

基于平行偏振光注入的 1550 nm 波段垂直腔表面 发射激光器获取窄线宽光子微波的理论和实验研究

孙波 吴加贵 王顺天 吴正茂 夏光琼

Theoretical and experimental investigation on the narrow-linewidth photonic microwave generation based on parallel polarized optically injected 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

Sun Bo Wu Jia-Gui Wang Shun-Tian Wu Zheng-Mao Xia Guang-Qiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 014207 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.014207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锥形太赫兹量子级联激光器输出功率与光束特性研究

[Analyses of the output power and beam quality of the tapered terahertz quantum cascade lasers](#)

物理学报.2015, 64(22): 224212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224212>

主副垂直腔面发射激光器动力学系统混沌输出的时延特征及带宽分析

[Analyses of the time-delay signature and bandwidth of the chaotic output from a master-slave vertical-cavity surface-emitting laser dynamical system](#)

物理学报.2015, 64(22): 224213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224213>

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

[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](#)

物理学报.2015, 64(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204203>

硅基 III-V 族量子点激光器的发展现状和前景

[Quantum dot lasers on silicon substrate for silicon photonic integration and their prospect](#)

物理学报.2015, 64(20): 204209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204209>

用于铯原子内态操控的双光子拉曼激光的产生及应用

[Generation and application of two-photon Raman laser for manipulation of internal state of Cs atom](#)

物理学报.2015, 64(18): 184209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184209>

基于平行偏振光注入的1550 nm波段垂直腔表面发射激光器获取窄线宽光子微波的理论和实验研究*

孙波 吴加贵† 王顺天 吴正茂 夏光琼

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2015年8月25日收到; 2015年9月7日收到修改稿)

提出一种基于1550 nm垂直腔表面发射激光器(1550 nm-VCSEL)获取高质量微波信号的全光方案. 在该方案中, 采用波长位于VCSEL中被抑制模式的中心波长附近、振动方向与VCSEL中主导模式相同的偏振光注入(即平行注入)1550 nm-VCSEL获取高频微波, 并借助双光反馈对该高频微波的线宽进行窄化. 一方面, 基于VCSEL的自旋反转模型, 从理论上分析了采用该方案产生微波信号的可行性; 另一方面, 通过构建相应的实验系统, 对该方案产生的微波的特性进行初步实验研究. 实验结果表明: 在合适的注入条件下, 1550 nm-VCSEL能够产生30 GHz左右的微波信号, 但该信号的线宽较宽(百兆水平); 引入双光反馈后, 微波线宽可被压窄两个数量级以上, 得到了线宽低于1 MHz、信噪比大于40 dB的微波信号.

关键词: 垂直腔表面发射激光器, 平行偏振光注入, 光子微波, 双光反馈

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

DOI: 10.7498/aps.65.014207

1 引言

光载无线(radio-over-fiber, RoF)通信技术由于融合了无线微波通信的便捷性以及光纤通信的高带宽、远程低损耗等特性, 在通信技术体系中具有诱人的应用前景, 而作为关键支撑技术之一的光子微波技术已成为近年来的研究热点^[1-3]. 光子微波技术不仅在RoF通信技术中, 在微波光子信号处理、雷达等其他领域同样处于举足轻重的地位^[2]. 目前, 国内外学者已经提出了多种光子微波方案, 比如基于一定频差的两独立激光的拍频获得微波信号的光外差法^[4]、基于光电调制器的外部调制法^[5]以及基于多段集成的双模激光器的双模输出等^[6]. 这些方案各自具有突出的优势, 但同时不足之处也较明显, 如需要额外的相位锁定技术或昂贵的微波电子振荡源等.

近年来, 利用外部光注入半导体激光器(semiconductor laser, SL)的周期振荡来获取光子微波信号的方法吸引了相关领域学者的关注^[7-14]. 首先, 特定条件下的光注入SL产生的振荡频率可以远超SL的弛豫振荡频率^[7], 能以低廉的成本获得高频微波. 其次, 在合适条件下, 外部光注入SL的输出光谱具有单边带特征, 从而可有效地规避RoF系统中由光纤色散所导致的微波功率罚问题^[2]. 目前, 关于外部光注入SL获得微波的方案主要是基于边发射半导体激光器(EEL)^[7-14]. 而近年来飞速发展的垂直腔表面发射激光器(VCSEL)由于具有低阈值电流、高光纤耦合效率、易集成阵列化、低制造成本等独特优势^[15-28], 已成为取代EEL的强有力竞争者. 另外, 与EEL相比, VCSEL中存在偏振正交的两个模式(X模和Y模)^[15-21], 从而为发展偏振复用的多路系统提供了可能性.

