

SETMOS 实现多涡卷蔡氏电路的研究*

冯朝文[†] 蔡 理 张立森 杨晓阔 赵晓辉

(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2009 年 12 月 18 日收到; 2010 年 6 月 13 日收到修改稿)

基于细胞神经网络结构, 利用具有负微分电阻特性的单电子晶体管与金属氧化物半导体混合结构器件 SETMOS 实现了多涡卷蔡氏电路. 对该电路系统的基本动力学特性(如相图、分岔图、Lyapunov 指数、Poincaré 映射和功率谱)进行了理论分析和数值仿真, 并利用电路仿真实验验证了该三阶四涡卷蔡氏电路设计的正确性和可行性. 研究表明, SETMOS 的负微分电阻特性决定着多涡卷蔡氏电路的复杂动力学行为, 而且所设计的电路结构简单易行.

关键词: 单电子晶体管, 负微分电阻, 多涡卷, 分岔

PACC: 0547

1. 引 言

相比于传统的单涡卷和双涡卷混沌系统, 多涡卷混沌系统呈现出更为复杂的结构和动力学行为, 在混沌保密通信和信息隐藏等领域具有较好的应用前景^[1,2]. 近年来, 有关多涡卷混沌吸引子的研究^[1-6]逐渐成为混沌研究领域的一个新方向. 同时, 通过对此类系统中混沌的生成机理进行研究也可以加深人们对于混沌系统的理解, 有助于发展新型混沌系统. 在该领域的研究中, 文献[7]对近年来提出的多涡卷混沌系统模型及其硬件实现方式进行了综述.

蔡氏电路的物理性质是一个非常简单的电子混沌发生器, 不论对于实验室实验研究混沌, 还是利用计算机模拟研究混沌, 蔡氏电路都是一个范例^[8]. 在这个系统中, 如果改变系统参数或非线性函数, 可以有许多非常复杂的动力学行为, 例如单周期解、多周期解、混沌吸引子等等.

当金属氧化物半导体场效应晶体管的发展接近尺寸极限时, 一批新兴的纳米器件成为超大规模集成电路芯片设计和制造的备选对象, 从而使纳电子器件及其电路实现成为研究的热点^[9]. 单电子晶体管 (SET) 和金属氧化物半导体混合型纳电子器件

SETMOS 的负微分电阻 (NDR) 特性呈现出库仑振荡现象^[10], 本文将利用 SETMOS 的 NDR 特性得到设计蔡氏混沌电路所需的非线性函数, 然后基于细胞神经网络 (CNN) 思想实现蔡氏电路, 进而产生多涡卷混沌吸引子, 最后通过理论分析和仿真实验研究所设计混沌电路具有的非线性动力学行为.

2 基于 SETMOS 的蔡氏多涡卷混沌吸引子

大多数混沌系统中含有状态变量的乘积项^[11-15]. 其电路实现方法主要有以下三种: 一是利用模拟乘法器实现非线性乘积项^[16], 二是通过线性分段函数来代替乘积项^[17], 三是使用绝对值函数和开关函数来代替非线性乘积项^[18]. 但有一类只含有非线性函数而没有状态变量乘积项的混沌系统, 例如蔡氏系统^[19]. 这类系统具有混沌的所有特征, 而且利用硬件容易实现, 因而成为广泛研究的内容.

非线性函数对于蔡氏电路多涡卷混沌的产生至关重要. SETMOS 的 NDR 特性曲线是一个光滑连续的非线性函数, 同时具有多个正负斜率区, 因此可用于实现蔡氏电路所需的非线性函数.

三维蔡氏电路的无量纲状态方程为

$$\dot{x} = \alpha(y - x - h(x)),$$

$$\dot{y} = x - y + z,$$

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2008AAJ225) 资助的课题.

