

基于次谐波调制光注入半导体激光器获取窄线宽微波信号的实验研究

毛嵩 吴正茂 樊利 杨海波 赵茂戎 夏光琼

Acquiring narrow linewidth microwave signals based on an optical injection semiconductor laser under subharmonic microwave modulation

Mao Song Wu Zheng-Mao Fan Li Yang Hai-Bo Zhao Mao-Rong Xia Guang-Qiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 244204 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.244204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

互注入垂直腔表面发射激光器的多次偏振转换特性研究

Multiple polarization switching in mutually coupled vertical-cavity surface emitting lasers

物理学报.2015, 64(2): 024208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024208>

基于外光注入互耦合垂直腔面发射激光器的混沌随机特性研究

Chaotic randomness of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting laser by optical injection

物理学报.2015, 64(2): 024209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024209>

多波长红外激光二极管峰值光谱热漂移研究

Research on spectral peaks thermal-drifting in multi-wavelength infrared laser diode

物理学报.2014, 63(15): 154206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154206>

短外腔偏振旋转光反馈下 1550 nm 垂直腔面发射激光器的动力学特性研究

Dynamic characteristics of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser subject to polarization-rotated optical feedback: the short cavity regime

物理学报.2014, 63(1): 014203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014203>

表面液晶-垂直腔面发射激光器温度特性的研究

Temperature characteristics of VCSEL with liquid crystal overlay

物理学报.2013, 62(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234206>

基于次谐波调制光注入半导体激光器获取窄线宽微波信号的实验研究*

毛嵩¹⁾ 吴正茂¹⁾ 樊利¹⁾ 杨海波¹⁾ 赵茂戎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)

(2014年5月26日收到; 2014年7月1日收到修改稿)

实验研究了处于单周期振荡的光注入半导体激光器在频率等于单周期振荡频率一半的1/2次谐波调制下所产生的微波信号的特性. 实验结果显示: 在合适的注入条件下, 处于单周期(P1)振荡的光注入半导体激光器可输出频率可达26.5 GHz、光谱具有单边带结构的光生微波信号, 但微波信号的线宽比较宽(MHz量级); 通过采用频率为单周期振荡频率一半的次谐波信号调制光注入半导体激光器, 可将微波线宽从十几MHz压缩到几十kHz. 进一步分析了次谐波调制信号的功率以及频率对微波信号的相位噪声的影响, 并在由次谐波调制信号的功率和频率构成的参数空间绘制出了能实现次谐波频率锁定的分布区域.

关键词: 光注入半导体激光器, 单周期(P1)振荡, 光生微波, 次谐波调制

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

DOI: 10.7498/aps.63.244204

1 引言

基于微波/毫米波光载无线(radio-over-fiber, RoF)技术在下一代宽带无线通信中展现出的诱人的应用前景, 作为支撑微波/毫米波RoF的关键技术之一, 光微波/毫米波副载波信号的产生受到了人们的广泛关注^[1-7]. 考虑到长距离光纤中色散对光毫米波传输的影响, 要求作为RoF系统中心站的光毫米波源应具有单边带(SSB)光谱结构, 否则会因为光纤色散效应导致严重的色散致功率罚^[8]. 目前, 已经报道了多种光生SSB微波技术, 包括光外差法^[9]、SSB外调制法^[10]、双模半导体激光器法^[11]以及直接调制半导体激光器滤波法^[12]等. 这些技术方法各具特色, 但还存在进一步改进完善的空间. 例如, 光外差法可以得到大的调谐范围, 但通常需要高速复杂的电路对光位相进行锁

定; 单边带外调制不需要位相锁定技术, 但外调制器需求高的驱动电压同时可能会带来较大损耗; 基于多段式结构的双模激光器所产生的微波信号由于受到固定腔长的限制而可能导致调谐范围较小; 而直接调制半导体激光器结合光子滤波技术所产生的微波的调制深度则可能会受到半导体激光器的调制带宽限制.

在光注入下, 半导体激光器可呈现注入锁定、周期振荡、倍周期、混沌等多种非线性动力学状态输出^[13-16]并已被应用到光混沌保密通信、高速真随机数产生、全光时钟分频、微波光子学等相关领域. 其中, 基于光注入半导体激光器呈现的单周期非线性动力学状态获取微波信号由于具有一些独特的性能而受到相关领域学者的关注^[17-21]. 首先, 采用该方法可直接获得光谱具有单边带(SSB)结构的光生微波信号; 其次, 采用此方法产生的微波频率可达激光器弛豫振荡频率的3—4倍, 并能实

* 国家自然科学基金(批准号: 61178011, 61275116, 61475127)、重庆市自然科学基金(批准号: 2012jjB40011)和东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(批准号: K201418)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