* 国家自然科学基金(批准号: 61178011, 61275116, 61475127, 11474233, 61575163)、重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(批准号: 102060-20600512)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: XDJK2013B037, SWU114004)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mgh@swu.edu.cn

最近, 相继提出了一系列基于外光注入 VCSEL 的周期性振荡获取微波信号的方案^[22–24]. 如 2012 年, Quirce 和 Valle^[22] 理论分析了利用双光注入多横模 VCSEL 产生高频微波信号的可行性; 2013 年, 陈于淋等^[23] 对双光注入下 1550 nm-VCSEL 的非线性动力学特性进行了理论分析, 阐明了利用 1550 nm-VCSEL 获得两个相互正交光毫米波的可能性; 2015 年, Perez 等^[24] 从理论和实验两方面分析了两正交光注入 1550 nm-VCSEL 的微波信号特性, 但该文的实验结果却显示双光注入下 1550 nm-VCSEL 中产生的光子微波信号的线宽决定于两注入光的相位波动, 表明双光注入方案在获取窄线宽微波信号方面还值得商榷.

本文提出利用一偏振方向与 VCSEL 中主导模式相同的光注入到 1550 nm-VCSEL 中以获取窄线宽微波信号的新方案. 首先, 基于 VCSEL 的自旋反转模型 (SFM), 从理论上分析了采用该方案产生微波的可行性; 构建了相应的实验系统对方案进行了实验验证. 实验结果表明: 在合适的注入条件下, 1550 nm-VCSEL 能够产生 30 GHz 左右的微波信号, 但其线宽较宽; 进一步引入双光反馈后, 微波线宽被显著压窄, 得到了线宽低于 1 MHz、信噪比大于 40 dB 的微波信号.

2 系统结构

基于平行偏振光注入 1550 nm-VCSEL 获取窄线宽微波信号的系统模型如图 1 所示. 可调激光源 (TSL, Santec TSL-710) 的输出光经过偏振控制器 (PC1)、光纤耦合器 (FC1) 和光环行器 (CIR) 后注入到一个单模 1550 nm-VCSEL (Raycan) 芯片中. 其中 PC1 可改变注入光的偏振让其与 VCSEL 主导模式的偏振方向一致, 从而形成平行偏振光注入. 1550 nm-VCSEL 的输出光经 CIR 和 FC2 后分成了两个部分: 其中一部分经 FC3 分成两束, 一束经过 PC2, FC4, VA 以及 CIR 反馈回 1550 nm-VCSEL 中, 而另一束则经过 PC3, FC4, VA 以及 CIR 反馈回 1550 nm-VCSEL 中, 从而最终形成一个双光反馈系统; 而另一部分 1550 nm-VCSEL 的输出光被 FC5 再分成两部分, 其中一部分注入到光谱分析仪 (Ando AQ6317C) 中进行光谱分析, 而另一部分经过宽带光电探测器 (U2T-XPDV3120R, 带宽 70 GHz) 转换为电信号后进入宽带频谱分析仪 (Rohde & Schwarz-FSW, 带宽 67 GHz) 中进行功率谱测量. 实验中使用了激光器驱动源 (ILX-Lightwave LDC-3724B) 来控制 1550 nm-VCSEL 芯片的温度以及偏置电流.

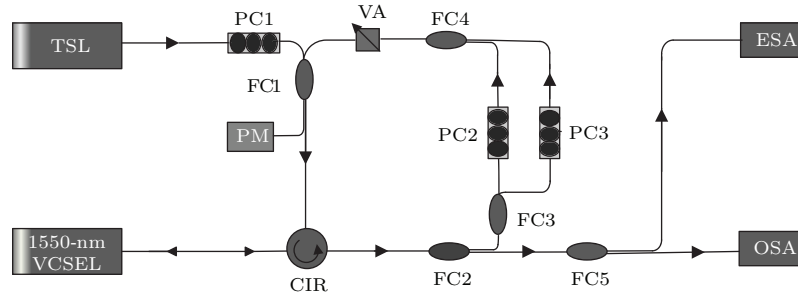


图 1 平行偏振光注入 1550 nm-VCSEL 获取微波信号的方案, 其中 TSL 为可调激光源, PC 为偏振控制器, PM 为光功率计, FC 为光纤耦合器, CIR 为光环行器, VA 为可变衰减器, ESA 为频谱分析仪, OSA 为光谱分析仪

Fig. 1. Schematic diagram of photonic microwave signal generation based on the parallel polarized optically injected 1550 nm-VCSEL. TSL, tunable semiconductor laser; PC, polarization controller; PM, power meter; FC, fiber coupler; CIR, circulator; VA, variable attenuator; ESA, electrical spectrum analyzer; OSA, optical spectrum analyzer.

