

# 基于光注入半导体激光器单周期振荡的光子微波产生及全光线宽窄化\*

林晓东<sup>1)2)</sup> 邓涛<sup>1)2)</sup> 解宜原<sup>2)</sup> 吴加贵<sup>1)2)</sup> 陈建国<sup>1)</sup> 吴正茂<sup>2)</sup> 夏光琼<sup>2)†</sup>

1) (四川大学电子信息学院, 成都 610064)

2) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2012年6月5日收到; 2012年6月20日收到修改稿)

本文对基于光注入半导体激光器的单周期动力学态产生光子微波并利用光反馈压缩其线宽进行了实验研究. 研究表明: 通过适当调节注入参数, 能对该方法产生的光子微波频率在数十 GHz 范围内进行连续、大范围地调节; 通过引入光反馈并精细调节反馈强度, 光子微波的线宽能够从 40—100 MHz 的范围被压缩约两个数量级至 300—900 kHz 范围; 反馈长度对光子微波的线宽几乎没有影响, 但当反馈长度精细变化时, 光子微波频率会出现一定范围内的周期性漂移.

**关键词:** 半导体激光非线性动力学, 单周期, 光子微波, 线宽

**PACS:** 42.55.Px, 42.65.Sf

## 1 引言

20 世纪 80 年代以来, 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<sup>[1-4]</sup>. 在光注入半导体激光器系统中, 通过调节注入功率和频率失谐, 激光器将运行在一系列包括稳定的注入锁定态、周期振荡态和混沌态等不同的动力学状态. 这些复杂的动力学状态可以应用于不同的技术领域, 如带宽增强<sup>[5-7]</sup>、啁啾压缩<sup>[8]</sup>、光子微波应用<sup>[9,10]</sup>、混沌同步及通信<sup>[11-13]</sup> 以及宽带波形产生<sup>[14]</sup> 等.

当前, 一种新兴的能够将光纤通信和无线通信技术完美结合的光载无线 (radio-over-riber, RoF) 技术<sup>[15,16]</sup> 逐渐成为人们研究的热点之一. RoF 系统运用光纤作为中心站与基站之间的传输链路, 直接利用光载波来传输高频射频信号. 信号的调制、交换、控制等复杂的信号处理都集中在中心站, 基站

仅实现简单的光电转换和无线信号的发射. 这种方式使系统具有了一些独特的优势, 如能够实现长距离低损耗、低色散传输, 系统硬件设计更加简化, 系统的体积、重量以及成本均得到降低, 信号不受电磁干扰, 信号传输速率得到提高等等. 因此, RoF 系统已逐渐成为未来高速宽带无线通信的发展方向, 而光子微波的产生是 RoF 系统中的一个非常重要的关键技术. 在过去的十多年中, 人们提出了很多基于半导体激光器的光生微波方法, 如直接调制法<sup>[17]</sup>、光外差法<sup>[18]</sup>、光锁相环法<sup>[19]</sup>、自脉动和锁模激光器<sup>[20]</sup>、双模激光器<sup>[21]</sup> 等. 尽管它们各自都具有一些优势, 但同时不足之处也比较突出, 如可调节范围较小, 或稳定性较差, 或需要复杂、昂贵的电子设备作为辅助等等<sup>[22]</sup>.

近年来, 一种新兴的基于光注入半导体激光器单周期 (period-one, P1) 动力学态的光子微波产生技术引起了人们的关注<sup>[23,24]</sup>. 在适当的光注入条件下, 激光器将运行在单周期振荡态, 由于该振荡态的诸多优点而使其成为一种全新的高速光子

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60978003, 61078003, 61178011, 11004161, 61275116)、重庆市自然科学基金 (批准号: CSTC2012jjB40011, CSTCjjA40015) 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.

