

# 外部光注入混沌激光器产生超宽带微波信号的研究\*

孟丽娜<sup>1)</sup> 张明江<sup>1)†</sup> 郑建宇<sup>1)</sup> 张朝霞<sup>1)2)</sup> 王云才<sup>1)2)</sup>

1) (太原理工大学光电工程研究所, 太原 030024)

2) (东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

(2010年12月16日收到; 2011年7月4日收到修改稿)

利用外部光注入混沌激光器产生了完全符合美国联邦通信委员会关于室内无线通信频谱限定的超宽带(UWB)微波信号. 基于外部光注入光反馈半导体激光器的速率方程组, 理论研究了外部及内部参量对半导体激光器输出混沌 UWB 脉冲信号的影响. 研究表明, UWB 信号的  $-10$  dB 带宽随着光注入强度、注入失谐量以及线宽增强因子的增大而增大, 随着激光器偏置电流的增大而减小. 同时, UWB 信号的中心频率在  $5-8$  GHz 范围内变化. 在实验中, 通过设定其他参量和调节光注入强度, 得到中心频率及带宽可调谐的混沌 UWB 微波信号, 传输速率达到  $500$  Mbit/s. 实验结果与理论分析相符合.

**关键词:** 半导体激光器, 混沌激光, 光生微波技术, 超宽带信号

**PACS:** 42. 65. Sf, 42. 55. Px, 42. 79. Sz

## 1. 引言

由于超宽带(UWB)技术具有抗多径衰减、低功耗、高精度、强穿透以及高安全性等诸多的优异特性, 使其在高速无线通信系统、无线传感网络领域的应用备受关注<sup>[1,2]</sup>. 2002年, 美国联邦通信委员会(FCC)正式准许 UWB 技术进入民用领域, 并公布将  $3.1-10.6$  GHz 的无照频段开放用于室内无线通信及传感网络. 为了避免 UWB 信号对其他窄带无线通信系统造成干扰, FCC 将 UWB 功率谱密度限定在  $-41.3$  dBm/MHz 以下<sup>[3]</sup>. 与此同时, 由于混沌信号本身具有的宽带、平坦功率谱以及类噪声特性, 使得混沌保密通信、混沌抗干扰雷达以及快速随机数发生器等众多应用被相继提出<sup>[4-7]</sup>. 混沌 UWB 通信机制在上述背景之下被建立, 并已成为 IEEE 802. 15. 4a 标准的物理层候选方案, 在此通信机制中, 混沌脉冲信号作为一种形状极为特殊的脉冲信号用于信息传输<sup>[8,9]</sup>. 然而, UWB 技术当前主要有以下两大难题: 第一个是高速率、高频谱利用率的 UWB 脉冲信号在电域产生困难; 第二个是

UWB 信号在空间的传输距离过短(典型值不大于  $10$  m). 这限制了此种通信方式被大规模应用. 为了拓展 UWB 无线通信的传输距离和覆盖范围并促进该通信系统与其他网络间的融合互联, 研究者提出了光载 UWB 无线通信方案<sup>[10]</sup>. 在光域直接生成频谱特性灵活可控的 UWB 微波脉冲信号是实现光载 UWB 无线通信的关键技术<sup>[11]</sup>. 近年来, 多种光生 UWB 信号的方法相继被提出. 文献[12]利用电吸收调制器的非线性调制区域, 完成了二阶高斯脉冲的生成. 2008年, 文献[13,14]应用马赫-曾德尔调制器和赛格纳克光纤环的非线性特性分别得到了一阶及二阶高斯脉冲. 2009年, 华中科技大学与丹麦科技大学合作利用级联电吸收调制器及半导体光放大器的交叉吸收调制和交叉增益调制完成一阶二阶高斯脉冲成形<sup>[15]</sup>. 同年, Pan 和 Yao<sup>[16]</sup>提出了利用相位调制器和马赫-曾德尔干涉仪在光域内产生 UWB 高斯脉冲的方案. Bolea 等<sup>[17]</sup>利用将激光序列注入到微波光子滤波器中的方法制成 UWB 脉冲发生器. Yu 等<sup>[18]</sup>提出了一种利用全光非相干光场叠加技术产生二进制编码 UWB 脉冲无线电信号的方法. 2010年, 加州理工学院 Zadok 等<sup>[19]</sup>利用高

\* 国家自然科学基金(批准号:60927007, 60777041, 61108027)和国家重点基础研究发展计划(批准号:2010CB327800)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

非线性光纤的脉冲压缩效应以及平衡差分光电探测器的差分响应完成了二阶高斯脉冲的生成. 但是, 上述方法都很难调节所产生的 UWB 信号的带宽及频谱形状, 从而限制了它们在实际复杂环境中的应用. 我们在前期的工作中提出利用光反馈半导体激光器的非线性混沌特性产生 UWB 混沌脉冲信号<sup>[20]</sup>, 此方法不仅具有较传统电学方法更高的传输速率和频谱效率, 而且所产生的 UWB 信号的频谱特性可以便捷地通过改变半导体激光器的偏置电流以及反馈强度进行控制和调节. 然而, 受限于光反馈半导体激光器混沌输出的复杂度及带宽<sup>[21]</sup>, 生成的 UWB 信号的频谱利用率难以进一步提高, FCC 的频谱掩蔽限定不能够尽可能多地被利用.

本文提出并论证了基于外部光注入混沌激光器产生 UWB 脉冲信号的方法. 理论上, 通过对光注入强度、注入失谐量、从激光器的偏置电流以及线宽增强因子调节, 产生了满足 FCC 室内掩蔽限定的混沌 UWB 脉冲信号. 实验上, 通过设定注入

失谐量和注入光功率, 得到了频谱符合 FCC 的 UWB 标准的混沌脉冲信号, 实验结果与模拟结果相一致.

## 2. 系统模型

外部光注入混沌激光器产生 UWB 脉冲信号的系统模型如图 1 所示. 混沌振荡源由从激光器和一个反射系数可调的反射镜组成, 另一个主激光器用于提供外部注入光. 在适当的反馈强度下, 从半导体激光器将由稳态进入混沌态, 从而出射混沌激光, 通过注入光可控制该混沌激光的频谱特性<sup>[22]</sup>. 该混沌光入射到一个外调制器, 将一系列非归零码序列加载到外调制器上, 直接对此混沌光进行开关控制调制, 从而生成纳秒量级的 UWB 混沌光脉冲信号. 当脉冲持续时间  $t$  满足  $t > 1/(2\Delta F)$  ( $\Delta F$  为原始混沌信号的 -10 dB 带宽) 时, 混沌脉冲信号的带宽将与  $\Delta F$  一致<sup>[20]</sup>.

