

各向异性光反馈注入的垂直表面发射激光器的 矢量偏振模转换机理*

钟东洲^{1)†} 曹文华¹⁾ 吴正茂²⁾ 夏光琼²⁾

1) 五邑大学信息学院, 江门 529020)

2) 西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2007 年 5 月 17 日收到, 2007 年 6 月 14 日收到修改稿)

数值研究了各向异性光反馈注入的垂直表面发射激光器(VCSEL)的矢量偏振模转换机理, 研究表明, 首先, 当注入电流接近阈值电流时, 由 VCSEL 的外部参数和偏振器控制的光反馈注入量中各偏振模的能量决定 VCSEL 输出的偏振态. 其次, 由偏振器控制的各向异性光反馈注入引起的 VCSEL 输出偏振态呈周期性变化. 另外, 当由偏振器控制的反馈注入量中的 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振模能量相当时, \hat{x} 偏振模和 \hat{y} 偏振模之间竞争激烈, 而激光器外部微小的扰动都会打破这两种偏振模竞争平衡, 从而使激光器输出偏振态对外部参数变化非常敏感. 最后, 当注入电流远大于阈值电流时, \hat{y} 偏振模增益获得足够大, 这时 VCSEL 输出为稳定的 \hat{y} 偏振, 即 VCSEL 的输出偏振态与其他参数无关.

关键词: 各向异性光反馈, 垂直表面发射激光器, 矢量偏振模

PACC: 0760F, 4260B, 4265T

1. 引言

随着光纤通信系统向大规模集成化、多信道波分复用、解复用技术发展, 微型激光器之一, 即垂直表面发射激光器(VCSEL)被广泛用于光通信系统, 信息处理, 光网络互连系统. 这是因为 VCSEL 比常规边缘发射半导体激光器(EEL)更具有许多本质的优点, 比如单纵模光输出、低阈值电流、大的调制带宽、圆形光束输出、容易与光纤耦合、且易集成而形成激光阵列. 然而, 由于 EEL 激光腔结构的非对称性, 所以激光腔的增益介质晶体有很强的各向异性, 所以它输出的横电(TE)模线性偏振锁定到一个固定轴上. 相比之下, VCSEL 的激光腔一般为匀称的圆柱形, 其增益介质也为匀称的圆柱形, 有很弱的各向异性, 这导致了横磁(TM)模的线性偏振的产生. 1995 年, Miguel 等提出了一个具有四能级量子阱的 VCSEL, 简称为自旋反向模型(SFM)^[1], 该模型很好描述了 VCSEL 的输出的偏振态特性. SFM 模型指出了 VCSEL 输出的偏振态取决如下两方面^[1]: 首先, 偏振态取向性反映了不同光子跃迁的本质的动力学

行为. 另一方面, 激光腔的晶体各向异性, 结构的匀称性和波导效应导致了偏振方向沿着激光腔的有源区的横截面的任一方向(垂直于激光发射方向), 或者优先取向于在正交基矢坐标系下 \hat{x} 和 \hat{y} 的任一方向(取两个正交基矢 $e_x = \hat{x}$, $e_y = \hat{y}$), 若偏振方向优先取向于 \hat{x} 方向为 \hat{x} 偏振, 而偏振方向优先取向于 \hat{y} 方向为 \hat{y} 偏振, 另外偏振方向优先取向于 \hat{x} 和 \hat{y} 的合成方向为混合偏振(同时包括 \hat{x} \hat{y} 偏振, 即椭圆偏振或圆偏振). 外界温度变化, 注入电流的变化和外部光注入都会引起 VCSEL 输出的偏振方向在 \hat{x} 和 \hat{y} 之间转换, 即在一定的条件下, VCSEL 输出偏振态可以为 \hat{x} 线性偏振或 \hat{y} 线性偏振, 或混合偏振(同时包括 \hat{y} 线性偏振和 \hat{x} 线性偏振). 结果 VCSEL 输出的动态行为对激光场的偏振非常敏感, 因此 VCSEL 又称之为矢量激光器^[2, 3].

近年来, 许多学者对 VCSEL 受到来自外腔平面镜各向同性光反馈时的矢量偏振的转换机理作了大量地研究^[3-8], 这些研究结果表明, 当外部注入电流在阈值电流附近的微量变化都能导致外腔各向同性光反馈的 VCSEL 输出的正交化的矢量偏振相互转换, 当外部注入电流固定在阈值电流附近时, 光反馈

* 五邑大学科学研究基金和重庆市自然科学基金(批准号 2006BB2331 和 2005BB3099)资助的课题.

† E-mail: dream_yu2002@126.com

强度微小的变化也会引起 VCSEL 输出的正交化的矢量偏振相互转换. 然而这些研究结果只考虑了 VCSEL 受到各向同性的光反馈注入, 对于实际的激光通信系统, 由于外部扰动, 外腔反馈光轴和 VCSEL 的固有光轴之间不能精确对齐, 这样会引起反馈光的幅度和相位的各向异性, 这样不同偏振光(各向异性光)反馈注入到 VCSEL, 会引起新的正交化矢量偏振转换物理机理. 基于此, 为了便于研究各向异性光反馈注入, 在外腔平面镜和 VCSEL 之间插入极化偏振器, 通过调节极化偏振器和光轴之间的角度, 使 VCSEL 受到不同的偏振光注入. 因此本文对带有偏振器的各向异性光注入的 VCSEL 输出的矢量偏振转换机理进行深入数值研究.