† E-mail: gqxia@swu.edu.cn

微波源. 首先, 由该方法产生的微波频率能够进行大范围、连续调节, 目前观察到的最高频率可达 100 GHz<sup>[25]</sup>. 其次, 由 P1 态产生的微波频率很容易通过注入锁定、谐波锁定、相位锁定等<sup>[26]</sup>方法进行稳定. 此外, P1 态输出的光谱显示出近单边带的特性, 这有利于消除 RoF 系统中由于光纤色散引入的功率惩罚<sup>[27]</sup>. 并且由于该方法基于半导体激光器的非线性动力学, 属于一种全光产生光子微波的方法, 因此不需要额外的、昂贵的电子设备, 这更有利于简化系统结构以及降低系统成本.

尽管基于光注入半导体激光器单周期动力学态的光子微波产生技术具有以上的诸多优点, 但是通常条件下所产生的光子微波线宽相对较宽 (约为 40—100 MHz), 这将在一定程度上限制其在窄线宽微波领域的应用. 为此, 人们提出了一些线宽压缩的方法, 如光电反馈<sup>[23]</sup>、双锁定<sup>[28]</sup>、光锁相环<sup>[29]</sup>、光外差法<sup>[30]</sup>等. 然而, 这些方法都需要一个外部的微波源和高速光电转换器, 这同样增加了系统的复杂程度和成本.

半导体激光器在光注入、光反馈的共同作用下获取超宽带微波信号已有报道<sup>[31]</sup>, 其原理是通过较强的光反馈使激光器工作在混沌态, 结合光注入的带宽增强效应从而获得超宽带的微波信号. 而在本文中, 我们则基于半导体激光器在较弱的注入强度下呈现的 P1 状态产生窄带微波信号, 并通过光反馈对微波信号的线宽进行全光压缩. 通过适当调节注入强度和频率失谐, 由 P1 态产生的光子微波频率能够 10—100 GHz 的范围内连续地调节. 通过引入光反馈并精细地调节反馈强度后, 光子微波线宽能够从 40—100 MHz 的范围被压缩约两个数

量级至 300—900 kHz 的范围. 由于该方案在整个过程中均采用全光方法, 不需要额外的昂贵的电子设备, 因而能够有效降低系统的成本及其复杂程度, 是一种非常具有应用潜力的高质量光子微波产生方法.

## 2 实验装置

基于光注入半导体激光器产生光子微波的实验装置如图 1 所示. 其中使用的半导体激光器 (SL) 为单纵模分布反馈 (DFB) 激光器, 其阈值电流约为 12 mA, 弛豫振荡频率约为 5.2 GHz. 实验中, 利用一台高精度、低噪声半导体激光器控制器 (ILX-Lightwave LDC-3724B) 将 SL 的温度稳定在 17.24 °C, 并将其偏置电流控制在 26.08 mA, 此时测得 SL 的激射波长为 1547.82 nm. TLS 为可调谐激光器 (Ando AQ4321A), 其波长调节范围为 1480—1580 nm, 精度为  $\pm 0.01$  nm. 通过控制 TLS 的输出强度以及波长可以调节光注入的强度和频率失谐使 SL 运行在 P1 态. TLS 输出的光首先经过一个增益为 25 dB 的掺铒光纤放大器 EDFA (Corning PureGain™ 2500C) 进行放大, 然后通过一个可调光衰减器 (VA) 注入到 SL 中. 其中, 光纤耦合器 FC1 (分光比为 20:80) 将输出光分为两部分: 其中 20% 的能量进入光功率计, 由于功率计探测功率到的功率  $P_{in}$  与 SL 的注入光功率具有固定的比例关系, 因此在本文中我们采用  $P_{in}$  描述注入光功率的大小; 另 80% 的能量由一个非球面镜 L1 将其耦合到空间, 并最终注入到 SL 中. SL 的输出光通过分束器 BS2 和 BS1 透射后, 经非球面镜

