# 忆阻及其应用研究综述

王小平<sup>1,2</sup> 沈轶<sup>1,2</sup> 吴计生<sup>1,2</sup> 孙军伟<sup>1,2</sup> 李薇<sup>1,2</sup>

**摘 要** 忆阻由蔡少棠教授从对称性角度预言提出,自惠普实验室 2008 年制作出第一款忆阻开始,其已成为自动化等相关领 域最热门研究方向之一.本文回顾了忆阻的起源,探讨了忆阻的分类及其制造技术,分析了忆阻的多个数学模型和仿真模型以 及仿真模型的实现方法,总结了忆阻在人工神经网络、保密通信、存储器、模拟电路、人工智能计算机、生物行为模拟等方面 的研究现状,并对其应用前景进行展望.

关键词 忆阻,数学模型,仿真模型,存储器

引用格式 王小平, 沈轶, 吴计生, 孙军伟, 李薇. 忆阻及其应用研究综述. 自动化学报, 2013, **39**(8): 1170–1184 **DOI** 10.3724/SP.J.1004.2013.01170

# **Review on Memristor and Its Applications**

WANG Xiao-Ping<sup>1, 2</sup> SHEN Yi<sup>1, 2</sup> WU Ji-Sheng<sup>1, 2</sup> SUN Jun-Wei<sup>1, 2</sup> LI Wei<sup>1, 2</sup>

**Abstract** Since memristor was predicted by Chua L O from symmetry arguments and produced at HP laboratory in 2008, it has become one of the most popular research directions in the related fields of automation. In this paper, the origin of the memristor is investigated, the memristor classification and its manufacturing technology are described, then the multiple mathematical models, simulation models and their implementation methods of memristor are analyzed. Finally, the research situation and application prospects on artificial neural network, confidential communications, memory, analog circuit, artificial intelligence computer, and biological behavior simulation are discussed.

 ${\bf Key \ words} \quad {\rm Memristor, \ mathematical \ model, \ simulation \ model, \ memory}$ 

Citation Wang Xiao-Ping, Shen Yi, Wu Ji-Sheng, Sun Jun-Wei, Li Wei. Review on memristor and its applications. Acta Automatica Sinica, 2013, **39**(8): 1170–1184

忆阻 (Memristor) 是美国加利福尼亚大学伯克 利分校的科学家蔡少堂于 1971 年提出的, 蔡少堂教 授从对称性角度预言提出, 除电容、电感和电阻外, 电子电路还应存在第四种基本元件 — 忆阻<sup>[1]</sup>. 蔡少 棠指出, 电压 v、电流 i、电荷 q 和磁通量  $\varphi$ , 这 4 个 基本电路变量之间应该存在六种数学关系: 电流定 义为电荷关于时间的变化率  $i = \frac{Q}{dt}$ ; 电压是磁通量 关于时间的变化率  $v = \frac{Q}{dt}$ ; 电阻定义为电压随着电 流的变化率  $R = \frac{Q}{dt}$ ; 电容定义为电荷随着电压的变 化率  $C = \frac{dq}{dv}$ ; 电感定义为磁通量随着电流的变化率  $L = \frac{dQ}{dt}$ ; 还有一个问题是缺少了一种能够将电荷 q

Manuscript received December 31, 2012; accepted June 6, 2013 国家自然科学基金 (61134012, 11271146), 中央高校基本科研业务费 (HUST: 2013TS126), 武汉市科技计划 (2013010501010117) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61134012, 11271146), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (HUST: 2013TS126), and Wuhan Science and Technology Plan (2013010501010117)

与磁通量  $\varphi$  关联起来的电路元件, 而这种元件即由 电荷 q 和磁通量  $\varphi$  之间的关系来定义 (见图 1).





美国惠普实验室的 Strukov 和其同事在进行极 小型电路实验时制造出忆阻的实物<sup>[2-3]</sup>,其成果发表

收稿日期 2012-12-31 录用日期 2013-06-06

本文责任编委 张化光

Recommended by Associate Editor ZHANG Hua-Guang

<sup>1.</sup> 华中科技大学自动化学院 武汉 430074 2. 图像信息处理与智能 控制教育部重点实验室 武汉 430074

<sup>1.</sup> School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Image Processing and Intelligent Control, Wuhan 430074

在 2008 年 5 月的《自然》杂志上. 忆阻的发现足以 媲美 100 年前发明的三极管, 其任何一项产业化应 用都可能带来新一轮的产业革命. 中国科技部 2010 年 4 月 13 日在其官方网站上指出:"美国惠普实验 室科学家 2010 年 4 月 8 日在《自然》杂志上撰文表 示, 他们在忆阻设计上取得重大突破, 发现忆阻可进 行布尔逻辑运算, 用于数据处理和存储<sup>[4-5]</sup>".

目前, 忆阻的国内外研究主要集中在两个方面: 1) 按照惠普实验室研究的思路, 研究如何以最经济 实惠的材料制作出具有忆阻特性的器件; 2) 按照蔡 少棠教授的思路, 研究由忆阻构建的系统的动力学 行为及其应用.

# 1 忆阻的分类及其制造

普通电阻两端的电压和流经的电流呈现的是线 性关系,而忆阻两端在外界正弦电压的作用下,电压 和流经的电流的关系是非线性的,并且这种非线性 关系曲线表现为对频率响应的李萨如图形<sup>[2]</sup>.近些 年的研究发现很多纳米材料能够实现忆阻的非线性 特性,下面首先介绍忆阻和忆阻系统的概念,并阐述 忆阻的特性;而后将根据材料的不同来分类介绍几 种典型的忆阻系统<sup>[6]</sup>,分析其物理机制和导电机理, 并总结每种忆阻系统的特性和优缺点;最后介绍目 前较为常见的两种忆阻元件的制造技术.

