

光抽运下 1300 nm 自旋垂直腔面发射激光器 输出激光的圆偏振转换及偏振双稳特性

徐攀, 夏光琼, 吴正茂, 李琼, 林晓东, 唐曦, 樊利, 邓涛

西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715

摘要 基于自旋反转模型, 数值研究了光抽运下 1300 nm 自旋垂直腔面发射激光器 (Spin-VCSEL) 输出激光的圆偏振转换 (PS) 及偏振双稳 (PB) 特性。研究表明: 对于一定的抽运光偏振椭圆率 P_p , 抽运光功率能在一定程度上控制激光器输出光的偏振椭圆率 P_{out} , 其绝对值随抽运光功率的增加而逐渐增大; 对于一定的归一化抽运光功率 η , 采用正向扫描 (逐渐增加) 和反向扫描 (逐渐减小) P_p 时, Spin-VCSEL 输出的左旋圆偏振光与右旋圆偏振光之间会发生 PS, 并可观察到 PB 现象。对于较小的 η , 双稳环宽度随 η 的增加先增加到一个最大值然后减小到 0; 对于较大的 η , 双稳环宽度随 η 的增加总体上呈现出逐渐减小的趋势。激光器的线宽增强因子 α 和有源区介质的双折射系数 γ_p 等内部参数对由 P_p 变化引起的 PS 和 PB 均有较大的影响。此外, 确定了双稳环宽度在某些激光器关键内部参数和 η 构成的参数空间中的分布图。

关键词 激光光学; 自旋垂直腔面发射激光器; 光抽运; 圆偏振转换; 双稳

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401002

Circular Polarization Switching and Polarization Bistability of Optically Pumped 1300 nm Spin Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Xu Pan, Xia Guangqiong, Wu Zhengmao, Li Qiong, Lin Xiaodong, Tang Xi, Fan Li, Deng Tao

School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract Based on the spin-flip model, the output laser circular polarization switching (PS) and polarization bistability (PB) characteristics of 1300 nm spin vertical-cavity surface-emitting lasers (Spin-VCSEL) under optical pumping are investigated numerically. The results show that, for a certain polarization ellipticity P_p of the pump light, the pump power P_{out} can control the polarization ellipticity of the output light at a certain extent, and its absolute value increases with the increase of pump power. For a certain normalized pump power η , the PS can occur between the left circularly polarized light and the right circularly polarized light of the spin-VCSEL and the PB phenomenon can be observed when P_p is scanned forward (gradually increasing) or backward (gradually decreasing). For the small η , the bistability loop width increases to a maximum, and then decreases to 0 with the increasing η . For a large η , the bistability loop width shows a decreasing trend with the increasing η on the whole. Moreover, the internal parameters such as linewidth enhancement factor α of the laser and birefringence coefficient γ_p of the source medium have a great influence on the PS and PB characteristics induced through the changing of P_p . In addition, the distribution of the bistability loop width is also given in the parameter space of some key internal parameters of the laser and η .

Key words laser optics; spin vertical-cavity surface-emitting lasers; optical pump; circular polarization switching; bistability

OCIS codes 140.7260; 140.5560; 190.4360; 190.1450

收稿日期: 2017-09-26; **收到修改稿日期:** 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金 (11704316, 61475127, 61575163, 61674123, 61640004, 61775184)、重庆市自然科学基金 (CSTC2016jcyjA0082, CSTC2016jcyjA0575)、中央高校基本科研业务费专项资金 (XDJK2017B012, XDJK2017B047, XDJK2017C063)

作者简介: 徐攀 (1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体激光非线性动力学方面的研究。E-mail: 1281030531@qq.com

导师简介: 邓涛 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光非线性动力学及其应用方面的研究。

E-mail: dengt@swu.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

自 1990 年 Datta 和 Das^[1] 提出自旋晶体管以来,自旋电子学受到了人们的广泛关注^[1-5]。自旋激光器因具有超快的偏振相关动力学^[6-7]、更低的阈值工作电流^[8]及更强的偏振控制能力^[9-10]等,成为理想的自旋光源。虽然自旋垂直腔面发射激光器(Spin-VCSEL)属于准对称结构器件,其输出的激光偏振几乎无选择性,但通过引入各向异性的机制可优化选择某种偏振,实现对激光器输出激光偏振的控制,因此 Spin-VCSEL 已经成为自旋激光器的理想选择^[11-12]。

