第 58 卷 第 3 期 2009 年 3 月
1000-3290/2009/58(03)/1480-04

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.58,No.3,March,2009
©2009 Chin. Phys. Soc.

光脉冲注入下 VCSEL 的偏振开关特性*

杨炳星 夏光琼 林晓东 吴正茂†

(西南大学物理学院,重庆 400715)

(2008 年 4 月 8 日收到;2008 年 9 月 16 日收到修改稿)

基于描述主、副垂直腔表面发射激光器(M-VCSEL,S-VCSEL)动态特性的速率方程,研究了 M-VCSEL 在脉冲电流调制下,输出光脉冲的偏振特性,以及 S-VCSEL 在 M-VCSEL 输出光脉冲的注入下,其偏振开关特性.研究结果表明:M-VCSEL 在周期性脉冲电流的作用下,将产生周期性光脉冲输出;S-VCSEL 在该光脉冲的注入下,输出光将在两个互相垂直的方向之间发生周期性转化,且变化周期与 M-VCSEL 所受到的调制脉冲电流周期相同;通过改变 M-VCSEL 驱动脉冲电流的调制幅度,可控制 S-VCSEL 输出的垂直偏振抑制比.

关键词:垂直腔表面发射激光器(VCSEL),光脉冲,偏振开关

PACC:0545,4225J,4265

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、与光纤耦合效率高、以及易形成高密度二维阵列等优点,在光纤通信、光互联和光集成等领域有广阔的应用前景[1—12].利用 VCSEL 稳定的偏振转换可以制作偏振开关,为了提高偏振转换的稳定性,已进行了一些相关研究[3—12].

Jeong 等人[8]提出了利用主 VCSEL(M-VCSEL)在脉冲电流的作用下产生的光脉冲注入到副 VCSEL(S-VCSEL)中,实验上实现了 S-VCSEL 输出在两个互相垂直的方向上的转换.本文基于文献[8]提出的实现偏振转换的方案,利用描述 VCSEL 动态特性的速率方程,从理论上研究注入光脉冲对 S-VCSEL 偏振特性的影响.研究结果显示:通过改变 M-VCSEL 驱动脉冲电流的调制幅度,可控制 S-VCSEL 输出的垂直偏振抑制比.

2. 理论模型

S-VCSEL 在光脉冲注入下实现偏振开关的系统模型如图 1 所示[8].M-VCSEL 在直流偏置和脉冲电流驱动下所产生的光脉冲经偏振控制器 1(PC_1)、可调光衰减器(VOA)和光环行器(OC)注入 S-VCSEL 中.副激光器的输出经光环行器 OC、偏振控制器 2(PC_2)、偏振光束分离器(PBS)后分成两个垂直方向的线偏振光——x 偏振光和 y 偏振光.

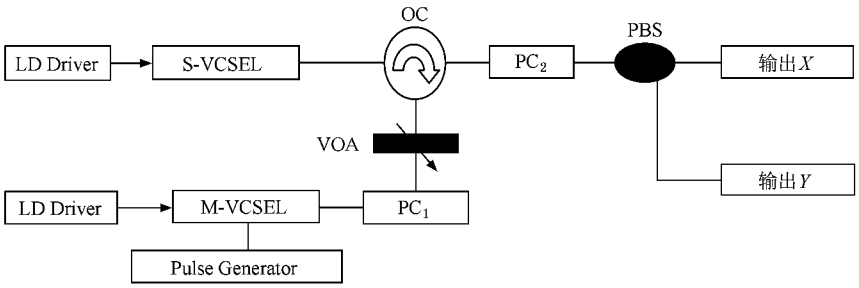


图 1 S-VCSEL 在光脉冲注入下实现偏振开关的示意图(LD Driver:激光器直流驱动;Pulse Generator:调制脉冲电流;PC:偏振控制器;VOA:可变衰减器;OC:光环行器;PBS:偏振分束器)

* 重庆市自然科学基金(批准号:CSTC-2007BB2333)和西南大学高新技术培育基金资助的课题.