### 1.1 忆阻和忆阻系统

1971年,蔡少棠教授给出忆阻的定义为一种表现电荷和磁通量关系的非线性无源两端电气元件<sup>[1]</sup>. 1976年,蔡少棠将忆阻的概念一般化,提出了新的概念— 忆阻系统 (Memristive systems). 忆阻系统 指的是,存在一类物理设备和系统,其特性类似忆 阻,但是并不能真实地由忆阻来建模,原因是因为忆 阻只是众多此类动态系统中的一个特例,因此将这 类设备和系统称之为忆阻系统<sup>[7]</sup>.并指出,忆阻系统 最大的特点是过零属性 (Zero-crossing),即任何时 候当系统输入为零,则系统输出也为零,即输入输出 的李萨如图形一定过坐标轴零点.更进一步指出,很 多设备和系统具有耗散 (Dissipative) 特征的都可以 建模为忆阻系统<sup>[7]</sup>.

### 1.2 忆阻系统的分类及其导电机理

### 1.2.1 薄膜忆阻系统

薄膜忆阻系统 (Thin-film memristive systems), 是一种两端结构模型<sup>[2]</sup>.物理结构为金属 电极/中间层 (阻变层)/金属电极,以自由离子作为 电荷载体,自由离子由于外界正反电压的作用在阻 变层形成导电通道,进而来回移动使忆阻本身出现 "开"或"关"的状态.其中阻变层材料有二元、多元 金属氧化物材料、有机材料、固态电解液材料等<sup>[8]</sup>.

# 1) 惠普二氧化钛忆阻

惠普的 TiO<sub>2</sub> 忆阻是一种薄膜忆阻模型<sup>[2]</sup>, 其两端使用金属铂 (Pt) 作为电极,中间使用 TiO<sub>2-x</sub>-TiO<sub>2</sub> 结构作为阻变层.其中,TiO<sub>2-x</sub> 为 掺杂区,TiO<sub>2</sub> 为非掺杂区,TiO<sub>2-x</sub> 比TiO<sub>2</sub> 少了几 个氧离子,进而产生了带 +2 价正电荷的氧空洞.该 结构忆阻的导电是由掺杂区氧空洞的移动造成的, 由于TiO<sub>2</sub> 具有半导体性质,并且对缺氧非常敏感, 故掺杂部分在外加正向电压的作用下,会有很高的 电导率,并且在正向电场的作用下,掺杂区右边界会 向非掺杂区移动,致使该结构掺杂区增加,电导率升 高,电阻值变小,呈现导通状态 (On);在外加反向电 压作用下,掺杂区由于反向电场的作用会逐渐缩小, 致使电导率下降,电阻变大,呈现断开状态 (Off).图 2 给出了惠普忆阻的物理结构模型,并给出该模型 在正反向电压作用下掺杂区的变化.





进一步研究表明, 电极及阻变层材料存在多样 化.例如使用半金属碲 (Te) 和金属铍 (Be) 作为两 端电极, TiO<sub>2</sub> 作为阻变层的忆阻结构<sup>[9]</sup>; 另一种使 用金属 Pt 和钽 (Ta) 作为两端电极, 氧化钽 (TaO<sub>x</sub>) 作为阻变材料的忆阻结构<sup>[10]</sup>.阻变材料的氧化物形 式还有其他的金属氧化物类型, 例如  $WO_x^{[11]}$ 、TiO<sub>x</sub> 等一元金属氧化物和 SrTiO<sub>x</sub><sup>[12-13]</sup> 等多元金属氧化 物. 非金属氧化物也可以作为阻变材料, 例如一种五 层结构的银-硫族化合物也可以实现忆阻功能<sup>[14]</sup>.

2) 高分子聚合物忆阻

另一种薄膜忆阻模型称为高分子聚合物忆阻 (Polymeric memristor),也称为有机忆阻 (Organic memristor),使用有机化合物薄膜作为阻变层材料, 其导电机制是由于材料中含有带电掺杂物或可移 动的带电分子在电压作用下移动造成<sup>[2,15]</sup>.例如利 用聚苯胺 (Polyaniline)的内部氧化还原反应造成 离子浓度变化来充当掺杂行为,通过化学反应致使 掺杂区扩散或收缩从而实现忆阻状态改变<sup>[16]</sup>;惠普 实验室和加州大学洛杉矶分校在 2004 年联合研究 出了一种以Pt 和 Ti 作为电极,LB 膜 (Langmuirblodgett film)作为薄膜层结构的忆阻<sup>[17]</sup>,并提出该 种机制可广泛应用在特定分子开关设计中.微电子 聚合物在忆阻信息存储方面的使用比使用晶体硅要 更加便宜<sup>[18]</sup>,聚合物存储器大小由于可以达到微米 和纳米级别,有可能作为传统存储技术的替代或补充<sup>[19]</sup>.

3) 谐振隧道二极管忆阻

谐振隧道二极管忆阻 (Resonant tunneling memristor), 是使用量子阱 (Quantum well) 二极管设备,基于双势垒结构的内部时变运动学行为<sup>[20-21]</sup>. 文献 [22] 中提出了一种基于铁电隧道结 (Ferroelectric tunnel junction) 的忆阻,该种设备对频率的响应 I-V 曲线具有磁滞特性.

综上所述,薄膜型忆阻结构,在物理上是一种 MIM (Metal-insulator-metal)结构.该种结构早在 1962 年由 Hickmott<sup>[23]</sup>提出并阐述了该结构的开 关机制.在金属/氧化物/金属忆阻结构中,带电氧 空洞在阻变层的运动规律很大程度上受到外界电压 (压控忆阻)或电流(流控忆阻)的影响.而当金属 与半导体接触时,在接触面会产生界面势垒(肖特 基势垒, Schottky barrier),目前有研究表明肖特基 势垒对氧空洞的浓度、忆阻开关过程有着重要的影 响<sup>[24-26]</sup>,并且有研究指出,开关机制产生的物理机 理是由于金属电极与氧化物界面附近发生的热和电 化学氧化还原反应的结果<sup>[25, 27]</sup>.