Spin-VCSEL 主要采用电抽运和光抽运两种方式注入自旋极化电子,以获得左(右)旋圆偏振光输出^[13]。电抽运下 Spin-VCSEL 的相关研究已取得一些进展^[2,13-14],但是此种抽运方式下的 Spin-VCSEL 通常需要较大的磁场强度和较低的工作温度,且在衬底设计和制作等方面还有诸多关键技术问题亟需解决^[8,13-15]。光抽运能使激光器产生自旋极化的载流子,给人们探究 Spin-VCSEL 的工作机理及偏振输出特性提供了另一种可行的选择。迄今为止,光抽运下短波长自旋 VCSELs 的工作温度、阈值特性及输出的偏振特性已经得到了学者的广泛关注^[16-20]。1997 年, Hallstein 等^[16] 在 15 K 温度和 16 T 磁感应强度下证实了光脉冲抽运 VCSELs 输出圆偏振光是可行的。Rudolph 等^[17] 利用圆偏振光抽运 In_{0.04}Ga_{0.96}As 量子阱 VCSELs,在 6 K 温度下观察到激光器的阈值减小了 20%,随后该课题组进一步在室温条件下利用光抽运将商用 GaAs/(AlGa)As 量子阱 VCSELs 的阈值减小了 2.5%,并理论预见了当自旋弛豫时间大于 800 ps 时,采用左(右)旋圆偏振光注入可使激光器的阈值降低 50%^[18]。Gahl 等^[19] 理论研究了光抽运 VCSELs 输出的偏振动力学行为。Hövel 等^[20] 利用脉冲光抽运研究了室温下 Spin-VCSEL 的偏振输出特性,实验证实了通过调节抽运光的偏振态可实现对激光器输出偏振特性的控制。值得注意的是,Spin-VCSEL 的偏振转换(PS)和偏振双稳(PB)作为激光器偏振相关的重要特性也成为了近年来研究的热点^[21-24]。2003 年, Dyson 等^[21] 理论分析了光抽运功率与短波长 Spin-VCSEL 输出偏振特性的关系,并观察到了由抽运功率变化引起的 PS 和 PB 现象。与短波长 Spin-VCSEL 相比,长波长 Spin-VCSEL 产生偏振输出的物理机理应该是相似的,但由于长波长 Spin-

VCSEL 在有源区材料、结构、制作工艺方面的不同,其偏振输出特性与短波长 Spin-VCSEL 相比会存在一定的差异^[9,25]。特别地,1300 nm Spin-VCSEL 位于通信波段,易与现有光纤系统实现兼容,有利于其在光通信及可重构的光互联等领域的应用。2012 年 Schires 等^[22] 报道了在室温和连续光抽运条件下 1300 nm 稀氮化物 Spin-VCSEL 的偏振输出特性。2015 年 Alharthi 等^[23] 实验研究了 1300 nm Spin-VCSEL 由外光注入引起的 PS 和 PB 现象。2016 年 Li 等^[24] 也从理论上研究了光抽运下 1300 nm Spin-VCSEL 的偏振输出特性,证实了抽运光偏振态对自旋激光器输出偏振特性的可控性,并初步观察到了 PS 和 PB 现象。如上所述,尽管人们已对光抽运下 Spin-VCSEL 的 PS 和 PB 现象开展了初步的理论和实验研究,但是仍有很多方面有待深入研究。基于此,本文对圆偏振光抽运下 1300 nm Spin-VCSEL 的偏振输出特性开展了相关探究,讨论了抽运光功率和偏振态、激光器相关关键内部参数等对 1300 nm Spin-VCSEL 输出激光的 PS 及 PB 特性的影响。

2 理论模型

基于描述 VCSELs 的自旋反转模型^[26-28],光抽运下 1300 nm Spin-VCSEL 动力学特性的速率方程可以表示为^[9]

$$\frac{dE_{\pm}}{dt} = k(1 + i\alpha)(N \pm m_z - 1)E_{\pm} - (\gamma_a + i\gamma_p)E_{\pm} + F_{\pm}, \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \gamma[\eta_+ + \eta_- - (1 + I_+ + I_-)N - (I_+ - I_-)m_z], \quad (2)$$

$$\frac{dm_z}{dt} = \gamma(\eta_+ - \eta_-) - [\gamma_s + \gamma(I_+ + I_-)]m_z - \gamma(I_+ - I_-)N, \quad (3)$$

式中 t 为时间, E_+ (E_-) 为右(左)旋圆偏振光的慢变复振幅,其相应的强度 $I_{\pm} = |E_{\pm}|^2$, n_+ 和 n_- 分别为自旋向下和自旋向上的归一化载流子密度, $N = (n_+ + n_-)/2$ 为归一化载流子密度, $m_z = (n_+ - n_-)/2$ 为自旋向上和自旋向下的归一化载流子密度的差值, k 为光场衰减速率, α 为线宽增强因子, γ_a 和 γ_p 分别为有源区介质的线性色散系数和双折射系数, γ 为总的载流子衰减速率, γ_s 为自旋反转速率, η_+ (η_-) 为与两圆偏振光场 E_+ (E_-) 对应的归一化光抽运功率,总的归一化光抽运功率

$\eta = \eta_+ + \eta_-$, F_{\pm} 为噪声源, 可表示为

$$F_{\pm} = \sqrt{\beta\gamma(N \pm m_z)} \xi_{\pm}, \quad (4)$$

式中 ξ_{\pm} 为高斯白噪声, β 为自发辐射噪声因子。

根据偏振光椭圆率的定义, 抽运光的偏振椭圆率可表示为

$$P_p = \frac{\eta_+ - \eta_-}{\eta_+ + \eta_-}, \quad (5)$$

Spin-VCSEL 输出光的偏振椭圆率为

$$P_{out} = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}, \quad (6)$$

P_{out} 在 $[-1, 1]$ 之间取值, 当取值为 1 时对应右旋圆偏振光, 当取值为 -1 时对应左旋圆偏振光。

3 结果与讨论

利用 4 阶龙格-库塔算法对速率方程进行数值求解, 数值仿真过程中所用参数取值如下^[22]: $k = 250 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 105 \text{ ns}^{-1}$, $\beta = 10^{-5}$, $\gamma_a = 0$, $\gamma_p = 34.5 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 2$ 。基于上述参数, 得到 I_{\pm} 、 P_{out} 与 η 的关系如图 1 所示。图 1(a) 对应 $P_p = -1$

