

SETMOS 在蔡氏电路中的特性研究*

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)

利用拟合法简化了单电子晶体管与金属氧化物半导体混合结构器件 SETMOS 的负微分电阻特性方程, 提出了由 SETMOS 设计多涡卷混沌电路的方法. 理论上定性和定量地分析了负微分电阻特性对于多涡卷蔡氏电路平衡点的影响. 经研究发现, 多涡卷蔡氏电路混沌在非线性函数的各负斜率区中形成径向收缩、轴向拉伸的单向运动, 而在各正斜率区中形成径向拉伸、轴向收缩的涡卷运动. 这为进一步实现多涡卷电路及研究其复杂动力学行为提供了理论基础.

关键词: 单电子晶体管, 负微分电阻, 拟合, 多涡卷

PACC: 0545, 7335C

1. 引 言

近年来, 各种变形蔡氏电路以及多涡卷混沌吸引子的出现, 使得蔡氏电路一类系统得到了深入的研究. 为了获得多涡卷混沌吸引子, 需要对系统方程中的非线性函数进行特殊设计, 通常采用的函数构造方法有多转折点分段线性函数法^[1,2]、非线性调制(正弦)函数法^[3]、阶梯函数法^[4]、滞后函数法^[5]、三角波函数法和锯齿波函数法^[6]、饱和函数法^[7]、平移变换法^[8]以及时滞序列法和阶跃序列法^[9,10]等. 以上研究工作为多涡卷混沌吸引子的研究提供了丰富的模型, 但其构造过程一般都是在已有混沌系统基础上通过改变非线性函数形式来得到多涡卷系统, 参数计算过程通常比较复杂, 且对于系统的生成原理少有深入的解释, 并且硬件实现较复杂.

随着超大规模集成电路的发展, 器件尺寸已进入纳米级, 新兴器件取代传统器件实现电路成为发展的必然趋势^[11]. 本文以蔡氏电路为例, 利用单电子晶体管(SET)和金属氧化物半导体(MOS)混合结构器件 SETMOS 的负微分电阻(NDR)特性实现混沌电路的非线性函数, 进而分析其对蔡氏电路的非线性动力学特性的影响, 得出蔡氏电路的涡卷数目决定于非线性函数特性.

2. SETMOS 的 NDR 特性与拟合

SETMOS 器件所具有的 NDR 特性^[12]适合于非线性电路的研究, 可在硬件领域为实现混沌电路提供新的研究空间. 图 1 为改进型 SETMOS 器件结构简图及其 NDR 特性. SET 的参数取值如下: $C_G = 0.3$ aF, $C_D = C_S = 0.1$ aF, $R_D = R_S = 1$ M Ω , $T = 300$ K. 这里 C_G 为栅极电容, C_D 和 C_S 分别为漏极电容和源极电容, R_D 和 R_S 分别为漏极电阻和源极电阻, T 为热力学温度. 在本文的仿真模拟中, 各 MOS 晶体管的模型均采用 BSIM3V3 模型. 图 1(a) 中, M_1 提供 70 nA 恒定偏置电流, M_2 工作在弱反型亚阈值区的边缘以获得有效的库仑振荡域, M_3 提供 14.315 μ A 的补偿电流. 补偿电压 V_{ofs} 为 -869.8 mV, 偏置电压 $V_C = 1$ V, $V_S = 0$ V. 应当指出, 理论上 SETMOS 的 NDR 特性可产生无穷多个振荡峰谷. 但实际上 MOS 晶体管的栅极有泄漏电流发生, 且当输入电压增大到一定程度, 此泄漏电流与 SET 的偏置电流可比拟时, 该器件的 NDR 特性会遭到破坏, 最终使得该器件的作用相当于一个普通电阻, 输出电流随输入电压呈指数形式增加, 不再有振荡行为. 从图 1(b) 可以看出, SETMOS 的 $I_{DS} - V_{DS}$ 特性曲线有三个振荡峰谷, 其中 I_{DS} 为 M_2 的漏极输出电流, V_{DS} 为 M_2 的漏源输入

* 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

电压.