现频率的连续可调;此外,该方法产生的微波副载波容易实现FM调制,从而减少了RoF系统中AM调制方式存在的衰减效应及非线性失真^[18].尽管该方法具有上述优点,但同时也存在一些关键技术问题有待解决,如所产生的微波频率不够稳定、需要引入额外的频率锁定技术等.多种频率稳定技术如光反馈^[22]、光电反馈^[23]、双锁定^[17]、光锁相环^[24]等相继被提出并进行了相关研究.其中,Simpson和Doft^[17]所提出的通过采用一个与单周期振荡频率相同的微波信号对激光器进行弱调制方案可得到频率非常稳定的微波信号.然而,由于在该方案中需要一个能产生与光生微波频率一致的微波信号的信号发生器,这对于产生高频微波信号而言必将导致系统成本会非常昂贵.同时,电子电路带宽以及激光器自身的特点也可能会导致高频信号难以有效地加载到激光器,从而难以实现稳定的高频微波信号的获取.

基于光注入下半导体激光器呈现的倍周期振荡动力学状态(其输出谱中包含基频 f_0 以及次频 $f_0/2$),Chan和Liu^[25]采用频率位于次频 $f_0/2$ 附近的微波信号调制半导体激光器实现了对倍周期振荡中基频 f_0 的频率锁定.尽管在该研究中所采用的微波调制信号频率是选择激光器在倍周期振荡下本身就具有的次频成分,但其研究结果提供了利用低频微波获取高性能高频微波的可能性.受这一工作启发,本文提出了一种 $1/2$ 次谐波锁定技术,即利用一个频率为光注入半导体激光器呈现的单周期振荡频率一半的次谐波信号对所获取的微波信号进行频率锁定.实验研究了基于光注入下半导体激光器呈现单周期振荡所产生的微波信号特性,并分析了采用频率为单周期振荡频率一半的次谐波信号调制激光器后微波信号性能的变化.

2 实验装置

基于次谐波调制光注入半导体激光器获取窄线宽微波信号的实验系统结构如图1所示.主激光器(ML)为一个可调光源(Ando AQ4321A),其输出的连续光经过偏振控制器(PC)、可变衰减器(VA)后分为两部分,一部分用于入射到光功率计(PM),而另一部分经过光环行器(OC)后注入到副激光器(SL),其为一单纵模分布反馈(DFB)半导体激光器.副激光器输出的光信号经过光

环行器和耦合器(FC)后分为两部分,一部分进入光谱仪(OSA, Ando AQ6317C)进行光谱分析,而另一部分经47 GHz带宽的光电探测器(PD, U2T XPDV2150R)转成电信号后输入到26.5 GHz带宽的频谱分析仪(ESA, Agilent E4407B)进行电谱分析.系统中各器件之间通过单模光纤连接.实验中,利用一台超低噪声电流源及精密温控系统(ILX-Lightwave LDC-3724B)将SL的温度稳定在 $16.95\text{ }^\circ\text{C}$ 、偏置电流控制在 $I = 25\text{ mA}$ (该激光器的阈值电流 $I_{th} = 13\text{ mA}$).此时,SL的弛豫振荡频率约为6.5 GHz.在该系统中,偏振控制器(PC)用于控制注入光的偏振方向,而可变衰减器用于控制注入光强度的大小.由于功率计(PM)探测到的光功率 P_i 与SL的注入光强度具有固定的比例关系,因此在本文中采用 P_i 描述注入光功率的大小.另外,对SL进行调制的次谐波信号由一个微波频率合成仪MFS(Agilent E8257D)产生,其输出功率 P_m 和频率 f_m 连续可调.

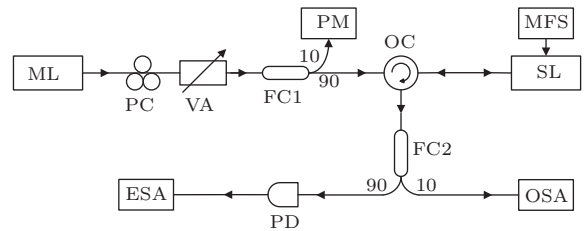


图1 基于次谐波调制光注入半导体激光器获取窄线宽微波信号的实验系统结构 ML, 主激光器; SL, 副激光器; PC, 偏振控制器; VA, 可调衰减器; FC, 光纤耦合器; PM, 光功率计; OC, 光环行器; MFS, 微波频率合成仪; PD, 光电探测器; ESA, 频谱分析仪; OSA, 光谱分析仪

