

# 基于单电子器件的混沌电路研究\*

冯朝文<sup>1)†</sup> 蔡理<sup>1)</sup> 康强<sup>2)</sup>

1) 空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) 空军工程大学科研部, 西安 710051)

(2008 年 1 月 12 日收到, 2008 年 3 月 5 日收到修改稿)

利用单电子晶体管和金属氧化物半导体的混合器件——SETMOS 设计实现了细胞神经网络结构的蔡氏电路, 得到了单涡卷吸引子和双涡卷吸引子. 通过设计构成的 SETMOS 跨导放大器和 SETMOS 电压比较器, 提出了基于 SETMOS 的类双涡卷混沌电路, 仿真验证了类双涡卷吸引子. 模拟结果表明, 所设计的硬件电路结构简单, 功耗低, 有利于进一步提高集成电路的集成度, 为混沌在工程领域的实际应用提供了新方法.

关键词: 细胞神经网络, 蔡氏电路, 混沌, 涡卷

PACC: 0545, 7335C

## 1. 引 言

混沌电路因具有丰富的非线性动力学特性, 在非线形科学、信息科学、保密通信、混沌密码以及其他工程领域获得了广泛的应用, 已成为非线性电路与系统的一个热点课题<sup>[1]</sup>. 混沌信号的非周期性连续宽带频谱、似噪声特性和长期不可预测性, 尤其为通信提供了高度保密的手段.

在混沌电路的实现方面, 国内外已提出了许多新的方法来设计各种不同类型的混沌电路<sup>[2-7]</sup>. 但为了适应集成电路的高集成度、低功耗等要求和发展趋势, 有必要从元器件本身研究混沌的硬件实现方法. 单电子晶体管(SET)和金属氧化物半导体(MOS)的混合结构(SETMOS)是一种新型的单电子混合器件, 它所具有的结构尺寸小、功耗低、集成度高以及负微分电阻等优点为研究混沌电路提供了可能.

在三阶低维混沌系统中, 蔡氏电路已成为理论和实验研究混沌的一个典型范例<sup>[8,9]</sup>. 本文提出了一种基于细胞神经网络(CNN)的蔡氏电路 SETMOS 实现法, 同时基于 SETMOS 实现的跨导器, 提出并设计了 SETMOS 结构的类双涡卷混沌电路.

## 2. 基于 CNN 的蔡氏电路 SETMOS 设计实现

研究表明, 不仅可以利用分段线性负电阻实现蔡氏混沌, 而且还可利用 CNN 实现蔡氏混沌<sup>[2,10]</sup>. 近年来提出的 CNN, 由于其易于电路实现而备受重视. 该类型网络具有二维或三维的格状结构, 属于局部互联且有规律重复的非线性模拟电路. 网络中的每个神经元均是一个非线性微分方程描述的动力学系统, 每一个神经元只与其相邻并且在一定距离内的神经元之间有耦合关系. 一个典型的二维 CNN 的内部状态方程为<sup>[11]</sup>

$$C \frac{dV_{xy}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} V_{xy}(t) + \sum_{\alpha, k, l \in N_p(i, j)} A(\alpha, i, j, k, l) V_{\alpha k l}(t) + \sum_{\alpha, k, l \in N_p(i, j)} B(\alpha, i, j, k, l) V_{\alpha k l} + I, \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, C > 0, R_x > 0 \quad (1)$$

$$V_{xy}(t) = 0.5 (|V_{xy}(t)| + 1) - |V_{xy}(t) - 1|, \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N. \quad (2)$$

令  $\tau = t/|R_x C|$  对(1)和(2)式进行标度变换后得

$$C \frac{dV_{xy}(\tau)}{d\tau}$$

\* 陕西省自然科学基金(批准号 2005F20)和空军工程大学科研基金(批准号 2005ZK19)资助的课题.