[†] E-mail: phonchownfcw@sohu.com

$\dot{z} = -\beta y$ -系统(2)中 x, y, z 为状态变量; $\alpha, \beta, \mu, \gamma, \varepsilon$ 为实常数; 非线性函数 $f(x)$ 为 SETMOS 的 NDR 特性模型经简化后的归一化形式,

$$(1)$$

系统(1)中 $h(x)$ 为非线性函数, $h(x) = m_1 x + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)(|x+1| - |x-1|)$; x, y, z 为状态变量; $\alpha, \beta, \gamma, m_0, m_1 \in R$ 为系统的参数. 本文为了基于 SETMOS 的 NDR 特性构建多涡卷蔡氏电路, 须对系统(1)作如下变型:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha y - \mu x - \varepsilon f(x), \\ \dot{y} &= x - y + z, \\ \dot{z} &= -\beta y - \gamma z. \end{aligned} \quad (2)$$

$$f(x) = \sum_{i=0}^6 k_i |x - x_i| + k. \quad (3)$$

这里 k_i, k 为归一化拟合参数, x_i 为归一化拟合点. 各 k_i 构成向量 $\mathbf{K} = [4.670, -5.895, 5.670, -5.038, 4.847, -4.893, 4.948]^T, k = -4.129$, 各拟合点 x_i 构成向量 $\mathbf{X} = [-0.88, -0.66, -0.47, -0.14, 0.12, 0.49, 0.75]^T$.