(左旋圆偏振光抽运) 的情况, 图 1(b) 对应 $P_p = 1$ (右旋圆偏振光抽运) 的情况。黑色虚线代表左旋圆偏振光的输出功率, 黑色实线代表右旋圆偏振光的输出功率。从图 1 可以看出, 当抽运光功率超过阈值后, 该 Spin-VCSEL 同时输出左旋和右旋圆偏振光, P_{out} 的绝对值随抽运光功率的增加而增大, 即抽运光为左旋圆偏振光时, 激光器输出的左旋圆偏振光占主导地位, 且左旋圆偏振光的主导地位随抽运功率的增加而被加强; 反之, 当抽运光为右旋圆偏振光时, 激光器输出的右旋圆偏振光占主导地位, 且右旋圆偏振光的主导地位同样随抽运功率的增加而增强。产生该现象的原因可能是: 自旋向下的电子与自旋向下的重空穴复合可产生右旋圆偏振光, 而自旋向上的电子与自旋向上的重空穴复合可产生左旋圆偏振光。当左旋圆偏振光抽运时, 有源区自旋向上的电子增多, 此时左旋圆偏振光模式对应的增益超过右旋圆偏振光模式对应的增益, 因此激光器输出的左旋圆偏振光占据了主导地位; 反之, 当右旋圆偏振光抽运时, 激光器输出的右旋圆偏振光占据了主导地位^[29]。

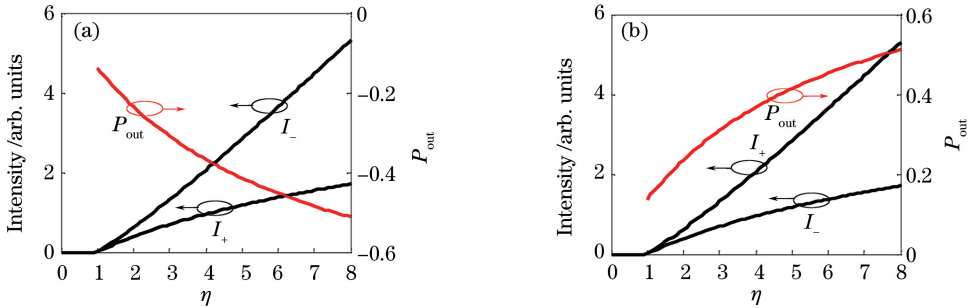


图 1 Spin-VCSEL 的 I_{\pm} 、 P_{out} 与 η 之间的关系。(a) $P_p = -1$; (b) $P_p = 1$

Fig. 1 I_{\pm} and P_{out} of Spin-VCSEL versus η . (a) $P_p = -1$; (b) $P_p = 1$

3.1 连续改变 P_p 时激光器输出的 PS 及 PB 特性

图 2 给出了不同 η 下, 连续改变 P_p 时 Spin-VCSEL 输出的 P_{out} 。其中, 图 2(a)~(f) 分别对应 η 为 1.2, 2.0, 2.2, 3.0, 5.0, 7.0 的情况。在无特别说明的情况下, 对 P_p 均采用正(反)向的扫描方式, 即对 P_p 从 -1 开始扫描到 1, 然后再从 1 扫描到 -1。对于 $\eta = 1.2$ 的情况, 如图 2(a) 所示, P_p 在一个扫描周期内由 -1 连续增加到 1 (正向扫描) 时, P_{out} 分别在 -0.35 和 0.85 时出现了符号的突然跳变, 激光器输出的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的主导地位发生两次转换, 即发生了两次 PS 现象; 当 P_p 以相同的扫描速率从 1 减小到 -1 (反向扫描) 时, P_{out} 同样发生了两次 PS, 且发生 PS 的位置与正向扫描时不同, 即发生了 PB 现象。将正、反向扫描过程中发生

PS 时所对应的抽运光偏振椭圆率差值定义为双稳宽度。考虑到实际探测过程中探测仪器具有一定的响应时间, 因此模拟过程中激光器的输出强度是对 1 ns 时间窗口进行平均后得到的结果^[30]。从图 2(a) 中可以看出, P_{out} 随 P_p 的变化出现了两个几乎对称的双稳环, 其环宽基本相同。当 $\eta = 2$ 时, 如图 2(b) 所示, 红色线对应 P_p 从 1 开始扫描, 在正(反)向扫描抽运偏振椭圆率时均能观察到 PS 和 PB 现象, 但在扫描范围内没有出现完整的双稳环。当 η 继续从 2.2 增加到 7.0 时, 如图 2(c)~(f) 所示, 激光器在正(反)向扫描过程中再次出现两次 PS 现象, PB 现象也始终存在, 在相同抽运功率下激光器由抽运椭圆率变化引起的两个双稳环的宽度基本相等, 且双稳环宽度在所研究的抽运功率范围内随 η 的增加总体

