

基于单电子器件的细胞神经网络实现及应用研究*

冯朝文 蔡 理 李 芹

(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2007 年 7 月 3 日收到, 2007 年 9 月 7 日收到修改稿)

利用单电子晶体管和互补型金属氧化物半导体场效应晶体管的混合结构所具有的负微分电阻特性实现了细胞神经网络(CNN),设计构成了 CNN 的细胞体电路、A 模板电路和 B 模板电路,并将构成的 CNN 用于图像处理应用中.仿真结果表明,所设计的硬件电路具有结构简单、功耗低、响应速度快等特点,可用于构成各种规模的 CNN,进一步提高集成电路的集成度.

关键词:单电子晶体管,细胞神经网络,负微分电阻

PACC:7335C,7340Q,7290

1. 引 言

细胞神经网络(CNN)理论及应用是由 Chua 等^[1]于 1988 年提出来的,它是一种功能强大、易于电路实现的非线性处理器阵列.由于它是局域互联的结构,每个细胞只和邻域的细胞进行连接,因此比全局互联的神经网络具有更简单的结构,更易于超大规模集成电路(VLSI)的实现,故 CNN 具有广阔的应用前景.国外已有大量研究成果发表^[2,3],国内近年来所做的工作^[4,5]主要是以软件方法实现 CNN.软件方法具有方便、灵活、可构成多种模型、实现不同应用等优点.但软件不能充分体现神经网络快速并行的优点.因此,用硬件直接实现 CNN 是发展的必然趋势.

随着微电子工业的发展,以硅为基础的金属氧化物半导体技术已进入纳米级领域,由于互补型金属氧化物半导体场效应晶体管(CMOSFET)的物理尺寸极限所带来的固有缺陷和纳米级单电子晶体管(SET)的背景电荷效应、极低电流驱动等局限性,使得 CMOSFET 和 SET 的结合对于将来纳米尺寸的集成电路具有很好的应用前景.SET 与 MOSFET 的混合电路结构融合了 SET 的纳米特征尺寸、超低功耗和库仑阻塞振荡特性以及 CMOSFET 的高速驱动和高电压增益等优点^[6].用该 SET-MOSFET 混合电路

结构实现 CNN 可适应大规模集成电路的高速、低功耗、更高集成度的发展趋势.

本文基于 Ionescu 等^[7]提出的新型混合基本电路单元——SET-MOSFET 和张志勇、王太宏^[8]研究的 SET-MOSFET 所具有的负微分电阻(NDR)特性构造细胞体电路,用 MOSFET 管构成 A 模板电路和 B 模板电路,并用这三个模板构成 CNN,进而通过计算机模拟仿真验证,最后将其应用在简单的图像处理中.

2. CNN 细胞单元的硬件结构

CNN 网络的基本单元是人工细胞单元,每个细胞单元与周围邻近的细胞相连^[1].对于 M 行 N 列的网络, $\alpha(i, j)$ 表示第 i 行第 j 列的神经单元, $\alpha(i, j)$ 接受自身和邻近细胞的反馈信号及控制信号,反馈量由 A 模板决定,控制量由 B 模板决定.每个细胞所满足的非线性微分形式的状态方程为

$$C \frac{dV_{xy}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} V_{xy}(t) + \sum_{\alpha(k,l) \in N_r(i,j)} A(\alpha(k,l); i, j) V_{ykl}(t) + \sum_{\alpha(k,l) \in N_c(i,j)} B(\alpha(k,l); i, j) V_{ukl} + I$$

($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, C > 0, R_x > 0$);(1)
输出方程为

* 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.

$$V_{yij}(t) = \frac{1}{2}(|V_{xij}(t) + 1| - |V_{xij}(t) - 1|) \quad (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N); \quad (2)$$

输入方程为

$$V_{uij} = E_{ij} \quad (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N); \quad (3)$$

约束条件为

$$|V_{xij}(0)| \leq 1 \quad (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N); \quad (4)$$