固定参数 $\alpha = 10.5, \beta = 15, \gamma = 0.05, \varepsilon = 1$, 若参

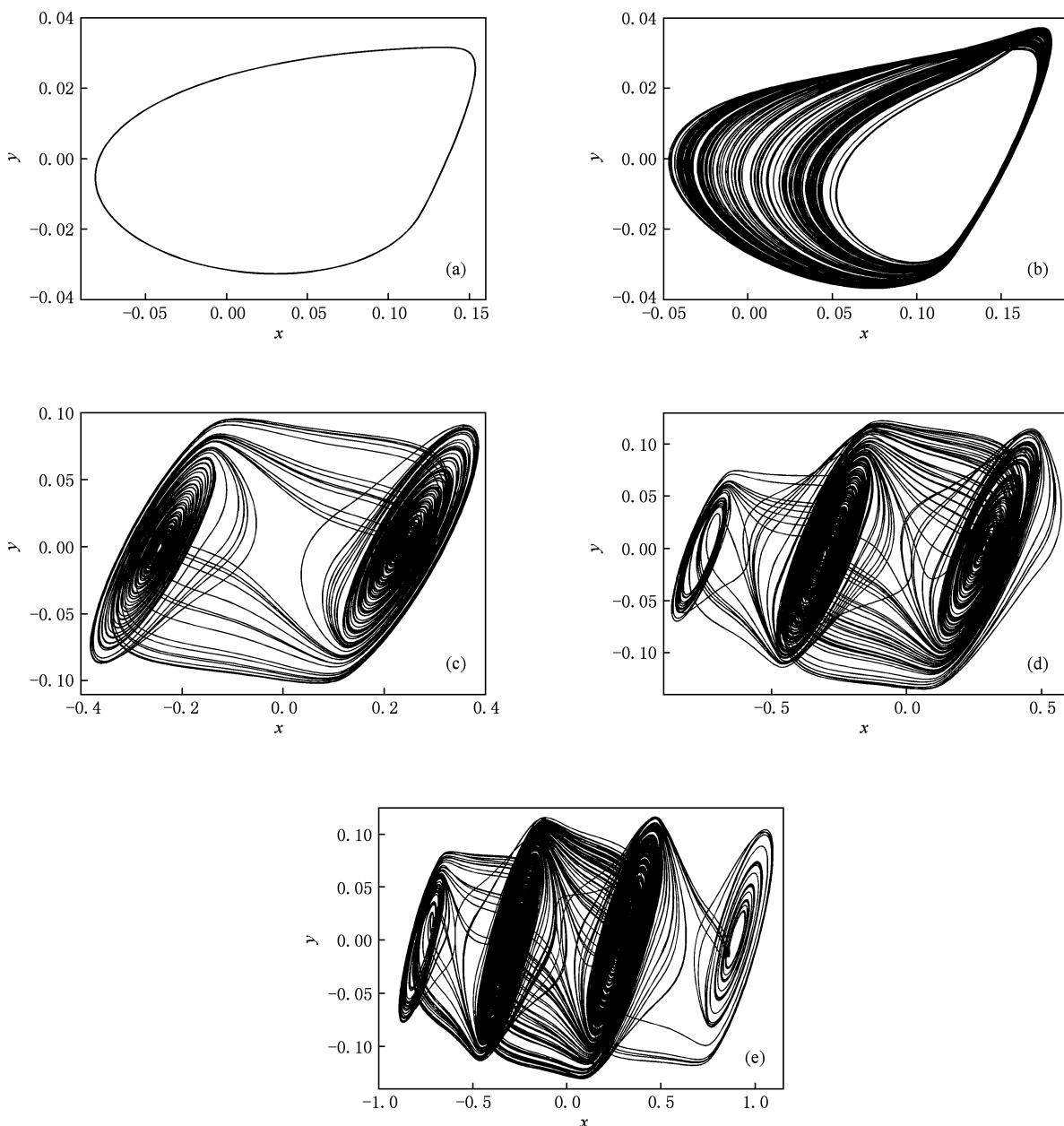


图1 当 μ 变化时系统(2)在相空间 $x-y$ 平面上的典型混沌吸引子 $\alpha = 10.5, \beta = 15, \gamma = 0.05, \varepsilon = 1$. (a) $\mu = 5.5$, (b) $\mu = 4.5$, (c) $\mu = 1$, (d) $\mu = 0.05$, (e) $\mu = 0$

数 μ 取值不同,则系统(2)所产生的混沌吸引子涡卷数就有所不同,结果如图1所示.当 $\mu=5.5$ 时,系统(2)产生周期轨道;当 $\mu=4.5$ 时,系统(2)产生单涡卷混沌吸引子;当 $\mu=1$ 时,系统(2)产生双涡卷混沌吸引子;当 $\mu=0.05$ 时,系统(2)产生三涡卷混沌吸引子;当 $\mu=0$ 时,系统(2)产生四涡卷混沌吸引子.

3. 分岔图与 Lyapunov 指数谱

研究分岔和 Lyapunov 指数谱可更好地了解系统(2)的丰富动力学行为.图2和图3分别示出了固定参数 $\alpha=10.5, \mu=0, \beta=15, \gamma=0.05$ 时,状态变量 x 随参数 ε 变化的分岔过程和系统(2)的 Lyapunov 指数随参数 ε 变化的特性, ε 的取值范围是 $[0, 2]$.

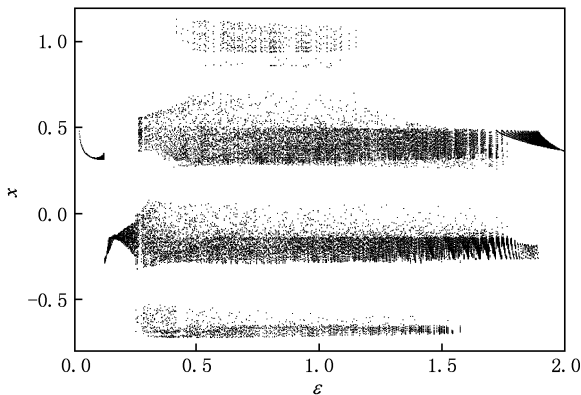


图2 系统(2)随 ε 变化的分岔图

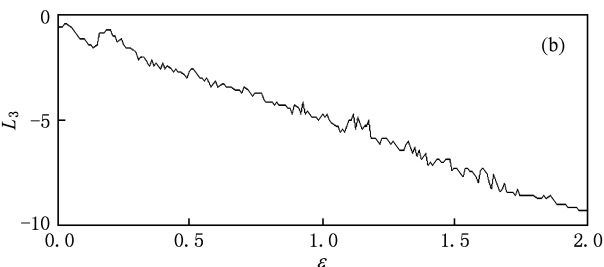
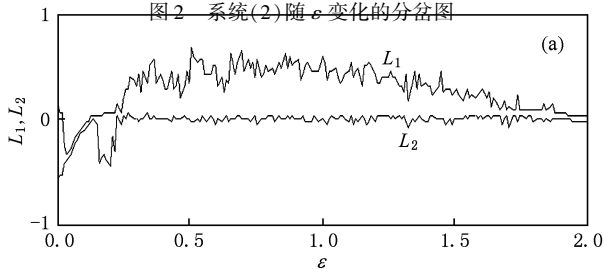