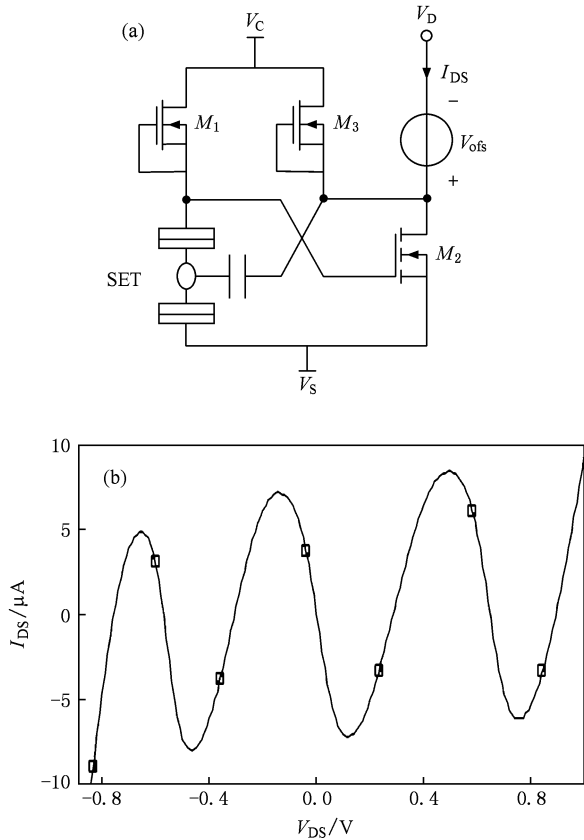


图1 改进型并联结构 SETMOS 及其特性 (a) 器件改进后的电路结构, (b) NDR 特性曲线

为了方便 SETMOS 在混沌系统领域的研究,在不改变 SETMOS 以及系统定性性质的情况下,对 SETMOS 复杂的 NDR 特性曲线模型进行曲线拟合,进而采用简化模型研究.

若进行正弦函数拟合,非线性函数可写作如下形式:

$$I_{DS} = f_1(V_{DS}) = \begin{cases} \frac{b\pi}{2a}(V_{DS} - 2ac) & (V_{DS} \geq 2ac), \\ -b\sin\left(\frac{\pi V_{DS}}{2a} + d\right) & (-2ac < V_{DS} < 2ac), \\ \frac{b\pi}{2a}(V_{DS} + 2ac) & (V_{DS} \leq -2ac), \end{cases} \quad (1)$$

其中 a, b, c, d 的值可根据不同的具体情况确定. 若要获得 n 涡卷吸引子, 须满足条件

$$n = c + 1, \quad (2)$$

$$d = \begin{cases} \pi & (n = 1, 3, 5, \dots), \\ 0 & (n = 2, 4, 6, \dots). \end{cases} \quad (3)$$

由图 1(b) 中 SETMOS 的 NDR 特性曲线可知, 产生

四涡卷混沌时, $n = 4, c = 3, d = 0$, 经拟合后得 $a = 0.15, b = 6.2 \times 10^{-6}$.

若进行连续分段线性函数拟合, 则拟合函数形式可写为

$$I_{DS} = f_2(V_{DS}) = \sum_{i=0}^{M-1} G_i |V_{DS} - V_i| + I. \quad (4)$$

(4) 式具有 $M-1$ 个拟合转折点 V_i . 设 $V_0 < V_1 < \dots < V_M$, V_0 和 V_M 分别为拟合初始点和终止点, M 为拟合点 V_i 的总数, G_i 和 I 均为拟合参数. 根据图 1(b) 可知, $M=7$, 经拟合得到 $G = [4.670, -5.895, 5.670, -5.038, 4.847, 4.893, 4.948]^T \times 10^{-5} \text{ S}$, $I = -4.129 \times 10^{-5} \text{ A}$.

SETMOS 的 NDR 曲线与拟合曲线的比较如图 2 所示. 图 2 中曲线 $f_0(x)$ 代表 SETMOS 的 NDR 原特性曲线, $f_1(x)$ 代表正弦函数拟合曲线, $f_2(x)$ 代表分段线性函数拟合曲线.

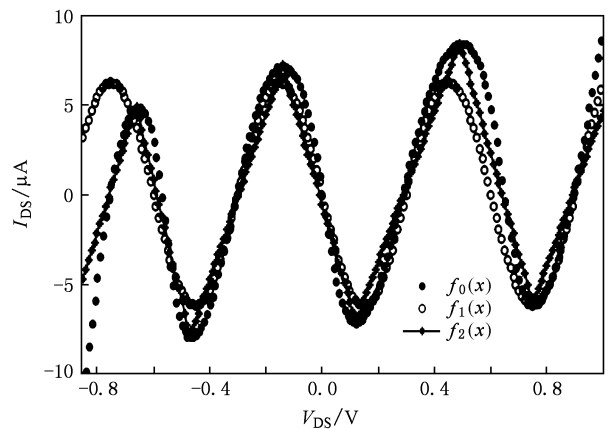


图2 SETMOS 的 NDR 特性曲线及拟合曲线

就拟合曲线效果而言, 正弦函数拟合比分段线性函数拟合误差大, 不能反映原曲线的 e 指数函数的趋势; 分段线性函数拟合虽有一定误差, 但它的设计具有灵活性, 并且可正确反映出原曲线各正负斜率区的特性. 综合考虑后, 本文选择分段线性拟合函数(4)式作为 SETMOS 的 NDR 曲线特性的模型来研究蔡氏电路多涡卷混沌.

