

# 利用半导体激光器环产生 27 GHz 的平坦 宽带混沌激光\*

冯野<sup>1)</sup> 杨毅彪<sup>1)†</sup> 王安帮<sup>1)</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) (山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2010 年 8 月 11 日收到; 2010 年 9 月 27 日收到修改稿)

利用 3 个半导体激光器构成的环形激光器实验产生了平坦的宽带混沌信号. 环形结构中, 每个半导体激光器的输出注入后继的激光器以形成环路. 注入光的强度由半导体激光器间的光放大器或者衰减器来控制, 注入光的频率失谐量由改变半导体激光器的工作温度来调谐. 实验所产生的混沌光信号带宽超过 27 GHz (受限于所用频谱仪的测量带宽), 其频谱平坦度小于 5 dB.

**关键词:** 激光器, 混沌, 宽带, 环形结构

**PACS:** 42. 65. Sf, 05. 45. Jn

## 1. 引言

近 20 年来, 混沌激光的产生与应用受到越来越广泛的关注. 基于混沌激光的混沌保密通信<sup>[1]</sup>、混沌激光雷达<sup>[2]</sup>、快速随机数发生器<sup>[3,4]</sup>、相关混沌光时域反射仪<sup>[5]</sup>和光学相干层析<sup>[6]</sup>等众多应用被相继提出. 目前已实验证实, 光纤激光器<sup>[7]</sup>、固体激光器<sup>[8]</sup>、气体激光器<sup>[9]</sup>和半导体激光器<sup>[10,11]</sup>在附加扰动(光反馈、光注入或光电反馈)下均可以产生混沌激光. 在混沌激光的应用中, 混沌激光的带宽是一个重要的指标, 影响着混沌保密通信所能隐藏的信号速率、混沌激光雷达和相关混沌光时域反射仪的测量精度、随机数的产生速率等.

因半导体激光器具有体积小、价格低、易与其他光电子器件集成等优点, 故在混沌激光产生的研究领域里, 用半导体激光器产生混沌成为一个极为重要的分支. 受限于半导体激光器的弛豫振荡频率(典型值为 2—5 GHz), 混沌激光的带宽为 GHz 量级, 通过特别设计的混沌半导体激光器的带宽也不高于 8GHz<sup>[12]</sup>. 为获得更高带宽的混沌光, 研究人

员提出了利用强光注入带光反馈的半导体激光器中的理论方案, 以达到增强带宽目的<sup>[13]</sup>. 相对于无强光注入的情况, 利用这种方法可以使带宽提高大约 3 倍. 2008 年, 研究人员在实验中用外光注入分布式反馈(DFB)半导体激光器, 获得 16.7 GHz 的宽带混沌, 且通过调整注入光的频率可以调控混沌光信号的带宽<sup>[14]</sup>. 实验研究还证实, 将混沌光注入比其光频率略低的半导体激光器同样能够产生更高带宽的混沌——在 9.1 GHz 的频率失谐下获得带宽为 12 GHz 的混沌激光<sup>[15]</sup>. 另外, 将超快脉冲半导体激光器和光电振荡环相结合, 也可以达到带宽增强的效果, 即产生 8 GHz 以上的平坦宽带混沌<sup>[16]</sup>.

本文将 3 个 DFB 激光器的输出依次注入到下一个激光器中形成环形结构. 利用激光器间的频率失谐产生 20 GHz 以上的振荡, 利用激光器环对光信号进行放大, 环路的衰减控制激光器环最终的输出状态. 实验中可获得带宽超过 27 GHz (频谱仪测量范围) 的平坦宽带混沌信号. 对于 27 GHz 平坦宽带信号的产生, 产生高频振荡是其中关键, 将详细说明 20 GHz 以上振荡信号的产生过程. 进而介绍 27 GHz 宽带混沌的产生.

\* 国家自然科学基金科学仪器专项(批准号:60927007)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号:60908014)和国家自然科学基金(批准号:60777041)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yangyibiao\_tyut@sohu.com

## 2. 高频振荡的产生

首先用外光注入激光器产生 20 GHz 以上的振荡. 图 1 为实验装置图,DFB 激光器 LD1 的输出经由环形器 OC1 注入到 DFB 激光器 LD2 中. 注入光经掺铒光纤放大器 (EDFA1) 适当放大后由偏振控制器 (PC1) 控制其偏振态. 每个激光器都由低噪声电流源 (Newport model 501) 驱动,并由温度控制器 (ILX Lightwave LDT-5412)控制工作温度. LD2 相对于 LD1

