

电光调制对外部光注入垂直腔表面发射激光器的偏振转换及其非线性动力学行为的操控性研究

钟东洲 计永强 邓涛 周开利

Manipulation of the polarization switching and the nonlinear dynamic behaviors of the vertical-cavity surface-emitting laser subjected to optical injection by EO modulation

Zhong Dong-Zhou Ji Yong-Qiang Deng Tao Zhou Kai-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光学全息的任意矢量光的生成方法

Generation of arbitrary vector beam based on optical holography

物理学报.2015, 64(12): 124202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124202>

基于扭曲向列液晶空间光调制器的矢量光生成

Generation of vector beams in terms of the partial light modulator of twisted nematic liquid crystal

物理学报.2015, 64(11): 114204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114204>

离轴椭圆矢量光场传输中的光斑演变

Propagation evolution of the off-axis ellipse vector beam

物理学报.2015, 64(2): 024204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024204>

像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用

Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement

物理学报.2014, 63(18): 184204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184204>

光源参数及大气湍流对电磁光束传输偏振特性的影响

Effect of source parameters on polarization characteristics of electromagnetic beam propagating in atmospheric turbulence

物理学报.2014, 63(10): 104201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104201>

电光调制对外部光注入垂直腔表面发射激光器的偏振转换及其非线性动力学行为的操控性研究*

钟东洲^{1)†} 计永强¹⁾ 邓涛²⁾ 周开利¹⁾

1)(五邑大学信息工程学院, 江门 529020)

2)(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2014年10月16日收到; 2014年11月13日收到修改稿)

针对主和副垂直腔表面发射激光器构成的外部注入激光器系统的偏振转换及其非线性动力学行为, 利用周期性极化铌酸锂晶体中准相位匹配线性电光调制, 本文提出了一种新的操控方案并且探索了其控制规律. 研究发现, 受到平行光注入或正交光注入的副激光器输出偏振度随外加电场成周期性振荡变化, 其振荡波峰轨迹包络曲线为正弦曲线, 而振荡波谷轨迹包络曲线为余弦曲线; 选取一定的主激光器偏置电流, 通过对来自主激光器的光进行电光调制, 受到两种方式注入的副激光器可以输出任意偏振模, 并且其非线性动力学行为经历不同的演变. 另外, 副激光器的偏振度仅依赖于外加电场, 与副激光器的偏置电流无关.

关键词: 外部光注入垂直腔表面发射激光器, 准相位匹配线性电光效应, 偏振转换, 非线性动力学行为

PACS: 42.25.Ja, 42.50.Md, 42.60.Mi, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.64.114203

1 引言

垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 具有低阈值电流、单纵模工作、结构紧凑、低能量损耗、低成本、圆形光输出且容易与光纤耦合、动态调制带宽高等优良特性^[1]. 因此, 它在光开关、全光复合逻辑门, 光互连、光存储、光通信、光子信息处理等领域具有广泛的应用前景. 根据自旋反转模型 (SFM)^[2], 由于 VCSEL 中增益介质或激光腔中存在弱的各向异性, 其输出包含两个相互垂直的线性偏振模分量. 而激光腔中晶体的各向异性、结构均称性和波导效应导致了 VCSEL 输出偏振方向沿着有源区横截面的任一方向 (垂直于光传播方向). 而当偏振方向优先取向于激光器的正交基坐标系 (取两个正交基矢 $\mathbf{e}_x = \mathbf{x}$, $\mathbf{e}_y = \mathbf{y}$) 下的 \mathbf{x} 方向为 x 偏振时, 激光器输出为 x 线性偏振模 (简称为 x -LP 模). 当偏振方向优先取 \mathbf{y} 方向为 y 偏振, 其输出为 y 线性偏振模

(简称为 y -LP 模). 当偏振方向优先取向于 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 的合成方向为混合偏振 (同时包括 x 偏振和 y 偏振), 激光器输出为椭圆偏振或圆偏振模. 许多实验和理论研究结果表明, 尽管 VCSEL 是单纵模激光器, 但是, 其输出表现为非常复杂的偏振转换 (PS) 特性^[3-12]. 其偏振转换对外部光轻微扰动非常敏感.

在对 PS 非常敏感的 VCSEL 应用领域, 如全光开关、全光复合逻辑门、光子信息处理, 光学存储, 偏振复用保密通信系统中, 如何精确和稳定控制 VCSEL 输出偏振和其非线性动力学行为是十分关键的技术. 外部光注入通常也作为一种技术来控制或获得 PS. 对于 VCSEL 而言, 外部光注入有两种方式: 平行光注入 (POI) 和正交光注入 (OOI). 在主和副 VCSEL 构成的外部注入激光器系统中, 若将主激光器 x 和 y 线性偏振分量分别注入到副激光器对应的 x 和 y 线性偏振分量上, 称之为 POI. 若把主激光器 x 和 y 线性偏振分量分别注入到副激光器对应的 y 和 x 线性偏振分量上, 称之为 OOI^[13].

* 国家自然科学基金面上项目 (批准号: 61475120) 和广东省自然科学基金 (批准号: S2011010006105) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dream_yu2002@126.com

近年来, 通过改变激光器的两个关键参数(如外部注入光强和偏置电流), 许多理论和实验工作已经观察到两种注入方式下的副激光器的PS和非线性动力学行为的演变^[3-13]. 从这些相关研究结果可知, 由于VCSEL对外部注入光强和偏置电流非常敏感, 这两个参数轻微的改变也可能导致激光器输出两线性偏振模能量之间产生激烈的竞争, 引起两偏振之间转换频率增加, 从而使激光器输出偏振非常不稳定^[3-13]. 另外, 其非线性动力学演变也极其不稳定. 结果, 通过上述两个激光器参数来精确和稳定控制偏振转换和非线性行为的演变是相当困难的; 使激光器稳定地输出具有特殊用途的圆偏振模也是一件不容易的事; 激光器输出两偏振模之间能量也很难达到稳定的均衡. 这些因素使外部注入VCSEL的应用前景受到一定的限制. 为此, 本文中, 根据新电光调制理论^[14], 针对外部注入VCSEL的PS和非线性动力学行为, 我们提出一种新的控制方案. 在此方案中, 若对主激光器输出光进行电光调制, 受到POI或OOI的副激光器可以输出稳定任意偏振模, 也可以获得不同的非线性动力学行为.

众所周知, 电光调制的物理基础是线性电光效应. 长期以来, 折射率椭球理论被用来描述线性电

光效应. 然而, 由于激光器输出载波表现为非常复杂的非线性动力学行为, 所以作为该理论的关键步骤之一, 其标准化变得非常困难以致难以实现. 2001年, 取代该理论的线性电光效应耦合波理论被She等提出^[14]. 该理论可以应用到任意光脉冲沿着电光晶体的任意方向传播的情形. 该理论所描述的线性电光效率依赖于光场的两偏振分量之间的相位匹配. 目前, 与双折射率相位匹配技术相比, 基于光学超晶格晶体的准相位匹配技术具有许多优点. 例如, 工程上比较容易实现、响应带宽较宽、能利用晶体的最大电光系数和透明波长范围. 而周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)作为光学超晶格晶体的典型代表, 具有良好的电光特性. 因此, 它常用于线性电光效应的相位匹配^[15-17]. 基于上述考虑, 根据PPLN中准相位匹配线性电光效应耦合波理论^[15], 我们探索了外部注入VCSEL的PS和非线性动力学行为的操控性方案. 探讨了在不同的外加电场下, 激光器的PS规律和非线性动力学的演变规律.

2 控制方案和理论模型

图1所示为外部注入VCSEL的PS及非线性

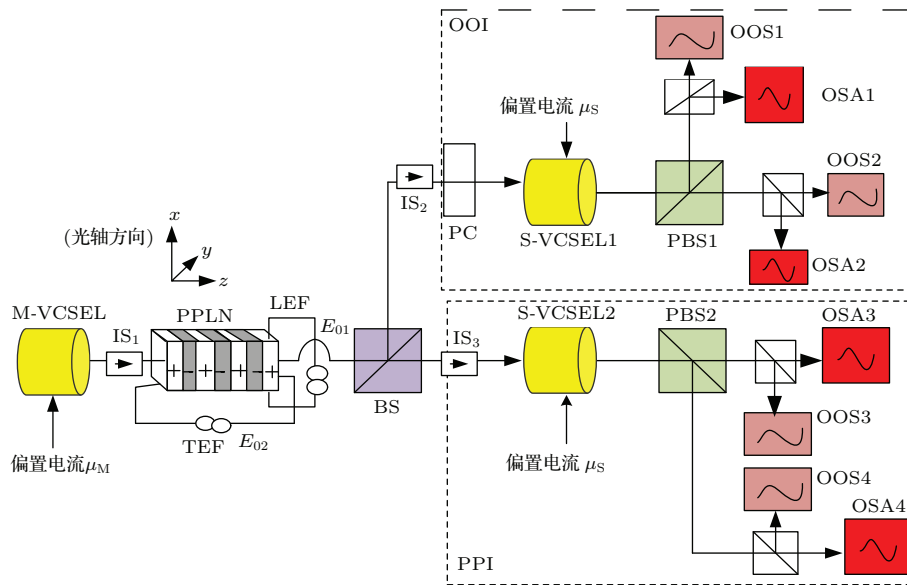


图1 (网刊彩色) 外部注入VCSEL的偏振转换及其非线性动力学行为的操控方案. 图中, M-VCSEL: 主激光器 (Master VCSEL); S-VCSEL: 副激光器 (Slave VCSEL); LEF: 纵向外加电场; TEF: 横向电场; IS: 光隔离器; PPLN: 周期性极化铌酸锂晶体; μ_M 和 μ_S : 归一化偏置电流; BS: 分束器; PC: 偏振控制器; PBS: 极化分束器; OOS: 光学示波器; OSA: 光学频谱分析仪; PC: 偏振控制器; POI: 平行光注入; OOI: 正交光注入.

