

1550 nm 垂直腔面发射激光器的特征参量随温度的变化

马凌华 夏光琼 陈建军 吴正茂

Temperature dependence of characteristic parameters of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

Ma Ling-Hua Xia Guang-Qiong Chen Jian-Jun Wu Zheng-Mao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 214203 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180572

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180572>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[高速 850 nm 垂直腔面发射激光器的优化设计与外延生长](#)

Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报.2018, 67(10): 104205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172550>

[基于两正交互耦 1550 nm 垂直腔面发射激光器获取多路随机数](#)

Multi-channel physical random number generation based on two orthogonally mutually coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报.2018, 67(2): 024204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171902>

[高斯切趾型光纤布拉格光栅外腔半导体激光器的混沌输出特性](#)

Characteristics of chaotic output from a Gaussian apodized fiber Bragg grating external-cavity semiconductor laser

物理学报.2017, 66(24): 244207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244207>

[混沌光注入垂直腔面发射激光器混沌输出的时延和带宽特性](#)

Performances of time-delay signature and bandwidth of the chaos generated by a vertical-cavity surface-emitting laser under chaotic optical injection

物理学报.2017, 66(24): 244206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244206>

[大幅度增加弛豫振荡频率来实现毫米级外腔半导体激光器的外腔机制转换](#)

Conversion of external cavity mechanism of millimeter-level external cavity semiconductor laser by significantly increasing relaxation oscillation frequency

物理学报.2017, 66(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234204>

1550 nm垂直腔面发射激光器的特征参量 随温度的变化*

马凌华¹⁾ 夏光琼¹⁾ 陈建军²⁾ 吴正茂^{1)†}

1) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2) (新疆医科大学医学工程技术学院, 乌鲁木齐 830011)

(2018年3月30日收到; 2018年7月14日收到修改稿)

在采用自旋反转模型分析垂直腔面发射激光器(VCSELs)动力学行为的过程中, 为了正确预测 VCSELs 的动力学行为, 需要准确给出自旋反转模型中光场衰减速率 k 、总反转载流子衰减速率 γ_N 、线性二向色性系数 γ_a 、线性双折射系数 γ_p 、自旋反转速率 γ_s 和线宽增强因子 α 这 6 个特征参量. 本文对 1550 nm VCSELs 在自由运行和平行光注入下的输出特性进行实验分析, 获取了这 6 个特征参量的值, 并着重研究了当激光器温度在 10.00—30.00 °C 范围内变化时, 这 6 个特征参量呈现的变化趋势. 研究表明, 随着温度的逐渐升高, γ_p 整体呈现逐渐增加的趋势, γ_a , γ_s , γ_N 和 k 呈现复杂的变化趋势, 而 α 则呈现逐渐减小的趋势.

关键词: 1550 nm 垂直腔面发射激光器, 自旋反转模型, 特征参量, 温度变化

PACS: 42.55.Px, 05.45.-a, 12.38.Qk

DOI: 10.7498/aps.67.20180572

1 引言

相比于传统的边发射半导体激光器^[1-4], 垂直腔面发射激光器(VCSELs)独特的结构和制作工艺使其具有阈值电流低、稳定单波长工作、易于集成、圆形对称光斑以及可实现与光纤之间的高效率耦合等优势^[5-8], 从而在光通信、光存储等领域发挥越来越重要的作用^[9,10]. 同时, VCSELs 呈现的丰富动力学特性也一直是激光研究领域的前沿课题之一^[11-14].

目前, 关于 VCSELs 非线性动力学特性的理论分析大多基于 San Miguel 等^[6]提出的自旋反转模型 (spin-flip model, SFM). 该模型在给出激光器 6 个特征参量 (光场衰减速率 k 、总反转载流子衰减速率 γ_N 、线性二向色性系数 γ_a 、线性双折射系数 γ_p 、自旋反转速率 γ_s 和线宽增强因子 α) 的条件下, 可对激光器的非线性动力学特性进行分析. 已有的

研究表明, 6 个特征参量的取值对激光器的动力学行为有较大的影响, 只有在正确给出 6 个特征参量的条件下, 采用 SFM 得到的关于激光器非线性动力学行为的理论分析结果才能准确预计实验结果, 而受客观因素影响, 这 6 个特征参量通常因激光器及其工作条件的不同具有差异. 因此, 准确确定实际使用 VCSEL 的这些特征参量, 对正确分析该激光器的输出动力学特性从而指导其相关应用具有重要意义. 目前已有一些课题组开展了这方面的工作^[15-20]. 但我们注意到, 在目前的相关报道中, 特征参量大多是在激光器温度固定的条件下得到的. 而在实际的应用过程中, 常借助于对激光器温度的调节实现对其激射波长的调控. 因此, 对激光器在不同温度条件下特征参量的准确获取, 是探明实验现象与物理本质之间关系的必经之路. 尽管 γ_s 和 α 随温度的变化已有相关的报道^[21-23], 但对所有这 6 个特征参量随温度变化规律的系统研究还未见报道.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61475127, 61575163, 61775184, 31760269, 61875167) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

