

# 基于双光注入锁定 1550 nm 垂直腔表面发射半导体激光器产生可调谐毫米波\*

陈于淋<sup>1)</sup> 吴正茂<sup>1)2)</sup> 唐曦<sup>1)</sup> 林晓东<sup>1)</sup> 魏月<sup>1)</sup> 夏光琼<sup>1)†</sup>

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)

(2012年6月18日收到; 2012年12月5日收到修改稿)

基于自旋反转模型, 对双光注入下 1550 nm 垂直腔表面发射半导体激光器 (1550 nm-VCSEL) 的非线性动力学行为进行了理论分析和数值仿真研究. 结果表明: 当一个中心波长位于 1550 nm 的副 VCSEL(S-VCSEL) 同时受到来自两个主 VCSELs (M-VCSELs) 的光注入时, 在适当的注入条件下, S-VCSEL 可处于双光注入锁定态. 此时, S-VCSEL 中的两偏振模式均呈现频率为两注入光频率之差的周期性振荡, 输出的光谱仅包含两个主频率部分, 即光谱具有单边带特征. 因此, 基于双光注入下 S-VCSEL 的周期性振荡可以获得两个相互正交的光毫米波. 通过调节两个 M-VCSELs 之间的频率差异可使毫米波频率在较大范围内连续可调, 通过调节系统参量可以控制毫米波功率以及调制深度.

**关键词:** 垂直腔表面发射激光器, 双光注入, 毫米波, 调制深度

**PACS:** 42.55.Px, 42.65.Sf, 84.40.-x

**DOI:** 10.7498/aps.62.104207

## 1 引言

光载无线通信 (radio-over-fiber, RoF) 技术是采用光纤链路来传输无线电信号的通信技术, 由 Cooper<sup>[1]</sup> 于 1990 年首次提出. RoF 技术能够有效地利用光纤链路的低损耗、高带宽以及抗电磁干扰等特性, 通过光纤链路将无线信号从中心站分配到各个基站, 再将基站信号收集回中心站. 由于 RoF 技术具有覆盖面积广、易于安装和维护、宽带宽、低成本、低功耗等优点, 在未来通信、军事上有着重要的应用价值, 因而成为目前通信技术领域研究的前沿热点之一<sup>[2-5]</sup>.

基于 RoF 技术在众多领域所展现出的诱人应用前景, 作为支撑 RoF 的关键技术之一——光毫米波的产生得到了人们的广泛关注<sup>[6-16]</sup>. 迄今为止, 国内外学者相继提出多种光毫米波的获得方法,

主要包括光外差法<sup>[7,8]</sup>、外部调制<sup>[9,10]</sup>、双模半导体激光器<sup>[11]</sup>、直接调制结合滤波技术<sup>[12]</sup>以及光注入半导体激光器呈现的单周期振荡<sup>[13-15]</sup>等. 光外差法主要基于存在一定频率差的两个独立的激光器来获得高频微波. 光外差法产生毫米波信号由于两外差源较大的相位噪声, 必须采用相位锁定等降噪技术才能使产生的毫米波信号满足实际应用的需要. 目前常用的相位锁定技术有光注入锁定技术、光锁相环技术等, 然而这些锁定技术通常都需要外加高性能微波振荡源, 这无疑增加了系统的复杂性和成本. 外调制技术可以产生高频率的微波信号, 通过结合其他技术手段可产生 70 GHz 以上的光毫米波. 外调制技术虽然有易于配置的优点, 但由于需要高性能的本地振荡器和调制器将导致系统的造价昂贵. 双模半导体激光器结构简单, 且由于两个模式共用同一个激光腔从而使获得的毫米波信号的性能优于采用光外差所获得的光毫米波

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60978003, 61078003, 61178011, 61275116)、重庆市自然科学基金 (批准号: CSTC2011jjA40035, CSTC2012jjB40011)、毫米波国家重点实验室开放课题 (批准号: K201311) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: XDJK2010C019) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

的性能. 但由于大多数的双模激光器的两个模式之间的间隔是固定的, 因此采用双模激光器获得的光毫米波的可调谐性相对较差. 直接调制结合滤波的方案是获得单边带调制最直接的方式, 但是微波频率受半导体激光器调制带宽的限制难以获得大调制深度的高频毫米波信号. 基于单光注入半导体激光器所呈现的单周期振荡可获得大调制深度的光毫米波, 且通过改变光注入强度以及频率失谐可获得在一定范围内频率可调的毫米波. 但采用该方法能获得的毫米波的频率在几十吉赫兹以内. 因此, 为了获取更高频率的光毫米波, 最近提出了一种采用两个具有一定频率差异的光同时注入半导体激光器使之呈现双光注入锁定而获取光毫米波的方案, 研究结果表明采用该方案可获得超过 100 GHz 的光毫米波<sup>[16]</sup>.