† 通讯联系人.E-mail:zmwu@swu.edu.cn

描述 M-VCSEL 动态特性的速率方程可根据文献[9]，而描述光注入下的 S-VCSEL 动态特性只须增加与注入相关的项 $\eta F_{x_M}(t-\tau_c)e^{i\Delta\omega t}e^{-i\omega_M\tau_c}$ 与 $\eta F_{y_M}(t-\tau_c)e^{i\Delta\omega t}e^{-i\omega_M\tau_c}$，即

$$\frac{dF_{x_M}}{dt}=\kappa(1+i\alpha)(D_M F_{x_M}+id_M F_{y_M}-F_{x_M})-i\gamma_{P_M}F_{x_M}-\gamma_{a_M}F_{x_M}, \quad (1)$$

$$\frac{dF_{y_M}}{dt}=\kappa(1+i\alpha)(D_M F_{y_M}-id_M F_{x_M}-F_{y_M})+i\gamma_{P_M}F_{y_M}+\gamma_{a_M}F_{y_M}, \quad (2)$$

$$\frac{dF_{x_S}}{dt}=\kappa(1+i\alpha)(D_S F_{x_S}+id_S F_{y_S}-F_{x_S})-i\gamma_{P_S}F_{x_S}-\gamma_{a_S}F_{x_S}+\eta F_{x_M}(t-\tau_c)e^{i\Delta\omega t}e^{-i\omega_M\tau_c}, \quad (3)$$

$$\frac{dF_{y_S}}{dt}=\kappa(1+i\alpha)(D_S F_{y_S}-id_S F_{x_S}-F_{y_S})+i\gamma_{P_S}F_{y_S}+\gamma_{a_S}F_{y_S}+\eta F_{y_M}(t-\tau_c)e^{i\Delta\omega t}e^{-i\omega_M\tau_c}, \quad (4)$$

$$\frac{dD_{M,S}}{dt}=-\gamma_e D_{M,S}(1+|F_{x_{M,S}}|^2+|F_{y_{M,S}}|^2)+\gamma_e\mu_{M,S}-i\gamma_e d_{M,S}\times(F_{y_{M,S}}F^*_{x_{M,S}}-F_{x_{M,S}}F^*_{y_{M,S}}), \quad (5)$$

$$\frac{d(d_{M,S})}{dt}=-\gamma_S d_{M,S}-\gamma_e d_{M,S}\times(|F_{x_{M,S}}|^2+|F_{y_{M,S}}|^2)-i\gamma_e D_{M,S}(F_{y_{M,S}}F^*_{x_{M,S}}-F_{x_{M,S}}F^*_{y_{M,S}}), \quad (6)$$

式中，下标 M，S 分别代表 M-VCSEL 与 S-VCSEL，F_x 与 F_y 分别代表 x 及 y 方向电场的复振幅，D 为反转粒子数，d 为自旋反向的反转粒子数之差，μ 为对阈值电流进行归一化后的电流，κ 为场衰减速率，γ_e 为载流子衰减速率，γ_s 为自旋反向弛豫速率，γ_a 表征线性腔二色性，γ_P 为线性腔双折射，α 为线宽增强因子，η 为注入速率，$\Delta\omega=\omega_M-\omega_S$ 为频率失谐量，τ_c 为光从 M-VCSEL 到 S-VCSEL 的传输时间.

3. 结果与讨论

采用四阶龙格库塔法可对方程(1)—(6)进行数值仿真研究. 在数值计算中采用的数据为 $\eta=2$ GHz，$\tau_c=0$，$\Delta\omega=\omega_M-\omega_S=1$ GHz，其他的数据[9]：$\kappa=300\ ns^{-1}$，$\gamma_e=1\ ns^{-1}$，$\gamma_s=30\ ns^{-1}$，$\gamma_{a_M}=\gamma_{a_S}$ 0.1 rad/ns，$\gamma_{P_M}=\gamma_{P_S}=6$ rad/ns，$\alpha=3$. 图 2 给出了直流偏置下，VCSEL 沿 x 方向和 y 方向偏振光的强度随归一化电流 μ 的变化曲线，图中虚线代表 x 方向偏振，实线代表 y 方向偏振. 从图中可以看出：当归一化电流值介于 1.02—1.11 之间，输出 y 方向偏振光，在 1.12 附近发生偏振转换，$\mu>1.12$，x 偏振将占主导.