基于上述原因, 本文以 1550 nm-VCSEL 作为研究对象, 研究描述 VCSEL 动力学行为的 SFM 中 6 个特征参量随温度的变化规律. 首先, 实验测定自由运行 1550 nm-VCSEL 在不同温度、不同电流条件下的光谱和噪声谱, 研究 k , γ_N , γ_a , γ_p 和 γ_s 随温度的变化规律; 其次, 实验测定平行光注入 1550 nm-VCSEL 不同温度下固定偏置电流的光谱和功率谱, 研究 α 随温度的变化规律.

2 实验装置

图 1 为实验系统结构示意图. 实验中所用的 1550 nm-VCSEL 是 Raycan 公司的商用激光器, 其电流与温度由高精度温度电流控制源 (ILX-Lightwave LDC-3724C) 控制. 可调光源 (Santec

TSL-710) 输出的连续光经偏振控制器 (PC)、可变衰减器 (VA) 和光环行器 (OC) 后被 90/10 光纤耦合器 (FC1) 分成两部分, 其中 90% 的光注入进 1550 nm-VCSEL, 另外 10% 的光进入功率计 (PM) 用于监测注入强度. 1550 nm-VCSEL 的输出则通过光环行器 (OC) 和光纤耦合器 (FC2) 后分成两束, 其中一束经 12.5 GHz 带宽的光电探测器 (PD, New Focus 1544-B) 转成电信号后再输入到 67 GHz 带宽的频谱分析仪 (ESA, R&S@FSW) 进行电谱分析, 另一束则输入到高分辨率 (20 MHz) 光谱分析仪 (OSA, Aragon Photonics BOSA lite+) 进行光谱测定. 系统中 PC 用于调节注入光的偏振方向, 使其与自由运行 1550 nm-VCSEL 中主激励模式的偏振方向一致, 从而实现平行光注入, VA 用于控制注入光的强度.

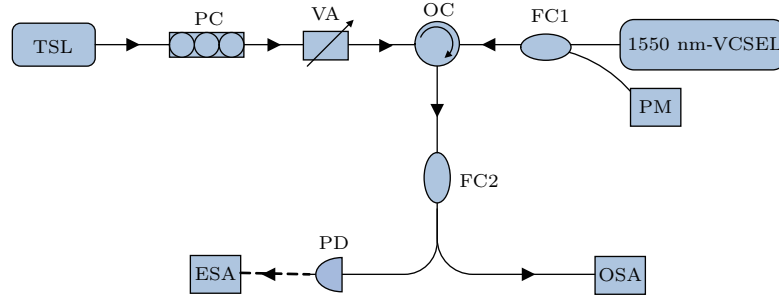


图 1 实验系统结构图 (TSL, 可调光源; PC, 偏振控制器; VA, 可调衰减器; OC, 光环行器; FC, 光纤耦合器; PM, 功率计; PD, 光电探测器; ESA, 频谱分析仪; OSA, 光谱分析仪. 实线, 光路; 虚线, 电学路径)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system. TSL, tunable semiconductor laser; PC, polarization controller; VA, variable attenuator; OC, optical circulator; FC, fiber coupler; PM, power meter; PD, photodiode; ESA, electrical spectrum analyzer; OSA, optical spectrum analyzer. Solid line, optical path; dashes line, electrical path.

基于 SFM^[6,24], 并考虑平行光注入的情形, 描述平行光注入 1550 nm-VCSELs 动力学特性的速率方程可表示为

$$\frac{dE_x}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N - 1)E_x + inE_y] - (\gamma_a + i\gamma_p)E_x, \quad (1)$$

$$\frac{dE_y}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N - 1)E_y - inE_x] + (\gamma_a + i\gamma_p)E_y + \eta_{inj}E_{inj}e^{i2\pi\Delta f t}, \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma_N[N(1 + |E_x|^2 + |E_y|^2) - \mu + in(E_yE_x^* - E_xE_y^*)], \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma_s n - \gamma_N[n(|E_x|^2 + |E_y|^2) + iN(E_yE_x^* - E_xE_y^*)], \quad (4)$$