3 理论模型与数值仿真结果

根据 SFM^[15,16], 并考虑外光注入以及双光反馈的影响, 1550 nm-VCSEL 动力学特性的速率方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{dE_x}{dt} = & k(1 + i\alpha)(NE_x - E_x + inE_y) \\ & - (\gamma_a + i\gamma_p)E_x + \eta_x E_{inj} e^{i2\pi(\nu_{inj} - \nu)t} \\ & + \xi_{f1} E_x(t - \tau_1) e^{-i2\pi\nu\tau_1} \\ & + \xi_{f2} E_x(t - \tau_2) e^{-i2\pi\nu\tau_2} + F_x, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_y}{dt} = & k(1 + i\alpha)(NE_y - E_y - inE_x) \\ & + (\gamma_a + i\gamma_p)E_y + \eta_y E_{inj} e^{i2\pi(\nu_{inj} - \nu)t} \\ & + \xi_{f1} E_y(t - \tau_1) e^{-i2\pi\nu\tau_1} \\ & + \xi_{f2} E_y(t - \tau_2) e^{-i2\pi\nu\tau_2} + F_y, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} = & -\gamma_e N(1 + |E_x|^2 + |E_y|^2) + \gamma_e \mu \\ & - i\gamma_e n(E_y E_x^* - E_x E_y^*), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} = & -\gamma_s n - \gamma_e n(|E_x|^2 + |E_y|^2) \\ & - i\gamma_e N(E_y E_x^* - E_x E_y^*). \end{aligned} \quad (4)$$

在方程中, 下标 x, y 分别表征 1550 nm-VCSEL 的 X, Y 偏振模; α 为线宽增强因子; γ_a 代表线性色散效应; N 表示载流子密度; γ_e 是载流子衰减率; E 代表光场的慢变振幅; γ_p 代表有源介质线性双折射效应; n 为两个自旋反转载流子密度的差值; κ 是光子衰减率; γ_s 为自旋翻转速率; η_x 和 η_y 分别为 X 偏振和 Y 偏振方向的注入系数; E_{inj} 表示注入光场的幅度; ν 为 1550 nm-VCSEL 自由运行时的中心频率, $\nu = (\nu_x + \nu_y)/2$, 其中 ν_x 为 VCSEL 的 X 偏振分量 (X -PC) 的频率, ν_y 为 Y 偏振分量 (Y -PC) 的频率; ν_{inj} 为注入光的频率; ξ_{f1} 和 ξ_{f2} 分别表示两个反馈回路的反馈系数; τ_1 和 τ_2 为两个反馈回路所对应的延迟时间; μ 代表归一化注入电流; F 为郎之万噪声源 [25],

$$F_x = \sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}} \left(\sqrt{N + n\xi_1} + \sqrt{N - n\xi_2} \right), \quad (5a)$$

$$F_y = -i\sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}} \left(\sqrt{N + n\xi_1} - \sqrt{N - n\xi_2} \right), \quad (5b)$$

其中, ξ_1, ξ_2 代表均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声, 而 β_{sp} 代表自发辐射速率。

根据四阶龙格-库塔法对方程 (1)–(4) 式进行数值求解, 在计算中使用的参数取值分别为 [26]: $\alpha = 2.2$, $\kappa = 125 \text{ ns}^{-1}$, $\beta_{sp} = 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_e = 0.67 \text{ ns}^{-1}$, $\nu = 193.5 \text{ THz}$ (对应的中心波长为 1550 nm). 根据实验中所测得的 1550 nm-VCSEL 的 X -PC 和 Y -PC 之间的频率差异, 本文中 $\gamma_p = 94.2 \text{ ns}^{-1}$.