2. 实验装置和理论模型

图 1 所示为各向异性光反馈的 VCSEL 的矢量

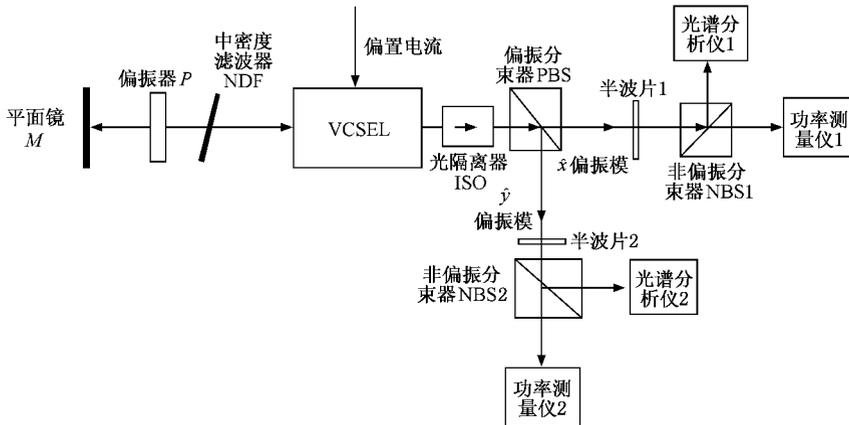


图 1 各向异性光反馈的 VCSEL 的矢量转换机理实验装置示意图

考虑 VCSEL 受到偏振器和激光器外部参数控制的不同反馈偏振光注入, 另外激光器输出的偏振光只在外腔循环一次(弱反馈), 因此根据 Lang-Kobayashi 近似, 各向异性光反馈注入的 VCSEL 的速率方程组为修正的 SFM 模型^[1,7,9,10], 即在左右旋基坐标系下, 其速率方程组为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} A_+(t) \\ A_-(t) \end{pmatrix} &= \Gamma g (1 + ia) \left[\begin{pmatrix} N_+(t) \\ N_-(t) \end{pmatrix} - N_0 \right] \begin{pmatrix} A_+(t) \\ A_-(t) \end{pmatrix} \\ &- k \begin{pmatrix} A_+(t) \\ A_-(t) \end{pmatrix} - ika \begin{pmatrix} A_+(t) \\ A_-(t) \end{pmatrix} \\ &- (\gamma_a + i\gamma_p) \begin{pmatrix} A_-(t) \\ A_+(t) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

转换机理实验装置示意图, 图中的中密度滤波器 NDF 用来调节反馈量, 光隔离器 ISO 为了避免传输到偏振分束器 PBS 的光反馈回 VCSEL, 偏振分束器 PBS 是用来分离不同的偏振光(\hat{x} 和 \hat{y} 偏振), 半波片 1 是用来保证通过非偏振分束器 NBS1 的光为 \hat{x} 偏振光, 半波片 2 是用来保证通过非偏振分束器 NBS2 的光为 \hat{y} 偏振光, 功率测量仪 1、2 分别用来测量 \hat{x} 和 \hat{y} 偏振光的能量, 光谱分析仪 1、2 分别用来测量 \hat{x} 和 \hat{y} 偏振光的功率频谱分布. 偏振器 P 插入平面镜 M 和 VCSEL 的左端面之间, 其透光轴中心与平面镜和 VCSEL 的光轴中心对齐, 从 VCSEL 左端面输出的光经过调节偏振器与平面镜和 VCSEL 的中心光轴之间的夹角得到不同的偏振光经平面镜反馈注入到 VCSEL. 另外, 从 VCSEL 右端面输出光经光隔离器 ISO 后, 再经偏振分束器 PBS 分成 \hat{x} 和 \hat{y} 偏振光.

$$+ k_r \exp[\chi(-\omega_0\tau)] \mathcal{H}_L \begin{pmatrix} A_+(t) \\ A_-(t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} N_+(t) \\ N_-(t) \end{pmatrix} &= \frac{I}{2eV} - \gamma_c \begin{pmatrix} N_+(t) \\ N_-(t) \end{pmatrix} \\ &- 2g \left[\begin{pmatrix} N_+(t) \\ N_-(t) \end{pmatrix} - N_0 \right] \begin{pmatrix} |A_+(t)|^2 \\ |A_-(t)|^2 \end{pmatrix} \\ &- \gamma_j \left[\begin{pmatrix} N_+(t) \\ N_-(t) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_-(t) \\ N_+(t) \end{pmatrix} \right], \quad (2) \end{aligned}$$

其中, $\mathcal{H}_L = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & e^{i2\theta} \\ e^{-i2\theta} & 1 \end{pmatrix}$ 为线性偏振器 P 的 H 矩阵^[10], θ 为线偏振器的透光轴与平面镜和 VCSEL 的中心光轴之间的夹角, A_{\pm} 分别为激光场的左、右圆

偏振慢变振幅, N_{\pm} 分别为上旋和下旋载流子密度. 此外, $k = 1/(2\tau_p)$, τ_p 为光子寿命, g 为微分材料增益, N_0 为每个自旋方向的透明载流子密度, a 是线宽增强因子, Γ 为有源层的限制因子, γ_a, γ_p 分别为各向异性光场振幅损耗速率和有源介质线性双折射效应. I 为注入电流, e 为单位电荷, V 为激光有源层体积, γ_c 为非辐射载流子弛豫振荡速率, γ_j 自旋反转速率, V 为激光器有源区体积, k_f 分别为反馈系数, ω_0 为 T-VCSEL 和 R-VCSEL 的中心频率, τ 为外部光反馈延迟时间.

