

单电子晶体管与金属氧化物半导体混合电路构造的一维离散混沌系统研究*

冯朝文¹⁾ 蔡理^{1)†} 杨晓阔¹⁾ 康强²⁾ 彭卫东³⁾ 柏鹏³⁾

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7月2日收到; 2011年12月20日收到修改稿)

基于单电子晶体管与金属氧化物半导体混合结构构造出一种一维离散混沌系统. 研究了单电子晶体管与金属氧化物半导体串联混合结构的电压传输特性, 并建立了相应的N型分段线性函数模型. 基于该模型实现了一维离散映射系统, 分析了它的一维映射过程、分岔图和Lyapunov指数谱等动力学特性. 最后利用单电子晶体管与金属氧化物半导体混合电路设计出该离散混沌系统的电路结构, 仿真验证与理论分析一致. 研究表明, 利用单电子晶体管与金属氧化物半导体混合结构设计的离散混沌电路不仅结构非常简单, 功耗很低, 而且有利于混沌系统的集成和应用.

关键词: 离散系统, Lyapunov 指数谱, 分岔, 电路实现

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

1 引言

混沌是一种自然发生的全局整体性现象, 是非线性动力系统所特有的行为. 目前, 混沌已渗透到包括医学、电子工程和信息控制等多个领域^[1-4], 是前沿课题和研究热点之一. 根据随时间变化的特点, 混沌系统模型可分为连续时间模型和离散时间模型. 连续混沌系统多为微分方程或方程组形式, 含有丰富的混沌信息量, 产生的混沌现象直观性强, 易于理解, 但实现结构复杂. 与连续混沌系统相比, 离散混沌系统多为迭代方程, 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, 因而离散混沌系统成为人们在非线性动力学领域的一个重点研究方向.

电子电路设计是离散混沌系统实现硬件化并进行广泛应用的一个重要研究内容. 目前, 离散混沌系统的电路实现方法大多数是基于互补型金属

氧化物半导体集成电路技术^[5-7], 而根据摩尔定律中器件按等比例缩小的趋势, 速度和面积将成为影响这种集成电路技术进一步发展的两大重要因素^[8,9]. 纳电子技术的出现促进了集成电路技术的新发展, 使得电路的超高速、超低功耗和超高集成度成为可能. 根据超大规模集成芯片设计和制造的发展趋势, 新兴的纳电子器件已成为国际上研究的热点^[10], 其中单电子晶体管 (SET) 及其与金属氧化物半导体 (MOS) 的混合结构 SET-MOS 是一类非常具有发展潜力的候选者. SET-MOS 具有小尺寸、低功耗、高速、高集成度和强非线性等^[11] 优点, 非常适于混沌电路的设计. 基于 SET-MOS 研究混沌不仅适应集成电路的发展趋势, 而且可为混沌系统提供新的物理实现途径.

本文基于 SET-MOS 混合结构的库仑振荡特性提出了一种实现一维离散混沌系统的电路设计方法, 在对离散系统动力学特性分析的基础上, 通过

* 国家自然科学基金 (批准号: 61172043)、陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目 (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: qianglicai@163.com

电路设计和仿真实验验证了该方法的正确性和可行性。

2 基于 SET-MOS 的 N 型分段线性函数

一维离散映射系统是离散混沌系统的一种最简单的方式. 非线性函数的电路实现是产生离散混沌映射过程的一个非常重要的组成部分, 并且非线性函数可以有多种形式, 例如抛物线函数、绝对值函数、符号函数等 [12]. 为了准确构造混沌映射, 研究者常常利用大量的晶体管去实现这种电路, 这会产生较大的功耗. 而在某些应用方面, 产生的混沌信号特性并不需要满足严格的统计学要求或频谱要求, 而是需要一种一般类似随机性的不可预测信号. 因而, 混沌映射的准确形状比起它整体的“伸展和折叠”特性就不是很重要了. 下面基于 SET-MOS 研究 N 型分段线性 (PWL) 函数的电路设计.