参数假设为

$$A(i, j; k, l) = A(k, l; i, j) \quad (1 \leq i, k \leq M, 1 \leq j, l \leq N, C > 0, R_x > 0). \quad (5)$$

(1)式中 $A(i, j; k, l)$ 表示 $\alpha(k, l)$ 的输出与 $\alpha(i, j)$ 之间的连接权,由 $A(i, j; k, l)$ 组成 A 矩阵,又称反馈模板; $B(i, j; k, l)$ 表示 $\alpha(k, l)$ 的输入与 $\alpha(i, j)$ 之间的连接权,由 $B(i, j; k, l)$ 组成 B 矩阵,又称控制模板。 $V_{xij}, V_{yij}, V_{uij}, I$ 分别表示神经元 $\alpha(i, j)$ 的状态变量、输出变量、输入变量和恒定偏置.将(2)式代入(1)式化简后得

$$C \frac{dV_{xij}(t)}{dt} = -f(V_{xij}(t)) + g(t), \quad (6)$$

式中

$$f(V_{xij}(t)) = -(1/2)A(i, j; i, j) \times (|V_{xij}(t) + 1| - |V_{xij}(t) - 1|) + (1/R_x)V_{xij}(t) - I, \quad (7)$$

$$g(t) = \sum_{\substack{\alpha(k, l) \in N_r(i, j) \\ \alpha(k, l) \neq \alpha(i, j)}} A(i, j; k, l)V_{ykl} + \sum_{\alpha(k, l) \in N_r(i, j)} B(i, j; k, l)V_{ukl}. \quad (8)$$

(7)式等号右边第一项和第二项的合成伏安特性具有 N 形分段线性的形式,该两项之和对于 CNN 中每一个细胞都相同,所以将它划分为一个电路模块,称为细胞体模块.(8)式等号右边第一项和第二项分别为分段线性和线性的压控电流源,将两项分别用 A 模板电路模块和 B 模板电路模块来实现.

3. 细胞体电路模块

综合以上各段分析,利用 SET-MOSFET 结构的 NDR 特性,给出了细胞体电路的结构及 SPICE 仿真特性曲线,如图 1 所示.图 1(a)中 M_1, M_3 的栅极与源极相连构成恒流源, V_{dd} 为 M_1 提供偏置电压,电压源 V_1 和 V_2 为调解电压源, V_1 用来调解传输特性

曲线的横坐标位移, V_2 用来为 M_3 的源极提供偏压.整个电路可构成具有驱动点特性的 N 形非线性电阻,符合(7)式的要求.