3. 基于 SETMOS 特性的多涡卷蔡氏电路分析

3.1. 蔡氏多涡卷系统的构造

三维蔡氏电路的无量纲归一化状态方程为

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha(y - x - h(x)), \\ \dot{y} &= x - y + z, \\ \dot{z} &= -\beta y - \gamma z.\end{aligned}\quad (5)$$

非线性函数 $h(x)$ 通常用三段分段线性函数表示, 即

$$\begin{aligned}h(x) &= m_1 x + \frac{1}{2}(m_0 - m_1) |x + 1| \\ &\quad - |x - 1|,\end{aligned}\quad (6)$$

式中 x, y, z 为归一化状态变量; $\alpha, \beta, \gamma, m_0, m_1$ 为归一化实常数.

由(4)式得 SETMOS 特性曲线函数的归一化形式为

$$f(x) = \sum_{i=0}^{M-1} k_i |x - x_i| + k, \quad (7)$$

其中 $k_i = RG_i$, $k = RI/v$, $x_i = v_i/v$, $M = 7$, R 为归一化电阻, v 为归一化电压.

若将(6)式设计为(7)式, 则可利用 SETMOS 实现细胞神经网络(CNN)结构的变型蔡氏电路. 三维全互联无量纲 CNN 动态模型方程的一般式为^[13]

$$\begin{aligned}\dot{x}_j &= -x_j + a_j y_j + \sum_{k=1, k \neq j}^3 a_{jk} y_k \\ &\quad + \sum_{k=1}^3 s_{jk} x_k + i_j \quad (j = 1, 2, 3).\end{aligned}\quad (8)$$

令 $b_j g(x_j) = x_j - a_j y_j$, 则(8)式可变形为

$$\begin{aligned}\dot{x}_j &= -b_j g(x_j) + \sum_{k=1, k \neq j}^3 a_{jk} y_k \\ &\quad + \sum_{k=1}^3 s_{jk} x_k + i_j \quad (j = 1, 2, 3).\end{aligned}\quad (9)$$

这里下标 j 表示细胞位置, x_j 为状态变量, y_j 为对应细胞的输出, 即

$$y_j = \frac{1}{2} (|x_j + 1| - |x_j - 1|). \quad (10)$$

(8)式中 a_j 和 s_j 均为常量, i_j 为偏置值. (9)式中 b_j 为常量, $g(x_j)$ 为 N 形分段线性函数, 对于 CNN 的每一个细胞都相同, 因而将其划分为一个电路模块, 称为细胞核模块. 令

$$\begin{aligned}b_1 &= \alpha, \\ b_2 &= b_3 = 0, \\ a_{jk} &= 0, \\ i_j &= 0, \\ s_{11} &= -s_{12} = -\alpha, \\ s_{21} &= -s_{22} = s_{23} = 1, \\ s_{13} &= s_{31} = 0, \\ s_{32} &= -\beta, \\ s_{33} &= -\gamma,\end{aligned}\quad (11)$$

则可实现系统(5)的变型蔡氏电路方程

$$\begin{aligned}\dot{x} &= s_{11}x + s_{12}y - b_1 f(x), \\ \dot{y} &= s_{21}x + s_{22}y + s_{23}z, \\ \dot{z} &= s_{32}y + s_{33}z.\end{aligned}\quad (12)$$

(9)式中状态变量 x_1, x_2, x_3 分别对应于系统(12)中的状态变量 x, y, z ; 非线性函数 $g(x)$ 对应于(7)式的非线性函数 $f(x)$.

