

基于椭圆偏振光注入垂直腔表面发射激光器的正交偏振模式单周期振荡产生两路光子微波

周娅 吴正茂 樊利 孙波 何洋 夏光琼

Two channel photonic microwave generation based on period-one oscillations of two orthogonally polarized modes in a vertical-cavity surface-emitting laser subjected to an elliptically polarized optical injection

Zhou Ya Wu Zheng-Mao Fan Li Sun Bo He Yang Xia Guang-Qiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 204203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.204203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多横模垂直腔面发射激光器及其波长特性

Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser

物理学报.2015, 64(16): 164203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164203>

基于半导体环形激光器的高速双向双信道混沌保密通信

High speed bidirectional dual-channel chaos secure communication based on semiconductor ring lasers

物理学报.2015, 64(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154205>

243 nm 稳频窄线宽半导体激光器

A narrow linewidth diode laser at 243 nm

物理学报.2015, 64(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134205>

双路激光混沌复用系统的混沌同步及安全性能研究

Performance of chaos synchronization and security in dual-chaotic optical multiplexing system

物理学报.2015, 64(12): 124206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124206>

有机激光材料及器件的研究现状与展望

Current research and future development of organic laser materials and devices

物理学报.2015, 64(9): 094202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094202>

基于椭圆偏振光注入垂直腔表面发射激光器的正交偏振模式单周期振荡产生两路光子微波*

周娅¹⁾ 吴正茂¹⁾ 樊利¹⁾ 孙波¹⁾ 何洋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)

(2015年4月25日收到; 2015年5月29日收到修改稿)

提出了基于椭圆偏振光注入下垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 输出的正交偏振模式单周期 (P1) 振荡来同时获取两路光子微波的实现方案, 并进行了相关仿真研究. 结果表明: 在合适的参数条件下, 一个自由运行的 VCSEL (定义为主 VCSEL, M-VCSEL) 可输出椭圆偏振光, 其 X 偏振分量和 Y 偏振分量具有相同的振荡频率; 将 M-VCSEL 输出的椭圆偏振光注入到另外一个 VCSEL (定义为副 VCSEL, S-VCSEL), 在给定的主副 VCSEL 间频率失谐的条件下, 通过选择合适的注入强度可使 S-VCSEL 中两个偏振分量均呈现单周期 (P1) 振荡, 从而可获得两正交的光子微波信号; 随着注入强度的增加, 光子微波的频率以及功率均呈现增加的趋势; 结合微波频率、功率以及输出光谱中第一边带和第二边带的幅度差在由注入强度和频率失谐所构成参数空间下的分布图, 可确定获取高品质微波信号的优化注入参数范围.

关键词: 垂直腔表面发射激光器, 椭圆偏振光注入, 单周期振荡, 光子微波

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

DOI: 10.7498/aps.64.204203

1 引言

近年来, 光注入半导体激光器的非线性动力学由于其复杂的物理机理以及潜在的技术应用而受到了人们的广泛关注^[1-7]. 通过引入光注入, 半导体激光器可呈现单周期 (P1) 振荡、倍周期振荡、混沌、注入锁定等多种动力学状态, 这些动力学状态已在相关领域得到应用. 如光注入半导体激光器处于注入锁定态时有助于调制带宽的增强以及强度噪声的抑制^[8-10], 而光注入半导体激光器处于混沌态时所输出的混沌信号可用于信息的保密传输以及高速物理随机数的获取^[11-13].

特别地, 在合适的参数条件下, 光注入半导体激光器可呈现 P1 振荡^[14-23], 其输出光的强度呈现高速的周期性振荡, 其振荡频率可远超过半导体

激光器自由运行时的弛豫振荡频率, 可用于产生频率达 100 GHz 以上的光子微波信号^[17]. 同时, 通过调节系统参量, 基于光注入半导体激光器呈现的 P1 振荡所产生的光子微波的频率易于实现大范围连续可调. 因此, 基于光注入半导体激光器呈现的 P1 振荡获取光子微波的技术受到人们的额外关注, 并已在可调谐窄带微波信号获取^[18-20]、光载无线 (RoF) 通信^[21,22] 以及速度的精确测量等^[23] 领域展现初步的应用前景. 当前, 利用光注入半导体激光器的 P1 振荡获取光子微波的研究大多基于边发射半导体激光器. 与边发射半导体激光器相比, 垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 具有诸多优势, 如体积小、阈值低、单纵模光输出、调制带宽大、圆形光束输出、与光纤耦合效率高、易集成而形成激光阵列以及能够同时输出两个正交偏振分量等^[24-28]. 基于此, 本文提出了一个基于椭圆偏