引入归一化变量

$$\begin{pmatrix} E_+(t) \\ E_-(t) \end{pmatrix} = \sqrt{g/\gamma_c} \begin{pmatrix} A_+(t) \\ A_-(t) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$N(t) = \Gamma \frac{g}{k} \left(\frac{N_+(t) + N_-(t)}{2} - N_0 \right), \quad (4)$$

$$n(t) = \Gamma \frac{g}{k} \frac{N_+(t) - N_-(t)}{2}. \quad (5)$$

基于正交基坐标系, 将左、右旋圆偏振态转化为正交化线性偏振态

$$\begin{aligned} E_x(t) &= \frac{E_+(t) + E_-(t)}{\sqrt{2}}, \\ E_y &= -i \frac{E_+(t) - E_-(t)}{\sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

把方程(3)–(6)代入(1)和(2)并且考虑自发辐射噪声得

$$\begin{aligned} d \begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{pmatrix} / dt &= \begin{pmatrix} i\Gamma(1 + ia\chi N(t) - 1) - (\gamma_a + i\gamma_p) \\ i\Gamma(1 + ia\chi N(t) - 1) + (\gamma_a + i\gamma_p) \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{pmatrix} + k_f J_L \begin{pmatrix} E_x(t - \tau) \\ E_y(t - \tau) \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} [\beta_{sp}(N(t) + n(t))2]^2 \\ -[\beta_{sp}(N(t) + n(t))2]^2 \end{pmatrix} \xi_1 \\ &+ \begin{pmatrix} [\beta_{sp}(N(t) - n(t))2]^2 \\ [\beta_{sp}(N(t) - n(t))2]^2 \end{pmatrix} \xi_2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} dN(t)/dt &= -\gamma_c [N(t) - \mu \\ &+ N(t)\chi(|E_x(t)|^2 + |E_y(t)|^2) \\ &+ in(t)\chi(E_y E_x^* - E_x E_y^*)], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} dn(t)/dt &= -\gamma_s n(t) \\ &- \gamma_c [n(t)\chi(|E_x|^2 + |E_y|^2) \\ &+ in(t)\chi(E_y E_x^* - E_x E_y^*)], \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $J_L = CHC^{-1}$ 为琼斯矩阵, $C = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -i/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} \end{pmatrix}$ 为

H 矩阵与琼斯矩阵 J 的交换矩阵, C^{-1} 是 C 的逆矩阵. $\gamma_s = \gamma_c + 2\gamma_j$, $\mu = (\Gamma g/k) \times [I/(2eV\gamma_c) - N_0]$, μ 是归一化的注入电流, 当激光器在阈值电流运行时, μ 取值为 1, β_{sp} 为自发辐射速率, $\xi_{1,2}$ 均为白噪声, 其平均值为 0, 方差为 1. 特别注意的是自发辐射噪声对偏振转换的影响很小^[11], 为便于讨论, 因此在下面的数值模拟中将忽略.

3. 结果与讨论

为了能够准确描述 VCSEL 输出的矢量偏振特性, 引入参数偏振度^[10]

$$FP = \frac{|E_x^2| - |E_y^2|}{|E_x^2| + |E_y^2|}, \quad (10)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示取平均值, FP 取值介于 -1—1 之间, FP 为 -1 意味 VCSEL 输出的为 \hat{y} 偏振, FP 为 1 时, 为 \hat{x} 偏振, FP 取 0 时, 为圆偏振, 当 $0 < FP < 1$ 为右旋椭圆偏振, 而 $-1 < FP < 0$ 为左旋椭圆偏振.

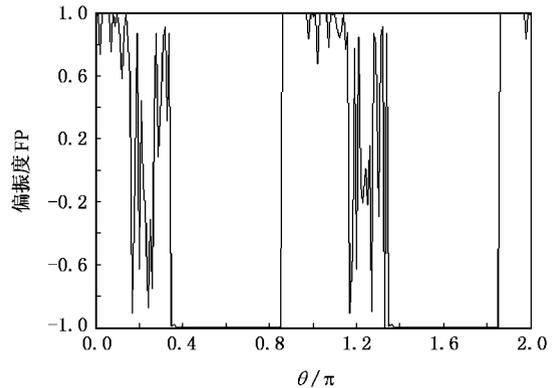


图 2 $k_f = 1.3 \text{ GHz}$, $\mu = 1.1$ 时, 偏振度 FP 随 θ 在 $0-2\pi$ 变化时的关系曲线

通过四阶龙格库塔方法对常微分方程组(7)–(9)进行数值解, 数值模拟所用的参数取值如下: $a = 3$, $k = 300 \text{ GHz}$, $\gamma_s = 50 \text{ GHz}$, $\omega_0 = 2.2176 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ (相应的中心波长为 850 nm), $\gamma_c = 1 \text{ GHz}$, $\gamma_a = -0.1 \text{ GHz}$, $\gamma_p = 6 \text{ GHz}$, $\tau = 2 \text{ ns}$, μ, k_f, θ 为自由选择参数. 图 2 给出了当 $k_f = 1.3 \text{ GHz}$, $\mu = 1.1$ 时, 偏振度 FP 随 θ 在 $0-2\pi$ 变化时的关系曲线, 从图中可以看出, 当 θ 介于 $0-0.35\pi$ 之间, FP 在 -1 到 1 之间呈无规则的变化, 定义为激光器输出正交化 LP 之间相互转换对 θ 的敏感变化区. 具体表现如下: 首先, 当 θ 取值从 0 到 0.17π 时, FP 在 0.6 到 1 之间呈振荡性变化, 这时激光器输出在 \hat{y} 偏振和右旋椭圆