SET 的漏极被金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 构造的恒流源偏置后, 其漏极输出电压 V_{out} 会随栅极输入电压 V_{in} 变化呈现出类似正弦波式的周期性库仑振荡特性 [11](图 1), 因而该结构可用于生成 N 型 PWL 函数. 在图 1(a) 中, p 型 MOSFET 用作恒流源为 SET 提供 150 nA 的偏置电流, MOSFET 的漏电压 $V_{DD} = 1$ V, 栅电压 $V_G = 0.54$ V, SET 的背栅电压 V_{CTRL} 用于控制输出电压的相位移动. SET 的参数分别取电容 $C_{G1} = 0.15$ aF, $C_{G2} = 0.1$ aF, $C_D = C_S = 0.05$ aF, 电阻 $R_D = R_S = 100$ k Ω , 工作温度 $T = 300$ K. 当 V_{CTRL} 取值在 0—0.4 V 范围内变化时, 可得到不同相位的电压传输特性曲线, 如图 1(b) 所示.

PWL 系统能够以任意精度逼近非线性系统, 近十年来已经引起了广泛的关注. 在利用图 1(a) 中的 SET-MOS 电路研究离散混沌系统时, 为从定性和定量角度分析系统混沌行为, 图 1(b) 所示的电路传输特性可用一个 PWL 逼近函数 h 模型来描述, 即

$$h(V) = k_0 |V - V_0 - V_{PH}| + k_1 |V - V_1 - V_{PH}| + k_2 |V - V_2 - V_{PH}| + V_3, \quad (1)$$

其中, k_0, k_1 和 k_2 为常量, $k_0 = 0.47, k_1 = -1.4525, k_2 = 1.4525; V_0, V_1, V_2$ 和 V_3 分别为起始电压、峰值电压、谷值电压和偏移电压, $V_0 = 0$ V,

$V_1 = 0.34$ V, $V_2 = 0.51$ V, $V_3 = -0.0051$ V; V_{PH} 为相位电压. h 模型的逼近效果如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 当 $V_{PH} = 0$ V 时, 模型的特性曲线对应于图 1(b) 中 $V_{CTRL} = 0$ V 时的电压传输特性曲线.