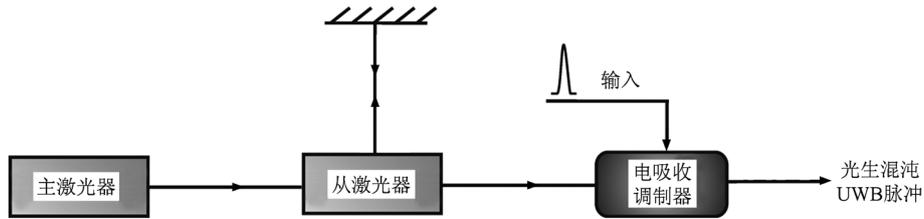


图 1 外部光注入混沌激光器产生 UWB 脉冲信号的系统模型

## 3. 数值模拟及结果

在外部光注入光反馈半导体激光器的条件下, 系统的理论模型可由下列光场复振幅  $E$  和载流子密度  $N$  速率方程组<sup>[22]</sup>来描述:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} = & \frac{1 + i\alpha}{2} \left[ \frac{g(N - N_0)}{1 + \varepsilon |E|^2} - \tau_p^{-1} \right] E \\ & + \frac{\kappa_f}{\tau_{in}} E(t - \tau) \exp(-i2\pi\nu_s \tau) \\ & + \frac{\kappa_i}{\tau_{in}} E_i \exp(i\Delta\nu t), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I_s}{qV} - \frac{N}{\tau_n} - \frac{g(N - N_0)}{1 + \varepsilon |E|^2} |E|^2, \quad (2)$$

式中  $\kappa_i$  和  $\kappa_f$  分别为注入系数和反馈系数,  $|E_i|$  为注入激光的振幅,  $\Delta\nu = \nu_i - \nu_f$  为主从激光器之间的频率失谐量,  $\alpha$  为线宽增强因子, 反馈延时  $\tau = 200$  ns,

透明载流子浓度  $N_0 = 0.445 \times 10^6 \mu\text{m}^{-3}$ , 阈值电流  $I_{th} = 22$  mA, 小信号增益系数  $g = 1.414 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3/\text{ns}$ , 载流子寿命  $\tau_n = 2.5$  ns, 光子寿命  $\tau_p = 1.17$  ps, 激光在腔内往返周期  $\tau_m = 7.38$  ps, 增益饱和系数  $\varepsilon = 5 \times 10^{-5} \mu\text{m}^3$ , 有源层体积  $V = 324 \mu\text{m}^3$ . 在模拟中, 使用一系列码长为 2 ns, 码速率为 500 Mbit/s 的非归零码序列调制混沌激光, 生成 UWB 混沌光脉冲序列. 在激光器混沌振荡的区域内通过改变光注入系数  $\kappa_i$ 、主激光器偏置电流  $I_m$ 、从激光器的偏置电流  $I_s$ 、失谐量  $\Delta\nu$  以及线宽增强因子  $\alpha$ , 分析输出脉冲的波形、频谱及光谱的状态及内在联系.

图 2 为在参数  $\alpha = 5.0$ ,  $\Delta\nu = 6$  GHz,  $I_m = I_s = 3.88I_{th}$ ,  $\kappa_i = 0.08$ ,  $\kappa_f = 0.011$  下生成 UWB 信号的波形、频谱以及对应的光谱. 由图 2(a) 可以看出, 在合适的外光注入情况下, UWB 脉冲频谱带宽达到了 6 GHz, 且很好地填充了 FCC 所规定的室内频谱掩蔽. 相对于文献[20]的结果而言, 通过增加外部光

注入有效地改善了混沌脉冲信号的频谱特性,使其频谱更为平坦,并提高了在 FCC 频谱掩蔽范围内的频谱带宽和能量利用率. 从图 2(b) 可以看出,脉冲信号的光谱成分更为丰富,这是导致 UWB 信号带

宽增强的直接原因.

为进一步讨论各参量对光注入混沌激光器产生 UWB 脉冲信号的影响,下面分别从外部参量和内部参量两方面进行研究.