上呈现减小的趋势。此外,从图 2 中还可看出, P_{out} 整体上受到 P_p 的控制。对于 P_p 绝对值较小的情况, P_{out} 随 P_p 线性变化,两者符号相反,且在此区间未出

现 PS 和 PB 现象;对于 P_p 绝对值相对较大的情况, P_{out} 发生了符号的突变,且与 P_p 的符号保持一致,激光器在此区间可能出现 PS 和 PB 现象。

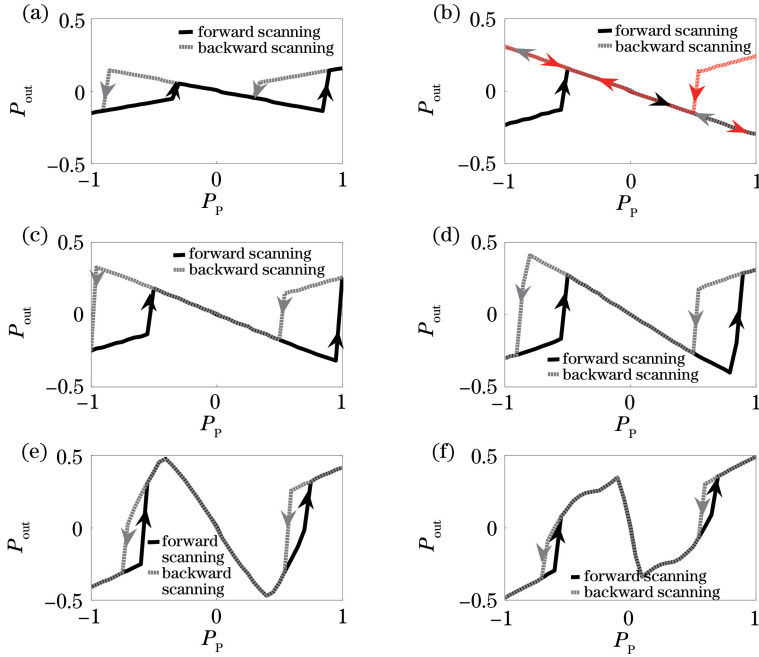


图 2 激光器的 P_{out} 随 P_p 的变化曲线。(a) $\eta=1.2$; (b) $\eta=2.0$; (c) $\eta=2.2$; (d) $\eta=3.0$; (e) $\eta=5.0$; (f) $\eta=7.0$

Fig. 2 Variation in P_{out} with P_p of the laser.

(a) $\eta=1.2$; (b) $\eta=2.0$; (c) $\eta=2.2$; (d) $\eta=3.0$; (e) $\eta=5.0$; (f) $\eta=7.0$

上述现象出现的原因可能是:1300 nm Spin-VCSEL 输出激光存在同相稳态解和反相稳态解,因此 P_{out} 与 P_p 的符号可出现相同或相反两种情况^[24,31]。同时,自旋激光器工作时存在一些基本的物理过程,如均衡右旋圆偏振分量和左旋圆偏振分量增益的自旋反转过程、均衡两个分量场幅度的二向色性、两个偏振分量相互耦合的双折射效应等。这些物理过程的共同作用导致激光器在逐渐增加或减小 P_p 的过程中两个圆偏振分量的主导地位可能发生变化,从而发生 PS 现象。在正反向扫描 P_p 的过程中,由于系统的初始条件发生了变化,激光器在非线性效应的作用下发生 PS 时所需的 P_p 发生了变化,从而导致 PB 现象的出现,激光器最终的输出状态取决于 P_p 的扫描路径。值得注意的是:如果 P_p 采用反、正向的扫描方式,即对 P_p 从 1 开始扫描到 -1,然后再从 -1 扫描到 1,且选取适当的初始值使 P_{out} 在 $P_p=1$ 时为正值,对于 $\eta=2.0$ 的情形,所得结果如图 2(b) 中红色线所示。而 η 取其他值时,其结果不变。出现该现象的原因主要是:对于图 2(b) 的情况,由于激光器在 P_p 为 1 和 -1 时均存在两种不同的输出状态,对于不同的初始值,在扫描

P_p 的过程中 P_{out} 可能存在不同的演化路径。而对于其他的情况,由于激光器在 P_p 为 1 和 -1 时均只有一种输出状态,因此无论选择哪一种扫描方式,其输出的 P_{out} 只有唯一的演化路径。

进一步分析,当 η 在 1~8 之间变化时, P_{out} 由 P_p 变化引起的双稳环宽度随 η 的变化关系如图 3 所示。从图 3 可以看出,当 $\eta < 1.3$ 时,双稳环宽度随 η 的增加呈现上升的趋势;当 $1.4 < \eta < 2.1$ 时,双稳环宽度变为 0。需要指出的是,此时激光器输出光的偏振椭圆率随抽运光偏振椭圆率的变化出现了 PB 现象,但考虑到所研究范围内这类 PB 没有形成

