

# SET-MOS 混合结构的细胞神经网络及其应用<sup>\*</sup>

李 芹<sup>†</sup> 蔡 理 冯朝文

(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2008 年 11 月 7 日收到, 2008 年 11 月 28 日收到修改稿)

基于细胞神经网络(CNN)细胞单元的等效电路及其电学特性模型,利用 SET-MOS 混合结构反相器实现了模型中的激活函数电路,用耦合电容单元实现 CNN 细胞的系统模板,构建了 SET-MOS CNN 细胞硬件电路,并将其应用在图像处理中.仿真结果表明,所设计的 CNN 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 电路,进一步满足大规模信号处理的需求及提高集成电路的集成度.

关键词:单电子晶体管, MOS 管, 细胞神经网络, 图像处理

PACC: 7335C, 7340Q, 7290, 0365S

## 1. 引 言

1988 年 Chua 等<sup>[1]</sup>创造性地提出了一个具有实时信号处理功能的大规模非线性模拟电路——细胞神经网络(CNN).CNN 显示了神经网络和细胞自动机两者的优点,特别是具有高速并行处理功能和连续动力学性质,同时每个细胞仅与它最接近的细胞相连接,使得它更易于超大规模电路(VLSI)实现,故 CNN 具有广泛的应用前景,如在图像处理、模式识别、机器人视觉及高级生物脑功能探索等诸多领域已有大量研究成果发表<sup>[2-6]</sup>.

随着纳米技术的发展,人们在对互补型金属氧化物半导体场效应晶体管(CMOS)器件尺寸进行减小的同时,也在寻找新的信息处理结构以满足大规模信号处理的需求.如何在提高集成度的同时降低电路的能耗,仍是 CNN 硬件实现中一个值得探索的问题.单电子晶体管(SET)器件满足大规模神经网络的硬件需求,如局部互连,小的器件尺寸以及低功耗等.鉴于 CMOS 的物理尺寸极限所带来的固有缺陷和纳米级 SET 的背景电荷效应、极低电流驱动等局限性,使得 MOS 管和 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-MOS 混合的电路结构融合了 SET 的纳米特征尺寸、超低功耗和库仑阻塞振荡特性以及 MOS 的高速驱动和高电

压增益等优点<sup>[7,8]</sup>.用该混合结构实现 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 CNN 细胞的等效电路及其电学特性模型,利用作者提出的 SET-MOS 混合结构反相器<sup>[9]</sup>实现了激活函数电路,用耦合电容单元实现了 CNN 的系统模板,构建了 SET-MOS CNN 细胞单元硬件电路,并将其应用在图像处理中.

## 2. SET-MOS CNN 细胞硬件电路的实现

### 2.1. 细胞的电学特性模型

细胞神经网络的基本电路单元称作一个细胞或神经元.一个规模为  $M \times N$  的细胞神经网络共有  $M \times N$  个细胞排列成  $M$  行  $N$  列,每一个细胞仅和它邻域的细胞相连. $\alpha(i, j)$ 表示第  $i$  行第  $j$  列的细胞单元,其等效电路如图 1 所示<sup>[1]</sup>,它接受自身和邻近细胞的反馈信号及控制信号.其中, $I_{xi}(i, j; k, l) = B(i, j; k, l)V_{xkl}$ ;  $I_{xy}(i, j; k, l) = A(i, j; k, l)V_{ykl}$ ;  $I_{yx}(i, j; k, l) = 0.5(|V_{xij} + 1| - |V_{xij} - 1|)R_y$ .

细胞的动态过程可以用如下一阶非线性微分方程来描述:

$$C \frac{dV_{xij}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} V_{xij}(t)$$

<sup>\*</sup> 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.

<sup>†</sup> E-mail: liqin\_121@sohu.com

$$\begin{aligned}
& + \sum_{\alpha(k,l) \in N_r(i,j)} A(i,j;k,l)V_{ykl}(t) \\
& + \sum_{\alpha(k,l) \in N_r(i,j)} B(i,j;k,l)V_{ukl} + I \\
& (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, C > 0, R_x > 0) \quad (1)
\end{aligned}$$

输出方程

$$\begin{aligned}
V_{yij}(t) &= 0.5(|V_{xij}(t) + 1| - |V_{xij}(t) - 1|) \\
(1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N), \quad (2)
\end{aligned}$$

输入方程

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

约束条件

$$\begin{aligned}
|V_{xij}(0)| &\leq 1 \\
(1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N), \quad (4)
\end{aligned}$$

参数假设

$$\begin{aligned}
A(i,j;k,l) &= A(k,l;i,j) \\
(1 \leq i,k \leq M, 1 \leq j,l \leq N; C > 0, R_x > 0). \quad (5)
\end{aligned}$$

上述式中,  $A(i,j;k,l)$  表示  $\alpha(k,l)$  的输出与  $C(i,j)$  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.