3 实验结果

3.1 具有SSB光谱特性的光子微波的获取

通过调节注入光强度以及主、副激光器之间的频率失谐,可使光注入半导体激光器呈现单周期非线性动力学状态.图2给出了主、副激光器的频率失谐 $\Delta f (= f_{ML} - f_{SL}$,其中 f_{ML} , f_{SL} 分别为主、副激光器的激射频率)为9.16 GHz时,注入功率取不同值时SL输出的光谱(第一列)、功率谱(第二列)以及微波峰值功率附近的功率谱(第三列).其中光谱是以SL自由运行的激射频率 f_{SL} 为中心,而微波峰值功率附近的功率谱分布是以微波的峰值频率 f_0 作为参考频率.如图2(a)所示,当注入功率 $P_i = 49.62\text{ }\mu\text{W}$ 时,SL输出的光谱在以载波频率 f_c

(= -7.56 GHz)为中心, 两边相距 $f_0 = 16.72$ GHz 的位置有两相差 10 dB 的边带, 此时 SL 工作在双边带 (DSB) 单周期动力学态, 所产生的微波信号的峰值频率位于 $f_0 = 16.72$ GHz. 增大注入功率, 当 $P_i = 153.03 \mu\text{W}$ 时, 光谱中的两个主要成分分别位于 -11.78 GHz 以及 9.16 GHz 处, 这两个主要成分比其他的边带高出 20 dB 以上. 由此可以判断, 此时 SL 工作在 SSB 单周期动力学状态, 此时所产生的微波频率 f_0 为 20.94 GHz. 由于这种光谱具有 SSB 特性的光微波作为 RoF 的副载波能够有效抑制光纤色散引起的功率罚, 因此在后面讨论微波频率锁定的部分中, 我们将以此为例进行讨论. 当注入强度 P_i 增加到 401.75 μW (如图 2(c) 所示), SL 输出的单周期振荡依然具有 SSB 光谱结构, 此时所产生的微波频率 f_0 增加到 25.24 GHz. 继续增大注入光功率, 当 $P_i = 675.43 \mu\text{W}$ 时, 此时 SL 的中心频率锁定到注入光的频率, 功率谱为噪声谱(如图 2(d) 所示). 因此, 在频率失谐保持不变的条件

下, 在一定的注入光功率变化范围内, 可得到光谱具有 SSB 结构的光生微波, 同时微波的频率可通过改变注入光功率进行调节.

3.2 微波频率锁定

从图 2 的 iii 列可以看出, 由光注入半导体激光器所产生的微波信号, 其线宽比较宽, 这样的微波信号可能无法满足某些应用领域的要求. 考虑到此时所得到的频谱分布具有不规则起伏(如图 2 iii 列所示), 因此我们采用功率谱中功率分布的标准差来描述微波线宽 [26], 其计算公式为

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

$$\langle\nu^M\rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \nu^M P(\nu)^2 d\nu}{\int_{-\infty}^{\infty} P^2(\nu) d\nu} \quad (M = 1, 2), \quad (2)$$

其中, $\Delta\nu$ 表示微波线宽, ν 表示频率, $P(\nu)$ 表示激光器输出的功率谱分布.