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178011, 61275116, 61475127, 61575163) 和毫米波国家重点实验室开放基金 (批准号: K201418) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

振光注入下 VCSEL 输出的正交偏振模式 P1 振荡来同时获取两路光子微波的方案, 并对所产生的光子微波的性能进行了相关仿真研究. 在该方案中, 将一个 VCSEL (定义为主 VCSEL, M-VCSEL) 所产生的椭圆偏振光注入到另一个 VCSEL (定义为副 VCSEL, S-VCSEL) 中, 通过选取合适的系统参数, 可使 S-VCSEL 中两个偏振分量均呈现 P1 振荡, 从而可获取两正交的光子微波信号.

2 系统结构

椭圆偏振光注入 VCSEL 的系统结构示意图见图 1. M-VCSEL 输出的椭圆偏振光通过光隔离器 (OI)、中性密度衰减器 (NDF), 以及分束器 (BS) 单向注入到 S-VCSEL 中, 其中 OI 用于保证光的单向传输, NDF 用于调节光注入的强度. S-VCSEL 的输出光通过 BS 后被偏振分束器 (PBS) 分为 X 和 Y 偏振分量.

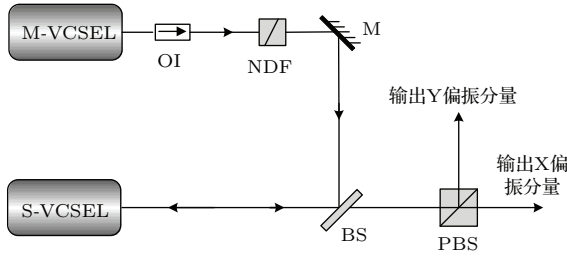


图1 椭圆偏振光注入 VCSEL 的系统结构示意图 (M 为平面镜)

Fig. 1. Schematic diagram of an elliptical polarization optical injection VCSEL: M-VCSEL, master vertical cavity surface-emitting laser; S-VCSEL, slave vertical cavity surface-emitting laser; OI, optical isolator; NDF, neutral density filter; M, mirror; BS, beam splitter; PBS, polarization beam splitter.

3 理论模型

基于 VCSEL 的自旋反转模型 (SFM) [24,25], 描述 M-VCSEL 和 S-VCSEL 的动力学特性的速率方程为

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

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

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

$$\dot{n}^{m,s} = -\gamma_s n^{m,s} - \gamma_e \left[n^{m,s} \left(1 + |E_x^{m,s}|^2 + |E_y^{m,s}|^2 \right) + i N^{m,s} \left(E_y^{m,s} E_x^{m,s*} - E_x^{m,s} E_y^{m,s*} \right) \right], \quad (4)$$

式中上标 m 和 s 分别代表 M-VCSEL 和 S-VCSEL, 下标 x 和 y 分别表征 X 和 Y 偏振分量; E 为激光器的慢变场振幅, N 为总的载流子密度, n 表示两个自旋反转载流子密度差值, α 为线宽增强因子, κ 为光场衰减率, γ_s 为自旋反转速率, γ_e 为总的载流子衰减率, γ_a 和 γ_p 分别表示线性色散效应和有源介质双折射效应, μ 为归一化的注入电流, τ_c 为 M-VCSEL 注入 S-VCSEL 的注入延时时间, ν 是激光器谐振腔频率, $\Delta\nu = \nu^m - \nu^s$ (ν^m 和 ν^s 分别为 M-VCSEL 和 S-VCSEL 的中心频率) 为两激光器之间的频率失谐, k_{in} 为注入强度. F 为朗之万噪声源, 可表示为

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

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

其中, ξ 为高斯白噪声, 其平均值为 0, 方差为 1; β_{sp} 为自发辐射噪声.