3.2. 基本动力学特性

3.2.1. 平衡点与特征值

令系统(12)中 $\dot{x} = 0, \dot{y} = 0, \dot{z} = 0$, 可得到平衡点方程

$$\begin{aligned}f(x) &= \frac{1}{b_1} \left(s_{11} + \frac{s_{12}s_{21}s_{33}}{s_{23}s_{32} - s_{22}s_{33}} \right) x, \\ y &= \frac{s_{21}s_{33}}{s_{23}s_{32} - s_{22}s_{33}} x, \\ z &= \frac{s_{21}s_{32}}{s_{22}s_{33} - s_{23}s_{32}} x.\end{aligned}\quad (13)$$

欲使(13)式有意义, 须满足条件 $b_1 \neq 0, s_{23}s_{32} \neq s_{22}s_{33}$. 由(7)和(13)式可得系统(12)的平衡点

$$\begin{aligned}x_n &= \frac{\sum_{i=0}^n k_i x_i - \sum_{j=n+1}^{M-1} k_j x_j - k}{\sum_{i=0}^n k_i - \sum_{j=n+1}^{M-1} k_j - \frac{1}{b_1} \left(s_{11} + \frac{s_{12}s_{21}s_{33}}{s_{23}s_{32} - s_{22}s_{33}} \right)}, \\ y_n &= \frac{s_{21}s_{33}}{s_{23}s_{32} - s_{22}s_{33}} x_n, \\ z_n &= \frac{s_{21}s_{32}}{s_{22}s_{33} - s_{23}s_{32}} x_n.\end{aligned}\quad (14)$$

下面对系统(12)的平衡点个数进行分析. 由 SETMOS 的 NDR 特性曲线和(13)式可得平衡点的分布及稳定情况, 结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 当过原点的直线 l 斜率 k_l 满足条件 $k_{l2} < k_l < k_{l1}$ 时, 系统(12)存在 7 个平衡点; 当 $k_{l1} < k_l$ 或 $k_3 < k_l < k_{l2}$ 时, 系统(12)只存在 3 个平衡点; 当 $k_l < k_3$ 时, 系统(12)只有原点是平衡点. 因此, 欲使系统(12)产生四涡卷, (13)式中的参数须满足

$$k_{l2} < \frac{1}{b_1} \left(s_{11} + \frac{s_{12}s_{21}s_{33}}{s_{23}s_{32} - s_{22}s_{33}} \right) < k_{l1}. \quad (15)$$

其中 $k_{l1} = f(x_2)/x_2 = 1.69717 \times 10^{-5}R$, $k_{l2} = f(x_1)/x_1 = -7.3727 \times 10^{-6}R$.

由以上所述可知, 非线性分段函数 $f(x)$ 经推广后有四个主要特点. (1) 负斜率区对应于键带区, 正

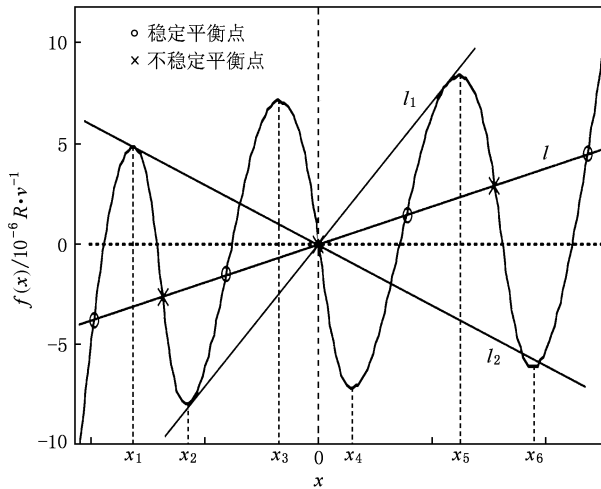


图3 平衡点的分布及稳定性

斜率区对应于涡卷区。(2)在相空间中, N 涡卷混沌吸引子的 N 个涡卷和 $N-1$ 个键带保持相互间置,且在最外面的两个区域一定是涡卷存在的区域。(3)产生 N 涡卷混沌吸引子需要 $N-1$ 个极大值和 $N-1$ 个极小值相互间置的连续性函数,且这些极大值和极小值分布于直线 $f(x)=0$ 两侧,其中 N 个正斜率区对应于 N 个涡卷, $N-1$ 个负斜率区对应于 $N-1$ 个键带。(4)极值点 $x_i (i=1,2,3,\dots)$ 与平衡点 $E_i (i=0,1,2,3,\dots)$ 保持相互间置。