Fig. 1. (color online) The schematic of the control scheme for the polarization switching and the nonlinear dynamic behaviors of optically injected VCSEL, where M-VCSEL, master VCSEL; S-VCSEL, slave VCSEL; LEF, longitudinal electric field; TEF, transverse electric field; IS, isolator; PPLN, periodical poled LiNbO₃; μ_M and μ_S , the bias current; BS, beam splitter; PBS, polarization beams splitter; OOS, optical oscilloscope; OSA, Optical spectrum analyzer; PC, polarization controller; POI, parallel optical injection; OOI, orthogonal optical injection.

动力学行为的操控方案. 图1左边部分中的M-VCSEL为主VCSEL; 右边部分中的S-VCSEL1和S-VCSEL2分别为受到POI和OOI的副VCSEL. 图中IS₁为了避免光从PPLN的左端反馈回M-VCSEL, IS₁和IS₂为了避免光反馈回PPLN. M-VCSEL在偏置一定偏置电流 μ_M 的作用下, 产生两个LP模, 即TE和TM模, 由于这两个LP模偏振方向分别沿着晶体坐标轴的 x -和 y 方向, 因此它们分别命名为 x -和 y -LP模. 在外加电场作用 E_{01} 和 E_{02} 的作用下, 这两个LP模分量在PPLN中分别经历电光幅度和电光相位调制. 被调制后的光通过分束器BS分成两路. 其中一路光束经过偏振控制器PC后, 其 x -和 y -LP偏振模分量分别转换成与之垂直的 y -和 x -LP偏振模分量, 然后注入到S-VCSEL1中. 这种注入方式为OOI. 另外一束光的两个偏振模分量直接注入到S-VCSEL2中. 这种注入方式定义为POI. 受到OOI的S-VCSEL1输出 x -LP模分量的时间轨迹和功率频谱分别通过OOS1和OSA1来测量, 而其 y -LP模分量的时间轨迹和功率频谱通过OOS2和OSA2来测量. 受到PPI的S-VCSEL2输出 x -和 y -LP的时间轨迹分别通过OOS3和OOS4来测量, 它们的功率频谱则通过OSA3和OSA4来测量.

根据SFM^[2], M-VCSEL受到偏置电流注入时, 其速率方程组为

$$\begin{aligned}
 & \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} E_{Mx}(t) \\ E_{My}(t) \end{pmatrix} \\
 & = k(1 + ia)[N_M(t) - 1] \begin{pmatrix} E_{Mx}(t) \\ E_{My}(t) \end{pmatrix} \\
 & \pm ik(1 + ia)n_M(t) \begin{pmatrix} E_{My}(t) \\ E_{Mx}(t) \end{pmatrix} \\
 & \mp (\gamma_a + i\gamma_p) \begin{pmatrix} E_{Mx}(t) \\ E_{My}(t) \end{pmatrix} \\
 & + \begin{pmatrix} [\beta_{sp}(N_M(t) + n_M(t))/2]^{1/2} \\ -i[\beta_{sp}(N_M(t) + n_M(t))/2]^{1/2} \end{pmatrix} \xi_1 \\
 & + \begin{pmatrix} [\beta_{sp}(N_M(t) - n_M(t))/2]^{1/2} \\ i[\beta_{sp}(N_M(t) - n_M(t))/2]^{1/2} \end{pmatrix} \xi_2, \quad (1) \\
 & \frac{dN_M(t)}{dt} \\
 & = -\gamma_e\{N_M(t) - \mu_M \\
 & + N_M(t)(|E_{Mx}(t)|^2 + |E_{My}(t)|^2)
 \end{aligned}$$

$$+ in_M(t)[E_{My}(t)E_{Mx}^*(t) - E_{Mx}(t)E_{My}^*(t)], \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{dn_M(t)}{dt} \\
 & = -\gamma_s n_M(t) \\
 & - \gamma_e\{n_M(t)(|E_{Mx}(t)|^2 + |E_{My}(t)|^2) \\
 & + iN_M(t)[E_{My}(t)E_{Mx}^*(t) \\
 & - E_{Mx}(t)E_{My}^*(t)]\}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中, 下标M表示M-VCSEL; 下标 x 和 y 分别表示 x -LP模分量和 y -LP模分量; E 为光场的复振幅; N 为反转载流子数; n 为上旋和下旋辐射载流子数差; $k = 1/(2\tau_p)$, τ_p 为载流子寿命; γ_e 为载流子数损耗速率; α 为线性增宽因子; γ_s 为光子自旋速率; γ_a 和 γ_p 分别表示各向异性光场振幅损耗速率和有源介质线性双折射效应; β_{sp} 为自发辐射速率; ξ_1 和 ξ_2 均为高斯白噪声, 其平均值为0, 均方差为1. 让M-VCSEL输出的 x -LP和 y -LP模分量的偏振方向分别沿PPLN晶体的 x 和 y 轴方向, 即作为晶体的o光和e光的初始输入. 晶体中两偏振光的初始输入复振幅 U 与 x -LP和 y -LP模分量复振 E 有如下约束关系^[6]:

$$\begin{aligned}
 & U_{x,y}(0, t - \tau) \\
 & = \sqrt{\frac{\hbar\omega_0 V}{ST_L C n_{1,2}}} E_{Mx,My}(t - \tau), \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中, \hbar 为Planck常数; S 为光斑有效面积; V 为激光器有源层体积; C 为真空中的光速; $T_L = 2n_g C/L_V$ 为光在激光腔内来回一周的时间, L_V 是激光腔的长度, n_g 为激光器有源层的有效折射率; ω_0 为M-VCSEL的发射激光脉冲的中心波长;

n_1 和 n_2 分别 x -LP和 y -LP模的未扰动折射率; τ 为光从M-VCSEL到S-VCSEL的时延. 由于相位失配, 其他二阶非线性效应非常微弱以致被忽略, 我们获得两偏振模分量在PPLN晶体中线性电光效应耦合波方程如下^[15]:

$$\begin{aligned}
 \frac{dU_x(t, x)}{dx} & = -id_1(x)U_y(t, x) \exp(i\Delta kx) \\
 & - id_2(x)U_x(t, x), \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dU_y(t, x)}{dx} & = -id_3(x)U_x(t, x) \exp(-i\Delta kx) \\
 & - id_4(x)U_y(t, x), \quad (6)
 \end{aligned}$$

这里

$$d_1 = \frac{k_0}{2\sqrt{n_1 n_2}} r_{\text{eff}1} E_0 f_1, \quad (7)$$

$$d_2 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff}2} E_0 f_0, \quad (8)$$

$$d_3 = \frac{k_0}{2\sqrt{n_1 n_2}} r_{\text{eff1}} E_0 f_{-1}, \quad (9)$$

$$d_4 = \frac{k_0}{2n_2} r_{\text{eff3}} E_0 f_0, \quad (10)$$

其中, 有效电光系数表达式为

$$r_{\text{eff1}} = \sum_{j,k,l} (\varepsilon_{jj}\varepsilon_{kk}) a_j r_{jkl} b_k c_l, \quad (11)$$

$$r_{\text{eff2}} = \sum_{j,k,l} (\varepsilon_{jj}\varepsilon_{kk}) a_j r_{jkl} a_k c_l, \quad (12)$$

$$r_{\text{eff2}} = \sum_{j,k,l} (\varepsilon_{jj}\varepsilon_{kk}) b_j r_{jkl} b_k c_l, \quad (13)$$

方程式(5)–(13)中, $j, k, l = 1, 2, 3$ (以下相同); 晶体的对角化电介质张量元 $\varepsilon_{jj} = n_{jj}^2$, $\varepsilon_{kk} = n_{kk}^2$; r_{jkl} 为晶体的电光张量元; \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 为两偏振光分量的单位矢量; \mathbf{c} 为外加电场的单位矢量. 由于PPLN是单轴晶体, 所以 $\mathbf{b} = (-\cos\theta \cos\varphi, -\cos\theta \sin\varphi, \sin\theta)$, $\mathbf{a} = (\sin\varphi, -\cos\varphi, 0)$, 这里 θ 和 φ 分别为极化角和方位角. 外加电场分别沿晶体的 y 和 z 方向, 并且

$E_{01} = E_0$ 和 $E_{02} = 2E_0$ 时, $\mathbf{c} = (0, 1, 2)$. 此外, $f_0 = 2D - 1$ 为晶体结构函数被Fourier级数展开后的零阶系数; 正负一阶Fourier级数分别是 $f_1 = [1 - \cos(2\pi D) + i \sin(2\pi D)]/(i\pi)$ 和 $f_{-1} = [1 - \cos(-2\pi D) + i \sin(-2\pi D)]/(-i\pi)$; 占空比 $D = \ell^+ / (\ell^+ + \ell^-)$, ℓ^+ 和 ℓ^- 分别表示晶体的正和负畴; $\Delta k = k_x - k_y + K_1$, $K_1 = 2\pi/\Lambda$ 是第一阶倒格矢, Λ 为晶体的极化周期. $k_x = 2\pi n_1 C / \omega_0$ 和 $k_y = 2\pi n_2 C / \omega_0$ 分别为两LP模在中心频率 ω_0 的波矢; k_0 为光脉冲在真空中的波矢. 考虑晶体的一阶倒格矢 K_1 与两偏振模分量的波矢失配 $k_x - k_y$ 接近, 同时忽略哪些波矢失配对电光效应贡献不大的项, 我们获得方程(5)和(6)的解析解如下:

$$\begin{aligned} & u_{x,y}(t - \tau, L) \\ &= \rho_{x,y}(t - \tau, L) \exp(i\beta_0 L) \\ & \quad \times \exp[i\phi_{x,y}(t - \tau, L)], \end{aligned} \quad (14)$$

