

基于偏振旋转光反馈下的外光注入 VCSEL 产生高性能毫米波*

陈兴华¹⁾ 林晓东¹⁾ 吴正茂¹⁾ 樊利¹⁾ 曹体¹⁾ 夏光琼^{1)2)†}

1) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2) (东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

(2011 年 7 月 20 日收到; 2011 年 8 月 29 日收到修改稿)

本文提出一种基于偏振旋转光反馈下的外光注入垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 产生高性能毫米波的方案, 并利用描述外部扰动下 VCSEL 动态特性的自旋反转模型 (SFM), 对所产生的毫米波的特性进行了数值研究. 研究表明: 一个受到主 VCSEL (M-VCSEL) 光注入的副 VCSEL (S-VCSEL) 在一定条件下可以产生单周期 (P1) 振荡, 即在光波上调制了一个微波信号. 通过调节外光注入强度 ξ_i 以及 S-VCSEL 与 M-VCSEL 之间频率失谐 $\Delta\nu$, 可以获得频率在 30—60 GHz 范围内连续可调的毫米波信号. 在外光注入 VCSEL 中引入偏振旋转光反馈, 通过选取合适的反馈强度 ξ_f 以及反馈延迟时间 τ , 产生的毫米波信号的线宽可以得到明显窄化. 对于光注入 S-VCSEL 所产生的线宽为 5.509 MHz 的毫米波, 在引入偏振旋转光反馈后, 毫米波线宽可以降低到 230.2 kHz. 本文的研究对高速光载无线 (RoF) 系统中优质毫米波信号的获取具有一定的参考意义.

关键词: 光注入 VCSELs, 毫米波, 偏振旋转光反馈, 线宽

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

1 引言

光载无线 (Radio-over-Fiber, RoF) 技术在 1990 年由 Cooper 首先提出^[1], 它将有线 (光纤) 通信和无线 (微波) 通信相结合, 利用光波来搭载微波/毫米波等无线电信号并在光纤链路中进行传输. 由于它将宽带无线通信的可移动性、点对多点接入等特点与光纤通信的超宽带、高可靠性有机结合起来, 为大容量、低成本的无线电信号有线传输和超过 1 Gbit/s 的超宽带无线接入提供了理想的解决方案, 已成为第四代宽带综合通信系统设计中的关键技术, 近年来正受到各国的高度关注^[2-6]. 显然, 高性能微波/毫米波的获取对 RoF 系统而言至关重要, 其中利用光学的手段和方法产生微波/毫米波 (即光生微波/毫米波技术) 近年来倍受关注. 在过去的十几年中, 人们提出了许多不同的光生毫米波方法,

其中包括直接电流调制、自脉动和锁模激光器、光外差、光锁相环、双模激光器以及光注入半导体激光器的单周期 (P1) 振荡等^[7-14]. 其中, 基于光注入半导体激光器的单周期 (P1) 振荡产生毫米波由于具有的一些独特的优势而受到相关学者的关注. 首先, 采用这种方法产生的微波频率能够在弛豫振荡频率 3—4 倍以上的范围以内连续可调, 其最高可达到 100 GHz^[15]. 其次, 该方法产生的微波频率容易通过注入锁定、位相锁定等方法进行稳定^[13,16]. 此外, 该方法产生的光谱在一定条件下能够呈现出单边带 (SSB) 的特征, 这有助于解决 RoF 系统中由于光纤色散引起的微波功率罚^[17].

目前利用光注入半导体激光器 P1 态产生毫米波的研究大多基于边发射激光器 (EEL)^[18-20], 而针对近年来蓬勃发展的垂直腔表面发射激光器 (VCSEL), 这方面的研究还非常缺乏. 由于 VC-

* 国家自然科学基金 (批准号: 60978003, 61078003, 61178011), 重庆市自然科学基金 (批准号: CSTC2011jjA40035, CSTC2012jjB40011), 西南大学中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: XDJK2010C019, XDJK2009B010) 和毫米波国家重点实验室开放课题 (批准号: K201109) 资助的课题.

† E-mail: gqxia@swu.edu.cn

SEL 具有低阈值电流、大调制带宽、易与光纤耦合、易集成形成激光阵列、制作成本低廉等优势 [21–25], 将有望取代 EEL 成为未来光通信和光信号处理的关键器件. 并且与 EEL 相比, 利用光注入 VCSELs 的 P1 态产生毫米波信号具有如下一些独特的优点: 首先, 由于 VCSELs 能够同时输出两个正交 (X 模和 Y 模 [22]) 的偏振光 [26], 因此可以同时产生两个光生毫米波信号, 可用于高速双信道通信系统; 其次, 初步的研究表明, 无论是 X 模还是 Y 模, 其单周期振荡态光谱都始终具有 SSB 的特征 [27], 而基于 EEL 的方法则需要适当地调节注入参数才能使其输出光谱呈现出 SSB 的特征. 因此, 利用光注入 VCSEL 产生毫米波信号将更具应用前景. 虽然文献 [27] 对光注入 VCSEL 产生毫米波的特性进行了研究, 但主要着眼于所产生的毫米波信号的频率随光注入强度以及主副激光器的频率失谐的变化规律, 并未涉及所产生的毫米波的线宽. 根据我们的初步研究发现, 利用该方法产生的毫米波线宽相对较大, 通常在 MHz 以上, 这无法满足某些领域的应用要求. 虽然利用目前所采用的一些微波线宽窄化的方法, 如光注入锁定 [10]、光锁相环 [16]、光电反馈 [28] 等可以对微波线宽进行一定程度的压缩, 但这些方法通常都需要一个高质量的外部微波源或者高速光电转换器件, 这既增加了系统的复杂程度又提高了系统成本.