的频率失谐 ( $\Delta\nu_{12} = \nu_1 - \nu_2$ ) 通过调整半导体激光器的工作温度来实现. 实验中用光谱仪 (Agilent 86140B) 观察混沌激光的波长. 激光器输出的激光信号经带宽为 47 GHz 的光电探测器 (u<sup>2</sup>t XPDV2020) 转变为电信号后,由 27 GHz 的频谱仪 (Agilent N9020A) 进行频域测量. 在实验中,LD1 和 LD2 的偏置电流分别为  $1.15I_{th1}$  和  $1.55I_{th2}$  ( $I_{th1} = 23\text{ mA}$ ,  $I_{th2} = 22\text{ mA}$ ,  $I_{th}$  表示所使用半导体激光器的阈值电流). LD1 的中心波长被固定在 1554.082 nm,EDFA1 的抽运电流设定为 50 mA. 频率失谐(注入后)  $\Delta\nu_{12} = 25.3\text{ GHz}$ .

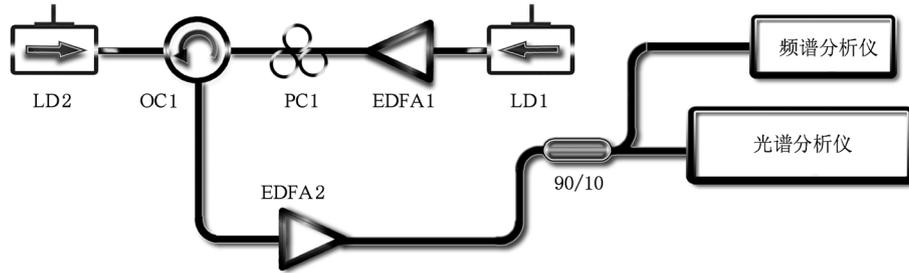


图 1 利用外光注入产生 20GHz 以上的振荡的实验装置图 LD 为 DFB 激光器,OC 为光环形器,PC 为偏振控制器,EDFA 为掺铒光纤放大器

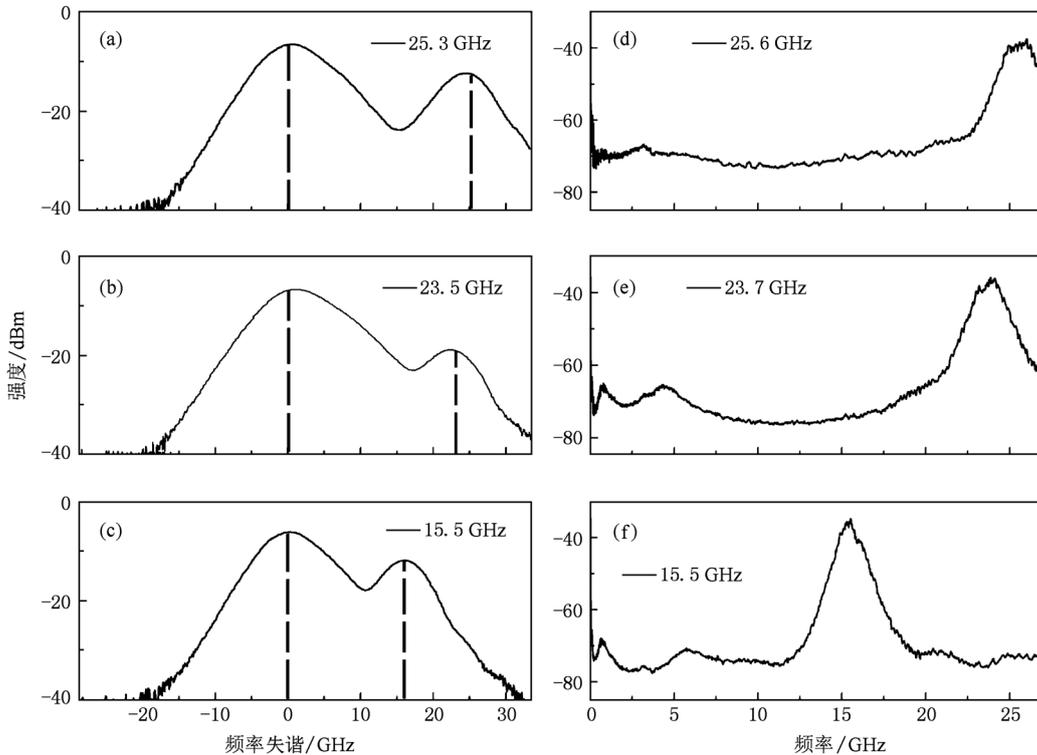


图 2 实验获得的 LD2 的光谱及频谱图 (a),(b),(c)对应 LD2 输出的光谱,(d),(e),(f)对应 LD2 输出的信号的频谱. 由于 LD1 的注入,LD2 发出的光包含两个频率:一个源于 LD2 被注入后其自身的光;另一个源于 LD1 的光注入 LD2 后发生的注入锁定. (a),(b),(c)中的标注表示 LD2 两个波长的频率差,横坐标 0 GHz 处对应 LD2 自身的光;(d),(e),(f)中的标注表示信号的中心频率