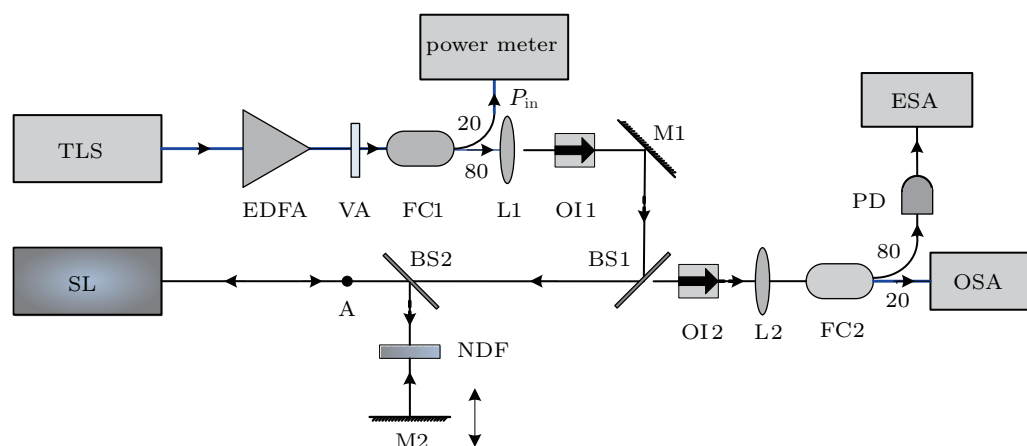


图 1 实验系统结构图 (TLS 为可调谐激光器; SL 为激光器; EDFA 为掺铒光纤放大器; VA 为可调光衰减器; FC1, FC2 为光纤耦合器; L1, L2 为非球面透镜; OI1, OI2 为空间光隔离器; M1, M2 为反射镜; BS1, BS2 为分束器; NDF 为中性密度衰减器; PD 为高速光电转换器; OSA 为光谱分析仪; ESA 为频谱分析仪; Power Meter 为光功率计)

L2 耦合进光纤, 再由光纤耦合器 FC2(分光比为 20:80) 分为两部分, 一部分 20% 的光直接进入一个波长范围为 600—1750 nm 且精度为 0.01 nm 的光谱分析仪 OSA (Ando AQ6317C) 对其光谱进行探测, 另一部分 80% 的光由一个带宽为 12 GHz 的高速光电转换器 (PD, New Focus 1544-B) 转换成电信号, 再由一个频率范围为 9 kHz 到 26.5 GHz 的频谱分析仪 ESA(Agilent E4407B) 对其频谱进行分析 (对于超出 26.5 GHz 的频率, 则通过对光谱仪所测得的光谱进行分析得到). 实验系统中光隔离器 OI1 和 OI2 分别保证光从 TLS 到 SL 的单向注入以及隔离光纤端面反射回 SL 的光. 光反馈由反射镜 M2 通过分束镜 BS2 引入, 反馈强度和反馈长度分别由一个中性密度衰减器 NDF 和一个滑动导轨使其前后滑动来进行控制.

### 3 实验结果

#### 3.1 光子微波的产生

首先考查在没有光反馈的情况下, 基于光注入半导体激光器的 P1 态产生的光子微波频率随光注入参数的变化. 图 2 为光注入半导体激光器的各

非线性动力学态的演化过程. 其中左列为光谱, 其横坐标为频率偏差, 中点为 SL 自由运行时的频率; 右列为频谱. 图中  $f_c$  为腔谐振频率,  $f_{in}$  为频率失谐,  $f_0$  为光子微波频率, 图 2(d) 中的点线表示 SL 自由运行时的光谱. 在实验中, TLS 和 SL 之间的频率失谐固定为  $f_{in} = 5$  GHz, 而光注入功率由可调衰减器 VA 进行调节. 从图中可以看出, 随着注入功率的增加, SL 将运行在不同的动力学态. 当注入功率为  $P_{in} = 0.32 \mu\text{W}$  时 (如图 2(a) 所示), 此时的输出频率为注入光频率与 SL 自由运行频率之差, 即  $f_0 = f_{in} = 5$  GHz, 激光器运行在四波混频状态; 随着注入功率的增加, 由于增益饱和效应, 此时光增益会减小而介质折射率会增加, 此时的腔谐振频率会发生红移. 如图 2(b-1) 所示, 当注入功率增大到  $P_{in} = 18.86 \mu\text{W}$  时,  $f_c$  发生红移, 因此图 2(b-2) 显示其光子微波频率增大到  $f_0 = 9.2$  GHz. 从光谱中可以看出, 此时的激光器工作在一个双边带 P1 态下, 其特征是谐振频率  $f_c = f_{in} - f_0$ , 且两个边带具有相同的强度; 当注入功率进一步增大到  $P_{in} = 181.61 \mu\text{W}$  时, 如图 2(c-1) 所示,  $f_c$  继续红移, 此时的光子微波频率增大到了  $f_0 = 15.5$  GHz, 且激光器工作在一个单边带 P1 态下, 即光谱中两个主峰为  $f_c = f_{in} - f_0$  和  $f_{in}$ , 它们比相邻的边带强