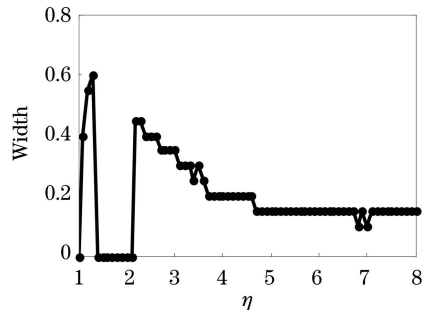


图 3 双稳环宽度随 η 的变化曲线

Fig. 3 Bistability loop width versus η

完整的双稳环,如图 2(b)所示,为了方便,将这类 PB 的环宽取值为 0。当 $2.2 < \eta < 8.0$ 时,双稳环宽度先整体呈现减小的趋势,然后逐步稳定在一定的水平。出现该现象的原因可能是:当采用圆偏振光抽运自旋激光器时,自旋极化的电子(空穴)被注入到器件的有源区,形成非均衡的自旋分布,根据光学跃迁自旋守恒的选择定则,自旋极化的载流子辐射复合发出左旋(右旋)圆偏振光,即电子自旋与光子偏振之间实现了相互转化。由于自旋极化的电子具有典型的自旋相干时间,因此其自旋信息具有一定的记忆效应^[32-33]。随着 η 的增加,极化电子的自旋信息得到增强,其记忆效应随之发生变化,因此相应的双稳区也随之发生改变。

3.2 激光器内部参数取不同值时,连续改变 P_p 引起激光器输出光的 PS 及 PB 特性

众所周知,激光器的工作性能与其内部参数息息相关,且内部参数因受材料、制作工艺等诸多因素的影响而较难准确控制,因此研究典型的激光器内部参数对 Spin-VCSEL 输出光特性的影响尤为重要。已有研究表明,自旋激光器的偏振输出特性主要受到内部参数 α 和 γ_p 的影响^[34-38]。基于此,本课题

主要研究了 α 和 γ_p 对 1300 nm Spin-VCSEL 的 P_{out} 受 P_p 变化引起的 PS 及 PB 特性的影响。需要指出的是,这里仅考虑了单个激光器内部参数变化对激光器输出偏振特性的影响。在实际中,激光器输出的偏振特性受到多个内部参数变化的综合影响,因此其偏振输出特性将变得更为复杂。图 4 给出了 $\eta = 3, \gamma_p = 34.5 \text{ ns}^{-1}$ 时,不同 α 下 P_{out} 随 P_p 的变化。当 $\alpha = 1.0$ 和 1.5 时,分别如图 4(a)和图 4(b)所示, P_{out} 没有发生 PS 和 PB 现象;当 α 分别取 1.6, 2.0, 2.4, 2.8 时,分别如图 4(c)~4(f)所示, P_{out} 随 P_p 的变化出现了 PS 和 PB 现象,即激光器输出的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的主导地位随着 P_p 的变化而发生了转换, P_p 为正或负时对应的双稳环几乎呈对称分布,且双稳环宽度随 α 的增加整体呈现出逐渐减小的趋势。出现该现象的原因可能是: α 表征了由激光器有源区载流子密度起伏引起的线宽展宽及啁啾特性,对激光器的输出状态有较大的影响^[34]。仿真发现在较大的 α 下,激光器在双稳区将处于非稳态工作,如图 4(f)中的双稳区部分。因此在给定的条件下, α 的变化将导致激光器输出光的偏振特性呈现上述变化趋势。

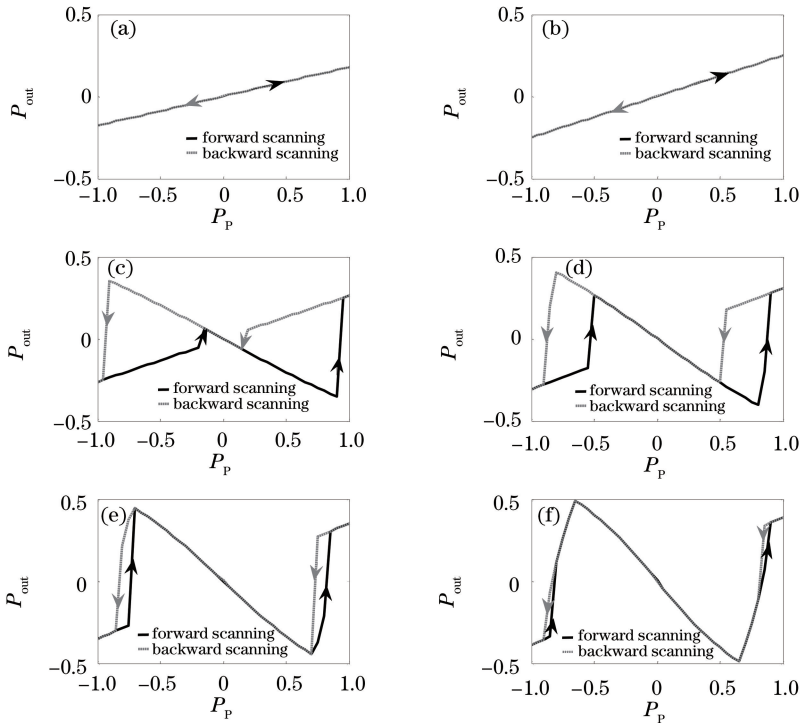


图 4 当 $\eta = 3, \gamma_p = 34.5 \text{ ns}^{-1}$ 时 P_{out} 随 P_p 的变化曲线。(a) $\alpha = 1.0$; (b) $\alpha = 1.5$; (c) $\alpha = 1.6$; (d) $\alpha = 2.0$; (e) $\alpha = 2.4$; (f) $\alpha = 2.8$

Fig. 4 Variation in P_{out} with P_p when $\eta = 3$ and $\gamma_p = 34.5 \text{ ns}^{-1}$.