# 1.2.2 自旋忆阻系统

根据自旋力矩感应磁化开关 (Spin-torqueinduced magnetization switching) 和磁畴壁 (Magnetic domain wall) 的运动已经证明自旋忆阻器的 存在<sup>[28]</sup>. 文献 [29] 中给出自旋忆阻系统 (Spintronic memristive system),其动态行为由电子自旋扩散 (Electron-spin diffusion) 和弛豫过程 (Relaxation process) 产生,并提出了一种半导体/铁磁体结构的 自旋忆阻模型. 自旋忆阻行为主要受控于电子自身 特性,仅受电子自旋的自由度 (Electron-spin degree of freedom) 的影响,因而在纳米结构下比起离子迁 移运动更容易得到控制<sup>[30]</sup>.

# 1.2.3 其他类忆阻系统

1) 三端电阻存储器 (Memistor)

1960年, Widrow 等发明自适应神经网络<sup>[31]</sup> 时 提出了电阻存储器 (Memistor) 的概念, 表述为一种 类似晶体管的三端器件, 是组成自适应神经网络的 基础, 其中两端的电导率受第三端中电流对时间的 积分的控制<sup>[29]</sup>.使用两个两端忆阻组合来模拟一个 三端存储器件, 其动力学行为特性可通过对两个忆 阻进行开关切换实现<sup>[32]</sup>, 结构图如图 3 所示.



# 2) 相变忆阻系统

相变 (Phase transition), 指物质从一种相 (态) 转变到另一种相 (态)的过程, 通常发生在外部环境 (温度、磁场、压力等)连续变化过程中.利用二氧化 钒 (VO<sub>2</sub>)制作的薄膜被证明存在磁滞回归特性<sup>[33]</sup>, 在 VO<sub>2</sub> 两端施加的持续电压使得薄膜的局部发热, 促使 VO<sub>2</sub> 从绝缘相向金属相转变; 当外部电压变回 零时, 薄膜局部温度迅速回到其原始温度 (室温).在 相变过程中测量获得 I-V 曲线具有非线性迟滞环特 性,并且证明该种记忆特性可以维持几个小时.下面 将几种典型的忆阻系统归纳如表 1 所示.

蔡少棠教授在 2011 年指出,所有基于电阻开关 (Resistance switching) 机制的两端非易失性记忆设 备 (Non-volatile memory devices) 都是忆阻,而不 管其设备材料和内部物理运作机制如何<sup>[34]</sup>.它们共 同的特点是对频率的响应曲线在 I-V 平面上位于一 三象限的箍缩磁滞环 (Pinched hysteresis loop),并 且该曲线随着频率的增加逐渐收缩成一条直线,如 图 4 所示<sup>[7]</sup>.

	表 1 忆阻系统的分类、物理结构和导电机制
Table 1	Classification, physical structure and conductive mechanism of memristive system

忆阻系统种类	物理结构	导电机制
薄膜忆阻系统	MIM 结构	自由带电粒子作为电荷载体
自旋忆阻系统	自旋电子结构	电子自旋, 磁畴壁运动
三端存储器系统	两个两端忆阻连接	视两端忆阻而定
相变忆阻系统	MIM 结构	相变原理



图 4 I-V 曲线随频率变化 Fig. 4 Frequency-dependent I-V curve

#### 1.3 忆阻元件的制造技术

根据目前的研究情况, 忆阻元件的制造技术主要有两大类, 分别为纳米压印光刻技术 (Nanoimprint lithography, NIL)和原子层沉积技术 (Atomic layer deposition, ALD).

1) 纳米压印光刻技术

纳米压印光刻技术是一种纳米级图案制作方法, 其原理是通过传统的机械模具,将微观目标图形压 印到相应的衬底上<sup>[35]</sup>,然后通过高温或紫外光 (Uv light) 手段使图形固化的技术.惠普实验室在制作 TiO<sub>2</sub> 忆阻阵列 (Cross-bar array)的时候使用了一 种自对准、一步到位的纳米压印光刻方法<sup>[36]</sup>.

2) 原子层沉积技术

原子层沉积技术原理是通过化学反应,将物质 以单原子膜的形式一层层镀在基底表面的方法,这 种技术使得每次化学反应只沉积一层原子<sup>[37]</sup>.文献 [38-39] 中介绍了利用原子层沉积方法制造 TiO<sub>2</sub> 薄 膜的过程,利用不断重复的自限制性 (Self-limiting) 反应来获得所需要的薄膜. 该文献同时指出, TiO<sub>2</sub> 薄膜呈现导通和断开的状态是由于在外界电压作 用下,其内部导电细丝 (Conductive filament)的形 成和断裂造成. 忆阻元件的制造过程中还会用到的 其他方法有:反应离子刻蚀 (Reactive ion etching, RIE)<sup>[11]</sup>、金属喷镀 (Metallizing)<sup>[33]</sup>、Lift-off 工艺 等<sup>[11,40]</sup>.

# 2 忆阻的数学模型

忆阻是一个基本的无源二端元件,它的磁通量  $\varphi$ 与累积的电荷 q之间的关系可以用  $\varphi$ -q 或 q- $\varphi$  平 面上的曲线来定义<sup>[1-3,7]</sup>:

$$f(\varphi, q) = 0 \tag{1}$$

当式 (1) 由电荷的单值函数表示时,称其为电 荷控制型忆阻 (也称流控忆阻),可由式 (2) 和式 (3) 表示:

$$v(t) = M(q(t)) \cdot i(t) \tag{2}$$

$$M(q(t)) = \frac{\mathrm{d}\varphi(q)}{\mathrm{d}q} \tag{3}$$

相应的磁通控制型忆阻 (也称压控忆阻) 可由式 (4) 和式 (5) 表示:

$$i(t) = W(\varphi(t)) \cdot v(t) \tag{4}$$

$$W(\varphi) = \frac{\mathrm{d}q(\varphi)}{\mathrm{d}\varphi} \tag{5}$$

这里, 忆阻两端的电压 v, 流经忆阻的电流 i, 非线性 函数 M(q) 和  $W(\varphi)$  分别称为忆阻和忆导.

