

文章编号: 1001-4322(2003)01-0037-04

PV 型 HgCdTe 光电探测器中的混沌及其诊断*

马丽芹, 程湘爱, 许晓军, 李文煜, 陆启生

(国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 对激光辐照半导体光电探测器的实验研究, 发现当一束不太强的稳定连续波激光照射在 PV 型 HgCdTe 光电探测器上时, 可以引起探测器出现混沌行为。利用光电探测器的光电压信号随时间变化的实验数据, 通过求功率谱、计算 Lyapunov 指数对混沌进行了诊断。

关键词: HgCdTe 光电探测器; 混沌; 功率谱; Lyapunov 指数

中图分类号: TN247

文献标识码: A

混沌是当今倍受关注的前沿课题及学术热点, 随着人们研究的不断深入, 已在多个领域发现了混沌现象。半导体光电探测器中的混沌是由 Teitsworth 等人首先在 p-Ge 红外光电探测器中观察到的^[1,2], 他们建立了非本征光电导载流子输运模型。当对处于液 He 温度下的这种 p-Ge 光电探测器的偏置电流作周期性调制, 且调制频率和调制幅度达到一定程度时, 非本征光电探测器便出现混沌。Teitsworth 等人的结论引起了人们的极大兴趣。近十年来已有不少文章对光电探测器中的混沌进行了讨论, 但对这方面的研究还不够深入, 并且多数文章是针对光导型半导体材料的, 目前尚未发现有对光伏型半导体光电探测器混沌行为的报道。

我们在用激光辐照半导体光电探测器的实验研究中, 发现当一束不太强的稳定连续波激光照射在 PV 型 HgCdTe 光电探测器上时, 可以引起探测器出现混沌行为。本文利用光电探测器的光电压信号随时间变化的实验数据, 通过求功率谱、计算 Lyapunov 指数的方法对混沌进行了诊断。

1 实验及结果

实验装置如图 1 所示, 用氟化氙连续波激光器的 $3.8 \mu\text{m}$ 激光对工作在 77 K 温度下的 PV 型 HgCdTe 探测器进行辐照实验研究。探测器的输出信号由多通道测量仪记录, 采样频率为 100 kHz, 同时对激光器输出功率的稳定性进行监测。

实验中发现: 当激光辐照使探测器达到非线性响应饱和和阈值以后, 继续增加激光辐照功率时, 探测器出现混沌输出, 至 $720 \sim 800 \text{ mW/cm}^2$ 时混沌现象明显, 如图 2 所示(横坐标表示采样时间, 纵坐标表示探测器输出光电压信号), 其振荡峰值不超过饱和阈值, 振荡中心接近于无光照时的输出。图 2 中 (a), (b) 分别表示在同一激光辐照功率密度下激光两次辐照同一个 PV 型 HgCdTe 探测器的输出信号, 两次的输出波形毫无相似之处, 这正符合混沌的特性。

2 混沌的诊断

从图 2 可以看出, 光电探测器的输出信号是复杂的非周期性的, 但这不足以确定一定是混沌现象, 可以根据功率谱、计算 Lyapunov 指数作进一步判定。

2.1 功率谱

光电探测器处于混沌过程中, 它的输出既不是规则的, 也不是象噪声那样完全无规律。反映在功率谱上便是连续谱上迭加了具有一定宽度的线状谱。根据此特征, 可以由功率谱来判别一个时间序列是完全随机的、周

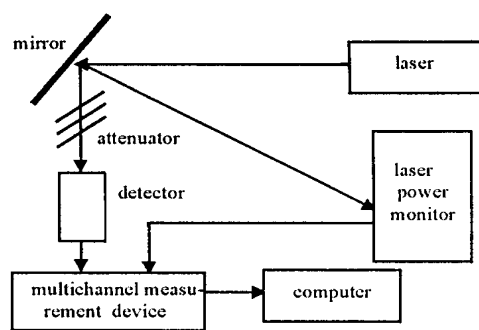


Fig. 1 Experimental setup of laser irradiating detector
图 1 激光辐照探测器的实验装置图

* 收稿日期: 2001-11-20; 修订日期: 2002-06-24

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 马丽芹(1963-), 女, 博士生, 副教授; 主要从事工程光学、激光与物质相互作用方面的教学与科研工作; E-mail: Maliqin01 @ 263.net.

