

半导体激光器混沌法拉第效应控制方法

颜森林

Control of chaos in a semiconductor laser using the Faraday effect

Yan Sen-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 240505 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.240505

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.240505>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冠状动脉系统高阶滑模自适应混沌同步设计

Chaos synchronization of coronary artery system based on higher order sliding mode adaptive control

物理学报.2015, 64(21): 210508 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210508>

一种基于强跟踪滤波的混沌保密通信方法

A method of chaotic secure communication based on strong tracking filter

物理学报.2015, 64(14): 140501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140501>

基于哈密顿函数的永磁同步电机混沌系统鲁棒控制

Robust control for permanent magnet synchronous motors based on Hamiltonian function

物理学报.2015, 64(9): 090503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.090503>

基于在线误差修正自适应 SVR 的非线性不确定分数阶混沌系统滑模控制

Sliding mode control of fractional order chaotic system based on an online error correction adaptive SVR

物理学报.2015, 64(7): 070502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.070502>

迟滞混沌神经元/网络的控制策略及应用研究

Control strategy and application of hysteretic chaotic neuron and neural network

物理学报.2015, 64(6): 060504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060504>

半导体激光器混沌法拉第效应控制方法

颜森林[†]

(南京晓庄学院电子工程学院, 南京 211171)

(2015年8月15日收到; 2015年9月10日收到修改稿)

提出了外腔延时反馈半导体激光器法拉第效应控制下的新激光系统, 构造出两种类型结构光路, 建立了法拉第效应控制下的延时负反馈、延时正反馈激光动力学物理模型, 研究了激光混沌控制与反控制等. 利用法拉第效应原理及磁致旋光性和系统特点, 调节控制光路中的光旋转角度和光延时间可实现双参数控制激光器, 控制激光到双周期、三周期及多周期, 使激光产生拍动等现象, 反控制激光周期到混沌等. 发现了以磁致旋光角分布的激光混沌控制与反控制区域. 并研究了激光混沌控制与周期控制的动态情况, 演示讨论了激光态的转化演变过程等.

关键词: 混沌, 控制, 激光器, 法拉第效应

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Pq, 02.30.Yy, 42.60.By

DOI: 10.7498/aps.64.240505

1 引言

混沌是普遍存在的一种物理现象, 非线性系统在一定条件下容易出现混沌行为. 混沌具有对初值条件极为敏感的特性, 其变化具有随机行为特点, 它的长期行为是难以预测的^[1-3]. 然而, 其背后隐藏着一些物理本质特性也已逐渐被人们所发现和利用^[3-6]. 人们总是期望找到一些方法或技术手段来控制混沌, 使其实现对混沌系统中某个不稳定周期轨道的稳定控制^[4-6]. 20世纪90年代, Ott等^[1]提出混沌控制方法后, 混沌控制技术研究迅速发展^[2,7-10]. 其中, 激光混沌控制作为一个重要研究方向也受到人们特别关注和重视, 控制方法有光延时反馈方法、光相位调制方法、注入周期信号方法、双劈反馈方法以及电流扰动方法等^[2,7-10].

在激光通信及光电器件应用中, 光反馈一直受到人们的关注. 例如, 在全光网络通信中, 完全隔离外部光进入激光器很难做到, 即使非常少量的光注入或反馈都能引起激光器工作不稳定^[11,12], 随着光注入或反馈光强度增加, 激光的动力学行为会变得非常复杂, 会出现相干光塌陷、频谱展宽、分岔

和混沌等现象^[9-12]. 本文提出法拉第效应控制激光混沌方法. 法拉第效应也称为磁光效应, 即磁场引起介质折射率变化而产生的旋光现象. 如线偏光通过处于通电螺线管磁场中的介质(如玻璃等)时, 其光波振动面会产生旋转, 这种磁致旋光性是法拉第1846年发现的, 是人类历史上发现光和电磁之间有内在联系的第一个现象. 本文着重研究外腔延时反馈半导体激光器混沌法拉第效应控制混沌方法, 通过调节控制参数, 可实现对激光混沌的多参数控制等. 另外, 研究了激光周期法拉第效应控制方法, 因为控制激光周期到多周期、到混沌是混沌反控制研究一个重要领域, 该方法对于激光系统和混沌反控制的研究是非常有帮助的.