研究者对惠普的 TiO<sub>2</sub> 忆阻开展了卓有成效的 研究工作,建立了线性杂质漂移模型、窗函数模型、 分段函数模型、三次非线性模型、积分模型等数学 模型.

#### 2.1 忆阻的线性杂质漂移模型

图 5 所示为惠普实验室给出的纳米级忆阻的基本模型,图 5 中 D 为忆阻元件的长度, w(t) 表示元件的掺杂区域的宽度.元件总电阻 r(t) 等于掺杂部分电阻与未掺杂部分电阻的阻值之和.经研究可知,忆阻元件上流过的电流 i(t) 与 w(t) 变化率成线性关系<sup>[41]</sup>.忆阻的数学模型<sup>[2,41]</sup>为



图 5 忆阻元件的基本模型 Fig.5 Basic model of the memristor

$$R_{\rm mem}(t) = R_{\rm on}x(t) + R_{\rm off}(1 - x(t)) \qquad (6)$$

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = ki(t), \ k = \frac{\mu_v R_{\mathrm{on}}}{D^2} \tag{7}$$

其中,  $x(t) = \frac{w(t)}{D} \in (0,1),$ 

$$R_{\rm mem}(t) = R_{\rm off} + (R_{\rm on} - R_{\rm off}) \frac{\mu_v R_{\rm on}}{D^2} q(t) \qquad (8)$$

所以得到忆阻的电压与电流的关系为

$$v(t) = \left[ R_{\rm on} \frac{w(t)}{D} + R_{\rm off} \left( 1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right] i(t) = \left[ R_{\rm off} + (R_{\rm on} - R_{\rm off}) \frac{w(t)}{D} \right] i(t)$$
(9)

其中,  $R_{off}$  为元件全部未掺杂情况下, 即w(t) = 0时的电阻值;  $R_{on}$  为元件全部掺杂情况下, 即w(t) = D时的电阻值;  $\mu_v$  表示离子在均匀场中移动情况的常数. 由于掺入不同杂质后可形成正负两种离子, 故存

令 
$$x(t) = \frac{w(t)}{D}$$
,式 (9) 可以变为  
 $v(t) = [R_{on}x(t) + R_{off}(1 - x(t))]i(t)$  (10)

由式 (6)~(10), 整理后得到:

$$w(t) = \frac{\mu_v R_{\rm on}}{D} q(t)$$

这里的 q(t) 代表电流 i(t) 通过忆阻的电量, 将式 (9) 和式 (10) 结合得到:

$$v(t) = R(t)i(t) \tag{11}$$

其中,  $\tilde{R}(t) = R_{\text{off}} + (R_{\text{on}} - R_{\text{off}}) \frac{\mu_v R_{\text{on}}}{D^2} q(t)$ , 将式 (11) 进行微分后得到微分方程:

$$\dot{v}(t) = \dot{\tilde{R}}(t)i(t) + \tilde{R}(t)\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}$$
(12)

将  $\tilde{R}(t) = \frac{v(t)}{i(t)}$  代入式 (12), 得到:

$$\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} - \frac{\dot{v}(t)}{v(t)}i(t) + \frac{\tilde{R}(t)}{v(t)}[i(t)]^2 = 0$$

这样就得到了忆阻的伯努利方程,类似地,也可 以得到忆容、忆感的伯努利方程<sup>[42-45]</sup>,如表 2 所示. 这些研究为忆阻将来更好地应用到电路中打下了坚 实的基础.

惠普实验室给出的纳米级忆阻的基本模型被称为线性杂质漂移模型.线性杂质漂移的含义是忆阻杂质与非杂质分界面的漂移速度在 [0, D] 的范围内保持恒定.

#### 2.2 忆阻的非线性模型

#### 2.2.1 忆阻的窗函数模型

由于杂质与非杂质分界面在整个忆阻大部分区 域内的漂移速度是恒定的,仅在小部分区域,即金属 氧化物与金属氧化物电极的接触面附近漂移速度受 到限制,采用对分界面漂移速度加窗函数<sup>[46-52]</sup>的 方式能有效地解决这一问题,实现忆阻的非线性建 模.为了对真实情况进行模拟,在式(7)右侧乘一个 窗函数,得到:

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = ki(t)f(x) \tag{13}$$

其中, 窗函数 f(x) 主要有两种: 一种是 Joglekar 窗 函数<sup>[46-51]</sup>

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \tag{14}$$

另一种是 Biolek 窗函数<sup>[49-52]</sup>

$$f(x) = 1 - (x - \operatorname{sgn}(-i))^{2p}$$
(15)

其中, p 是一个正整数, 是函数的控制参数, sgn(·) 则为数学中常用的符号函数,  $x \in (0, 1)$ .

Joglekar 窗函数对应的忆阻是理想忆阻,它只能在  $p \ge 4$ ,  $f(0 < x < 1) \approx 1$  且未达边界的范围内使用.同时考虑到边界点上 (x = 0 或 x = 1)的非线性离子漂移情况,有 f(0) = f(1) = 0.这个函数的缺点是存在边界效应,即当到达边界点 (x = 0 或 x = 1)后就永远保持那个状态,再施加反向电流也无法改变忆阻的阻值.Biolek 窗函数可以较好地避免边界效应,该窗函数除了变量 x 和 p 外,还考虑了流经忆阻的电流 i,该函数到达边界点 (x = 0 或 x = 1)后并不会锁定在那个状态,施加反向电流可以改变其阻值,使其继续工作.