4 结果与讨论

利用四阶龙格-库塔法可对速率方程 (1)–(4) 进行数值求解, 数值仿真计算中我们假定 M-VCSEL 和 S-VCSEL 具有相同的内部参数. 所用内部参数如下 [26]: $\kappa = 300 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 3$, $\gamma_e = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 48 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 4 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = -0.1 \text{ ns}^{-1}$, $\beta_{sp} = 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$, $\nu = 352.94 \text{ THz}$ (对应激光中心波长为 850 nm). 另外, 在本文的计算中, $\tau_c = 3 \text{ ns}^{-1}$.

图 2 给出了自由运行时 M-VCSEL 输出的平均功率随归一化偏置电流变化的 P - I 曲线. 从图 2 可看出: 当 $1 < \mu < 1.22$ 时, 只有 X 偏振分量起振, Y 偏振分量被抑制; 当 $1.22 < \mu < 1.28$ 时, Y 分量起振而 X 分量被抑制; 当 $1.28 < \mu < 1.35$ 时, 呈现

X 偏振分量和 Y 偏振分量共存. 通过计算可知, 此时 X 偏振分量和 Y 偏振分量具有相同的激射频率, M-VCSEL 的输出为椭圆偏振光. 在下面的讨论中, 取 $\mu = 1.3$.

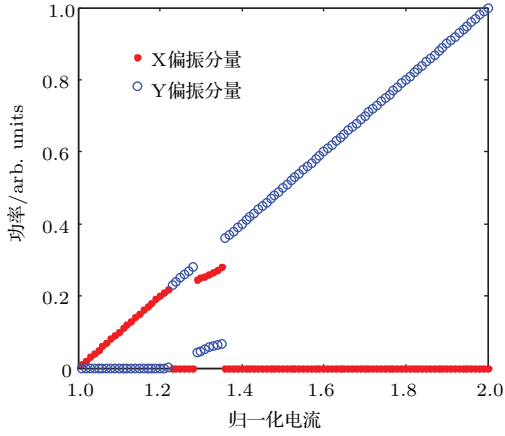


图2 (网刊彩色) 自由运行 M-VCSEL 的 $P-I$ 曲线
Fig. 2. (color online) $P-I$ curve for M-VCSEL at free-running.

首先, 我们固定 M-VCSEL 和 S-VCSEL 之间的频率失谐 $\Delta\nu$, 考察注入强度 k_{in} 取不同值时, S-VCSEL 输出的动力学状态. 图 3 给出了 $\Delta\nu =$

20 GHz, 注入强度取不同值时 S-VCSEL 输出的光谱图, 图中的横坐标为相对于 S-VCSEL 自由运行中心频率的频率偏差. 如图 3(a1) 和 (a2) 所示, 当注入强度较大时 ($k_{in} = 140 \text{ ns}^{-1}$), S-VCSEL 输出的 X 偏振分量和 Y 偏振分量被锁定在注入光的 X 偏振分量和 Y 偏振分量, 由于此时来自于 M-VCSEL 的注入光是椭圆偏振光, 即注入光中 X 偏振分量和 Y 偏振分量具有相同的激射频率, 这样就导致 S-VCSEL 处于锁定态时 X 偏振分量和 Y 偏振分量也具有相同的激射频率. 当注入强度 k_{in} 减小到 136 ns^{-1} (如第二行所示), 此时 S-VCSEL 输出的 X 和 Y 偏振分量的光谱具有两个主要的成分, 可判定此时其输出频率为 f_0 的 P1 振荡; 光谱最强的主峰位于注入频率 f_i 处, 第一边带和第二边带分别出现在载波频率 $f_c = f_i - f_0$ 和 $f_i + f_0$ 处, 第二边带的幅度值比第一边带低至少有 20 dB, 表明输出为光谱具有单边带 (SSB) 特征的光子微波. 当注入强度 $k_{in} = 30 \text{ ns}^{-1}$ 时 (如第三行所示), 在载波频率 f_c 的两侧 f_i 及 $f_c - f_0$ 处存在两个功率相当的成分, 表明此时的输出为具有双边带 (DSB) 特征的 P1.