下面通过参数的具体取值研究系统(12)的平衡点与特征根。由(13)和(15)式的约束条件,令 $s_{11}=0.5, b_1=s_{12}=10.5, s_{21}=s_{23}=1, s_{22}=-1, s_{33}=0.05, s_{32}=-15, R=15 \text{ k}\Omega$, 则(13)式变为

$$\begin{aligned} f(x) &= 0.0443x, \\ y &= -0.0033x, \\ z &= -1.0033x. \end{aligned} \quad (16)$$

于是可得各平衡点为 $E_0 = (-0.8039, 0.0027, 0.8066), E_1 = (-0.5634, 0.0019, 0.5653), E_2 = (-0.3163, 0.0011, 0.3174), E_3 = (0, 0, 0), E_4 = (0.3120, -0.0010, -0.3130), E_5 = (0.6081, -0.0020, -0.6101), E_6 = (0.9579, -0.0032, -0.9611)$ 。同时,由系统(12)可得对应的线性化 Jacobi 矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} s_{11} - b_1 f'(x) & s_{12} & 0 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ 0 & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0.5 - 10.5f'(x) & 10.5 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -15 & 0.05 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (17)$$

系统(12)对应的特征方程为

$$\begin{aligned} \varphi(\lambda) &= \lambda^3 + (10.5f'(x) + 0.45)\lambda^2 + (9.975f'(x) \\ &\quad + 3.975)\lambda + 156.975f'(x) - 6.95 \\ &= 0. \end{aligned} \quad (18)$$

由(4)式各系数 G_i 构成的向量 \mathbf{G} 及(7)式可得 $f'(x_0) = 0.75465, f'(x_1) = -1.01385, f'(x_2) = 0.68715, f'(x_3) = -0.82425, f'(x_4) = 0.62985, f'(x_5) = -0.83805, f'(x_6) = 0.64635$, 进而可得 $f'_{\min}(x) = f'(x_1) = -1.01385, f'_{\max}(x) = f'(x_0) = 0.75465$ 。将 $f'_{\min}(x)$ 代入(18)式解得特征根 λ 的值为 $\eta_1 = 11.8872, \sigma_1 \pm j\omega_1 = -0.8459 \pm j3.6411$ 。由于复根具有负实部,所以称此类特征根对应的平衡点为 I 型鞍焦点。同理,将 $f'_{\max}(x)$ 代入(18)式解得特征根 λ 的值为 $\eta_0 = -8.5533, \sigma_0 \pm j\omega_0 = 0.0897 \pm j3.6096$ 。由于复根具有正实部,所以称此类特征根对应的平衡点为 II 型鞍焦点。其他平衡点的分析类似。

3.2.2. 特征向量与特征平面

根据 $(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{J})\mathbf{v} = 0$, 由 $f(x)$ 产生的特征值对应的特征向量 $\mathbf{v} = [v_1, v_2, v_3]^T$ 可以表示成

$$\begin{bmatrix} \lambda - s_{11} + b_1 f'(x) & -s_{12} & 0 \\ -s_{21} & \lambda - s_{22} & -s_{23} \\ 0 & -s_{32} & \lambda - s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = 0. \quad (19)$$

下面对特征方程(18)的特征根 λ 分两种情况进行讨论。当 λ 的值为实数 η 时,令 $v_3 = s_{32}$, 由(19)式得一实特征向量

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= [v_1, v_2, v_3]^T \\ &= [((\eta - s_{22})(\eta - s_{33}) - s_{23}s_{32})/s_{21}, \\ &\quad \eta - s_{33}, s_{32}]^T. \end{aligned} \quad (20)$$

实数 η 对应的特征空间线性方程为

$$\begin{aligned} \frac{x - x_E}{((\eta - s_{22})(\eta - s_{33}) - s_{23}s_{32})/s_{21}} &= \frac{y - y_E}{\eta - s_{33}} \\ &= \frac{z - z_E}{s_{32}}, \end{aligned} \quad (21)$$

其中 x_E, y_E 和 z_E 为系统(12)的平衡点 E 的位置坐标。当 λ 的值为复数 $\sigma + j\omega$ 时,令 $v_3 = s_{32}$, 由(19)式得一复特征向量

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} ((\sigma + j\omega - s_{22})(\sigma + j\omega - s_{33}) - s_{23}s_{32})/s_{21} \\ \sigma + j\omega - s_{33} \\ s_{32} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} A + jB\omega \\ \sigma - s_{33} + j\omega \\ s_{32} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