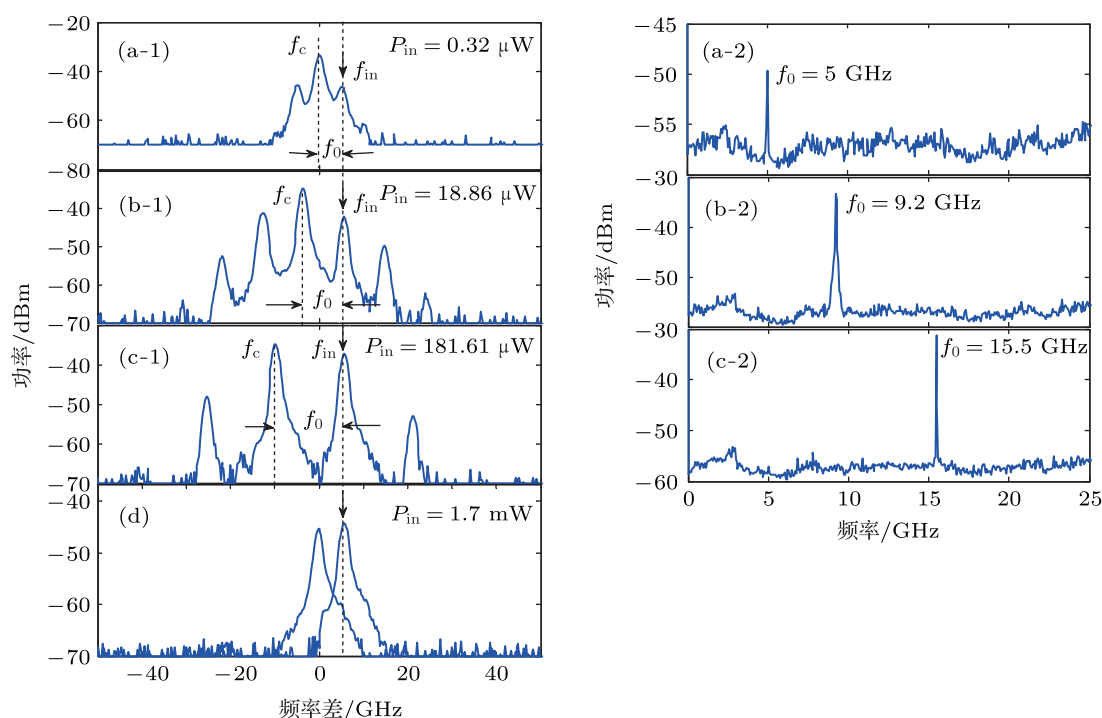


图 2 频率失谐  $f_{in} = 5$  GHz、不同光注入功率  $P_{in}$  下, SL 输出的光谱及频谱图 (左列为光谱图, 右列为频谱图)

度大了约 15 dB. 而这种具有单边带特征的光子微波正是 RoF 系统中所需要的微波源. 从以上几个图可以看出, 随着注入功率的增加, 谐振频率不断发生红移, 从而使光子微波频率不断增加. 当注入光功率达到  $P_{in} = 1.7$  mW 时, 如图 2(d) 所示, 此时的注入光功率太强以至于使 SL 工作在一个注入锁定状态下, 即输出为一稳态光且频率为  $f_{in}$ .