† E-mail: fengchaowen@163.com

$$\begin{aligned}
&= -V_{xy}(\tau) + R_x \left[ \sum_{(\alpha, k, l) \in N_c(i, j)} A(i, j; k, l) V_{yk}(\tau) \right. \\
&\quad \left. + \sum_{(\alpha, k, l) \in N_c(i, j)} B(i, j; k, l) V_{ul} + I \right], \\
&1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, C > 0, R_x > 0
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
V_{xy}(\tau) &= 0.5 (|V_{xy}(\tau) + 1| - |V_{xy}(\tau) - 1|), \\
1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N.
\end{aligned} \tag{4}$$

将邻近细胞概念扩展到一般形式,得到如下无量纲通用神经网络细胞的状态方程为

$$\dot{x}_j = -x_j + \sum_{k=1}^n a_{jk} y_k + \sum_{k=1}^n S_{jk} x_k + V_j, \tag{5}$$

式中,  $n$  为邻近细胞数, 输出方程为

$$y_j = 0.5 (|x_j + 1| - |x_j - 1|). \tag{6}$$

下面利用(5)式三个相邻的神经细胞构成的 CNN 替代无量纲的三阶蔡氏电路方程,令  $x = x_1, y = x_2, z = x_3$ , 去掉无关项,得

$$\dot{x}_1 = -x_1 + a_{11} y_1 + S_{11} x_1 + S_{12} x_2,$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_2 &= -x_2 + S_{21} x_1 + S_{23} x_3, \\
\dot{x}_3 &= -x_3 + S_{32} x_2 + S_{33} x_3,
\end{aligned} \tag{7}$$

其中,  $a_{11} = \alpha(b-1), S_{11} = 1 - \alpha(1+b), S_{12} = \alpha, S_{21} = 1, S_{23} = 1, S_{32} = -\beta, S_{33} = 1 - \gamma$ .

利用 SETMOS 器件构成细胞体模块,金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)构成反馈模板和控制模板,可设计出基于 CNN 结构的蔡氏电路,如图 1 所示.细胞体所采用的 SETMOS 模型参数为 SET 栅极电容  $C_g = 0.2$  aF,漏极电容  $C_d = 0.06$  aF,源极电容  $C_s = 0.06$  aF,隧穿电阻  $R_d = 3$  M $\Omega, R_s = 3$  M $\Omega$ ,工作温度  $T = 300$  K;  $M_1$  提供 20 nA 的偏置电流,  $M_2$  的阈值电压  $V_{th} = 0.02$  V,沟道宽  $W = 100$  nm,沟道长  $L = 65$  nm;  $M_3$  的阈值电压  $V_{th} = -0.3$  V,沟道宽  $W = 1.22$   $\mu$ m,沟道长  $L = 100$  nm;调节电压源  $V_1$  值为 1.244 V,调节电压源  $V_2$  值为 2 V,偏置电压  $V_{dd} = V_{ss1} = V_{ss2} = 1$  V,  $V_{ss2} = V_{s1} = -1$  V.由此可计算出整个电路的静态功耗为 140 nW 左右.