式中, 下标 x 和 y 分别代表 x 偏振分量 (x -LP) 和 y 偏振分量 (y -LP); E 表示 1550 nm-VCSEL 的光场慢变复振幅; N 表示 1550 nm-VCSEL 增益介质内导带和价带之间总的反转载流子密度; n 表示自旋向上和自旋向下能级对应的载流子密度之差; μ 为归一化偏置电流 ($\mu = I/I_{th}$, I_{th} 为阈值电流, μ 在阈值时取值为 1); η_{inj} 为注入系数; E_{inj} 表示注入光场振幅; Δf ($\Delta f = f_m - f_s$, f_m 为 TSL 的中心频率, f_s 为 1550 nm-VCSEL 自由运行的中心频率) 为频率失谐. 当令 $\eta_{inj} = 0$ 时, 上述速率方程则过渡到激光器自由运行时的情形. 在方程 (1)–(4) 中, E_x , E_y , N , n 为未知量, μ , Δf , η_{inj} , E_{inj} 为外部参量, 而 k , γ_N , γ_a , γ_p , γ_s , α 为激光器的 6 个特征参量. 为了准确预测所使用激光器的动力学行为, 通常需要给出这 6 个特征参量的准确值.

3 结果与分析

3.1 线性双折射系数 γ_p 随温度的变化

根据文献[19], γ_p 与激光器中 x -LP 的振荡频率 (ν_x) 和 y -LP 的振荡频率 (ν_y) 存在如下关系: $\gamma_p = \pi(\nu_y - \nu_x)$, 因此通过测量激光器的输出光谱, 就可以得到 γ_p 的值. 图 2(a) 为实验测得的自由运行 1550 nm-VCSEL 在温度 $T = 20.00^\circ\text{C}$ 、偏置电流 $I = 2.50\text{ mA}$ 时的光谱图. 可以看出, 光谱中存在两个明显的峰, 分别对应两个相互正交的线性偏振模式. 其中, 激光波长较短 (1549.5351 nm) 的线性偏振分量为 y 偏振分量 (y -LP), 而波长较长 (1549.8095 nm) 的线性偏振分量为 x 偏振分量 (x -LP). 这两个偏振模式波长间隔约为 0.2744 nm, 对应的频率差异 $\nu_y - \nu_x = 34.25\text{ GHz}$, 从而可得到 γ_p 的值. 通过多次测量取平均后, $\gamma_p = 107.18\text{ GHz}$. 依照这一方法, 在固定的偏置电流 ($I = 2.50\text{ mA}$) 下,

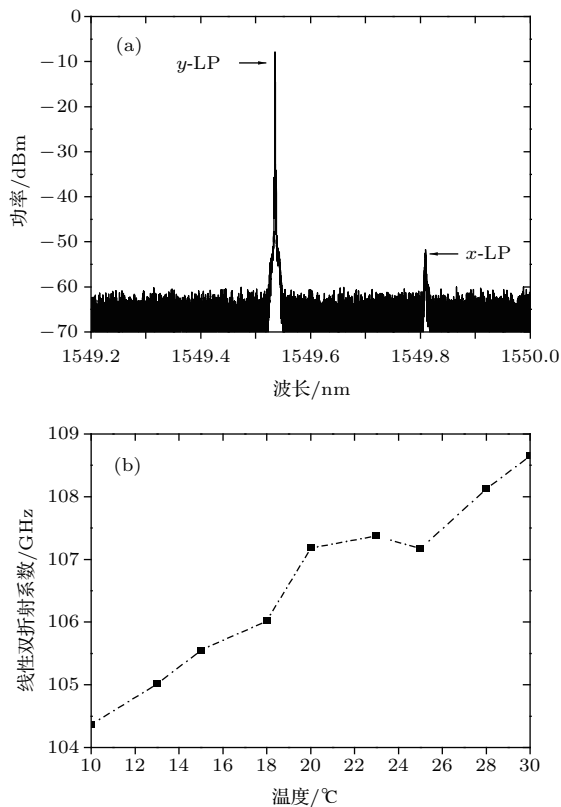


图2 $I = 2.50\text{ mA}$ 时, 实验测得的自由运行 1550 nm-VCSEL 在 $T = 20^\circ\text{C}$ 时的光谱 (a) 以及线性双折射系数随温度的变化 (b)

Fig. 2. For $I = 2.50\text{ mA}$, measured optical spectrum of a free-running VCSEL under $T = 20^\circ\text{C}$ (a), and linear birefringence coefficient as a function of temperature (b).