图 3 为在不同的频率失谐下, 光子微波频率 (即 P1 振荡频率) 随注入功率的变化规律. 从图中可以看出, 在不同的频率失谐下, 微波频率将随注入功率的增大而增大, 直到最后进入其他的复杂动力学态. 越大的频率失谐将有利于获得更大的微波频率, 但同时也需要更大的光注入功率才能使激光器工作在 P1 态. 基于本实验中的设备条件, 在实验中观察到的微波最高频率可达 100 GHz 以上, 而这与文献 [22] 报道的结果相同.

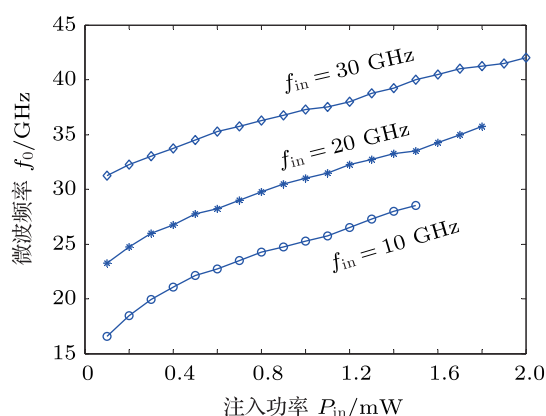


图 3 不同的频率失谐下, 光子微波频率随注入光功率的变化

### 3.2 光子微波的线宽窄化

由于大多数的应用领域都要求微波具有较窄的线宽, 而由 P1 态产生的光子微波线宽相对较宽, 约为 40—100 MHz. 下面我们将通过引入光反馈对光子微波进行全光的线宽压缩. 如图 1 中所示, 我们通过一个中性密度衰减器 NDF 和一个滑动导轨来分别控制反馈强度和反馈腔长, 可分析反馈参量对光子微波线宽的影响. 考虑到实验中所获取的频谱曲线具有不规则的起伏, 因此对于其线宽的描述不能采用传统的诸如半高全宽或 3 dB 线宽等描述方法. 在本文中, 我们采用功率谱中功率分布的标准偏差来描述光子微波线宽  $\Delta f$  [23], 其计算公式为

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

式中  $\nu$  表示频率, 而

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

其中,  $P(\nu)$  表示激光器输出的功率分布. 反馈强度定义为图 1 中反馈回 A 点处的光功率与 SL 输出功率的比值, 其值可通过功率探头测量各位置的光功率以及对 NDF 各角度透光率的标定来获得.

图 4 为不同反馈强度下半导体激光器输出的功率谱分布, 测试中频谱分析仪的 RBW 和 VBW 均设置在 300 kHz. 实验中, 外腔长度固定为 38.25 cm. 当注入功率为  $P_{in} = 74.66$   $\mu$ W, 频率失谐为  $f_{in} = 2.75$  GHz 时, 此时的 P1 振荡频率为  $f_0 = 7.93$  GHz, 图中的横坐标表示以此频率为中心的相对频率. 如图 4(a) 所示, 当没有光反馈即  $k_f = 0$  时, SL 运行在 P1 态且其光子微波频率为  $f_0 = 7.93$  GHz, 其线宽约为 28.35 MHz. 当反馈强度增大到  $k_f = 0.015$  时, 其光子微波线宽被明显地压缩为 2.77 MHz, 如图 4(b) 所示. 而在图 4(c) 中, 反馈强度被调节至  $k_f = 0.018$ , 微波线宽被压缩至 976.83 kHz. 图 4(d) 所示为当反馈强度为  $k_f = 0.047$  时, 微波线宽被进一步压缩至 655.58 kHz. 实验结果还表明, 只有当反馈强度足够小且在很小范围内变化时, 才能获得较好的线宽窄化效果, 因为相对较强的反馈强度将使激光器 SL 的输出进入复杂动力学状态.