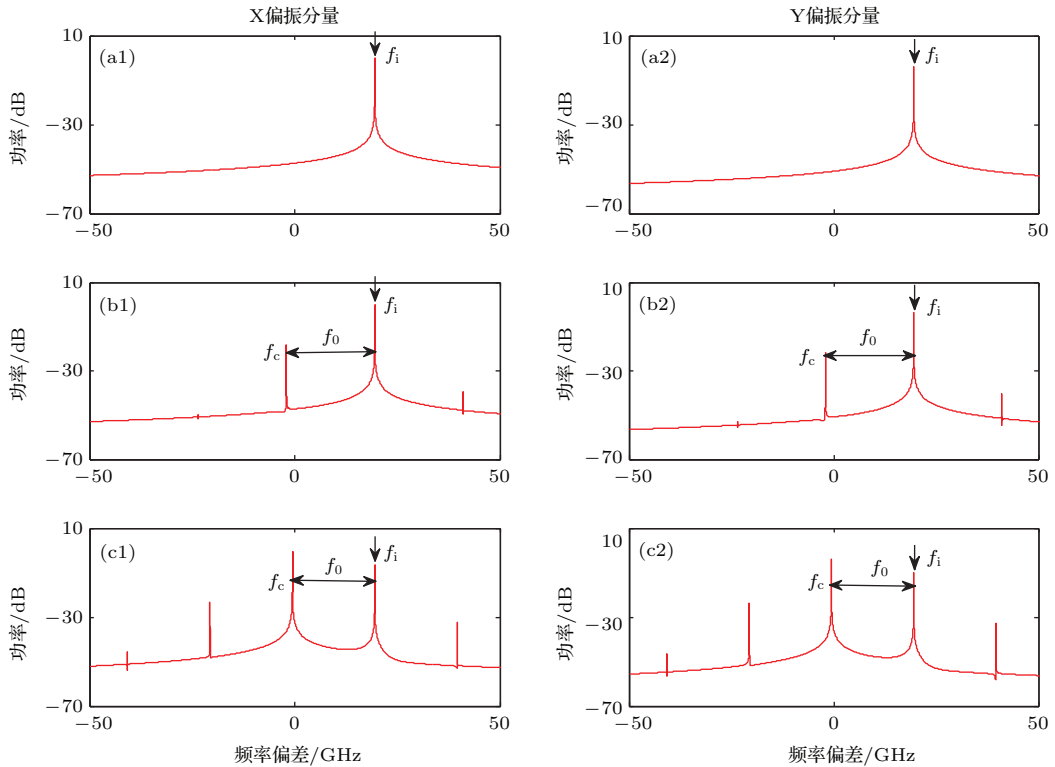


图3 (网刊彩色) 频率失谐 $\Delta\nu = 20 \text{ GHz}$ 以及注入强度 $k_{in} = 140 \text{ ns}^{-1}$ (第一行), 136 ns^{-1} (第二行), 30 ns^{-1} (第三行) 时, S-VCSEL 输出的 X 偏振分量 (左列) 和 Y 偏振分量 (右列) 的光谱

Fig. 3. (color online) Polarization-resolved optical spectra output from S-VCSEL under optical injection with $\Delta\nu = 20 \text{ GHz}$ and $k_{in} = 140 \text{ ns}^{-1}$ (Row 1), 136 ns^{-1} (Row 2), and 30 ns^{-1} (Row 3).