如图 2(a), (d) 所示, 25.3 GHz 频率失谐的注入光使 LD2 输出中心频率在 25.6 GHz 的宽带信号. 当调整 LD2 的工作温度以减小  $\Delta\nu_{12}$  时, LD2 输出信号的中心频率也会相应的向低频率方向移动, 且总是和  $\Delta\nu_{12}$  非常接近, 如图 2 所示. (信号中心频率与  $\Delta\nu_{12}$  不一致的地方主要由实验中半导体激光器的波长不稳定造成.) 显然, LD2 发出的信号主要由注入光和他本身的光的拍频产生.

### 3. 宽带平坦混沌的产生

利用光注入半导体激光器只产生了 20 GHz 以上的振荡信号, 为在此基础上产生平坦的宽带混沌, 引入第 3 个激光器 (LD3) 以形成环形结构,

使光信号在激光器环中不断循环以达到放大信号、增强带宽的作用. 如图 3 所示, 每个半导体激光器 (LD1, LD2, LD3) 的输出都经由环形器 (OC) 注入到下一个激光器之中. 注入光的偏振态都由偏振控制器 (PC) 控制. 注入到 LD2 和 LD3 的半导体光功率都分别由掺铒光纤放大器 (EDFA) 控制, 而注入 LD1 的光强度由衰减器 (ATT) 来控制. LD2 和 LD3 相对于 LD1 的频率失谐  $\Delta\nu_{1j} = \nu_1 - \nu_j$ , ( $j = 2, 3$ ) 通过调整半导体激光器的工作温度来实现. 实验中加入数字实时示波器 (5GSps 采样率, 500 MHz 带宽) 来监测激光器环输出的实时波形. EDFA2 的抽运电流设定为 100 mA. 频率失谐 (注入后)  $\Delta\nu_{12} = 25.3 \text{ GHz}$ ;  $0 \text{ GHz} > \Delta\nu_{13} > -4 \text{ GHz}$ .

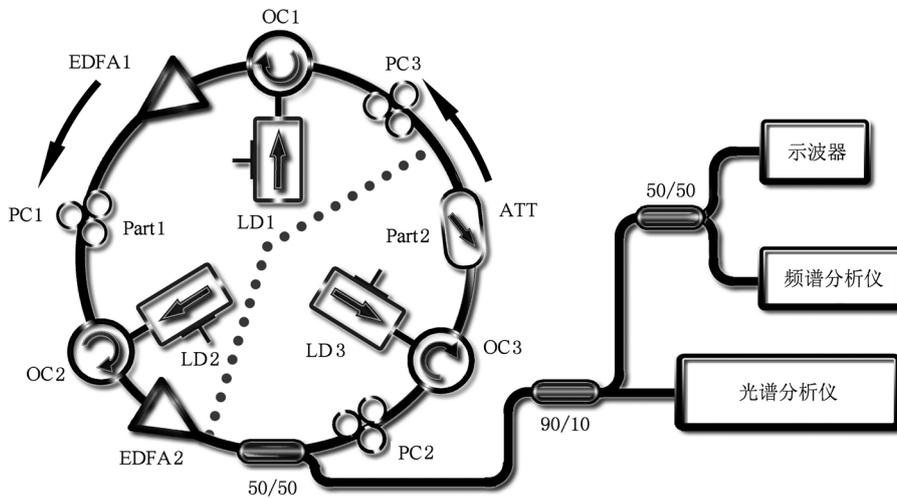


图 3 光纤环形激光器的实验装置图 OC, PC, LD 和 EDFA 同图 1; ATT 为衰减器

定义 10 dB 带宽为: 从频谱中的最高点下降 10 dB 后, 频谱曲线对应的宽度. 如图 4(a) — (c) 所示, 当注入强度由 0 依次变为 -20.0 dBm 和 -19.2 dBm 时, 半导体环输出信号的 10 dB 带宽由 2.5 GHz 变为 4.5 GHz 和 5.6 GHz. 10 dB 带宽随着注入强度的增加快速地增加. 同时, 在弛豫振荡频率附近激光器环输出的的信号有所增强. 实验中, 不论 LD3 的波长如何变化, LD3 输出的 20 GHz 以上部分的频谱形状总是和 LD2 相似. 因此我们认为, 当完整的激光器环形成时, LD3 在 20 GHz 以上的振荡主要由 LD2 的注入引起. 同理, LD1 在相同频率处的振荡又由 LD3 激发, 进而, LD1 再反过来增强 LD2 在相同频率处的振荡, 这样就表现为整个光纤环输出的信号带宽增强.