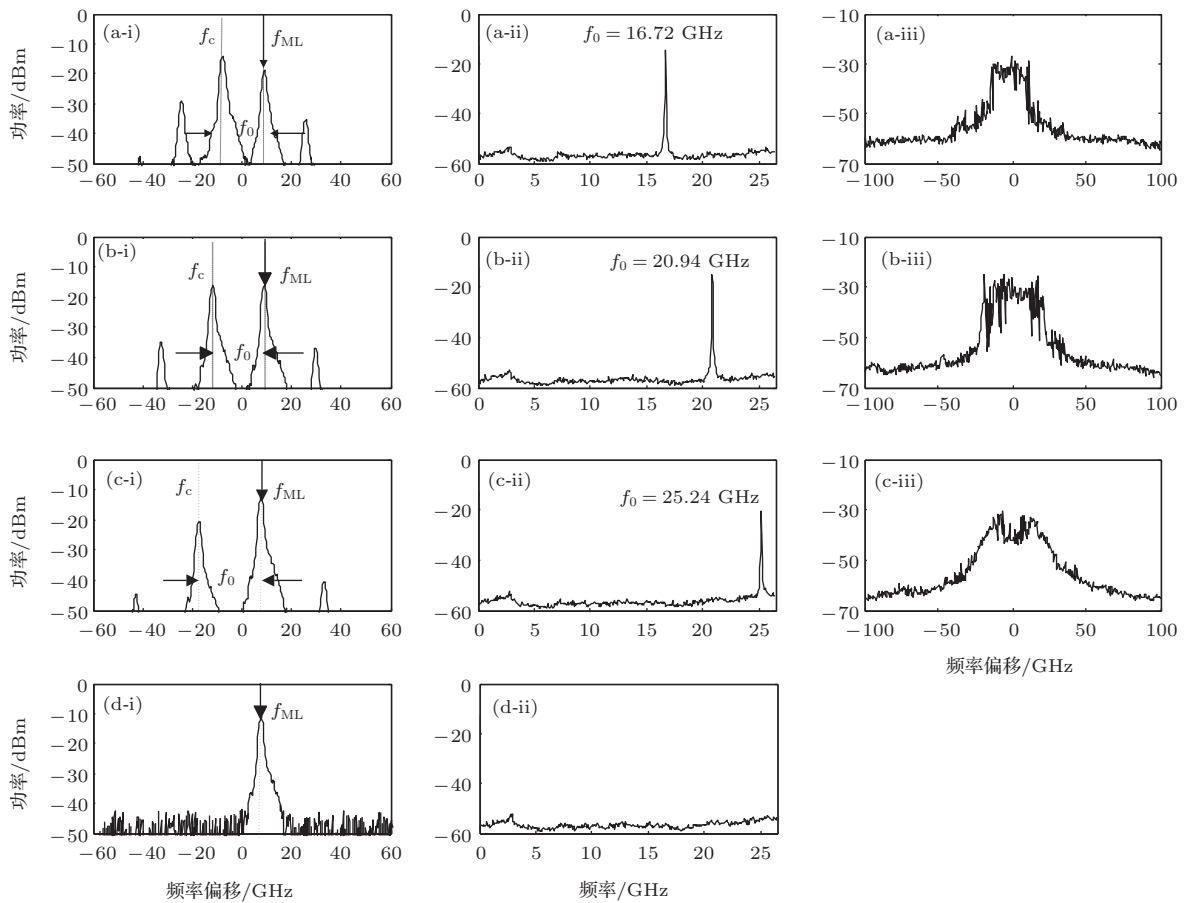


图 2 频率失谐 $\Delta f = 9.16$ GHz 时, SL 输出的光谱 (第一列)、功率谱 (第二列) 及功率谱在峰值频率附近的分布 (第三列) (a)–(d) 分别对应注入光功率 $P_i = 49.62, 153.03, 401.75, 675.43 \mu\text{W}$

在本文中, 我们采用次谐波频率锁定技术对微波信号频率进行锁定, 即采用频率约为单周期振荡频率 f_0 一半的次谐波信号调制光注入下的激光器. 图 3 (a) 给出了采用频率 $f_m = 10.63 \text{ GHz} (\approx f_0/2)$, $P_m = 10 \text{ dBm}$ 的次谐波信号调制副激光器时所得到的光生微波信号功率谱分布. 为了便于比较, 图 3 (b) 给出了直接由光注入半导体激光器所产生的中心频率 $f_0 = 20.94 \text{ GHz}$ 的光生微波信号的功率谱分布. 图 3 中的零频对应 20.94 GHz , 此时频谱分析仪 RBW 设置为 100 kHz . 从图中可以看出, 采用 $1/2$ 次谐波调制副激光器可大大降低光生微波信号的线宽, 微波线宽从 11.12 MHz 被压缩到 35.42 kHz .

上述实验结果表明: 基于光注入半导体激光器单周期振荡产生的微波信号, 在通过引入频率为微波频率 $1/2$ 的次谐波信号对副激光器进行调制时, 可以实现微波频率锁定从而得到线宽大大窄化的光生微波信号. 接下来, 我们将讨论要达到频率锁定, 对副激光器进行调制的次谐波信号的功率以及频率所需满足的要求. 首先, 我们固定次谐波信号的频率 $f_m = 10.63 \text{ GHz}$, 其近似为光生微波频率 $f_0 (= 20.94 \text{ GHz})$ 的 $1/2$, 考察功率变化对微波线宽的影响. 图 4 给出了频率 $f_m = 10.63 \text{ GHz}$, 功率 P_m 取不同值的次谐波信号对副激光器进行调制时, 实验得到的光生微波的功率谱分布. 此时, 频谱分析仪 RBW 设置为 300 kHz . 当 $P_m = -2.5 \text{ dBm}$ 时 (如