基于上述原因, 本文提出了一种基于全光的方法获得频率可调的高频、窄线宽毫米波信号的方案. 该方案基于光注入 VCSEL 呈现的单周期振荡产生频率可调的高频毫米波, 通过引入偏振旋转光反馈对毫米波线宽进行窄化, 从而获得高性能的毫米波信号. 由于该方案无需额外的、昂贵的高频电子元件, 因此, 有利于缩小系统尺寸、降低系统成本.

2 理论模型

系统结构示意图如图 1 所示, 主激光器 (M-VCSEL) 输出光通过光隔离器 OI 和可调衰减器 NDF1 单向注入到副激光器 (S-VCSEL) 中, 其中 OI 保证光的单向传输, NDF1 用于调节光注入强度. S-VCSEL 的输出经分束器 BS₁ 分成两束, 其中一束通过一个 $\lambda/4$ 波片、一个衰减片 NDF₂, 和一个平面镜 M₂ 构成一个偏振旋转光反馈回路. 而另一束则通过 BS₂ 和 OI₂ 后作为光毫米波的输出. 如

果要得到毫米波输出, 则需要附加一个高速的光电探测器.

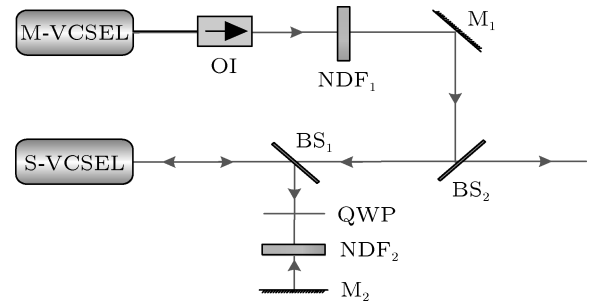


图 1 偏振旋转光反馈下外光注入 VCSEL 产生毫米波的系统结构示意图 (其中 OI 为光隔离器, QWP 为四分之一波片, NDF 为衰减片, BS 为分束器, M 为平面镜)

基于自旋反转模型 (SFM) [29], 描述系统中 M-VCSEL 和 S-VCSEL 的动力学特性的速率方程为

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x,y}^m &= \kappa(1 + i\alpha)(N^m E_{x,y}^m \pm i n^m E_{y,x}^m - E_{x,y}^m) \\ &\quad \mp (i\gamma_p + \gamma_a) E_{x,y}^m + F_{x,y}^m, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x,y}^s &= \kappa(1 + i\alpha)(N^s E_{x,y}^s \pm i n^s E_{y,x}^s - E_{x,y}^s) \\ &\quad \mp (i\gamma_p + \gamma_a) E_{x,y}^s + \xi_i E_{x,y}^m(t - \tau_c) \\ &\quad \times \exp[-i2\pi(\nu^m \tau_c - \Delta\nu t)] + \xi_f E_{y,x}^s(t - \tau) \\ &\quad \times \exp(-i2\pi\nu^s \tau) + F_{x,y}^s, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{N}^{m,s} &= -\gamma \left[N^{m,s} (1 + |E_x^{m,s}|^2 + |E_y^{m,s}|^2) \right. \\ &\quad \left. - \mu + i n^{m,s} (E_y^{m,s} E_x^{m,s*} - E_x^{m,s} E_y^{m,s*}) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{n}^{m,s} &= -\gamma_s n^{m,s} - \gamma \left[n^{m,s} (|E_x^{m,s}|^2 + |E_y^{m,s}|^2) \right. \\ &\quad \left. + i N^{m,s} (E_y^{m,s} E_x^{m,s*} - E_x^{m,s} E_y^{m,s*}) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 上标 m 与 s 分别代表 M-VCSEL 和 S-VCSEL, 下标 x 与 y 分别表示 VCSELs 的 X 和 Y 偏振模. E 表示光场的慢变振幅, N 表示导带和价带之间总的载流子密度, n 表示自旋向上和自旋向下能级对应的载流子密度之差, κ 为光子衰减率, α 为线宽增强因子, γ 为总载流子的衰减速率, γ_s 为自旋反转速率, γ_a 为线性色散效应, γ_p 为有源介质双折射效应, μ 为归一化的注入电流, ν 为激光器谐振腔频率, $\Delta\nu (= \nu^m - \nu^s, \nu^m, \nu^s$ 分别为主、副激光器自由运行时的频率) 为两个激光器之间的频率失谐. τ_c 表示从 M-VCSEL 到 S-VCSEL 的注入延迟时间, τ 为 S-VCSEL 的反馈延迟时间, ξ_i 和 ξ_f 分别表示