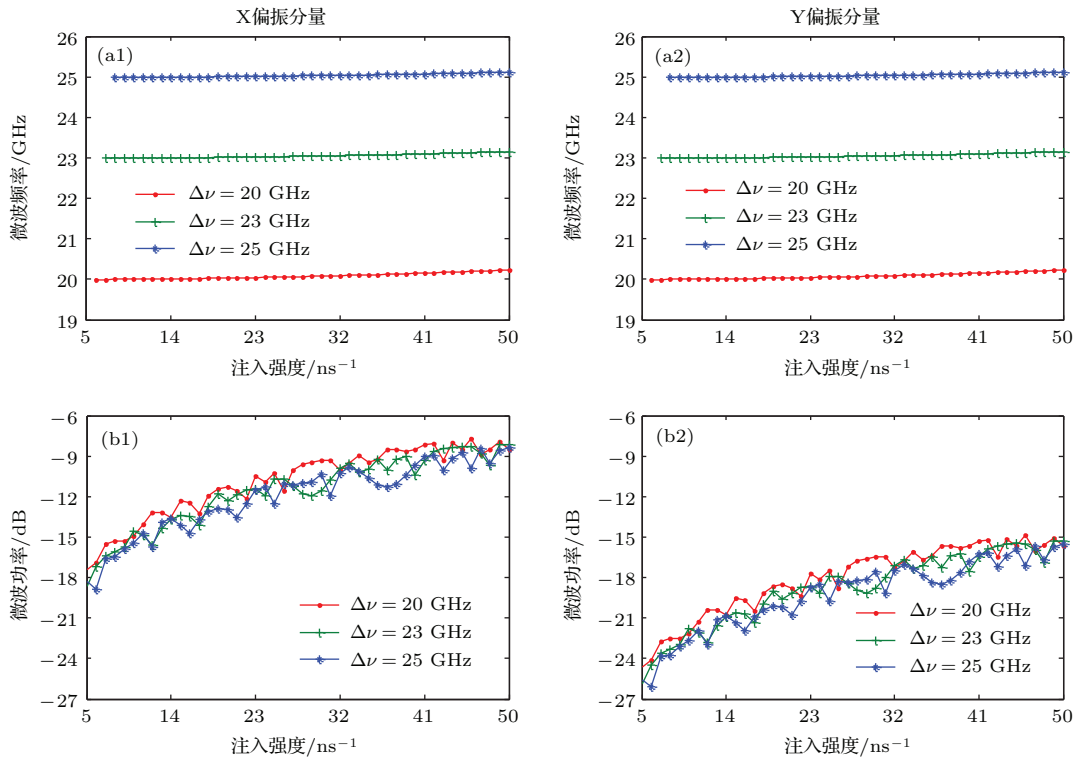


图4 (网刊彩色) 不同的频率失谐下, 所产生微波的频率(第一行)和功率(第二行)随着注入强度的变化
 Fig. 4. (color online) Variations of microwave frequency (first row) and microwave power(second row) with injection strength under different detuning frequencies.

图3的结果表明, 注入强度的大小对S-VCSEL输出的动力学状态具有重要的影响. 接下来, 我们考察基于椭圆偏振光注入下S-VCSEL呈现的P1振荡而获得的微波特性随注入参数的变化规律. 图4给出了频率失谐取不同值时, 基于S-VCSEL的P1振荡所获得微波的频率及功率随注入强度的变化曲线. 从图4(a1)和(a2)中可以看出, X, Y偏振分量具有相同的变化趋势: 在固定的频率失谐下, 随着注入强度的增加, 微波频率缓慢增大; 在相同的注入强度下, 频率失谐越大, 则所产生的微波频率越大. 由于在RoF通信应用中, 微波信号的功率大小是一个重要的参量, 因此图4(b1)和(b2)给出了在固定的失谐频率条件下微波功率随着注入强度的变化. 从图中可以看出: 随着注入强度的增加, 微波功率总体呈现增加的趋势, 但在增加的过程中伴随着波动; 在相同的注入强度下, $\Delta\nu$ 越小微波功率越大, 但差异不明显; 另外, 基于X偏振分量所产生微波的功率高于基于Y偏振分量所产生微波的功率, 其原因为在本文所给的参数条件下, 自由运行的S-VCSEL的X偏振分量的功率比Y偏振分量的功率大.

为了进一步揭示注入强度和频率失谐对基于S-VCSEL的P1振荡而获得的微波频率及功率的

影响, 图5给出了微波频率(第一行)以及微波功率(第二行)随注入强度和频率失谐变化的演化图. 需要指出的是: 由于本文着重研究基于P1振荡而获得光子微波信号, 因此S-VCSEL呈现其他动力学状态不在本文的讨论范围, 这些区域在图中用白色表示. 从图5中可以看出, 两个偏振分量呈现P1振荡的参数区域是基本相同的, 并且在负失谐区域明显多于正失谐区域; 基于X偏振分量和Y偏振分量的P1振荡所产生的两路光子微波信号具有相同的频率、不同的功率, 基于X偏振分量的P1振荡所产生微波的功率高于基于Y偏振分量的P1振荡所产生微波的功率.