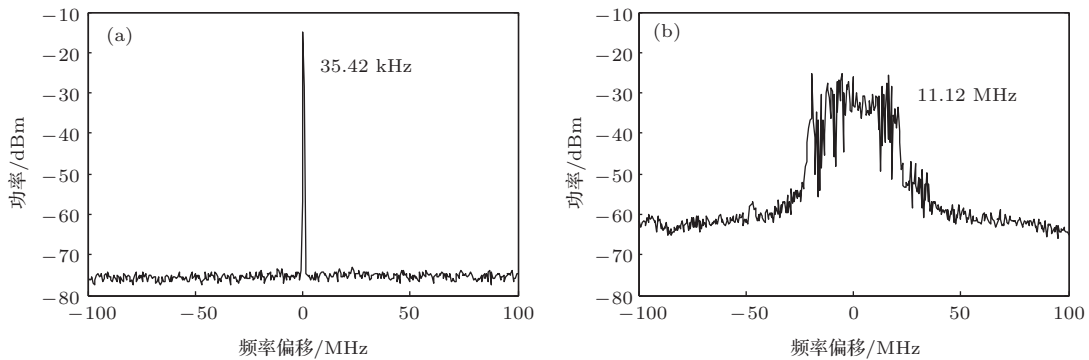


图 3 (a) 采用频率 $f_m = 10.63 \text{ GHz}$, 功率 $P_m = 10 \text{ dBm}$ 的次谐波信号调制副激光器后实验获得的光生微波的功率谱分布; (b) 直接由光注入半导体激光器产生的频率为 $f_0 = 20.94 \text{ GHz}$ 光生微波的功率谱分布, 频谱分析仪 RBW 设置为 100 kHz

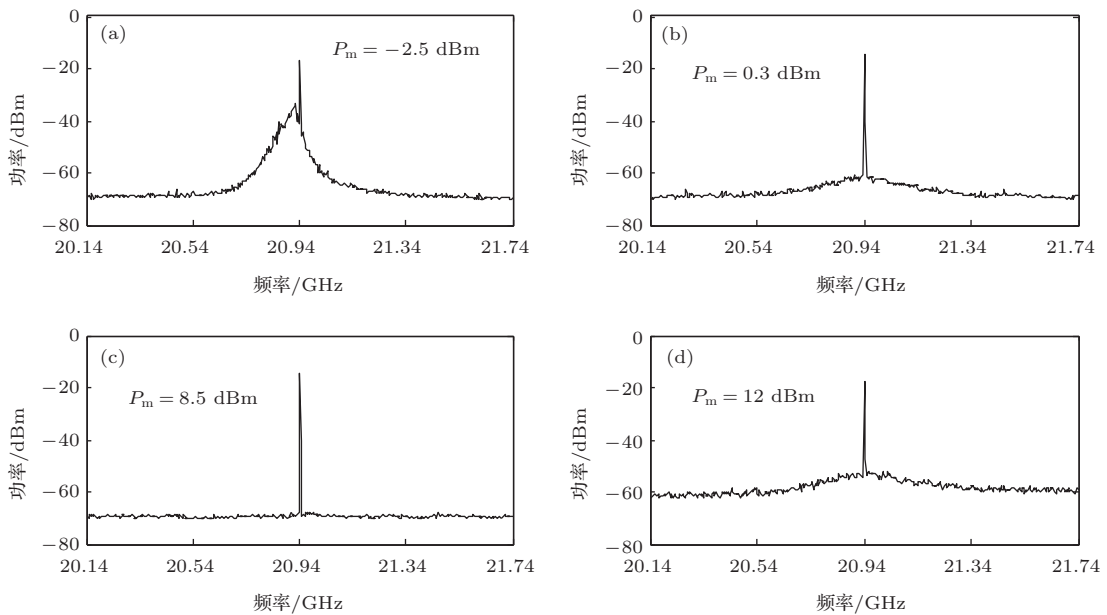


图 4 调制频率 $f_m = 10.63 \text{ GHz} (\approx f_0/2)$ 时, 不同功率的次谐波信号调制光注入半导体激光器得到的光生微波信号的功率谱分布 (a)—(d) 分别对应调制功率 $P_m = -2.5, 0.3, 8.5, 12 \text{ dBm}$

图4(a)所示), 外部调制信号较弱以至于无法有效锁定微波信号; 当 $P_m = 0.3$ dBm 时(如图4(b)所示), 绝大部分能量都集中在中心频率处, 虽然还能观察到基座, 但基座不明显; 当 $P_m = 8.5$ dBm 时(如图4(c)所示), 基座已经完全被抑制, 微波信号的频率被锁定; 继续增大次谐波信号功率, 当 P_m 增大到12 dBm 时(如图4(d)所示), 此时所产生的微波信号的基座能量较大, 频率锁定效果变差. 这是因为过强的调制信号加载到副激光器后会导致副激光器不再呈现单周期非线性动力学行为.