圆偏振之间不断转换,即 \hat{y} 偏振占主导地位,而 \hat{x} 偏振受到严重的抑制.原因如下,偏振器控制的反馈注入量被 \hat{x} 偏振主导,这是因为 \hat{x} 偏振为主导的外部扰动使激光器腔内的 \hat{x} 偏振的增益增大,而 \hat{y} 偏振增益减小,从而导致了 \hat{x} 偏振严重抑制了 \hat{y} 偏振.其次,当 θ 从 0.17π 增加到 0.35π 时,FP 在 -0.92 到 0.86 作无规则变化,这意味着激光器输出在左旋椭圆偏振、圆偏振、右旋椭圆偏振之间不断转换.这种现象作如下解释,反馈注入量中 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振各占能量相当,这样光反馈注入量的相位和振幅各向异性减弱,即各向同性增强,这样激光器 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振增益大小相当,这引起了 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振之间的竞争,因此 θ 微小的扰动都会导致 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振之间相互转换.再者,当 θ 介于 0.35π 和 0.85π 之间时,激光器输出完全被 \hat{y} 偏振主导,称之为 \hat{y} 偏振完全主导区.由于反馈注入量由 \hat{y} 偏振主导,这使激光器腔内 \hat{y} 偏振增益增加,而 \hat{x} 偏振的增益几乎减小到 0,导致了激光器的输出基本上由稳定的 \hat{y} 偏振完全主导.当 θ 大于 0.85π 时,系统完全被 \hat{x} 偏振统治,称之为 \hat{x} 偏振完全统治区.原因如下,反馈注入量又由 \hat{x} 偏振完全主导,激光腔内 \hat{x} 偏振的增益增大, \hat{y} 偏振的增益被抑制,促使激光器输出完全为稳定的 \hat{x} 偏振.最后,当 θ 从 π 增加到 2π 时,FP 的变化轨迹与 θ 介于 0 到 1π 时的轨迹基本相同,这表明 FP 随 θ 的变化呈周期性变化,且周期为 π .

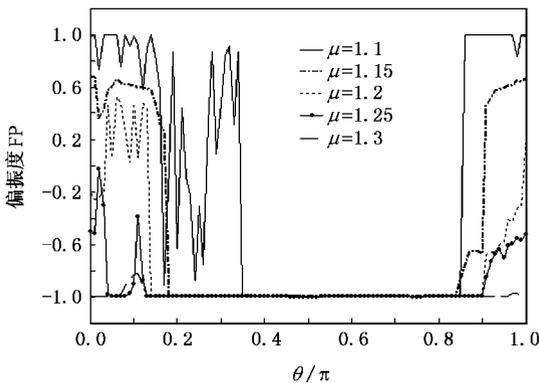


图3 当注入电流值 μ 取不同,其他参数取值与图1一致时,偏振度 FP 在下随 θ 在 $0-\pi$ 变化时的关系曲线

图3给出了 μ 取不同值时,FP 随 θ 在一个周期内变化的关系曲线图,从图中可以看出,随着 μ 值增大,各偏振态的转换对 θ 的敏感区和 \hat{x} 偏振完全统治区逐渐减少, \hat{y} 偏振完全主导区不断增大,当

μ 达到 1.3 时,系统基本上由 \hat{y} 偏振统治,即随着 μ 值逐渐增大,激光器输出偏振态逐步被 \hat{y} 偏振取代,这时系统输出偏振态与 θ 变化无关.