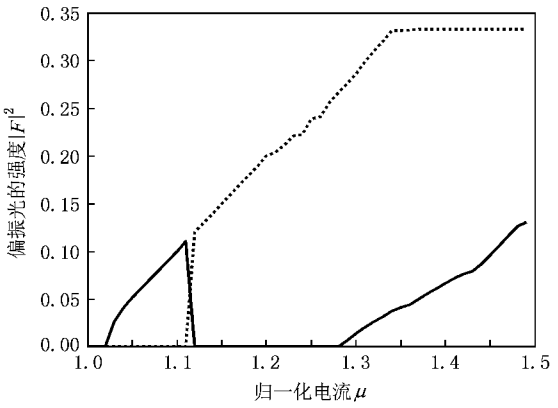


图 2　偏振光的强度随直流偏置电流的变化

当 M-VCSEL 在脉冲电流驱动下，假定偏置电流为超高斯型：

$$\mu=\mu_0\{1+We^{-[8\times(t-\tau/2)/\tau]^{2m}}\}\quad(n\tau\leqslant t\leqslant(n+1)\tau, n\text{ 取整数}), \quad (7)$$

其中 μ 为注入归一化脉冲电流，μ_0 为归一化直流偏置电流，W 为调制幅度，m 为阶数，τ 为周期. 计算中采用的数据为 $\mu_0=1.03$，$W=0.08$，$m=3$，$\tau=10$ ns. 在该偏置电流下，M-VCSEL 输出的光脉冲如图 3 所示，出射光为 y 方向线偏振光，其强度作周期

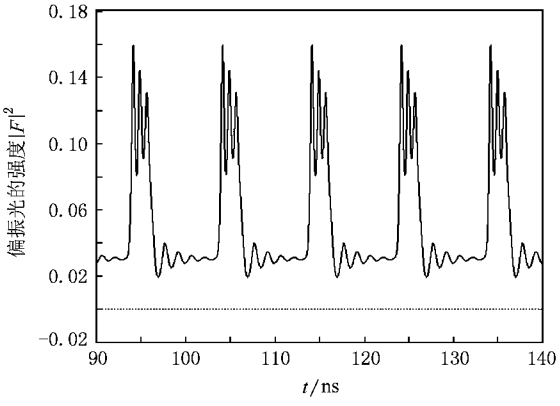


图 3　脉冲电流驱动下主激光器激射脉冲光的强度

性变化，其周期为 10 ns，与脉冲电流周期相同，x 方向出现消光现象.

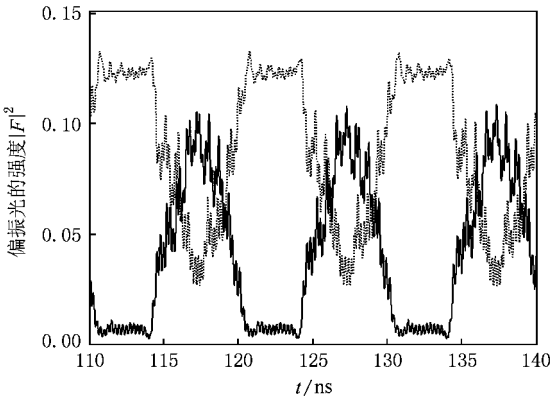


图 4 S-VCSEL 出射光强度随时间的变化

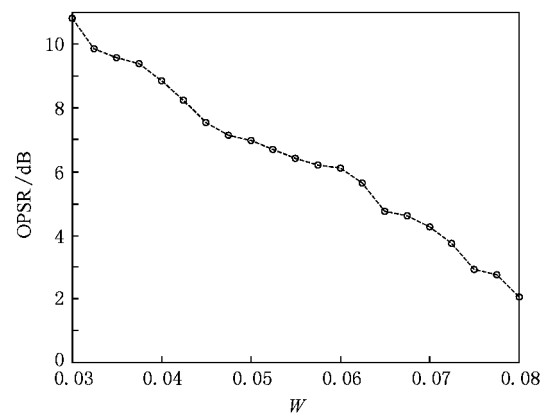


图 5 垂直偏振抑制比(OPSR)随 W 的变化

对于一工作于 x 偏振的 S-VCSEL，在一连续 y 偏振光的注入下，有可能发生偏振转换. 因此，可以预计在一个随时间周期性变化的光脉冲注入下，可以实现 S-VCSEL 偏振开关. 假设 S-VCSEL 偏置在 $\mu = 1.13$，根据图 2 可知，在没有外光注入下，S-VCSEL 的输出光为 x 偏振. 图 4 给出了由 M-VCSEL 输出的如图 3 所示的光脉冲注入下，S-VCSEL 出射光中 x (虚线)和 y (实线)偏振光的强度随时间的变化. 由图 4 可看出：S-VCSEL 出射光在两个方向之间发生周期性的变化，且反相；两个方向变化周期都为 10 ns，与脉冲电流变化周期相同. 理论结果与实验结果[8]符合.