在目前基于光注入半导体激光器的周期振荡获取毫米波的方案中, 大多基于边发射分布反馈半导体激光器 (DFB-SL)<sup>[14-16]</sup>. 而与 DFB-SL 相比, 垂直腔表面发射激光器 (VCSELs) 具有一些独特的优势, 如低阈值电流、单纵模输出、圆形输出光斑以及易于做成大面积阵列等<sup>[17,18]</sup>. 而且, 由于 VCSELs 中可能同时存在两个相互正交的偏振模式, 从而有望同时产生两个正交的光毫米波. 因此, 本文对双光注入下 1550 nm-VCSELs 的非线性动力学行为进行研究, 获取双光注入 1550 nm-VCSELs 呈现双光注入锁定态对系统参量的要求. 在此基础上, 讨论系统参量对所获得的光毫米波的功率、毫米波的调制深度的影响.

## 2 理论模型

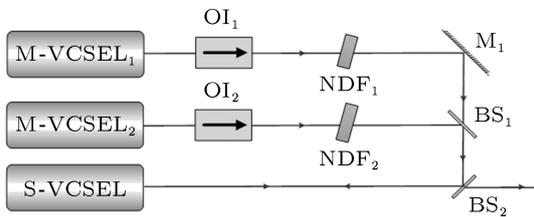


图1 双光注入锁定 1550 nm-VCSEL 产生毫米波的系统结构示意图 M-VCSEL, 主 VCSEL; S-VCSEL, 副 VCSEL; OI, 光隔离器; NDF, 中性密度衰减片; BS, 分束器; M, 平面镜

双光注入锁定 1550 nm-VCSEL 产生毫米波的系统结构如图 1 所示. 两个主激光器 (M-VCSEL<sub>1</sub>, M-VCSEL<sub>2</sub>) 的输出光分别通过光隔离器 (OI)、中性密度衰减片 (NDF) 单向注入到副激光器 (S-VCSEL) 中. 其中 OI 确保光的单向传输, NDF 用

于调节光注入强度. S-VCSEL 的输出经过 BS<sub>2</sub> 后作为光毫米波的输出.

基于自旋反转模型 (SFM)<sup>[17]</sup>, 描述上述系统中两 M-VCSELs 和 S-VCSEL 的动力学特性的速率方程可表示为

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x,y}^{m1,m2} &= \kappa(1 + i\alpha)(N^{m1,m2} E_{x,y}^{m1,m2} \pm i n^{m1,m2} E_{y,x}^{m1,m2} - E_{x,y}^{m1,m2}) \\ &\quad \pm (-i\gamma_p - \gamma_a) E_{x,y}^{m1,m2} + F_{x,y}^{m1,m2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x,y}^s &= \kappa(1 + i\alpha)(N^s E_{x,y}^s \pm i n^s E_{y,x}^s - E_{x,y}^s) \pm (-i\gamma_p - \gamma_a) E_{x,y}^s \\ &\quad + \eta_1 E_{x,y}^{m1}(t - \tau_{c1}) \exp[-i2\pi(\nu^{m1} \tau_{c1} - \Delta\nu_1 t)] \\ &\quad + \eta_2 E_{x,y}^{m2}(t - \tau_{c2}) \exp[-i2\pi(\nu^{m2} \tau_{c2} - \Delta\nu_2 t)] \\ &\quad + F_{x,y}^s, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{N}^{m1,m2,s} &= -\gamma_e [N^{m1,m2,s} (1 + |E_x^{m1,m2,s}|^2 + |E_y^{m1,m2,s}|^2) - \mu \\ &\quad + i n^{m1,m2,s} (E_y^{m1,m2,s} E_x^{m1,m2,s*} \\ &\quad - E_x^{m1,m2,s} E_y^{m1,m2,s*})], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{n}^{m1,m2,s} &= -\gamma_s n^{m1,m2,s} - \gamma_e [n^{m1,m2,s} (|E_x^{m1,m2,s}|^2 + |E_y^{m1,m2,s}|^2) \\ &\quad + i N^{m1,m2,s} (E_y^{m1,m2,s} E_x^{m1,m2,s*} \\ &\quad - E_x^{m1,m2,s} E_y^{m1,m2,s*})], \end{aligned} \quad (4)$$