注入系数和反馈系数, F 为朗之万噪声源:

$$F_x^{m,s} = \sqrt{\beta_{sp}/2} \left(\sqrt{N^{m,s} + n^{m,s}} \xi_1^{m,s} + \sqrt{N^{m,s} - n^{m,s}} \xi_2^{m,s} \right), \quad (5)$$

$$F_y^{m,s} = -i \sqrt{\beta_{sp}/2} \left(\sqrt{N^{m,s} + n^{m,s}} \xi_1^{m,s} - \sqrt{N^{m,s} - n^{m,s}} \xi_2^{m,s} \right), \quad (6)$$

其中, β_{sp} 是自发辐射速率, ξ_1, ξ_2 为高斯白噪声, 其平均值为 0, 方差为 1.

3 结果与讨论

我们利用四阶龙格库塔法对速率方程 (1)—(4) 进行数值求解, 模拟所用参数取值如下: $\kappa = 300 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 3.5$, $\gamma = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 50 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 6 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = 0.1 \text{ ns}^{-1}$, $\tau_c = 3 \text{ ns}$, $\mu = 1.3$, $\beta_{sp} = 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$, $\nu = 193.5 \text{ THz}$ (相对应激光中心波长为 1550 nm).

3.1 光注入 VCSEL

我们首先分析只有外光注入到 VCSEL 时, 注

入强度和频率失谐对光生毫米波信号频率的影响. 图 2 给出了在固定频率失谐为 $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$ 时, 不同注入强度下的 S-VCSEL 输出光谱图. 左、右两列分别表示 X, Y 偏振模, 图中的横坐标为相对于自由运行 S-VCSEL 的频率偏差, 纵坐标为对 S-VCSEL 稳态输出功率进行归一化后的功率. 从图中可以看出, 当注入强度较大时 ($\xi_i = 205 \text{ ns}^{-1}$), 系统处于注入锁定状态, 其输出光谱被锁定在 M-VCSEL 的光谱处 (如图 2(a), (b) 所示). 随着注入强度 ξ_i 减小到 150 ns^{-1} 时, S-VCSEL 的输出光谱出现两个成分, 分别为 M-VCSEL 和 S-VCSEL 的光谱成分, 但其中 S-VCSEL 的腔谐振频率由于增益饱和效应导致介质折射率增加而发生红移, 此时其处于 P1 振荡态, 光生毫米波的频率即为二者频率之差 $\nu_0 = \nu_i - \nu_c = 30.63 \text{ GHz}$ (如图 2(c), (d) 所示). 当注入强度 ξ_i 进一步减小到 100 ns^{-1} 时, 红移效应减弱, 因而其光生毫米波信号的频率减小到 $\nu_0 = 30.28 \text{ GHz}$ (如图 2(e), (f) 所示). 研究表明, 当注入强度进一步减弱时, S-VCSEL 的输出将从非稳定注入锁定的 P1 态进入到非注入锁定的四波混频 (FWM) 状态^[30,31], 其光信号强度变化的频率为两个激光器自由运行频率之差. 从图中的结果可以