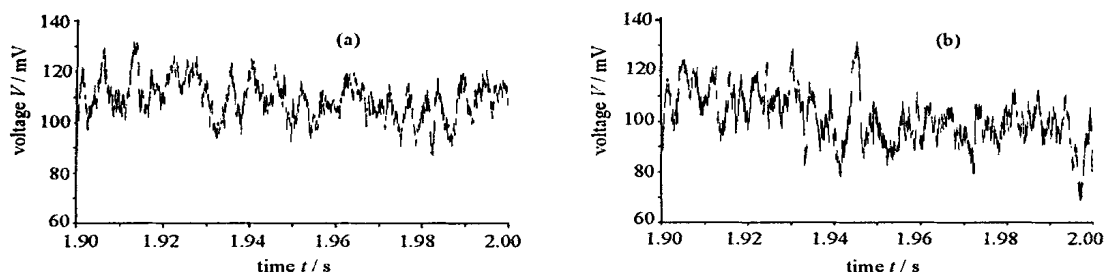


Fig. 2 Experimental signals of the PV-type HgCdTe detector under laser irradiation twice at same condition (laser power density of 758.5 mW/cm^2 , irradiation time of 1 second)

图2 激光两次辐照同一 PV 型 HgCdTe 探测器时的输出电压信号(激光辐照功率密度为 758.5 mW/cm^2 , 辐照时间为 1s)

期的、还是混沌的。图 3 为与图 2 (a) 对应的 PV 型 HgCdTe 光电探测器输出的功率谱,从图中可以看出该功率谱的特点是在连续谱上迭加着一些无规律的谱峰,与完全随机(平滑的连续谱)不同。所以在这里能确定是混沌并与随机运动加以区别,功率谱法是有效的。

2.2 Lyapunov 指数

通过求功率谱可以定性地判断一个动力学系统是否是混沌的。为了定量地判断,人们引入了表征吸引子任意二相邻轨道分离快慢程度的量——Lyapunov 指数^[3]。若存在正的 Lyapunov 指数,则认为系统处于混沌状态,并且指数越大说明混沌程度越大。

当实验结果为一时间序列 $x(t)$ 时,用相空间重构法来计算 Lyapunov 指数,即适当选取一时间延迟量 τ ,取 $x(t), x(t+\tau), x(t+2\tau), \dots, x[t+(m-1)\tau]$ 为 m 维相空间轨线点的坐标,根据相空间轨线(构成所谓吸引子)的演化来估算 Lyapunov 指数。由于能形象地画出的最大维数是 3,因此如果仅想从相空间轨线的表现来判断系统运动的性质,则可简单地取 m 等于 2 或 3,并且最有意义、人们最关心的是计算出最大的 Lyapunov 指数。相空间重构法虽然是用一个变量在不同时刻的值构成相空间,但动力学系统的一个变量的变化必然跟此变量与系统的其它变量的相互作用有关,即此变量随时间的变化隐含着整个系统的动力学规律。因此重构的相空间轨线也反映系统状态的演化规律。

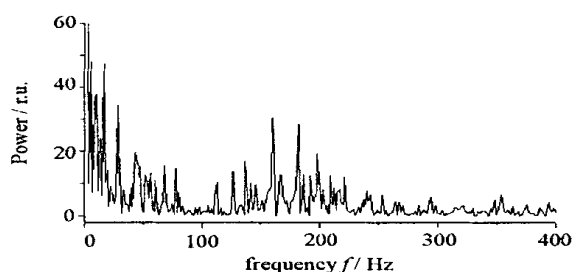


Fig. 3 Power spectrum corresponding to Fig. 2 (a)