依据文献[25], 微波信号相位噪声大小是一种判定微波信号是否被锁定的依据. 图5给出了频率 $f_m = 10.63$ GHz 的次谐波信号对副激光器进行调制时光生微波信号的相位噪声随调制功率 P_m 的变化曲线. 从图中可以看出: 当 $P_m < -2$ dBm 时, 微波信号的相位噪声较大; P_m 从 -2 dBm 逐渐增大到12 dBm 的过程中, 微波信号的相位噪声维持在一个较低的水平(均低于 0.1 rad²); 当 P_m 大于12 dBm 以后, 相位噪声随着 P_m 的增加而逐渐增大, 此时光注入半导体激光器在次谐波信号的调制下已不再呈现单周期态. 在下面的讨论中, 当微波信号的相位噪声低于 0.1 rad² 时, 我们认为光生微波信号的频率被锁定.

接下来, 我们考察当次谐波信号功率 P_m 固定, 而频率 f_m 在 $f_0/2$ 附近变化时, 输出光生微

波信号的频率锁定情况. 图6给出了次谐波信号功率 $P_m = 7.5$ dBm, 频率取不同值时实验获得的光生微波信号的功率谱分布. 测试过程中, 频谱分析仪RBW设置为300 kHz. 图6(a)对应 $f_m = 10.57$ GHz 的情形, 此时 $2f_m$ 与 f_0 之间频差为0.2 GHz. 从图中可以看出, 此时副激光器所加载次谐波信号不能对微波信号的频率进行有效锁定, 在高频端还存在一个宽的边带. 逐渐增大 f_m , 当 $f_m = 10.60$ GHz (相应地, $2f_m$ 与 f_0 之间频差为0.26 GHz) 时, 微波信号的边带得到了很好的抑制(如图6(b)所示). 当 f_m 增加到10.85 GHz (如图6(c)所示), 微波信号被完全锁定. 继续增加 f_m 到11.35 GHz (如图6(d)所示), 此时 $2f_m$ 与 f_0 之间

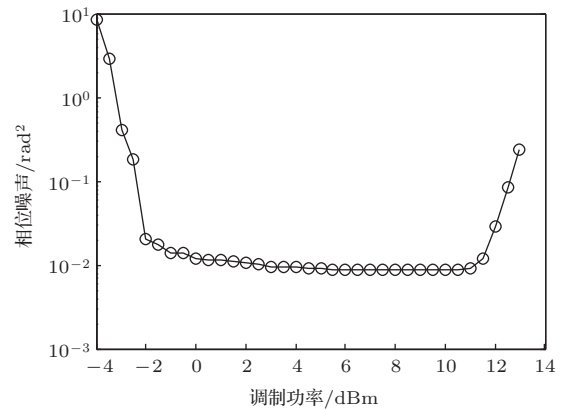


图5 调制频率 $f_m = 10.63$ GHz ($\approx f_0/2$) 的次谐波信号调制光注入半导体激光器所获得的微波信号相位噪声随调制功率 P_m 的变化

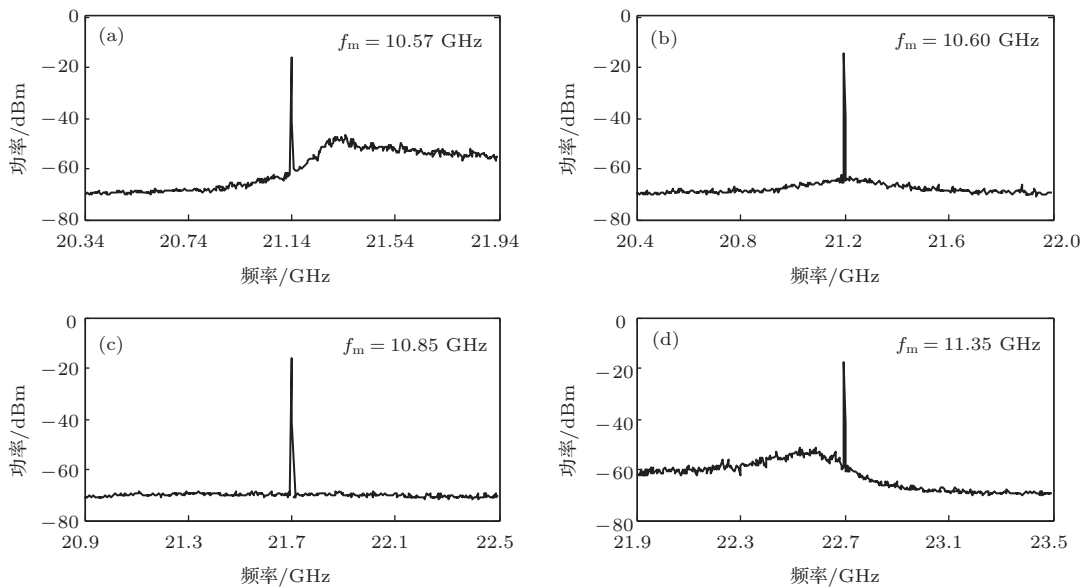


图6 调制功率 $P_m = 7.5$ dBm, 频率取不同值的次谐波信号调制副激光器后所获得的微波信号的功率谱分布 (a)—(d) 分别对应调制频率 $f_m = 10.57, 10.60, 10.85, 11.35$ GHz