这里

$$\rho_{x,y}(t - \tau, L) = \left\{ u_{x,y}^2(t - \tau, 0) \cos^2(\nu L) + \left[\frac{\gamma u_{x,y}(t - \tau, 0) \mp d_{1,3} u_{y,x}(t - \tau, 0)}{\nu} \right]^2 \sin^2(\nu L) \right\}^{1/2}, \quad (15)$$

$$\phi_{x,y}(t - \tau, L) = \tan^{-1} \left[\frac{\pm \gamma u_{x,y}(t - \tau, 0) - d_{1,3} u_{y,x}(t - \tau, 0)}{\nu u_{x,y}(t - \tau, 0)} \tan(\nu L) \right], \quad (16)$$

其中

$$\beta_0 = (\Delta k - d_2 - d_4)/2, \quad (17)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{(\Delta k + d_2 - d_4)^2 + 4d_1 d_3}{2}}, \quad (18)$$

$$\gamma = (d_4 - d_2 - \Delta k)/2. \quad (19)$$

当来自M-VCSEL两LP分量在PPLN受到电光调制后注入到副激光器S-VCSEL1或S-VCSEL2时, 其光场振幅变换为

$$\begin{aligned} & E_{P_x, P_y}(t - \tau) \\ &= \sqrt{\frac{ST_L C n_{1,2}}{\hbar \omega_0 V}} u_{x,y}(t - \tau, L), \end{aligned} \quad (20)$$

式中下标P表示PPLN中受到电光调制的两LP模的光场振幅. 这样, 受到POI的S-VCSEL2的速率方程组为^[2-6]

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} E_{S_x}(t) \\ E_{S_y}(t) \end{pmatrix} \\ &= k(1 + ia)[N_S(t) - 1] \begin{pmatrix} E_{S_x}(t) \\ E_{S_y}(t) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \pm ik(1 + ia)n_S(t) \begin{pmatrix} E_{S_y}(t) \\ E_{S_x}(t) \end{pmatrix} \\ & \mp (\gamma_a + i\gamma_p) \begin{pmatrix} E_{S_x}(t) \\ E_{S_y}(t) \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} [\beta_{\text{sp}}(N_S(t) + n_S(t))/2]^{1/2} \\ -i[\beta_{\text{sp}}(N_S(t) + n_S(t))/2]^{1/2} \end{pmatrix} \xi_1 \\ & + \begin{pmatrix} [\beta_{\text{sp}}(N_S(t) - n_S(t))/2]^{1/2} \\ i[\beta_{\text{sp}}(N_S(t) - n_S(t))/2]^{1/2} \end{pmatrix} \xi_2 \\ & + k_{\text{inj}} \begin{bmatrix} E_{P_x}(t - \tau) \\ E_{P_y}(t - \tau) \end{bmatrix} \\ & \times \exp(-i\omega_0 \tau + i\Delta\omega t), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \frac{dN_S(t)}{dt} \\ &= -\gamma_e \{N_S(t) - \mu_S \\ & \quad + N_S(t)(|E_{S_x}(t)|^2 + |E_{S_y}(t)|^2) \\ & \quad + in_S(t)[E_{S_y}(t)E_{S_x}^*(t) - E_{S_x}(t)E_{S_y}^*(t)], \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \frac{dn_S(t)}{dt} \\ &= -\gamma_S n_S(t) - \gamma_e \{n_S(t)(|E_{Sx}(t)|^2 + |E_{Sy}(t)|^2) \\ & \quad + iN_S(t)[E_{Sy}(t)E_{Mx}^*(t) \\ & \quad - E_{Sx}(t)E_{Sy}^*(t)]\}, \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $\Delta\omega$ 为 M-VCSEL 与 S-VCSEL 的中心频率差; k_{inj} 为光注入强度. 假设 S-VCSEL1 与 S-VCSEL2 完全一样, 这两个副激光器仅仅差别在于受到外部光注入方式不一样. 因此, 对于 S-VCSEL1, 其光场振幅 E 的速率方程与方程 (21) 惟一不同的是最后一项外部光注入表达式. 它应修改为 $k_{inj} \begin{bmatrix} E_{py}(t-\tau) \\ E_{px}(t-\tau) \end{bmatrix} \exp(-i\omega_0\tau + i\Delta\omega t)$, 其他参量 N 和 n 的速率方程分别与方程 (22) 和 (23) 一致.

3 结果与讨论

为了描述激光器输出的光脉冲的偏振度变化,

我们定义偏振度如下:

$$PD_{1,2} = \frac{\langle I_{1x,2x}(t) \rangle - \langle I_{1y,2y}(t) \rangle}{\langle I_{1x,2x}(t) \rangle + \langle I_{1y,2y}(t) \rangle}, \quad (24)$$

式中下标 1 和 2 分别表示 S-VCSEL1 和 S-VCSEL2; $I_{1x,1y}(t) = |E_{1Sx,1Sy}(t)|^2$ 和 $I_{2x,1y}(t) = |E_{2Sx,2Sy}(t)|^2$, 下标 S 代表 S-VCSEL; $\langle \rangle$ 表示平均值; PD 介于 -1 和 1 之间, PD = 1 意味着激光器输出为 x 偏振模; PD = -1 为 y 偏振模; PD = 0 为圆偏振模; $-1 < PD < 0$ 为右旋椭圆偏振模; $0 < PD < 1$ 为左旋椭圆偏振模. 首先, 利用四阶 Rung-Kutta 方法, 对速率方程组 (1)–(3) 和 (21)–(23) 进行数值解, 在数值计算中所用到的参数值如表 1 所示, 其中 n_1 和 n_2 来自于 PPLN 晶体的 Shellmeier 折射率公式 [18], 并且 $u_S, u_M, k_{inj}, E_{01}$ 和 E_{02} 作为讨论的参数. 另外, 方程 (21) 中自发辐射噪声项对 S-VCSEL 的偏振转换影响很小 [19], 为便于讨论, 在下面的数值计算中将被忽略.

表 1 用于计算的系统参数

Table 1. The parameter values of the system for calculation.

参数	值	参数	值
线宽增强因子 a	3	极化角 θ	$\pi/2$
载流子寿命 τ_p/ps	3.3	方位角 $\varphi/(\circ)$	0
光子自旋速率 γ_s/ns^{-1}	50	晶体的温度 F/K	293
非辐射载流子驰豫振荡速率 γ_e/ns^{-1}	1	晶体的极化周期 Λ/m^{-1}	5.8×10^5
各向异性光场振幅损速率 γ_a/ns^{-1}	-0.1	占空比 D	0.5
有源介质双折射效应 γ_b/ns^{-1}	1	晶体长度 L_N/mm	15
有源层限制因子 Γ	0.05	o 光折射率 n_1	2.24
时延 τ/ns	5	e 光折射率 n_2	2.17
有效光斑面积 $S/\mu\text{m}^2$	38.45	电光张量元 $r_{61}/\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	-3.4×10^{-12}
激光腔长 $L_V/\mu\text{m}$	10	电光张量元 $r_{13}/\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	8.6×10^{-12}
激光器有源层折射率 n_g	3.6	电光张量元 $r_{33}/\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	30.8×10^{-12}
激光器有源层体积 $V/\mu\text{m}^3$	384.5	电光张量元 $r_{51}/\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	28×10^{-12}
中心波长 λ_0/nm	850	中心角频率差 $\Delta\omega/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	0

针对 M-VCSEL 中不同的偏置电流 μ_M , 我们计算了受 POI 的 S-VCSEL2 输出偏振度 PD_2 与外加电场 E_{01} 的依赖关系, 如图 1 所示. 这里, $E_{01} = E_0; u_s = 1.2; k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}; E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$. 从图 1 中可以发现, 当 S-VCSEL2 受到 POI 时, 对于任意偏置电流 μ_M , 偏振度 PS_2 与外加电场 E_{01} 成周期性振荡变化, 其变化周期为 1.5 kV/mm. 另外, 在一个周期内, PS_2 在 -1 到 1 之间

振荡变化, 其振荡波峰轨迹的包络曲线为余弦曲线, 振荡波谷的包络曲线为正弦曲线. 例如, 如图 1 所示, 对于 $\mu_M = 1.048$, 当 E_{01} 在第一个周期内 (0—1.5 kV/mm) 变化时, PS_2 在 -1 和 1 之间振荡变化, 其振荡波峰和波谷轨迹的包络曲线分别为余弦和正弦曲线, 这时, 在外加电场 E_{01} 一个变化周期内, 激光器输出偏振度的变化规律如下图 3 所示. 从图 3 可以看出, 激光器 S-VCSEL2 输出偏振