首先, 不考虑光注入和光反馈的影响, 自由运行 1550 nm-VCSEL 的偏振分辨 P - I 特性曲线如图 2 所示. 从图 2 可以看出: 激光器中可能存在两

个正交偏振模式, 在 $1 < \mu < 1.88$ 区间中, Y -PC 为主导模式而 X -PC 被抑制; 当 $\mu \approx 1.89$ 时, 发生了偏振转换 [27,28], VCSEL 的主导模式由 Y -PC 转变为 X -PC; 当 $1.89 < \mu < 2.5$, X -PC 为主导模式而 Y -PC 被抑制。

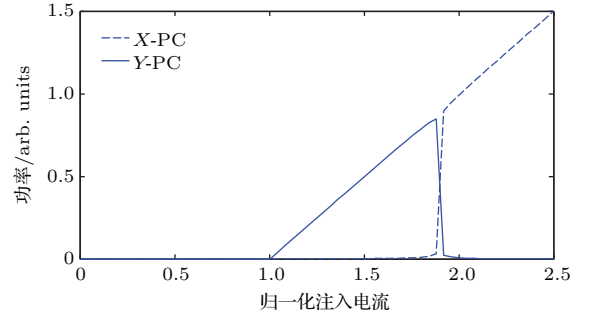


图 2 (网刊彩色) 1550 nm-VCSEL 自由运行时的 P - I 曲线, 其中虚线和实线分别代表 X 偏振分量和 Y 偏振分量

Fig. 2. (color online) P - I curve of free-running 1550 nm-VCSEL, where the dashed line and solid line represent X -PC and Y -PC, respectively.

图 3 给出了 $\mu = 1.8$ (左列) 和 $\mu = 1.96$ (右列) 时自由运行和平行偏振光注入 1550 nm-VCSEL 输出光谱以及光注入下输出的功率谱图. 如图 3(a1) 和图 3(b1) 所示, $\mu = 1.8$ 时自由运行 1550 nm-VCSEL 中占主导地位的为 Y -PC, 而当 $\mu = 1.96$ 时, Y -PC 被抑制而 X -PC 占主导地位, 两个模式之间的频率差异约为 30 GHz. 在平行偏振光注入下, 要求注入光的偏振方向与自由运行时激光器中的主导模式的偏振方向相同. 图 3(a2) 和图 3(b2) 分别给出了 $\mu = 1.8$ 和 1.96 时, 平行偏振光注入下激光器输出的光谱图. 其中图 3(a2) 的注入条件为 $\eta_x = 0$, $\eta_y = 20 \text{ GHz}$, $\nu_{inj} - \nu_y = -30 \text{ GHz}$. 从图 3(a2) 可以看出, 光注入 1550 nm-VCSEL 输出中包含两个功率相当、频率间隔为 30 GHz 的谱成分, 其功率谱如图 3(a3) 所示. 类似地, 当 $\mu = 1.96$ 时, 而注入条件为 $\eta_x = 20 \text{ GHz}$, $\eta_y = 0$, $\nu_{inj} - \nu_x = 30 \text{ GHz}$ 时的 1550 nm-VCSEL 输出的光谱和功率谱如图 3(b2) 和图 3(b3) 所示, 同样, 一个频率为 30 GHz 的微波信号可以得到. 因此, 采用波长位于 VCSEL 的被抑制模式附近, 而偏振与自由运行 VCSEL 的主导模式相同的偏振光注入, 可以在 1550 nm-VCSEL 中获得光子微波信号。