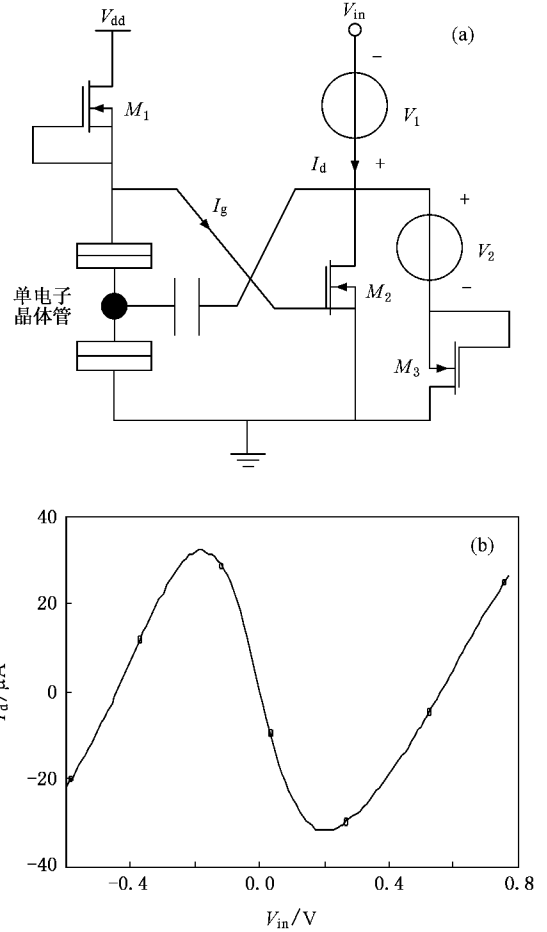


图 1 细胞体电路及传输特性 (a)细胞体电路 (b)输入-输出传输特性仿真曲线

在细胞体电路的仿真模拟中,各器件的参数设置如下:SET 采用 Mahapatra, Ionescu 和 Banerjee 等提出的改进型 MIB 模型^[9],栅极电容 $C_g = 2$ aF,源极电容 $C_s = 0.6$ aF,漏极电容 $C_d = 0.6$ aF,隧穿电阻 $R_1 = 3$ M Ω , $R_2 = 3$ M Ω ,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 $V_{th} = -0.3$ V,沟道宽 $W = 100$ nm,沟道长 $L = 65$ nm; M_3 的阈值电压 $V_{th} = -0.6$ V,沟道宽 $W = 8.66$ μ m,沟道长 $L = 100$ nm,为 SET-MOSFET 结构提供 77.94 μ A 的补偿电流;调解电压源 V_1 值为 1.253 V,调解电压源 V_2 值为 3 V.直流传输 $V_{in} - I_d$ 特性的 SPICE 仿真结果如图 1(b)所示,特性曲线与理论分析结果相符合,可以满足对细胞体电路 N 形非线性电阻特性的要求.

4. A 模板和 B 模板电路模块的 MOSFET 实现

4.1. A 模板电路模块的 MOSFET 实现

为实现细胞单元的 A 模板,利用纳米级的 MOSFET 管构造了结构简单的电路,如图 2 所示.它主要由纳米级 p 沟道的 MOSFET 镜像电流源和 n 沟道的 MOSFET 镜像电流源、输入极 p 沟道的 MOSFET 和 n 沟道的 MOSFET 以及调解电阻 R_{s1} 和 R_{s2} 构成.图 2(a)中 M_1 和 M_2 构成左支路的电流镜,由直流

源 V_{ss1} 为 M_1, M_2 源极提供偏置电压, M_3 和 M_4 构成右支路的电流镜,由直流源 V_{ss2} 为 M_3 和 M_4 源极提供偏置电压; M_2 和 M_3 的漏极构成输出电流, M_5 和 M_6 的栅极构成电压信号的输入端,调解电阻 R_{s1} 和 R_{s2} 在偏置电压 V_{s1} 和 V_{s2} 下用于调节 A 模板线性区的线性度,而线性区的斜率可由 M_5 和 M_6 的沟道宽长比 W/L 来确定.图 2(b)的结构与图 2(a)类似,区别在于对应的 MOSFET 管由增强型改变为耗尽型,耗尽型改为增强型,同时各管的参数也发生了变化.图 3 为 A 模板相应的输入-输出传输特性仿真曲线.表 1 和表 2 分别列出了正反馈 A 模板和负反馈 A 模板的各 MOSFET 的几何尺寸.