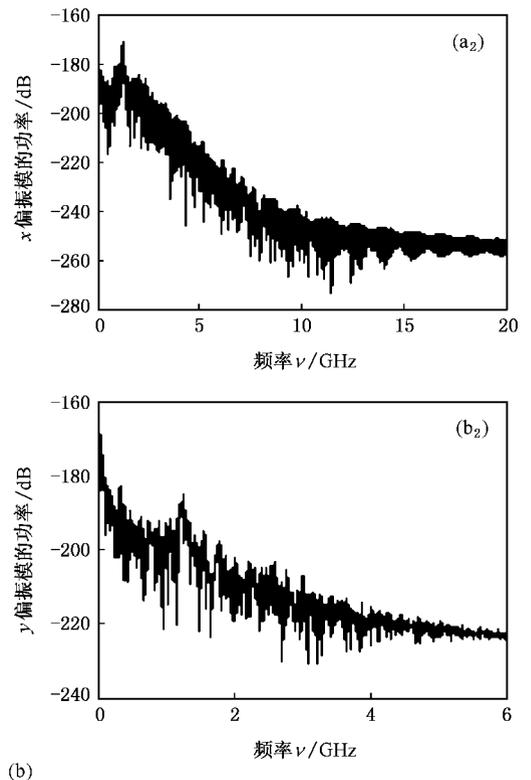
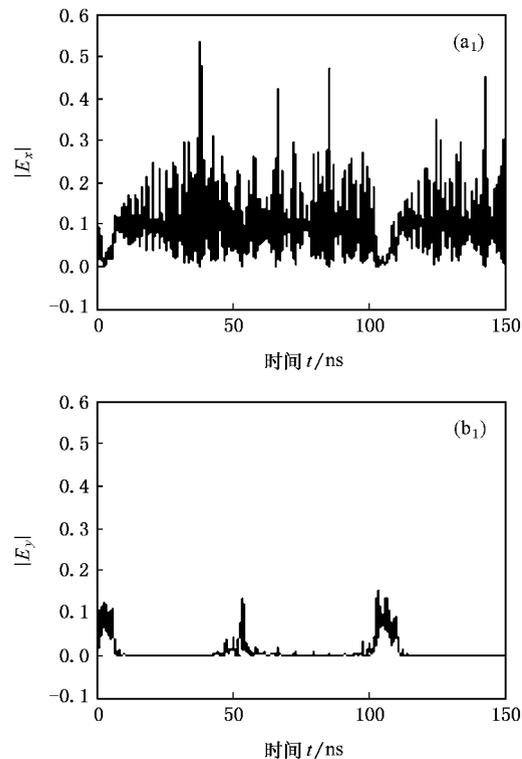
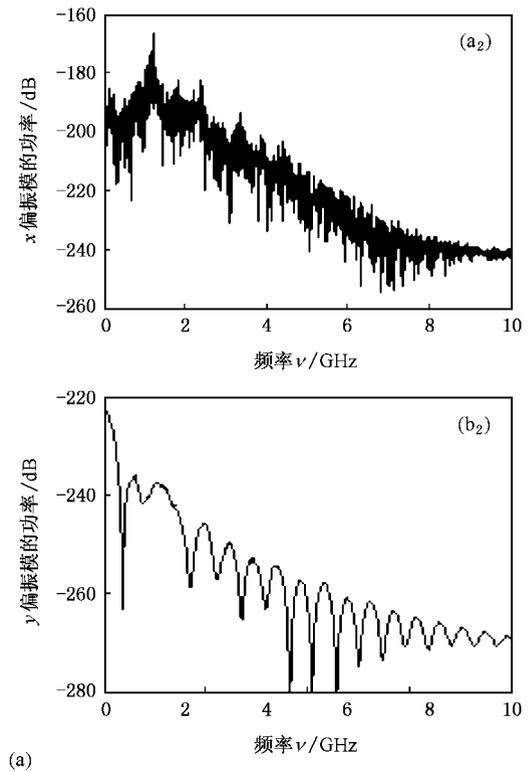
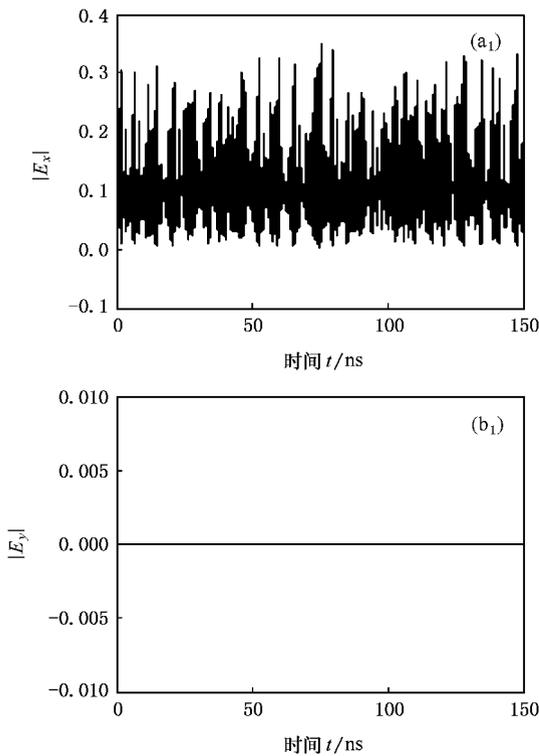
图4给出了 $\mu = 1.1$, $k_f = 1.3$ GHz, θ 分别取 0π (a), $1/6\pi$ (b), $1/4\pi$ (c), $1/2\pi$ (d) 时 VCSEL 输出矢量偏振的动态行为.当 $\theta = 0\pi$ 时,激光器外腔仅有 \hat{x} 偏振模反馈注入,激光器输出偏振态振幅随时间的变化轨迹和对应功率谱如图4(a)所示,从图4(a)中 (a₁) (a₂) (b₁) 和 (b₂) 可以看出 \hat{x} 偏振的振幅的时间轨迹呈混沌变化,而对应的功率谱分布在 0 到 10 GHz,且功率在 -250 dB 到 -170 dB 之间,功率谱分布非常周密且连续.相比较而言, \hat{y} 偏振的振幅的接近 0,而对应功率谱分布较稀疏,其功率在 -280 dB 到 -220 dB 之间.以上表明,激光器输出基本上呈混沌态的 \hat{x} 偏振主导.再从图4(b)可以看出,当 $\theta = 1/6\pi$ 时,反馈注入偏振态为右旋椭圆偏振,则被抑制的 \hat{y} 偏振模开始呈现,而当 θ 进一步增大到 $1/4\pi$ 时,反馈注入偏振态为圆偏振,则 t 介于 0—108 ns 之间对应的 \hat{y} 偏振模占主导地位,而 \hat{x} 偏振受到严重的抑制,而 t 大于 108 ns,激光器的输出仍然被 \hat{x} 偏振统治,见图4(c).这表明 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振之间存在竞争,开始阶段 \hat{y} 偏振占优,后来 \hat{x} 偏振占优.然而 θ 旋转到 $1/2\pi$ 时,激光器外腔仅有 \hat{y} 偏振模反馈注入,这时 \hat{x} 偏振被完全抑制,系统完全被 \hat{y} 偏振模主导.然而, θ 旋转到 π 时,激光输出的偏振转换机制和 $\theta = 0$ 时相同,表明系统输出又被 \hat{x} 偏振完全主导.

以上分析表明,当注入电流接近阈值电流时,旋转 θ 角,使偏振控制器控制的注入两正交化的态偏振态的能量不同,即让 VCSEL 受到外界扰动不同,引起了 VCSEL 腔内的各偏振态增益不同,而导致 VCSEL 输出的偏振态不同.具体表现如下:当反馈注入量被 \hat{x} 偏振主导,那么激光器输出为 \hat{x} 偏振或为 \hat{x} 偏振主导的右旋椭圆偏振;当反馈注入量中 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振的能量相当时,激光器输出偏振态对 θ 角的变化非常敏感;当反馈注入量被 \hat{y} 偏振主导时,激光器输出为 \hat{y} 偏振或为 \hat{y} 偏振主导的左旋椭圆偏振.然而随着注入电流的增大, \hat{y} 偏振模完全主导区不断增大,最后激光器输出完全被 \hat{y} 偏振模主导,这时激光器输出的偏振态与 θ 无关.

