进的光子集成技术成为其理想的解决方案。易集成的自旋激光器无需外部反馈即可产生混沌信号, 因此在混沌光源领域具有巨大的应用价值。

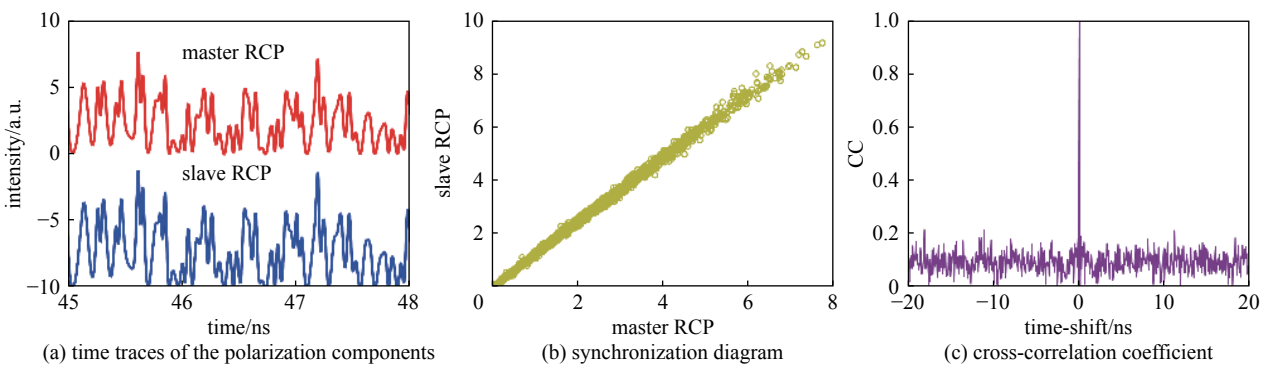
基于自激光器混沌动力学特性, 本课题组提出由 2 个光泵浦量子阱自旋 VCSEL 组成主从结构, 研究其混沌同步特性以及在安全通信中的应用^[71]。图 11 展示了主从激光器的混沌时间序列, 在选定的注入参数下, 主从自旋 VCSEL 能够很好地实现混沌同步。基于自旋 VCSEL 的 2 个附加的自由度: 泵浦强度 η 和泵浦椭圆率 P , 本课题组提出 2 种不同的加密方式。第一种是调制泵浦强度, 类似于混沌键控技术(CSK)。具体而言, 由 0 和 1 组成的信号通过小信号调制方式 $\eta_m=\eta[1+\delta_{\text{CSK}}Me(t)]$ 编码形成加密信息, 此时从激光器泵浦强度保持不变。传输后的信息与从激光器的输出相减产生差值信号, 随后通过五阶滤波器实现信息的解码。图 12(a)~图 12(d)中展示了 4 Gb/s 的数字信息和解码信息。从眼图中能够发现, 信息能够成功恢复, 几乎没有错误。在信息恢复过程中, 恢复的信息质量不仅仅取决于同步质量, 还取决于滤波机制。结果表明, 基于强度调制的信息编码方式的信息传输速率受限于弛豫振荡的频率 ($\sim 6 \text{ GHz}$)。另外, 从图 12(c)、图 12(d)中可以看出, 单一的偏振分量不能单独传递关于系统动态和编码信息的所有信息, 此种加密方案不能使用单一偏振输出实现信息的恢复。第二种是调制泵浦椭圆率, 类似于相位键控数(PSK), 如图 12(e)~图 12(h)所示。在这个方案中, 主激光器的偏振椭圆率 P 值在 -0.1 和 -0.4 之间来回切换, 从激光器的偏振椭圆率固定为 -0.1 。输入信息的 0 和 1 控制主激光器的偏振椭圆率的切换, 只有主从激



feedback strength $k_f=1.1 \text{ ns}^{-1}$ and feedback delay time $\tau=4 \text{ ns}$. $\kappa=300 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a=0$, $\gamma_s=30 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p=40\pi \text{ ns}^{-1}$, $\gamma=1 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha=3$, $\eta=2$, $P=-0.5$ [40]

Fig. 10 Schematic of the proposed photonic microwave generation system and optical spectra and radio-frequency spectra