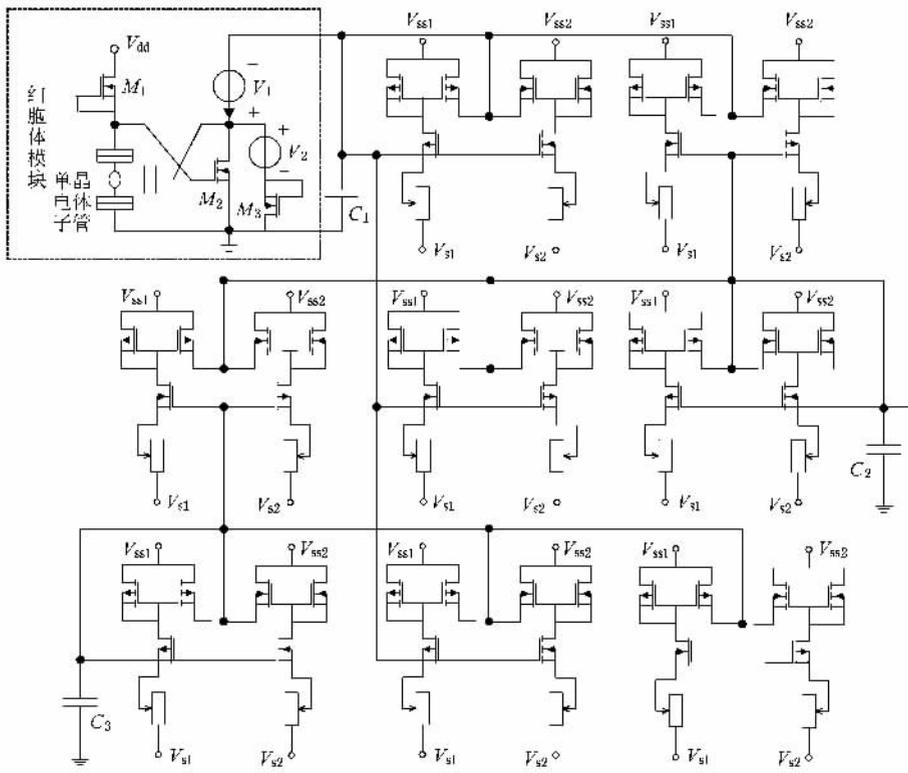


图 1 SETMOS 实现的 CNN 结构蔡氏电路

### 3. 蔡氏单、双涡卷吸引子的计算机模拟

基于以上分析和设计结果,建立如下两个典型

的蔡氏混沌电路:1)单涡卷吸引子;2)双涡卷吸引子.并观察分析这些电路的动态特性.其条件为  $\gamma = 0, a = -8/7, b = -5/7, \beta = 16$ .对上述三维系统中的单涡卷混沌吸引子和双涡卷混沌吸引子进行计算机模拟.模拟结果如图 2 所示.其中,单涡卷吸引子参

数取值如下:细胞 1: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega, C_1 = 50 \text{ nF}, S_{11} = -1.5857 \times 10^{-6}, S_{12} = 90.5 \times 10^{-6}$ ;细胞 2: $R_2 = 2 \text{ k}\Omega, C_2 = 50 \text{ nF}, S_{21} = 10 \times 10^{-6}, S_{23} = 10 \times 10^{-6}$  细胞 3: $R_3 = 1 \text{ k}\Omega, C_3 = 50 \text{ nF}, S_{32} = -160 \times 10^{-6}, S_{33} = 10 \times$

$10^{-6}$ . 双涡卷吸引子参数取值  $S_{11} = -2.0857 \times 10^{-6}, S_{12} = 94 \times 10^{-6}$ , 其余参数同单涡卷吸引子的取值. 从整个设计与仿真结果看, 利用 SETMOS 构成 CNN 是可以产生蔡氏混沌的, 而且具有可调节性, 电路的结构

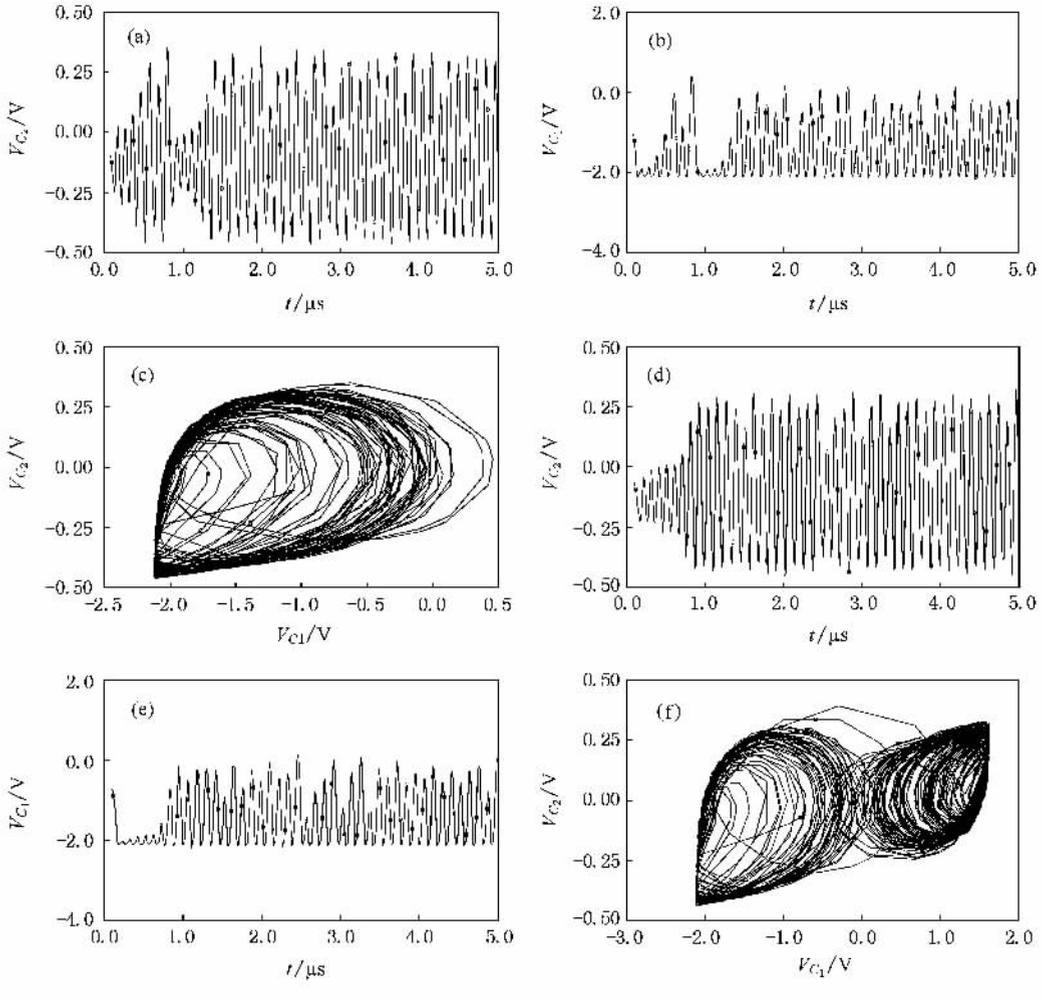


图2 单涡卷与双涡卷吸引子的计算机模拟结果 (a)(b)(c)为单涡卷混沌吸引子时域波形图及相图 (d)(e), (f)为双涡卷混沌吸引子时域波形图及相图

简单, 静态功耗较低, 易于实现大规模的集成.

### 4. 基于 SETMOS 的类双涡卷混沌电路的设计实现

类双涡卷混沌动力学系统<sup>[12]</sup>等式为

$$\ddot{X} = -a[\ddot{X} + \dot{X} + X - f(X)], \quad (8)$$

其中

$$f(X) = \text{sgn}(X) = \begin{cases} 1 & X \geq 0 \\ -1 & X < 0 \end{cases},$$

当参数  $a \in (0.48, 0.98)$  时有类双涡卷混沌现象发生.

对(8)式利用等式  $X = V_x/V_R$  把  $X$  转变成电压信号  $V_x$ , 其中  $V_R$  是参考电压; 利用等式  $d/d\tau = (C/g) \text{d}/dt$  把时间域  $\tau$  转变成时间  $t$ , 其中  $g$  是跨导,  $C$  是电容. 基于此可以得出电压模式下的三阶微分方程为

$$\begin{aligned} \ddot{V}_x = & -a \frac{g}{C} \ddot{V}_x - a \left(\frac{g}{C}\right)^2 \dot{V}_x - a \left(\frac{g}{C}\right)^3 V_x \\ & + a V_R \left(\frac{g}{C}\right)^3 f(V_x), \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$f(V_x) = \begin{cases} 1, & V_x \geq 0, \\ -1, & V_x < 0. \end{cases}$$

由(9)式可见,跨导是构成一个混沌发生器的基本单元<sup>[13]</sup>,因此可利用电流模式去实现这个电路.对(9)式降阶处理后得到

$$\begin{aligned} I_4 &= g_3 V_x, \\ I_3 &= g_2 V_y = C_3 \dot{V}_x, \\ \dot{V}_x &= \frac{g_2}{C_3} V_y, \\ I_2 &= g_1 V_z = C_2 \dot{V}_y, \\ \ddot{V}_x &= \left(\frac{g_2}{C_3}\right) \left(\frac{g_1}{C_2}\right) V_z, \\ I_1 &= C_1 \dot{V}_z, \end{aligned} \tag{10}$$

这里假设  $g_1 = g_2 = g_3 = g, C_1 = C/a$  和  $C_2 = C_3 = C$ .

由(10)式可得

$$\ddot{V}_x = a \frac{g^2}{C^3} I_1, \tag{11}$$

把(10)式代入(9)式可得到

$$\ddot{V}_x = a \frac{g^3}{C^3} [-V_z - V_y - V_x + V_R f(V_x)]. \tag{12}$$

通过比较(11)和(12)式,我们可以利用如下  $I_1$  表示为

$$\begin{aligned} I_1 &= -gV_z - gV_y - gV_x + I_c \\ &= -I_2 - I_3 - I_4 + I_c, \end{aligned} \tag{13}$$

$$I_c = \begin{cases} I_b, & V_x \geq 0, \\ -I_b, & V_x < 0. \end{cases} \tag{14}$$

其中  $I_b = gV_R$ (偏置电流).因此,可以得出整体的简单模块电路模型如图3所示,其中包括三个跨导、三个接地电容、一个电压比较器和一个电流选择器.

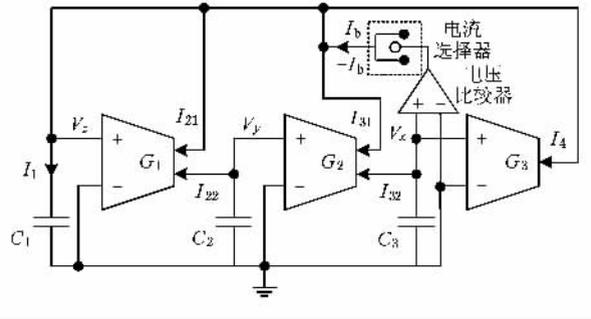


图3 类双涡卷混沌结构示意图

利用补偿和电流镜像技术 SETMOS 基本结构加以改造,适当选取各器件的参数,可到如图4所示的两种 SETMOS 跨导放大器.其中参数设置为,  $SET : C_g = 0.08 \text{ aF}, C_d = 0.02 \text{ aF}, C_s = 0.02 \text{ aF}, R_d = 1 \text{ M}\Omega, R_s = 1 \text{ M}\Omega, T = 300 \text{ K}; M_1$ : 阈值电压  $V_{th} = 0.1 \text{ V}$ , 沟道宽  $W = 100 \text{ nm}$ , 沟道长  $L = 100 \text{ nm}$ ,  $M_2$  与  $M_3$  共同构成镜像电流源;偏置电流  $I_b = 13 \text{ nA}$ , 补偿电压  $V_{off} = 1.76 \text{ V}$ , 补偿电流  $I_{off} = 39 \text{ nA}$ .不同点:图4(a)结构采用 p 沟道耗尽型  $M_2$  与  $M_3$  共同构成镜像电流源,图4(c)结构采用 n 沟道耗尽型  $M_2$  与  $M_3$  共同构成镜

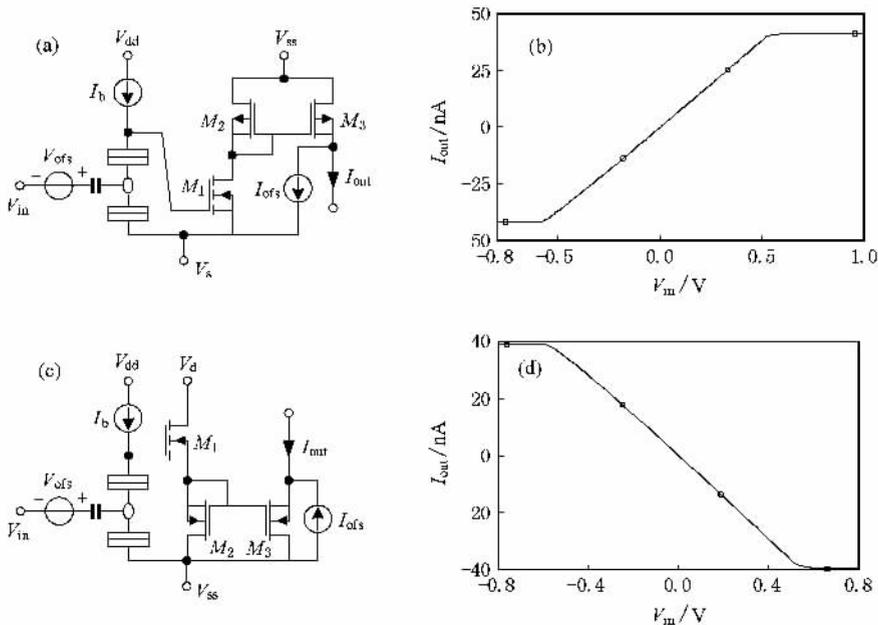


图4 SETMOS 跨导放大器 (a)和(b)为正跨导结构及特性 (c)和(d)为负跨导结构及特性

像电流源. 另外, 调节  $M_1$  的阈值电压或调节沟长和沟宽可改变跨导值.

电压比较器的结构可采用 SETMOS 多值逻辑电路结构实现, 如图 5 所示. 参数设置为, SET : 栅极电容  $C_{in} = 1 \text{ aF}$ ,  $C_{con} = 1 \text{ aF}$ , 漏极电容  $C_d = 0.4 \text{ aF}$ , 源极

电容  $C_s = 0.4 \text{ aF}$ , 隧穿电阻  $R_d = 4 \text{ M}\Omega$ ,  $R_s = 4 \text{ M}\Omega$ , 工作温度  $T = 300 \text{ K}$ ;  $I_b$  提供  $4.5 \text{ nA}$  的偏置电流, MOS 管的阈值电压  $V_{th} = 0.44 \text{ V}$ , 用于稳定 SET 的漏极电压, 偏置电压  $V_d = 0.5 \text{ V}$ ,  $V_s = -0.5 \text{ V}$ .

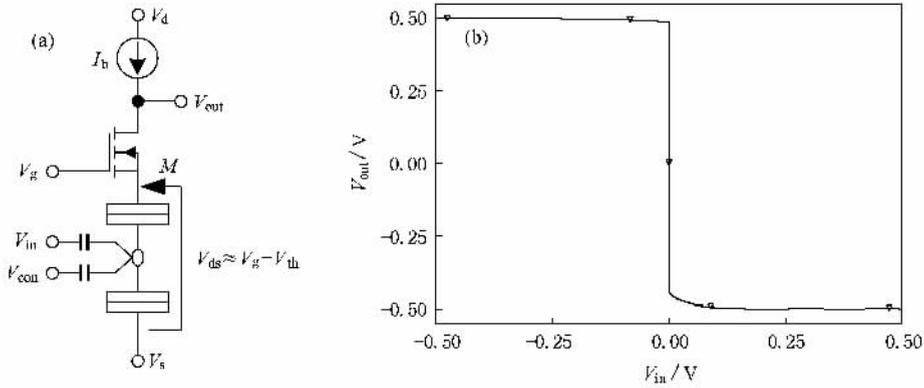


图 5 SETMOS 电压比较器及特性 (a) 结构图 (b) 传输特性

由以上各组成部分可实现具体的类双涡卷混沌电路, 如图 6 所示. 其中跨导电路的参数设置为, SET :  $C_g = 0.08 \text{ aF}$ ,  $C_d = 0.02 \text{ aF}$ ,  $C_s = 0.02 \text{ aF}$ ,  $R_d = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_s = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $T = 300 \text{ K}$ , MOS 阈值电压  $V_{th} = 0.1 \text{ V}$ , 沟道宽

$W = 100 \text{ nm}$ , 沟道长  $L = 100 \text{ nm}$ , 偏置电流  $I_b = 13 \text{ nA}$ , 补偿电压  $V_{off} = 1.76 \text{ V}$ , 补偿电流  $I_{off} = 39 \text{ nA}$ .  $V_{dd} = V_d = 1 \text{ V}$ ,  $V_{ss} = -0.1 \text{ V}$  电压比较器的参数设置同图 5. 其中, 电流比较器可利用跨导放大器实现.

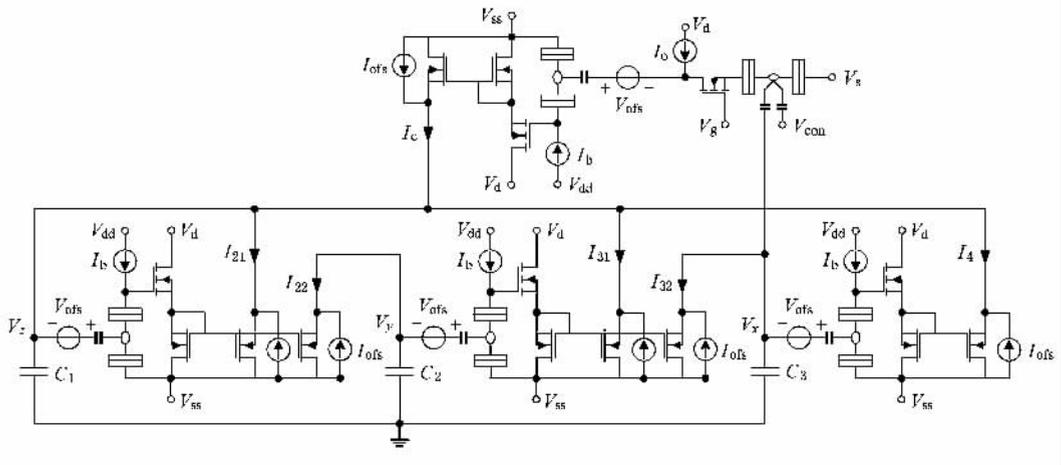


图 6 类双涡卷混沌电路的 SETMOS 实现

### 5. 类双涡卷吸引子的计算机模拟

由跨导放大器的转移特性可计算出跨导值为  $G = 0.8 \mu\text{S}$ , 选取电容参数  $C_2 = C_3 = C = 5 \text{ nF}$ ,  $C_1 =$

$C/0.5 = 10 \text{ nF}$  ( $a = 0.5$ ), 参考电压  $V_R = 0.2 \text{ V}$  对由 SETMOS 构成的类双涡卷混沌电路进行仿真, 得到如图 7 所示的类双涡卷时域波形图及相图. 由此可计算出整个电路的静态总功耗  $369.7 \text{ nW}$ .

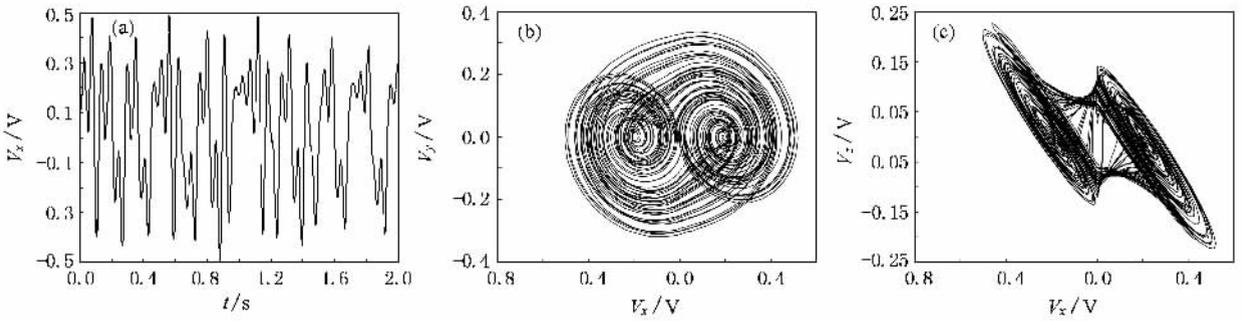


图7 类双涡卷吸引子的计算机模拟结果 (a)  $V_x$  的时域波形仿真图 (b)  $V_x$ - $V_y$  的相图 (c)  $V_x$ - $V_z$  的相图