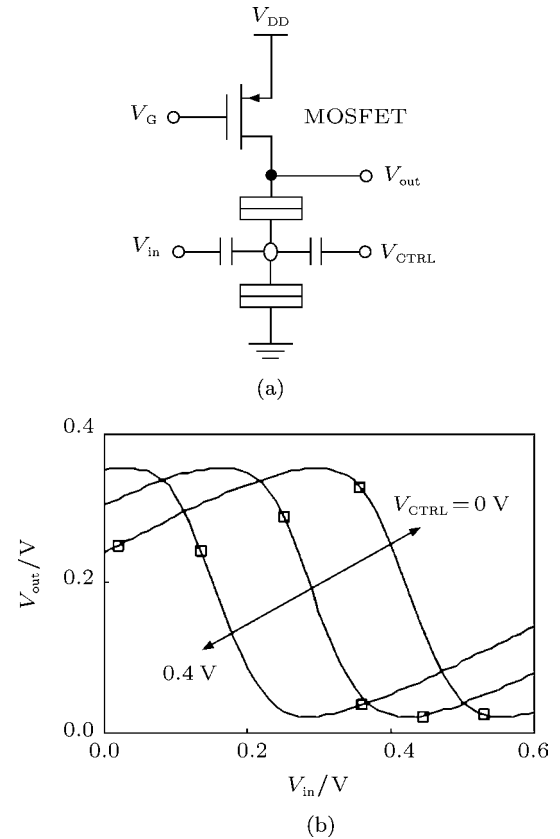


图 1 混沌神经元 N 型输出函数的电路设计 (a) 神经元输出函数的 SET-MOS 电路结构; (b) 电压传输特性

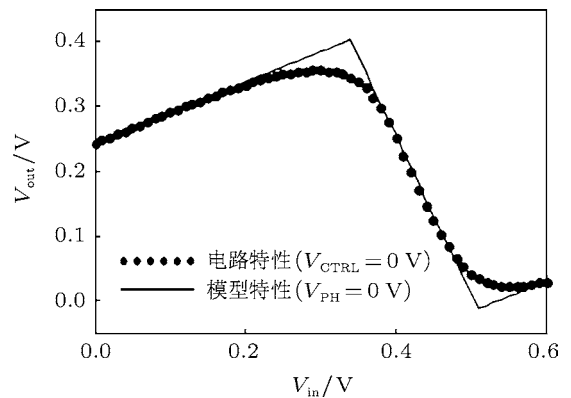


图 2 $h(V)$ 模型的 N 型 PWL 逼近效果

由文献 [13] 可知, N 型 PWL 函数构成的离散映射产生混沌行为的条件之一是 N 型 PWL 函数曲线的负斜率区斜率必须小于 -1. 由图 2 可见, (1) 式的模型函数 h 基本上准确反映了图 1 中的电压传输特性, 且负斜率满足产生混沌的离散映射条件.

此外, 还可以有另一种实现 N 型 PWL 函数的 SET-MOS 电路设计, 即恒流源偏置下的两个串联 SET, 如图 3(a) 所示. SET 的参数设置为 $C_{G1} = 0.15$ aF, $C_{G2} = 0.1$ aF, $C_D = C_S = 0.05$ aF, $R_D = R_S = 1$ M Ω , $T = 300$ K; pMOS 提供 13 nA 的恒流偏置. 与图 1 相比, 由图 3(a) 电路得到的 N 型 PWL 函数的幅度变化范围较大, 且负斜率区斜率最小值接近 -8, 更有利于混沌信号的产生. 但这种结构略显复杂.

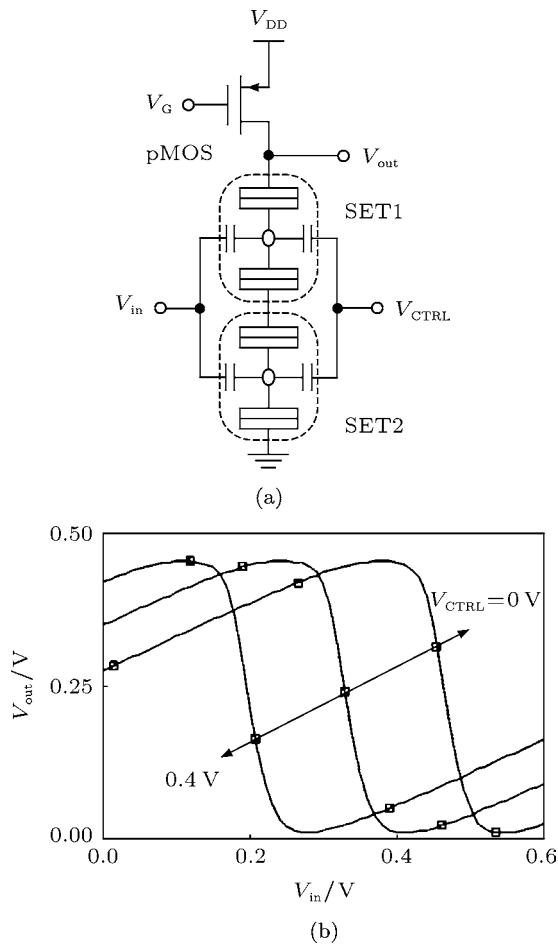


图 3 基于串联结构 SET-MOS 的 N 型 PWL 函数电路设计 (a) 电路结构; (b) V_{in} - V_{out} 传输特性

3 基于 SET-MOS 的一维离散系统混沌动力学特性

文献 [14] 提出的一维离散映射动力学方程为

$$y(t+1) = af[y(t)] + c, \quad (2)$$

其中, a 和 c 为比例参数, $f(y)$ 为具有 N 型特征的

分段函数, 即

$$f(y) = \begin{cases} m_1y + b_1 & (y \leq \delta_1), \\ m_2y + b_2 & (\delta_1 < y \leq \delta_2), \\ m_3y + b_3 & (\delta_2 < y). \end{cases} \quad (3)$$

这里, $m_2 < 0$, $\delta_2 > \delta_1$, $f(y)$ 是一个中间部分有负斜率的 PWL 函数, 它有两个临界拐点. 方程 (2) 所描述的模型可看作是由一个非线性函数方程 $f(y)$ 和一个线性函数方程 $y(t)$ 复合而成. 如果方程 (2) 在每个周期 $n(n = 1, 2, \dots)$ 有一个周期解和无数族有界非周期解, 则表明该方程可表现出混沌特征.