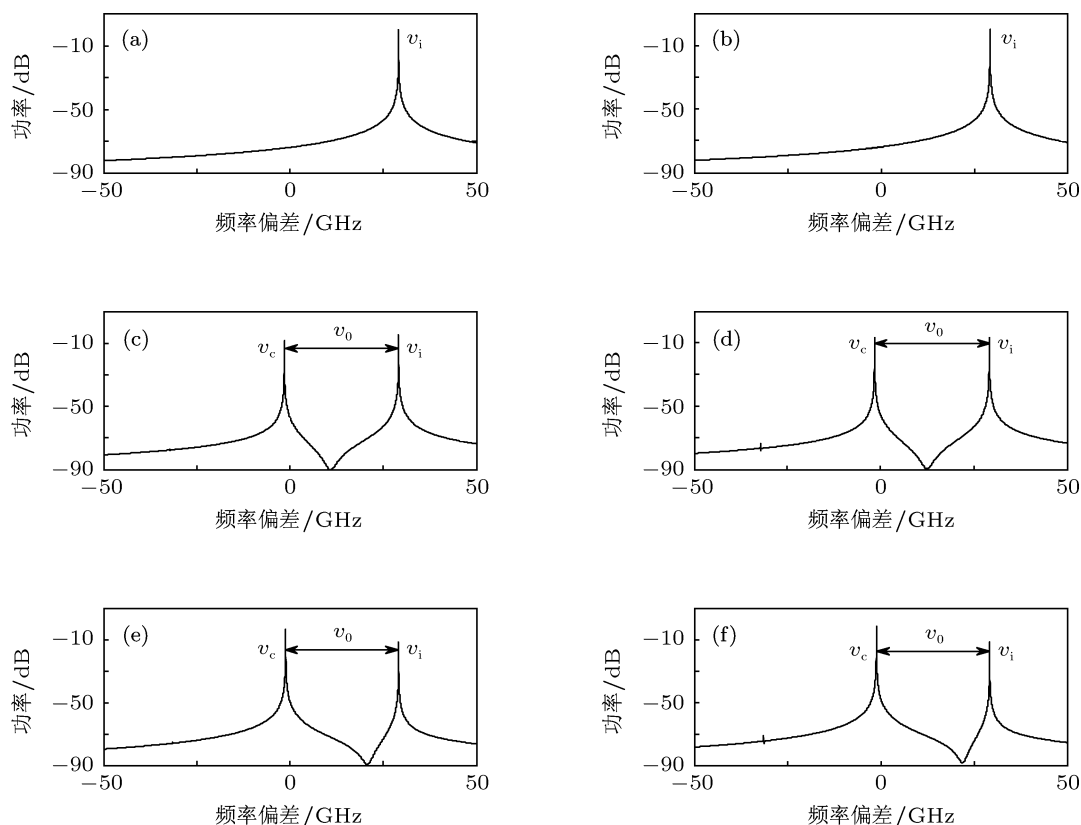


图 2 $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$ 时不同注入强度下 S-VCSEL 的光谱, (其中左右两列分别表示 X 和 Y 偏振模) (a) 和 (b): $\xi_i = 205 \text{ ns}^{-1}$; (c) 和 (d): $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$; (e) 和 (f): $\xi_i = 100 \text{ ns}^{-1}$

看出, 在一定的注入条件下, VCSEL 能够产生 P1 振荡, 且其频率在一定范围内随注入强度连续变化 (注入强度越大, P1 振荡频率越高). 因此, 通过调节光注入强度可以获得频率大范围内连续可调的毫米波信号. 此外, 我们还可以看出光注入 VCSELs 的 P1 振荡态, 无论是 X 偏振模还是 Y 偏振模, 其光谱都天然地具有 SSB 特征, 这有利于消除 RoF 系统中由于光纤色散引起的功率罚. 而对于 EEL 的 P1 态, 则需要通过适当调节注入强度来获得 SSB 特性, 因此外光注入 VCSELs 可望为 RoF 系统提供优质的光生毫米波信号源.

图 3 给出了注入强度 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同

频率失谐下 S-VCSEL 输出的光谱图, 图中纵坐标为对 S-VCSEL 稳态输出功率进行归一化后的功率. 可以看出, 当频率失谐量为 30 GHz 时, P1 振荡产生的光生毫米波频率为 $\nu_0 = \nu_i - \nu_c = 30.63 \text{ GHz}$ (如图 3(a), (b) 所示). 当频率失谐量增大到 40 GHz 时, 光生毫米波的频率增大为 40.255 GHz (如图 3(c), (d) 所示). 当频率失谐进一步增大到 50 GHz 时, 光生毫米波的频率为 50.13 GHz (如图 3(e), (f) 所示). 因此在光注入 VCSELs 系统中, 我们还可以通过调节主副激光器之间的频率失谐来获得频率大范围内连续可调的光生毫米波信号, 且 X, Y 偏振模具有相似的规律.