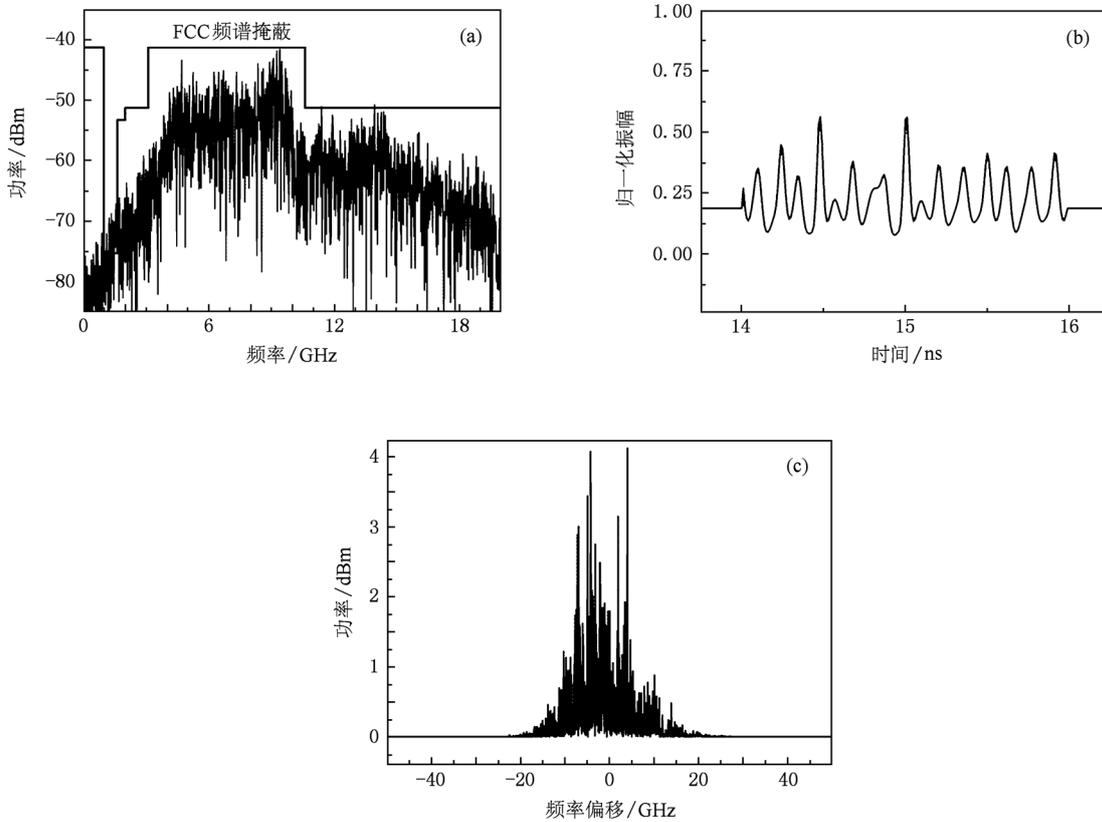


图 2 当  $\alpha = 5.0, \Delta\nu = 6 \text{ GHz}, I_m = I_s = 3.88I_{th}, \kappa_i = 0.08, \kappa_f = 0.011$  时生成的 UWB 信号 (a) 频谱, (b) 时序, (c) 光谱

### 3.1. 外部参量的影响

为了分析仿真模型中各个参量对最终输出 UWB 信号频谱特性的影响及内在联系,在其他参量不变的情况下,分别对光注入强度、注入失谐量、从激光器的偏置电流三个外部参量进行了调节,模拟结果如图 3—图 5 所示.

降低  $\kappa_i = 0.065$ ,其他参量取值为  $\alpha = 5.0, \Delta\nu = 6 \text{ GHz}, I_m = I_s = 3.88I_{th}, \kappa_f = 0.011$  时,脉冲频谱的模拟结果如图 3(a) 所示. 此时,脉冲信号的频谱带宽降低为 4.8 GHz,中心频率变为 6.55 GHz. 图 3(b) 和(c) 为相应的光谱和时序. 图 3(d) 中的实线为 UWB 信号带宽与光注入强度的关系曲线,可以看出当注入系数由 0.05 增大到 0.12 时,带宽由 3.9 GHz 增加到 8.2 GHz. 这是由于当注入光强度增加时,它与从激光器的拍频效果会加剧,即差频项振

幅增大,对应的在频域上表现为差频频带附近能量分布的增强,从而导致 UWB 信号频谱展宽.

当频率失谐量降低至 3.5 GHz 时,其他参量取值为  $\alpha = 5.0, I_m = I_s = 3.88I_{th}, \kappa_i = 0.08, \kappa_f = 0.011$ ,得到的模拟结果如图 4(a)—(c) 所示. 由图 4(a) 可以看出,降低主从激光器的失谐量至 3.5 GHz 时,脉冲信号的频谱带宽降低为 3.1 GHz,中心频率为 6.4 GHz. 由于主从激光器输出激光频率失谐量的降低,使得混沌光光谱成分减少(图 4(b)),光谱成分间的拍频混频作用相应被弱化,这是 UWB 脉冲频谱带宽降低的原因. 图 4(d) 中实线为带宽与失谐量的关系曲线,可以看出当注入失谐量由 3.5 GHz 增大到 10 GHz 时,带宽由 3.1 GHz 增加到 7.9 GHz. 这种变化的原因在文献[23]中已作阐述,当注入失谐量增加时,周期振荡的频率会加大,高频的周期振荡与混沌振荡相互作用引起带宽的展宽.

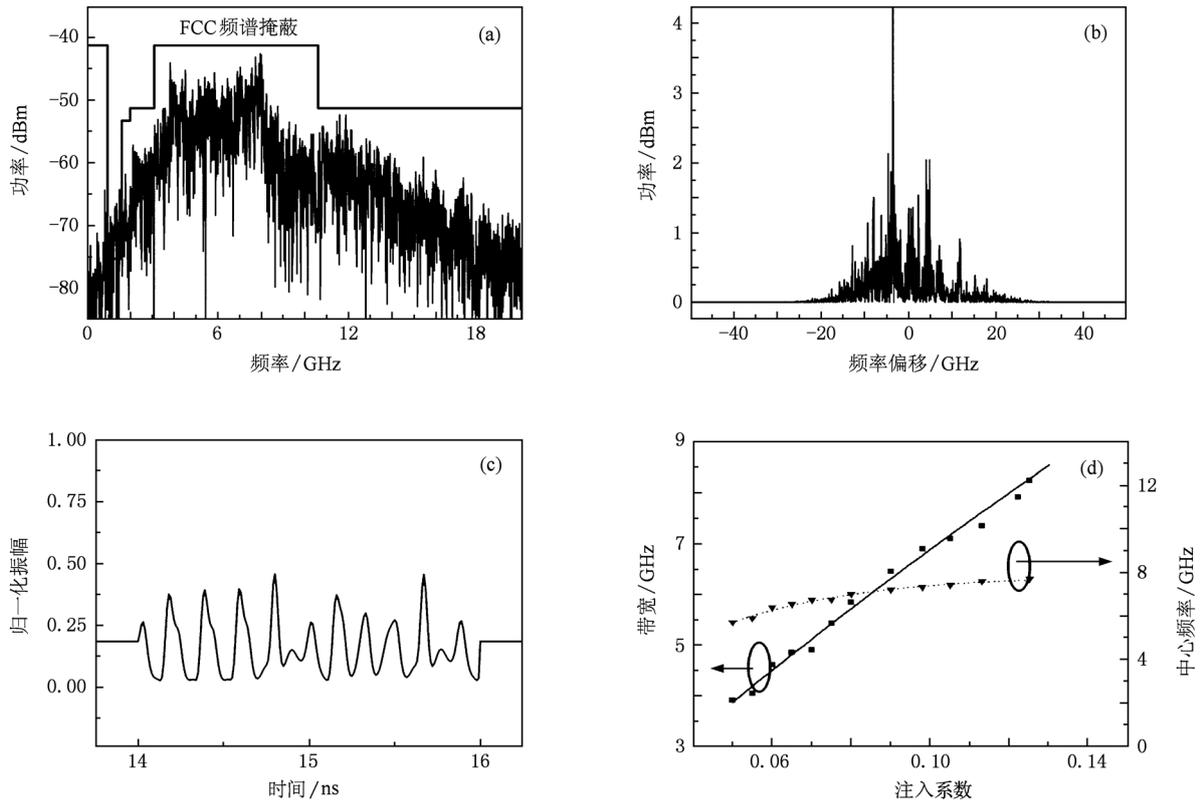


图3 当  $\alpha=5.0, \Delta\nu=6$  GHz,  $I_m = I_s = 3.88I_{th}, \kappa_i = 0.065, \kappa_f = 0.011$  时生成的 UWB 信号 (a) 频谱, (b) 光谱, (c) 时序, (d) UWB 信号的中心频率和 -10 dB 带宽与  $\kappa_i$  的关系