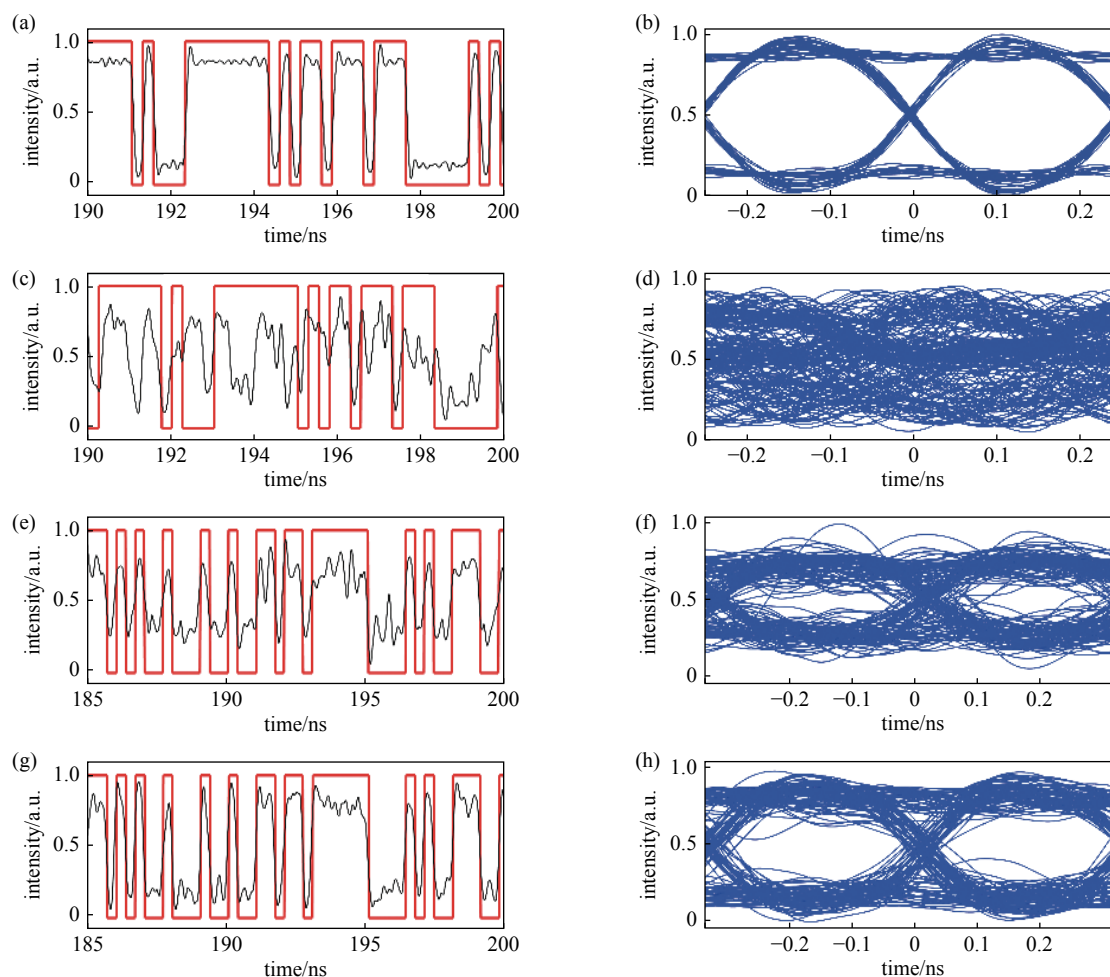
图 10 自旋 VCSEL 的光子微波产生系统以及光谱与频谱示意图



$\kappa=250 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a=0$, $\gamma_s=30 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p=8.8\pi \text{ ns}^{-1}$, $\gamma=0.68 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha=4$, $k_{ij}=100 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f=-20 \text{ GHz}$, $\eta^{M,S}=6$, and $P^{M,S}=-0.1$ [71]

Fig. 11 Cross-correlation between the master laser and slave laser

图 11 主从激光器的混沌时间序列



Modulated pump magnitude of the master spin-VCSEL. Recovered message from (a) the total intensity and (c) the RCP. (b) and (d) the corresponding eye diagrams. The bit rate is 4 Gb/s. Modulated pump polarization of the master spin-VCSEL. Recovered message from (e) the total intensity and (g) the RCP. (f) and (h) the corresponding eye diagrams. The bit rate is 3 Gb/s^[71]. The other parameters are the same as those in Fig. 8