窗函数的选择、曲线拟合的精度以及与实际数据的相对误差都是评价非线性杂质漂移忆阻建模优劣的因素.非线性杂质漂移模型的建立不影响理想线性漂移模型在建模方面的作用,理想模型仍然适用,虽然精确程度有缺陷,但是由于杂质与非杂质分界面的移动,在金属氧化物的绝大部分区域都是线性

表 2 各类忆阻、忆容、忆感的伯努利方程

	Table 2 Be	ernoulli	function	of	memristor,	memcapacitor	and	meminductor
--	------------	----------	----------	----	------------	--------------	-----	-------------

忆阻元素	构成关系	微分方程
流控忆阻	$V_{ m mres}(t) =  ilde{R}(t) \cdot I_{ m mres}(t)$	$\dot{I}_{\mathrm{mres}}(t) - [rac{\dot{V}_{\mathrm{mres}}(t)}{V_{\mathrm{mres}}(t)}][I_{\mathrm{mres}}(t)] + [rac{\dot{\check{R}}(t)}{V_{\mathrm{mres}}(t)}][I_{\mathrm{mres}}(t)]^2 = 0$
压控忆阻	$I_{ m mres}(t) =  ilde{G}(t) \cdot V_{ m mres}(t)$	$\dot{V}_{ m mres}(t) - [rac{\dot{I}_{ m mres}(t)}{I_{ m mres}(t)}][V_{ m mres}(t)] + [rac{\dot{G}(t)}{I_{ m mres}(t)}][V_{ m mres}(t)]^2 = 0$
压控忆容	$Q_{ m mcap}(t) =  ilde{C}(t) \cdot V_{ m mcap}(t)$	$\dot{V}_{\text{mcap}}(t) - [\frac{\dot{Q}_{\text{mcap}}(t)}{Q_{\text{mcap}}(t)}][V_{\text{mcap}}(t)] + [\frac{\dot{\dot{C}}(t)}{Q_{\text{mcap}}(t)}][V_{\text{mcap}}(t)]^2 = 0$
荷控忆容	$V_{ m mcap}(t) = \tilde{C}^{-1}(t) \cdot Q_{ m mcap}(t)$	$\dot{Q}_{ m mcap}(t) - [rac{\dot{V}_{ m mcap}(t)}{V_{ m mcap}(t)}][Q_{ m mcap}(t)] + [rac{\dot{C}^{-1}(t)}{V_{ m mcap}(t)}][Q_{ m mcap}(t)]^2 = 0$
流控忆感	$\varphi_{\min d}(t) = \tilde{L}(t) \cdot I_{\min d}(t)$	$\dot{I}_{\mathrm{mind}}(t) - [rac{arphi_{\mathrm{mind}}(t)}{arphi_{\mathrm{mind}}(t)}][I_{\mathrm{mind}}(t)] + [rac{\dot{L}(t)}{arphi_{\mathrm{mind}}(t)}][I_{\mathrm{mind}}(t)]^2 = 0$
磁控忆感	$I_{\rm mind}(t) = \tilde{L}^{-1}(t) \cdot \varphi_{\rm mind}(t)$	$\dot{\varphi}_{\mathrm{mind}}(t) - [\frac{\dot{t}_{\mathrm{mind}}(t)}{I_{\mathrm{mind}}(t)}][\varphi_{\mathrm{mind}}(t)] + [\frac{\dot{t}^{-1}(t)}{I_{\mathrm{mind}}(t)}][\varphi_{\mathrm{mind}}(t)]^2 = 0$

的,所以仍可以利用理想模型对大多数忆阻电路进行研究.

# 2.2.2 忆阻的分段函数模型

Itoh 等<sup>[52]</sup> 采用一个特性曲线为分段线性且单 调上升的忆阻替换蔡氏振荡器中的蔡氏二极管,导 出了两类基于忆阻元件的类正弦振荡或混沌振荡电 路. Muthuswamy 等<sup>[53]</sup> 采用一个不连续分段线性 的忆导函数的含源忆阻电路替换蔡氏振荡器或类蔡 氏混沌电路中的蔡氏二极管,导出了一些新的基于 忆阻的混沌电路.这些忆阻混沌电路在一定的电路 参数条件下可生成不同形状的混沌吸引子.在文献 [53-60] 中,所采用的忆阻特性曲线均是非光滑的 分段函数,导致它的忆阻或忆导均是不连续的非线 性函数.其中被大家广泛认可的分段函数模型如式 (16) 和式 (17) 所示.

$$q(\varphi) = b\varphi + 0.5(a-b)(|\varphi+1| - |\varphi-1|) \quad (16)$$

$$W(\varphi) = \frac{\mathrm{d}q(\varphi)}{\mathrm{d}\varphi} = \begin{cases} a, & |\varphi| < 1\\ b, & |\varphi| > 1 \end{cases}$$
(17)

其中,  $a \ \pi b$  是常数, 非线性函数  $W(\varphi)$  为忆导.

# 2.2.3 忆阻的三次非线性模型

Muthuswamy 在文献 [61] 中提出了一个具有 三次非线性特性曲线的磁控忆阻,并采用已有元器 件构建了它的等效电路.其中被大家广泛认同并应 用于混沌研究的是如式 (18) 和式 (19) 所示的三次 非线性函数<sup>[61-67]</sup>.

$$q(\varphi) = \alpha \varphi + \beta \varphi^3 \tag{18}$$

$$W(\varphi) = \frac{\mathrm{d}q(\varphi)}{\mathrm{d}\varphi} = \alpha + 3\beta\varphi^2 \tag{19}$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  是常数, 非线性函数  $W(\varphi)$  为忆导.

三次非线性模型是最能简单表达电荷和磁通之间非线性关系的光滑数学模型.此外,有学者研究了更加简单的二次非线性特性曲线的光滑忆阻模型<sup>[68-69]</sup>.

### 2.2.4 忆阻的积分模型

由惠普实验室提出的忆阻元件模型能在无边界 条件下完全描述单个忆阻元件的电路特性,但在有 边界条件下,当元件的状态变量处于边界 w(t)时, 电流对状态变量不再具有控制作用,微分模型中的 状态变量微分关系不存在,这说明微分数学模型不 能完全描述这一元件.针对这一问题进行研究,提出 了如下的忆阻元件的积分模型<sup>[70-71]</sup>.