令
则

$$\mathbf{v} = \xi_1^T + j\xi_2^T,$$

$$\xi_1 = [A, \sigma - s_{33}, s_{32}],$$

$$\xi_2 = [B\omega, \omega, 0].$$

由向量 (ξ_1, ξ_2) 确定的复平面空间可表示为

$$\xi_1 \times \xi_2 \\ = \left\{ \begin{vmatrix} \sigma - s_{33} & s_{32} \\ \omega & 0 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} s_{32} & A \\ 0 & B\omega \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} A & \sigma - s_{33} \\ B\omega & \omega \end{vmatrix} \right\} \\ = \{-\omega s_{32}, B\omega s_{32}, \omega[A - B(\sigma - s_{33})]\}. \quad (23)$$

(22) 式中

$$A = [\sigma^2 - \omega^2 - \sigma(s_{22} + s_{33}) + s_{22}s_{33} - s_{23}s_{32}]/s_{21},$$

$$B = (2\sigma - s_{22} - s_{33})/s_{21}.$$

因而,由复特征值确定的特征复平面方程可表示为

$$s_{32}(x - x_E) - Bs_{32}(y - y_E) \\ - [A - B(\sigma - s_{33})](z - z_E) = 0. \quad (24)$$

4. 多涡卷产生机制

由以上分析表明,在系统(5)和(6)式表示的混沌系统中,若非线性函数 $f(x)$ 有多个正负斜率区,则存在两种不同类型的平衡点,一类平衡点为 I 型鞍焦点,另一类平衡点为 II 型鞍焦点. I 型鞍焦点对应的特征值能够导致系统在负斜率区的各个区间中形成径向收缩、轴向拉伸的单向运动,而 II 型鞍焦点对应的特征值则导致系统在正斜率区的各个区间中形成径向拉伸、轴向收缩的涡卷运动. 由于这两种运动的相互作用,可在系统(5)和(6)式所构成的系统中形成多涡卷混沌吸引子.

5. 结 论

通过对 SETMOS 的 NDR 特性模型方程采用拟合简化后,研究了利用该拟合结果构成多涡卷混沌所需的非线性函数,进一步提出了 CNN 结构的多涡卷蔡氏电路的实现方法. 经过对该多涡卷蔡氏电路平衡点、特征值、特征向量及特征平面的分析,得到了多涡卷混沌的产生机制. 这不仅有利于降低多涡卷混沌电路硬件实现的复杂性,而且为多涡卷混沌的研究提供了新思路.

- [1] 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]
 [2] 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]
 [3] Tang W K S, Zhong G Q, Chen G, Man K F 2001 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **1** **48** 1369
 [4] Yalcin M E, Suykens J A K, Vandewalle J, Ozoguz S 2002 *Int. J. Bifur. Chaos* **12** 23
 [5] Lü J H, Han F L, Yu X H, Chen G R 2004 *Automatica* **40** 1677
 [6] Zhang C X, Yu S M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 119
 [7] Lü J H, Chen G R, Yu X H, Leung H 2004 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **1** **51** 2476

- [8] Chen L, Peng H J, Wang D S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3337 (in Chinese) [谌 龙、彭海军、王德石 2008 物理学报 **57** 3337]
 [9] Zhang C X, Yu S M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 120 (in Chinese) [张朝霞、禹思敏 2009 物理学报 **58** 120]
 [10] Wang F Q, Liu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1983 (in Chinese) [王发强、刘崇新 2007 物理学报 **56** 1983]
 [11] Thompson S E, Parthasarathy S 2006 *Mater. Today* **9** 20
 [12] Mahapatra S, Ionescu A M 2005 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **4** 705
 [13] Arena P, Baglio S, Fortuna L, Manganaro G 1995 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **1** **42** 123

Characteristic of hybrid single electron transistor and metal oxide semiconductor structure in Chua's circuit^{*}

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

The negative differential resistance (NDR) characteristic equation of single electron transistor and metal oxide semiconductor (SETMOS) hybrid structure is simplified by a fitting method. And a new approach to designing multi-scroll chaotic circuit with SETMOS is proposed. The effect of NDR characteristic on the equilibrium point of multi-scroll Chua's circuit is analyzed both qualitatively and quantitatively. The results show that the unidirectional motions of radial contract and axial tension occur in the negative sections of multi-scroll Chua's circuit, whereas in the positive sections appear the scroll motions of radial tension and axial contract. The result provides theoretical basis for the construction of multi-scroll chaotic circuits and the further study of their complex dynamical behaviors.

Keywords: single electron transistor, negative differential resistance, fitting, multi-scroll

PACC: 0545, 7335C

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

[†] E-mail: phonchownfcw@sohu.com