从以上实验结果中可以看出, 当光反馈强度在一个微小范围内逐渐增大过程中, 光子微波的线宽能够明显地被压缩约两个数量级. 在本实验中, 被观察到的最窄线宽为 295.42 kHz. 产生这种现象的原因可以解释为: 当引入光反馈后, 系统的复杂性进一步加强, 其输出将显示出更复杂的动力学特性, 而光反馈在其中更是起到了滤波以及将 SL 输出锁定在光子微波频率的作用. 由于这种方法基于半导体激光器的非线性动力学, 是全光的窄线宽光子微波产生方法, 因此它是一种全新的具有广泛应用前景的光生微波方法.

此外, 我们还对不同注入功率下光反馈对光子微波线宽的影响进行了研究, 结果如图 5 所示. 图中星号和圆圈分别表示光反馈强度为  $k_f = 0$  和  $k_f = 0.013$  情况下的微波线宽. 从图中可以清晰地看出, 光反馈能够明显地减小微波线宽.

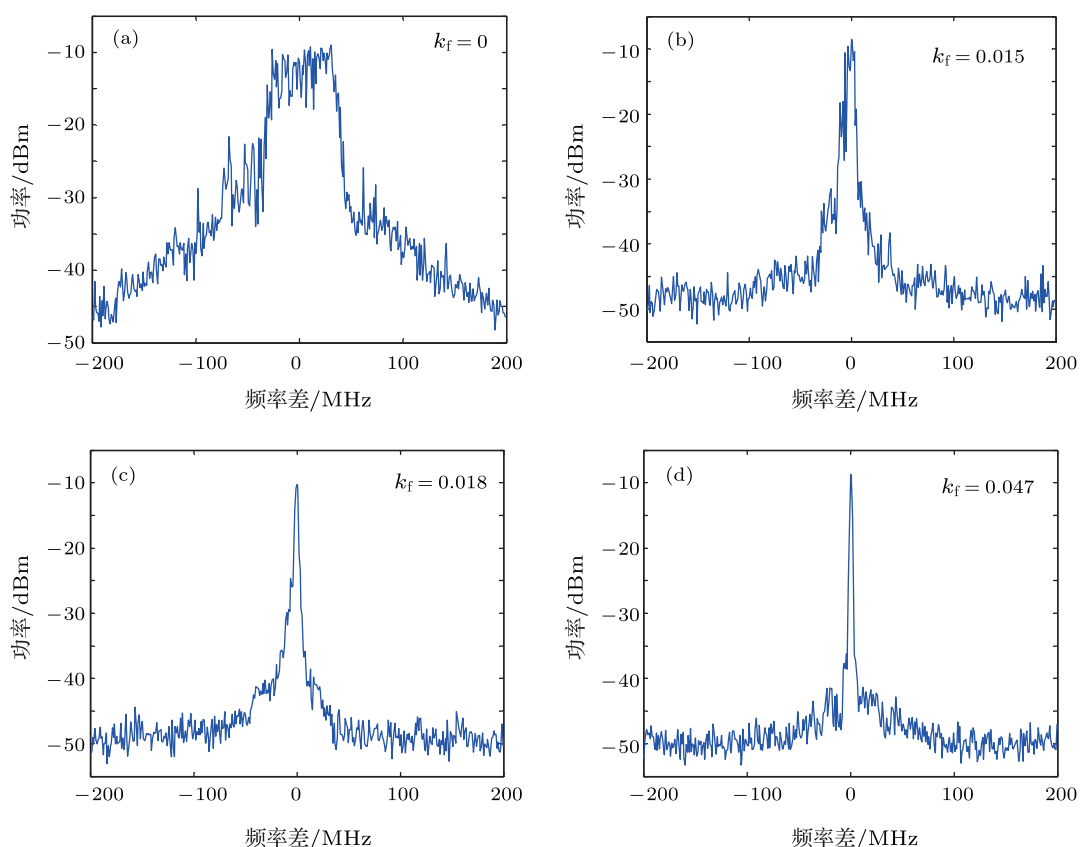


图4 在  $f_{in} = 2.75$  GHz,  $P_{in} = 74.66$   $\mu$ W 的注入条件下, 微波线宽随反馈强度的变化

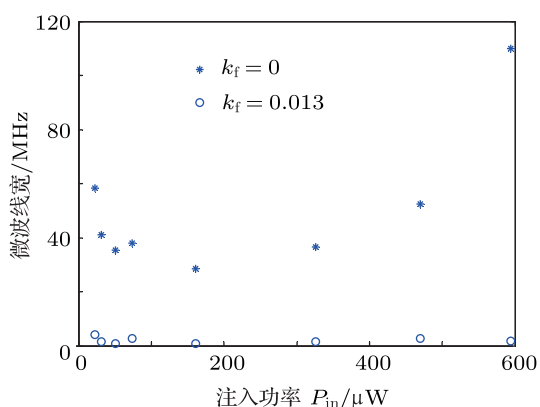


图5 在不同注入功率下, 光反馈对微波线宽的压缩效果

图6 为光反馈对于不同频率的微波线宽的压缩效果. 从图中可以看出, 当反馈强度在  $k_f < 0.018$  的范围时, 微波线宽能够被较大程度地压缩, 而在  $k_f > 0.018$  的范围时, 线宽压缩效应相对较弱. 此外, 对于较低频率的光子微波, 其线宽压缩效应比较高频率的光子微波更强.