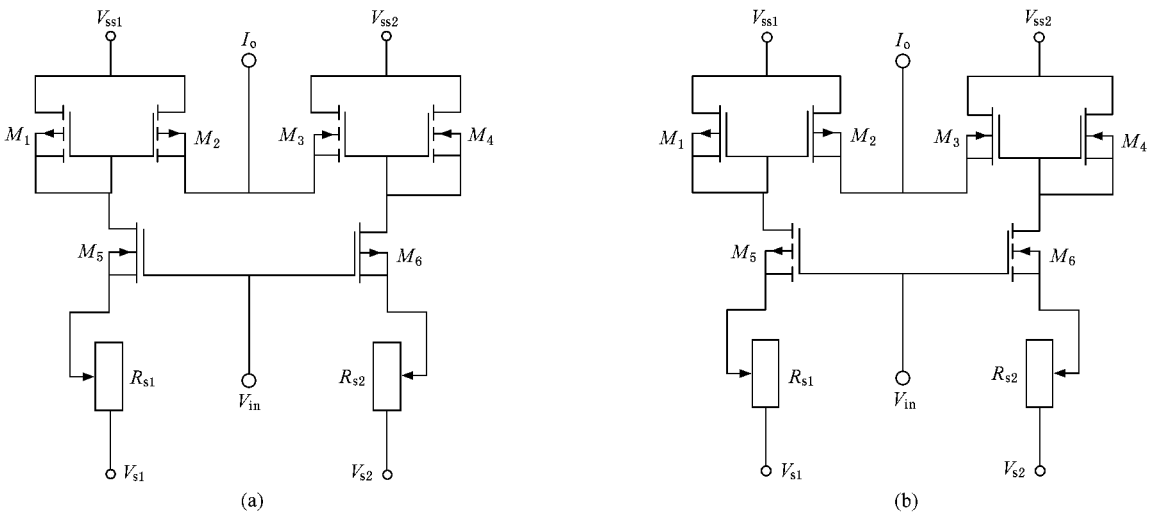


图 2 A 模板电路 (a)正反馈模板 (b)负反馈模板

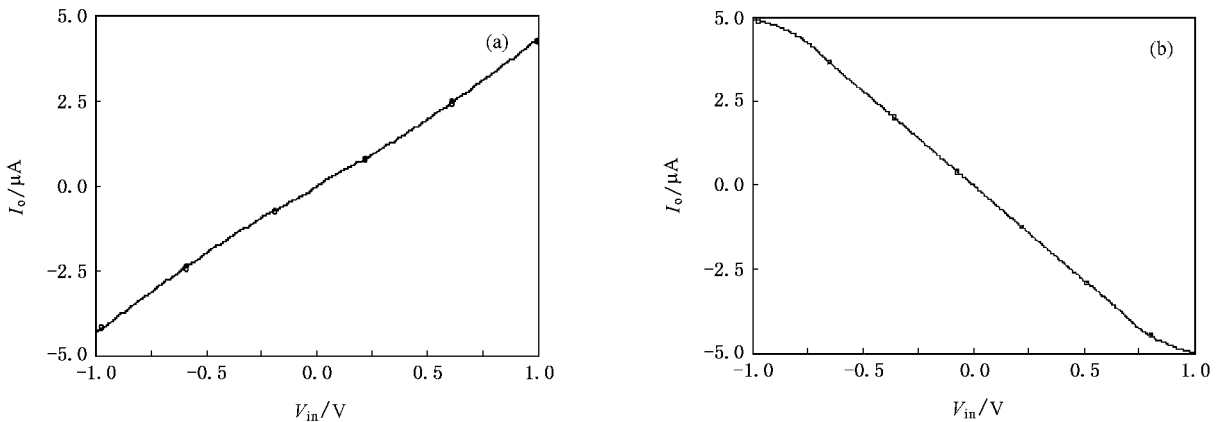


图 3 A 模板的输入-输出传输特性曲线 (a)正反馈 $V_{in}-I_o$ 特性 (b)负反馈 $V_{in}-I_o$ 特性

表 1 正反馈 A 模板的各 MOSFET 的阈值电压 V_{th} 和几何尺寸

MOSFET	V_{th}/V	W/nm	L/nm
M_1	-0.1	100	65
M_2	-0.1	100	65
M_3	0.1	100	65
M_4	0.1	100	65
M_5	-0.1	100	65
M_6	0.1	100	65

表 2 负反馈 A 模板的各 MOSFET 的阈值电压 V_{th} 和几何尺寸

MOSFET	V_{th}/V	W/nm	L/nm
M_1	0.1	70	100
M_2	0.1	70	100
M_3	-0.1	70	100
M_4	-0.1	70	100
M_5	-0.5	70	100
M_6	0.5	70	100