通过高精度温度电流控制源改变激光器的温度, 测定了激光器温度在 $10.00\text{--}30.00^\circ\text{C}$ 范围内的光谱. 根据实验获得的不同温度条件下的光谱, 计算出不同温度下的 γ_p , 如图 2(b) 所示. 从图 2(b) 可以看出, 随着温度的升高, γ_p 总体呈现上升趋势, 在上升的过程中伴随着波动. 当温度在 $10.00\text{--}30.00^\circ\text{C}$ 范围内变化时, γ_p 的变化幅度大约为 4.28 GHz, 相对变化量 (以 20.00°C 作为标准) 为 3.99%. 温度导致 γ_p 发生变化的原因如下: γ_p 为描述 VCSEL 中两个正交的线性偏振模式谐振频率之间差异的物理量, 而两个正交的线性偏振模式谐振频率差异取决于有源区介质折射率在两个偏振方向上的折射率差异, 由于温度的变化会引起有源区介质折射率发生改变, 从而导致 γ_p 也会发生变化.

3.2 线性二向色性系数 γ_a 随温度的变化

两个偏振模式不仅具有不同的谐振频率, 已有的研究还表明, 两个偏振模式所获得的增益也具有一定差异, 这一差异通过二向色性系数 γ_a 来表征. 根据线性二向色性系数 γ_a 与有效二向色性系数 γ_0 、非线性二向色性系数 γ_{non} 之间的关系: $\gamma_a = (\gamma_0 - \gamma_{\text{non}})/2$ [25], 只要测定 γ_0 和 γ_{non} 的值, 就能获得 γ_a . 根据文献 [26], $\gamma_0 = \pi(\Delta\nu_x - \Delta\nu_y)$, 其中 $\Delta\nu_x$, $\Delta\nu_y$ 为测出的 x -LP 和 y -LP 输出的光谱经过 Voigt 拟合后得到的半极大全高宽 [19,27]. 而 γ_{non} 的测定还需要通过不同电流的 γ_0 , 找到 $|\gamma_0|$ 的最小值, 这一最小值即为 γ_{non} . 根据上述测量 γ_0 的方案, 得到了 $T = 20.00^\circ\text{C}$ 时, 激光器偏置电流在 $2.00\text{--}6.00\text{ mA}$ 范围内, $|\gamma_0|$ 随电流的变化, 结果如图 3(a) 所示. 由图 3(a) 可知, $|\gamma_0|$ 的最小值出现在 $I = 3.25\text{ mA}$ (对应于该温度下的开关电流), 为 0.057 GHz, 即温度 $T = 20.00^\circ\text{C}$ 时 $\gamma_{\text{non}} = 0.057\text{ GHz}$. 从而可计算 $I = 2.50\text{ mA}$, $T = 20.00^\circ\text{C}$ 时的 $\gamma_a = 0.047\text{ GHz}$. 采用同样的方法, 得到 $I = 2.50\text{ mA}$ 、温度在 $10.00\text{--}30.00^\circ\text{C}$ 范围内变化时 γ_a 的变化趋势, 结果如图 3(b) 所示. 从图 3(b) 可看出, γ_a 随着温度的增加呈现波动变化的趋势. 温度变化导致 γ_a 发生改变的原因如下: 温度的变化引起两个偏振模式激光波长发生改变, 而有源区介质提供的增益是与波长相关的, 因此, 当温度发生变化时, 两个偏振模式所获得的增益之差会发生变化, 从而引起表征增益差异的二向色性系数 γ_a 发生变化.

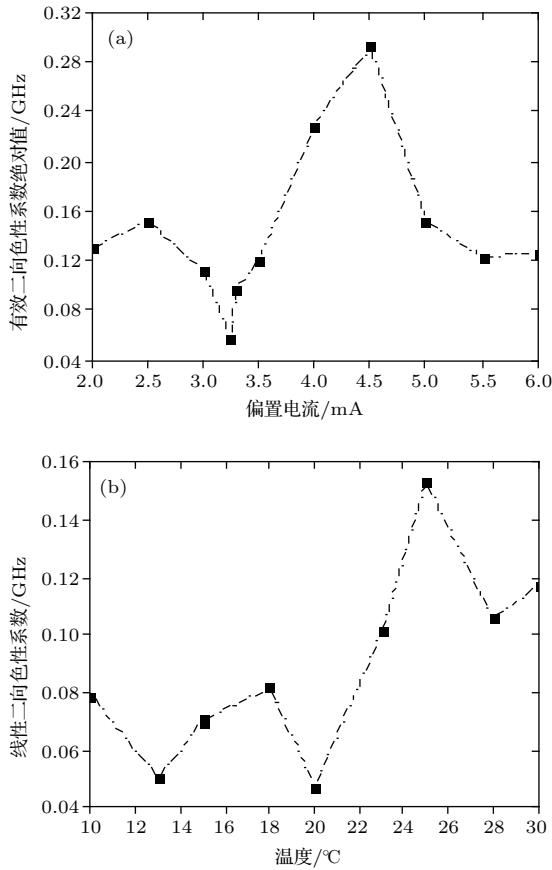


图3 (a) $T = 20.00\text{ }^\circ\text{C}$ 时有效二向色性系数绝对值 ($|\gamma_0|$) 随电流的变化; (b) $I = 2.50\text{ mA}$ 时, 线性二向色性系数 (γ_a) 随温度的变化

Fig. 3. (a) Absolute value of the effective dichroism ($|\gamma_0|$) as a function of the current for $T = 20.00\text{ }^\circ\text{C}$; (b) linear dichroism (γ_a) as a function of temperature for $I = 2.50\text{ mA}$.