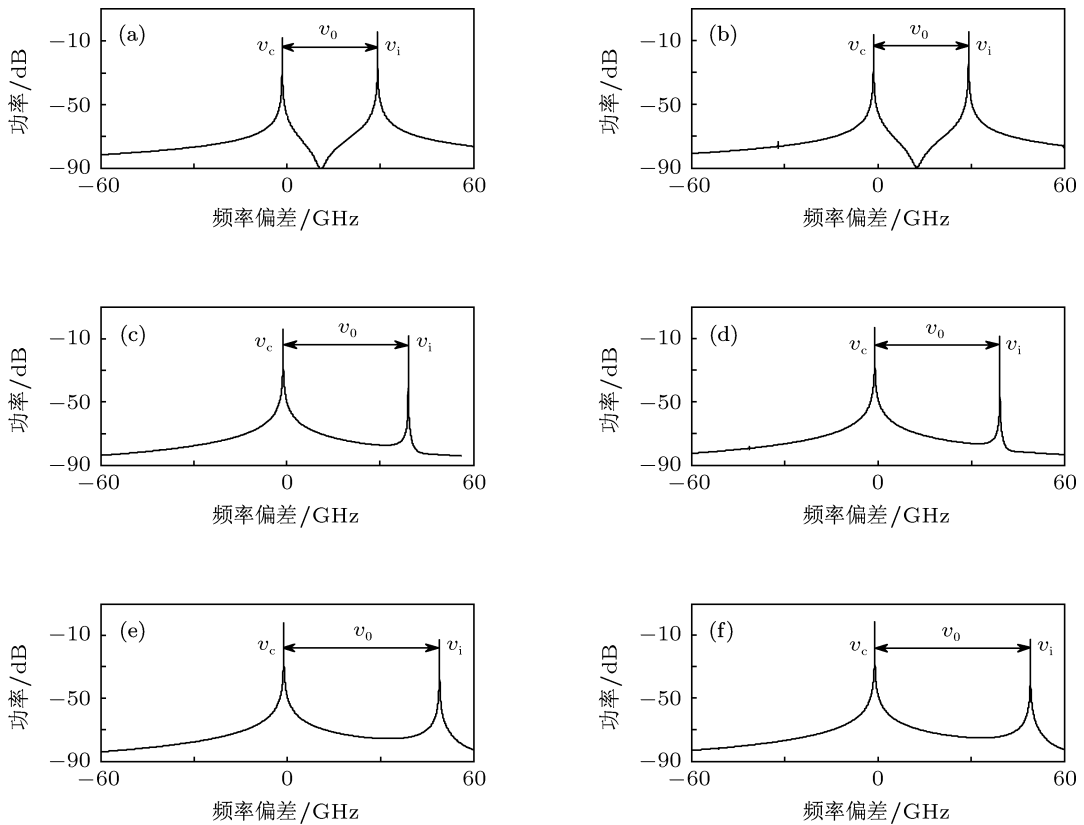
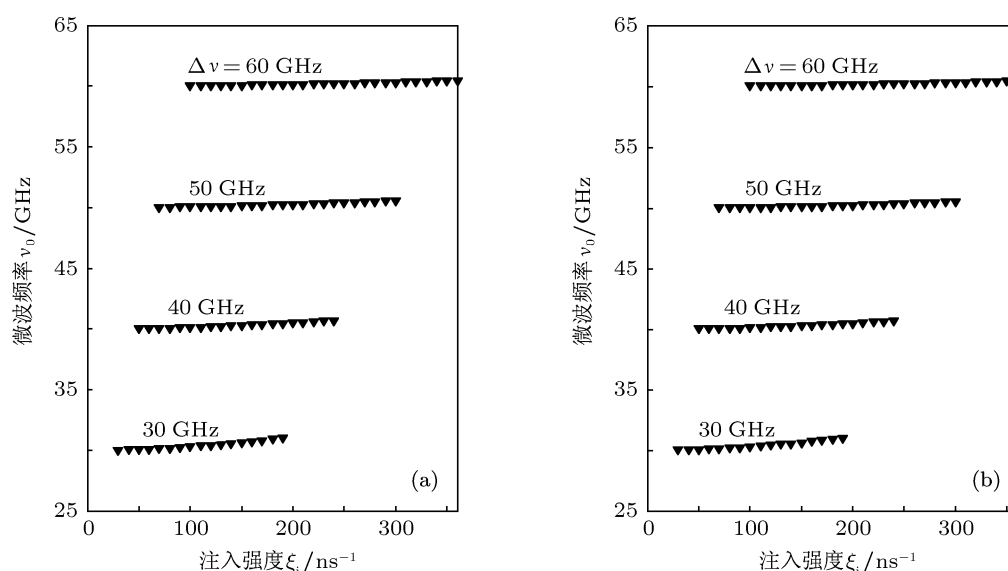


图 3 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$ 时不同频率失谐下 S-VCSEL 的光谱 (其中左右两列分别表示 X 和 Y 偏振模) (a) 和 (b): $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$; (c) 和 (d): $\Delta\nu = 40 \text{ GHz}$; (e) 和 (f): $\Delta\nu = 50 \text{ GHz}$

图 4 为不同频率失谐下, S-VCSEL 产生的光生毫米波频率 ν_0 与注入强度 ξ_i 的关系图. 从图中可以看出, 对于某一确定的频率失谐, 毫米波频率在一定范围内会随注入强度的增加而增加. 这是因为在光注入强度增加时增益饱和效应也增强, 反导引效应使折射率增大, 导致腔谐振频率红移量增大, 从而使光生毫米波频率增大. 此外, 在频率失谐比较小时如 $\Delta\nu = 30, 40 \text{ GHz}$ 时, 毫米波频率

受注入强度影响较为明显, 而随着频率失谐的增大, 如 $\Delta\nu = 50, 60 \text{ GHz}$ 时, 这种影响就逐渐减小. 这是由于随着频率失谐增大, 反导引效应减弱, 注入强度对毫米波频率影响相应减弱. 另外, 需要指出的是: 对于某一特定的频率失谐, 注入量过大会使 S-VCSEL 进入注入锁定态, 而注入量过小将进入四波混频状态, 因此图中每条曲线都只适用于注入强度在一定范围内变化的情形.


 图4 毫米波频率 ν_0 随频率失谐 $\Delta\nu$ 、注入强度 ξ_i 的变化 (a), (b) 分别代表 X 和 Y 偏振模

3.2 偏振旋转光反馈下的光注入 VCSEL

上述研究表明 VCSEL 在外光注入下可呈现周期 (P1) 态, 但是由此获得的毫米波信号线宽通常达到了 MHz 量级, 这无法满足许多应用领域对毫米波信号线宽的要求, 因此需要考虑对线宽进行窄化处理. 本文中我们提出通过引入偏振旋转光反馈对光生毫米波信号线宽进行压缩, 而线宽我们采用功率分布的标准偏差来标定^[28]. 其计算公式如下所示:

$$\langle \nu^p \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \nu^p P(\nu)^2 d\nu}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\nu) d\nu}, \quad (7)$$

$$\Delta f = \left[\langle \nu^2 \rangle - \langle \nu \rangle^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

其中, Δf 表示毫米波的线宽, $P(\nu)$ 表示激光器输出的功率分布, ν 表示频率.