Fig. 12 Modulated pump magnitude and polarization of the master spin-VCSEL ($P^{M,S}=-0.1$)

图 12 调制自旋 VCSEL 的泵浦振幅和偏振态

光器的偏振椭圆率相同时 ($P^m=P^s=-0.1$), 两者处于同步状态。图 12(e)~图 12(h)展示了单一输出偏振和总偏振情形下的信息编码和解码。从图中能够看出, 无论是单一输出或总强度输出, 系统均能实现良好的信息解码, 眼图保持张开状态。此外, 从图 12(e)~图 12(h)还显示出, 相比于总强度, 单一偏振输出能体现出更好的解码性能, 特别是在更高的比特速率下。这一现象是由于调制单一偏振分量比调制总强度的同步恢复时间更短(系统受到瞬态扰动时重新恢复同步所花费的时间)。进一步增大比特速率, 偏振调制编码方式能在 4 Gb/s 的比特速率下实现信息恢复。本课题组提出 2 种不同的编码方式, 能够实现在 4 Gb/s 的比特速率下的信息恢复。与传统激光器相比, 自旋 VCSEL 能够提供 2 种不同的信息加载方式以适应不同的应用场景, 因此其在安全保密通信领域具有巨大的应用潜力。同时, 基于自旋 VCSEL 混沌同步系统不会引入时延信号(外光反馈混沌产生系统), 提高了光通信的保密性。

此外, 本课题组进一步提出了一种基于 2 个光泵量子点自旋 VCSEL 混沌同步的高速密钥分发方案^[41, 72], 如图 13 所示。在这个方案中, 自旋 VCSEL 的附加自由度-偏振椭圆率能够实时改变, 2 个响应激光器具有相同的偏振椭圆率的情况下, 才能获得高质量的混沌同步。从激光器的输出通过采样和异或操作得到密钥流, 抛弃 2 个从激光器不同步的阶段, 保留同步阶段, 最终产生密钥信息。此方案基于自旋 VCSEL 的 2 个独特的优势: 偏振椭圆率可调和无需外部反馈结构。基于前者可以实现偏振键控混沌, 极大地提高了密钥分发的安全性。后者使系统具有简单的结构, 并且没有嵌入时延特性, 降低了信息泄露的风险。更重要的是其构成开环同步结构, 极大降低了同步恢复时间。该方案能够实现皮秒量级的同步恢复时间, 相比较于传统的安全密钥方案降低了约两个量级^[73], 为实现 Gb/s 的密钥分发提供了保障。基于这些优势, 本课题组数值验证了密钥分发速率约 1.34 Gb/s, 误码率低于 3.8×10^{-3}