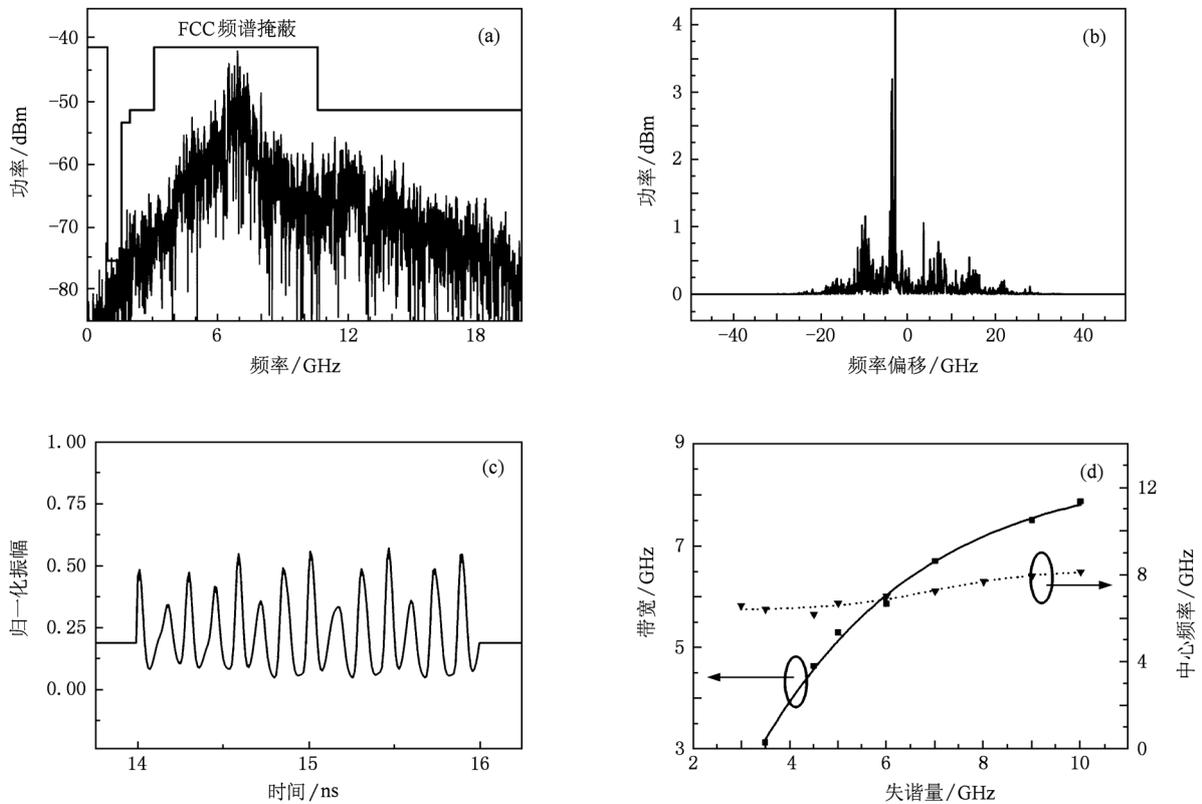


图4 当  $\alpha=5.0, \Delta\nu=3.5$  GHz,  $I_m = I_s = 3.88I_{th}, \kappa_i = 0.08, \kappa_f = 0.011$  时生成的 UWB 信号 (a) 频谱, (b) 光谱, (c) 时序, (d) UWB 信号的中心频率和 -10 dB 带宽与  $\Delta\nu$  的关系

增大从激光器的偏置电流至  $4.07I_{th}$ , 其他参量取值为  $\alpha = 5.0$ ,  $\Delta\nu = 6$  GHz,  $I_m = 3.88I_{th}$ ,  $\kappa_i = 0.08$ ,  $\kappa_r = 0.011$  时, UWB 信号频谱的模拟结果如图 5(a) 所示. 由图 5(a) 可见, 频谱带宽反而降低为 5.4 GHz, 中心频率约为 7.1 GHz. 图 5(b) 和 (c) 为相应的光谱和时序. 当从激光器的偏置电流由  $3.27I_{th}$  提高到  $4.17I_{th}$  时, UWB 信号带宽由 6.16 GHz 降低为

4.98 GHz, 信号带宽与  $I_s$  的关系曲线如图 5(d) 中实线所示. 这是因为频谱上的能量分布是由激光器的本征振荡模式、弛豫振荡引起的边带模式以及外光注入模式相互作用引起拍频而形成的. 偏置电流的增大会导致弛豫振荡频率增加, 弛豫振荡的边带模式与注入模式就会趋近, 此时, 两种模式相互作用的结果使得输出信号的带宽变窄.