另外, 实验结果还表明光反馈长度对微波线宽

几乎没有影响. 当反馈长度在一个很小范围内 (厘米量级) 变化时, 光子微波频率会发生一个小范围内的周期性变化但其线宽几乎没有变化. 出现这种现象的可能原因是, 当反馈长度变化时, 反馈光的位相发生一个周期性变化, 从而被其滤波及锁定的 P1 振荡频率也相应发生一个周期性变化, 当反馈长度变化为波长的整数倍时, P1 振荡频率刚好变化一个周期后又回到开始时的数值.

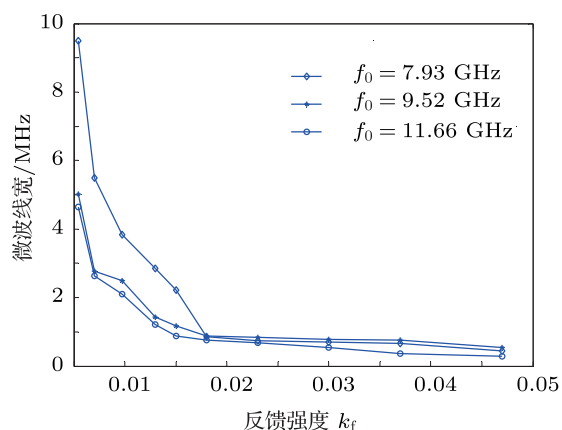


图6 在光子微波频率下, 微波线宽随反馈强度的变化



## 4 结论

实验研究了基于光注入半导体激光器 P1 态产生光子微波以及其线宽窄化效应. 研究表明: 通过调节光注入条件, 由该方法产生的光子微波频率可以非常方便地被连续、大范围调节. 在引入光反馈后, 通过调节反馈强度, 光子微波的线宽可以从 40—100 MHz 的范围被压缩约两个数量级

至 300—900 kHz 的范围. 此外, 我们还考查了光反馈对不同注入功率以及不同频率下的线宽窄化效果. 由于这是一种全新的利用全光方法产生微波的技术, 不需要复杂、昂贵的外部电子设备, 因此具有非常广阔的应用前景. 下一步的工作希望能够对其进行更加深入的理论和实验研究, 以期获得更加稳定、线宽更窄的光子微波.