图 5 给出了当 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$, $\tau = 3.5 \text{ ns}$ 时, 不同反馈强度下光生毫米波信号的功率谱图. 左、右两列分别代表 X, Y 偏振模, 图中的横坐标为相对于光生毫米波频率的频率偏差, 纵坐标为对 S-VCSEL 稳态输出功率进行归一化后的功率. 从图中可以看出, 在没有光反馈 ($\xi_f = 0 \text{ ns}^{-1}$) 时, 光注入 VCSEL 产生的毫米波信号的线宽 Δf 为 5.509 MHz (如图 5(a), (b) 所示). 当反馈强度为 $\xi_f = 0.09 \text{ ns}^{-1}$ 时, 毫米波信号线宽

被压缩至 3.296 MHz (如图 5(c), (d) 所示). 而当反馈强度进一步增大到 $\xi_f = 0.108 \text{ ns}^{-1}$ 时, 毫米波信号线宽被进一步压缩至 293.2 kHz. 由此可知, 对外光注入下的 S-VCSEL, 在引入偏振旋转光反馈后, 可以使得光生毫米波信号的线宽在一定范围内获得较明显的压缩.

为了更加全面地了解偏振旋转光反馈的引入对光注入 S-VCSEL 产生的毫米波信号线宽 Δf 的影响, 我们将进一步详细分析光生毫米波线宽 Δf 随反馈强度 ξ_f 及反馈延迟时间 τ 的变化规律. 图 6 为 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$, $\tau = 3.5 \text{ ns}$ 时, 光生毫米波线宽 Δf 随反馈强度 ξ_f 变化的关系图, 图中 (a), (b) 分别代表 X, Y 偏振模. 为了保证 S-VCSEL 输出始终保持 P1 振荡态, 因此我们所加的反馈强度必须足够小, 在这里只研究反馈强度 ξ_f 从 0 ns^{-1} 增大到 0.3 ns^{-1} 的情形. 从图中可以看出, 当反馈强度在从 0 ns^{-1} 增加到 0.05 ns^{-1} 的过程中, 光生毫米波的线宽没有明显的变化; 随着反馈强度的进一步增大, 光生毫米波线宽随反馈强度的增加呈现振荡, 且振荡的周期越来越小, X 和 Y 两偏振模的情况大致相同. 当反馈强度增大到 0.3 ns^{-1} 以上时, 此时 S-VCSEL 的输出状态不再为 P1 振荡态. 仔细观察该图可以看出: 在注入参数 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$, 以及反馈延迟时间 $\tau = 3.5 \text{ ns}$ 的情况下, 当反馈强度为 $\xi_f = 0.17 \text{ ns}^{-1}$ 时可以把毫米波信号线宽从无反馈时的 5.509 MHz 压缩至 230.2 kHz.