图3 系统(2)随 ε 变化的 Lyapunov 指数谱 (a) L_1 和 L_2 , (b) L_3

由图2可见,随着参数 ε 的变化,系统状态变量 x 发生明显的分岔.同时,由图3可见:当参数 $\varepsilon \in [0, 0.13]$ 时, Lyapunov 指数 L_1, L_2, L_3 均小于零,系统的动态行为收敛于平衡点;当参数 $\varepsilon \in (0.13, 0.25)$ 时,系统逐渐从周期轨道运动过渡到单涡卷状态;当参数 $\varepsilon \in [0.25, 0.40) \cup (1.19, 1.58]$ 时, $L_1 > 0, L_2 = 0, L_3 < 0$, 系统产生三涡卷混沌吸引子;当参数 $\varepsilon \in [0.40, 1.19]$ 时, $L_1 > 0, L_2 = 0, L_3 < 0$, 状态变量 x 值分布成4个带状区域,系统产生四涡卷混沌吸引子;当参数 $\varepsilon \in (1.58, 1.88)$ 时, $L_1 > 0, L_2 = 0, L_3 < 0$, 系统产生双涡卷混沌吸引子;当参数 $\varepsilon \in [1.88, 2]$ 时,系统的动态行为又收敛于平衡点.分岔过程和涡卷分析表明,系统的动力学行为与 SETMOS 的 NDR 特性有密切关系.

4. Poincaré 映射与功率谱

为了便于观察系统的动力学行为,可选取某一截面使得吸引子的轨迹穿过该截面,并利用 Poincaré 映射对系统进行降维处理,进而根据截面上所得截点的情况判断出在固定参数的情况下系统运动是否为混沌.本文所选取的截面为

$$\Sigma = \{(x, y, z) \mid y = 0\}. \quad (4)$$

图4(a)示出了 Poincaré 映射在由(4)式确定的 x - z 截面上的投影.由图4(a)可见,该系统的截面上有4个成片的密集点区,吸引子轮廓清晰可见,说明由 SETMOS 可构成多涡卷蔡氏电路.另外,采用快速傅里叶变换算法,对多涡卷蔡氏电路中状态变量 x 的时域波形做功率谱分析,结果如图4(b)所示.由图4(b)可见,该功率谱是连续谱,且具有较宽的频带,这对于混沌的保密通信具有潜在的应用价值.

5. 电路设计与实现

基于 SETMOS 的 NDR 特性,利用 CNN 的连接结构,由系统(2)和(3)式得其电路实现方程为

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_x}{dt} &= G_{21}v_y - \frac{v_x}{R_1} - f(v_x), \\ C_2 \frac{dv_y}{dt} &= G_{12}v_x - \frac{v_y}{R_2} + G_{32}v_z, \\ C_3 \frac{dv_z}{dt} &= -G_{23}v_y - \frac{v_z}{R_3}. \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$f(v_x) = \sum_{i=0}^6 G_i |v_x - v_i| + I. \quad (6)$$

这里 G_i 和 I 为拟合参数. 经拟合得到 $G = [4.670, -5.895, 5.670, -5.038, 4.847, -4.893, 4.948]^T \times 10^{-5} \text{ S}$, $I = -4.129 \times 10^{-5} \text{ A}$. (6) 式为实际的 SETMOS 器件产生的 NDR 特性拟合函数.