式中, 上标 s 代表 S-VCSEL, m1 和 m2 分别代表 M-VCSEL<sub>1</sub> 和 M-VCSEL<sub>2</sub>, 下标 x 和 y 分别代表 VCSEL 的 X 和 Y 线偏振模, E 表示光场慢变振幅, N 表示导带和价带之间总的反转载流子密度, n 表示两个自旋反转载流子密度的差值,  $\kappa$  为光子衰减率,  $\alpha$  为线宽增强因子,  $\gamma_e$  为总载流子的衰减速率,  $\gamma_s$  为自旋反转速率,  $\gamma_a$  为线性色散效应,  $\gamma_p$  为有源介质双折射效应,  $\mu$  为归一化的注入电流,  $\nu$  为激光器的中心频率,  $\Delta\nu_1 = \nu^{m1} - \nu^s$ ,  $\Delta\nu_2 (= \nu^{m2} - \nu^s)$  分别为 M-VCSEL<sub>1</sub>, M-VCSEL<sub>2</sub> 与 S-VCSEL 之间的频率失谐,  $\tau_c$  表示从 M-VCSEL 到 S-VCSEL 的注入延迟时间,  $\eta$  表示注入系数. F 为朗之万噪声源, 可表示为

$$F_x^{m1,m2,s} = \sqrt{\beta_{sp}/2} \left( \sqrt{N^{m1,m2,s} + n^{m1,m2,s}} \xi_1^{m1,m2,s} + \sqrt{N^{m1,m2,s} - n^{m1,m2,s}} \xi_2^{m1,m2,s} \right), \quad (5)$$

$$F_y^{m1,m2,s} = -i \sqrt{\beta_{sp}/2} \left( \sqrt{N^{m1,m2,s} + n^{m1,m2,s}} \xi_1^{m1,m2,s} - \sqrt{N^{m1,m2,s} - n^{m1,m2,s}} \xi_2^{m1,m2,s} \right), \quad (6)$$

其中  $\xi$  为高斯白噪声, 其平均值为 0, 方差为 1;  $\beta_{sp}$  是自发辐射速率.

### 3 结果与讨论

利用四阶龙格库塔法可对上述速率方程 (1)—(4) 进行数值求解. 在计算过程中假定三个 VCSELs 具有相同的内部参量, 各参数取值如下 [18]:  $\kappa = 125 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\alpha = 2.2$ ,  $\gamma_e = 0.67 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 192 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\tau_{c1} = \tau_{c2} = 3 \text{ ns}$ ,  $\mu = 1.3$ ,  $\beta_{sp} = 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$ ,  $\nu^s = 193.5 \text{ THz}$  (对应激光中心波长为 1550 nm). 为便于讨论, 假定 M-VCSEL<sub>1</sub> 对

S-VCSEL 的注入强度保持不变, 取值为  $\eta_1 = 220 \text{ ns}^{-1}$ .

图 2 为 1550 nm-VCSEL 自由运行时 X 偏振模和 Y 偏振模的光谱图. 对于  $\gamma_p = 192 \text{ ns}^{-1}$  的情形, X 偏振模和 Y 偏振模之间有 61.14 GHz 的频率偏差. 此时, Y 偏振模的输出功率远大于 X 偏振模的输出功率.