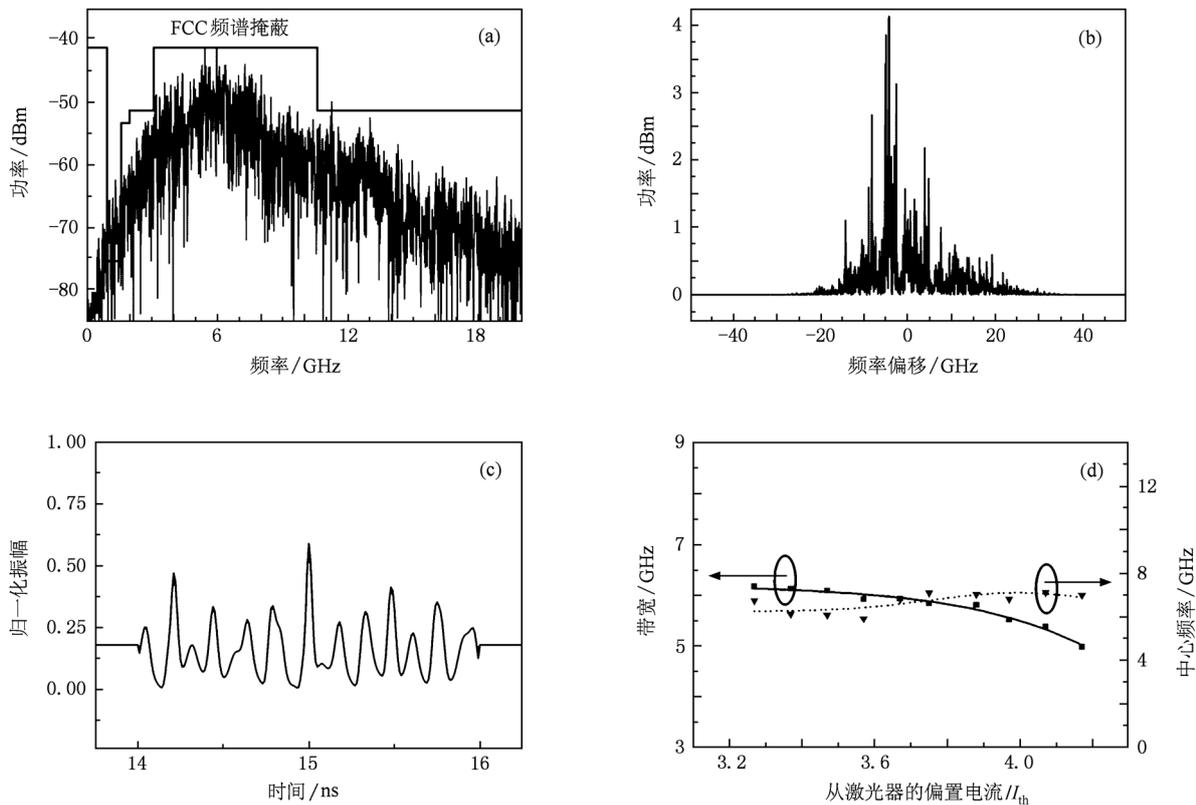


图 5 当  $\alpha = 5.0$ ,  $\Delta\nu = 6$  GHz,  $I_m = 3.88I_{th}$ ,  $I_s = 4.07I_{th}$ ,  $\kappa_i = 0.08$ ,  $\kappa_r = 0.011$  时生成的 UWB 信号 (a) 频谱, (b) 光谱, (c) 时序, (d) UWB 信号的中心频率和 -10 dB 带宽与  $I_s$  的关系

以上分析了 UWB 信号的 -10 dB 带宽随三个外部参量的变化情况, 此外, 外部参量的改变也会对 UWB 信号频谱的中心频率有影响, 其与光注入强度、注入失谐量、从激光器的偏置电流的关系曲线分别如图 3(d)、图 4(d) 和图 5(d) 的虚线所示. 外部参量的变化会影响 UWB 信号能量在频域上重新分布, 或高频段能量增强 (图 3(a)、图 4(a)), 或低频段被抑制 (图 5(a)), 这就导致了中心频率对应地在 5—8 GHz 内的小幅变化.

### 3.2. 内部参量的影响

在半导体激光器的诸多内部参量中, 线宽增强

因子  $\alpha$  是一个极其重要的参数, 它表征了半导体激光器由于载流子密度起伏导致的线宽展宽和啁啾特性. 线宽增强因子  $\alpha$  可表示为<sup>[24]</sup>

$$\alpha = - \frac{\partial \chi' / \partial N}{\partial \chi'' / \partial N}, \quad (3)$$

其中  $\chi = \chi' + i\chi''$  是电极化率. 事实上, 线宽增强因子本质上描述的是增益与折射率的耦合强度, 不同材料体系和不同结构类型的半导体激光器的线宽增强因子各有不同. 正是由于线宽增强因子的存在, 半导体激光器的输出才会呈现各种非线性动力学现象<sup>[25]</sup>, 因此有必要研究线宽增强因子对混沌 UWB 信号频谱特性的影响.

保持图 2 中各外部参数不变, 仅将  $\alpha$  由 5.0 降

低为 4.5, 脉冲信号的频谱带宽为 5 GHz, 中心频率为 6.6 GHz(图 6(a)), 图 6(b)和(c)为相应的光谱和时序. UWB 信号的中心频率和 -10 dB 带宽与  $\alpha$  的关系曲线如图 6(d)中实线所示. 从图 6(d)可以看出, 当  $\alpha$  由 2.0 增加到 7.5 时, 脉冲信号的带宽由 4.1 GHz 增加到 7.5 GHz.

脉冲信号带宽之所以会随线宽增强因子  $\alpha$  的增大而加宽, 是因为在有外部光注入情况下, 线宽增强

因子的存在会导致大量不稳定动态特性的出现. 当  $\alpha$  增加时, 表现在光谱上即为主要振荡模式和边带模式的不断变化<sup>[25-27]</sup>, 光谱成分会更加丰富, 这两种模式相互作用的加强使得混沌光输出的频谱展宽. 线宽增强因子  $\alpha$  的改变也会对中心频率有影响, 如图 6(d)中虚线所示. 由于参量的变化导致 UWB 信号能量在频域上重新分布, 引起了高频段能量增强(图 6(a)), UWB 信号的中心频率小幅度增加.