由 (1) 式和方程 (2) 可得基于 SET-MOS 电路特性建立的电压模式一维离散映射系统为

$$v(t+1) = f[v(t)] = ah[v(t)] + c. \quad (4)$$

当 $a = 1$, $c = 0$ 时, 则可得系统 (4) 随时间变化产生的一维映射过程, 结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 系统在该组参数下可以产生混沌行为, 并且系统状态值变化范围为 0.25—0.4 V. 进一步研究系统 (4) 随参数变化的分岔过程和 Lyapunov 指数 λ_L 可以更清楚地说明系统产生混沌时的参数变化条件, 如图 5 所示.

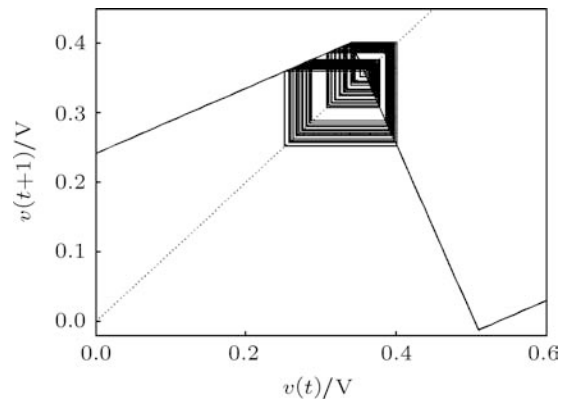


图 4 一维离散映射过程

由图 5 可见: 系统 (4) 随参数 a 变化是通过倍周期分岔进入混沌的. 随着参数 a 的增大, 系统在 $a = 0.846$ 处发生了第一次分岔行为, 在 $a = 0.934$ 处发生了第二次分岔行为, 继而进入混沌状态, Lyapunov 指数 λ_L 逐渐由负值转为正值. 当 $1.164 \leq a \leq 1.184$ 或 $1.276 \leq a \leq 1.422$ 时, 系统处于周期态, 即为混沌区之间的周期窗口, λ_L 值小于零; 当 $a = 2.192$ 时, 系统的混沌区出现跳变转折点. 系统随参数 V_{PH} 变化时的分岔过程和 Lyapunov 指数谱如图 6 所示. 由图 6 可见,