1) 无边界条件的忆阻元件积分模型 由惠普实验室的微分模型(7),得:

$$i(t) = \frac{D}{\mu_v R_{\rm on}} \cdot \frac{\mathrm{d}w(t)}{\mathrm{d}t} \tag{20}$$

将式 (20) 代入式 (9), 得:

$$v(t) = \left[ R_{\rm on} \frac{w(t)}{D} + R_{\rm off} \left( 1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right] \frac{D}{\mu_v R_{\rm on}} \cdot \frac{\mathrm{d}w(t)}{\mathrm{d}t}$$
(21)

在不考虑边界条件的情况下对式 (21) 两边进行积分 得:

$$\int_{0}^{t} v(t) dt = \left(\frac{1}{2\mu_{v}} - \frac{R_{\text{off}}}{2\mu_{v}R_{\text{on}}}\right) w^{2}(t) + \frac{DR_{\text{off}}}{\mu_{v}R_{\text{on}}} w(t) + \left[\frac{R_{\text{off}}}{2\mu_{v}R_{\text{on}}} w^{2}(0) - \frac{1}{2\mu_{v}} w^{2}(0) - \frac{DR_{\text{off}}}{\mu_{v}R_{\text{on}}} w(0)\right]$$
(22)

式 (22) 是一个关于 w(t) 的二阶代数方程, 求解可 得:

$$w(t) = -\sqrt{\frac{\int_{0}^{t} v(t) dt}{A} + \frac{B^{2}}{4A^{2}} - \frac{C}{A} - \frac{B}{2A}}$$

其中

$$A = \frac{1}{2\mu_v} - \frac{R_{\text{off}}}{2\mu_v R_{\text{on}}}$$
$$B = \frac{DR_{\text{off}}}{\mu_v R_{\text{on}}}$$
$$C = \frac{R_{\text{off}}}{2\mu_v R_{\text{on}}} w^2(0) - \frac{1}{2\mu_v} w^2(0) - \frac{DR_{\text{off}}}{\mu_v R_{\text{on}}} w(0)$$

从而得到电流与电压之间的关系为

$$i(t) = -\frac{D}{2\mu_v R_{\rm on}A} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{\int_0^t v(t)dt}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C}{A}}} w(t),$$

$$w(t) \in (0, D) \quad (23)$$

电荷与电流之间的关系为

$$q(t) = \int_{-\infty}^{t} i(t) dt = \int_{0}^{t} i(t) dt = \frac{D}{\mu_{v} R_{\text{on}}} [w(t) - w(0)] \quad (24)$$

最后得到  $\varphi$ -q 的关系方程为

$$\varphi(t) = \int_{0}^{t} v(t) dt = \left(\frac{\mu_{v} R_{\text{on}}^{2}}{2D^{2}} - \frac{\mu_{v} R_{\text{on}} R_{\text{off}}}{2D^{2}}\right) \times \left[q^{2}(t) - q^{2}(0)\right] + \left(R_{\text{off}} + \frac{R_{\text{on}} - R_{\text{off}}}{D}w(0)\right) \times \left[q(t) - q(0)\right]$$
(25)

令:

$$\alpha = \frac{\mu_v R_{\rm on} (R_{\rm on} - R_{\rm off})}{2D^2}$$
$$\beta = R_{\rm off} + \frac{R_{\rm on} - R_{\rm off}}{D} w(0)$$
$$\gamma = -\alpha q^2(0) - \beta q(0)$$

将式(25)整理可以得到:

$$\varphi(t) = \alpha q^2(t) + \beta q(t) + \gamma \tag{26}$$

由式 (26) 可以看出, 磁通量与电荷之间的关系是过 原点的二次函数, 符合忆阻元件定义的非线性关系. 因此可以使用积分模型描述忆阻元件在无边界条件 时的特性.

2) 有边界条件的忆阻元件积分模型

当 w(t) = 0 或者 w(t) = D 时, 忆阻元件可 以等效为一个无记忆的线性电阻元件, 阻值分别为

$$i(t) = \begin{cases} -\frac{D}{2\mu_v R_{\rm on}A} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{\int_0^t v(t)dt}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C}{A}}} v(t), \\ w(t) \in (0, D) \\ \frac{v(t)}{R_{\rm off}}, & w = 0 \\ \frac{v(t)}{R_{\rm on}}, & w = D \end{cases}$$
(27)

对式 (27) 的仿真说明该模型更接近于真实的元件, 能更好地描述元件的特性.

关于上述五类模型,总结见表 3.

# 3 忆阻的仿真

忆阻作为一种纳米级元件,其制造成本高昂,到 目前为止难于获取一个能够完全表征其物理特性的 标准元件,通过实验手段获取精确的电气特性数据 也较为困难,因此对忆阻的研究较大程度依赖于对 忆阻元件的建模与仿真.现有的忆阻仿真软件主要 有 SPICE、Matlab 和 Micro-Cap 三类.为了保证 各仿真软件获得的忆阻仿真过程和结果具有可比性, 以下仿真中均使用相同的配置参数,即采用幅值为 1.2V, 频率为1Hz的正弦电压源作为激励源,忆阻 元件的参数设置如下:  $R_{on} = 100\Omega$ ,  $R_{off} = 16 k\Omega$ ,  $R_{int} = 11 k\Omega$ , p = 10.