图5给出了当 $\mu = 1.1$ 且 θ 取不同值时,偏振度 FP 随反馈系数变化的关系曲线.从图5(a)中可以看出,当 $\theta = 0$ 时,反馈系数 k_f 介于 0 到 0.46 GHz

时,FP 值为 -1 ,即激光器输出为 \hat{y} 偏振.当 $0.46 \text{ GHz} < k_f < 0.97 \text{ GHz}$ 时,FP 值转变为 1 ,这表明激光

器输出由 \hat{y} 偏振转为 \hat{x} 偏振.当 $0.97 \text{ GHz} < k_f < 1.2 \text{ GHz}$ 时,FP 在 -0.16 和 1 之间作无规则变化,激光器



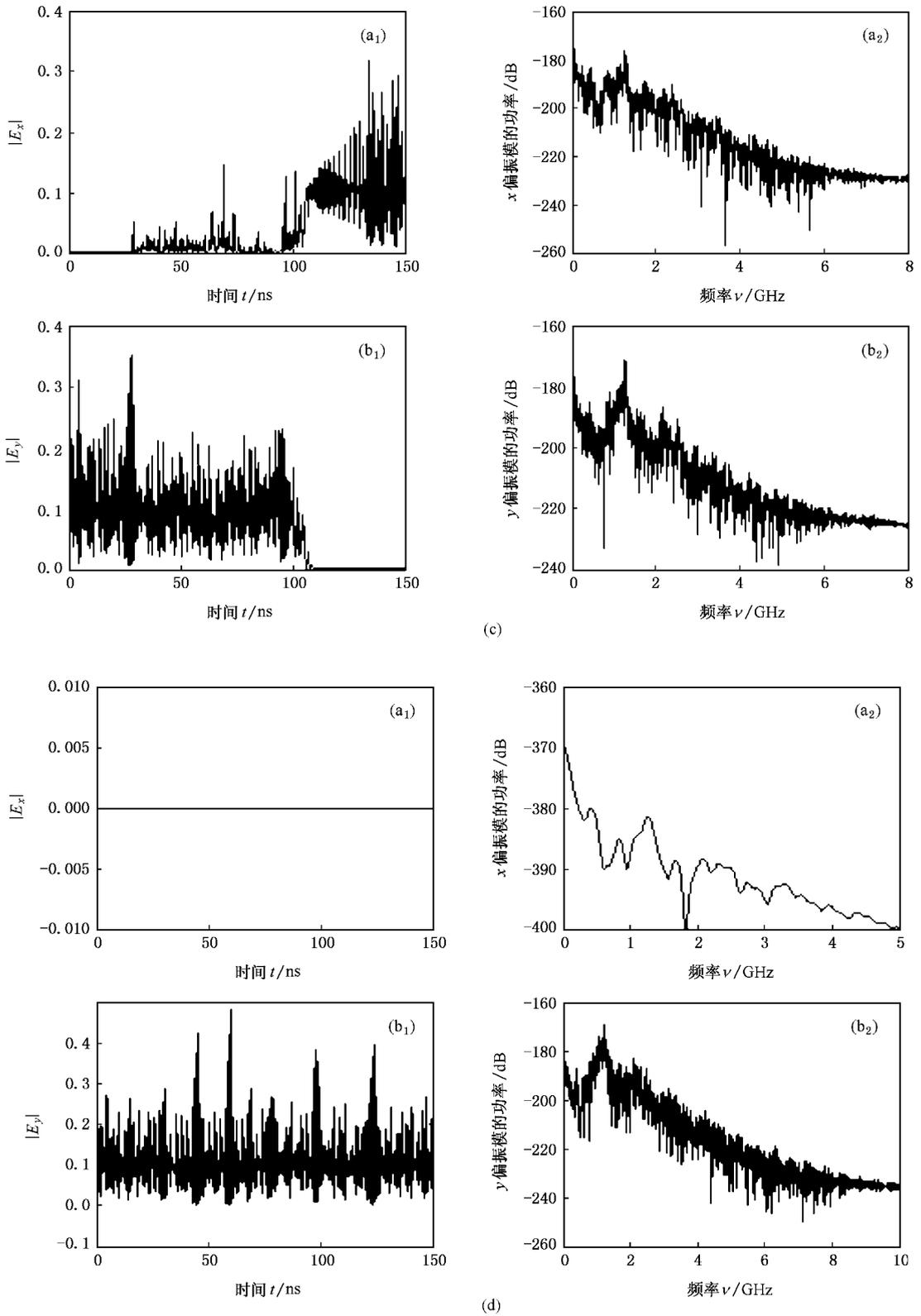


图 4 当 $\mu = 1.1, k_f = 1.3 \text{ GHz}$, θ 分别取 0π 或 π (a); $1/6\pi$ (b); $1/4\pi$ (c); $1/2\pi$ (d) 时 VCSEL 输出矢量偏振的动态行为

输出偏振态在左旋椭圆偏振、圆偏振、右旋椭圆偏振、 \hat{x} 偏振之间不断转换, 即激光器输出偏振态对反馈系数非常敏感. 当 $k_f > 1.2 \text{ GHz}$ 时, FP 在 0.775 和

1 之间振荡变化, 激光器输出被 \hat{x} 偏振主导, 即输出偏振态在右旋椭圆偏振、 \hat{x} 偏振之间转换. 再从图 5 中的 (b) 可以观察到当 $\theta = \pi/6$ 时, k_f 在 0.46 GHz 到