由图 1 的 CNN 细胞等效电路及方程式 (1)(2) 构建的细胞单元的电学特性模型如图 2 所示. 图中  $V_\Sigma$  为细胞单元各个输入及反馈信号与相应权重信号相乘后的加和输出, 可以看出  $V_\Sigma$  的变化状态

释了方程 (1). CNN 细胞的最终输出信号  $V_{out}$  输出的高低电平级别由输入信号的加权和是否大于阈值状态值  $S$  来决定. 因此, 也可以把阈值  $S$  作为 CNN 细胞的一个输入信号  $V_i$  来处理<sup>[10]</sup>.

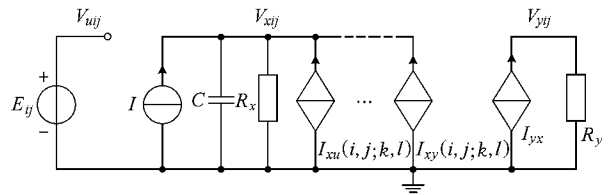


图 1 CNN 细胞的等效电路

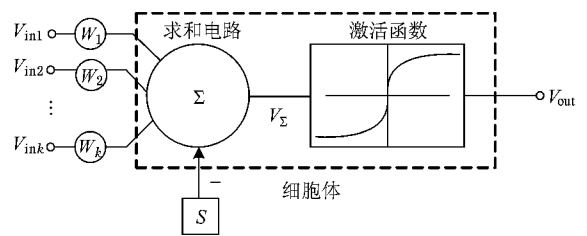


图 2 CNN 细胞的电学特性模型

### 2.2. 激活函数的电路实现

从图 2 CNN 细胞的电学特性模型可以看出, 激活函数模块是细胞电路硬件实现的关键. 基于激活函数的输入输出特性, 通过对作者提出的 SET-MOS 反相器的传输特性分析<sup>[9]</sup>可知, 在反相器的输出端再串联一个反相器, 即可得到 CNN 细胞的激活函数电路如图 3(a) 所示.

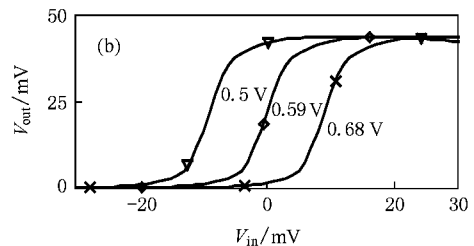
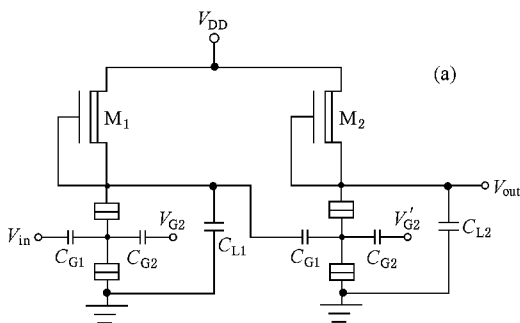


图 3 SET-MOS 混合结构激活函数电路 (a) 及其仿真曲线 (b)

利用 SPICE 对提出的激活函数电路进行仿真分析,  $V_{G2} = 0.36 \text{ V}$ ,  $V_{G2}$  分别为  $0.5, 0.59$  和  $0.68 \text{ V}$  时的仿真曲线如图 3(b) 所示, 其余设置如下:  $V_{DD} =$

$0.05 \text{ V}$ . NMOS 管的参数设置为  $W = 20 \text{ nm}, L = 200 \text{ nm}$ . SET 的参数设置为  $C_{G1} = 1 \text{ aF}, C_{G2} = 0.1 \text{ aF}$ , 源极和漏极隧道结电容  $C_S = C_D = 0.2 \text{ aF}$ , 源极和漏极隧