2 法拉第效应延时负反馈控制方法

2.1 物理模型

外腔延时负反馈半导体激光器是一种非线性光学系统, 在理论和实验上被广泛研究过^[4-8], 延时反馈光再注入会导致激光器出现许多不稳定的非线性现象, 如分岔或混沌^[6-10]. 为了控制混沌激光, 先设计出法拉第效应控制下的负反馈控制系

[†] 通信作者. E-mail: yansenlinbsh@sina.com

统. 如图 1 所示: 激光通过偏振器 PC 后被分光镜 BS 分为两束光, 第一束光经平面镜 M₁ 反射回到激光器, 这一光路组合构成了人们所熟知的外腔延时反馈激光系统. 在一定条件下, 该系统激光器会输出混沌激光. 第二束光经过法拉第效应控制器 FT, 经平面镜 M₂ 反射后再通过 FT 及 PC 后回到激光器中. 这时 PC 又显示出检偏器的功能作用, 它能控制经过 M₂ 反射光回到激光器中的光通过量, 其比例大小由偏振光振动面与 PC 振动面的角度决定. 由于第二束光两次通过法拉第效应控制器必然受其影响和控制, 特别是光偏振方向受到影响. 这样 PC, FT 和 M₁ 等构成了控制光路. 这样两个光路组合构成了激光混沌控制系统. 为了简便, 假设激光器仅是单偏振光激光器, 且设置 PC 偏振面与激光偏振面相同. 下面可给出有法拉第效应控制下的动力学系统方程组 [3-8]:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} = & \frac{1}{2}(G - \gamma_p)E(t) + \frac{k_1}{\tau_L}E(t - \tau_1) \\ & \times \cos[\varphi(t) - \varphi(t - \tau_1) + \omega\tau_1] \\ & + \frac{k_2}{\tau_L}E(t - \tau_2) \cos(2\phi) \\ & \times \cos[\varphi(t) - \varphi(t - \tau_2) + \omega\tau_2], \quad (1a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} = & \frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma_p) - \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E(t - \tau_1)}{E(t)} \\ & \times \sin[\varphi(t) - \varphi(t - \tau_1) + \omega\tau_1] \\ & - \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E(t - \tau_2) \cos(2\phi)}{E(t)} \\ & \times \sin[\varphi(t) - \varphi(t - \tau_2) + \omega\tau_2], \quad (1b) \end{aligned}$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \gamma_e N - GV_p |E(t)|^2, \quad (1c)$$

式中, 变量 E 表示激光场慢变部分, 变量 φ 表示激光相位变化, 变量 N 表示激光器载流子数; $k_{1,2}$ 是两束光反馈系数, $\tau_{1,2}$ 是两束光在外腔中传输延时时间; ω 是激光频率; $\tau_L = 2n_g L/c$ 表示激光在其腔内长 L 来回一周的时间, c 是真空中光速, $n_g = c/v_g$ 是激光器群速折射率; β_c 是光线宽增强因子; 载流子非线性损耗速率由

$$\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$$

表示, 其中, A_{nr} 是非辐射复合速率, B 是辐射复合因子, C 是俄歇复合因子; 光子损耗速率是 $\gamma_p = v_g \alpha$, α 是光子损耗系数. 激光模式增益由式

$$G = (\Gamma v_g a/V)(N - N_{th})/\sqrt{1 + |E|^2/|E_s|^2}$$

表示, 其中, a 是增益常数, $\Gamma = V/V_p$ 是压缩和限制因子, V 是腔体积, V_p 是激光模式体积, $N_{th} = n_{th}V$ 是激光透明时的载流子数, n_{th} 是它的密度值, E_s 是饱和时场幅值, I 是驱动电流, q 是单位电荷. 方程 (1a) 和 (1b) 右边第三项是混沌控制项, 其中 ϕ 是偏振光通过法拉第效应控制器后旋转角度 (磁致旋光角). 磁致旋光角与光在法拉第效应控制器中所经过路程长度 S 和磁感应强度大小 B 成正关系, 即

$$\phi = \xi SB, \quad (2)$$

其中系数 ξ 与法拉第效应控制器中材料有关. 由于法拉第效应没有光的互易性, 因此光两次通过法拉第效应控制器后转过角度是 2ϕ . 具体控制过程是, 平面镜 M₂ 位置上下移动控制光的延时时间, 磁感应强度 B 控制 ϕ 大小变化. 为了方便, 可让 τ_2 和 ϕ 作为控制参数.