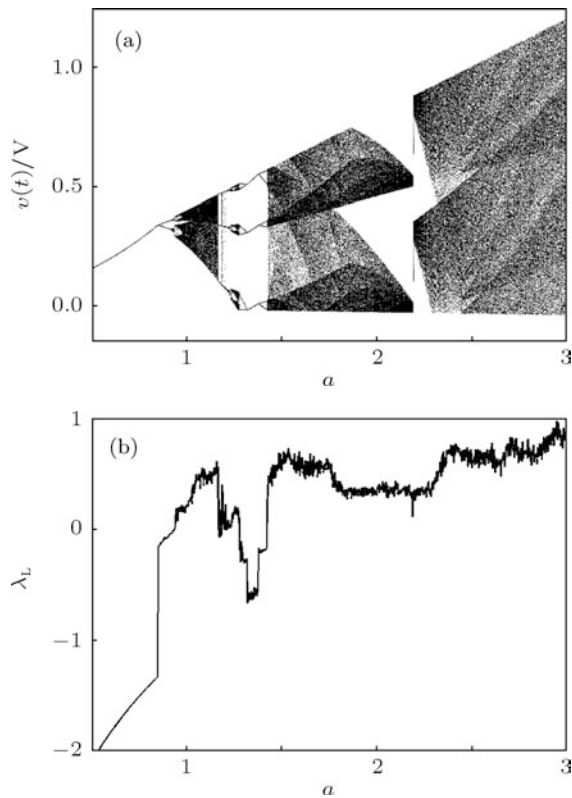


图5 系统随参数 a 变化的混沌动力学特性 $c = 0$, $V_{PH} = 0$ V. (a) 分岔图; (b) Lyapunov 指数谱

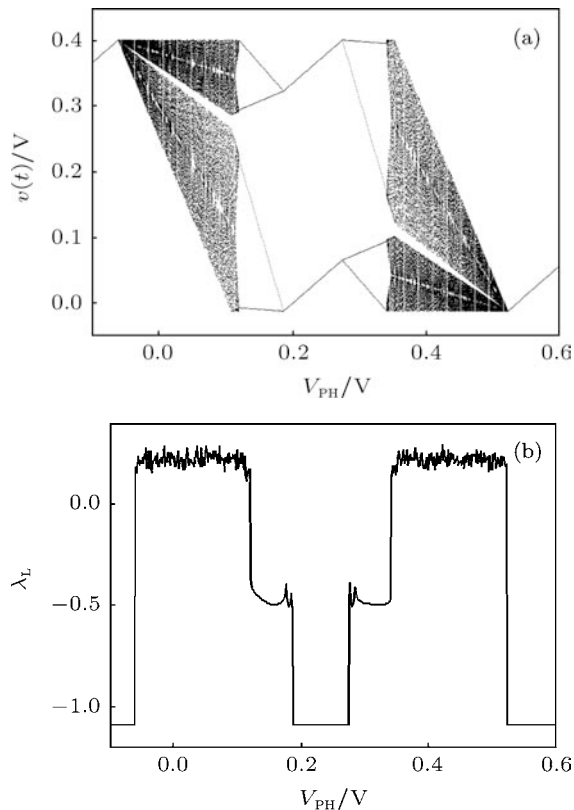


图6 系统随参数 V_{PH} 变化的混沌动力学特性 $a = 1$, $c = 0$. (a) 分岔图; (b) Lyapunov 指数谱

当 $-0.062 \text{ V} \leq V_{PH} \leq 0.120 \text{ V}$ 或 $0.341 \text{ V} \leq V_{PH} \leq 0.523 \text{ V}$ 时, 系统 (4) 可产生混沌行为, 而当 $0.120 \text{ V} < V_{PH} < 0.341 \text{ V}$ 时, 系统处于周期态.

4 电路设计及数值研究

根据以上的理论分析, 可由 SET-MOS 混合结构设计出系统 (4) 的电路结构, 如图 7 所示. 该结构所采用的条件参数 $a = 1$, 而电压源 U 表示参数 c 的值, 它描述了 c 的变化情况. SET 的参数选取为 $C_{G1} = 0.15 \text{ aF}$, $C_{G2} = 0.1 \text{ aF}$, $C_D = C_S = 0.05 \text{ aF}$, $R_D = R_S = 100 \text{ k}\Omega$, $T = 300 \text{ K}$, $V_G = 0.54 \text{ V}$, $V_{DD} = 1 \text{ V}$, $V_{SS} = -1 \text{ V}$; 各个 MOSFET 的宽长比 W/L (W 和 L 的单位均为 nm) 设计如下: M_1 为 $900/45$, M_2 为 $45/270$, M_3 为 $45/540$, M_4 为 $45/450$, M_{S1} 和 M_{S4} 为 $45/360$, M_{S2} 和 M_{S3} 为 $45/450$; 偏置电压分别为 $V_{DD} = 1 \text{ V}$, $V_G = 0.54 \text{ V}$, $V_{B1} = 0.67 \text{ V}$, $V_{B2} = -0.5 \text{ V}$, $V_S = -1 \text{ V}$. 图 7 中由 M_1 , M_2 , M_3 , M_4 以及 M_{S1} , M_{S2} , M_{S3} , M_{S4} 构成的电路具有采样保持器功能.

当开关 M_{S1} 导通时, 离散混沌电路输入端信号为 $v(t)$, 经映射电路形成映射信号 $f[v(t)]$, 并在 M_{S1} 截止时被存储到缓冲器的输出端 M_1 的电容上形成信号 $v(t+1)$; 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.

设置电路的时钟脉冲源周期为 120 ns , 且导通区不重叠, 则当 $V_{CTRL} = 0 \text{ V}$ 时, 分别取 $c = 0$ (不含有电压源) 和 $c = 0.1$ (含有电压源, 且幅值电压为 0.1 V), 对图 7 中的电路进行仿真, 可得该电路产生混沌态输出电压的两组时域瞬态波形曲线, 如图 8 所示. 整个电路的静态功耗约为 $42 \mu\text{W}$, 其中大部分功耗是由 MOSFET 电路产生的.