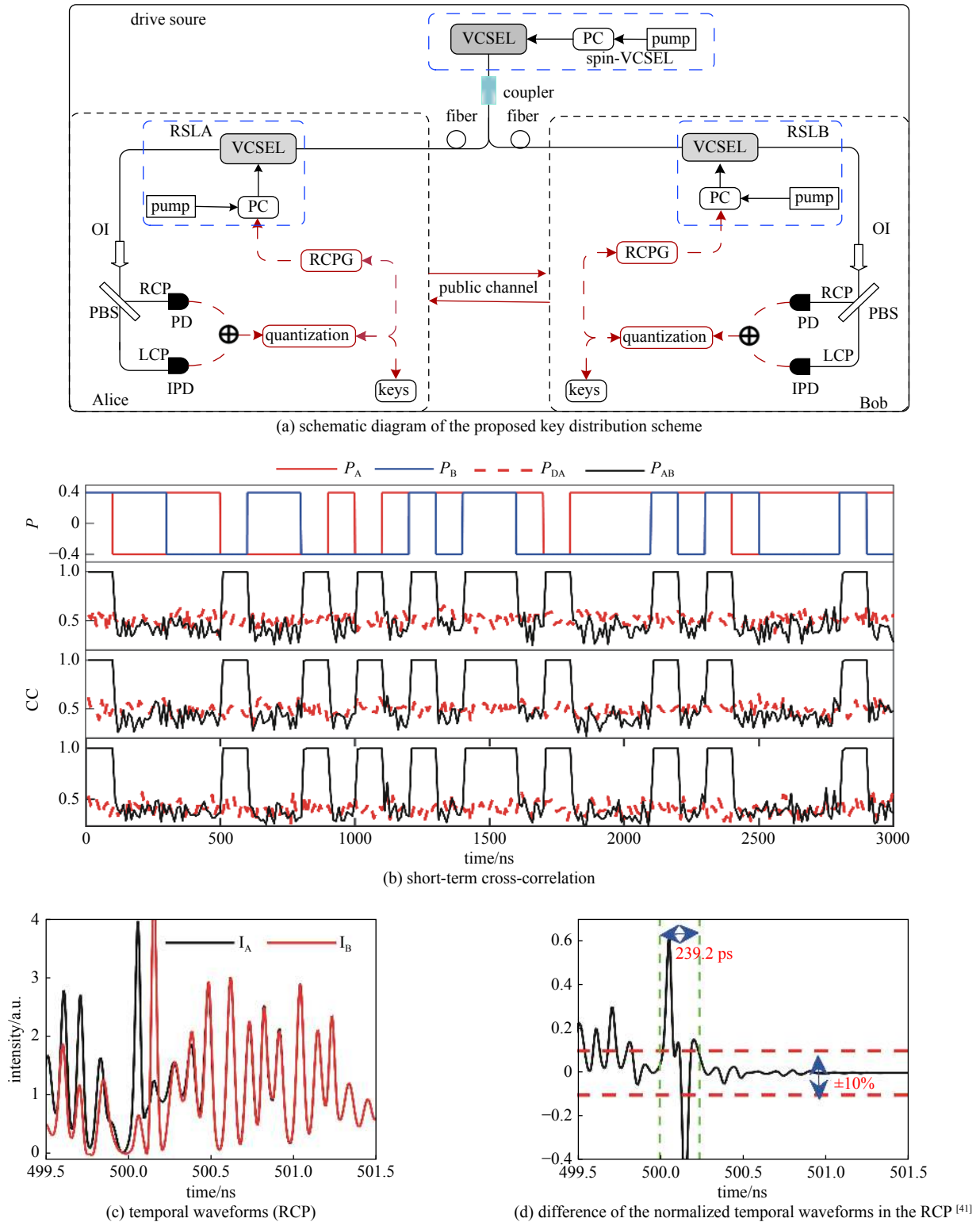


Fig. 13 Key distribution based on spin-VCSELs

图 13 基于自旋激光器的密钥分发

的密钥分发系统。基于自旋 VCSEL 的密钥分发方案为实现高速物理密钥分发提供了一种新的途径。

基于自旋激光器的偏振混沌动力学特性,其在混沌光雷达、光通信模块、分布式光纤传感等领域的应用价值会被继续研究开发。此外,研究者们也有望进一步调控自旋 VCSEL 偏振混沌信号的维度以面对更高需求的应用。

4 结 论

自旋激光器的研究在自旋电子学和常规激光器的发展基础上提供了良好的机遇。它不仅仅体现在优于常规

激光器的性能,而且还涉及阐明自旋电子学中的新概念和工作原理。深刻地理解自旋激光器的动力学及其特性,是指导高性能自旋电子器件的设计、制造与运行的基础,亦是推动自旋激光器在保密光通信、量子计算、光信息处理和数据存储、可重构光互联及生物医学传感等领域快速发展与应用的重要前提。在此梳理了几年来在自旋 VCSEL 动力学及应用领域取得的进展,阐述了自旋 VCSEL 动力学的演变、影响因素、物理机制以及其应用研究,主要结论与展望如下。

(1)通过调控偏振自由度,自旋 VCSEL 能产生丰富的动力学行为,包括稳态、单周期、多周期以及混沌。通过合理设计自旋 VCSEL 的参数,如自旋弛豫速率(改变活性材料)、双折射率,动力学行为能够有效地调控。基于动力学特性,自旋 VCSEL 被应用于光互相、微波光子、混沌保密通讯等领域,并且随着理论研究的发展和器件工艺的成熟,自旋激光器能够被期待应用于更多的交叉领域。然而,一些内在的缺陷也限制了其进一步发展。例如,在微波光子学领域,由于自发辐射噪声的影响,微波信号质量显著降低;在混沌光通信中,混沌信号的维度较低,可能会降低通信的安全性等。