由初始的 y 偏振转换为左旋椭圆偏振后, 经历左旋椭圆偏振, 圆偏振和右旋椭圆偏振这三个偏振之间 5 次循环转换, 再转换原来的 y 偏振. 当 $\mu_M = 1.1$ 时, 在 E_{01} 一个变化周期内, 激光器输出的偏振变化规律如图 3 所示. 从图 4 中可以发现, S-VCSEL2 输出的光偏振度由初始的左旋椭圆偏振转换为圆偏振, 又经历圆偏振, 右旋椭圆偏振和左旋椭圆偏振这三个偏振之间 5 次循环转换后, 转为圆偏振, 最后又回到初始的左旋椭圆偏振. 图 5 给出了当 $\mu_M = 1.18$ 时, S-VCSEL2 输出光偏振度的转换规律. 从图 5 中可以看出, 激光器输出光偏振由初始的 x 偏振转换为右旋椭圆偏振, 再经过右旋椭圆偏

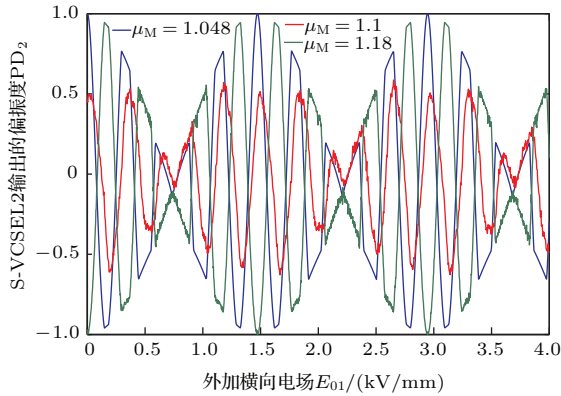


图 2 (网刊彩色) 针对 M-VCSEL 中不同的偏置电流 μ_M , 受到 POI 的 S-VCSEL2 输出偏振度与外加横向电场 $E_{01}(=E_0)$ 的依赖关系. 图中, $\mu_s = 1.2$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$.

Fig. 2. (color online) For different bias current μ_M of the M-VCSEL, the dependence of the output PD_2 of light from the S-VCSEL2 with POI on the applied electric field E_{01} , where $\mu_s = 1.2$; $K_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{01} = E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$.

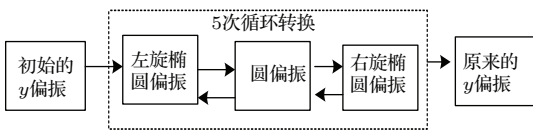


图 3 当 $\mu_M = 1.048$ 时, 在外加电场 E_{01} 的一个变化周期内, S-VCSEL2 输出光的 PS 规律

Fig. 3. The PS law of the output light from the S-VCSEL2 in one change period of the applied electric field E_{01} , where $\mu_M = 1.048$.

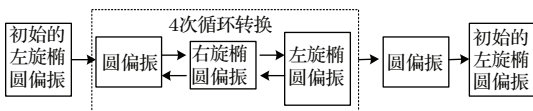


图 4 当 $\mu_M = 1.1$ 时, 在外加电场 E_{01} 的一个变化周期内, S-VCSEL2 输出光的 PS 规律

Fig. 4. The PS law of the output light from the S-VCSEL2 in one change period of the applied electric field E_{01} when $\mu_M = 1.1$.

振, 圆偏振和左旋椭圆偏振之间的 5 次循环转换后, 又再次转换为初始的 x 偏振. 此外, 在相同的条件下, 针对不同偏置电流 μ_M , 我们也计算了受到 OOI 的 S-VCSEL1 输出偏振度与外加电场 E_{01} 的依赖关系. 从图 6 中可以发现, 在相同的初始偏振条件下, 随着 E_{01} 的增加, S-VCSEL1 输出偏振度变化轨迹和规律与受到 POI 的 S-VCSEL2 输出偏振度变化轨迹和规律相同. 但是, 在同一偏置电流 μ_M 和外加电场 E_{01} 的条件下, 与 S-VCSEL2 输出偏振相比, S-VCSEL1 的相应偏振发生了翻转. 即 $x\text{-LP} \rightarrow y\text{-LP}$; $y\text{-LP} \rightarrow x\text{-LP}$; 左旋椭圆偏振 \rightarrow 右旋椭圆偏振; 右旋椭圆偏振 \rightarrow 左旋椭圆偏振. 但中其输出的圆偏振保持不变.

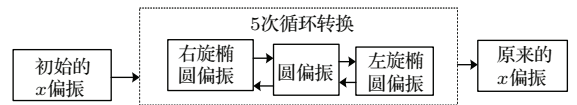


图 5 针对 $\mu_M = 1.18$, 在外加电场 E_{01} 的一个变化周期内, S-VCSEL2 输出光的 PS 规律

Fig. 5. The PS law of the output light from the S-VCSEL2 in one change period of the applied electric field E_{01} when $\mu_M = 1.18$.

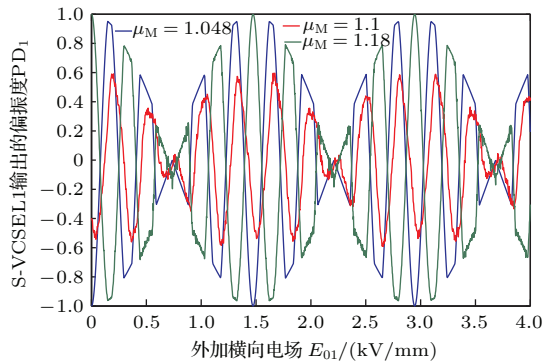


图 6 (网刊彩色) 针对不同的偏置电流 μ_M , 受到 OOI 的 S-VCSEL1 输出偏振度与外加横向电场 E_{01} 的依赖关系. 图中, $\mu_s = 1.2$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$

Fig. 6. (color online) For different bias current μ_M of the M-VCSEL, the dependence of the output PD_4 of light from the S-VCSEL1 with OOI on the applied electric field E_{01} , where $\mu_s = 1.2$; $K_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$.

为了进一步描述外加电场对副激光器 S-VCSEL 输出偏振度影响, 针对不同的外加电场 E_{01} , 我们计算了受 POI 的 S-VCSEL2 输出 $x\text{-LP}$ 和 $y\text{-LP}$ 模的平均光强与偏置电流 μ_M 的依赖关系, 如图 7 所示. 图中, $\mu_s = 1.2$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$. 从图 7 中可以发现, 对于 $E_{01} = 0 \text{ kV/mm}$, 随着 μ_M 的增加, S-VCSEL2 输出两偏振模分量之间不断地相互转换. 例如, 当 $1.01 < \mu_M \leq 1.07$ 时, 激光器输出由 y 偏振快速

转换为 x 偏振; 在 $1.07 < \mu_M \leq 1.1$ 范围内, 激光器输出的两偏振模分量之间的转换频率增加; 当 $\mu_M \geq 1.1$ 时, 激光器输出又转换为 y 偏振模. 当 E_{01} 增加到 0.6849 kV/mm 时, 激光器输出的两偏振分量之间的转换频率减弱. 并且随着 μ_M 增加到 1.14 , 两偏振分量的平均光强逐渐达到基本一致, 这时激光器输出为圆偏振模. 进一步增大 E_{01} 至 1.325 kV/mm, 与初始状态 $E_{01} = 0$ kV/mm 相比, 在相同的偏置电流 μ_M 的条件下, 激光器输出的偏振再次发生翻转, 即 x 偏振 $\leftrightarrow y$ 偏振; 左旋椭圆偏振 \leftrightarrow 右旋椭圆偏振. 当 E_{01} 达到 1.474 kV/mm 均时, 激光器输出两偏振分量的平均光强随偏置电流 μ_M 的变化轨迹基本上恢复成初始状态. 即激光器输出的偏振度变化与 $E_{01} = 0$ kV/mm 时的情况一样. 针对不同的外加电场 E_{01} , 图 8 给出了受 OOI 的 S-VCSEL1 输出两偏振分量的平均光强与偏置电流 μ_M 的依赖关系. 图中, 其他参数值与图 7 一样. 对比图 7(a) 和图 8(a), 在 $E_{01} = 0$ kV/mm 条件下, 副激光器注入方式由 POI 变换为 OOI 时, 激光器输出偏振实现翻转, 即 x 偏振 $\leftrightarrow y$ 偏振; 左旋椭圆偏振 \leftrightarrow 右旋椭圆偏振. 因此, 在相同的外加电场条件下, S-VCSEL1 输出的 y -LP 和 x -LP 分量平

均光强随偏置电流变化轨迹分别与 S-VCSEL2 的 x -LP 和 y -LP 模平均光强变化轨迹相同 (见图 7). 但是, 随着外加场 E_{01} 增加, 两个副激光器输出偏振的变化规律基本相同.

固定 $\mu_M = 1.18$, $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$ 和 $E_{02} = 0$ kV/mm, 针对不同的外加电场 E_{01} , 我们进一步分别计算了受 POI 的 S-VCSEL2 和受 OOI 的 S-VCSEL1 输出两偏振分量的平均光强与偏置电流 μ_s 的依赖关系, 其计算结果分别如图 9 和图 10 所示. 从图 9 和图 10 中可以看出, 随着偏置电流 μ_s 的增加, 两副激光器输出两偏振分量的平均光强基本上表现出线性增大. 但是, 两副激光器输出的偏振度与偏振度无关, 但依赖于外加电场 E_{01} . 例如, 当 $E_{01} = 0$ kV/mm 时, 对于任意 μ_s , S-VCSEL2 和 S-VCSEL1 输出分别为 y -LP 和 x -LP 模分量; 当 $E_{01} = 0.6849$ kV/mm 时, 两副激光器输出两偏振分量的平均光强基本相等, 这时其输出都为圆偏振模; 当 E_{01} 增加到 1.325 kV/mm 时, S-VCSEL2 和 S-VCSEL1 激光器输出分别为 x -LP 和 y -LP 模分量; 当 E_{01} 达到 1.474 kV/mm 时, 这两个副激光器输出分别为 y -LP 和 x -LP 模分量.