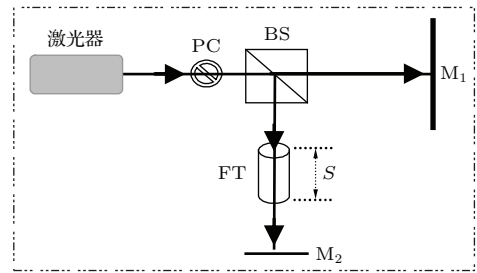


图 1 激光器混沌法拉第效应负反馈控制模块 其中, M_{1,2} 是平面镜, BS 是分光镜, PC 偏振器, FT 法拉第效应控制器

Fig. 1. Chaos-control block of the negative feedback laser using the Faraday effect. M_{1,2} is the mirror, BS is the beam splitter, PC is the polarizer, FT is the Faraday effect controller.

2.2 控制结果

数值模拟中用表 1 参量, 并取 $\tau_1 = 0.75$ ns, $k_1 = 0.02$. 没有控制时, 图 2 显示激光器呈现出混沌状态. 当施行混沌控制时, 让 $k_2 = 0.01$, 控制参数取 $\tau_2 = 1$ ns 和 $\phi = \pi/12$. 图 3 是控制结果, 显示激光被控制到三周期态. 当 ϕ 变化到 $\pi/8$, 激光被控制另外一个三周期态, 图 4 显示其控制结果. 研究发现: ϕ 为 $\pi/14, \pi/13, \pi/11, \pi/10, \pi/9$ 时, 激光都呈现出三周期态; 控制参数 ϕ 在较大的 $\pi/14 - \pi/9$ 范围内变化都可以有效地控制激光混沌到三周期态.

表1 激光器参量
Table 1. The laser parameters.

参量	值	参量	值
腔长 $L/\mu\text{m}$	350	俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6\cdot\text{s}^{-1}$	3.5×10^{-29}
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2	饱和光子场振幅 $ E_s /\text{m}^{-3/2}$	1.6619×10^{11}
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15	增益常数 a/cm^2	2.3×10^{-16}
压缩和限制因子 Γ	0.29	光线宽增强因子 β_c	6
群速折射率 n_g	3.8	驱动电流 I/mA	25
光子损耗系数 α/cm^{-1}	49	频率 $\omega/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	1438×10^{12}
非辐射复合速率 A_{nr}/s^{-1}	1.0×10^8	激光透明时载流子密度 n_{th}/cm^{-3}	1.2×10^{18}
辐射复合因子 $B/\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$	1.2×10^{-10}		

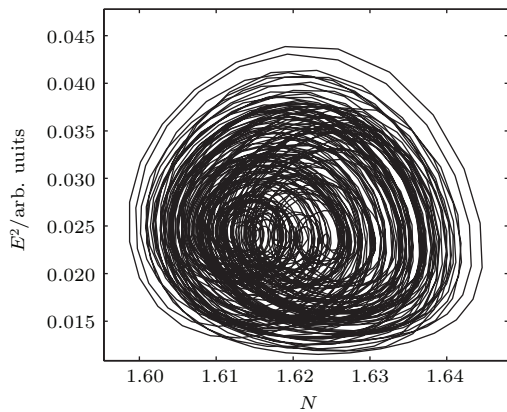


图2 典型的激光混沌吸引子
Fig. 2. Chaotic attractor.

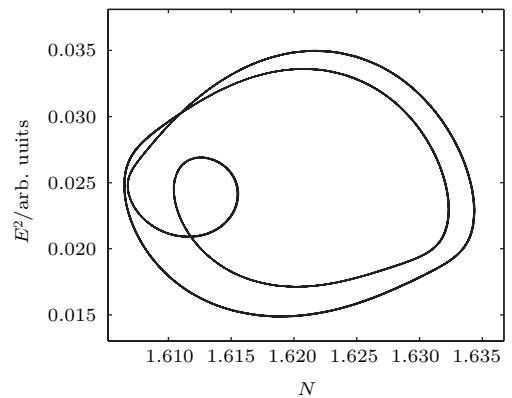


图3 三周期轨迹
Fig. 3. Tri-period trajectory.