4.2. B 模板电路模块的 MOSFET 实现

B 模板实现的是线性电压控制电流源 $B(i, j; k, l) V_{ukl}$, 它具有跨导量纲, 实现电路图同 A 模板电路实现结构相同, 所不同的是 B 模板参数选取与 A 模板不同, 改变输入极 MOSFET 的宽长比 W/L 可改变 B 模板线性区的斜率, 即改变 B 模板的跨导值, 故在此不再赘述 B 模板的结构. 此外, B 模板的输入是自身和邻近细胞的输入变量信号 V_{ukl} , 而 A 模板的输入是自身和邻近细胞的输出变量信号 V_{ykl} .

5. 分段线性输出函数的实现

细胞的输出方程(2)可由图 4(a)所示的 SET-MOSFET 混合电路结构实现, 其中由 M_1 和 M_2 作恒流源提供的偏置电流为 50 nA, SET 所用参数如下: $C_{g1} = 0.04$ aF, $C_{g2} = 0.04$ aF, $C_s = 0.02$ aF, $C_d = 0.02$ aF, $R_1 = 1$ M Ω , $R_2 = 1$ M Ω , $T = 300$ K. 图 4(b) 为其输入-输出传输特性曲线. 由图 4(b)可见, 曲线的分段线性度较好, 调节背栅的补偿电压 V_{ofs1} 可以调节曲线沿横轴左右移动. 此外, 调节背栅的补偿电压 V_{ofs2} 可改变分段线性输出函数线性区的斜率. 该

方程实现后可与 A 模板一起构成分段线性压控电流源 $A(i, j; k, l) V_{ykl}$, 进而实现反馈控制.

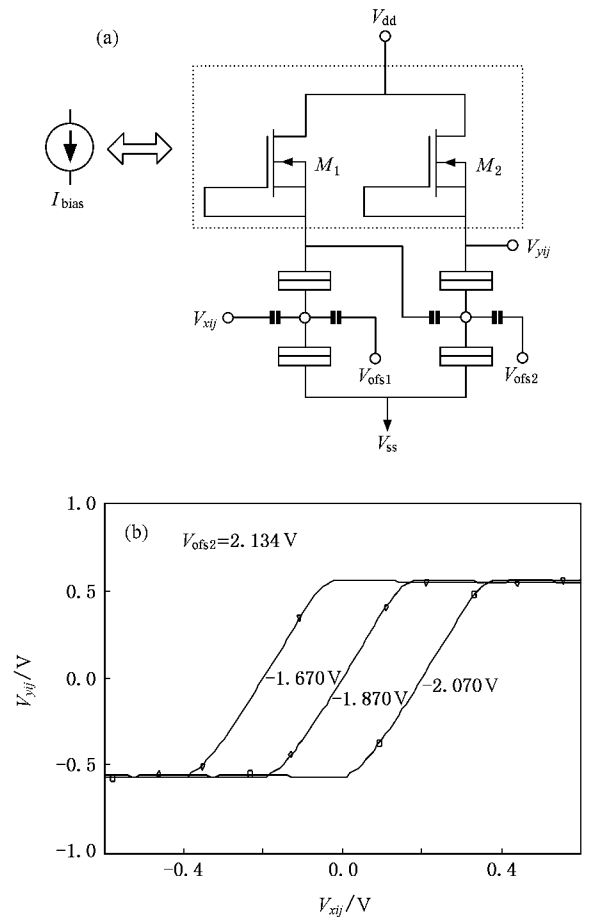


图 4 分段线性输出函数的 SET-MOSFET 混合结构实现 (a) 分段线性输出函数电路图 (b) 当 V_{ofs1} 取 -2.070 , -1.870 和 -1.670 V 时的输入-输出传输特性曲线

6. CNN 的图像处理应用

图像处理是信号处理领域的一个重要研究方向, CNN 的实时并行处理功能在数据量特别大的图像处理领域应用广泛^[10, 11]. 基于上述电路模块构成 CNN, 本文作了在相邻检测、空洞填充和边缘检测等方面的应用研究, 限于篇幅, 仅对二维的 CNN 图像处理——空洞填充^[12]予以应用研究, 并给出仿真结果. 空洞填充模板为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = 4;$$

恒定偏置电流 $I = -1$.