#### 3.1 双光注入 S-VCSEL 的动态特性

图 3 给出了  $\Delta v_1$  取不同值时, S-VCSEL 输出的动力学状态在  $\eta_2 - \Delta v_2$  构成的空间内的分布图. 图

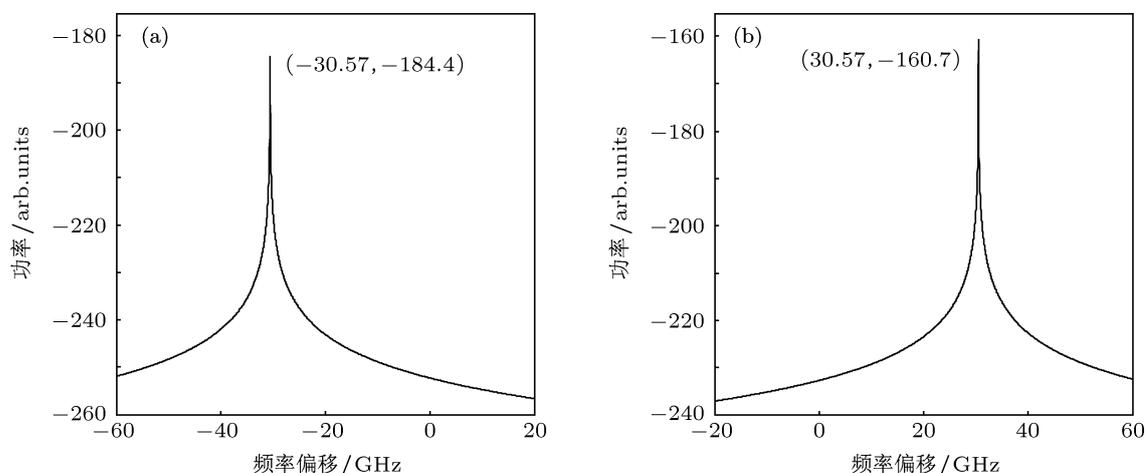


图 2 1550 nm-VCSEL 自由运行时的光谱图, 其中横坐标“0”点对应 1550 nm, (a), (b) 分别对应 X 和 Y 偏振模

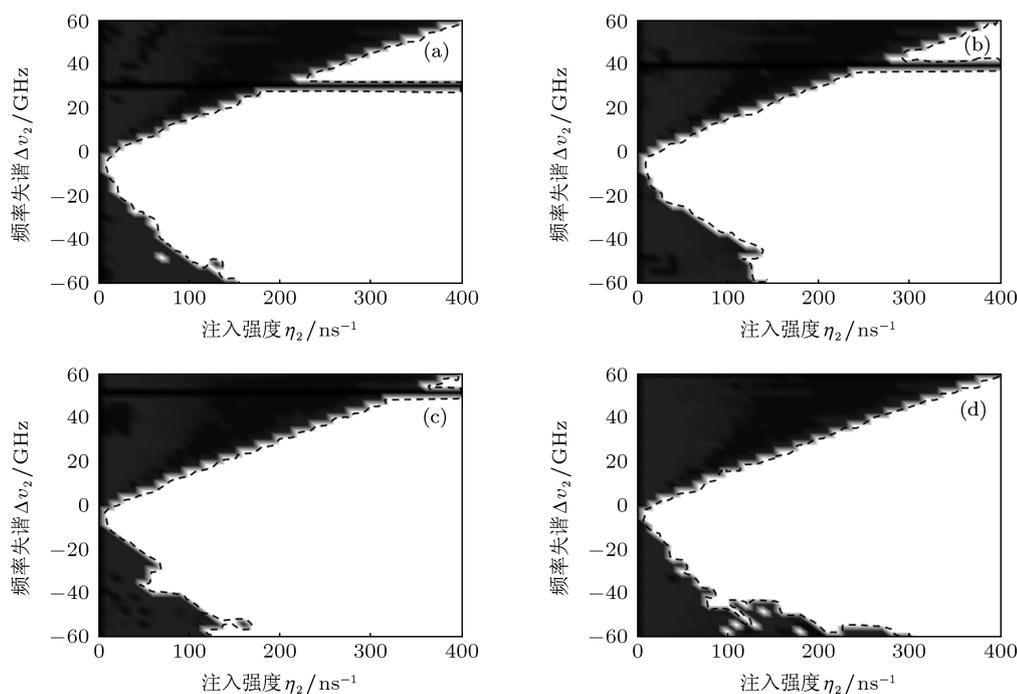


图 3 S-VCSEL 在双光注入下的动态分布 (a)  $\Delta v_1 = 30 \text{ GHz}$ ; (b)  $\Delta v_1 = 40 \text{ GHz}$ ; (c)  $\Delta v_1 = 50 \text{ GHz}$ ; (d)  $\Delta v_1 = 60 \text{ GHz}$ ; 白色部分为双光注入锁定区域, 黑色部分为多周期、混沌态等其他动力学状态