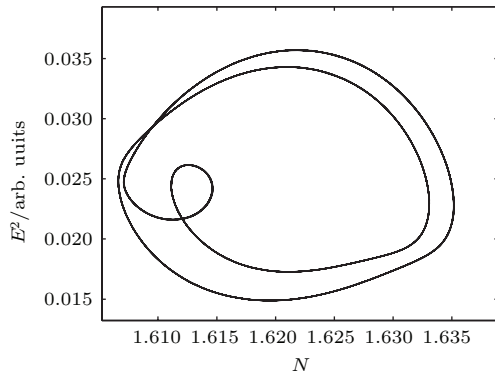


图4 另一个三周期轨迹
Fig. 4. Another tri-period trajectory.

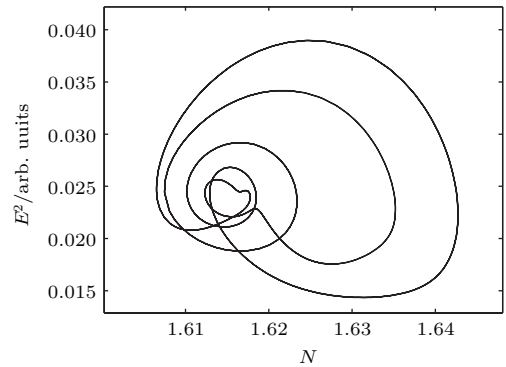


图5 七周期轨迹
Fig. 5. Period-7 trajectory.

我们实行另一个过程控制, 让 $k_2 = 0.015$, 控制参数取为 $\tau_2 = 0.8 \text{ ns}$ 和 $\phi = \pi/12$. 图5是控制结果, 显示激光器已被控制到七周期. 发现 ϕ 取为 $\pi/13.3, \pi/12.8, \pi/11.2, \pi/10.8$ 时, 激光混沌都能被控制到七周期, 即 ϕ 在较大的 $\pi/13.3 - \pi/10.8$ 范围内变化都可以有效地控制激光混沌到七周期. 继

续施行混沌控制且取 $\phi = \pi/8.8$ 时, 控制结果是三周期, 如图6所示. 发现 ϕ 取在 $\pi/9.6 - \pi/8$ 区域内, 激光都能够被控制到三周期.

本文还给出了一个混沌动态控制结果, 讨论混沌控制时的动态变化特点. 图7是混沌激光被动态控制到三周期变化过程, 其中在 30 ns 时实施控制,

控制参数是 $\tau_2 = 0.8$ ns 和 $\phi = \pi/8.8$. 发现混沌动态变化到三周期态有一个张弛振荡过程, 其演化时间有 10 ns.

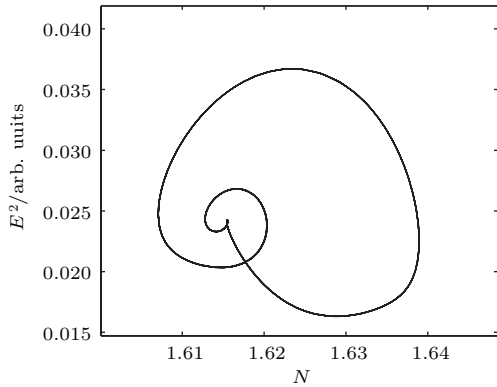


图6 一个三周期轨迹

Fig. 6. A tri-period trajectory.

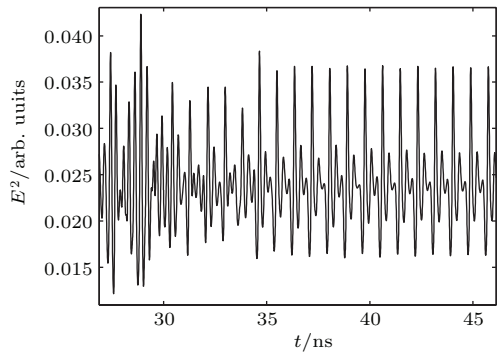


图7 混沌控制到三周期变化过程

Fig. 7. Chaos shifts to tri-period.

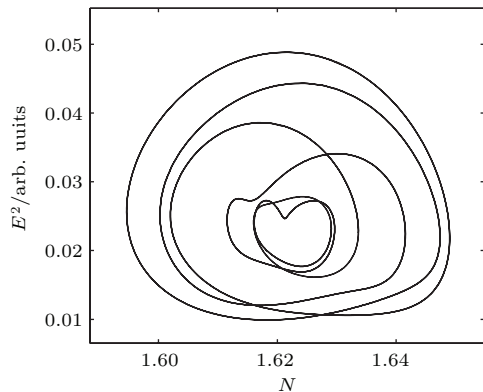


图8 八周期轨迹

Fig. 8. Period-8 trajectory.