3.3 自旋反转速率 γ_s 随着温度的变化

根据文献 [23], $\gamma_s = \frac{G_N(I_{PS} - I_{th})}{2e\gamma_{non}}$, 其中 I_{PS} ,

I_{th} 分别为 1550 nm-VCSEL 的偏振开关电流以及阈值电流, 通过测定在特定温度下的偏振分解 P - I 曲线即可得到; G_N 为增益, 需要根据弛豫振荡角

频率与偏置电流的关系 [18] $\Omega_R = \sqrt{\frac{G_N}{e}(I - I_{th})}$,

实验测定激光器输出的噪声谱分布, 即可得到弛豫振荡角频率, 从而计算出相应的 G_N . 以温度 $T = 20.00\text{ }^\circ\text{C}$ 时为例, 说明 γ_s 的测量方法. 首先, 通过测量偏振分解的 P - I 曲线 (如图 4(a) 所示), 可得到该温度下的 I_{th} , I_{PS} 分别为 2.02 和 3.25 mA. 接下来, 测定 $I = 2.50\text{ mA}$ 时的噪声谱分布, 结果如图 4(b) 所示, 可以得到弛豫振荡角频率为 6.25 GHz. 由此可得到 $T = 20.00\text{ }^\circ\text{C}$, $I = 2.50\text{ mA}$

时的 $\gamma_s = 1218.1/\text{ns}$. 采用同样的方法, 可得到其他温度条件下 γ_s 的值, 结果如图 4(c) 所示. 可以看出, 在测量的温度范围内, γ_s 呈现振荡的变化趋势, 这一变化趋势是由 G_N , I_{PS} , I_{th} 以及 γ_{non} 随温度的变化共同导致的 [23].

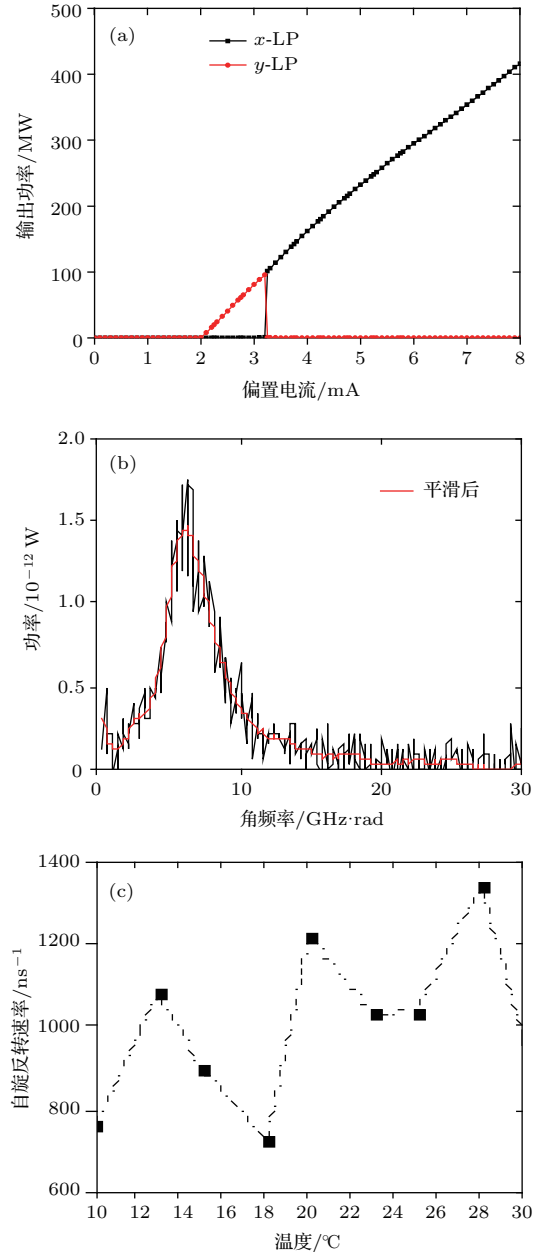


图4 (a) $T = 20.00\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 实验测得的自由运行 1550 nm-VCSEL 输出的偏振分解 P - I 曲线; (b) $T = 20.00\text{ }^\circ\text{C}$, $I = 2.50\text{ mA}$ 时, 1550 nm-VCSEL 输出的噪声谱; (c) 自旋反转速率 γ_s 随温度的变化

Fig. 4. (a) Recorded polarization-resolved P - I curves of the free-running 1550 nm-VCSEL under $T = 20.00\text{ }^\circ\text{C}$; (b) recorded noise spectrum of the free-running 1550 nm-VCSEL under $T = 20.00\text{ }^\circ\text{C}$ and $I = 2.50\text{ mA}$; (c) spin-flip rate γ_s as a function of temperature for $I = 2.50\text{ mA}$.