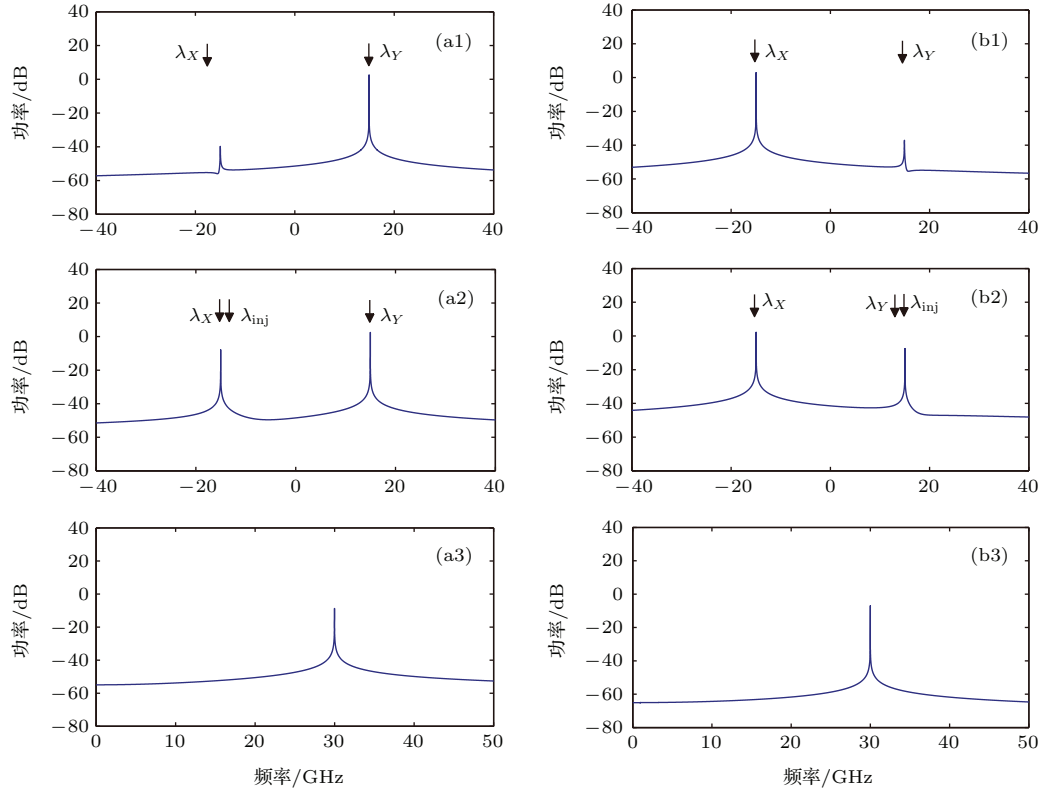


图3 (网刊彩色) $\mu = 1.8$ (左列), $\mu = 1.96$ (右列)时,自由运行(第一行)、光注入(第二行) 1550 nm-VCSEL 输出的光谱以及光注入 1550 nm-VCSEL 输出的功率谱(第三行)

Fig. 3. (color online) For $\mu = 1.8$ (left column) and $\mu = 1.96$ (right column), optical spectra of 1550 nm-VCSEL under free-running (the first row), optical spectra of 1550 nm-VCSEL under parallel polarized optical injection (the second row) and corresponding power spectra (the third row).

4 实验结果

图4给出了注入电流 I 分别为 7.7 mA (左列), 9.5 mA (右列) 条件下自由运行以及光注入 1550 nm-VCSEL 的实验测量得到的光谱和功率谱. 当注入电流为 7.7 mA 时, 自由运行 1550 nm-VCSEL 中位于波长 $\lambda_Y = 1553.121$ nm 的 Y-PC 占主导地位. 通过外部注入一偏振方向与 Y-PC 平行, 且波长位于自由运行 1550 nm-VCSEL 中被抑制模式所在波长附近的线偏振光后, 激光器输出的光谱中包含两个功率相近、波长差约为 0.255 nm (则对应频率差约为 31.7 GHz) 的光谱成分, 如图 4(a2) 所示. 经过宽带光电探测器转换后, 所得的功率谱如图 4(a3) 所示. 从图 4(a3) 可以看出, 微波信号成分主要集中在 31 GHz 附近, 结合图 4(a3) 中嵌入的功率谱细节曲线可知, 该微波信号线宽很宽, 几乎覆盖了约 1 GHz 的范围. 需要指出的是, 考虑到该功率谱曲线的不规则分布特征, 这里没有采用传统衡量微波线宽的半高全宽, 而使用了

标准偏差 $\Delta f_0 = [\langle \nu^2 \rangle - \langle \nu \rangle^2]^{1/2}$ (式中 ν 为频率值) 来描述信号的线宽^[29]. 图 4(a3) 所示的功率谱曲线对应的线宽 Δf_0 约为 233 MHz. 类似地, 对于注入电流 $I = 9.5$ mA 的情形(如图 4 的右列所示), 此时自由运行 1550 nm-VCSEL 中 X-PC 占主导地位, 而 Y-PC 被抑制. 通过引入平行偏振光注入后, 所得到的微波信号频率约为 35 GHz, 线宽 Δf_0 约 183 MHz.