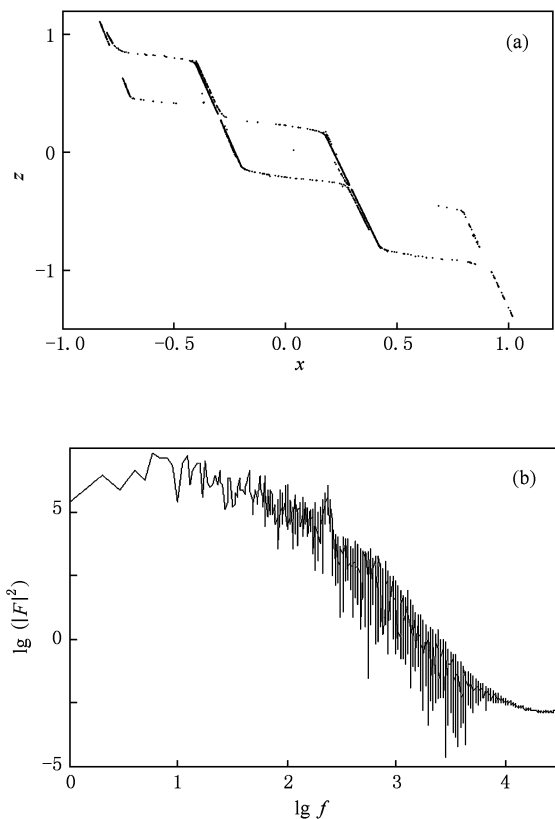


图4 Poincaré映射及功率谱 (a) x - z 截面上的 Poincaré 映射, (b) 信号 $x(t)$ 的功率谱(f 为频率, F 为信号幅值)

由系统(5)和(6)式设计出蔡氏电路的结构如图5所示,图5(a)中所涉及到的跨导 G 可用图5(b)的 SETMOS 结构实现^[20],其中 R_1, R_2 和 R_3 均为电阻, C_1, C_2 和 C_3 均为电容, v_x, v_y 和 v_z 为各电容上的状态电压. 从图5(a)可以看出,该电路中无电感,只有电阻、电容、跨导和 SETMOS 器件. 该电路结构简单,特别利于实现低功耗和集成度的提高.

由以上所述可知,当 $\alpha = 10.5, \mu = 0, \varepsilon = 1, \beta = 15, \gamma = 0.05$ 时,系统(2)产生四涡卷混沌吸引子. 因此,在应用 PSpice 软件进行电路仿

真实验时,若取电容 $C_1 = C_2 = C_3 = 1 \text{ nF}$, 电阻 $R_1 \rightarrow \infty$ (图5(a)中可断开或去掉 R_1 所在支路), $R_2 = 100 \text{ k}\Omega, R_3 = 2 \text{ M}\Omega$, 跨导 $G_{21} = 105 \text{ }\mu\text{S}$, $G_{12} = G_{32} = 10 \text{ }\mu\text{S}$, $G_{23} = 150 \text{ }\mu\text{S}$, 作用在电容 C_1, C_2 和 C_3 上的电压初始值分别为 $0.05, 0$ 和 0.01 V , 则系统(5)可产生典型的四涡卷混沌吸引子,如图6所示.

图6(a), (b), (c)分别描述了系统在不同状态空间内的混沌吸引子行为,图6(d)描述的是状态变量 v_z 的时域波形. 由图6可见, SETMOS 实现的蔡氏电路可产生明显的四涡卷混沌吸引子,且具有复杂的混沌动力学行为,与理论分析基本符合.

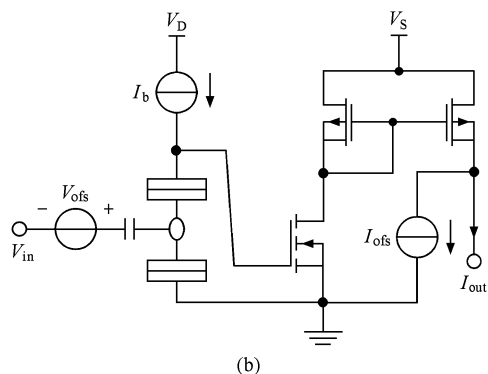
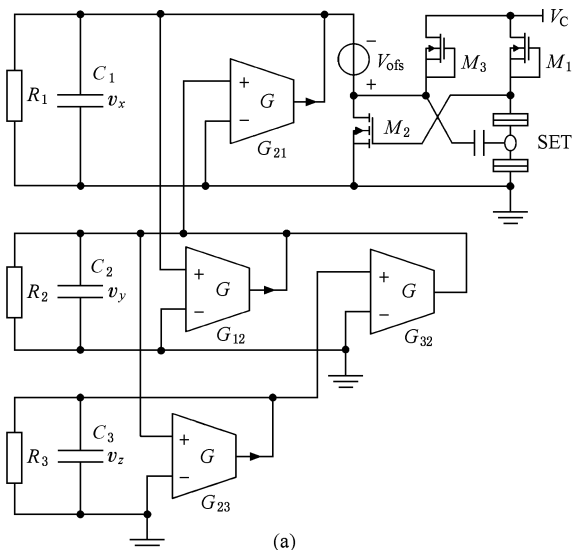