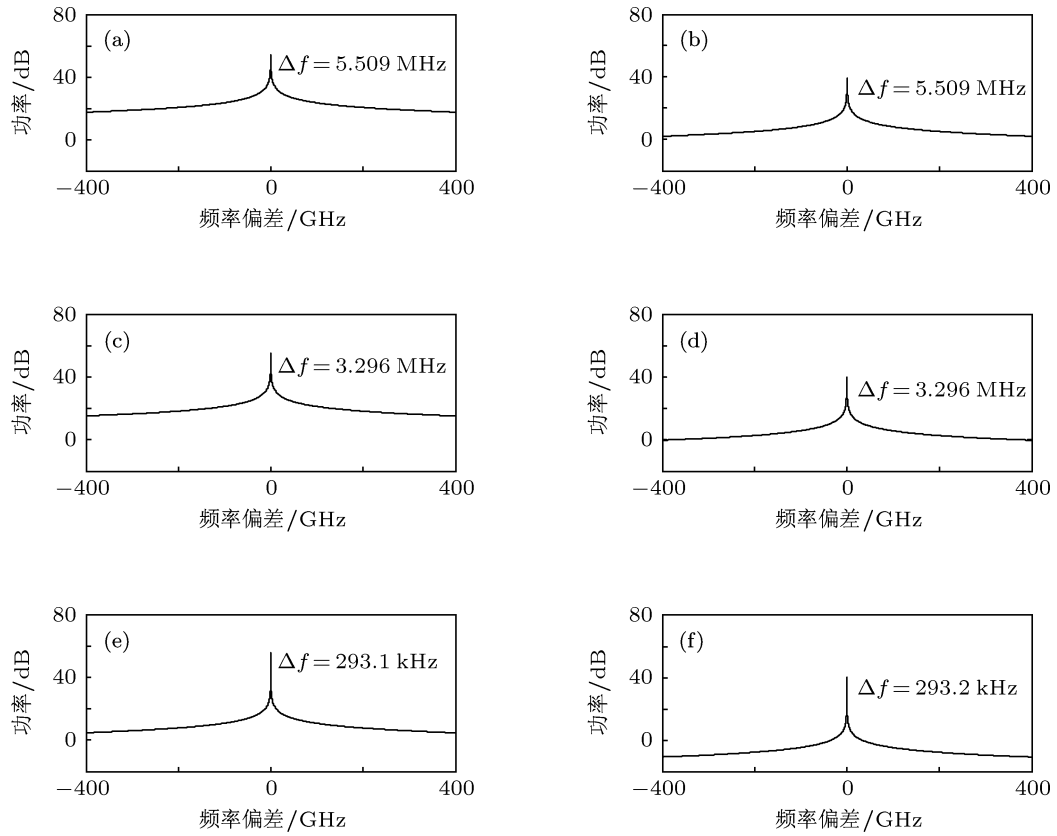


图5 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$, $\tau = 3.5 \text{ ns}$ 时, 不同反馈强度下 S-VCSEL 的功率谱 (其中左右两列分别表示 X, Y 偏振模) (a) 和 (b) $\xi_f = 0 \text{ ns}^{-1}$; (c) 和 (d) $\xi_f = 0.09 \text{ ns}^{-1}$; (e) 和 (f) $\xi_f = 0.108 \text{ ns}^{-1}$

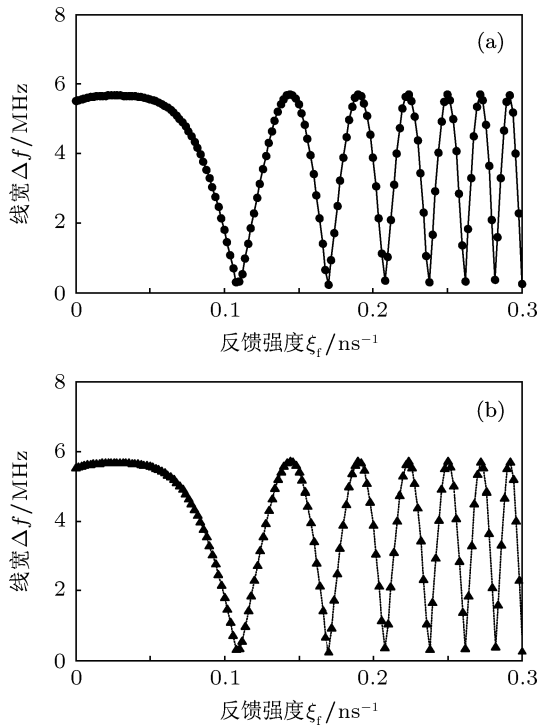


图6 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$, $\tau = 3.5 \text{ ns}$ 时, 光生毫米波信号线宽 Δf 随反馈强度 ξ_f 变化曲线 (a) 和 (b) 分别表示 X, Y 偏振模

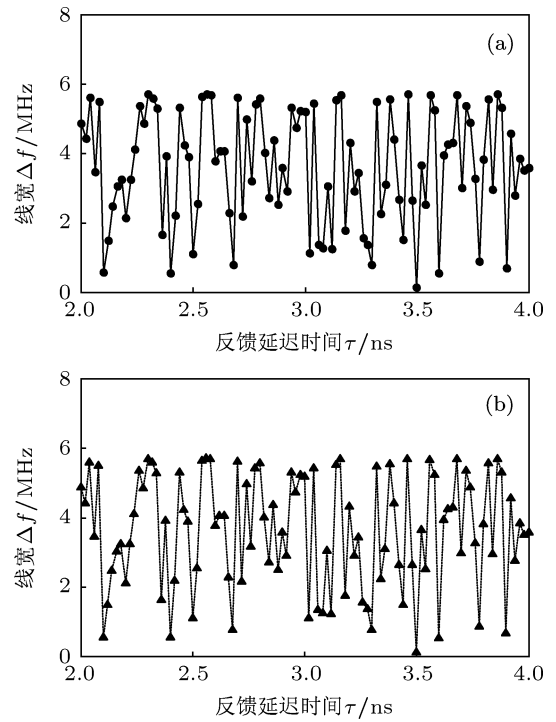


图7 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$, $\xi_f = 0.17 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$ 时, 光生毫米波信号线宽 Δf 随反馈延迟时间 τ 变化曲线 (a) 和 (b) 分别表示 X, Y 偏振模

图 7 给出了在 $\xi_i = 150 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\nu = 30 \text{ GHz}$, $\xi_f = 0.17 \text{ ns}^{-1}$ 时, 光生毫米波线宽 Δf 随反馈延迟时间 τ 的变化关系. 从图中可以看到毫米波线宽对反馈时间的变化非常敏感, 因此反馈时间需要精细控制.

4 结论

本文提出了一种基于 VCSELs 采用全光手段获得高性能毫米波的方案, 并采用描述 VCSELs 在外部扰动下的 SFM 模型, 理论研究了所产生的毫米波的性能. 研究表明; 采用单一的外部光注

入, 通过调节注入强度 ξ_i 和频率失谐 $\Delta\nu$, 可获得频率在 30—60 GHz 内大范围连续可调、具有 SSB 特性的毫米波信号. 额外引入偏振旋转光反馈后, 所产生的毫米波信号线宽随反馈强度 ξ_f 的增加呈现振荡周期越来越小的振荡, 同时毫米波线宽对反馈延迟时间 τ 的变化非常敏感. 通过选择合适的反馈参量, 可以使得光生毫米波信号从无反馈时的 5.509 MHz 压窄到 230.2 kHz. 由于本文采用的毫米波产生以及线宽压缩均基于全光手段, 具有结构简单、紧凑, 成本低廉等优势, 因此可望在高速 RoF 系统中获得应用.