图5是实验测量得到的引入双光反馈后的 1550 nm-VCSEL 的功率谱结果. 图 5(a1) 和图 5(b1) 为 0—50 GHz 大范围内测得的功率谱. 与图 4(a3) 和图 4(b3) 相比, 微波信号的线宽被明显压窄. 图 5(a2) 和图 5(b2) 给出了测得的功率谱细节, 在两种情况 1550 nm-VCSEL 下所产生的微波线宽 Δf_0 均小于 1 MHz. 相比无反馈时的情形, 引入双光反馈可使所产生的微波信号线宽压窄两个数量级以上; 同时, 采用双光反馈可以使其中每一个单光反馈所引起的侧峰得到很好的抑制, 所获得的微波信号的信噪比大于 40 dB.

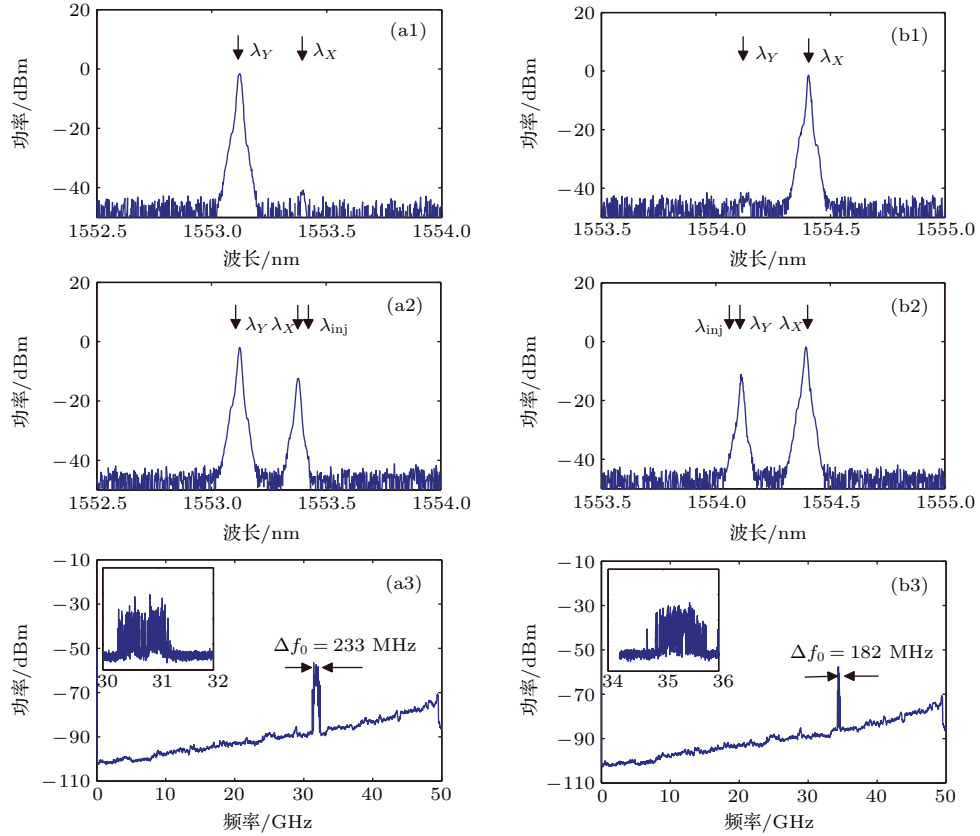


图4 (网刊彩色) 实验测得的自由运行 1550 nm-VCSEL 光谱(第一行), 平行偏振光注入后的 VCSEL 光谱(第二行) 及其对应的功率谱(第三行) 左列, $I = 7.7$ mA; 右列, $I = 9.5$ mA; 功率谱是在谱分析仪的分辨率带宽设置为 100 kHz 下得到的

Fig. 4. (color online) Experimentally measured optical spectra of free-running 1550 nm-VCSEL (the first row), optical spectra of the parallel polarized optically injected VCSEL (the second row) and corresponding power spectra (the third row), where left and right columns are for $I = 7.7$ mA and $I = 9.5$ mA, respectively. The resolution bandwidth of the electrical spectrum analyzer is set as 100 kHz.