道结电阻  $R_S = R_D = 8 \text{ M}\Omega$ 。由仿真结果可以看出,基于输入电压的变化可以获得一个双稳态的输出,特性曲线与理论分析结果相符合,可以满足对细胞体电路激活函数特性的要求。

### 2.3. CNN 细胞的硬件电路实现

图 2 所示求和部分  $V_\Sigma$  用电容耦合来实现<sup>[11]</sup>,则构成的 SET-MOS 混合结构的 CNN 细胞硬件电路如图 4 所示。激活函数电路的输入电压是外部所有输入信号的权重之和,而外部输入信号的权重由其耦合的电容值决定。为了获得基于 SET-MOS 混合结构 CNN 电路的输入输出关系,在此以两个神经元为例,构建了一个分析模型,如图 5 所示。电容  $C_{in}$  和  $C_{in1}$  用于连接前向反馈,  $C_{in2}$  用于连接后向反馈。当

$V_n$  为负值(即 CNN 反馈模板的负项),它将在  $V_{inv}$  端提供一个负的电压补偿,也即从细胞 1 提供一个负的输出电压到细胞 2 的输入,这也是对于 CNN 模板其具有负反馈项的必备条件。

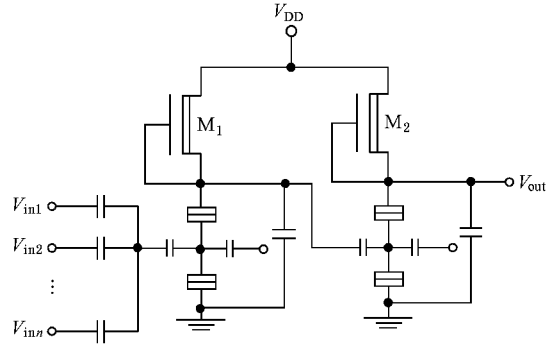


图 4 SET-MOS 混合结构 CNN 细胞硬件电路

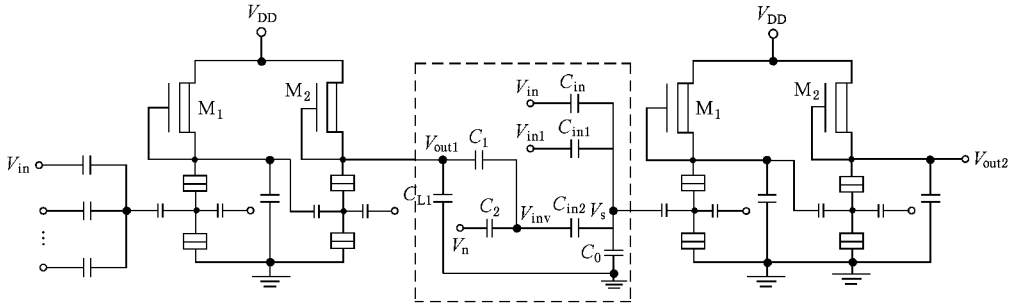


图 5 SET-MOS CNN 细胞互连示意图

在图 5 所示虚线框中,利用电荷守恒得

$$C_1(V_{out1} - V_{inv}) + C_2(V_n - V_{inv}) = C_{in2}(V_{inv} - V_s), \quad (6)$$

$$C_{in2}(V_{inv} - V_s) + C_{in1}(V_{in1} - V_s) + C_{in}(V_{in} - V_s) = C_0 V_s. \quad (7)$$

联立方程(6)和(7),整理得

$$V_s = \frac{C_{in2} C_1 V_{out1} + C_{in2} C_2 V_n + K C_{in} V_{in} + K C_{in1} V_{in1}}{-C_{in2}^2 + K C_{in2} + C_{in1} + C_{in} + C_0}, \quad (8)$$

式中  $K = C_1 + C_2 + C_{in2}$ 。

方程(8)中的状态电压  $V_s$  包括由  $C_{in}$ ,  $C_{in1}$  和  $C_{in2}$  项决定的输入、前向反馈和后向反馈,依据 CNN 的实际情况以及它的系统模板,可以确定出 CNN 细胞单元的各电容值,从而进行图像处理等具体应用。

### 3. SET-MOS CNN 应用于图像处理

图像处理是信号处理的一个重要的研究方

向,CNN 具有的高速并行实时信号处理能力使得它特别适用于解决图像处理的实时性问题<sup>[12-15]</sup>。基于提出的 CNN 细胞单元构成 CNN 电路,本文主要做了阴影检测、相邻单元检测以及线检测等方面的应用研究。限于篇幅,在此仅给出二维斜线检测的 CNN 电路及其相关仿真结果。