(a) $\alpha = 1.0$; (b) $\alpha = 1.5$; (c) $\alpha = 1.6$; (d) $\alpha = 2.0$; (e) $\alpha = 2.4$; (f) $\alpha = 2.8$

图 5 给出了当 $\gamma_p = 34.5 \text{ ns}^{-1}$ 时,1300 nm Spin-VCSEL 的 P_{out} 由 P_p 变化引起的双稳环宽度在 α

和 η 构成的参数空间中的分布图谱。从图 5 中可以看出,当 α 较小时,双稳环宽度为 0,即在所研究的 η

范围内 P_{out} 不会随 P_p 的变化而出现 PB 现象。当 α 在 1.6 和 2.4 之间取值时,对于一定的 α ,双稳环宽度随 η 的增加总体上先增加再减小到 0,即双稳环宽度增加到一定程度后 PB 现象消失或出现类似图 2(b)所示的现象。随着 η 的进一步增加,PB 现象再次出现,且双稳环宽度将随 η 的增加呈现逐渐减小的趋势,并在研究参数范围内趋于一个稳定的值。对于 α 较大($\alpha > 2.4$)的情况,双稳环宽度随 η 的增加总体上呈现先增加后减小的趋势。

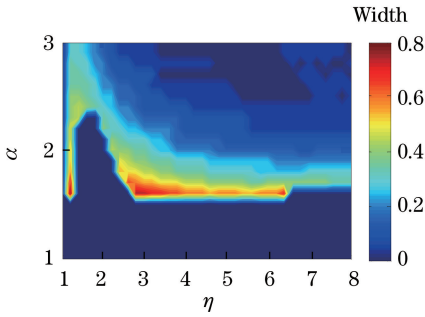


图 5 Spin-VCSEL 输出光的双稳环宽度在 α 和 η 构成的参数空间中的分布图

Fig. 5 Mapping of bistability loop width of laser from Spin-VCSEL in parameter space of α and η

图 6 给出了当 $\eta = 3, \alpha = 1.6$ 时,不同的 γ_p 下 1300 nm Spin-VCSEL 的 P_{out} 随 P_p 的变化曲线。从图 6 可以看出,当 $\gamma_p = 32.5 \text{ ns}^{-1}$ 时, P_{out} 不存在 PS 和 PB 现象,如图 6(a)所示;当 γ_p 分别取 33.5, 35.5, 37.5, 38.5 ns^{-1} 时,分别如图 6(b)~(e)所示, P_{out} 的符号在正向和反向扫描 P_p 的过程中均发生了两次转变,且存在 PB 现象,其双稳环宽度总体上随 γ_p 的增加呈现出减小的趋势;当进一步增加 γ_p 到 39.5 ns^{-1} 时,如图 6(f)所示,红色线对应 P_p 从 1 开始扫描,且 P_{out} 在 $P_p = 1$ 时为正值,激光器输出光在正向和反向扫描 P_p 时均出现了 PS 和 PB 现象,但在扫描范围内未出现完整的双稳环,与图 2(b)的情形类似。出现该现象的原因可能是:激光器有源区双折射效应的变化导致对应的光学增益发生变化,使两个圆偏振分量主导地位在不同的 P_p 下发生转变,从而使激光器在一定的条件下出现上述 PS 和 PB 现象。值得注意的是,在实际应用中,激光器有源区结构的各向异性及热效应均可能对双折射效应产生影响,其偏振特性将变得更为复杂,因此双折射系数等内部参数如何影响自旋激光器偏振输出光特性的深层次物理机制尚有待进一步探究。