3.4 光场衰减速率 k 和总反转载流子衰减速率 γ_N 随温度的变化

k 和 γ_N 与噪声谱有关. 频谱分析仪测量到的幅度噪声功率谱 [15,18,28]

$$\langle |\Delta P_R(\omega)|^2 \rangle = D \frac{G + \omega^2}{(\Omega_R^2 - \omega^2)^2 + E\omega^2},$$

式中 D, G, E 为3个拟合参数. 在拟合过程中使用列文博格-马夸尔特算法 [29] 对3个拟合参数进行提取, 而弛豫振荡衰减速率 Γ_R 又与拟合参数 E 之间存在 $\Gamma_R = \sqrt{E}/2$ 的关系 [18], 因此得到 E 后, 很容易计算出 Γ_R . 将激光器温度固定在某个温度, 通过测量不同电流的噪声谱分布, 可直接得到相应的弛豫振荡频率 $f_R(I)$. 借助上述拟合过程得到的 $\Gamma_R(I)$, 可得到 $\Gamma_R(I)$ 随 $f_R(I)$ 的变化曲线. 同时 $\Gamma_R(I)$ 与 $f_R(I)$ 存在如下的关系: $\Gamma_R = 1/(2\tau_n) + 2\pi^2\tau_p f_R^2$ (其中 τ_n 为激光器在阈值处的载流子寿命, τ_p 为光子寿命) [18,28], 将测得到的 $\Gamma_R(I)$ 随 $f_R(I)$ 的变化曲线, 与该式进行对比,

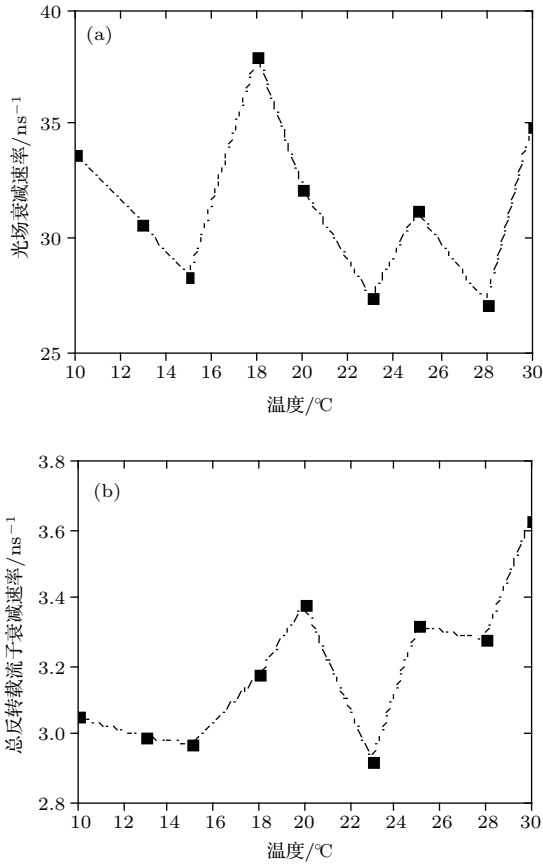


图5 (a) 光场衰减速率 k 和 (b) 总反转载流子衰减速率 γ_N 随温度的变化

Fig. 5. (a) Field decay rate k and (b) decay rate of population inversion γ_N as a function of the temperature.

可提取出 τ_n 和 τ_p 的值. 而 $k = 1/(2\tau_p)$, $\gamma_N = 1/\tau_n$, 故可计算出某一温度下 k 和 γ_N 的值. 进一步考虑到饱和效应的影响, 根据 Pérez 等 [19] 提出的修正公式 $\tau_p' = \tau_p - \Gamma\varepsilon/(G_N V_{\text{act}})$, 并按照该方案中各参量的取值, 对光子寿命进行修正, 最后得到该温度下的 k 和 γ_N 的值. 不同温度采用同样的方式进行处理, 最终得到的 k 和 γ_N 随温度的变化, 如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示. 从图 5 可看出, k 随温度的变化呈现波动趋势, 而 γ_N 随温度的增加呈现振动上升的趋势.