为了简化电路及分析问题的方便,在进行二维图像的斜线检测时,我们将图 4 所示的 CNN 细胞电路用图 6 所示的电路框图表示。

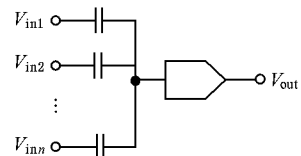


图 6 CNN 细胞硬件电路框图

将  $4 \times 4$  的细胞电路应用于图像处理,则实现左、右斜线检测的 CNN 简化电路如图 7 所示。待处

理图像如图 8 (a)所示,每个细胞代表一个像素,像素的黑色状态“■”代表高电平,白色状态“□”代表

低电平.所有细胞的初始状态值都设为高电平,如图 8 (b)所示.

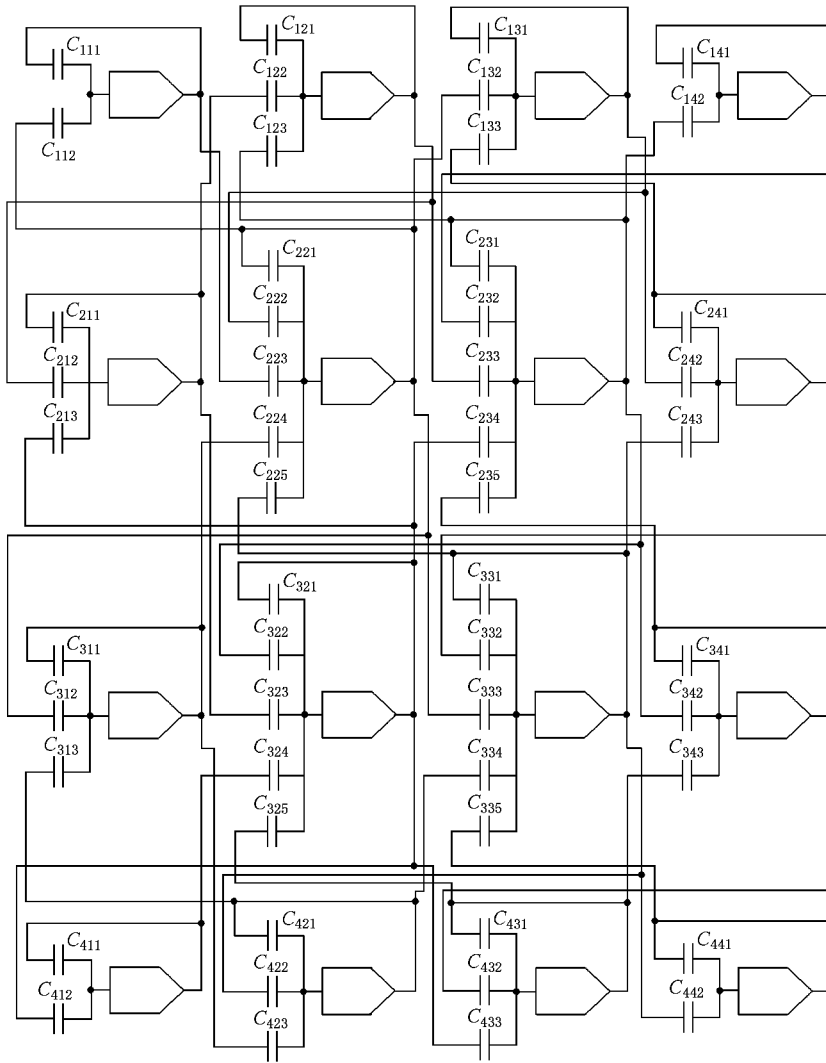


图 7 斜线检测电路

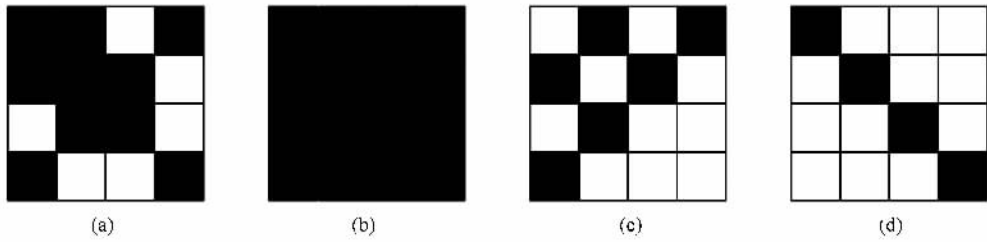


图 8 斜线检测 (a)原始图像 (b)CNN的初始态 (c)左斜线检测后图像 (d)右斜线检测后图像

当电路实现左斜线检测时,图像处理结果如图 8 (c)所示,各细胞输出变量仿真曲线如图 9 所示.选取  $V_{G2} = 0.36 \text{ V}$ ,  $V_{G2} = 0.5 \text{ V}$ .选取的电容值分别为  $C_{111} = C_{121} = C_{131} = C_{141} = C_{211} = C_{221} = C_{231} = C_{241} =$

$C_{311} = C_{321} = C_{331} = C_{341} = C_{411} = C_{421} = C_{431} = C_{441} = 2.5 \text{ aF}$ ,  $C_{122} = C_{132} = C_{142} = C_{212} = C_{222} = C_{232} = C_{242} = C_{213} = C_{223} = C_{233} = C_{243} = C_{312} = C_{322} = C_{332} = C_{342} = C_{313} = C_{323} = C_{333} = C_{343} = C_{412} = C_{422} = C_{432} = 1 \text{ aF}$ ,  $C_{112}, C_{123}, C_{133}, C_{143}, C_{213},$

$C_{223}, C_{225}, C_{233}, C_{242}, C_{313}, C_{323}, C_{325}, C_{333}, C_{335}, C_{342}, C_{423}, C_{433}, C_{442}$  断开, 其对应检测电路的 A 模板为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2.5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