下面再给出另两个控制混沌情况. 让 $k_2 = 0.012$, 控制参数取为 $\tau_2 = 0.6$ ns 和 $\phi = \pi/24$. 控制结果如图8所示, 其激光已被有效控制到八周期. 发现当 $\phi = \pi/30$ 时, 还可控制激光到另外一个八周期. 让 $k_2 = 0.011$ 以及取 $\tau_2 = 0.9$ ns 和

$\phi = \pi/10.2$ 时, 图9显示出控制结果是激光被控制到九周期. 如继续变化 ϕ 到 $\pi/12$ 时, 还能控制激光到其他九周期.

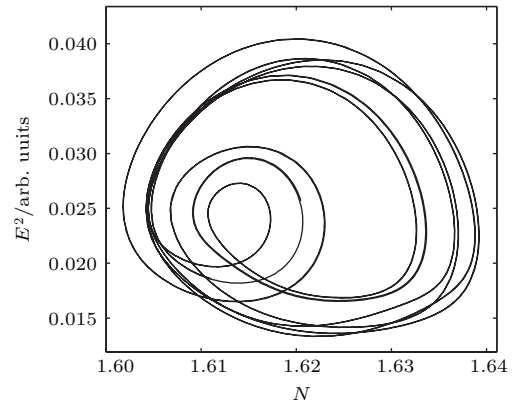


图9 九周期轨迹

Fig. 9. Period-9 trajectory.

3 法拉第效应延时正反馈激光周期控制方法

3.1 物理模型

图10是法拉第效应延时正反馈控制激光周期系统, 它以图1装置为基础.

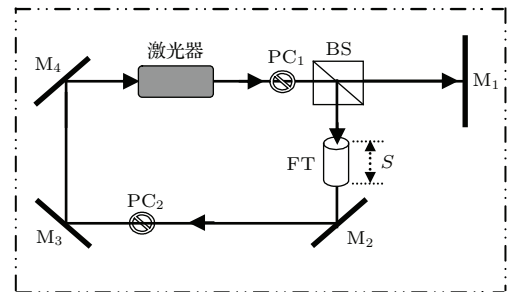


图10 激光器混沌法拉第效应正反馈延时控制模块 其中, $M_{1,2,3,4}$ 是平面镜, BS 是分光镜, $PC_{1,2}$ 是偏振控制器, PC_1 和 PC_2 在相同偏振面方向上

Fig. 10. Chaos-control block of the positive feedback laser using the Faraday effect. $M_{1,2,3,4}$ is the mirror, BS is the beam splitter. $PC_{1,2}$ is the polarizer. PC_1 and PC_2 are in the same direction as the polarization plane.

新设计的控制光路是: 分光镜 BS 分一束光经过法拉第效应控制器 FT, 经平面镜 M_2 反射后通过 PC_2 , 再经过 M_3 和 M_4 二次反射回到激光器中. 该光路相当于环形腔系统. 利用该光路可以实施激光周期控制操作. 下面给出具有控制功能的物理项, 就是把 (1a) 和 (1b) 式右边的第三项分别改写为:

$$+\frac{k_2}{\tau_L} E(t-\tau_2) \cos(\phi) \cos[\varphi(t) + \varphi(t-\tau_2) + \omega\tau_2], \quad (3a)$$

$$-\frac{k_2}{\tau_L} \frac{E(t-\tau_2) \cos(\phi)}{E(t)} \sin[\varphi(t) + \varphi(t-\tau_2) + \omega\tau_2]. \quad (3b)$$

3.2 控制结果

图 11 是无控制时激光输出周期脉冲情况, 其中激光周期系统参数是 $k_1 = 0.01$ 和 $\tau_1 = 0.8$ ns.

下面我们实施激光周期控制. 让 $k_2 = 0.01$, 控制参数为 $\tau_2 = 0.6$ ns 和 $\phi = \pi/10$. 控制结果是激光被有效控制到双周期, 如图 12 所示. 发现 ϕ 取值在 $\pi/10 - \pi/40$ 区域时, 激光器都能够出现双周期态.