由图 8 可见, 波形信号具有混沌态的非周期性, 参数 c 的不同取值影响着电路的混沌行为. 特别地, 当参数 $c = 0$ 时, 状态输出电压 $v(t)$ 在 $0.25\text{--}0.4 \text{ V}$ 范围内变化, 这与图 4 中一维映射过程产生的理论分析结果一致, 验证了电路设计的正确性以及 SET-MOS 构成一维离散混沌系统的可行性. 同时从图 7 可以看出该电路结构非常简单, 有利于混沌电路的集成化应用.

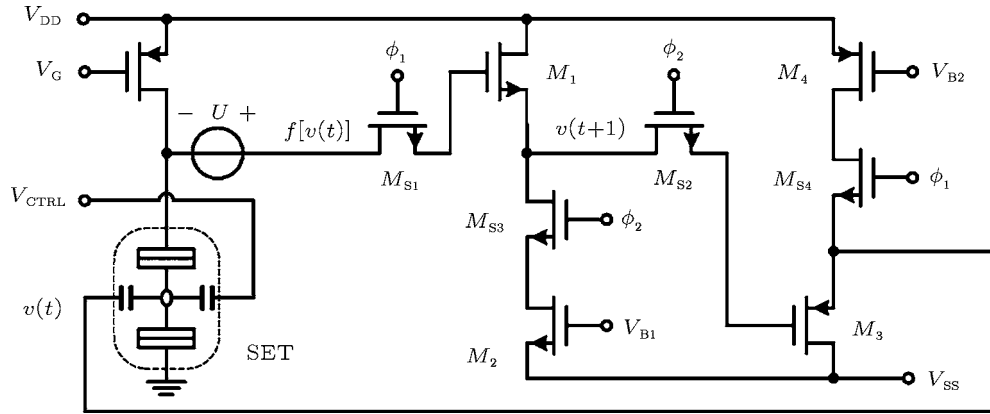


图7 基于 SET-MOS 的一维离散混沌系统电路

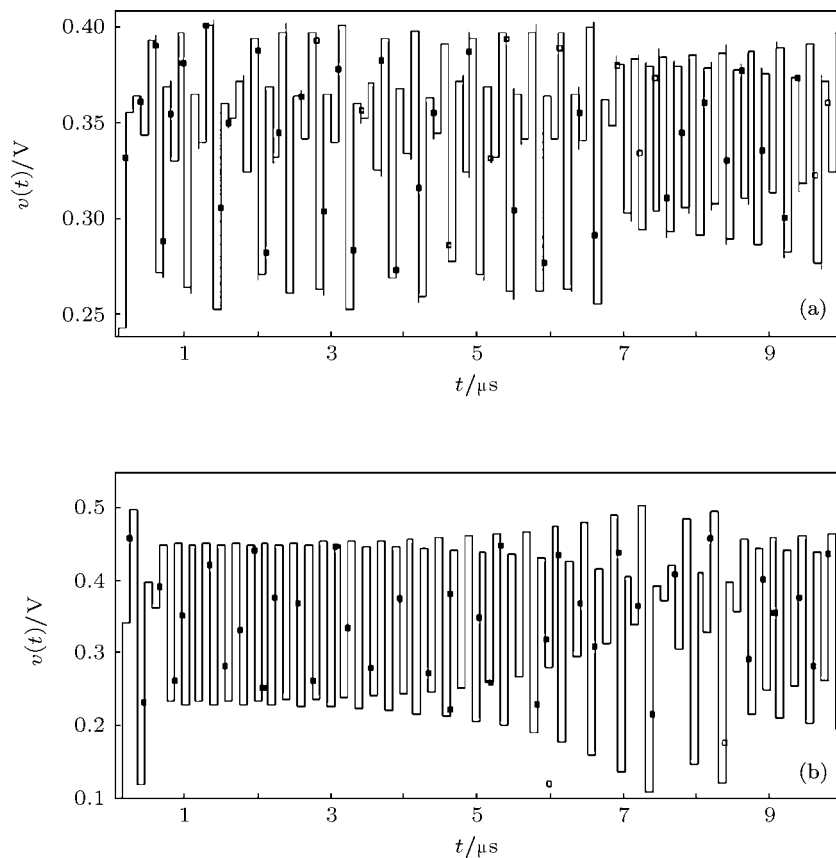


图8 离散混沌映射电路的仿真输出电压 (a) $c = 0$; (b) $c = 0.1$

5 结论

本文基于串联结构 SET-MOS 具有的非线性振荡特性设计了 N 型 PWL 函数的电路结构, 并基于此构成了一种结构非常简单的一维离散映射系统. 通过对该系统的动力学特性分析, 获得了产生混沌行为的参数变化范围. 最后设计出该系统的电路结构, 仿真验证了理论分析的正确性以及利