图3 与图 2(a) 对应的功率谱

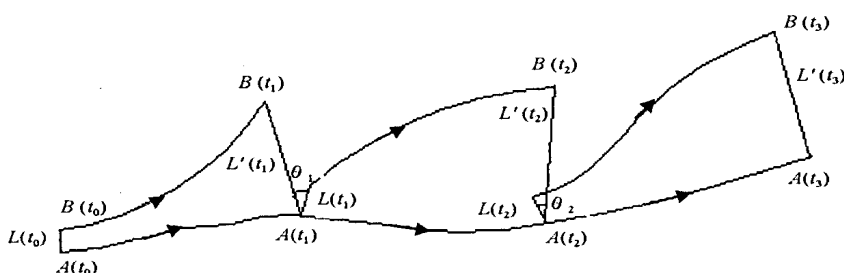


Fig. 4 Schematic representation of the evolution and replacement procedure of perturbation

图4 微扰的演化和替换示意图

计算 Lyapunov 指数需要一对相邻的轨道,由实验数据得到的那条轨道作为基准轨道,通过在时间序列中选取与考察点相差一个轨道周期左右的点集作为另一时间序列来建立另一轨道作为参考轨道,如图 4 所示。从参考轨道上选取初始考察点 $A(t_0)$ 的最近邻点 $B(t_0)$,该两点的空间距离称为初始微扰 $L(t_0)$,参考点沿参考轨道、考察点沿基准轨道经过一个时间步长后, t_1 时刻该两点分别演化为 $A(t_1)$ 和 $B(t_1)$,此两点的空间距离就是演化后的微扰 $L(t_1)$ 。为了始终保持微扰为小量,演化后的微扰 $L(t_1)$ 不能作为下一时间步长的初始微扰,必须进行类似 Gram-Schmidt 重整化过程(GSR):通过在与演化后微扰相同的方向上从参考轨道中选取新的参考点,使之与考察点 $A(t_1)$ 的空间距离 $L(t_1)$ 尽可能小, $L(t_1)$ 即为下一时间步长的初始微扰。依此类推,经过又一个时间步长后, t_2 时刻点 $A(t_1)$ 演化为 $A(t_2)$ 而 $L(t_1)$ 演化为 $L(t_2)$ 。在得到基准轨道上所有考察点的基础上即可求得最大 Lyapunov 指数^[4]

$$= \frac{1}{t_M - t_{0_{k=1}}} \ln \frac{L(t_k)}{L(t_{k-1})}$$

式中, M 是演化过程总迭代次数。由于实验数据量的有限, 可能会造成 $L(t_k)$ 与 $L(t_{k-1})$ 之间存在角度偏差 θ_k ($k = 1, 2, \dots, M$), 那么在微扰替代过程中使初始微扰 $L(t_k)$ 尽可能小与角度偏差 θ_k 尽可能小之间只能折中考虑。

在具体计算过程中诸如重构吸引子的维数、延迟时间、时间步长、初始微扰的大小、噪声的影响、时间序列数据量的要求等都要有所考虑。要求选择适当的值, 若选择不当, 会影响计算结果的精确度和可靠性。

根据 Applied Chaos Lab/ Georgia Tech School of Physics, ND T08^[5] 程序进行计算得到: 当激光功率密度为 722 和 758.5 mW/cm² 时, 探测器输出信号的 Lyapunov 指数分别为 1.19 和 1.28。