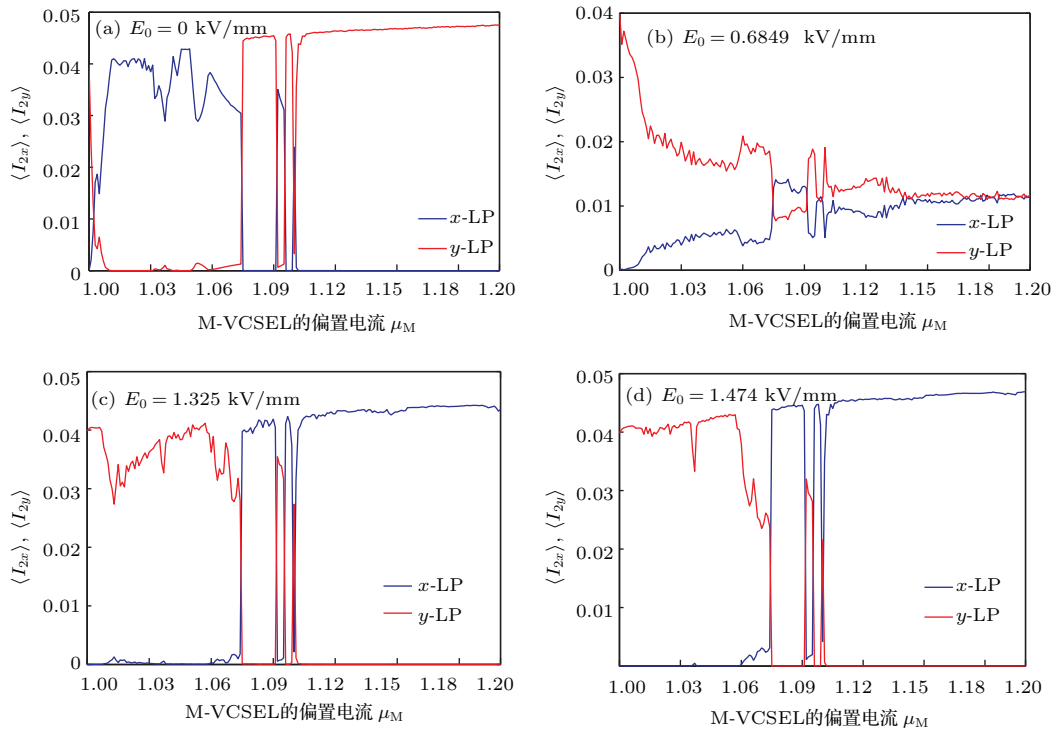


图 7 (网刊彩色) 不同外加电场 E_{01} 作用下, 受到 POI 的 S-VCSEL2 输出 x -LP 和 y -LP 模的平均光强与偏置电流 μ_M 的依赖关系. 图中, $\mu_s = 1.2$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0$ kV/mm

Fig. 7. (color online) The dependence of the average light intensity of the x -LP mode component and that of the y -LP mode component from the S-VCSEL2 subject to POI on the bias current μ_M , under different the applied electric field E_{01} when. $\mu_s = 1.2$, $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$ and $E_{02} = 0$ kV/mm.

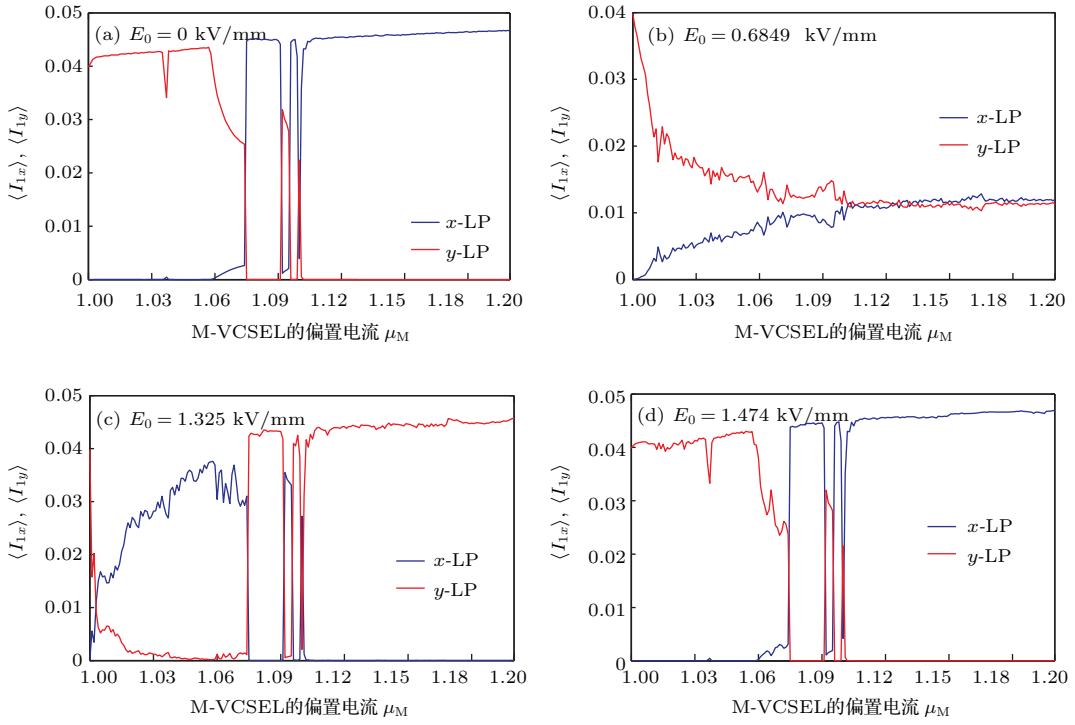


图8 (网刊彩色) 不同外加电场 E_{01} 作用下, 受到 OOI 的 S-VCSEL1 输出 x -LP 和 y -LP 模的平均光强与偏置电流 μ_M 的依赖关系. 图中, $\mu_s = 1.2$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$

Fig. 8. (color online) The dependence of the average light intensity of the x -LP mode component and that of the y -LP mode component from the S-VCSEL1 subject to OOI on the bias current μ_M , under different the applied electric field E_{01} when $\mu_s = 1.2$, $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$ and $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$.

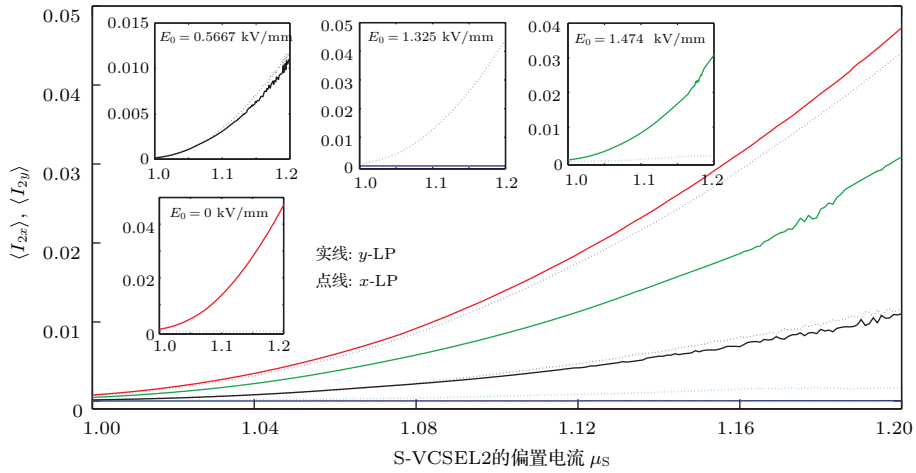


图9 (网刊彩色) 针对不同外加电场 E_{01} , 受到 POI 的 S-VCSEL2 输出 x -LP 和 y -LP 偏振分量的平均光强与偏置电流 μ_s 的依赖关系. 图中, $\mu_M = 1.18$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$

Fig. 9. (color online) For different the applied electric field E_{01} , the dependences of the average intensities of the x - and y -LP component from the S-VCSEL2 with POI on the bias current μ_s , where $\mu_M = 1.18$; $K_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$.

取图7中 $\mu_M = 1.18$ 为例, 针对四个不同的外加电场 E_{01} , 我们计算了受 POI 的 S-VCSEL2 输出两偏振模光强的时间轨迹, 其计算结果如图11所示. 从图11中可以发现, 对于初始条件 $E_{01} = 0 \text{ kV/mm}$, S-VCSEL2 输出为 y -LP 模分量, 其光强的时间轨迹表现为倍周期轨道 (见图11(a)); 当 $E_{01} = 0.6849 \text{ kV/mm}$ 时, 激光器输出两偏振分量

光强时间轨迹基本相同, 这意味着激光器发射圆偏振光 (见图11(b)). 它们的光强时间轨迹表现为混沌; 随着 E_{01} 增大到 1.325 kV/mm , 激光器输出为 x -LP 分量, 其光强的时间轨迹为准周期轨道 (见图11(c)); 当 E_{01} 进一步增大到 1.474 kV/mm 时, 激光器输出又回到 y -LP 模分量, 其光强的时间轨迹表现为混沌 (见图11(d)). 取图7中 $\mu_M = 1.18$

为例, 图 12 进一步给出了针对不同外加电场 E_{01} , 受 OOI 的 S-VCSEL1 输出 x -LP 和 y -LP 分量的光强时间轨迹. 如图 12 所示, 对于 $E_{01} = 0$ kV/mm, S-VCSEL1 输出为 x -LP 分量, 其光强时间轨迹为倍周期(见图 12(a)); 当 $E_{01} = 0.6849$ kV/mm 时, 激光器同时输出光强时间轨迹基本相同的 x -LP 和

y -LP 分量, 即输出为圆偏振光. 其动力学行为表现为混沌; 对于 $E_{01} = 1.325$ kV/mm, 激光器输出 y -LP 分量, 其光强的时间轨迹表现为准周期; 当 E_{01} 达到 1.474 kV/mm 时, 激光器输出偏振由 x -LP 分量转换为 y -LP 分量, 其光强时间轨迹表现为混沌轨道.