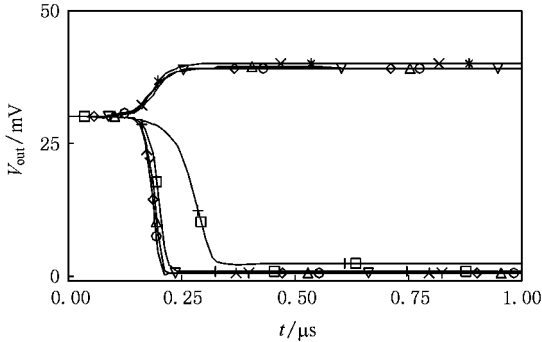


图 9 左斜线检测的各细胞输出变量仿真曲线

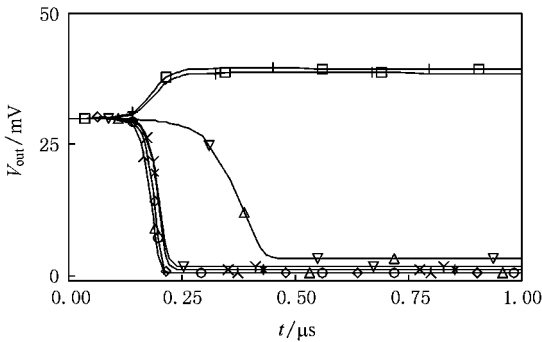


图 10 右斜线检测的各细胞输出变量仿真曲线

当电路实现右斜线检测时, 图像处理结果如图 8(d) 所示, 各细胞输出变量仿真曲线如图 10 所示. 选取  $V_{c2} = 0.36 \text{ V}, V_{c2} = 0.5 \text{ V}$ . 选取的电容值分别为  $C_{111} = C_{121} = C_{131} = C_{141} = C_{211} = C_{221} = C_{231} = C_{241} = C_{311} = C_{321} = C_{331} = C_{341} = C_{411} = C_{421} = C_{431} = C_{441}$

$= 2 \text{ aF}, C_{112} = C_{123} = C_{133} = C_{213} = C_{223} = C_{225} = C_{233} = C_{235} = C_{242} = C_{313} = C_{323} = C_{325} = C_{333} = C_{335} = C_{342} = C_{423} = C_{433} = C_{442} = 1 \text{ aF}, C_{122}, C_{132}, C_{142}, C_{212}, C_{222}, C_{224}, C_{232}, C_{234}, C_{243}, C_{312}, C_{322}, C_{324}, C_{332}, C_{334}, C_{343}, C_{412}, C_{422}, C_{432}$  断开, 其对应检测电路的 A 模板为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

从图 9 和图 10 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 40 mV, 低电平接近 0 V, 约经 0.25 μs 后, CNN 达到稳定状态. 可以看出, 通过选择合适的参数, SET-MOS 混合结构实现的二维 CNN 能够很好地进行左、右斜线的检测且功耗仅为 0.765 nW. 由此可见, 所设计的混合 SET-MOS CNN 有较好的图像处理功能, 与传统图像处理法相比, 因 CNN 硬件网络为并行的图像处理机制, 其处理速度是传统方法不能比拟的.