- [1] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
- [2] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, Kovanis V, Alsing P M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 3539
- [3] Kong H J, Wu Z M, Wu J G, Xie Y K, Lin X D, Xia G Q 2008 *Chaos, Solitons and Fractals* **36** 18
- [4] Wang L, Lin X D, Wu Z M, Ping X X, Xia G Q 2010 *Laser Phys.* **20** 1957
- [5] Simpson T B, Liu J M 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 1322
- [6] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B, Wang B J, Li Y L, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4372 (in Chinese) [王云才, 张耕玮, 王安帮, 王冰洁, 李艳丽, 郭萍 2007 物理学报 **56** 4372]
- [7] Liu S F, Xia G Q, Wu J G, Li L F, Wu Z M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1502 (in Chinese) [刘胜芳, 夏光琼, 吴加贵, 李林福, 吴正茂 2008 物理学报 **57** 1502]
- [8] Okajima Y, Hwang S K, Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **219** 357
- [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] Deng T, Xia G Q, Wu Z M, Lin X D, Wu J G 2011 *Opt. Express* **19** 8762
- [12] Lin X D, Xia G Q, Deng T, Chen J G, Wu Z M 2009 *Optoelectron. and Adv. Materials-Rapid Commun.* **3** 1129
- [13] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2819 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 2819]
- [14] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 682
- [15] Ogawa H, Polifko D, Banba S 1992 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **40** 2285
- [16] Wake D, Webster M, Wimpenny G, Beacham K, Crawford L 2004 *IEEE Int. Topical Meeting Microwave Photonics (MWP 2004)* 157
- [17] Kjebon O, Schatz R, Lourduoss S, Nilsson S, StAlnacke B, Backbom L 1997 *Electron. Lett.* **33** 488
- [18] Hyodo M, Abedin K S, Onodera N 1999 *Opt. Commun.* **171** 159
- [19] Johansson L A, Seeds A J 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 511
- [20] Novak D, Ahmed Z, R. Waterhouse B, Tucker R S 1995 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **43** 2257
- [21] Pajarola S, Guekos G, Nizzola P, Kawaguchi H 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 1234
- [22] Chan S C, Diaz R, Liu J M 2008 *Opt. Quantum Electron.* **40** 83
- [23] Chan S C, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 1025
- [24] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 14921
- [25] Chan S C, Liu J M 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 699
- [26] Hyodo M, Abedin K S, Onodera N 1999 *Opt. Commun.* **171** 159
- [27] Kaszubowska A, Anandarajah P, Barry L P 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 233
- [28] Simpson T B, Doft F 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 1476
- [29] Simpson T B 1999 *Opt. Commun.* **170** 93
- [30] Genest J, Chamberland M, Tremblay P, Têtu M 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 989
- [31] Zhang M J, Liu T G, Wang A B, Zheng J Y, Meng L N, Zhang Z X, Wang Y C 2011 *Opt. Lett.* **36** 1008

# Generation of photonic microwave based on the period-one oscillation of an optically injected semiconductor lasers and all-optical linewidth narrowing\*

Lin Xiao-Dong<sup>1)2)</sup> Deng Tao<sup>1)2)</sup> Xie Yi-Yuan<sup>2)</sup> Wu Jia-Gui<sup>1)2)</sup>  
Chen Jian-Guo<sup>1)</sup> Wu Zheng-Mao<sup>2)</sup> Xia Guang-Qiong<sup>2)†</sup>

1) (*School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

2) (*School of Physics Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

(Received 5 June 2012; revised manuscript received 20 June 2012)

## Abstract

Based on the single period dynamics of optically injected semiconductor laser, the generation of photonic microwave and its linewidth narrowing effect by introducing optical feedback are experimentally demonstrated. The experimental results show that the photonic microwave frequency can be continuously and widely tuned in a range of several ten GHz by adjusting the injection parameters. By introducing an optical feedback and properly adjusting the feedback strength, the photonic microwave linewidth is reduced by about two orders of magnitude from a range of 40–100 MHz to a range of 300–900 kHz. The influence of optical feedback length on the microwave linewidth is not obvious except that the photonic microwave frequency exhibits an periodical variation in a small range when the feedback length is finely varied in a small range.

**Keywords:** nonlinear dynamics of semiconductor lasers, period-one, photonic microwave, linewidth

**PACS:** 42.55.Px, 42.65.Sf

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 61178011, 11004161, 61275116), the Natural Science Foundation of Chongqing City (Grant Nos. CSTC2012jjB40011, CSTCjjA40015), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. XDJK2010C019).

† E-mail: gqxia@swu.edu.cn