在RoF通信应用中, 为了避免色散引起的微波功率惩罚, 要求所采用的光子微波应具有SSB光谱结构, 即第二边带应远弱于第一边带(低20 dB以上). 图6给出了在不同频率失谐和注入强度下, 第一边带和第二边带的幅度差(σ)的演化图. 从图中可以看出: 在较小的注入强度和频率失谐时, 由X偏振分量的P1振荡所产生的微波的 σ 与基于Y偏振分量的P1振荡所产生的微波的 σ 相差不大, 均具有较小的值; 对于较大的注入强度, 在负频率失谐区域, 基于Y偏振分量的P1振荡所产生的微波的 σ 较大而基于X偏振分量的P1振荡所

产生的微波的 σ 较小; 在注入强度位于 $(50 \text{ ns}^{-1}, 70 \text{ ns}^{-1})$ 而频率失谐位于 $(-60 \text{ GHz}, -50 \text{ GHz})$ 时, 基于两个偏振分量的P1振荡产生的光子微

波的 σ 都能保证在20 dB以上, 即此时基于两个偏振分量都可获得光谱具有SSB结构的光子微波信号.

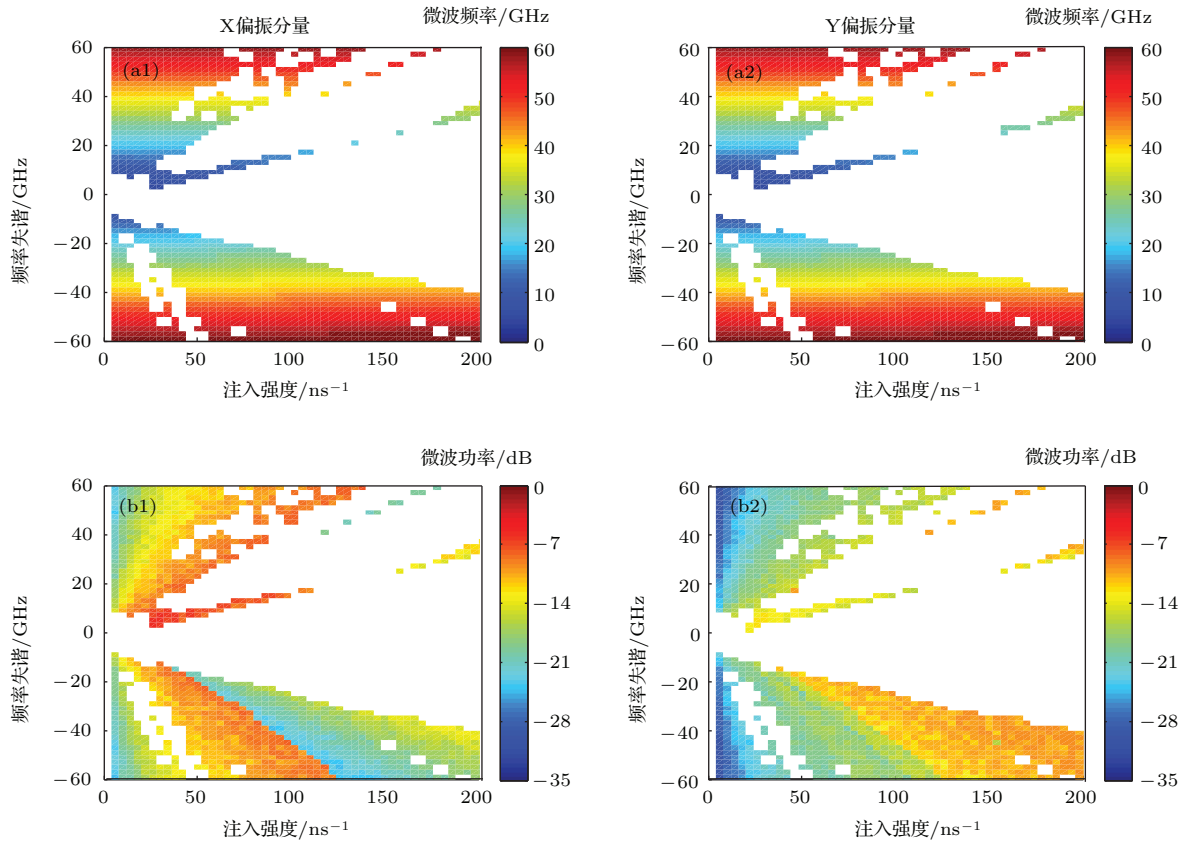


图5 (网刊彩色) 微波频率(第一行)和微波功率(第二行)分别随着注入强度和频率失谐的变化, 图中白色区域为非P1振荡

Fig. 5. (color online) Variation of microwave frequency (first row) and microwave power (second row) with the detuning frequency and injection strength, respectively, where the region labeled by white is for the other dynamical states besides P1.