(2)借助外场调控方式,是一种可供选择的方式弥补自旋激光器的缺陷。如外光反馈能够有效提升光子微波的性能^[40]。并且外场调控方式有可能进一步开发自旋激光器的潜力,如日本东北大学 Yokota 课题组提出并概念性地验证了光注入自旋激光器在相干光通信中的应用潜力^[74]。此外,自旋激光器的光子集成化进程中,外场调控的应用和研究是不可避免的。然而目前关于外场调控下自旋激光器的动力学及内在物理机制尚不清晰,亟需进一步的探索,以满足未来高性能自旋激光器的工程应用。

参考文献:

- [1] Gerhardt N C, Hofmann M R. Spin-controlled vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Advances in Optical Technologies*, 2012, 2012: 268949.
- [2] Adams M J, Alexandropoulos D. Parametric analysis of spin-polarized VCSELs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(6): 744-749.
- [3] Holub M, Shin J, Saha D, et al. Electrical spin injection and threshold reduction in a semiconductor laser[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98: 146603.
- [4] Alharthi S S, Hurtado A, Al Seyab R K, et al. Control of emitted light polarization in a 1310 nm dilute nitride spin-vertical cavity surface emitting laser subject to circularly polarized optical injection[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105: 181106.
- [5] Alharthi S S, Hurtado A, Korpjarvi V M, et al. Circular polarization switching and bistability in an optically injected 1300 nm spin-vertical cavity surface emitting laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 021117.
- [6] Basu D, Saha D, Bhattacharya P. Optical polarization modulation and gain anisotropy in an electrically injected spin laser[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 093904.
- [7] Schires K, Al Seyab R, Hurtado A, et al. Optically-pumped dilute nitride spin-VCSEL[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3550-3555.
- [8] Li Nianqiang, Alexandropoulos D, Susanto H, et al. Stability analysis of quantum-dot spin-VCSELs[J]. *Electronics*, 2016, 5: 83.
- [9] Alharthi S S, Orchard J, Clarke E, et al. 1300 nm optically pumped quantum dot spin vertical external-cavity surface-emitting laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107: 151109.
- [10] Li M Y, Jähme H, Soldat H, et al. Birefringence controlled room-temperature picosecond spin dynamics close to the threshold of vertical-cavity surface-emitting laser devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97: 191114.
- [11] Adams M, Li Nianqiang, Cemlyn B, et al. Algebraic expressions for the polarisation response of spin-VCSELs[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2018, 33: 064002.
- [12] Lee J, Oszwaldowski R, Göthgen C, et al. Mapping between quantum dot and quantum well lasers: from conventional to spin lasers[J]. *Physical Review B*, 2012, 85: 045314.
- [13] Žutić I, Fabian J, Sarma S D. Spintronics: fundamentals and applications[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76(2): 323-410.
- [14] Žutić I, Xu Gaofeng, Lindemann M, et al. Spin-lasers: spintronics beyond magnetoresistance[J]. *Solid State Communications*, 2020, 316-317: 113949.
- [15] Soldat H, Li Mingyuan, Gerhardt N C, et al. Room temperature spin relaxation length in spin light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 051102.
- [16] Schires K, Al Seyab R, Hurtado A, et al. Instabilities in optically-pumped 1300nm dilute nitride spin-VCSELs: experiment and theory[C]//Proceedings of IEEE Photonics Conference 2012. Burlingame: IEEE, 2012: 870-871.
- [17] Höpfner H, Lindemann M, Gerhardt N C, et al. Controlled switching of ultrafast circular polarization oscillations in spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 022409.
- [18] Lindemann M, Pusch T, Michalzik R, et al. Frequency tuning of polarization oscillations: toward high-speed spin-lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108: 042404.
- [19] Torre M S, Susanto H, Li Nianqiang, et al. High frequency continuous birefringence-induced oscillations in spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1628-1631.
- [20] Yokota N, Takeuchi R, Yasaka H, et al. Lasing polarization characteristics in 1.55- μm spin-injected VCSELs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017,