在图 4(c) 中可以看到, 激光器环输出功率完全可以在美国通信协会 (FCC) 为 22—29 GHz 车载雷达信号制定的功率密度的限制之内. 图 (c) 中最上方的曲线对应美国通信协会 (FCC) 为 22—29 GHz 车载雷达信号制定的功率密度的限制. 在实际使用中, 可以利用开关键控 (OOK) 的方式调制发射的信号, 并将其转换成电信号后用超宽带天线进行接收. 由于其发出的光波长为 1550 nm, 所以可以用商用通信光纤进行长距离的传输, 与光载无线电 (radio over fiber) 相结合<sup>[17]</sup>. 由图 4(a) — (c) 可以看到, 若作为 22—29 GHz 超宽带信号源, 其 10 dB 带宽可调.

当控制 ATT 使环路中的衰减进一步减小时, 25 GHz 以下的信号的功率也可以超过环路中有源器

件的放大阈值得到有效放大. 图 4(c) — (f) 显示, 各个频率处的信号被激发出来并且不断增强. 当各个频率的信号被放大之后, 增益饱和会使各频率信号的最大功率趋于一致. 最终, 当 LD1 的注入强度超过 1.25 dBm 时, 激光器环输出频谱既宽又平坦的混沌信号(图 4(f)).

图 4(f) 中, 频谱的最高点到最低点的垂直距离小于 5 dB. 由于频谱仪最大带宽为 27 GHz, 所以实验中没有观测此时输出信号在更高频段的情况. 但显而易见的是, 如果利用 80% 能量带宽来衡量此混

沌信号带宽, 其带宽会远高于 27 GHz. (80% 能量带宽所指为: 在信号的频谱上, 从直流分量的能量处开始积分, 包含全部能量的 80% 的点所对应的频率值即为其带宽<sup>[14]</sup>). 图 5 为输出信号的时序图及相应的自相关曲线, 从相关曲线上可以看到, 在相关峰的两侧约 0.4 ms 处各有一个高度为 0.21 的旁瓣, 它的位置恰好对应光在环路内环行一周的时间. 由环形激光器产生的宽频信号可以为相关光时域反射仪、随机数发生器等装置提供良好的随机信号, 甚至可以作为白噪声信号来使用.

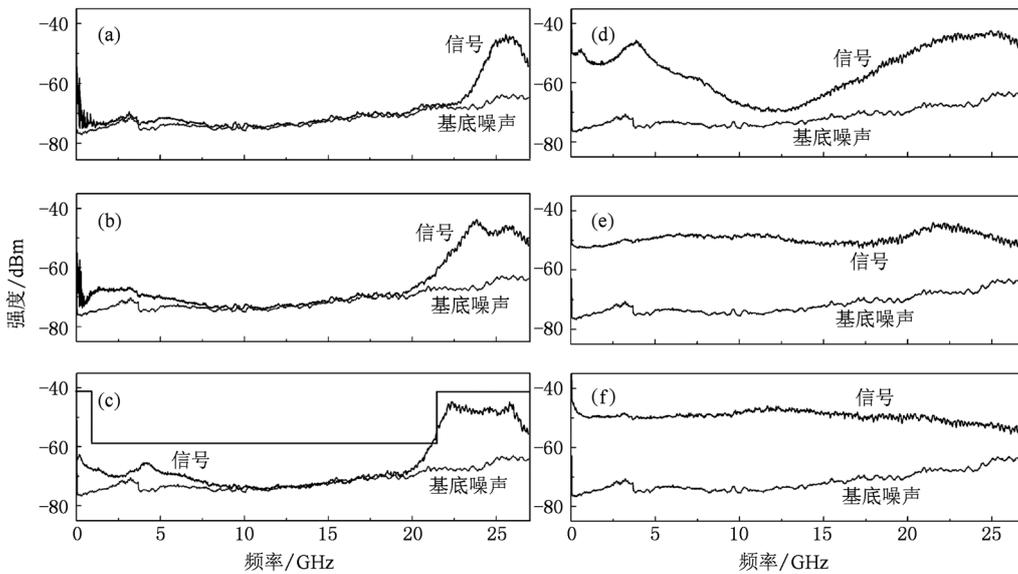


图 4 半导体激光器环输出信号的频谱变化图 (a) — (f) 对应的注入到 LD1 的光功率依次为 0, -20.0, -19.2, -8.9, 0.1, 1.25 dBm