假设一个两极态(± 1)二维图像的输入电压如图 5(a) 所示. 细胞的深灰色状态代表高电平, 输入电压为 0.5 V ; 白色状态代表低电平, 输入电压为 -0.5 V . 所有细胞的初始状态值 $V_{xij}(0) = +1, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$, 如图 5(b). 那么, 细胞的最终状态值 $V_{xij}(\infty)$ 是两极态的, 二维图像的任何空洞将被填充, 如图 5(c).

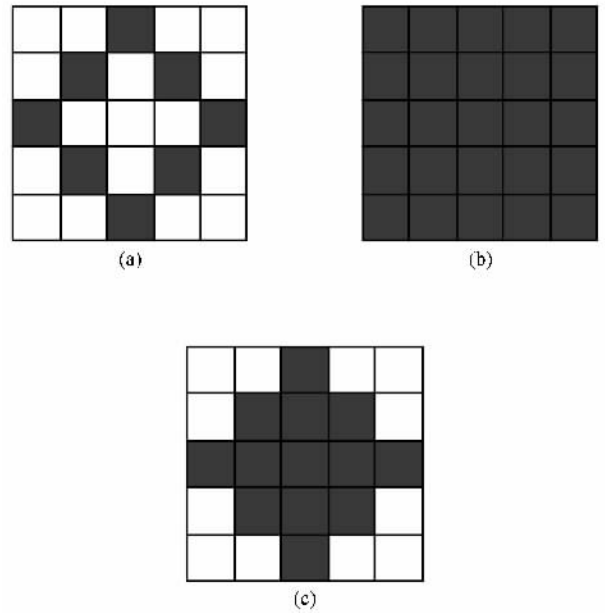


图 5 空洞填充 (a)待处理图像 (b)CNN 的初始态 (c)输出图像

图 6 是 CNN 各个细胞的暂态及输出随时间变化的仿真曲线. 从图 6(a) 可以看出, 尽管各个细胞的初始态相同, 但经过不同的路径达到不同的稳态. 从图 6(b) 可以看出, 输出信号从初始态随时间变化非常明显. 输出态的高电平接近 0.560 V , 低电平接近 -0.570 V . 由仿真曲线得出, 约经 $2.5\ \mu\text{s}$ 后, CNN 达到稳定状态. 由此可见, 所设计的混合 SET-MOSFET 的 CNN 有较好的图像处理功能. 与传统图像处理法相比, 用 CNN 硬件网络处理图像的机制是并行的, 其处理速度是传统方法不能比拟的.

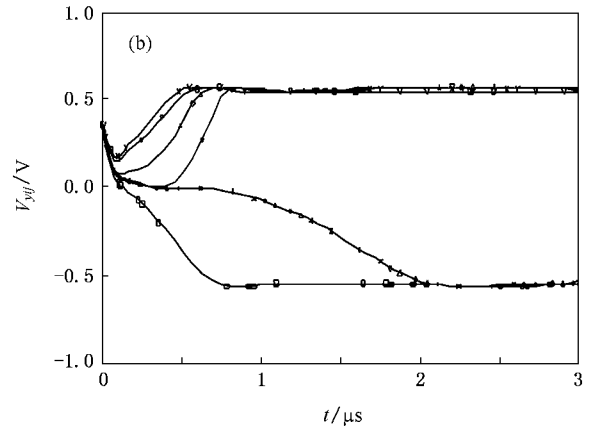
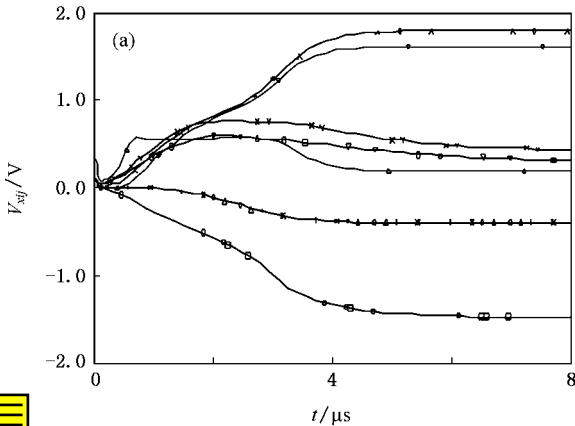