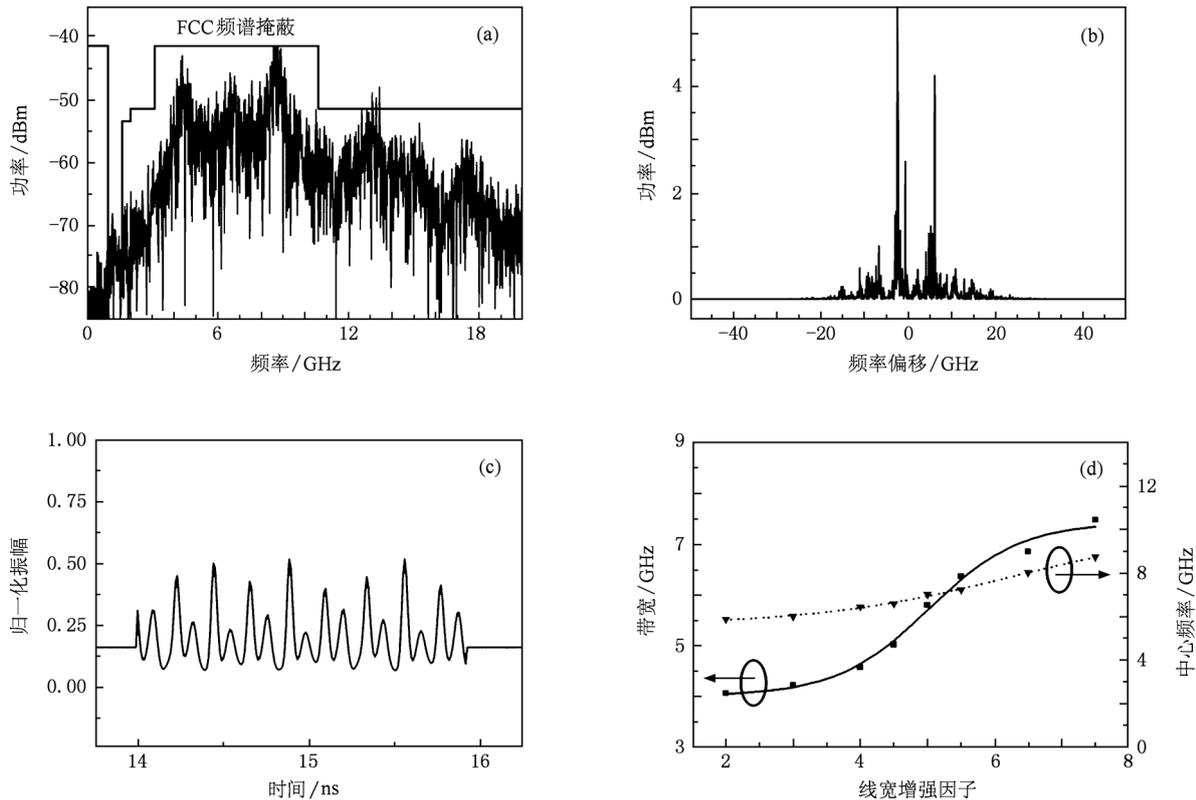


图 6 当  $\alpha=4.5, \Delta\nu=6$  GHz,  $I_m=I_s=3.88I_{th}, \kappa_i=0.08, \kappa_r=0.011$  时生成的 UWB 信号 (a) 频谱, (b) 光谱, (c) 时序, (d) UWB 信号的中心频率和 -10 dB 带宽与  $\alpha$  的关系

### 4. 实验及结果

外部光注入混沌激光器产生 UWB 微波信号的实验装置如图 7 所示. 实验中使用一个商用 C 波段的分布反馈半导体激光器作为从激光器并通过外加光纤环反馈系统构成一个混沌振荡源. 反馈光强度通过可调节光衰减器进行控制, 反馈光的偏振态由偏振控制器 3 来控制, 以调节其与从激光器的耦合效率. 另一个分布反馈激光器作为主激光器, 通过光耦合器向从激光器注入连续光波用来控制混沌信号的频谱带宽和形状. 注入激

光的光强度与偏振强度分别由掺铒光纤放大器和偏振控制器 2 来控制. 在适当的反馈及注入光强度下, 半导体激光器将由稳态进入混沌态<sup>[22]</sup>. 混沌光经过一个光隔离器后入射到一个 10 GHz 带宽的电吸收调制器中. 实验中利用一列码长为 2 ns, 码速率为 500 Mbit/s 的非归零码序列对此混沌连续光进行开关键控调制(与模拟一致), 生成一系列纳秒量级的混沌光脉冲序列. 之后, 生成的 UWB 混沌光脉冲经由一个 50 GHz 带宽的超快光电探测器被转换为一系列混沌 UWB 的微波脉冲信号. 实验中通过美国安捷伦公司生产的 Agilent 86140B 型光谱仪对输出的光信号进行观测, 通过美国安

捷伦公司生产的带宽为 26.5 GHz 的 Agilent N9020A 型频谱仪和美国力科公司生产的带宽为

6GHz 的 LeCroy 8600A 型实时示波器对输出的电信号进行测量.

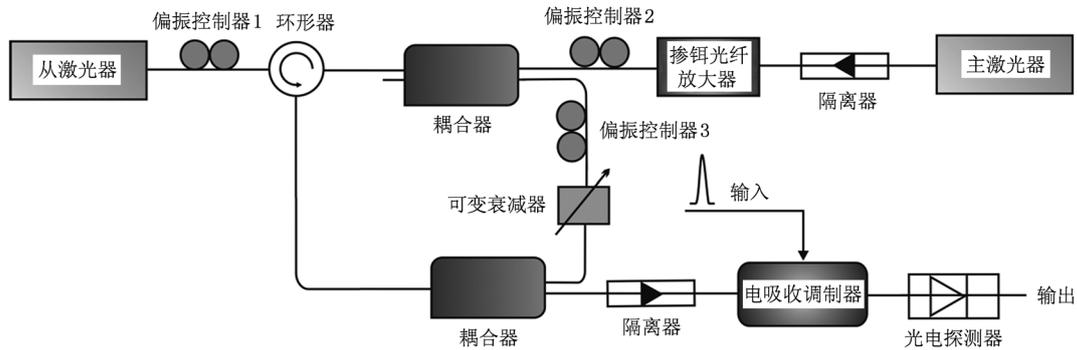


图7 外部光注入混沌激光器产生混沌脉冲微波信号的实验装置示意图

实验中,主激光器的偏置电流为 27.1 mA ( $1.23I_{th}$ ,  $I_{th} = 22$  mA),通过温度控制器将主激光器的工作波长稳定在 1553.350 nm.从激光器的偏置电流为 33.54 mA ( $1.52I_{th}$ ),输出光的波长稳定在 1553.400 nm,输出光功率为 -6.30 dBm.主从激光器的波长失谐量为 0.05 nm,对应的频率失谐量为 6.3 GHz.当注入光功率为 -6.48 dBm 时,得到带宽为 8.9 GHz,中心频率为 6.6 GHz 的脉冲信号,如图

8(a)所示.对比图 8(a)与图 2(a)可以看出,实验获得频谱与仿真所得频谱各频带功率谱密度值起伏基本一致.对应地,实验及仿真所得脉冲时序(图 8(b)和图 2(b))内部随机脉冲数量相符合,内部单个随机脉冲持续时间均在亚纳秒量级.由以上对比可知,实验结果与理论预测相符.与文献[20]相比,UWB 信号的频谱带宽有所增强,且频谱形状能很好符合 FCC 限定的频谱掩蔽.