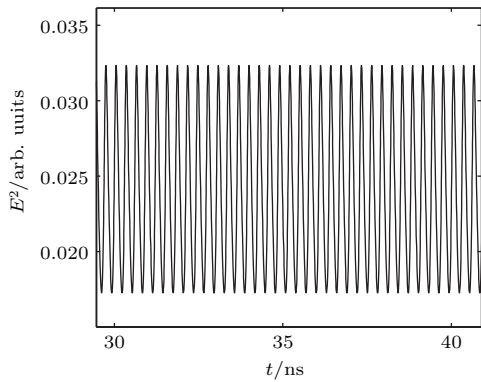


图 11 激光周期输出, $k_1 = 0.01$, $\tau_1 = 0.8$ ns
Fig. 11. Laser output, $k_1 = 0.01$, $\tau_1 = 0.8$ ns.

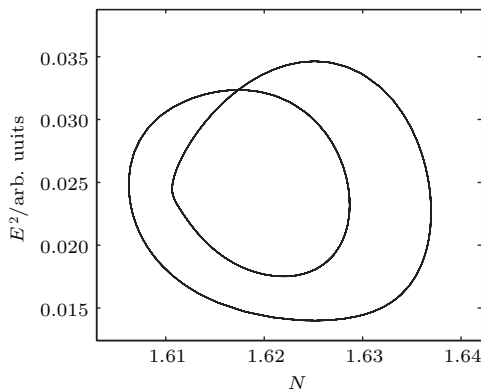


图 12 双周期
Fig. 12. Dual-period.

如控制参数取为 $\tau_2 = 0.7$ ns 和 $\phi = \pi/16$ 时, 激光还可被控制到其他双周期态, 如图 13 所示. 其中 ϕ 变化从 $\pi/10$ 到 $\pi/30$, 激光器都出现了双周期. 发现了激光被稳定控制到六周期的区域, 其中 ϕ 变

化可从 $\pi/4$ 到 $\pi/5$, 激光器都出现六周期. 图 14 是激光被控制到六周期的结果, 其中 $\phi = \pi/4$.

进一步发现了激光被控制到十三周期的区域, 其中 ϕ 是从 $\pi/6$ 到 $\pi/7.6$. 在该区域, 激光器都能够被控制到十三周期态. 图 15 是激光被控制到十三周期的相轨迹, 其中 $\phi = \pi/6$. 而当 $\phi = \pi/3.6$ 时, 激光还出现拍动现象, 拍动频率是 5.5 GHz, 轨迹呈现出多周期环带, 如图 16 所示.

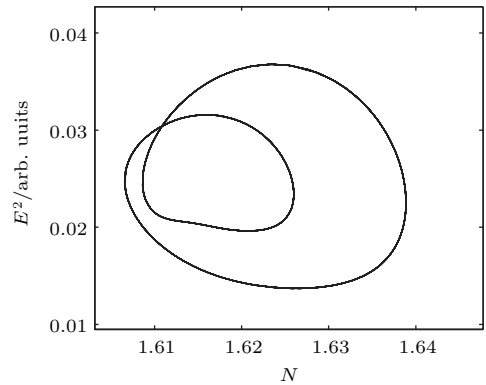


图 13 另一个双周期
Fig. 13. Another dual-period.

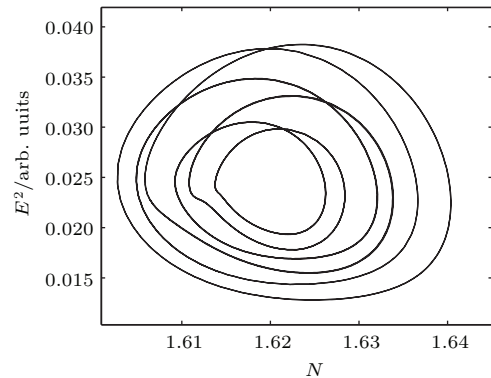


图 14 六周期
Fig. 14. Period-6.

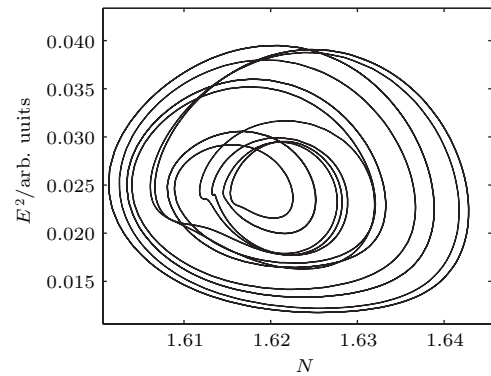


图 15 十三周期
Fig. 15. Period-13.