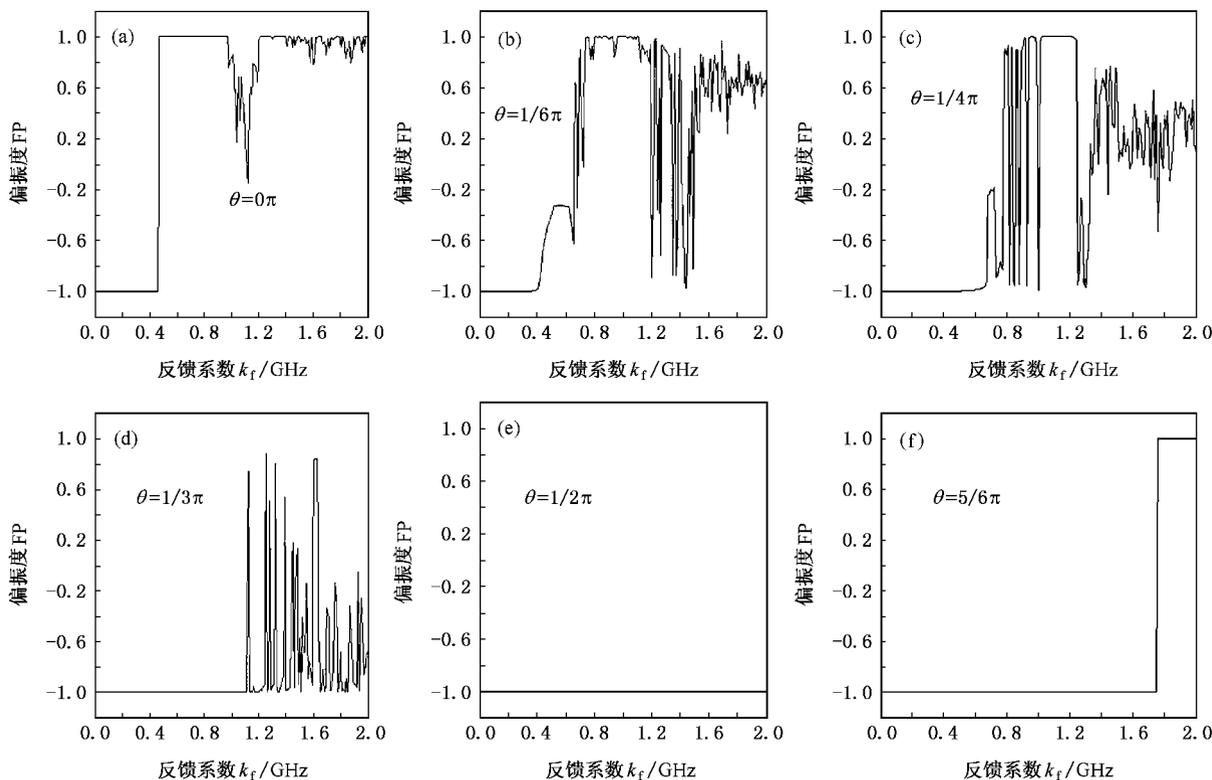


图5 当 $\mu = 1.1$ 且 θ 取不同值时, 偏振度 FP 随反馈系数 k_f 变化的关系曲线

1.19 GHz 范围内引起的 FP 在 -1 和 1 之间也作轻微振荡, 即激光器输出由 \hat{y} 偏振转向左旋椭圆偏振, 再到圆偏振、右旋椭圆偏振, 最后到 \hat{x} 偏振. 而 $k_f > 1.19$ GHz 引起的 FP (介于 -1 — 0.96 之间) 更为剧烈的振荡变化, 这表明激光输出在各种偏振之间不断转换, 即激光器输出偏振态对 k_f 变化非常敏感. 进一步从图 5(c) 可以看出, 当 θ 旋转到 $\pi/4$ 时, FP 等于 1 的 k_f 取值范围扩大到 0 — 0.65 GHz, 而 $k_f > 0.65$ GHz 范围内引起的 FP 在 -1 到 1 之间呈剧烈的无规则变化. 而从图 5(d) 可以观察到, 当 θ 进一步旋转到 $\pi/3$ 时, k_f 取值范围在 0 — 1.11 GHz 引起的 FP 恒等于 1 , 而 $k_f > 1.11$ GHz 范围内引起的 FP 在 -1 到 0.8 之间作振荡变化. 以上表明这意味随着 θ 增加, 激光器输出的偏振态对较大的 k_f 变化非常敏感. 随着 θ 增大到 $\pi/2$, FP 值恒等于 1 , 即激光器输出为稳定的 \hat{y} 偏振. 最后从图 5(e) 可以看出, 当 θ 旋转到 $5/6\pi$ 时且 $k_f > 1.75$ GHz 时, FP 的值由 -1 转为 1 , 即激光器输出由 \hat{y} 偏振转换为 \hat{x} 偏振. 然而 θ 增至 π 时, k_f 引起的 FP 变化曲线轨迹与 θ 等于 0 时一致.

以上分析可知, 当旋转角 θ 等于 0 且反馈系数

较小 k_f 时, 激光输出为稳定的 \hat{y} 偏振, 而 k_f 大于一定的值时, 激光输出的偏振态对 k_f 的变化非常敏感, 即略微改变都能引起激光器输出的偏振态发生改变. 其原因如下, 当 θ 等于 0 时, 由琼斯矩阵 J_L 可知, 反馈注入量为 \hat{x} 偏振, 但是由于 k_f 很小, 反馈注入的 \hat{x} 偏振引起激光器腔内的 \hat{x} 偏振增益很小, 因此在 k_f 较小范围内 \hat{x} 偏振被严重抑制, \hat{y} 偏振占主导地位. 当 k_f 大于一定值时, 反馈注入量的 \hat{x} 偏振的能量增加, 使激光腔内 \hat{x} 偏振增益增大, \hat{y} 偏振增益减小, 从而使激光输出由 \hat{y} 偏振主导转为 \hat{x} 偏振主导. 另外, 结合图 2 可知, θ 介于 0 — 0.35π 时, 激光输出稳定 \hat{y} 偏振的 k_f 取值范围增大, 而较大 k_f 值引起 FP 更加剧烈振荡变化, 特别 θ 旋转到 $\pi/4$ 时, FP 呈最为剧烈的无规则变化. 其原因如下, 当 θ 在 0 — 0.35π 范围内递增时, 反馈注入量中 \hat{y} 偏振能量增加, 虽然 k_f 由 0 开始递增时, 使反馈注入量中的 \hat{x} 偏振能量增加, 但也使反馈注入量中 \hat{y} 偏振能量增加, 因此 θ 越大, 反馈注入量中的 \hat{y} 偏振能量越高, 这需要更大的 k_f 才能使反馈注入量中的 \hat{x} 偏振能量大于或接近 \hat{y} 偏振能量, 从而使激光腔内 \hat{x} 偏振增益大于或接近 \hat{y} 偏振增益, 这样 k_f 越大, \hat{x}