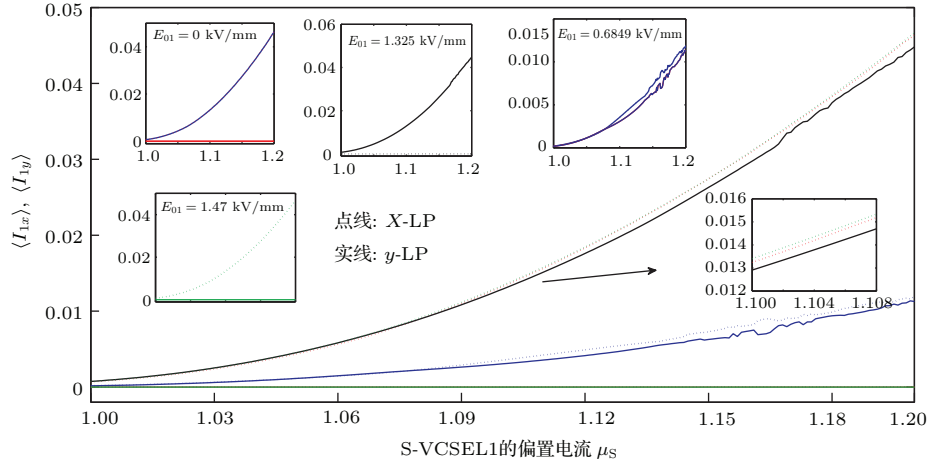


图 10 (网刊彩色) 不同外加电场 E_{01} 作用下, 受到 OOI 的 S-VCSEL1 输出 x -LP 和 y -LP 模平均光强与偏置电流 μ_s 的依赖关系. 图中, $\mu_M = 1.18$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0$ kV/mm

Fig. 10. (color online) For different the applied electric field E_{01} , the dependences of the average intensities of the x - and y -LP component from the S-VCSEL1 with OOI on the bias current. μ_s , where. $\mu_M = 1.18$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0$ kV/mm.

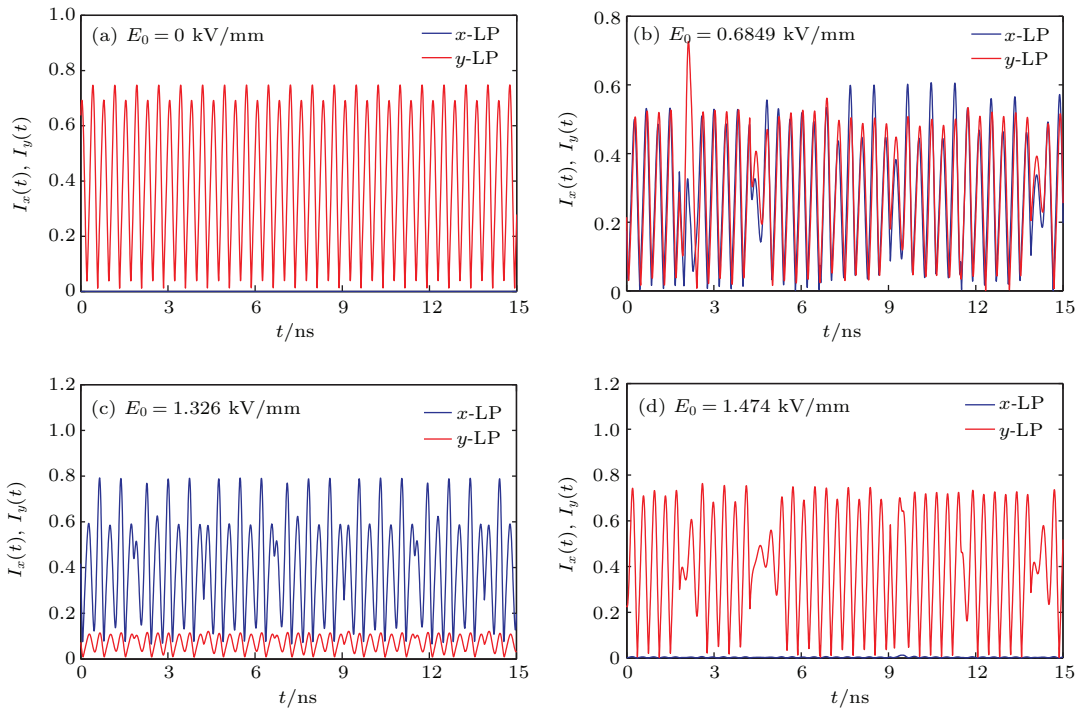


图 11 (网刊彩色) 不同外加电场 E_{01} 作用下, 受到 POI 的 S-VCSEL2 输出 x -LP 和 y -LP 模光强的时间轨迹. 图中, $\mu_s = 1.2$, $\mu_M = 1.18$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0$ kV/mm

Fig. 11. (color online) Under different the applied electric field E_{01} , the temporal traces of the light intensity of the output x -LP or y -LP mode component from the S-VCSEL2 with POI when. $\mu_s = 1.2$, $\mu_M = 1.18$, $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$, $E_{02} = 0$ kV/mm.

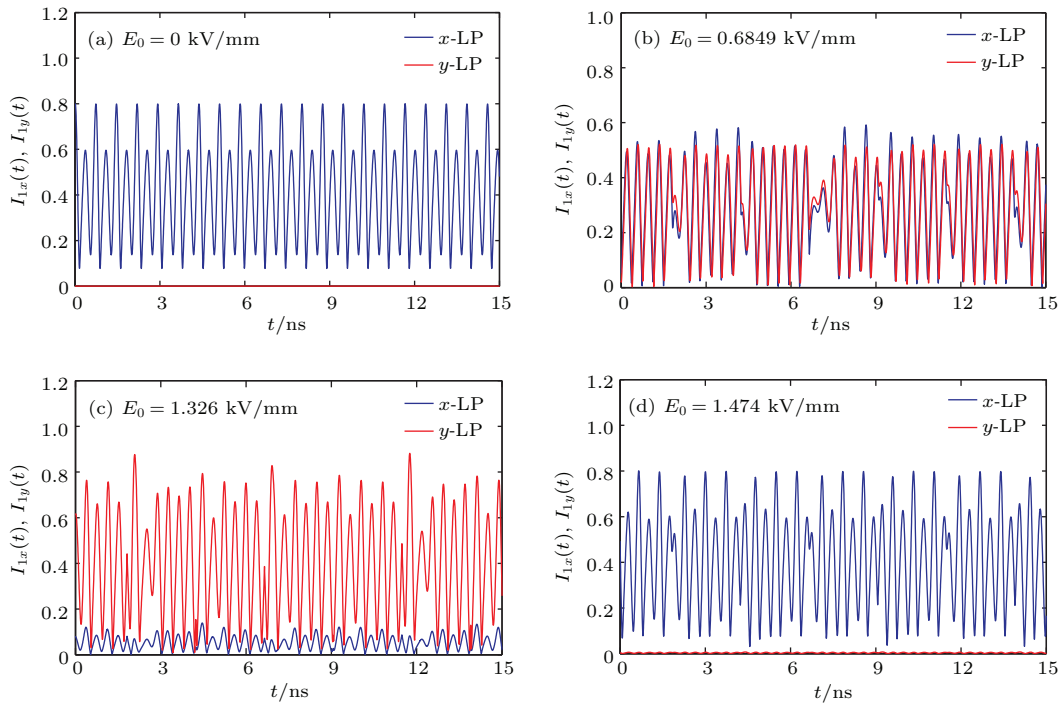


图 12 (网刊彩色) 不同外加电场 E_{01} 作用下, 受到 OOI 的 S-VCSEL 输出 x -LP 和 y -LP 模分量光强的时间轨迹. 图中, $\mu_s = 1.2$, $\mu_M = 1.18$; $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$
 Fig. 12. (color online) Under different the applied electric field E_{01} , the temporal traces of the light intensity of the output x - or y -LP mode component from the S-VCSEL1 with OOI when. $\mu_s = 1.2$, $\mu_M = 1.18$, $k_{inj} = 10 \text{ ns}^{-1}$, $E_{02} = 0 \text{ kV/mm}$.