频差达到 1.76 GHz, 在微波信号的低频端出现明显的边带, 此时处于失锁状态. 以上实验结果证实: 微波信号出现最佳锁定时, 次谐波信号的频率并非严格等于 $f_0/2$. 这是因为, 副激光器上加载的次谐波信号会导致副激光器在光注入下所产生的单周期振荡频率产生漂移. 这与自脉冲半导体激光器在调制信号作用下所观察到固有振荡频率漂移现象 [27] 的物理原因是相似的. 因此, 次谐波信号的频率需要在光注入半导体激光器产生的单周期振荡频率的 1/2 附近进行调节, 才能获得频率稳定的微波信号.

图 7 给出了功率 $P_m = 7.5$ dBm 时, 光生微波信号相位噪声随调制频率 f_m 的变化. 如图所示, 在功率 $P_m = 7.5$ dBm 的次谐波信号调制下, 当 f_m 与 $f_0/2$ 的差值位于 0.11—0.84 GHz 范围内, 微波信号的相位噪声维持在一个较小的水平, 微波信号频率被锁定. 但当 f_m 与 $f_0/2$ 的差值不在这一区域内, 微波信号的相位噪声将显著增加, 处于失锁状态.

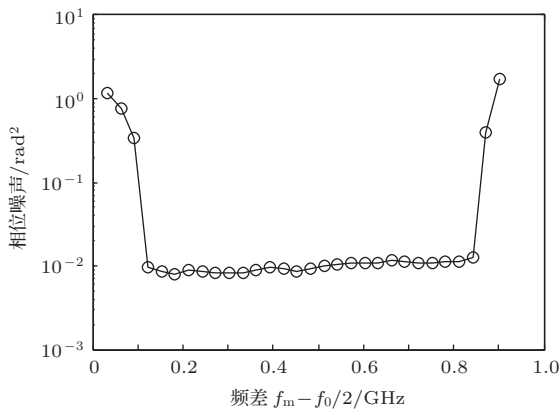


图 7 调制功率 $P_m = 7.5$ dBm, 光生微波信号相位噪声随调制频率 f_m 的变化

以上实验结果显示, 采用 1/2 次谐波频率锁定技术所得到的微波信号的特性与次谐波信号的功率 P_m 以及频率 f_m 相关. 在图 8 中, 我们绘制了能够实现微波频率锁定的次谐波信号功率 P_m 以及频率 f_m 的区域图. 如图所示, 随着调制功率 P_m 的增加, 能够实现微波频率锁定的次谐波信号频率 f_m 的范围逐渐增大; 为了实现频率锁定, 副激光器上加载的次谐波信号频率需大于 $f_0/2$, 且随着 f_m 的增加, 能实现频率锁定的次谐波信号功率 P_m 的范围呈现先增加后逐渐减小的趋势. 当 $P_m > 12$ dBm 或 $f_m - f_0/2 > 1.6$ GHz, 将无法实现对微波频率的锁定.