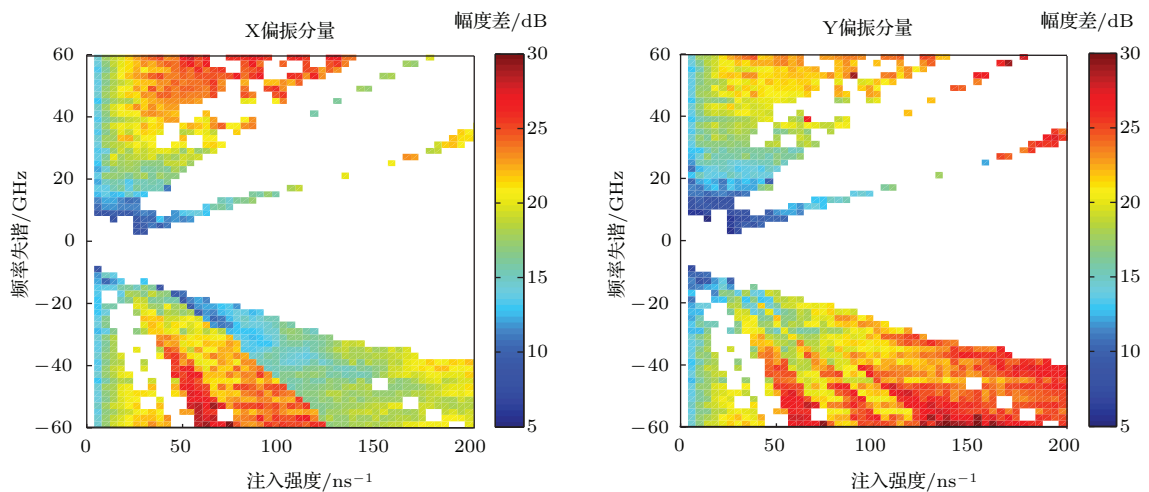


图6 (网刊彩色) 第一边带和第二边带的幅度差随着注入强度和频率失谐的变化

Fig. 6. (color online) Variations of the amplitude difference between the first sideband and second sideband with the detuning frequency and injection strength, respectively.

5 结 论

提出了一个基于椭圆偏振光注入下 VCSEL 输出的正交偏振模式单周期 (P1) 振荡来同时获取两路光子微波的方案, 并对所产生的光子微波的性能进行了相关仿真研究. 结果表明: 将一个 M-VCSEL 输出的椭圆偏振光注入到 S-VCSEL 中, 在合适的注入参数, 可使 S-VCSEL 中两个偏振分量均呈现 P1 振荡, 从而可获取两个正交的光子微波信号. 随着注入强度的增加, 两个正交的光子微波信号的频率均呈现单调缓慢上升的趋势, 而微波功率总体呈现上升趋势, 但在上升的过程中伴随着波动; 结合微波频率、微波功率以及 S-VCSEL 呈现 P1 振荡所输出光谱中第一边带和第二边带的幅度差在由注入强度和频率失谐所构成参数空间的分布图, 通过优化注入强度以及频率失谐, 可获得高品质的光子微波信号.