偏振增益和 \hat{y} 偏振的增益之间的竞争越剧烈,导致了激光器输出各种偏振态之间不断相互转换.特别注意的是,当 $\theta = \pi/4$ 且 k_f 大于一定值时,VCSEL 受到各向同性反馈,即反馈注入量中 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振的能量相当,激光腔内 \hat{x} 偏振增益和 \hat{y} 偏振的增益竞争最激烈,引起的激光器输出的各种偏振态之间转换频率最高.然而当 θ 旋转到 $\pi/2$ 时,无论 k_f 取任何值,激光器输出被 \hat{y} 偏振完全统治.这是因为反馈注入量完全由 \hat{y} 偏振主导,这样 \hat{x} 偏振的增益被抑制为 0, \hat{y} 偏振增益值达到最大.

4. 结 论

本文对各向异性光反馈注入光反馈的垂直表面发射激光器的矢量偏振模转换机理进行了数值研究,研究结果表明:首先,当注入电流接近阈值电流

时,由 VCSEL 的外部参数(光反馈系数和外部注入电流)和偏振器控制的光反馈注入量中各偏振态(\hat{x} 和 \hat{y} 偏振)能量决定激光器输出的偏振态.具体表现如下,当反馈注入量中 \hat{x} 偏振占主导时,激光器输出为 \hat{x} 偏振或右旋椭圆偏振.当反馈注入量中 \hat{y} 偏振占主导时,激光器输出为 \hat{y} 偏振或左旋椭圆偏振.当由偏振器控制的反馈注入量中的 \hat{x} 偏振和 \hat{y} 偏振模能量相当时,引起 \hat{x} 偏振模和 \hat{y} 偏振模之间竞争激烈,而激光器外部微小的扰动都会打破这两种偏振模竞争平衡,从而使激光器输出偏振态对外部参数变化非常敏感.其次,其他参数固定时,由偏振器控制各向异性光反馈注入引起的 VCSEL 输出偏振态呈周期性变化.最后,当注入电流远大于阈值电流时, \hat{y} 偏振模增益获得足够大,激光器输出为稳定的 \hat{y} 偏振,这时激光器的输出与其他参数无关.

-
- [1] Miguel M S , Feng Q , Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [2] Loiko Y V , Kulminskii A M , Voitovich A P 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1841
- [3] Besnard P , Chares M L , Stephan G M 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 1059
- [4] 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]
- [5] Masoller C , Abraham N B 1999 *Phys. Rev. A* **59** 3021
- [6] Hong Y , Spencer P S , Rees P , Shore K A 2002 *IEEE J Quantum Electron.* **38** 274
- [7] Giudici M , Balle S , Ackemann T , Barland S 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 2114
- [8] Zhang W L 2007 *Chin. Phys.* **16** 1996
- [9] Besnard P , Robert F , Chares M L , Stephan G M 1997 *Phys. Rev. A* **56** 3191
- [10] Gao Z H , Guo S J 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1605 (in Chinese) 高致慧、过巴吉 1994 物理学报 **43** 1605]
- [11] Vicente R , Mulet J , Mirasso C R 2006 *Semiconductor Lasers and Laser Dynamics II , proceedings of the SPIE* **6184** 6184131

Vector polarization mode switch mechanism of the vertical-cavity surface-emitting laser with anisotropic optical feedback injection^{*}

Zhong Dong-Zhou^{1)†} Cao Wen-Hua¹⁾ Wu Zheng-Mao²⁾ Xia Guang-Qiong²⁾

¹ *School of Informatics, Wuyi University, Jiangmen 529020, China*

² *School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China*

(Received 17 May 2007; revised manuscript received 14 June 2007)

Abstract

Vector polarization mode switch mechanism of the vertical-cavity surface-emitting laser with anisotropic optical injection is numerically investigated. The results are as follows: First, when the injection current is near the threshold current, the polarization state of the VCSEL output is determined by the power of each polarization mode of the optical feedback injection, which is controlled by the external parameter of the VCSEL and the polarizer. Second, the polarization state of the VCSEL output induced by anisotropic optical feedback injection under the control of polarizer changes periodically. Third, the \hat{x} -polarization mode competes drastically with the \hat{y} -polarization mode when the power of the \hat{x} -polarization of the feedback injection is equivalent to that of the \hat{y} -polarization, which induces slight external disturbance of the laser to break the balance of two competing polarization modes. So, on this condition, the polarization state is sensitive to the external parameter change. At last, the \hat{y} -polarization mode obtains enough big gain when the injection current is much higher above the threshold current. At this time, the output of the VCSEL is in steady \hat{y} -polarization mode. In other words, the polarization state of the VCSEL output is now independent of other parameters.

Keywords : anisotropy optical feedback, vertical-cavity surface-emitting laser, vector polarization mode

PACC : 0760F, 4260B, 4265T

^{*} Project supported by the Wuyi University Research Grant and the Natural Science Foundation of Chongqing City (Grant Nos. 2006BB2331 and 2005BB3099).

[†] E-Mail : dream-yu2002@126.com