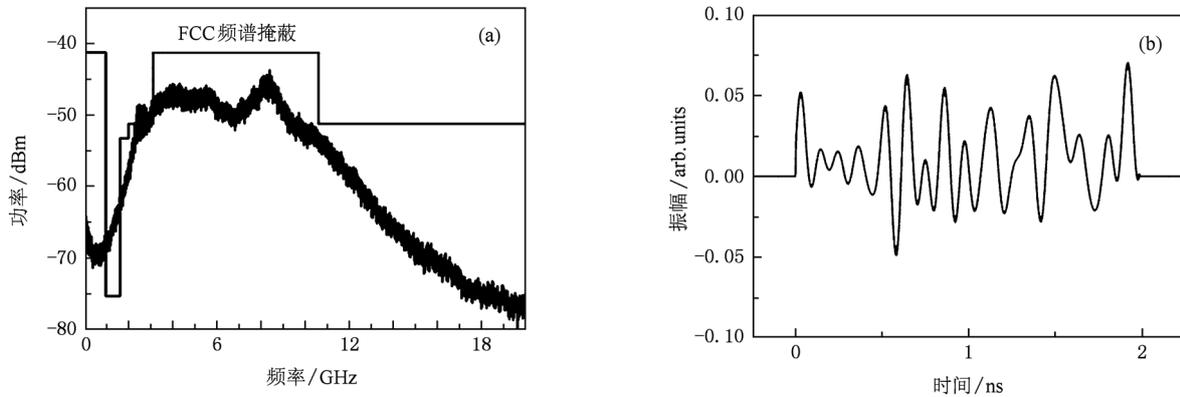


图8 注入光功率为 -6.48 dBm,频率失谐量为 6.3 GHz 时所输出的 UWB 脉冲信号 (a)频谱,(b)时序

为了对模拟结果做进一步的论证,在实验中通过设定注入失谐量,观察光注入强度的变化对 UWB 信号的影响.图 9 为实验所得混沌 UWB 光脉冲信号的频谱及对应的光谱.当无外光注入时,从图 9(b)可以看出,光反馈后从激光器的波长产生了一个约为 0.100 nm 的微小的红移量,即从无反馈时自由振荡所对应的波长 1553.400 nm 红移到 1553.500 nm.此时,脉冲信号的频谱带宽为 2 GHz,中心频率为 5 GHz,如图 9(a)所示.当有外光注入到从激光

器后,通过温度控制器将主激光器的工作波长调节为 1553.350 nm,如图 9(d)和(f)中箭头所指的位置.这时主从激光器的波长失谐量为 0.05 nm,对应的频率失谐量为 6.3 GHz.改变注入光的功率为 -10.50 dBm 时,得到频谱带宽为 4.5 GHz,中心频率为 5.4 GHz 的 UWB 脉冲信号,频谱和光谱分别如图 9(c)和(d)所示.在注入失谐量不变的情况下,继续加大注入光功率为 -6.72 dBm,此时,得到带宽为 8.4 GHz,中心频率为 7 GHz 的 UWB 脉冲信

号,如图 9(e)所示.上述现象可通过以下分析作出直观的解释:逐渐增加的注入光场降低了激光器受激辐射的阈值,激光器的增益随之发生改变.由方程(3)可知,较低的增益导致有源区折射率的增加,从而引起了激光器瞬时频率的红移(图 9(f)).瞬时频率与注入信号之间的拍频引起新的频率成分的

产生.在频域上,新的频率成分与弛豫振荡之间的相互作用,表现为差频频带附近能量分布增强,这就必然导致 UWB 信号频谱带宽展宽.另外,反馈光场发生微小红移,也使得注入光场与反馈光场间实际失谐量有所增加,这是输出 UWB 信号频谱带宽增加的另一原因.