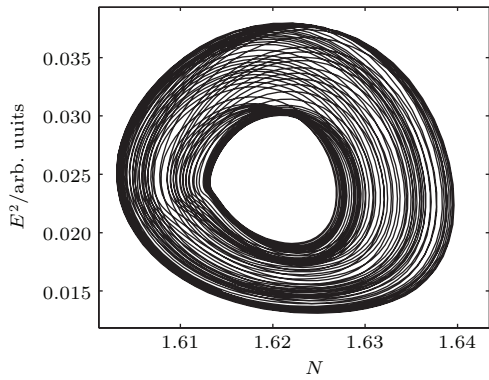


图 16 多周期带

Fig. 16. Multi-periodic belt.

当取 $\tau_2 = 0.9$ ns 和 $\phi = \pi/12$ 时, 还可控制激光器到三周期态, 如图 17 所示. 发现 ϕ 从 $\pi/4$ 变化到 $\pi/14$ 时, 都能控制激光到三周期.

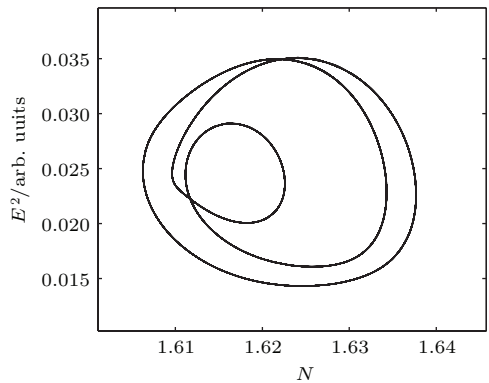


图 17 三周期

Fig. 17. Tri-period.

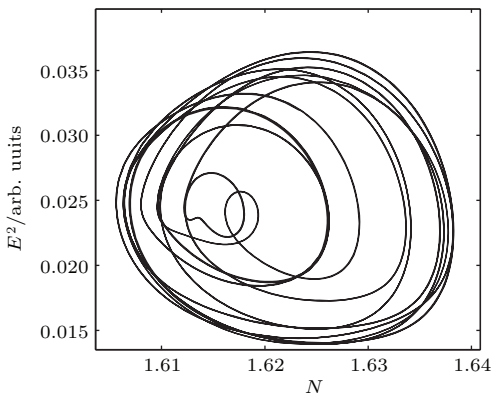


图 18 十三周期轨迹

Fig. 18. Period-13 trajectory.

给出 $k_2 = 0.12$ 时的控制过程. 控制参数取 $\tau_2 = 0.9$ ns 和 $\phi = \pi/6.8$, 图 18 是控制结果, 激光已被控制到十三周期. 取 $\phi = \pi/10$ 时, 图 19 显示激光器被控制到混沌态, 这就是通常所说的混沌

反控制. 如进一步使 ϕ 变化为 $\pi/12, \pi/14, \pi/16, \pi/18, \pi/20$ 直到 0 时, 激光器都能够被反控制到混沌态, 即存在一个较大的混沌反控制区域: $0 - \pi/10$. 最后给出一个周期动态控制结果, 分析控制激光周期到三周期的动态变化特点. 在 30 ns 时施加控制, 控制参数取 $\phi = \pi/4$, 图 20 显示激光动态控制到三周期的演化过程. 其中, 激光周期被控制到三周期的张弛振荡过程有 8 ns.

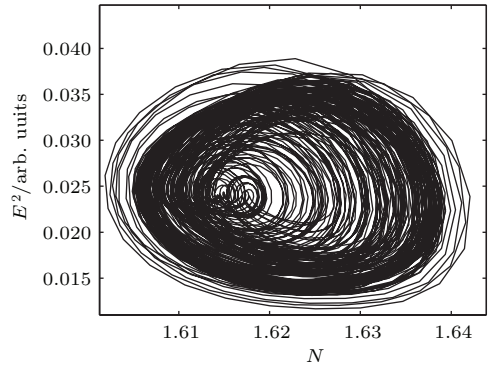


图 19 混沌吸引子

Fig. 19. Chaotic attractor.

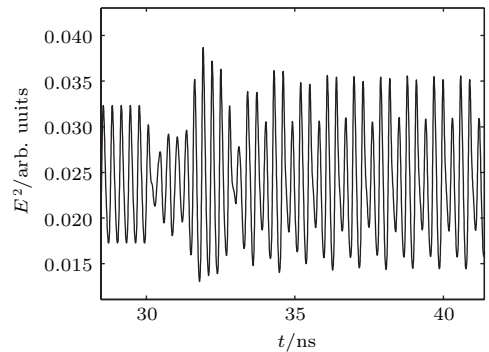


图 20 周期到三周期演化过程

Fig. 20. Single-period shifts to tri-period.