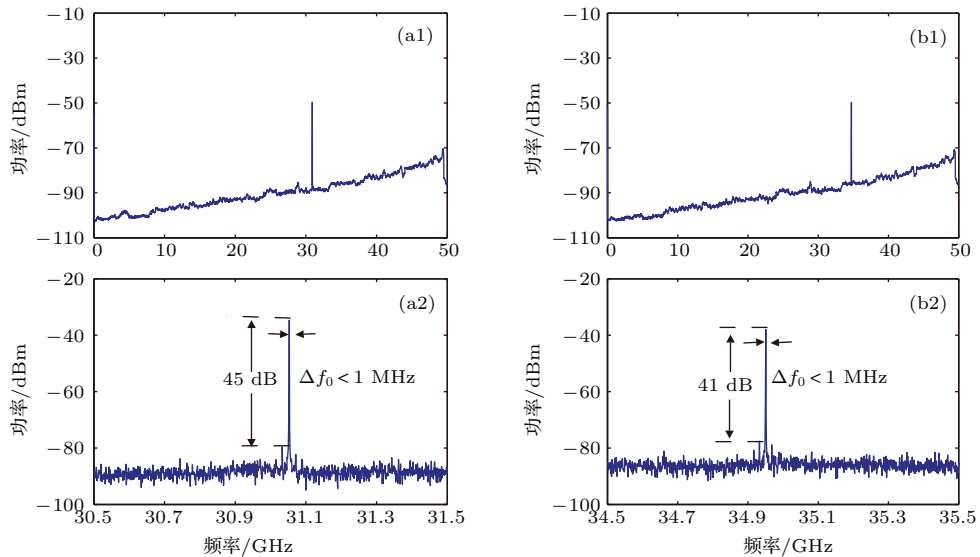


图5 (网刊彩色) 实验测得的引入双光反馈后的 1550 nm-VCSEL 的功率谱 (a1) 和 (b1) 是 0—50 GHz 范围的功率谱曲线; (a2) 和 (b2) 是相应的细节图; 左列, $I = 7.7$ mA; 右列, $I = 9.5$ mA; 谱分析仪的分辨率带宽设置为 100 kHz

Fig. 5. (color online) Experimentally measured power spectra of parallel polarized optically injected 1550 nm-VCSEL under double optical feedback. (a1) and (b1) are the power spectra within 0–50 GHz; (a2) and (b2) are the detailed distribution. Left and right columns are for $I = 7.7$ mA and $I = 9.5$ mA, respectively. The resolution bandwidth of the electrical spectrum analyzer is set as 100 kHz.

5 结 论

本文从理论和实验两个方面证实了基于平行偏振光注入 1550 nm-VCSEL 获取光子微波信号的全光方案的可行性. 首先基于 SFM 理论, 分析了该光子微波方案的可行性. 理论研究结果表明: 通过注入一波长位于自由运行 1550 nm-VCSEL 被抑制模式的波长附近, 偏振方向与自由运行 1550 nm-VCSEL 的主导模式相同的线偏振光, 可获得振动方向与自由运行 1550 nm-VCSEL 中主导模式相同的微波信号, 该理论研究结果被相应的实验研究结果所证实. 实验中所用的 1550 nm-VCSEL 的 X-PC 与 Y-PC 的频率差异约为 30 GHz, 通过平行偏振光注入, 实验获得了频率约 30 GHz 的微波信号, 但该微波信号的线宽较宽. 进一步引入双光反馈后, 微波信号的线宽被减小了两个量级以上, 最终实验获得了线宽低于 1 MHz、信噪比大于 40 dB 的微波信号. 由于本文提出的方案为全光结构, 无需使用昂贵的高频微波电子设备, 从而可望为发展低成本、高性能的窄线宽光子微波技术提供技术借鉴.