# 表 3 忆阻的五类数学模型的特点分析

Table 3 The characteristic analysis for five kinds of mathematical models to memristor

模型分类	数学表达式	优点	缺点
线性杂质漂移 模型	$\begin{aligned} R_{\rm mem}(x) &= R_{\rm on}x + R_{\rm off}(1-x) \\ \frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} &= \frac{\mu_v R_{\rm on}}{D^2} i(t) \end{aligned}$	简化将其纳入基本电路中的分析、仿 真过程,能直接对忆阻值进行估计.	不能客观反映忆阻的全部 真实特性,是近似模型.
窗函数模型	$R_{\text{mem}}(x) = R_{\text{on}}x + R_{\text{off}}(1-x)$ $\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mu_v R_{\text{on}}}{D^2}i(t)f(x)$	有效地描述了忆阻的非线性,能直接 对忆阻值进行估计.	模型与客观的实际情况还 有一定的差距.
分段函数模型	$\begin{split} q(\varphi) &= b\varphi + 0.5(a-b)( \varphi+1  -  \varphi-1 ) \\ W(\varphi) &= \frac{\mathrm{d}q(\varphi)}{\mathrm{d}\varphi} = \begin{cases} a, &  \varphi  < 1 \\ b, &  \varphi  > 1 \end{cases} \end{split}$	能够体现忆阻内部变量间的非线性 关系.	描述的电路特性与惠普忆 阻有差别,在物理上的实现 比较困难.
三 次 非 线 性 模型	$\begin{split} q(\varphi) &= \alpha \varphi + \beta \varphi^3 \\ W(\varphi) &= \frac{\mathrm{d}q(\varphi)}{\mathrm{d}\varphi} = \alpha + 3\beta \varphi^2 \end{split}$	能简单表达电荷和磁通之间非线性 关系的光滑数学模型.	无法对所描述的忆阻值进 行估计.
积分模型	$\begin{aligned} q(t) &= \frac{D}{\mu_v R_{\text{on}}} [w(t) - w(0)] \\ \varphi(t) &= \alpha q^2(t) + \beta q(t) + \gamma \end{aligned}$	更接近于真实的元件,能更好地描述 元件的特性.	相当复杂,无法对所描述的 忆阻值进行估计,在物理实 现上也有难度.

根据第 2.1 节的线性杂质漂移模型和第 2.2.1 节的窗函数模型 (Biolek 窗函数),可建立忆阻的 SPICE 宏模型,如图 6 所示.



图 6 惠普忆阻 SPICE 宏模型示意图 Fig. 6 HP memristor micro-model in SPICE

根据上述忆阻宏模型,在 SPICE 元件库中建立 忆阻元件,对其施加正弦电压进行仿真,仿真结果如 图 7 所示.



Fig. 7 Memristor model simulation with SPICE

#### 3.2 基于 Matlab 的忆阻仿真

1) 忆阻 Simulink 模型

为了观察忆阻的典型特性,通过 Simulink 建立 了第 2.2.1 节所述的忆阻的窗函数模型 (Joglekar 窗 函数)<sup>[72]</sup>,如图 8 所示. 该模型主要包括:参数控制 模块、输入模块、输出模块、内部运算模块 (包括乘 法器、加法器和增益控制)等.其中开关用来控制忆 阻内部状态变量  $x \in (0,1)$ 范围内变化.

对图 8 所示的忆阻 Simulink 模型进行仿真,其 仿真结果 V-I 曲线类似于图 7.

2) 忆阻 Simscape 模型

图 9 所示为根据第 2.2.1 节所述的忆阻的窗函 数模型 (Joglekar 窗函数)<sup>[73]</sup>, 在该 Simscape 系统 中, 包含一个含有三个终端的可变电阻, 即输入、输 出电阻端和输入控制端, 从而通过不同信号来控制 阻抗变化.

在图 9 所示的忆阻物理模型中,上半部分通过 Simulink 模块组成了忆阻的数学模型,下半部分则 通过有源器件建立了忆阻的数学模型和物理模型之 间的联系,对此模型仿真,其仿真结果 V-I 曲线类似 于图 7.









#### 3.3 基于 Micro-Cap 的忆阻仿真

Micro-Cap 是一款集成模拟/数字电路的设计 编辑、草图绘制和环境模拟的仿真软件,图 10 所示 为 Micro-Cap 忆阻仿真电路,对其进行仿真,其仿 真结果 V-I 曲线依然类似于图 7.



图 10 Micro-Cap 忆阻仿真电路

Fig. 10 The simulation circuit established with Micro-Cap

### 3.4 仿真软件的比较及其发展趋势

以上三类仿真软件的忆阻电流-电压仿真曲线 均为典型的磁滞回线,表明忆阻是一种非线性元件. 同时,还体现了忆阻的开关特性,即忆阻值可以在 高阻和低阻之间转换. 由此可见, 三类仿真软件均 可直观地对忆阻的数值和电气特性进行分析,其共 同点可总结如下: 1) 三种软件都有针对各物理量和 数字信号系统进行建模、分析和仿真的可视化图形 环境; 2) 在仿真结果的指导下, 可以了解各元件参 数对电路的影响,从而对比、改进电路,以确定电路 参数的最佳设计值. 以上仿真软件不仅可以对忆阻 元件特性进行仿真,还能对含有忆阻元件的系统级 电路进行仿真研究,对于图像处理方面的研究,由 于 Matlab 具有专用的图像处理工具箱,因此主要 采用 Matlab 软件开展研究工作: 对于神经网络及 存储方面的研究,由于忆阻具有不同于传统电子器 件的特性,从而导致电路组成结构和工作原理的巨 大变革,特别是在忆阻存储方面更多的关注电路中 读写操作的时序问题,此时 SPICE 较 Matlab 更具 优越性<sup>[74-78]</sup>.随着忆阻研究领域的不断拓宽,更多 的仿真软件被用于忆阻特性研究中. Batas 等建立 了全新的忆阻宏模型<sup>[79]</sup>,并利用 ELDO 仿真软件对 其特性进行仿真, Idongesit 等采用行为级仿真软件 Verilog-A 对阵列式的忆阻存储器读写操作进行了 仿真<sup>[80]</sup>.可以预见的是,将会有越来越多的仿真软 件被应用于忆阻研究领域, 仿真分析的侧重点也将 逐渐从系统级仿真向注重过程的行为级仿真过渡.