监测激光功率装置中所用的敏感元件为 PC 型 HgCdTe 红外探测器。改变在该探测器上的激光强度, 可以测出探测器达到线性饱和时的输出电压值, 然后用此装置监测实验中的激光功率, 只要其输出电压值小于线性饱和阈值, PC 型 HgCdTe 探测器就处于线性响应状态。其输出电压信号保持基本稳定, 因此激光器的输出也是稳定的。由此可断定 PV 型 HgCdTe 半导体红外光电探测器在波长为 3.8 μm 的稳定连续波激光辐照下, 当激光辐照密度为 720 ~ 800 mW/cm² 时, 探测器出现明显的混沌现象。

3 讨 论

激光辐照光电探测器出现混沌现象的可能原因如下: 激光辐照光电探测器时, 光电探测器由于吸收激光辐射能量而升温, 从而引起探测器的光伏电压以及内阻有所变化。激光辐照强度超过一定程度以后, 造成光生载流子过量, 光生电动势平衡了 p-n 结扩散电动势, 此时 PV 型光电探测器失去探测器作用, 相当于一般半导体材料。这种由光伏信号体现的混沌现象可能是光生电动势与 p-n 结扩散电动势之间在温升造成的内阻的干扰下所产生的无规律的竞争造成的。

混沌是由系统的非线性过程所引起的, 实验中测到的是光伏信号的混沌, 大于零。由于实验条件限制, 未测探测器内的载流子运动以及温度、内阻等变化的规律, 所以也无法从实验判断是否同时存在其他混沌, 这将由系统确定的动力学方程组决定。我们将进一步研究激光辐照下光电探测器产生混沌的物理机制, 并给出数值模拟结果。

参考文献:

- [1] Teitsworth S W, Westervelt R W, Italler E E. Nonlinear oscillation and chaos in electrical breakdown in Ge[J]. *Phys Rev Lett*, 1983, **51**: 825—828.
- [2] 姜宗福. 激光引起半导体红外光电探测器失效的一种新机制[J]. 中国激光, 1996, **A23**(3): 229—233. (Jiang Z F. A new mechanism of semiconductor infrared photoelectric detector disabled arose by laser. *Journal of Chinese Lasers*, 1996, **A23**(3): 229—233)
- [3] 刘秉正. 非线性动力学与混沌基础[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1994. 222—223. (Liu B Z. Nonlinear dynamics and chaos foundation. Changchun: Northeast Normal University Press, 1994. 222—223)
- [4] Wolf Alan, Swift Jack B, Swinney Harry L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. *Physica D*, 1985, **16**: 285—317.
- [5] Applied Chaos Lab/ Georgia Tech School of Physics. The Nonlinear Dynamics Toolbox, file NDT08[CP].
- [6] 陆启生, 曾雄文, 苏柏宏, 等. 光电探测器中的非线性过程[J]. 红外与激光工程, 1997, **26**(1): 12—20. (Lu Q S, Zeng X W, Su B H, et al. Nonlinear procedure of a photoelectric detector. *Infrared and Laser Engineering*, 1997, **26**(1): 12—20)
- [7] Teitsworth S W. The physics of space charge instabilities and temporal chaos in extrinsic photoconductors[J]. *Applied Physics A*, 1989, **48**(2): 127—136.
- [8] 陈士华, 陆君安. 混沌动力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. 359—362. (Cheng S H, Lu J A. Chaos dynamics[M]. University of Hydraulic and Electric Engineering Publishing Company, 1999. 359—362)

Chaos and its diagnosis in PV-type HgCdTe detector

MA Li-qin, CHENG Xiang-ai, XU Xiao-jun, LI Werr-yu, LU Qi-sheng

(Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In our experimental research on laser irradiating semiconductor photodetectors, chaos in the PV-type HgCdTe detectors irradiated by a mild stable continuous wave laser is found. The detectors will give chaotic output when the irradiation power density of laser increases above the saturation threshold of them. Chaos is diagnosed by determining the power spectrum and Lyapunov exponent from the output signal of the detectors in this paper.

Key words: HgCdTe detector; Chaos; Power spectrum; Lyapunov exponent