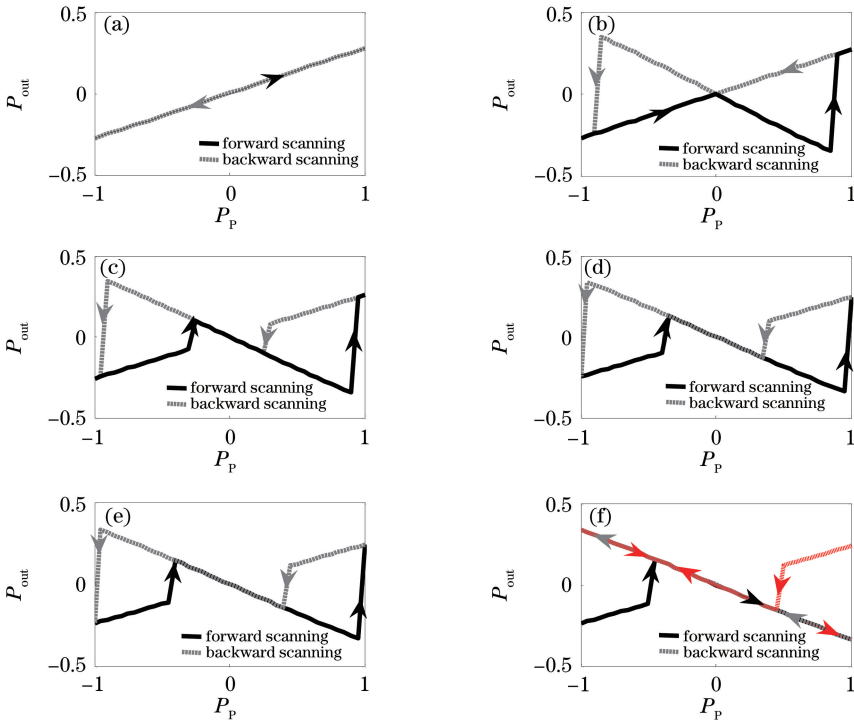


图 6 当 $\alpha = 1.6, \eta = 3$ 时 P_{out} 随 P_p 的变化曲线。(a) $\gamma_p = 32.5 \text{ ns}^{-1}$; (b) $\gamma_p = 33.5 \text{ ns}^{-1}$; (c) $\gamma_p = 35.5 \text{ ns}^{-1}$; (d) $\gamma_p = 37.5 \text{ ns}^{-1}$; (e) $\gamma_p = 38.5 \text{ ns}^{-1}$; (f) $\gamma_p = 39.5 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 6 Variation in P_{out} with P_p when $\alpha = 1.6$ and $\eta = 3$. (a) $\gamma_p = 32.5 \text{ ns}^{-1}$; (b) $\gamma_p = 33.5 \text{ ns}^{-1}$; (c) $\gamma_p = 35.5 \text{ ns}^{-1}$; (d) $\gamma_p = 37.5 \text{ ns}^{-1}$; (e) $\gamma_p = 38.5 \text{ ns}^{-1}$; (f) $\gamma_p = 39.5 \text{ ns}^{-1}$

图 7 给出了当 $\alpha=1.6$ 时,激光器输出光的双稳环宽度在 γ_p 和 η 构成的参数空间中的分布图谱。从图 7 可以看出,当 γ_p 较小时,所研究的 η 范围内激光器输出的双稳环宽度为 0,此时未发生 PB 现象。当 γ_p 在 33.5 ns^{-1} 和 40.5 ns^{-1} 之间取值时,激光器输出光发生了 PB 现象,其双稳环宽度随 η 的增加先增大到一定值后迅速变为 0,此时激光器输出光处于类似于图 6(f) 的情形。随着 η 的进一步增加,双稳环宽度整体上呈现出减小的趋势。对于较大的 γ_p ($\gamma_p > 40.5 \text{ ns}^{-1}$),当 η 较小时,激光器输出光与图 6(f) 的情况类似,其双稳环宽度为 0;当 η 增大到一定值后,双稳环宽度整体上随 η 的增大而减小。

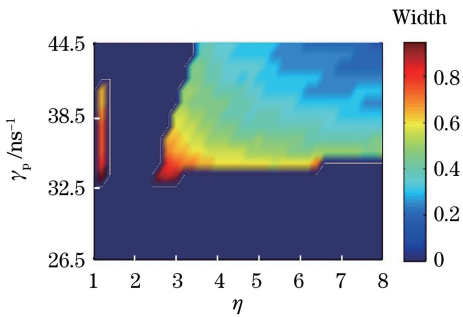


图 7 Spin-VCSEL 输出光的双稳环宽度在 γ_p 和 η 构成的参数空间中的分布图

Fig. 7 Mapping of bistability loop width of Spin-VCSEL output light in parameter space of γ_p and η

4 结 论

利用自旋反转模型,理论分析了基于光抽运的 1300 nm Spin-VCSEL 的 P_{out} 由 P_p 变化引起的 PS 及 PB 特性。研究表明:抽运光功率及其偏振椭圆率对 Spin-VCSEL 的偏振输出光特性有一定的影响;在适当的条件下,通过正(反)向扫描 P_p , P_{out} 可出现符号的跳变,且正向扫描和反向扫描时发生符号跳变的位置不同,即出现 PS 和 PB 现象;激光器内部参数 α 和 γ_p 对其圆偏振输出光的 PS 和 PB 现象均有较大的影响。在一定的 γ_p 和 α 条件下,通过正向和反向扫描 P_p 均可观察到 P_{out} 出现两次 PB 现象,且在较大的抽运功率下双稳环宽度随 η 的增加整体上呈现出逐渐减小的趋势。此外,也给出了 1300 nm Spin-VCSEL 的 P_{out} 由 P_p 变化引起的双稳环宽度在不同激光器内部参数(γ_p 和 α)和 η 构成的参数空间中的分布图谱。

参 考 文 献

[1] Datta S, Das B. Electronic analog of the electro-optic

modulator[J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(7): 665-667.

[2] Gerhardt N C, Hofmann M R. Spin-controlled vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Advances in Optical Technologies, 2012: 268949.

[3] Chen J Y, Wong T M, Chang C W, et al. Self-polarized spin-nanolasers[J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(10): 845-850.