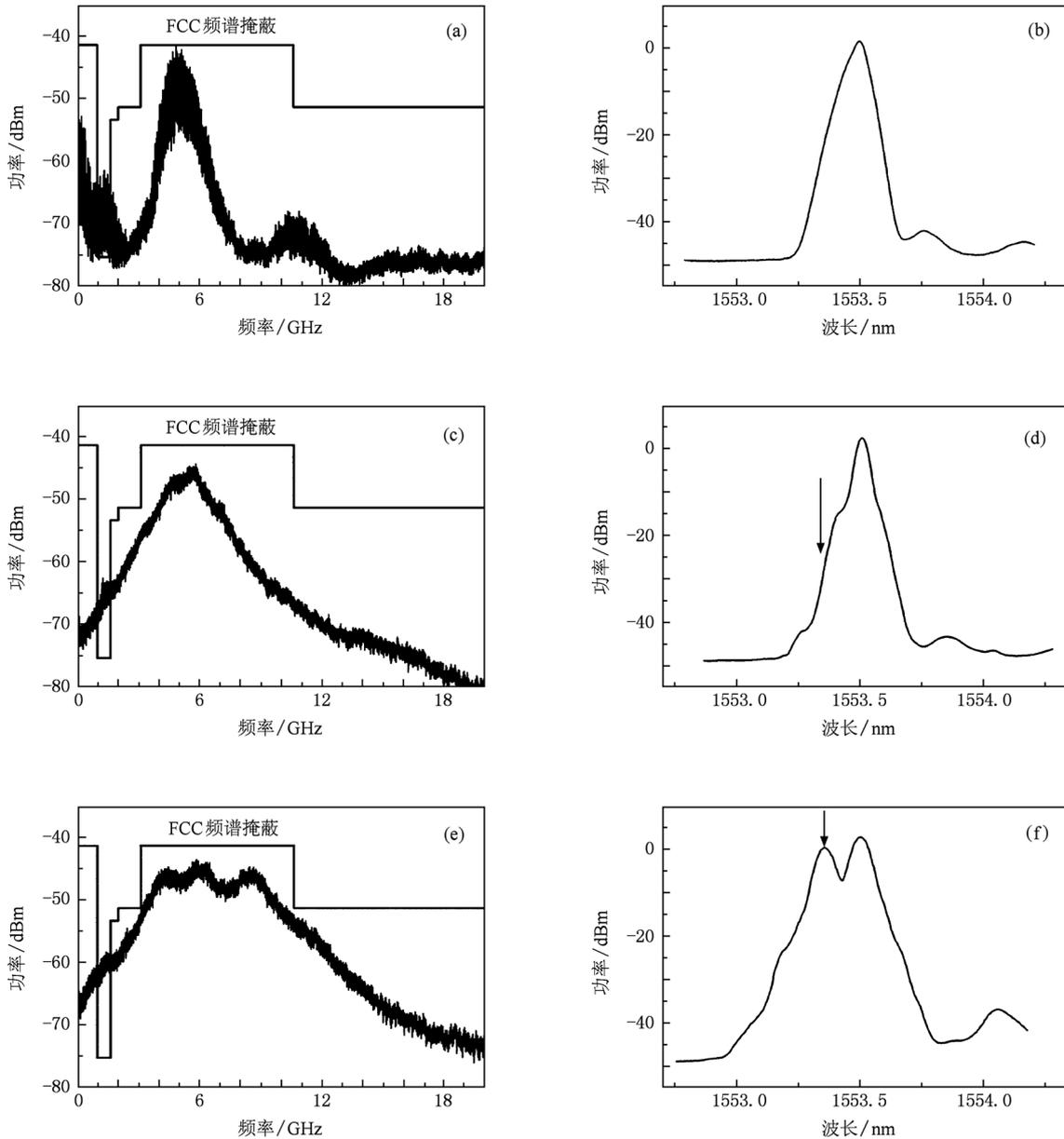


图 9 UWB 脉冲信号的频谱和光谱 (a) 无外光注入时的频谱, (b) 无外光注入时的光谱, (c) 注入光功率为  $-10.50$  dBm 时的频谱, (d) 注入光功率为  $-10.50$  dBm 时的光谱, (e) 注入光功率为  $-6.72$  dBm 时的频谱, (f) 注入光功率为  $-6.72$  dBm 时的光谱

### 5. 结 论

本文提出了一种利用外部光注入混沌激光器

产生 UWB 脉冲信号的方法.利用数值仿真,通过对光注入强度、注入失谐量、从激光器的偏置电流以及线宽增强因子进行控制调节,可以改变混沌脉冲的波形、光谱及频谱特性,得到符合 FCC 关于 UWB

的频谱限定的混沌 UWB 微波信号,并对模拟结果的内在机理进行了分析.同时,在实验上通过设定注入失谐量,观测了注入光强度对脉冲信号带宽和中心频率的影响,实验结果与模拟结果相符.分析

表明,上述方法较传统的电学方法有更高的传输速率和频谱利用率.而且,能通过对各参量的便捷调节,改善 UWB 脉冲信号的频谱特性,使之适合于复杂环境的光载无线电系统中应用.

- [1] Aiello G R, Rogerson G D 2003 *IEEE Microwave Mag.* **4** 36
- [2] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramanian Y, Cayirci E 2002 *IEEE Comput. Mag.* **40** 102
- [3] Roy S, Foerster J R, Somayazulu V S, Leeper D G 2004 *Proc. IEEE* **92** 295
- [4] Wang Y C 2009 *Laser Optoelectron. Prog.* **46** 13 (in Chinese) [王云才 2009 激光与光电子学进展 **46** 13]
- [5] Shi Z G, Qiao S, Chen K S, Cui W Z, Ma W, Jiang T, Ran L X 2007 *Prog. Electromagn. Res.* **77** 1
- [6] Zhang J B, Zhang J Z, Yang Y B, Liang J S, Wang Y C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7679 (in Chinese) [张继兵、张建忠、杨毅彪、梁君生、王云才 2010 物理学报 **59** 7679]
- [7] Chen S S, Zhang J Z, Yang L Z, Liang J S, Wang Y C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 010501 (in Chinese) [陈莎莎、张建忠、杨玲珍、梁君生、王云才 2011 物理学报 **60** 010501]
- [8] Chong C C, Yong S K 2008 *IEEE Trans. Veh. Technol.* **57** 1527
- [9] Jeong M I, Lee J N, Lee C S 2008 *J. Electromagn. Waves Appl.* **22** 1725
- [10] Ran M, Lembrikov B I, Ben Ezra Y 2010 *IEEE Photon. J.* **2** 35
- [11] 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]
- [12] Wang Q, Yao J P 2006 *Electron. Lett.* **42** 1304
- [13] Li J Q, Fu S N, Xu K, Wu J, Lin J T, Tang M, Shum P 2008 *Opt. Lett.* **33** 288
- [14] Huang H, Xu K, Li J Q, Wu J, Hong X B, Lin J T 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** 2635
- [15] Zhou E, Yu X B, Zhang X L, Xue W Q, Yu Y, Mørk J, Monroy I T 2009 *Opt. Lett.* **34** 1336
- [16] Pan S L, Yao J P 2009 *Opt. Lett.* **34** 160
- [17] Bolea M, Mora J, Ortega B, Capmany J 2009 *Opt. Express* **17** 5023
- [18] Yu X, Gibbon T B, Monroy I T 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 1235
- [19] Zadok A, Wu X X, Sendowski J, Yariv A, Willner A E 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 239
- [20] Zheng J Y, Zhang M J, Wang A B, Wang Y C 2010 *Opt. Lett.* **35** 1
- [21] 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、王安邦、王冰洁、李艳丽、郭萍 2007 物理学报 **56** 4372]
- [22] Wang A B, Wang Y C, Wang J F 2009 *Opt. Lett.* **34** 1144
- [23] Wang A B, Wang Y C, He H C 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1633
- [24] Osinski M, Buus J 1987 *IEEE J. Quantum Electron.* **23** 9
- [25] Hwang S K, Liu J M 2000 *Opt. Commun.* **183** 195
- [26] Lin F Y, Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **221** 173
- [27] Hwang S K, Liang D H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061120

# Chaotic ultra-wideband microwave signal generation utilizing an optical injection chaotic laser diode<sup>\*</sup>

Meng Li-Na<sup>1)</sup> Zhang Ming-Jiang<sup>1)†</sup> Zheng Jian-Yu<sup>1)</sup> Zhang Zhao-Xia<sup>1)2)</sup> Wang Yun-Cai<sup>1)2)</sup>

1) (*Institute of Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

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

(Received 16 December 2010; revised manuscript received 4 July 2011)

## Abstract

The ideal ultra-wideband (UWB) microwave pulses that fully comply with the indoor spectrum mask governed by Federal Communications Commission (FCC Indoor Mask) are generated by using continuous-wave optical injection to a chaotic laser diode. We firstly simulate and demonstrate the photonic generation of the chaotic UWB signal according to the rate equations of laser diode with optical feedback and injection. The simulations display that the  $-10$  dB bandwidth of UWB signal increases with the increases of optical injection strength, frequency detuning, linewidth enhancement factor and with the decrease of bias current of the slave laser, and the UWB signal central frequency changes in a range from 5 to 8 GHz. We further experimentally obtain tunable chaotic UWB microwave signals with a rate up to 500 Mbit/s by tuning optical injection strength when the other parameters are fixed. The experimental results are in accordance with the theoretical analyses.

**Keywords:** laser diode, chaotic laser, technology of photonic microwave, ultra-wideband signal

**PACS:** 42.65.Sf, 42.55.Px, 42.79.Sz

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 60927007, 60777041, 61108027) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB327800).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn