

基于单电子晶体管-金属氧化物场效应晶体管 电路的离散混沌系统实现*

冯朝文^{1)†} 蔡理¹⁾ 康强²⁾ 彭卫东³⁾ 柏鹏³⁾ 王甲富¹⁾

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)

3) (空军工程大学综合电子信息系统研究中心, 西安 710051)

(2011年1月25日收到; 2011年3月3日收到修改稿)

提出了一种利用单电子晶体管与金属氧化物半导体的混合结构(SET-MOS)实现离散混沌系统的方法. 研究了两个并联结构的单电子晶体管在电流源偏置下的传输特性, 并建立其相应的S形分段线性函数模型. 基于该模型实现了一维离散映射系统, 分析了它的动力学特性, 包括一维映射过程、分岔图和Lyapunov指数等. 最后利用SET-MOS混合电路设计出该离散混沌系统的电子电路, 验证了理论分析和实现方法的正确性. 研究表明, 该方法不仅可行, 而且物理实现结构简单, 利于集成.

关键词: 离散映射, Lyapunov指数, 分岔, 电路实现

PACS: 05.45.-a, 85.35.-p, 85.35.Gv

1. 引言

混沌现象是非线性确定性系统的一种内在随机过程的表现, 普遍存在于自然界及人类社会. 近几十年来, 研究表明, 混沌这一非线性科学在生物医学工程、力学工程、电子工程、保密通信、系统和模式识别等领域有着重大的科学意义和广阔的应用前景^[1-5]. 每个产生混沌行为的数学模型都包含两个基本要素: 动态特性和非线性特性. 根据动态行为特性, 产生混沌的模型可分为连续时间模型和离散时间模型. 根据在没有外加激励信号条件下的发生器是否能够自我保持非线性振荡行为特性, 产生混沌的模型又可分为自治系统模型和非自治系统模型. 与连续混沌系统相比, 离散混沌系统具有模型结构简单, 易于理论分析和电路实现, 在实际应用中易于控制等优点^[6-9], 因而离散混沌系统成为人们的热点研究方向之一.

然而, 离散混沌系统只有实现硬件化才能得到广泛应用. 由于离散混沌系统的模型方程非常简

单, 因而容易利用各种现有的电子电路直接实现. 目前离散混沌系统的实现方法^[10-12]已有多种, 但这些技术是以互补式金属氧化物半导体(CMOS)的集成电路(integrated circuit, 简记为IC)环境为基础, 速度和面积成为这种IC实现技术走向实际工程应用的两大限制因素^[13,14]. 而纳米电子技术的出现促进了IC技术的新发展, 使得电路的超高速、超低功耗和超高集成度成为可能. 在国际半导体技术路线^[15]中, 各种不同的新兴纳米电子器件成为国际研究的热点. 其中, 单电子晶体管(single electron transistor, 简记为SET)及其与金属氧化物场效应晶体管(metallic oxide semiconductor field effect transistor, 简记为MOSFET)的混合结构(SET-MOS)占有重要地位. SET-MOS不仅具有尺寸小、功耗低、工作速度高和集成度高等优点, 而且其非线性特性^[16]非常适于混沌电路的设计.

本文提出了一种利用SET-MOS混合电路结构实现离散混沌映射系统的方法, 并对所构建的离散映射系统进行了动力学特性分析, 最后通过电路设计和仿真验证了该方法的正确性和可行性.

* 国家自然科学基金(批准号:61172043)、陕西省自然科学基金研究计划重点项目(批准号:2011JZ015)和陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金(批准号:201115Y15)资助的课题.

† E-mail: phonchowncfw@sohu.com

2. 混沌映射中 S 形函数的电路实现

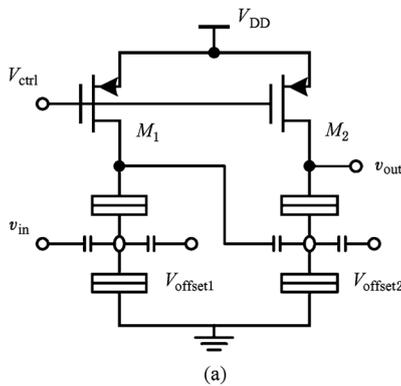
一维离散映射是产生混沌信号的一种最简单的方式,通常需要一个延迟单元电路(即采样保持电路)和一个非线性电路(即映射电路).其中非线性电路实现特定的映射函数,许多非线性函数都适于产生离散混沌映射信号,例如抛物线函数,绝对值函数,符号函数等^[17].下面以 S 形饱和函数为例研究 SET-MOS 混合电路实现离散混沌映射的途径.

文献[18]提出的一种一维离散映射动力学方程为

$$y(t+1) = ky(t) - \alpha f[y(t)] + a, \quad (1)$$

$$f(y) = 1/[1 + \exp(-y/\varepsilon)]. \quad (2)$$

其中 $k, \alpha, a, \varepsilon$ 为控制参数.当 $k=0.7, \alpha=1, a=$



0.64, $\varepsilon=0.02$ 时,系统(1)可产生混沌行为.在实际应用中,根据设计者的需要,(2)式中具有 S 形结构特性的 f 函数可以有多种表达形式,这里我们根据 SET-MOS 混合电路的特点研究这一函数的实现.文献[16]提出利用两个恒流偏置下的 SET 进行级联可实现混合神经元的 S 形输出函数.本文提出采用单个 p 沟道 MOSFET 构成恒流源以获得 S 形结构特性函数的电路结构,如图 1 所示.图 1(a)中, M_1 和 M_2 均作为电流源分别为两个 SET 提供 15 nA 的恒流偏置,两个 SET 的参数取值均为电容 $C_{G1} = C_{G2} = 0.04$ aF, $C_D = C_S = 0.02$ aF,电阻 $R_D = R_S = 1$ M Ω ,温度 $T = 300$ K,补偿电压分别为 $V_{\text{offset1}} = 1.55$ V, $V_{\text{offset2}} = 1.05$ V,偏置电压 $V_{\text{DD}} = 1$ V,栅极控制电压 V_{ctrl} 可以调节恒流源的偏置电流大小.图 1(b)为 SET-MOS 电路实现的 S 形传输函数特性.

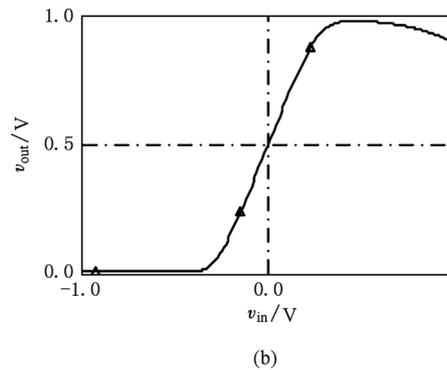


图 1 SET-MOS 实现的 S 形结构特性函数 (a) 电路结构;(b) 电压传输特性

为了研究问题的方便性,图 1(b)中的电路特性可以采用一个分段线性逼近函数 h 来描述

$$h(v) = k_0 |v - V_0| + k_1 |v - V_1| + k_2 |v - V_2| + V_3. \quad (3)$$

其中, $k_0 = 0, k_1 = 0.8083, k_2 = -0.8030, V_0 = -1, V_1 = -0.3, V_2 = 0.3, V_3 = 0.495$.函数 h 描述电路特性的曲线效果如图 2 所示.由图 2 可见,尽管两者存在一定误差,但函数 h 近似反映了 S 形函数的特点,并且不影响离散混沌映射的实现.因此,(3)式可作为 SET-MOS 实现混沌映射中 S 形非线性函数的模型用于研究离散混沌动力学行为.

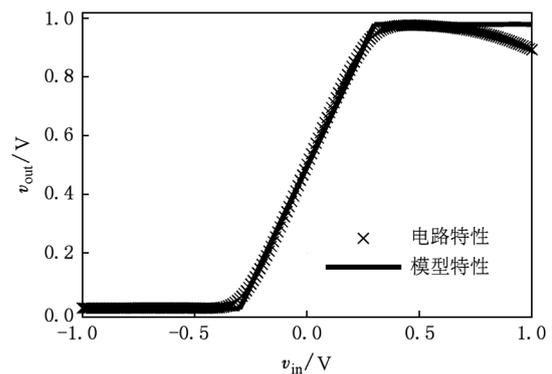


图 2 模型函数 $h(v)$ 特性与电路的传输特性

3. 离散系统的主要动力学特征

由系统(1)和(3)式可得由 SET-MOS 实现的电压模式的一维离散映射为

$$v(t+1) = g[v(t)]$$

$$= kv(t) - \alpha h[v(t)] + a. \quad (4)$$

取参数 $k = 1, \alpha = 2, a = 0.75$,可得系统(4)随时间变化产生的一维映射过程,如图 3 所示.从图 3 可以看出,电压状态变量 $v(t)$ 随时间变化产生了符合混沌行为的特征,且每次经映射后得到的绝对值均

小于一,这将有利于降低电路实现难度和功耗.

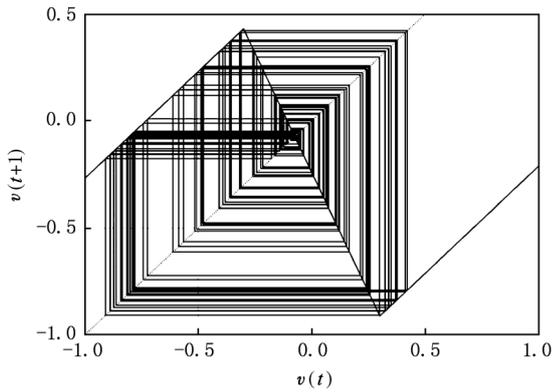


图3 一维离散映射过程

状态变量随参数变化的分岔行为以及 Lyapunov 指数有助于我们深入了解系统(4)的混沌动力学行为. 固定参数 $k = 1, \alpha = 2$, 当 a 值从 0 变化到 1 时, 系统(4)的状态变量 $v(t)$ 产生的分岔变化与 Lyapunov 指数 λ 变化情况分别如图 4(a) 和(b) 所示. 这里定义

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} \ln \left| \frac{dv(t+1)}{dv(t)} \right|. \quad (5)$$

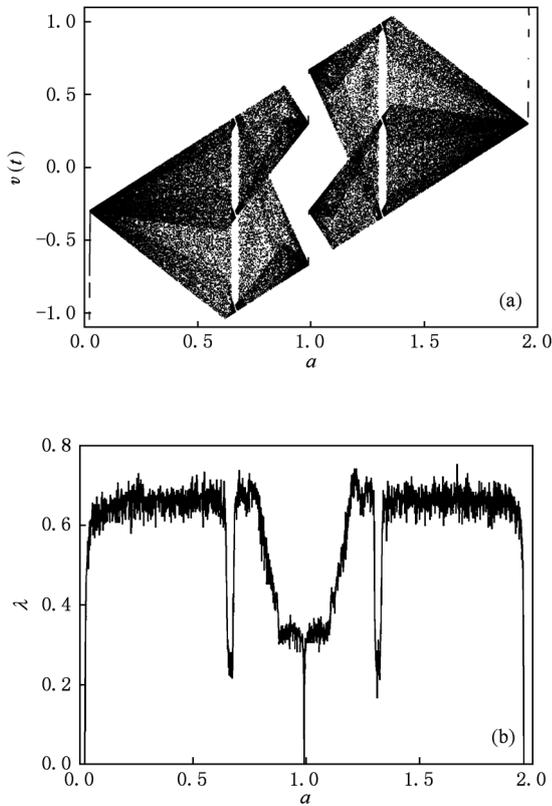


图4 分岔图与 Lyapunov 指数, $k = 1, \alpha = 2, a \in [0, 1]$ (a) $a - v(t)$; (b) $a - \lambda$

由图 4 可见, 当 $a = 0$ 时, 系统的轨迹被吸引到一个平衡点上. 当 a 值的增大到 0.023 时, 系统开始进入混沌状态. 当 $a \in [0.650, 0.676] \cup [1.301, 1.330]$ 时, 系统处于弱混沌状态, 对应于图 4(a) 中的两个窗口和图 4(b) 中的两条窄带. 当 $a = 0.99$ 时, 系统在这个点处于周期态, 形成混沌区域的转折点, 随着 a 的进一步增大, 系统又进入混沌区. 最后, 当 $a > 1.959$ 时, 系统退化到周期态. 在 a 的整个变化区间 $[0, 1]$ 内, 系统的 Lyapunov 指数在区间 $[0.3, 0.7]$ 内波动, 并且区间 $[0.6, 0.7]$ 内的指数居多. 此外, 系统(4)随其余两个参数 k, α 的变化也呈现出丰富的分岔行为, 并且可以直观地得到该系统的动力学特性是从倍周期分岔通向混沌的, 如图 5 所示.

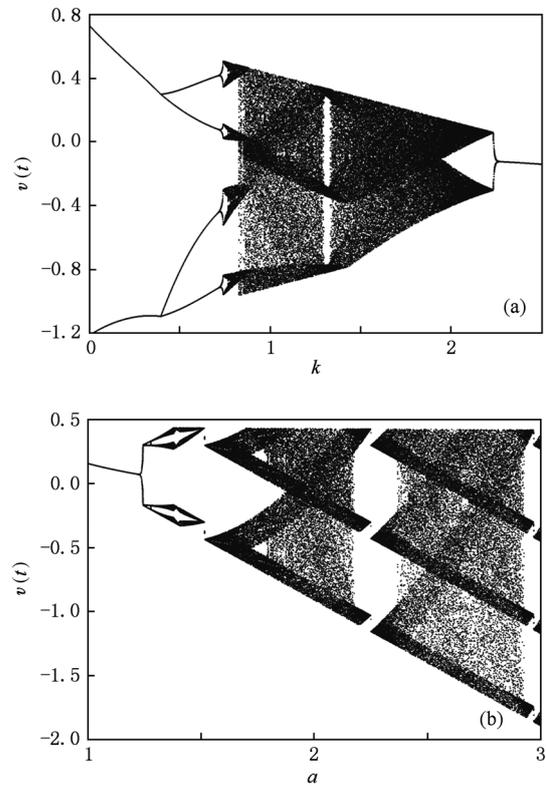


图5 系统(4)随参数 k 和 α 变化的分岔情况 (a) $k - v(t)$; (b) $\alpha - v(t)$

4. 电路设计与数值模拟

由系统(4)可知, 电压模式的混沌映射电路实现主要由乘法器、求和电路、采样保持器以及 h 函数实现电路等模块构成, 其中, 乘法器和求和电路可

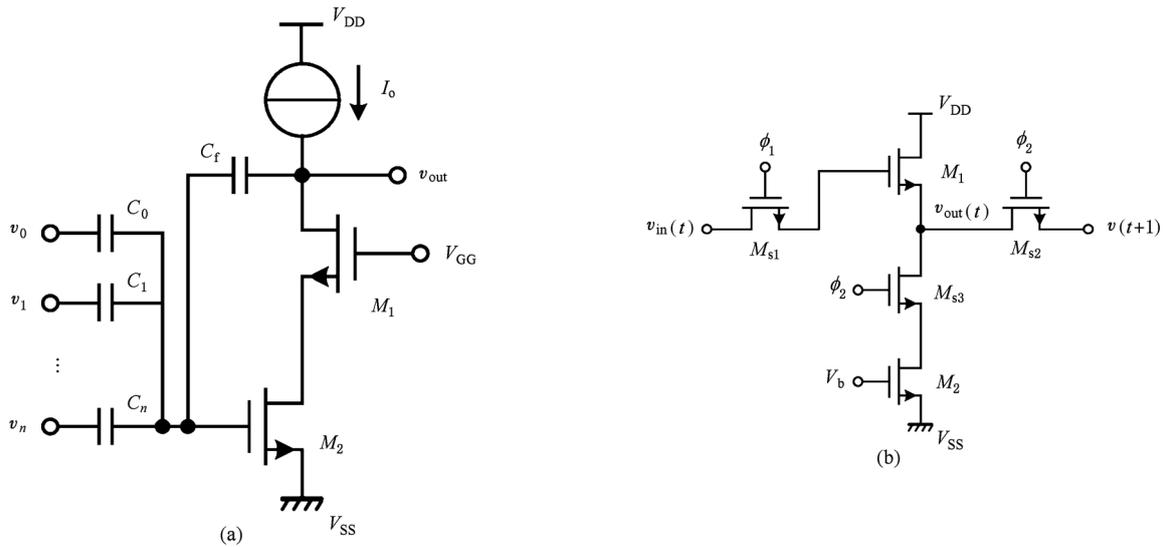


图 6 离散混沌映射的电路模块实现 (a)反相加法器;(b)采样保持器

共同用一个反相加法器^[19]实现,如图 6(a)所示;采样保持器可由 MOSFET 电路构成实现,如图 6(b)所示.

由图 6(a)可以得到该电路的输入 $v_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 与输出 v_{out} 之间的关系

$$v_{out} = - \sum_{i=0}^n v_i (C_i / C_f) + (V_{th} + V_{SS}) (1 + NC_i / C_f). \quad (6)$$

其中 V_{th} 和 N 分别为 M_1 的阈值电压和栅极输入端个数, C_i / C_f 可以实现系统(4)等号右边各项系数. 特别地,当 $n = 0, C_i = C_f, V_{SS} = -V_{th}$ 时, $v_{out} = -v_i$, 该电路为反比例的反相器.

图 6(b)中的采样保持器是由一个电压跟随器电路和三个 MOSFET 开关构成. 当开关 M_{s1} 的栅极电压相位 ϕ_1 为高电平 H 信号时, M_{s1} 导通, 输出电压 v_{out} 近似等于输入电压 v_{in} , 实现采样功能; 当开关 M_{s1} 的栅极电压相位 ϕ_1 为低电平 L 信号时, M_{s1} 截止, 此时由于 M_1 栅极电容作用, 输出电压 v_{out} 恒定不变, 其值等于 M_{s1} 截止时输入端电压值, 实现保持功能. 即

$$v_{out}(t) = \begin{cases} v_{in}(t) & (v_{\phi} = H), \\ v_{in}(t-1) & (v_{\phi} = L). \end{cases} \quad (7)$$

开关 M_{s2} 用于当 ϕ_2 为高电平时控制 v_{out} 作为下一时

刻的反馈输入信号, 开关 M_{s3} 用于当 ϕ_2 为低电平时降低电路功耗, M_2 在栅极偏置电压 V_b 下工作在饱和区充当电流源作用.

采用以上各电路模块, 当参数取为 $k = 1, \alpha = 2, a = 0.75$ 时, 可以设计出系统(4)的整个电路结构, 如图 7 所示. 其中, 由 SET-MOS 混合结构实现 $h[v(t)]$ 的部分电路同图 1 中所示. 在 45 nm CMOS 工艺下, 各 MOSFET 的尺寸(宽长比 W/L , 单位 nm/nm)可设计成: M_1 和 M_2 为 45/450, M_5 和 M_7 为 270/45, M_6 和 M_8 为 360/45, M_9 为 900/45, M_{10} 为 45/270, M_{11} 为 45/540, M_{12} 为 45/450, M_{s1} 和 M_{s4} 为 45/360, M_{s2} 和 M_{s3} 为 45/450. 电压偏置分别为: $V_{DD} = 1 \text{ V}, V_{SS} = -0.41 \text{ V}, V_{GG} = 0.45 \text{ V}, V_{ctrl1} = 0.58 \text{ V}, V_{ctrl2} = 0.65 \text{ V}, V_a = 1.50 \text{ V}, V_{b1} = 0.67 \text{ V}, V_{b2} = -0.5 \text{ V}, V_s = -1 \text{ V}.$

当开关导通 M_{s1} 时, 离散混沌电路的输入端信号为 $v(t)$, 经映射电路形成映射信号 $g[v(t)]$, 并在 M_{s1} 截止时被存储到缓冲器的输出端 M_9 电容上形成信号 $v(t+1)$; 当开关 M_{s2} 导通时, 信号 $v(t+1)$ 被反馈到混沌映射电路的输入端进行下一次映射处理过程.

根据图 7 中的电路, 为使映射电路和缓冲器有足够时间稳定输出, 这里将时钟脉冲源的周期设置

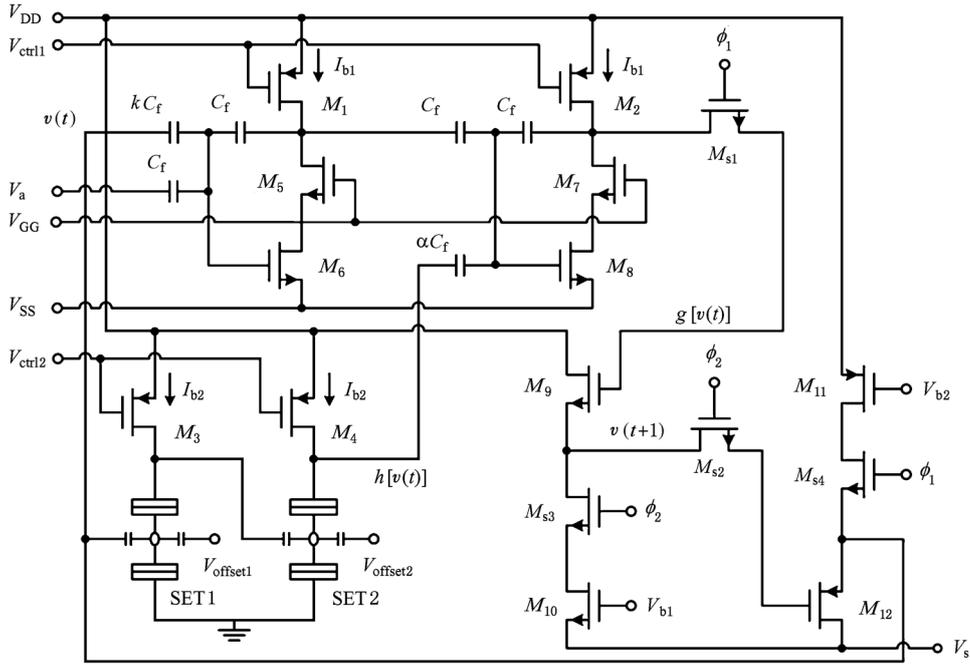


图 7 基于 SET-MOS 的一维离散混沌映射电路实现结构

为 120 ns,因此,电路的工作频率在 4 MHz 以上. 利用 PSpice 16.2 软件进行仿真,得到混沌映射电路的时域瞬态仿真波形,如图 8 所示. 由图 8 可见,所设计电路产生了非周期的混沌信号,整个电路的静态功耗约为 80 μ W,其中大部分功耗是由 MOSFET 构成的电路产生的.

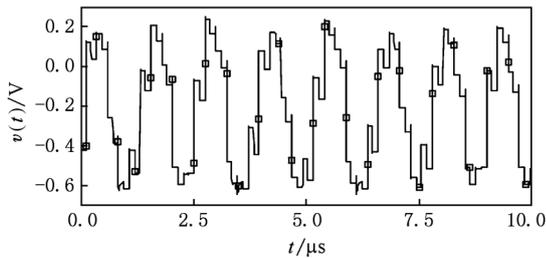


图 8 混沌映射电路的仿真输出电压

5. 结 论

根据两个并联结构的 SET 在 MOS 构成的恒流源偏置下输入输出的非线性特性,获得了混沌映射系统所需的 S 形结构特性函数,通过 SET-MOS 混合电路构成离散映射系统的动力学特性分析,找到了产生混沌行为的参数范围,进一步设计出相应的电路结构,并仿真验证了利用 SET-MOS 混合电路构建离散混沌映射系统这一方法的可行性与正确性. 研究表明,该方法实现的一维离散映射系统电路结构简单、工作频率高、功耗低,集成度高. 同时这种新的物理实现途径不仅对于多维离散混沌系统的设计研究具有借鉴意义,而且在保密通信和图像处理应用中存在潜在优势.

[1] Di G H, Xu Y, Xu W, Gu R C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020504 (in Chinese) [狄根虎,许 勇、徐 伟、顾仁财 2011 物理学报 **60** 020504]
 [2] Liu Z, Zhu X H, Hu W, Jiang F 2007 *Int. J. Bifur. Chaos* **17** 1735

[3] Long M, Qiu S S 2007 *Chin. Phys.* **16** 2254
 [4] Zheng F, Tian X J, Li X Y, Wu B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1685
 [5] Pan Y, Billings S A 2008 *Int. J. Bifur. Chaos* **18** 997
 [6] May R M 1976 *Nature* **261** 459
 [7] Henon M 1976 *Commun. Math. Phys.* **50** 69

- [8] Juncu V D, Rafiei-Naeini M, Dudek P 2006 *Analog Integrated Circuits and Signal Processing* **46** 275
- [9] Wang X Y, Wang M J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 0731 (in Chinese) [王兴元、王明军 2008 物理学报 **57** 0731]
- [10] Rodriguez-Vazquez A, Huertas J L, Rueda A, Perez-Verdu B, Chua L O 1987 *Proc. IEEE* **75** 1090
- [11] Tanaka H, Sato S, Nakajima K 2000 *Analog. Integrated Circ. Sign. Processing* **25** 329
- [12] Chen J F, Cheng L, Liu Y, Peng J H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 18 (in Chinese) [陈菊芳、程丽、刘颖、彭建华 2003 物理学报 **52** 18]
- [13] Herrera R, Horio Y, Suyama K 1997 *Proc. IEEE Int. Symp. Nonlinear Theo. Appl.* Honolulu, USA November 29—December 2, 1997 p625
- [14] Mandal S, Banerjee S 2004 *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.* **51** 1708
- [15] International Technology Roadmap for Semiconductors <http://public.itrs.net> [2008]
- [16] Goossens M 1998 *Ph. D. Dissertation* (Delft: Delft University)
- [17] Delgado-Restituto M, Rodríguez-Vázquez A 2002 *Proc. IEEE* **90** 747
- [18] Aihara K, Takabe T, Toyoda M 1990 *Phys. Lett. A* **144** 334
- [19] Degawa K, Aoki T, Higuchi T, Inokawa H, Takahashi Y 2004 *IECE Trans. Electron.* **E87-C** 1827

Realization of the discrete chaotic system based on SET-MOS circuits^{*}

Feng Chao-Wen^{1)†} Cai Li¹⁾ Kang Qiang²⁾ Peng Wei-Dong³⁾ Bai Peng³⁾ Wang Jia-Fu¹⁾

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

2) (Department of Science Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

3) (Research Center of Integrated Electronic Information System, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 25 January 2011; revised manuscript received 3 March 2011)

Abstract

A new method of realizing a discrete chaotic system using the hybrid architecture of single-electron transistor (SET) and metal oxide semiconductor (MOS) is proposed in this paper. The transfer characteristic for two parallel SETs with a biased current source is investigated and the corresponding S-shape piecewise linear function model is established. Based on this model a one-dimensional discrete mapping system is first constructed, and the dynamics of the system is then analyzed through one-dimensional mapping process bifurcation diagram and Lyapunov exponents, and the corresponding discrete chaotic system is finally designed through the electronic circuit of SET-MOS hybrid architecture. All these indicate that our approach not only is feasible but also has some advantages such as simple circuit structure and good integration compared with existing methods.

Keywords: discrete mapping, Lyapunov exponent, bifurcation, circuit realization

PACS: 05.45.-a, 85.35.-p, 85.35.Gv

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172043), the Key Program of Shaanxi Provincial Natural Science for Basic Research of China (Grant No. 2011JZ015) and the Research Fund of Shaanxi Key Laboratory of Electronic Information System Integration, China (Grant No. 201115Y15).

[†] E-mail: phonchownfcw@sohu.com