[4] Xie S, Liang T, Ma X Y, et al. Preparation, properties and optoelectronic applications of transition metal dichalcogenides[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703001.

谢爽, 梁涛, 马向阳, 等. 过渡金属硫族化合物的制备、特性和光电应用[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703001.

[5] Zhang J, Luo Z M, Luo H L, et al. Steering asymmetric spin splitting in photonic spin hall effect by orbital angular momentum[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1126002.

张进, 罗朝明, 罗海陆, 等. 利用轨道角动量操控光子自旋霍尔效应中的非对称自旋分裂[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1126002.

[6] 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(15): 151107.

[7] Lindemann M, Pusch T, Michalzick R, et al. Frequency tuning of polarization oscillations: Toward high-speed spin-lasers[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(4): 042404.

[8] Holub M, Shin J, Saha D, et al. Electrical spin injection and threshold reduction in a semiconductor laser[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(14): 146603.

[9] Gerhardt N, Hovel S, Hofmann M, et al. Enhancement of spin information with vertical cavity surface emitting lasers[J]. Electronics Letters, 2006, 42(2): 88-89.

[10] Hövel S, Bischoff A, Gerhardt N C, et al. Optical spin manipulation of electrically pumped vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(4): 041118.

[11] Soda H, Iga K, Kitahara C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.

[12] Iga K. Vertical-cavity surface-emitting laser: Its conception and evolution[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(1): 1-10.

[13] Holub M, Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(11): R179.

- [14] Holub M, Shin J, Chakrabarti S, *et al.* Electrically injected spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(9): 091108.
- [15] Basu D, Saha D, Wu C C, *et al.* Electrically injected InAs/GaAs quantum dot spin laser operating at 200 K[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(9): 091119.
- [16] Hallstein S, Berger J D, Hilpert M, *et al.* Manifestation of coherent spin precession in stimulated semiconductor emission dynamics[J]. *Physical Review B*, 1997, 56(12): R7076.
- [17] Rudolph J, Hägele D, Gibbs H M, *et al.* Laser threshold reduction in a spintronic device[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(25): 4516-4518.
- [18] Rudolph J, Döhrmann S, Hägele D, *et al.* Room-temperature threshold reduction in vertical-cavity surface-emitting lasers by injection of spin-polarized electrons[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(24): 241117.
- [19] Gahl A, Balle S, Miguel M S. Polarization dynamics of optically pumped VCSELs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(3): 342-351.
- [20] Hövel S, Gerhardt N, Hofmann M, *et al.* Spin controlled optically pumped vertical cavity surface emitting laser[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(5): 251-253.
- [21] Dyson A, Adams M J. Spin-polarized properties of optically pumped vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2003, 5(3): 222-226.
- [22] Schires K, Al Seyab R, Hurtado A, *et al.* Optically-pumped dilute nitride spin-VCSEL[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3550-3555.
- [23] 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(2): 021117.
- [24] Li N, Alexandropoulos D, Susanto H, *et al.* Stability analysis of quantum-dot spin-VCSELs[J]. *Electronics*, 2016, 5(4): 1-8.
- [25] 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(15): 151109.
- [26] San Miguel M, Feng Q, Moloney J V. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(2): 1728.
- [27] Zhang X X, Wu T N, Chang K G, *et al.* Time-delay characteristics and bandwidth analysis of chaotic output from single-ended feedback and mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501010.
- 张晓旭, 吴天安, 常凯歌, 等. 单端反馈互耦合垂直腔面发射激光器混沌输出的时延特征和带宽分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501010.
- [28] Wang X F, Xia Q, Gu B. Investigation of numerical simulation on all-optical flip-flop stability maps of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 051406.
- 王小发, 夏青, 顾斌. 1550 nm VCSEL 全光触发运行技术的数值模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 051406.
- [29] Iba S, Koh S, Ikeda K, *et al.* Room temperature circularly polarized lasing in an optically spin injected vertical-cavity surface-emitting laser with (110) GaAs quantum wells[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(8): 081113.
- [30] Hong Y, Ju R, Spencer P S, *et al.* Investigation of polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers subjected to optical feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(5): 619-624.
- [31] Li N, Susanto H, Cemlyn B R, *et al.* Stability and bifurcation analysis of spin-polarized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(1): 013840.
- [32] Hendriks R F M, Van Exter M P, Woerdman J P, *et al.* Memory effect for polarization of pump light in optically pumped vertical-cavity semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(8): 1455-1460.
- [33] Cortez S, Krebs O, Laurent S, *et al.* Optically driven spin memory in n-doped InAs-GaAs quantum dots[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(20): 207401.
- [34] Dowd P, Summers H D, White I H, *et al.* Measurement of differential gain and linewidth enhancement factor of InGaAs vertical cavity surface emitting laser[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(7): 557-559.
- [35] 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.
- [36] Adams M J, Alexandropoulos D. Parametric analysis of spin-polarized VCSELs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(6): 744-749.
- [37] Torre M S, Susanto H, Li N, *et al.* High frequency continuous birefringence-induced oscillations in spin-

- polarized vertical-cavity surface-emitting lasers [J].
Optics Letters, 2017, 42(8): 1628-1631.
- [38] 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.