3.5 线宽增强因子 α 随温度的变化

上述基于自由运行 1550 nm-VCSEL 的输出特性, 分析了 $\gamma_p, \gamma_a, \gamma_s, k$ 和 γ_N 随温度的变化. 最后, 通过引入平行光注入 1550 nm-VCSEL 输出的动力学态特性, 获取不同温度下 α 的值. α 的值与平行光注入实现稳定注入锁定区霍普夫分岔 [30] 所需最小失谐频率 Δf_{min} 有关, $\Delta f_{\text{min}} \approx -\sqrt{(\alpha^2 - 1)^3/(32\alpha^2)} \cdot f_R$ [30,31]. 通过测定 $I = 2.50 \text{ mA}$ 时, 不同温度下实现稳定注入锁定所需的 Δf_{min} , 并结合没有外部光注入的 1550 nm-VCSEL 噪声谱所获得的该温度下的弛豫振荡频率 f_R , 即可得到不同温度下 α 的值, 结果如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 随着温度的升高, α 逐渐减小, 这一变化趋势与文献 [22] 报道的结果一致. α 随着温度的升高而逐渐减小的原因是: 温度升高导致激光器的激射波长相对于增益峰发生蓝移, 从而导致激射波长更接近于微分增益的极值, 因而引起线宽增强因子减小 [32].

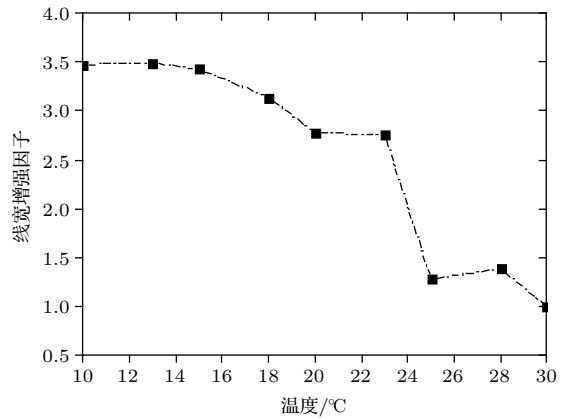


图6 $I = 2.50 \text{ mA}$ 时, 线宽增强因子随温度的变化

Fig. 6. Linewidth enhancement factor as a function of the temperature for $I = 2.50 \text{ mA}$.

4 结 论

基于实验测量自由运行 1550 nm-VCSEL 在 10.00—30.00 °C 温度变化范围的输出特性, 获取了描述激光器动力学行为的 SFM 中的 6 个特征参量 (k , γ_N , γ_a , γ_p , γ_s 和 α) 的值, 着重分析当激光器偏置电流为 2.50 mA 时这 6 个特征参量随温度的变化规律. 结果显示: 1550 nm-VCSEL 在 10.00—30.00 °C 的温度范围内, 随着温度的逐渐升高, γ_p 整体呈现逐渐增加的趋势; γ_a , γ_s , γ_N 和 k 呈现复杂的变化趋势. 进一步通过实验测定该激光器在平行光注入下的光谱和功率谱, 利用其霍普夫分岔所需的最小失谐频率 Δf_{\min} , 提取了不同温度下 α 的值. 结果显示, 随着温度的升高, α 呈现逐渐减小的趋势. 本文的研究有助于准确了解和掌握实际所使用 VCSELs 的非线性动力学特性从而指导其相关应用的开展.