## 6. 结 论

本文利用 SETMOS 混合器件对基于 CNN 结构的蔡氏电路提出了一种新的硬件实现方式, 分析并仿真得到了单涡卷吸引子和双涡卷吸引子. 同时, 利用 SETMOS 具有的非线性特性, 设计构成了基于

SETMOS 的跨导放大器和电压比较器, 提出了类双涡卷混沌电路的 SETMOS 实现方式, 并通过仿真模拟验证了类双涡卷吸引子. 分析、设计与仿真结果表明, 用 SETMOS 构成的混沌电路结构简单、静态功耗均在几百 nW 以内, 且响应速度较快, 有利于高集成度的超大规模集成电路的实现, 并为混沌在工程领域的实际应用提供了一种新的实现方式.

- [ 1 ] Lü J H , Chen G R 2002 *Int. J. Bifurc. Chaos* **12** 659
- [ 2 ] Arena P , Baglio S , Fortuna L , Manganaro G 1995 *IEEE Trans. CAS-I* **42** 123
- [ 3 ] Elwakil A S , Kennedy M P 2001 *IEEE Trans. CAS-I* **48** 289
- [ 4 ] Zhong G Q 1994 *IEEE Trans. CAS-I* **41** 934
- [ 5 ] Yu S M , Lin Q H , Qiu S S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2084 ( in Chinese ) [ 禹思敏、林清华、丘水生 2004 物理学报 **53** 2084 ]
- [ 6 ] Cai L , Ma X Q , Wang S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3002 ( in Chinese ) [ 蔡理、马西奎、王森 2003 物理学报 **52** 3002 ]
- [ 7 ] Li Y , Yu S M , Dai Q Y , Liu M H , Liu Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3938 ( in Chinese ) [ 李亚、禹思敏、戴青云、刘明华、刘庆 2006 物理学报 **55** 3938 ]
- [ 8 ] Keneedy M P 1993 *IEEE Trans. CAS-I* **40** 657
- [ 9 ] Zhong G Q , Ayrom F 1985 *Int. J. Circuit Theory Appl.* **13** 93
- [ 10 ] Zou F , Nossek J A 1991 *IEEE Trans. CAS* **38** 811
- [ 11 ] Chua L O , Yang L 1988 *IEEE Trans. CAS* **35** 1259
- [ 12 ] Elwakil A S , Kennedy M P 2001 *IEEE Trans. CAS-I* **48** 289
- [ 13 ] Radwan A G , Soliman A M , El-Sedeek A L 2003 *IEEE Trans. CAS-I* **50** 285

# Study of chaos based on single electron device<sup>\*</sup>

Feng Chao-Wen<sup>1)†</sup> Cai Li<sup>1)</sup> Kang Qiang<sup>2)</sup>

1) *Institute of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*

2) *Department of Science Research, Airforce Engineering University, Xi'an 710051, China*

(Received 12 January 2008; revised manuscript received 5 March 2008)

## Abstract

Chua's circuit in structure of cellular neural networks is realized by the hybrid device of single electron transistor and metal oxide semiconductor, named SETMOS. Then single scroll and double scrolls are obtained. SETMOS transconductance amplifier and SETMOS voltage comparator are designed, and the double-scroll-like chaotic circuit built of SETMOS is proposed. The double-scroll-like chaos attractor is verified by simulation. All the simulation results show that the designed circuits have the characteristics of simple structure and low power dissipation, and they can further improve the density of integrated circuits. It also provides a new method for the chaos to be used in engineering.

**Keywords:** cellular neural networks, Chua's circuit, chaos, scrolls

**PACC:** 0545, 7335C

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2005F20) and the Scientific Research Foundation of Air Force Engineering University, China (Grant No. 2005ZK19).

<sup>†</sup> E-mail: fengchaowen@163.com