中白色部分为双光注入锁定区域, 黑色区域为多周期、混沌态等其他动力学状态. 从该图可以看出, 在 M-VCSEL<sub>1</sub> 的注入强度和频率失谐确定的情况下, 随着 M-VCSEL<sub>2</sub> 注入强度的增加, 使 S-VCSEL 输出能实现双光注入锁定的频率失谐  $\Delta\nu_2$  的范围增大. 例如, 当频率失谐  $\Delta\nu_1 = 30$  GHz 时 (如图 3(a) 所示),  $\Delta\nu_2 = -60$  GHz,  $\eta_2 > 150$  ns<sup>-1</sup> 就可实现双光注入锁定, 即可获得 90 GHz 的毫米波信号; 当  $\Delta\nu_1 = 60$  GHz 时 (如图 3(d) 所示),  $\Delta\nu_2 = -60$  GHz,  $\eta_2 > 300$  ns<sup>-1</sup> 就可实现双光注入锁定, 即能够产生 120 GHz 的毫米波信号. 通过对图 3(a)—(d) 中的白色部分的范围进行比较可知: 随着  $\Delta\nu_1$  的增加, S-VCSEL 的注入锁定区域发生一定改变, 但均在较大参数范围内能够实现双光注入锁定. 因此, 基于双光注入锁定 VCSELs, 可产生频率大范围可调的毫米波信号.

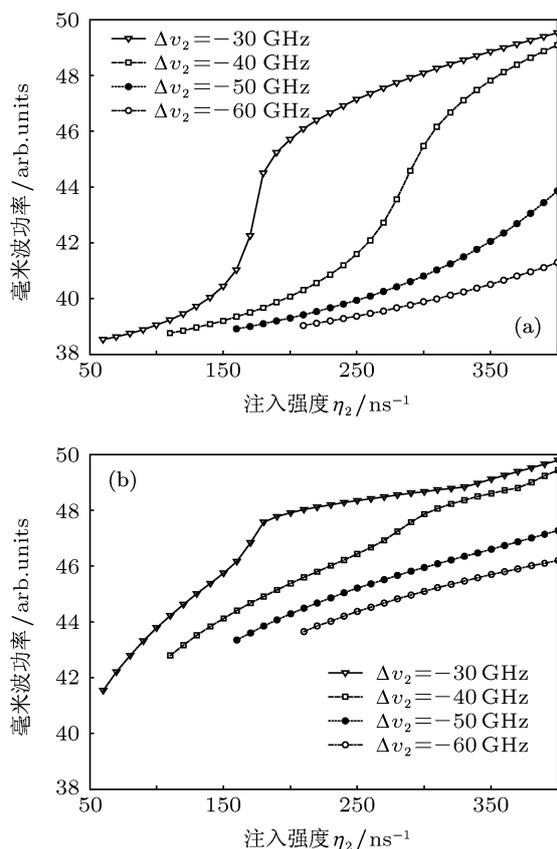


图 4  $\Delta\nu_1 = 30$  GHz,  $\Delta\nu_2$  取不同值时毫米波功率随着注入强度  $\eta_2$  的变化, 其中 (a), (b) 分别对应由 X, Y 偏振模式所产生的毫米波

### 3.2 M-VCSEL2 对 S-VCSEL 的注入参量对毫米波功率的影响

在 RoF 系统中, 毫米波功率是一个关键的参量. 图 4 给出了当  $\Delta\nu_1 = 30$  GHz 时,  $\Delta\nu_2$  取不同值

时毫米波功率随着注入强度  $\eta_2$  的变化曲线, 图中 (a), (b) 分别对应由 X, Y 模所产生的毫米波. 从图中可以看出, S-VCSEL 在处于注入锁定态时, 由 X, Y 偏振模所产生的毫米波功率随注入参数的改变呈现相同的变化趋势, 即随着注入强度的增大, 产生的毫米波功率逐渐增加; 在同样的注入强度条件下, 毫米波功率随着  $\Delta\nu_2$  的增加而减小; 在相同的条件下, 由 X 模式所产生的毫米波功率小于 Y 偏振模式所产生毫米波功率, 但随着注入强度的增加, 两者之间的差距逐渐缩小.