- 29(9): 711-714.
- [21] Yokota N, Nisaka K, Yasaka H, et al. Spin polarization modulation for high-speed vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113: 171102.
- [22] Lindemann M, Xu Gaofeng, Pusch T, et al. Ultrafast spin-lasers[J]. *Nature*, 2019, 568(7751): 212-215.
- [23] Frougier J, Baili G, Sagnes I, et al. Accurate measurement of the residual birefringence in VCSEL: Towards understanding of the polarization behavior under spin-polarized pumping[J]. *Optics Express*, 2015, 23: 9573-9588.
- [24] Etou K, Hiura S, Park S, et al. Room-temperature spin-transport properties in an $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ quantum dot spin-polarized light-emitting diode[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16: 014034.
- [25] Michalzik R. VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 166.
- [26] Sarma S D, Fabian J, Hu Xuedong, et al. Spin electronics and spin computation[J]. *Solid State Communications*, 2001, 119(4/5): 207-215.
- [27] Sarma S D, Fabian J, Hu Xuedong, et al. Spintronics: electron spin coherence, entanglement, and transport[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2000, 27(5/6): 289-295.
- [28] Parkin S P S, Kaiser C, Panchula A, et al. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers[J]. *Nature Materials*, 2004, 3(12): 862-867.
- [29] Alharthi S S, Al Seyab R K, Henning I D, et al. Simulated dynamics of optically pumped dilute nitride 1300 nm spin vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IET Optoelectronics*, 2014, 8(2): 117-121.
- [30] Alharthi S S. Nonlinear dynamics of solitary and optically-injected spin vertical-cavity lasers[D]. Essex: University of Essex, 2016: 82-180.
- [31] Virte M, Panajotov K, Thienpont H, et al. Deterministic polarization chaos from a laser diode[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(1): 60-65.
- [32] Raddo T R, Panajotov K, Borges B H V, et al. Strain induced polarization chaos in a solitary VCSEL[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14032.
- [33] Alexandropoulos D, Al-Seyab R, Henning I, et al. Instabilities in quantum-dot spin-VCSELs[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1700-1702.
- [34] Li Nianqiang, Susanto H, Cemlyn B R, et al. Mapping bifurcation structure and parameter dependence in quantum dot spin-VCSELs[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14636-14649.
- [35] Song Tingting, Xie Yiyuan, Ye Yichen, et al. Numerical analysis of nonlinear dynamics based on spin-VCSELs with optical feedback[J]. *Photonics*, 2021, 8: 10.
- [36] Saha D, Basu D, Bhattacharya P. High-frequency dynamics of spin-polarized carriers and photons in a laser[J]. *Physical Review B*, 2010, 82: 205309.
- [37] Al-Seyab R, Alexandropoulos D, Henning I D, et al. Instabilities in spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(5): 799-809.
- [38] Gerhardt N C, Li M Y, Jähme H, et al. Ultrafast spin-induced polarization oscillations with tunable lifetime in vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 151107.
- [39] Li Nianqiang, Susanto H, Cemlyn B, et al. Stability and bifurcation analysis of spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Physical Review A*, 2017, 96: 013840.
- [40] Huang Yu, Zhou Pei, Li Nianqiang. Broad tunable photonic microwave generation in an optically pumped spin-VCSEL with optical feedback stabilization[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3147-3150.
- [41] Huang Yu, Zhou Pei, Li Nianqiang. High-speed secure key distribution based on chaos synchronization in optically pumped QD spin-polarized VCSELs[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 19675-19689.
- [42] Vaughan M, Susanto H, Henning I, et al. Dynamics of laterally-coupled pairs of spin-VCSELs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56: 2400310.
- [43] Lindemann M, Pusch T, Michalzik R, et al. Investigations on polarization oscillation amplitudes in spin-VCSELs[C]//Proceedings of SPIE 10122, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXI. San Francisco: SPIE, 2017: 1012200.
- [44] Susanto H, Schires K, Adams M J, et al. Spin-flip model of spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers: asymptotic analysis, numerics, and experiments[J]. *Physical Review A*, 2015, 92: 063838.
- [45] Martin-Regalado J, Prati F, Miguel M S, et al. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(5): 765-783.
- [46] Gahl A, Balle S, Miguel M S. Polarization dynamics of optically pumped VCSELs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(3): 342-351.
- [47] Homayounfar A, Adams M J. Analysis of SFM dynamics in solitary and optically-injected VCSELs[J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10504-10519.
- [48] Lee J, Falls W, Oszwaldowski R, et al. Spin modulation in semiconductor lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97: 041116.
- [49] Panajotov K, Nagler B, Verschaffel G, et al. Impact of in-plane anisotropic strain on the polarization behavior of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(11): 1590-1592.
- [50] Pusch T, La Tona E, Lindemann M, et al. Monolithic vertical-cavity surface-emitting laser with thermally tunable birefringence[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110: 151106.
- [51] Pusch T, Lindemann M, Gerhardt N C, et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers with birefringence splitting above 250 GHz[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(20): 1600-1602.
- [52] Pusch T, Debemardi P, Lindemann M, et al. Vertical-cavity surface-emitting laser with integrated surface grating for high birefringence splitting[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(19): 1055-1057.