参考文献

- [1] Sacher J, Baums D, Panknin P, Elsässer W, Göbel E O 1992 *Phys. Rev. A* **45** 1893
- [2] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, Kovanis V, Alsing P M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 3539
- [3] Qi X Q, Liu J M 2011 *IEEE J. Quantum Electron.* **47** 762
- [4] Kong H J, Wu Z M, Wu J G, Xie Y K, Lin X D, Xia G Q 2008 *Chaos Soliton. Fract.* **36** 18
- [5] Yan S L 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 996 (in Chinese) [颜森林 2009 光学学报 **29** 996]
- [6] Wang A B, Wan Y C, Wang J F 2009 *Opt. Lett.* **34** 1144
- [7] Chen J J, Xia G Q, Wu Z M 2015 *Chin. Phys. B* **24** 024210
- [8] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 709
- [9] Liu J M, Chen H F, Meng X J, Simpson T B 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 1325
- [10] Murakami A, Kawashima K, Atsuki K 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1196
- [11] Yan S L 2005 *Chin. Opt. Lett.* **3** 283
- [12] Tang S, Chen H F, Hwang S K, Liu J M 2002 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **49** 163
- [13] Li X Z, Chan S C 2012 *Opt. Lett.* **37** 2163
- [14] Simpson T B, Liu J M, Huang K F, Tai K 1997 *Quantum Semiclass. Opt.* **9** 765
- [15] Juan Y S, Lin F Y 2011 *IEEE Photon. J.* **3** 644
- [16] Lin X D, Deng T, Xie Y Y, Wu J G, Chen J G, Wu Z M, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194212 (in Chinese) [林晓东, 邓涛, 解宜原, 吴加贵, 陈建国, 吴正茂, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 194212]
- [17] Chan S C, Liu J M 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 699
- [18] Chan S C, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 1025
- [19] Fan L, Wu Z M, Deng T, Wu J G, Tang X, Chen J J, Mao S, Xia G Q 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 4058
- [20] Zhuang J P, Chan S C 2013 *Opt. Lett.* **38** 344
- [21] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 14921
- [22] Cui C, Chan S C 2012 *IEEE J. Quantum Electron.* **48** 490
- [23] Diaz R, Chan S C, Liu J M 2006 *Opt. Lett.* **31** 3600
- [24] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [25] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [26] Michalzik R 2013 *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-cavity Surface-emitting Lasers* (Berlin: Springer) p217
- [27] Al-Seyab R, Schires K, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 1700512
- [28] Liu Q X, Pan W, Zhang L Y, Li N Q, Yan J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024209 (in Chinese) [刘庆喜, 潘炜, 张力月, 李念强, 阎娟 2015 物理学报 **64** 024209]

Two channel photonic microwave generation based on period-one oscillations of two orthogonally polarized modes in a vertical-cavity surface-emitting laser subjected to an elliptically polarized optical injection*

Zhou Ya¹⁾ Wu Zheng-Mao¹⁾ Fan Li¹⁾ Sun Bo¹⁾ He Yang¹⁾ Xia Guang-Qiong^{1)2)†}

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 25 April 2015; revised manuscript received 29 May 2015)

Abstract

Previous investigations demonstrated that a semiconductor laser subjected to optical injection can realize period-one (P1) oscillation output under suitable operational parameters, which can be used to obtain high quality photonic microwave. In this paper, we propose a scheme for simultaneously generating two channel photonic microwave based on the P1 oscillations of two orthogonally polarization modes in a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) subjected to an elliptical polarization optical injection, and the relevant characteristics of obtained photonic microwave are numerically simulated and analyzed. The results show that under suitable operational parameters, a free-running VCSEL (named master VCSEL, M-VCSEL) can output an elliptical polarization light in which both X and Y polarization components of the elliptical polarization light oscillate at the same frequency. By using the elliptical polarization light from the M-VCSEL as an injection light into another VCSEL (named slave VCSEL, S-VCSEL), both two polarization components of the S-VCSEL can be driven into P1 oscillation through selecting suitable injection strength under a fixed frequency detuning between the M-VCSEL and the S-VCSEL. Based on the P1 oscillation, two orthogonally photonic microwave signals can be obtained. With the increase of the injection strength from the M-VCSEL, the frequency of photonic microwave shows a gradually increasing trend while the power of photonic microwave displays an increasing process accompanied by slight ripples. Combining the distribution mappings of the frequency, the power, and the amplitude difference between the first sideband and the second sideband of the photonic microwave in the parameter space of the injection strength and the frequency detuning, certain regions with optimally operational parameters can be determined for acquiring high quality photonic microwave.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting laser, elliptical polarization optical injection, period-one oscillation, photonic microwave

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

DOI: 10.7498/aps.64.204203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178011, 61275116, 61475127, 61575163) and the Open Fund of the State Key Laboratory of Millimeter Waves of China (Grant No. K201418).

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