以上分析结果表明: 在 M-VCSEL 和 S-VCSEL 构成的外部光注入激光系统中, 若对 M-VCSEL 发射的两线性偏振分量进行电光强度调制, 对于任意主激光器偏置电流 μ_M , 受到 POI 和 OOI 的 S-VCSEL 输出光偏振随施加于电光晶体的横向电场成周期性振荡变化. 并且其振荡波峰包络轨迹为余弦曲线, 振荡波谷包络轨迹为正弦曲线(见图 3 和图 6). 但是, 两副激光器的偏振转换规律不仅取决于外加横向电场, 还取决于主激光器偏置电流(见图 3 至图 5). 当主激光器的偏置电流取不同的值时, 副激光器的偏振转换随着加的外加电场有不同的演化规律. 假如固定一定的主激光器偏置电流, 在外加横向电场作用下, 两副激光器输出可以获得任意偏振. 在这个条件下, 两副激光器的偏振转换仅仅依赖于外加横向电场, 与副激光器的偏置电流无关. 而增加的副激光器的偏置电流用来提高其输出偏振模的能量(见图 9 和图 10). 特别注意的是, 通过对 PPLN 施加外加横向电场, 不仅可以控制 POI 和 OOI 副激光器的偏振度, 还可以控制其非线性动力学行为(见图 11 和图 12). 上述研究结果在许多领域有潜在的应用, 如基于 VCSEL 的偏振特性的可控全光复合逻辑门的探索; 基于

VCSEL 的偏振模同步特性的可控全光复合逻辑门的设计; 多信道偏振复用保密通信系统中的信道载波交换器、能量均衡器, 混沌同步控制器的研究, 加密信号调制方案的优化等. 下面, 以外部光注入 VCSEL 的 PS 特性在可控全光逻辑门的应用为例, 我们阐述上述研究结果在该应用中潜在的价值.

基于外部光注入 VCSEL 的全光逻辑门逻辑计算方法的基本思想是利用周期性调制的偏置电流、或外部注入光能量、或主和副 VCSEL 之间的中心频率失谐编译成逻辑输入信号, 副激光器的输出偏振作为逻辑输出. 根据目前的文献报道^[20-23], 基于 VCSEL 的全光逻辑门逻辑计算方案主要有如下几个典型的方案: 一是利用 PS, 抽运调制电流(受调制的偏置电流), 噪声强度之间的相互作用, 实现全光逻辑或门、或非门, 与门和与非门^[21]; 二是通过 PS 和外部注入光强度之间的相互作用, 实现全光逻辑或门和与门^[22]; 三是基于 PS 与主和副 VCSEL 之间中心频率差之间的相互作用^[23], 实现全光逻辑或门和与门. 然而, 在上述的这些方案, 副激光器的 PS 对偏置电流, 外部注入光强度、主和副激光器之间的中心频率失谐非常敏感. 这些参数轻微的扰动可能导致 PS 发生变化, 从而改变逻辑

输出状态. 因此, 在上述的全光逻辑门逻辑计算方案中, 全光逻辑门稳定性较差, 为成功实现全光逻辑门, 需要严格地限定激光器参数. 另外, 由于诱导 PS 的上述参数的取值范围非常有限, 这些方案

输出状态. 因此, 在上述的全光逻辑门逻辑计算方案中, 全光逻辑门稳定性较差, 为成功实现全光逻辑门, 需要严格地限定激光器参数. 另外, 由于诱导 PS 的上述参数的取值范围非常有限, 这些方案

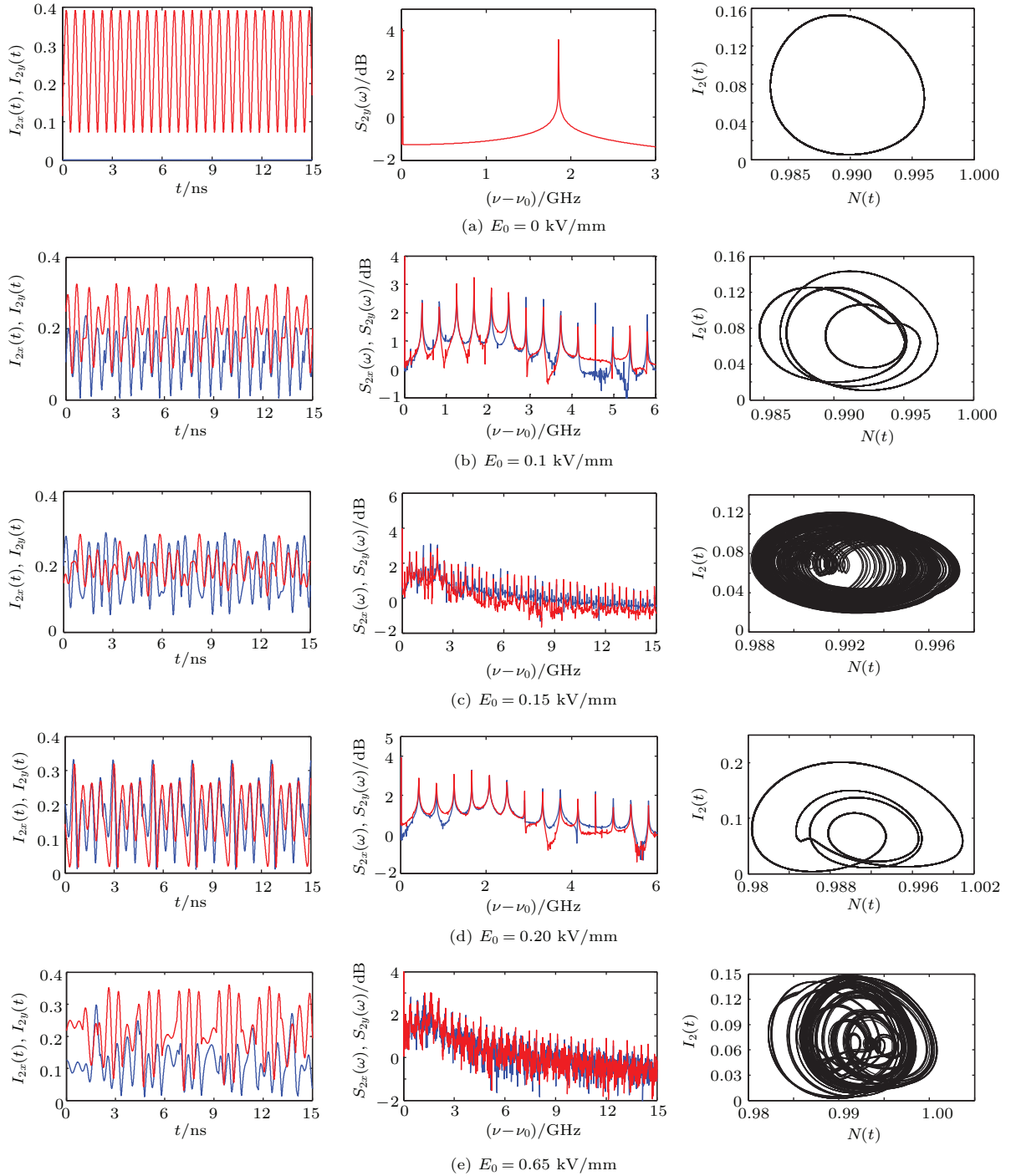


图 13 (网刊彩色) 不同外加电场 E_{01} 作用下, 受到 POI 的 S-VCSEL2 输出 x -LP 和 y -LP 分量光强的非线性动力学行为动态演变. 图中, $\mu_s = 1.06$, $\mu_M = 1.18$; $k_{inj} = 5 \text{ ns}^{-1}$; $E_{02} = 2E_{01}$; $S_x(\omega) = |E_{2S_x}(\omega)|^2$; $S_y(\omega) = |E_{2S_y}(\omega)|^2$; $I_2 = I_{2x} + I_{2y}$. 红色实线: y -LP 分量; 蓝色实线: x -LP 分量. 左边一列图为激光器输出两线偏振模分量时序图, 中间一列图为频谱分布图; 右边一列图为由激光器总的光强 I_2 和反转载流子 N 构成的相空间分布图

Fig. 13. (color online) The nonlinear dynamic behaviors evolution of each LP component from the S-VCSEL2 with POI under different the applied transverse and longitude electric field when. $\mu_S = 1.06$, $\mu_M = 1.18$, $k_{inj} = 5 \text{ ns}^{-1}$, $E_{02} = 2 E_{01}$, $S_x(\omega) = |E_{2S_x}(\omega)|^2$, $S_y(\omega) = |E_{2S_y}(\omega)|^2$ and $I_2 = I_{2x} + I_{2y}$. Here, red solid-line: the y -LP component; blue solid-line: the x -LP component; the left column: the temporal traces of each LP component; the middle column: the frequency spectrum distributions of each LP component; the right column: the phase space composed of the total carrier concentration N and the total intensity I_2 .

只能实现部分全光逻辑门, 如与门和或门. 在本文所提出的电光调制对外部注入PS控制方案中, 因为对于任意主激光器偏置电流, 副激光器输出光偏振随施加于电光晶体的横向电场成周期性振荡变化, 因此, 该方案有助于实现稳定的, 外电场可控的多类型全光逻辑门. 例如, 在该方案中, 若采用周期性调制的偏置电流或外部注入光强编译成两个逻辑输入信号, 那么就有四个逻辑输入: $(0, 0)$; $(0, 1)$; $(1, 0)$; $(1, 1)$. 另外, 假设副激光器发射 x -LP 偏振分量, 逻辑输出为 0; 若其发射 y -LP 分量逻辑输出为 1. 对于每一个逻辑输入, 在主激光器偏置电流较大的范围内, 通过改变外加电场, 副激光器都可以实现两种逻辑输出 1 和 0 (见图 7 和图 8). 于是, 全光逻辑与门、或门、异或门、同或门可能被稳定地实现. 考虑副 VCSEL 受到平行光注入和垂直光注入时的 PS 规律, 通过电光调制, 全光逻辑半加法器和半减法器也可能被实现. 由于受到篇幅限制, 基于外部光注入 VCSEL 的外电场可控全光逻辑门的具体逻辑计算方法研究将在下一步的工作中展开.