图5 利用 SETMOS 结构设计得到的多涡卷蔡氏电路 (a) 电路结构, (b) 跨导的实现方式

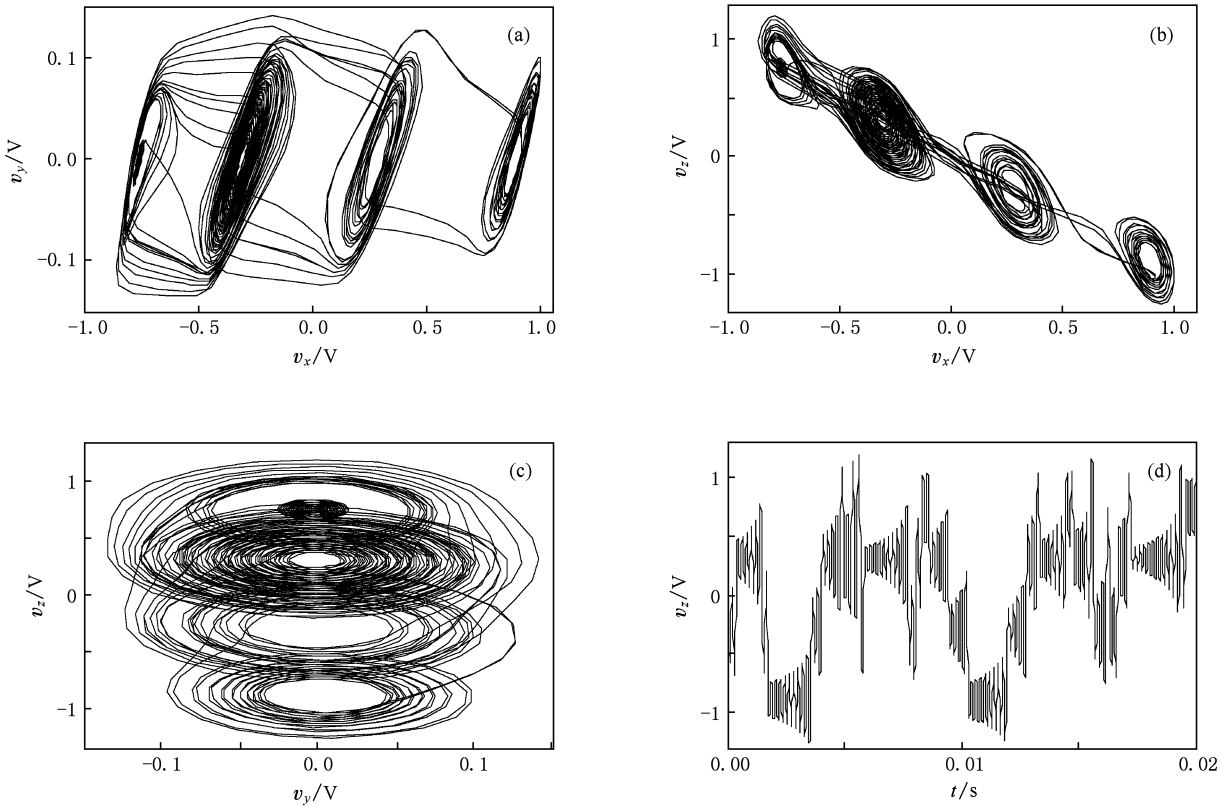


图6 多涡卷蔡氏电路混沌吸引子及时域波形 (a) v_x - v_y 相图, (b) v_x - v_z 相图, (c) v_y - v_z 相图, (d) v_z 的时域波形