参考文献

- [1] Yao J P 2009 *J. Lightw. Technol.* **27** 314
- [2] Qi X Q, Liu J M 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1198
- [3] Pan B W, Lu D, Sun Y, Yu L Q, Zhang L M, Zhao L J 2014 *Opt. Lett.* **39** 6395
- [4] Hyodo M, Abedin K S, Onodera N 1999 *Opt. Commun.* **171** 159
- [5] Han J, Seo B J, Han Y, Jalali B, Fetterman H R 2003 *J. Lightw. Technol.* **21** 1504
- [6] Liu W S, Jiang M, Chen D, He S L 2009 *J. Lightw. Technol.* **27** 4455
- [7] Hwang S K, Liu J M, White J K 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 974
- [8] Chan S C, Liu J M 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 699
- [9] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 14921
- [10] 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]
- [11] Chan S C 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 421
- [12] Juan Y S, Lin F Y 2011 *IEEE Photon. J.* **3** 644
- [13] Liao Y H, Lin F Y 2013 *Opt. Express* **21** 23568
- [14] Fan L, Wu Z M, Deng T, Wu J G, Tan X, Chen J J, Mao S, Xia G Q 2014 *J. Light. Technol.* **32** 4660
- [15] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [16] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [17] Altes J B, Gatare I, Panajotov K, Thienpont H, Sciamanna M 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 198
- [18] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [19] Li N Q, Pan W, Yan L S, Luo B, Xu M F, Jiang N 2011 *Chin. Phys. B* **20** 060502
- [20] Jiang N, Pan W, Luo B, Xiang S Y, Yang L 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1094
- [21] Xiang S Y, Pan W, Li N Q, Yan L S, Luo B, Zhang L Y, Zhu H N 2013 *IEEE J. Quantum Electron.* **49** 274
- [22] Quirce A, Valle A 2012 *Opt. Express* **20** 13390
- [23] Chen Y L, Wu Z M, Tang X, Lin X D, Wei Y, Xia G Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104207 (in Chinese) [陈于淋, 吴正茂, 唐曦, 林晓东, 魏月, 夏光琼 2013 物理学报 **62** 104207]
- [24] Perez P, Quirce A, Valle A, Consoli A, Noriega I, Pesquera L, Esquivias I 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 5500614
- [25] Gatare I, Sciamanna M, Locquet A, Panajotov K 2007 *Opt. Lett.* **32** 1629
- [26] 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
- [27] Torre M S, Hurtado A, Quirce A, Valle A, Pesquera L, Adams M J 2011 *IEEE J. Quantum Electron.* **47** 92
- [28] Sciamanna M, Panajotov K 2006 *Phys. Rev. A* **73** 023811
- [29] Chan S C, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 1025

Theoretical and experimental investigation on the narrow-linewidth photonic microwave generation based on parallel polarized optically injected 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser*

Sun Bo Wu Jia-Gui[†] Wang Shun-Tian Wu Zheng-Mao Xia Guang-Qiong

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

(Received 25 August 2015; revised manuscript received 7 September 2015)

Abstract

Photonic microwave generation has attracted much attention in recent years due to its potential applications in various fields such as radio-over-fiber communication, signal processing and radar systems. So far, different photonic microwave generation schemes have been proposed and investigated, such as the optical heterodyne method based on the beat of two independent lasers with a certain wavelength difference, the external modulation method based on electro-optical modulator, the dual-mode beat method based on the monolithic dual-mode semiconductor lasers, and the optoelectronic microwave oscillator method based on optoelectronic feedback loops. These schemes have their own advantages and deficiencies. Unlike the above schemes, in this paper we propose an all optical scheme for generating high-quality microwave based on a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser (1550 nm-VCSEL). For such a scheme, high frequency microwave can be obtained based on a 1550 nm-VCSEL subjected to external optical injection, where the polarization of the injected light is the same as that of the dominant mode of the free-running 1550 nm-VCSEL (named parallel-polarized optical injection) and its wavelength is adjusted to being close to the wavelength of the suppressed polarization mode of the free-running 1550 nm-VCSEL. With the aid of double optical feedback, the linewidth of the obtained microwave can be narrowed. In this work, firstly, the feasibility of microwave generation based on parallel-polarized optically injected 1550 nm-VCSEL is analyzed theoretically by using the spin-flip model. Next, a corresponding experimental system is constructed, and the performance of microwave generation is preliminarily investigated experimentally. The experimental results show that 30 GHz microwave signals could be obtained based on a parallel-polarized, optically injected 1550 nm-VCSEL under suitable injection parameters, but the linewidth of microwave signal is relatively wide (hundreds of MHz). Finally, after introducing double optical feedback, the linewidth of microwave signal can be reduced by more than two orders of magnitude and narrowed to less than 1 MHz, meanwhile the signal-noise ratio is larger than 40 dB. This work is helpful to develop relevant techniques to acquire high-performance narrow linewidth photonic microwave.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting laser, parallel-polarized optically injection, photonic microwave, double optical feedback

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

DOI: 10.7498/aps.65.014207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178011, 61275116, 61475127, 11474233, 61575163), the Foundation of Chongqing College Key Yung Teachers, China (Grant No. 102060-20600512), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. XDJK2013B037, SWU114004).

[†] Corresponding author. E-mail: mgh@swu.edu.cn