4 结 论

本文利用法拉第磁光效应, 提出外腔延时反馈激光控制方法, 建立了一个新的激光研究系统, 可灵活实现激光混沌控制与激光周期控制或者激光混沌反控制. 控制可使激光呈现出双周期、三周期及多周期等, 发现了激光周期、多周、混沌控制与反控制区域. 该控制方法对新激光系统和混沌控制及应用的研究是非常有益的.

参考文献

[1] Ott E, Grebogi, York J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196

- [2] Levy G, Hardy A A 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1
- [3] Liu X M, Tang X, Lu F, Ng J, Zhou X, Lu C 2005 *Opt. Express* **13** 142
- [4] Wu L, Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [5] Wu J G, Wu Z M, Xia G Q, Tao D, Lin X D, Xi T, Fen G Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1854
- [6] Liu M, Zhang M J, Wang A B, Wang L S, Ji Y N, Ma Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064209 (in Chinese) [刘明, 张明江, 王安帮, 王龙生, 吉勇宁, 马喆 2013 物理学报 **62** 064209]
- [7] Yan S L 2009 *J. Mod. Opt.* **56** 539
- [8] Yan S L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3810 (in Chinese) [颜森林 2010 物理学报 **59** 3810]
- [9] Yan S L 2010 *Opt. Commun.* **283** 3305
- [10] Yan S L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 090503
- [11] Wu J G, Wu Z M, Xi T, Li Fan, Wei D, Xia G Q 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 587
- [12] Wang S T, Wu Z M, Wu J G, Zhou L, Xia G Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154205 (in Chinese) [王顺天, 吴正茂, 吴加贵, 周立, 夏光琼 2015 物理学报 **64** 154205]

Control of chaos in a semiconductor laser using the Faraday effect

Yan Sen-Lin[†]

(School of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

(Received 15 August 2015; revised manuscript received 10 September 2015)

Abstract

We present a novel laser system with an external cavity delay feedback semiconductor laser under the control of Faraday effect. To study the chaos-control and chaos-anti-control of the laser system, we construct two types of optical path structures as two control systems of the negative feedback and the ring cavity by using the combination of the Faraday effect controller, the polarizer and the mirror. We give a physical model of laser dynamics with the delayed negative feedback or the delayed positive feedback under the control of Faraday effect. Using the Faraday effect principle of magnetic rotation and the characteristics of the system, we can achieve the double parameter control of the laser. We can shift the optical rotation angle by operating Faraday effect controller and modulate the optical delay time by performing the mirror to vary the double parameter. The laser can be controlled to a double-cycle, a tri-cycle, a multi-cycle, and beat phenomenon by using the control system of the negative feedback, etc. The periodic laser can be anti-controlled to chaos by using the control system of the ring cavity. Some control and anti-control areas formed with the distribution of magnetic rotation angular are found in the laser. For the negative feedback system under the some control cases, the chaotic laser can be controlled to some tri-cycle states between $\pi/14$ and $\pi/9$. By shifting the control parameters, the chaotic laser can be controlled to some cycle-7 states between $10\pi/133$ and $10\pi/108$ and another tri-cycle region is found from $10\pi/96$ to $\pi/8$. Under other control parameters, the chaotic laser can be controlled to some cycle-8 or cycle-9 states. For the ring cavity system under the some control cases, the dual-cycle region is between $\pi/10$ and $\pi/30$, the cycle-6 region is between $\pi/4$ and $\pi/5$, the cycle-13 region is found to be from $\pi/6$ to $10\pi/76$. In another control case, the large chaos-anti-control region is found to exist between 0 and $\pi/12$. Dynamic controls of the chaotic laser and the periodic laser are also studied while the transformation and evolution of laser states are discussed. It is found that it takes about 10 ns for one state to change into another state when the control operation is applied to the laser. The control method is very useful for studying chaos-control, new laser system and its application.

Keywords: chaos, control, laser, Faraday effect

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Pq, 02.30.Yy, 42.60.By

DOI: 10.7498/aps.64.240505

[†] Corresponding author. E-mail: yansenlinbsh@sina.com