由于在给定的直流偏置下，S-VCSEL 输出光中 x 和 y 偏振光的强度取决于注入光脉冲，而注入光脉冲是利用脉冲电流调制 M-VCSEL 而产生的. 因此，可以通过改变 M-VCSEL 调制电流的参数实现对 S-VCSEL 偏振开关的控制. 下面讨论 M-VCSEL 的脉冲电流调制幅度对 S-VCSEL 偏振开关特性的影响. 为了定量描述偏振开关特性，引入物理量—垂直偏振抑制比(OPSR)，其定义为[12]

$$\mathrm{OPSR} = 10\log(I_x/I_y)\,\mathrm{dB}, \tag{8}$$

式中，I_x，I_y 分别表示 x，y 方向偏振光中大于峰值的 10% 以内的平均强度. 图 5 给出了 OPSR 随 M-VCSEL 调制脉冲电流幅度的变化规律. 从图中可以看出，随着调制电流幅度的增加，OPSR 将减小. 这是易于理解的：随着调制幅度的增加，则 M-VCSEL 输出光脉冲平均功率将增大，而输出的光脉冲中几乎都是 y 偏振光，因此将其注入到 S-VCSEL 中，将增大 y 偏振光的输出，从而使 OPSR 随着 W 的增加呈现下降趋势. 因此，通过调整 W 的大小，可以获得不同的 OPSR.

4. 结 论

本文将基于文献[8]提出的实现偏振转换的方案，利用描述 VCSEL 动态特性的速率方程组，从理论上研究 M-VCSEL 在调制电流的作用下，其输出光脉冲的形状，以及在 M-VCSEL 所产生的光脉冲注入下，S-VCSEL 输出的 x 和 y 偏振光的动态特性，给出了 S-VCSEL 输出垂直偏振抑制比(OPSR)随 M-VCSEL 脉冲调制电流幅度的变化规律. 本文的研究结果对制作偏振开关具有一定的指导意义.

[1] 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]

[2] Liu S F, Xia G Q, Wu J G, Li L F, Wu Z M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1502 (in Chinese) [刘胜芳、夏光琼、吴加贵、李林福、吴正茂 2008 物理学报 **57** 1502]

[3] Hong Y H, Paul J, Spencer P S, Shore K A 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 3210

[4] Bandyopadhyay S, Hong Y, Spencer P S, Shore K A 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 2395

[5] Hong Y, Spencer P S, Bandyopadhyay S, Rees P, Shore K A 2003 *Opt. Commun.* **216** 185

[6] Bandyopadhyay S, Hong Y, Spencer P S, Shore K A 2002 *Opt. Commun.* **202** 145

[7] Arteaga M A, Unold H J, Ostermann J M, Michalzik R 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 102

[8] Jeong K H, Kim K H, Lee S H, Lee M H, Yoo B S, Shore K A 2007 *Photonics in Switching* (San Francisco, California) p71

[9] Sciamanna M, Gatare I, Locquet A, Panajotov K 2007 *ICTON '07* (9th International Conference on Transparent Optical Networks, Rome, Italy) **2** 40

[10] Panajotov K, Gatare I, Buesa J, Thienpont H, Sciamanna M 2006 *ICTON '06* (8th International Conference on Transparent Optical Networks, Nottingham, UK) **2** 176

[11] Altes J B, Gatare I, Panajotov K, Thienpont H, Sciamanna M 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 198

[12] Debernardi P, Ostermann J M, Feneberg M 2005 *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* **11** 107

Polarization switching performance of VCSEL subjected to optical pulse injection*

Yang Bing-Xing Xia Guang-Qiong Lin Xiao-Dong Wu Zheng-Mao†

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

(Received 8 April 2008; revised manuscript received 16 September 2008)

Abstract

Based on the rate equations describing the dynamic characteristics of the master and slave vertical cavity surface emitting laser (M-VCSEL, S-VCSEL), under the modulation of pulsed bias current, the polarization characteristics of M-VCSEL output and the polarization switching performance of S-VCSEL subjected to optical pulse output from the M-VCSEL have been investigated. The results show that periodical pulses can be obtained by adding a periodical pulsed current on the M-VCSEL. Under injection of the optical pulsed from M-VCSEL, the output power of S-VCSEL will switch periodically between two orthogonal polarizations, and the period is equal to the period of the modulated current in M-VCSEL. Through changing the modulated amplitude of current in M-VCSEL, the orthogonal polarization suppression ratio (OPSR) can be controlled easily.

Keywords: vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), optical pulse, polarization switching

PACC: 0545, 4225J, 4265

* Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant No. CSTC-2007BB2333), and the High-Tech Nurtured Fund of the Southwest University.

† Corresponding author. E-mail: zmwu@swu.edu.cn