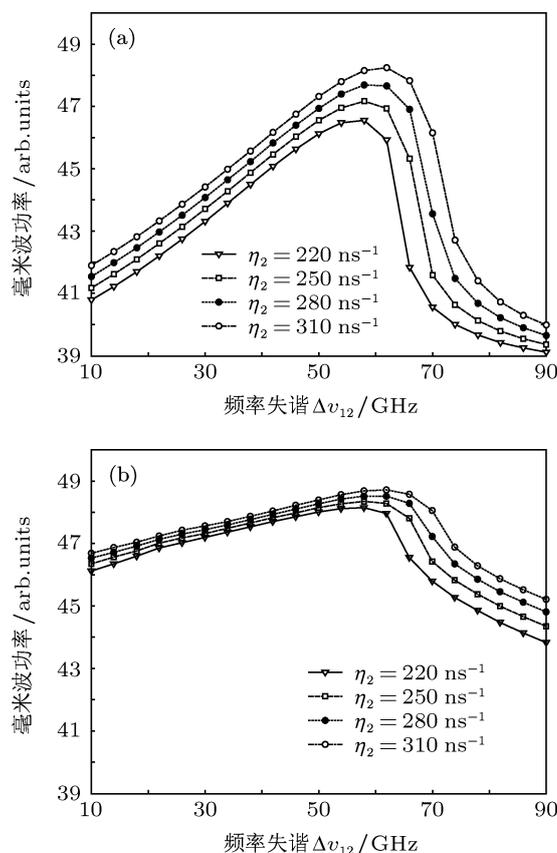


图 5  $\Delta\nu_1 = 30$  GHz 时, 不同注入强度  $\eta_2$  下毫米波功率随着频率失谐  $\Delta\nu_{12}$  的变化, 其中 (a), (b) 分别对应由 X, Y 偏振模式所产生的毫米波

图 5 为  $\Delta\nu_1 = 30$  GHz 时, 不同注入强度  $\eta_2$  下由 X(a), Y(b) 偏振模所产生的毫米波功率随着两 M-VCSELs 间频率失谐  $\Delta\nu_{12} (= \nu^{m1} - \nu^{m2})$  的变化关系. 从图中可以看出, 当 S-VCSEL 处于注入锁定态时, 随着两个 M-VCSELs 间频率失谐  $\Delta\nu_{12}$  的增加, 由 X, Y 偏振模所产生的毫米波功率呈现相同的变化趋势, 即毫米波的功率先增加, 达到最大值后, 呈下降的趋势. 出现最大值时, 两 M-VCSELs 的中心频率近似对称位于 S-VCSEL 的两边, 且由 X, Y 偏振模所产生的两毫米波功率之间相差不大.

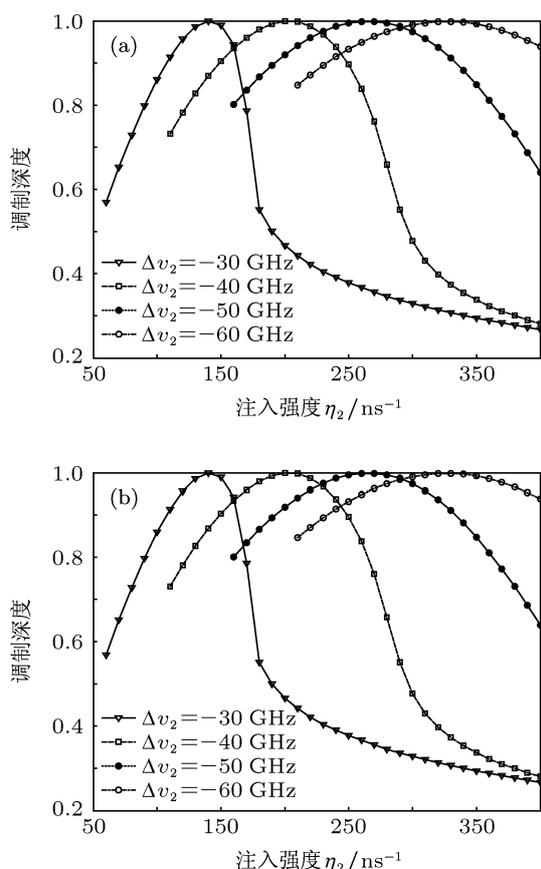


图6  $\Delta v_1 = 30$  GHz 时, 不同频率失谐  $\Delta v_2$  下调制深度随着注入强度  $\eta_2$  的变化. (a), (b) 分别对应由 X, Y 偏振模式所产生的毫米波