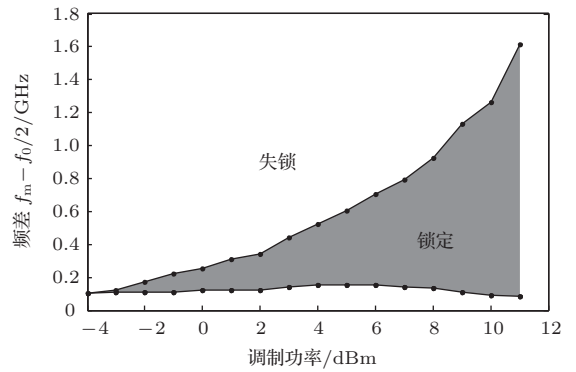


图 8 次谐波调制副激光器实现微波信号频率锁定的区域

4 结 论

本文实验研究了光注入半导体激光器在次谐波调制下所获得的光生微波信号的特性. 研究结果表明: 在适当的光注入强度与频率失谐下, 光注入半导体激光器可呈现具有 SSB 光谱结构的单周期振荡非线性动力学状态, 在该状态下所获得的光生微波信号的频率 f_0 可调谐, 但微波线宽较宽 (MHz 量级). 利用次谐波微波锁定技术, 通过引入一个频率约为光生微波信号频率一半 ($f_m \approx f_0/2$) 的次谐波信号弱调制光注入下的半导体激光器, 可使微波信号线宽从十几 MHz 压缩至几十 kHz. 进一步地, 通过固定次谐波调制信号的调制功率 P_m 和调制频率 f_m 其中之一, 而连续变换另外一个参量, 实验研究了光生微波信号的相位噪声变化, 并给出了为了获得较好的频率锁定效果, 次谐波调制信号的功率和频率所应满足的参数范围. 尽管本文的研究是基于微波信号的 1/2 次谐波锁定获取高性能微波信号, 但初步的实验结果表明该技术具有向利用微波信号的 1/3、1/4 等更高阶的次谐波来进行微波锁定的推广可能性, 因此本文的研究在低成本获取高性能高频微波/毫米波方面具有潜在的应用前景.

参考文献

- [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, Shimizu S, Toluda K, Kim Y H 2006 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **54** 1953
- [4] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2006 *Opt. Lett.* **31** 2254
- [5] Kim A, Joo Y H, Kim Y 2004 *IEEE Trans. Consumer Electron.* **50** 517
- [6] Kaszubowska A, Barry L P, Anandarajah P 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 852

- [7] Liu G H, Pei L, Ning T G, Gao S, Li J, Zhang Y J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094205 (in Chinese) [刘观辉, 裴丽, 宁提纲, 高嵩, 李晶, 张义军 2012 物理学报 **61** 094205]
- [8] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 14921
- [9] Hyodo M, Abedin K S, Onodera N 1999 *Opt. Commun.* **171** 159
- [10] Han J, Seo B J, Han Y, Jalali B, Fetterman H R 2003 *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* **21** 1504
- [11] Wake D, Lima C R, Davies P A 1996 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** 578
- [12] Ryu H S, Seo Y K, Choi W Y 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1942
- [13] Simpson T B, Liu J M, Huang K F, Tai K 1997 *Quantum Semiclass. Opt.* **9** 765
- [14] Yan S L 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 996 (in Chinese) [颜森林 2009 光学学报 **29** 996]
- [15] Ren X L, Wu Z M, Fan L, Xia G Q 2014 *Chin. Sci. Bull.* **59** 259 (in Chinese) [任小丽, 吴正茂, 樊利, 夏光琼 2014 科学通报 **59** 259]
- [16] Zhang M, Liu T, Wang A, Zhang J, Wang Y 2011 *Opt. Commun.* **284** 1289
- [17] Simpson T B, Doft F 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 1476
- [18] Chan S C 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 421
- [19] Qi X Q, Liu J M 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1198
- [20] Chan S C, Diaz R, Liu J M 2008 *Opt. Quantum Electron.* **40** 83
- [21] 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]
- [22] Zhuang J P, Chan S C 2013 *Opt. Lett.* **38** 344
- [23] Chan S C, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 1025
- [24] Simpson T B 1999 *Opt. Commun.* **170** 93
- [25] Chan S C, Liu J M 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 1142
- [26] 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]
- [27] Winful H G, Chen Y C, Liu J M 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 616

Acquiring narrow linewidth microwave signals based on an optical injection semiconductor laser under subharmonic microwave modulation*

Mao Song¹⁾ Wu Zheng-Mao¹⁾ Fan Li¹⁾ Yang Hai-Bo¹⁾
Zhao Mao-Rong¹⁾ 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 26 May 2014; revised manuscript received 1 July 2014)

Abstract

The performances of microwave signals generated by an optically injected semiconductor laser operated at the period-one (P1) oscillation under 1/2 subharmonic microwave modulation, are investigated experimentally. The experimental results show that under suitable injection condition, the microwave signal output from an optically injected semiconductor operated at P1 oscillation can reach a frequency of 26.5 GHz limited to the experimental conditions and may have a single sideband optical spectrum structure, but the linewidth of the microwave signal is relatively wide (on the order of MHz). After adopting 1/2 subharmonic locking technique, the linewidth of the obtained microwave signal can be reduced from tens of MHz to tens of kHz. Furthermore, we analyze the influences of the power and frequency of the subharmonic microwave on the phase noise of the generated microwave signals, and further map the subharmonic microwave locking region in the parameter space of the power and frequency of the subharmonic microwave.

Keywords: optically injected semiconductor laser, period-one (P1) oscillation, photonic microwave generation, subharmonic microwave modulation

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

DOI: 10.7498/aps.63.244204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178011, 61275116, 61475127), the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant No. 2012jjB40011), and the Open Research Program of State Key Laboratory of Millimeter Waves of Southeast University, China (Grant No. K201418).

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