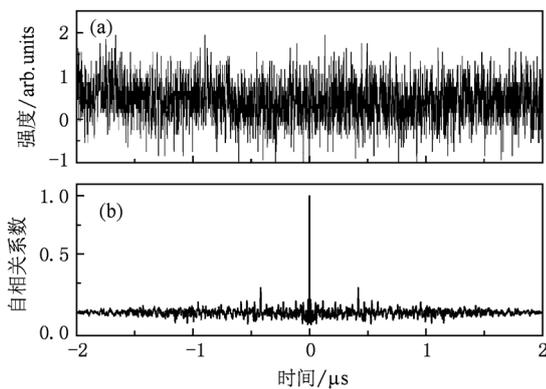


图 5 由激光器环输出的信号 (a) 时序图; (b) 自相关曲线

## 4. 结 论

利用光纤环形激光器产生了平坦的宽带混沌信号. 环形激光器主要由 3 个半导体激光器环形连接组成, 每个半导体激光器的输出依次注入后继的激光器以形成环形结构. 光信号在环路中不断循环以达到带宽增强的效果, 且通过改变环路的衰减可以使光纤环形激光器在两种状态间切换——27 GHz 平坦的宽带信号和满足 FCC 标准的车载雷达信号. 此装置既可以为随机数发生器、相关光时域反射仪等装置提供良好的宽带源, 还可以作为车载雷达的信号源.

- [1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, Garcia-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [2] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **10** 991
- [3] 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]
- [4] 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]
- [5] Wang Y, Wang B, Wang A 2008 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** 1636
- [6] Peil M, Fischer I, Elsäßer W, Bakic S, Damaschke N, Tropea C, Stry S, Sacher J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 091106
- [7] Sugawara T, Tachikawa M, Tsukamoto T, Shimizu T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3502
- [8] VanWiggeren G D, Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [9] Colet P, Roy R 1994 *Opt. Lett.* **19** 2056
- [10] Ohtsubo J 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1141
- [11] 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]
- [12] Argyris A, Hamacher M, Chlouverakis K E, Bogris A, Syvridis D 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 194101
- [13] Takiguchi Y, Ohayagi K, Ohtsubo J 2003 *Opt. Lett.* **28** 319
- [14] Wang A, Wang Y, He H 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1633
- [15] Someya H, Oowada I, Okumura H, Kida T, Uchida A 2009 *Opt. Express* **17** 19536
- [16] Callan K E, Illing L, Gao Z, Gauthier D J, Schol E 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 113901
- [17] Lim C S, Yee M L Ong L C 2006 *ITS Telecommunications Proceedings, 6th International Conference Chengdu, China*, 21—23 June, 2006 p250

## Generation of 27 GHz flat broadband chaotic laser with semiconductor laser loop \*

Feng Ye<sup>1)</sup> Yang Yi-Biao<sup>1)†</sup> Wang An-Bang<sup>1)</sup> Wang Yun-Cai<sup>1)2)</sup>

1) (Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

2) (Institute of Optoelectronics, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics devices of China, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 11 August 2010; revised manuscript received 27 September 2010)

### Abstract

Generation of flat broadband chaotic signal is demonstrated experimentally with a semiconductor laser loop, which consists of three laser diodes mainly. The output of each laser diode is injected into its neighbor diode as a loop. The injection light strength is controlled with erbium-dropped optical fiber amplifier or attenuator which is inserted between the diodes, and the detuning is adjusted by changing the temperature of the laser diode. Limited by the bandwidth of the laser diode, the bandwidth of the flat broadband chaotic signal is broader than 27 GHz or even more, and the fluctuation of the spectrum cure is less than 5 dB.

**Keywords:** laser, chaos, broadband, loop structure

**PACS:** 42. 65. Sf, 05. 45. Jn

\* Project supported by the Special Fund for Basic Research on Scientific Instruments of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60927007), the Young Scientist Found of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908014), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60777041).

† Corresponding author. E-mail: yangyibiao\_tyut@sohu.com