### 3.3 M-VCSEL2 对 S-VCSEL 的注入参量对毫米波调制深度的影响

图6为  $\Delta v_1 = 30$  GHz 时, 不同频率失谐  $\Delta v_2$  下由 X(a), Y(b) 偏振模所产生的毫米波调制深度随着注入强度  $\eta_2$  的变化关系图. 从图中可以看出, 由 X, Y 偏振模所产生的毫米波信号的调制深度相同. 在 S-VCSEL 处于注入锁定态时, 随着注入强度  $\eta_2$  的增加, 调制深度先逐渐增加, 当注入强度达到一定值后, 调制深度达到最大值, 之后随着注入强度  $\eta_2$  的继续增加, 调制深度逐渐下降. 出现这一规律的原因是调制深度取决于 S-VCSEL 中锁定的两频率的相对强度. 当它们强度相同时, 调制深度取得最大值 1. 当 M-VCSEL<sub>2</sub> 对 S-VCSEL 的注入强度刚达到能注入锁定的时候, 此时腔内 M-VCSEL<sub>1</sub> 对 S-VCSEL 注入锁定的光功率占主导; 随着  $\eta_2$  的增大, M-VCSEL<sub>2</sub> 对 S-VCSEL 注入锁定的光功率逐渐增加, 两个注入锁定频率处的功率的差值逐渐减小, 导致调制深度增加. 当  $\eta_2$  增加到两个注入锁

定频率处的功率相等时, 此时调制深度达到极大值 1; 继续增大  $\eta_2$ , 则 S-VCSEL 中被 M-VCSEL<sub>2</sub> 锁定的频率的功率将大于被 M-VCSEL<sub>1</sub> 锁定的频率的功率, 而且随着  $\eta_2$  的增加, 它们之间的差距越来越大, 从而导致调制深度一直减小. 另外, 调制深度达到极大值所要求的注入强度随着 M-VCSEL<sub>2</sub> 与 S-VCSEL 之间频率失谐数值的增大而增大, 其原因是要得到在被 M-VCSEL<sub>2</sub> 锁定的频率处同样大小的功率 (等于被 M-VCSEL<sub>1</sub> 锁定的频率处功率), 频率失谐数值越大所要求的注入光功率必须更大的缘故.

尽管在本文所给的注入参数变化范围内由 Y 偏振模式所产生的毫米波功率总是大于由 X 偏振模式所产生的毫米波功率, 但是从上面的结果仍然可以看出, 两者之间的差异会随着注入参数的变化而发生改变. 可以预计: 通过选择合适的系统参数, 可使两偏振模式产生的毫米波功率相差不大. 此时, 双光注入锁定 1550 nm-VCSELs 输出的两个相互正交偏振模式均可作为 RoF 系统中的光毫米波载波, 因此可望用于实现 RoF 的双信道通信.

## 4 结论

本文提出了一种基于双光注入锁定 1550 nm-VCSELs 产生毫米波的方案, 并利用自旋反转模型描述了 1550 nm-VCSELs 在双光注入锁定下所产生的毫米波特性的研究结果. 研究表明: 采用两个主 M-VCSELs 外部光注入, 通过调节注入强度以及频率失谐可使 S-VCSEL 处于双光注入锁定态. 此时 S-VCSEL 输出 X, Y 偏振光毫米波的光谱中均只包含两个主要频率, 即具有单边带调制特性, 毫米波的频率可通过调节两注入光的频率差而实现大范围调谐. 分别基于 X, Y 偏振模式所获得毫米波具有相似特性, 即随注入强度的增加, 毫米波信号的功率增大. 随着两个 M-VCSELs 间频率失谐  $\Delta v_{12}$  的增加, 毫米波的功率先增加, 当两 M-VCSELs 的中心频率近似对称位于 S-VCSEL 的两边时达到最大值, 然后呈现下降的趋势. 固定 M-VCSEL<sub>1</sub> 的注入强度与中心频率, 对不同中心频率 M-VCSEL<sub>2</sub> 注入光, 毫米波信号的调制深度总是随注入强度先逐渐增大, 达到极大值 1 后逐渐减小, 而达到极大值所要求的注入强度随着频率失谐数值  $|\Delta v_2|$  的增加而增加. 另外, 在本文所给的参数条件下, 自由运行