图 6 CNN 状态及输出仿真曲线 (a)各细胞暂态变化仿真曲线 (b)各细胞输出仿真曲线

7. 结 论

本文利用混合 SET-MOSFET 结构实现了 CNN 的硬件电路, 适合于 VLSI 实现. 设计构成了基于混合 SET-MOSFET 的细胞体电路模块, 用 MOSFET 构

成了 A 模板、B 模板电路模块, 并用这些模块构成 CNN 后进行了空洞填充的二维图像处理应用研究. 仿真结果表明, 混合 SET-MOSFET 的硬件结构 CNN 结构简单、静态功耗均在 200 nW 以内, 但输出电压均为几百毫伏, 较易驱动负载工作且响应时间较快, 有利于高集成度的 VLSI 实际应用.

[1] Chua L O, Yang L 1988 *IEEE Trans. CAS* **35** 1259
 [2] Yokosawa K, Nakaguchi T, Tanji Y, Tanaka M 2003 *IEEE Trans. CAS I* **50** 847
 [3] Varrientos J E, Sánchez-Sinencio E, Ramírez-Angulo J 1993 *IEEE Trans. CAS II* **40** 147

[4] Wang H X, Yu J B 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2303 (in Chinese)
 [王宏霞、虞厥邦 2001 物理学报 **50** 2303]
 [5] Wang H X, He C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2409 (in Chinese) [王宏霞、何晨 2003 物理学报 **52** 2409]
 [6] Mahapatra S, Ionescu A M 2005 *IEEE Trans. Nanotech.* **4** 705

- [7] Ionescu A M , Mahapatra S , Pott V 2004 *IEEE El. Dev. Lett.* **25** 411
- [8] Zhang Z Y , Wang T H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1766 (in Chinese)
[张志勇、王太宏 2003 物理学报 **52** 1766]
- [9] Mahapatra S , Vaish V , Wasshuber C , Banerjee K , Ionescu A M 2004 *IEEE Trans. El. Dev.* **51** 1772
- [10] Venetianer P L , Werblin F , Roska T 1995 *IEEE Trans. CAS I* **42** 278
- [11] Julián P , Dogaru R , Chua L O 2002 *IEEE Trans. CAS I* **49** 904
- [12] Matsumoto T , Chua L O , Furukawa R 1990 *IEEE Trans. CAS* **37** 635

Implementation and application of cellular neural networks based on single electron device^{*}

Feng Chao-Wen Cai Li Li Qin

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

(Received 3 July 2007 ; revised manuscript received 7 September 2007)

Abstract

This paper realizes cellular neural networks using the characteristic of negative differential resistance of hybrid single electron transistor and complementary metallic oxide semiconductor field effect transistor structure. The main building blocks consisting of cell core circuit , *A* and *B* template circuits are designed. Then a cellular neural network (CNN) is built and its application in image processing is studied. The computer simulation shows that the designed circuits are suitable for CNN implementation owing to its simple structure , low power dissipation and fast response. It could be used to form CNN of various scales so as to further increase the density of integrated circuits.

Keywords : single electron transistor , cellular neural networks , negative differential resistance

PACC : 7335C , 7340Q , 7290

^{*} 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).