- [53] Zhu Ninghua, Shi Zhan, Zhang Zhike, et al. Directly modulated semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(1): 1-19.
- [54] Zhou Daibing, Liang Song, Zhao Lingjuan, et al. High-speed directly modulated widely tunable two-section InGaAlAs DBR lasers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2341-2346.
- [55] Rosales R, Zorn M, Lott J A. 30-GHz bandwidth with directly current-modulated 980-nm oxide-aperture VCSELs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(23): 2107-2110.
- [56] Xu Gaofeng, Cao J D, Labinac V, et al. Intensity equations for birefringent spin lasers[J]. *Physical Review B*, 2020, 103: 045306.
- [57] Huang Yu, Zhou Pei, Torre M S, et al. Optically pumped spin-VCSELs: toward high-frequency polarization oscillations and modulation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57: 2400212.
- [58] Junior P E F, Xu Gaofeng, Lee J, et al. Toward high-frequency operation of spin lasers[J]. *Physical Review B*, 2015, 92: 075311.
- [59] Drong M, Fördös T, Jaffrès H Y, et al. Spin-VCSELs with local optical anisotropies: toward terahertz polarization modulation[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15: 014041.
- [60] Kini R N, Nontapot K, Khodaparast G A, et al. Time resolved measurements of spin and carrier dynamics in InAs films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: 064318.
- [61] Blansett E L, Raymer M G, Khitrova G, et al. Ultrafast polarization dynamics and noise in pulsed vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optics Express*, 2001, 9(6): 312-318.
- [62] Yokota N, Ikeda K, Yasaka H. Spin-injected birefringent VCSELs for analog radio-over-fiber systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(6): 297-300.
- [63] Guo Xingxing, Xiang Shuiying, Zhang Yahui, et al. High-speed neuromorphic reservoir computing based on a semiconductor nanolaser with optical feedback under electrical modulation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26: 1500707.
- [64] Vatin J, Rontani D, Sciamanna M. Enhanced performance of a reservoir computer using polarization dynamics in VCSELs[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4497-4500.
- [65] Bueno J, Brunner D, Soriano M C, et al. Conditions for reservoir computing performance using semiconductor lasers with delayed optical feedback[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2401-2412.
- [66] Yang Yigong, Zhou Pei, Li Nianqiang. Time-delayed reservoir computing based on an optically pumped spin VCSEL for high-speed processing[J]. submitted to *Nonlinear Dynamic*.
- [67] Harkhoe K, Verschaffelt G, Van der Sande G. Neuro-inspired computing with spin-VCSELs[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11: 4232.
- [68] Wang Cheng, Raghunathan R, Schires K, et al. Optically injected InAs/GaAs quantum dot laser for tunable photonic microwave generation[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1153-1156.
- [69] Chan S C, Hwang S K, Liu Jiaming. Period-one oscillation for photonic microwave transmission using an optically injected semiconductor laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14921-14935.
- [70] Lin Xiaodong, Xia Guangqiong, Yang Tilian, et al. Photonic microwave generation based on an OISL by subharmonic modulation from an OEO[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(22): 1846-1849.
- [71] Li Nianqiang, Susanto H, Cemlyn B, et al. Secure communication systems based on chaos in optically pumped spin-VCSELs[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3494-3497.
- [72] Huang Yu, Zhou Pei, Li Nianqiang. Chaos synchronization in optically pumped quantum-dot spin-VCSELs[C]//*Proceedings of SPIE 11763, Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications*. Kunming: SPIE, 2021: 1176361.
- [73] Jiang Ning, Xue Chenpeng, Liu Ding, et al. Secure key distribution based on chaos synchronization of VCSELs subject to symmetric random-polarization optical injection[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1055-1058.
- [74] Yokota N, Yasaka H. Spin laser local oscillators for homodyne detection in coherent optical communications[J]. *Micromachines*, 2021, 12: 573.