参考文献

- [1] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
- [2] Wu J G, Wu Z M, Fan L, Tang X, Deng W, Xia G Q 2013 *IEEE Photon Technol. Lett.* **25** 587
- [3] Sun Y Y, Li P, Guo Y Q, Guo X M, Liu X L, Zhang J G, Sang L X, Wang Y C 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 030503 (in Chinese) [孙媛媛, 李璞, 郭龔强, 郭晓敏, 刘香莲, 张建国, 桑鲁骥, 王云才 2017 物理学报 **66** 030503]
- [4] Yan S L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 240505 (in Chinese) [颜森林 2015 物理学报 **64** 240505]
- [5] Iga K, Koyama F, Kinoshita S 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 1845
- [6] San Miguel M, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [7] Martin-Regalado J, Prati F, San Miguel M, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [8] Koyama F 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4502
- [9] Lin Y Z, Xie Y Y, Ye Y C, Zhang J P, Wang S J, Liu Y, Pan G F, Zhang J L 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 7900512
- [10] Kawaguchi H, Mori T, Sato Y, Yamayoshi Y 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** L894
- [11] Jiang N, Xue C P, Liu D, Lv Y, Qiu K 2017 *Opt. Lett.* **42** 1055
- [12] 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]
- [13] Lee M W, Hong Y H, Alan Shore K 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2392
- [14] Sakuraba R, Iwakawa K, Kanno K, Uchida A 2015 *Opt. Express* **23** 1470
- [15] Barland S, Spinicelli P, Giacomelli G, Marin F 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 1235
- [16] Bacou A, Hayat A, Iakovlev V, Syrbu A, Rissons A, Mollier J C, Kapon E 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 313
- [17] Al-Seyab R, Schires K, Khan N A, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1242
- [18] Pérez P, Valle A, Noriega I, Pesquera L 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 1601
- [19] Pérez P, Valle A, Pesquera L 2014 *J. Opt. Soc. Am. B* **31** 2574
- [20] Yang J Y, Wu Z M, Liang Q, Chen J J, Zhong Z Q, Xia G Q 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 124203 (in Chinese) [杨继云, 吴正茂, 梁卿, 陈建军, 钟祝强, 夏光琼 2016 物理学报 **65** 124203]
- [21] Chlouverakis K E, Adams M J 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 189
- [22] Khan N A, Schires K, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2013 *IEEE J. Quantum Electron.* **49** 990
- [23] Quirce A, Valle A, Pesquera L, Thienpont H, Panajotov K 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 1800207
- [24] Al-Seyab R, Schires K, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 1700512
- [25] van Exter M P, Willemsen M B, Woerdman J P 1998 *Phys. Rev. A* **58** 4191
- [26] van Exter M P, Willemsen M B, Woerdman J P 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2274
- [27] Villafranca A, Lasobras J, Lázaro J A, Garcés I 2007 *IEEE J. Quantum Electron.* **43** 116
- [28] Tatham M C, Lealman I F, Seltzer C P, Westbrook L D, Cooper D M 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 408
- [29] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, Flannery B P 1992 *Numerical Recipes in Fortran 77: the Art of Scientific Computing* (2nd Ed.) (Cambridge: Cambridge University Press) pp678–683
- [30] Gavrielides A, Kovanis V, Erneux T 1997 *Opt. Commun.* **136** 253
- [31] Chlouverakis K E, Al-Aswad K M, Henning I D, Adams M J 2003 *Electron. Lett.* **39** 1185
- [32] Summers H D, Dowd P, White I H, Tan M R 1995 *Photon. Technol. Lett.* **7** 736

Temperature dependence of characteristic parameters of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser*

Ma Ling-Hua¹⁾ Xia Guang-Qiong¹⁾ Chen Jian-Jun²⁾ Wu Zheng-Mao^{1)†}

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

2) (School of Medical Engineering Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China)

(Received 30 March 2018; revised manuscript received 14 July 2018)

Abstract

Compared with conventional edge-emitting semiconductor lasers, vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) exhibit many advantages such as low power consumption, low threshold current, single longitudinal-mode operation, circular output beam with narrow divergence, on-wafer testing capability, high bandwidth modulation, low cost and easy large-scale integration into two-dimensional arrays, etc. VCSELs have been widely adopted in various applications such as optical communication, optical storage, parallel optical links, etc. At the same time, the rich dynamic characteristics of VCSELs have always been one of the frontier topics in the field of laser research, and many theoretically and experimentally investigated results have been reported. For theoretically investigating the dynamical characteristics of VCSELs, the spin-flip model (SFM) is one of most commonly and effectively used methods. In order to accurately predict the nonlinear dynamical performance of a 1550 nm-VCSEL, six characteristic parameters included in the rate equations of the SFM need to be given accurately. The six characteristic parameters are the decay rate of field k , the decay rate of total carrier population γ_N , the linear anisotropies representing dichroism γ_a , the linear anisotropies representing birefringence γ_p , the spin-flip rate γ_s , and the linewidth enhancement factor α . In this work, through experimentally analyzing the output performances of a 1550 nm-VCSEL under free-running and parallel polarized optical injection, such six characteristic parameters included in the SFM are extracted first in the case that the temperature of the VCSEL is set to be 20.00 °C. Furthermore, through gradually increasing the temperature of the 1550 nm-VCSEL from 10.00 °C to 30.00 °C, the dependence of the six characteristic parameters on the temperature of the 1550 nm-VCSEL is investigated emphatically. The results show that with the increase of temperature of the 1550 nm-VCSEL, the linear anisotropy representing birefringence γ_p behaves as an increasing trend, and the linewidth enhancement factor α shows a decreasing trend. However, the other four characteristic parameters present complex varying trends with the increase of the temperature of the 1550 nm-VCSEL. The research in this paper is helpful in accurately understanding and controlling the dynamical characteristics of the VCSEL, and we hope that it can give a guidance for practical applications.

Keywords: 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers, spin-flip model, characteristic parameters, temperature variation

PACS: 42.55.Px, 05.45.-a, 12.38.Qk

DOI: 10.7498/aps.67.20180572

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61475127, 61575163, 61775184, 31760269, 61875167).

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