1550 nm-VCSEL 的 Y 偏振模式输出功率远大于 X 偏振模式的输出功率, 在整个注入参数的变换范围内都没有出现偏振转换现象. 但是关于该系统呈现

偏振转换现象对系统参数的要求以及偏振转换对获得毫米波性能的影响等问题值得我们在接下来的研究中给予重点关注.

- 
- [1] Cooper A J 1990 *Electron. Lett.* **26** 2054
- [2] Capmany J, Novak D 2007 *Nature Photon.* **1** 319
- [3] Choi S T, Yang K S, Nishi S, Nishi S, Shimizu A, Tokuda K, Kim Y H 2006 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **54** 1953
- [4] Jiang T, Huang D X, Zhang X L, Zhang Q, Wang J Y 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 36 (in Chinese) [江涛, 黄德修, 张新亮, 张强, 王俊毅 2008 光学学报 **28** 36]
- [5] Yao J P 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 314
- [6] Zhang G Z, Zhu N H, Man J W, Ke J H, Zhang B H, Han W, Chen W, Yuan H Q, Wang X, Xie L, Zhao L J, Wang W 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 1045
- [7] Genest J, Chamberland M, Tremblay P, Têtu M 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 989
- [8] Johansson L A, Seeds A J 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 690
- [9] Zhao Y C, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Optoelectron. Adv. Mater. Rap. Commun.* **3** 791
- [10] Han J, Seo B J, Han Y, Jalali B, Fetterman H R 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 1504
- [11] Liu W S, Jiang M, Chen D, He S L 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 4455
- [12] Ryu H S, Seo Y K, Choi W Y 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1942
- [13] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 14921
- [14] 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]
- [15] Chen X H, Lin X D, Wu Z M, Fan L, Cao T, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094209 (in Chinese) [陈兴华, 林晓东, 吴正茂, 樊利, 曹体, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 094209]
- [16] Juan Y S, Lin F Y 2011 *IEEE Photon. J.* **3** 644
- [17] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [18] Seyab R A, Schires K, Khan N A, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1242

# Optical generation of tunable millimeter-wave based on dual-beam optical injection Locked 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser\*

Chen Yu-Lin<sup>1)</sup> Wu Zheng-Mao<sup>1)2)</sup> Tang Xi<sup>1)</sup> Lin Xiao-Dong<sup>1)</sup>  
Wei Yue<sup>1)</sup> Xia Guang-Qiong<sup>1)†</sup>

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

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

(Received 18 June 2012; revised manuscript received 5 December 2012)

## Abstract

Based on the spin-flip model, the nonlinear dynamics of a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser (1550 nm-VCSEL) subject to dual-beam optically injection is investigated theoretically. The results show that a slave 1550 nm-VCSEL (S-VCSEL) under the injection of dual-beam output from two master VCSELs (M-VCSELs) can be driven to enter into an injection locking state under suitable injection parameters. In this case, the outputs of both X and Y polarization modes of the S-VCSEL exhibit periodic oscillation whose frequency is equal to the frequency detuning between the two M-VCSELs, and its optical spectrum contains only two main frequency components and possesses a single sideband spectrum structure. As a result, two mutually orthogonal optical millimeter-waves can be obtained based on the periodic oscillation in a VCSEL subject to dual-beam optically injected locking. Through adjusting the frequency detuning between the two M-VCSELs, the frequency of the millimeter-wave can be tuned continuously in a large range, while the power and modulation depth can also be controlled by adjusting the system parameters.

**Keywords:** vertical-cavity surface-emitting laser, dual-beam injection, millimeter wave, modulation depth

**PACS:** 42.55.Px, 42.65.Sf, 84.40.-x

**DOI:** 10.7498/aps.62.104207

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 61178011, 61275116), the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant Nos. CSTC2011jjA40035, CSTC2012jjB40011), the Open Research Program of State Key Laboratory of Millimeter Waves, China (Grant No. K201311), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. XDJK2010C019).

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