### 4. 结 论

本文深入研究分析了 CNN 细胞的等效电路, 在此基础上根据细胞的电学特性模型, 利用作者提出的 SET-MOS 混合结构反相器及耦合电容单元实现了细胞神经网络细胞单元电路. 并将该电路应用于二维图像的斜线检测, 仿真结果证明, 所设计的混合 SET-MOS CNN 有较好的图像处理功能, 与传统图像处理法相比, 因 CNN 硬件网络为并行的图像处理机制, 其处理速度是传统方法无法比拟的. 简言之, 本文实现的混合 SET-MOS CNN 硬件电路结构简单、功耗降至 1 nW 以内, 且响应时间较快, 有利于推动高速、低功耗、高集成度的超大规模集成电路的应用和发展.

[ 1 ] Chua L O, Yang L 1988 *IEEE Trans. CAS* **35** 1258  
 [ 2 ] Yokosawa K, Nakaguchi T, Tanji Y, Tanaka M 2003 *IEEE Trans. CAS -I* **50** 847  
 [ 3 ] 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 ]  
 [ 4 ] Wang S, Cai L, Li Q, Wu G 2007 *Chin. Phys.* **16** 2631  
 [ 5 ] Feng C W, Cai L, Li Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2462 ( in Chinese ) [ 冯朝文、蔡 理、李 芹 2008 物理学报 **57** 2462 ]

[ 6 ] Feng C W, Cai L, Kang Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6155 ( in Chinese ) [ 冯朝文、蔡 理、康 强 2008 物理学报 **57** 6155 ]  
 [ 7 ] Ionescu A M, Mahapatra S, Pott V 2004 *IEEE Electron Devices Lett.* **25** 411  
 [ 8 ] Mahapatra S, Pott V, Ecoffey S, Schmid A, Wasshuber C 2003 *Proceeding of IEDM* 706  
 [ 9 ] Li Q, Cai L, Zhou Y J, Wu G 2008 *the 3rd IEEE Int. Conf. NEMS* 211

- [ 10 ] Flak J , Laiho M , Halonen K 2006 *the 10th International Workshop on CNNA* 183
- [ 11 ] Gerousis C , Goodnick S M , Porod W 2000 *Int. J. Circ. Theor. Appl.* **28** 532
- [ 12 ] Xing H Y , Xu W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3771 ( in Chinese ) [ 行 鸿彦、徐 伟 2007 物理学报 **56** 3771 ]
- [ 13 ] Arena P , Basile A , Bucolo M 2003 *IEEE Trans. CAS -I* **50** 837
- [ 14 ] Julian P , Dogaru R , Chua L O 2002 *IEEE Trans. CAS -I* **49** 904
- [ 15 ] Zhao J Y , Wang H M , Yu D 2003 *Int. J. Circ. Theor. Appl.* **31** 119

## Cellular neural network with hybrid single-electron and MOS transistors architecture and its application \*

Li Qin<sup>†</sup> Cai Li Feng Chao-Wen

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

( Received 7 November 2008 ; revised manuscript received 28 November 2008 )

### Abstract

Based on both the cell equivalent circuit of cellular neural network and the electrical characteristic model of cellular neural network ( CNN ) cell , the cell circuit of cellular neural networks is implemented . The activation function of cell circuit is made of two cascaded SET-MOS inverter , which is proposed previously by the author . The CNN cloning template is built by coupling capacitance of input terminal . Then the CNN and its application in image processing are built and studied . The computer simulation results show that the designed circuits is suitable for CNN implementation because of its simple structure , low power dissipation and fast response . The designed circuit can be used to form CNN of various scales so as to further satisfy the need of large-scale signal processing and improve the density of integrated circuit .

**Keywords** : single electron transistor , MOS transistor , cellular neural networks , image processing

**PACC** : 7335C , 7340Q , 7290 , 0365S

\* 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 : liqin\_121@sohu.com