6. 结 论

本文提出了一种利用纳电子新器件 SETMOS 产生多涡卷混沌吸引子的新途径. 设计出多涡卷蔡氏电路并分析了其复杂的非线性动力学特性, 计算

机硬件仿真实验验证了理论分析的正确性和所设计电路的有效性. 研究发现, 利用 SETMOS 结构设计的混沌电路不仅结构简单、易于集成化, 而且对于纳米级新器件在混沌信息加密方面的研究具有重要的应用价值.

- [1] Tang K S, Man K F, Chen G R 2001 *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.* **3** 787
- [2] Yalcin M E, Suykens J A K, Vandewalle J 2005 *Cellular Neural Networks, Multi-Scroll Chaos and Synchronization* (Volume 50) (Singapore: World Scientific)
- [3] Yu S M, Lin Q H, Qiu S S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 25 (in Chinese) [禹思敏、林清华、丘水生 2003 物理学报 **52** 25]
- [4] Lü J H, Chen G R 2006 *Int. J. Bifur. Chaos* **16** 775
- [5] Wang F Q, Liu C X 2007 *Chin. Phys.* **16** 4
- [6] Zhang C X, Yu S M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1
- [7] Lü J H, Yu S M, Leung H, Chen G R 2006 *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **53** 149
- [8] Chua L O, Lin G N 1990 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **37** 885
- [9] Huang J, Momenzadeh M, Lombardi F 2007 *IEEE Des. Test Comput.* **24** 304
- [10] Mahapatra S, Ionescu A M 2005 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **4** 705
- [11] Lorenz E N 1963 *J. Atmos. Sci.* **20** 130
- [12] Chen G R, Ueta T 1999 *Int. J. Bifur. Chaos* **9** 1465
- [13] Lü J H, Chen G R 2002 *Int. J. Bifur. Chaos* **12** 659
- [14] Liu W B, Chen G R 2003 *Int. J. Bifur. Chaos* **13** 261
- [15] Qi G Y, Chen G R, Du S Z, Chen Z Q, Yuan Z Z 2005 *Physica A* **352** 295
- [16] Wang F Z, Qi G Y, Chen Z Q, Yuan Z Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4005 (in Chinese) [王繁珍、齐国元、陈增强、袁著祉 2006 物理学报 **55** 4005]
- [17] Luo X H, Li H Q, Dai X G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7511 (in Chinese) [罗小华、李华青、代祥光 2008 物理学报 **57** 7511]
- [18] Elwakil A S, Kennedy M P 2001 *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **48** 289

- [19] Pospíšil J, Brzobohatý J 1996 *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **43** 702
- [20] Feng C W, Cai L, Kang Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6155 (in Chinese) [冯朝文、蔡理、康强 2008 物理学报 **57** 6155]

Implementation of multi-scroll Chua's circuit by hybrid single electron transistor and metal oxide semiconductor structure *

Feng Chao-Wen[†] Cai Li Zhang Li-Sen Yang Xiao-Kuo Zhao Xiao-Hui

(College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 18 December 2009; revised manuscript received 13 June 2010)

Abstract

Based on the structure of cellular neural network, multi-scroll Chua's circuit is implemented by the nanoelectronic device of hybrid single electron transistor and metal oxide semiconductor (SETMOS) structure with its negative differential resistance characteristic. The basic dynamical properties, including phase portrait, bifurcation diagram, Lyapunov exponent spectrum, Poincaré mapping and power spectrum are studied by theoretic analysis and numerical simulation. The validity and the feasibility of three-order Chua's circuit with four scrolls are further confirmed by the circuit simulation experiment. Finally, the results show that the negative differential resistance characteristic of SETMOS determines complex dynamical behaviors of multi-scroll Chua's circuit. Also, the designed circuit has simple structure and is easy to realize.

Keywords: single electron transistor, negative differential resistance, multi scrolls, bifurcation

PACC: 0547

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AAJ225).

[†] E-mail: phonchownfcw@sohu.com