为了进一步观察在电光调制下, 副激光器输出两线性偏振模分量的非线性动力学行为的演变. 图 13 给出了当施加的横向电场 E_{01} 和纵向电场 E_{02} 分别对 M-VCSEL 输出两线性偏振分量进行电光强度和相位调制时, S-VCSEL2 输出两线性偏振模分量的非线性动力学动态演变. 图中, $\mu_S = 1.06$, $\mu_M = 1.18$; $k_{inj} = 5 \text{ ns}^{-1}$; 左边一列图为激光器输出两线偏振模分量时序图, 中间一列图为频谱分布图; 右边一列图为由激光器总的光强 I_2 和反转载流子 N 构成的相空间分布图. 从图 13 中可以看出, 当 $E_{01} = 0 \text{ kV/mm}$ 时, S-VCSEL2 输出为 y -LP 分量, 其光强的时间轨迹为单周期轨道, 对应的频谱分布为单个波峰, 相位空间分布为一个极限环 (见图 13(a)); 对于 $E_{01} = 0.1 \text{ kV/mm}$ 时, 激光器同时输出 x -LP 和 y -LP 模分量, 但 y -LP 模分量能量大于 x -LP 模分量, 激光器发射左旋椭圆偏振光. 这两个偏振分量光强的时间轨迹为四周期轨道, 对应的频谱分布比较稀疏且在 3 dB 带宽处只有几个频谱峰, 其相空间分布为四个极限环 (见图 13(b)); 当 E_{01} 为 0.15 kV/mm 时, 激光器发射右旋椭圆偏振光, 其两偏振分量光强的时间轨迹为混沌, 对应的频谱分布非常致密且在 3 dB 带宽处有大量的频谱峰组成, 其相空间分布为混沌吸引子轨道 (见图 13(c)); 当 E_{01} 增加到 0.2 kV/mm 时, 激光器输出两偏振分量光强的时间轨迹基本相同, 这意味着

激光器发射为圆偏振光. 这两偏振分量光强的时间轨迹表现为四周期轨道, 对应的频谱分布比较稀疏且在 3 dB 带宽处只有几个频谱峰, 其相空间为四个极限环 (见图 13(d)); 当 E_{01} 进一步增加到 0.65 kV/mm 时, 激光器同时输出 x -LP 和 y -LP 模分量, 即激光器输出为左旋椭圆偏振模. 这两线性偏振分量的时间轨迹为混沌, 对应频谱分布非常致密且在 3 dB 带宽处有大量的谱峰, 其相空间表现为混沌吸引子 (见图 13(e)). 以上讨论可知, 当主激光器 M-VCSEL 输出光没有受到电光调制时, 副激光器输出为 y -LP 模分量, 其非线性动力学行为表现为单周期. 当来自于 M-VCSEL 的光同时受到电光相位和电光强度光调制时, 随着外加电场的增加, 副激光器输出的偏振依次转换为左旋椭圆偏振、右旋椭圆偏振、圆偏振和左旋椭圆偏振. 其非动力学行为依次表现为单周期、四周期、混沌、四周期和混沌.

4 结 论

在由主和副 VCSEL 构成外部光注入激光器系统中, 针对偏振转换和非线性动力学行为, 我们提出了一种新的控制方案. 这里, 当主激光器输出光被电光调制时, 副激光器的偏振转换和非线性动力学行为能够被有效和稳定地控制. 从以上分析结果可以得出: 受到正交光或平行光注入的副激光器输出偏振度随着外加电场成周期性振荡变化, 其振荡波峰轨迹的包络曲线为余弦曲线, 振荡波谷轨迹的包络曲线为正弦曲线; 副激光器输出偏振度依赖于外加横向电场和主激光器的偏置电流, 而与副激光器的偏置电流无关; 选取合适的主激光器偏置电流, 通过电光调制, 两副激光器可以输出任意偏振光和产生不同的非线性动力学行为. 这些研究结果在目前受到十分关注的一些领域有潜在的应用价值. 例如, 基于 VCSEL 的偏振特性的可控全光复合逻辑门的探索; 基于 VCSEL 的偏振模同步特性的可控全光复合逻辑门的设计; 多信道偏振复用保密通信系统中的信道载波交换器、能量均衡器, 混沌同步控制器的研究, 加密信号调制方案的优化等. 我们下一步工作将致力研究上述的科学问题.

参考文献

- [1] Koyama F 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4502
- [2] Miguel M S, Feng Q, Moloney J. V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728

- [3] Zhong D Z, Xia G Q, Wang F, Wu Z. M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3279 (in Chinese) [钟东洲, 夏光琼, 王飞, 吴正茂 2007 物理学报 **56** 3279]
- [4] Zhong D Z, Xia G Q, Wu Z M, Jia X H 2008 *Opt. Commun.* **281** 1689
- [5] Zhong D Z, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 1631
- [6] Zhong D Z, Wu Z M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064214 (in Chinese) [钟东洲, 吴正茂 2012 物理学报 **61** 064214]
- [7] Deshmukh M V, Lee S H, Kim D W, Kim K H, Lee M H 2011 *Opt. Express.* **19** 16934
- [8] Gauthier J P, Paranthoën C, Levallois C, Shuaib A, Lamy J M, Folliot H, Perrin M, Dehaese O, Chevalier N, Durand O, Corre A L 2012 *Opt. Express.* **20** 16832
- [9] Zhong D Z, Deng T, Zheng G L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 070504 (in Chinese) [钟东洲, 邓涛, 郑国梁 2014 物理学报 **63** 070504]
- [10] Perrone S, Vilaseca R, Masoller C 2012 *Opt. Express.* **20** 22962
- [11] Guo P, Yang W J, Parekh D, Chang-Hasnain C J, Xu A, Chen Z Y 2012 *Opt. Express.* **21** 3125
- [12] Li Y, Wu Z M, Zhong Z Q, Yang X J, Mao S, Xia G Q 2014 *Opt. Express.* **22** 19610
- [13] Gatare I, Panajotov K, Sciamanna M 2007 *Phys Rev. A.* **75** 023804
- [14] She W L, Lee W K 2001 *Opt. Commun.* **195** 303
- [15] Zheng G L, Wang H C, She W L 2006 *Opt. Express.* **14** 5535
- [16] Huang D, She W L 2007 *Opt. Express.* **15** 8275
- [17] Zhu W G, She W L 2013 *Opt. Express.* **21** 17265
- [18] Hobden M V, Warner J 1966 *Phys. Letts.* **22** 243
- [19] Vicente R, Mulet J, Mirasso C R, Sciamanna M 2006 *Semiconductor Lasers and Lasers Dynamics II, in: Proceedings of the SPIE* **6184** 6184131
- [20] Katayama T, Ooi T, Kawaguchi 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 1495
- [21] Zamora-Munt, Masoller C 2010 *Opt Express* **18** 16418
- [22] Perrone S, Vilaseca R, Masoller C 2012 *Opt Express.* **20** 22692
- [23] Salvide M F, Masoller C, Torre M S 2013 *IEEE J. Quantum Electron.* **49** 886

Manipulation of the polarization switching and the nonlinear dynamic behaviors of the vertical-cavity surface-emitting laser subjected to optical injection by EO modulation*

Zhong Dong-Zhou^{1)†} Ji Yong-Qiang¹⁾ Deng Tao²⁾ Zhou Kai-Li¹⁾

1) (School of Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

2) (School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 16 October 2014; revised manuscript received 13 November 2014)

Abstract

For the polarization switching (PS) and the nonlinear dynamic behaviors (NDBs) of the optically injected laser system composed of master vertical-cavity surface-emitting laser (M-VCSEL) and slave vertical-cavity surface-emitting laser (S-VCSEL), we put forward a novel manipulation scheme and explore their control law by means of electro-optic (EO) modulation with quasi-phase matched technology in periodically poled LiNbO₃. It is found that the PS of the S-VCSEL subjected to parallel or orthogonal optical injection undergoes a change of periodic oscillation with the applied transverse electric field. The envelope trajectory of the oscillation peak appears to be a cosine curve, and that of the oscillation wave trough becomes a sine curve. Besides, the PS of the S-VCSEL only depends on the applied transverse electric field and the bias current of the M-VCSEL, and is independent of the bias current of the S-VCSEL. When the bias current of the M-VCSEL takes a different value, the PS of the S-VCSEL shows a different evolution law in one period of the applied electric field. For a certain fixed bias current of the M-VCSEL, the optically injected S-VCSEL can emit an arbitrary polarization mode and its NDBs experience different evolutions when the light from the M-VCSEL goes through EO intensity modulation. If the output light of the M-VCSEL is subjected to EO intensity modulation and EO phase modulation simultaneously, while the bias current of the S-VCSEL is fixed at 1.06, that of the M-VCSEL is fixed at 1.18, and the optical injection strength is set at 5 ns^{-1} , then the output polarization of the S-VCSEL is in turn switched from the y -LP to the left-handed elliptic polarization (EP), then the right-handed EP circular polarization, and lastly the left-handed EP. And its NDB shows in turn a single period, four doubled periods, chaos, four doubled periods, and chaos with the increase of the applied electric field.

Keywords: vertical cavity surface emitting laser subjected to external optical injection, linear electro-optic effect with quasi-phase matching, polarization switching, nonlinear dynamic behavior

PACS: 42.25.Ja, 42.50.Md, 42.60.Mi, 42.65.Sf

DOI: [10.7498/aps.64.114203](https://doi.org/10.7498/aps.64.114203)

* Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. S2011010006105), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61475120).

† Corresponding author. E-mail: dream_yu2002@126.com