用 SET-MOS 混合电路构建离散混沌系统这一方法的可行性. 研究表明, 利用 SET-MOS 设计的一维离散混沌系统电路不仅结构简单, 而且工作频率很高, 功耗很低, 这有利于混沌电路的大规模集成以及在保密通信和图像处理等领域的应用, 同时也为多维离散混沌系统的研究提供了新的物理实现途径, 具有一定的借鉴意义.

- [1] Zhong M, Tang G N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3070 (in Chinese) [钟敏, 唐国宁 2010 物理学报 **59** 3070]
- [2] Chen G R, Dong X 1998 *Form Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and Applications* (Singapore: World Scientific)
- [3] Long M, Qiu S S 2007 *Chin. Phys.* **16** 2254
- [4] Guo H J, Liu D, Zhao G Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 010510 (in Chinese) [郭会军, 刘丁, 赵光宙 2011 物理学报 **60** 010510]
- [5] Rodriguez V A, Huertas J L, Rueda A, Perez V B, Chua L O 1987 *Proc. IEEE* **75** 1090
- [6] Tanaka H, Sato S, Nakajima K 2000 *Analog Integr. Circuits Signal Process.* **25** 329
- [7] 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]
- [8] Herrena R, Horio Y, Suyama K 1997 *Proceedings of the International Symposium on Nonlinear Theory and Its Application* (Honolulu: IEEE) p625
- [9] Mandal S, Banerjee S 2004 *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.* **51** 1708
- [10] Huang J, Momenzadeh M, Lombardi F 2007 *IEEE Des. Test Comput.* **24** 303
- [11] Ionescu A M, Mahapatra S, Pott V 2004 *IEEE Electron Device Lett.* **25** 411
- [12] Delgado-Restituto M, Rodriguez-Vázquez A 2002 *Proc. IEEE* **90** 747
- [13] Baillieul J, Brockett R W, Washburn R B 1980 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **27** 990
- [14] Hsu C, Gobovic D, Zaghoul M E, Szu H H 1996 *IEEE Trans. Neural Networks* **7** 1339

Research of one-dimensional discrete chaotic system constructed by the hybrid circuits of single-electron transistor and metal oxide semiconductor*

Feng Chao-Wen¹⁾ Cai Li^{1)†} Yang Xiao-Kuo¹⁾ Kang Qiang²⁾
Peng Wei-Dong³⁾ Bai Peng³⁾

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 2 July 2011; revised manuscript received 20 December 2011)

Abstract

A one-dimensional discrete chaotic system is constructed based on the hybrid architecture of single-electron transistor and metal oxide semiconductor in this paper. Voltage transfer characteristics of the parallel architecture of single-electron transistor and metal oxide semiconductor are investigated, and the corresponding N-shape piecewise linear function model is established. Based on this model a one-dimensional discrete mapping system is first constructed, the dynamics of the system is then analyzed including one-dimensional mapping process, bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum and the corresponding discrete chaotic system is finally designed through the electronic circuits of the hybrid architecture. The simulation result is consistent with the theoretical analysis. All these indicate that discrete chaotic system designed by the hybrid architecture of single-electron transistor and metal oxide semiconductor has some advantages such as simple circuit structure and low power dissipation, which are good for the integration and application of chaotic system.

Keywords: discrete system, Lyapunov exponent spectrum, 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 the Natural Science for Basic Research of the Shaanxi Province, China (Grant No. 2011JZ015), and the Foundation of Key Laboratory of Electronic Information System Integration of Shaanxi Province, China (Grant No. 201115Y15).

† E-mail: qianglicai@163.com