- [1] Cooper A J 1990 *Electron. Lett.* **26** 2054
- [2] Capmany J, Novak D 2007 *Nature Photon.* **1** 319
- [3] Kim A, Joo Y H, Kim Y 2004 *IEEE Trans. Consumer Electron.* **50** 517
- [4] Guennec Y L, Maury G, Yao J P, Cabon B 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 1277
- [5] Davide D, Giovanni T, Pier F, Luigi T 2011 *Optics Commun.* **284** 2751
- [6] Lin C T, Chen J, Shih P T 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 2296
- [7] Kjebon O, Schatz R, Lourdudoss S, Nilsson S, StAlnacke B, Backbom L 1997 *Electron. Lett.* **33** 488
- [8] Novak D, Ahmed Z, Waterhouse R B, Tucker R S 1995 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **43** 2257
- [9] Derickson D J, Helkey R J, Mar A, Wasserbauer J G, Wey Y G, Bowers J E 1992 *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.* **2** 753
- [10] Genest J, Chamberland M, Tremblay P, Tetu M 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 989
- [11] Johansson L A, Seeds A J 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 511
- [12] Wake D, Lima C R, Davies P A 1995 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **43** 2270
- [13] Chan S C, Diaz R, Liu J M 2008 *Opt. Quantum Electron.* **40** 83
- [14] Simpson T B, Doft F 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 1476
- [15] Chan S C, Liu J M 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 699
- [16] Simpson T B 1999 *Opt. Commun.* **170** 93
- [17] Kaszubowska A, Anandarajah P, Barry L P 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 233
- [18] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 14921
- [19] Niu S X, Wang Y C, He H C, Zhang M J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7241 (in Chinese) [牛生晓, 王云才, 贺虎成, 张明江 2009 物理学报 **58** 7241]
- [20] Xie H Y, Jin D Y, He L J, Zhang W, Wang L, Zhang W R, Wang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4558 (in Chinese) [谢红云, 金冬月, 何莉剑, 张蔚, 王路, 张万荣, 王圩 2008 物理学报 **57** 4558]
- [21] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [22] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [23] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2007 *Appl. Opt.* **46** 7262
- [24] Wang X F, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4669 (in Chinese) [王小发, 夏光琼, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 4669]
- [25] Yang B X, Xia G Q, Lin X D, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1480 (in Chinese) [杨炳星, 夏光琼, 林晓东, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 1480]
- [26] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [27] Leng Z M, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Optoelectron. & Adv. Mater. - Rap. Commun.* **3** 644
- [28] Chan S C, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **10** 1025
- [29] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev.* **44** 1728
- [30] Simpson T B, Liu J M, Gavielides A 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 1456
- [31] Hwang S K, Liu J M, White J K 2004 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **10** 974

Optical generation of high-quality millimeter-wave based on an optically injected VCSEL subject to polarization-rotated external optical feedback*

Chen Xing-Hua¹⁾ Lin Xiao-Dong¹⁾ Wu Zheng-Mao¹⁾ Fan Li¹⁾
Cao Ti¹⁾ Xia Guang-Qiong^{1)2)†}

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

2) (State Key Lab of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Received 20 July 2011; revised manuscript received 29 August 2011)

Abstract

A scheme of optical generation of high-quality millimeter-wave based on the optically injected vertical-cavity-surface-emitting laser (VCSEL) subject to polarization-rotated optical feedback is proposed in this paper. Based on the spin-flip model (SFM), with external disturbances taken into account, the performances of the millimeter-wave generated by this scheme are numerically investigated. The results show that under suitable operation conditions, a slave VCSEL (S-VCSEL) injected by a master VCSEL (M-VCSEL) will operate in a period-one (P1) oscillation state and the output optical intensity of S-VCSEL looks like being modulated by a microwave signal. By adjusting the injection strength ξ_i and the frequency detuning $\Delta\nu$ between S-VCSEL and M-VCSEL, a millimeter-wave, whose frequency can be continuously adjusted in a large range from 30 GHz to 60 GHz, is obtained. After introducing polarization-rotated optical feedback, the linewidth of millimeter-wave can be obviously narrowed by adjusting the feedback strength ξ_i and the feedback delay time τ . For a millimeter-wave with a linewidth of 5.509 MHz, generated by the optically injected VCSEL, its linewidth can be reduced to 230.2 kHz under optimum feedback parameters. The results obtained in this paper are helpful for acquiring high-quality millimeter-wave used in high speed Radio-over-Fiber (RoF) system.

Keywords: optically injected VCSELs, millimeter-wave, polarization-rotated optical feedback, linewidth

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 61178011), the Natural Science Foundation of Chongqing City (Grant Nos. CSTC2011jjA40035, CSTC2012jjB40011), the Special Funds of Southwest University for Basic Scientific Research in Central Universities (Grant No. XDJK2010C019, XDJK2009B010), and the Open Fund of the State Key Lab of Millimeter Waves of China (Grant No. 201109).

† E-mail: gqxia@swu.edu.cn