# 4 忆阻的应用

从现有文献来看,忆阻的应用主要体现在下列 六个方面,分别为:人工神经网络、保密通信、新型 存储器、模拟电路、人工智能计算机、生物行为模拟 等.

# 4.1 在人工神经网络上的应用

人工神经网络自 1943 年由心理学家 Mcculloch 和数理逻辑学家 Pitts 提出,国内外学者对人工神经 网络展开了广泛的研究.到目前为止,人工神经网络 的实现有四种方式:软件实现、虚拟实现、硬件实 现以及光器件实现<sup>[81]</sup>.其中晶体管是一种实现人工 神经网络的电子器件,Williams 和他的同事已经证 明了忆阻能比晶体管占用更小的区域,但是它的存 储容量更大并且速度更快<sup>[82-85]</sup>.标准的人工神经网 络通过乘法器实现神经网络的权值,但是乘法器不 但体积大,而且当修改神经网络时就需要更换乘法 器;新型忆阻人工神经网络使用忆阻作为突触权因 子以实现神经网络的权值,当需要修改神经网络时, 只需使用外加电压源改变忆阻的阻值即可.由于忆 阻是一种具有差分电阻特性的元件,将其融入到人 工神经网络电路中,就不再需要引入反馈机制,可以 大大简化电路结构<sup>[86]</sup>.美国密西根大学研究人员指 出,忆阻的功能特性是所有的电子组件中与突触最 相近的.图 11 展示了由美国密歇根大学研制的一种 Ag+Si 纳米忆阻作为突触的示例.



图 11 纳米忆阻作为突触的应用 Fig. 11 Application of the nanoscale memristor as the synapse

基于忆阻的人工神经网络,可以以与大脑相同 的峰电位时间相关的突触可塑性 (Spike timing dependent plasticity, STDP) 模式来响应同步电压脉 冲,提供了目前最好的构筑人工神经网络的基础条 件[82].为了更好地将基于忆阻的人工神经网络模 型应用于实践, 2010年, Hu 等<sup>[87]</sup>建立了一种新的 模型,即基于忆阻的递归神经网络,该模型中的参 数依赖于状态,通过运用微分包含等相关理论得到 了基于忆阻递归神经网络的平衡点全局一致渐近 稳定的充分条件. 在文献 [88] 的基础上, 通过运用 Filippov<sup>[89]</sup>关于右端不连续微分方程理论、关于 集值映射<sup>[90]</sup> 和微分包含<sup>[88]</sup> 的理论,得到了更加丰 富的关于忆阻递归神经网络的动力学现象. 在文献 [91-95] 中,得到了变时滞忆阻递归神经网络平衡 点的全局指数稳定性,在文献 [96] 中,得到了变时 滞的周期忆阻递归神经网络多平衡点的存在性及多 稳定性. 在文献 [97-98] 中,给出了忆阻递归神经 网络系统与其响应系统间同步指数稳定性的控制方 法. 2011年,东北大学的柴天佑院士等采用自适应 神经模糊推理系统 (Adaptive-network-based fuzzy inference system, ANFIS) 和一一映射相结合的方 法估计未建模动态. 在此基础上, 提出了由线性自适 应控制器、非线性自适应控制器以及切换机制组成 的自适应切换控制方法,将这种方法和忆阻结合起 来,控制器振荡平缓,消耗的能量也比较小,消除了 对执行机构的损害<sup>[99]</sup>.基于忆阻的人工神经网络还 可以模仿人脑,进行学习、预测<sup>[96]</sup>、适应环境、突发 行为<sup>[97-98]</sup> 以及车辆识别<sup>[100]</sup> 等.由于忆阻的以上 优势,使得忆阻在人工神经网络的应用上有着光明 的前景.随着对忆阻理解的逐步深入,将会极大地改 写人工神经网络中电路的设计方式和方法,使人工 神经网络的发展有新的突破<sup>[101-104]</sup>.

# 4.2 在保密通信中的应用

文献 [105] 给出了基于忆阻混沌的语音加密系 统设计方案,实现了局域网内点对点的双向语音保 密通信. 由于忆阻对系统的内部状态具有独特的记 忆性[64,106-107],运用忆阻构建的混沌电路有着与一 般混沌系统所不同的动力学特性,除了电路参数变 化外,还极端依赖于初始条件,系统的混沌行为更为 复杂,在不同的初始条件下系统轨线会从混沌行为 向周期行为或稳定的汇发生状态转移:反之亦然.含 忆阻的电路有着复杂的混沌路径使得在保密通信中 有其独特的优势. 忆阻替换蔡氏二极管的电路系统 在混沌保密通信中有以下优势:高维的混沌系统由 于其吸引子具有难以识别的拓扑结构,比低维的混 沌系统更加难以破译<sup>[105-108]</sup>. Itoh 和蔡少棠采用一 个特性曲线为单调上升且分段线性的非线性忆阻替 换蔡氏振荡器中的蔡氏二极管,导出了一系列基于 忆阻的振荡电路[52]. 条件忆阻器的独特记忆性使得 新构建的电路对初始值更加敏感,有着更加复杂的 混沌路径,从而可以利用忆阻器混沌产生伪随机序 列,且该伪随机序列随机性良好<sup>[109-110]</sup>,比以前的 混沌路径更难预测.

### 4.3 在存储器中的应用

文献 [80] 指出, 自从蔡少棠提出的忆阻被惠普 实验室证实后, 忆阻的应用研究涵盖了从存储和 逻辑重构到神经学习和保密通信的各个领域,而非 易失性存储器是忆阻最有希望的应用之一. 忆阻本 身具有非易失的记忆能力,目前研制的所有种类忆 阻器件,研制人员都首先尝试应用于非易失性随机 访问存储器 (Non-volatile random access memory, NVRAM), 据惠普公司报道, 近期就会有商业化量 产出现<sup>[2,111]</sup>. 在忆阻存储器方面, 忆阻最直接的应 用是制造可变电阻式内存 (Resistive random-access memory, RRAM) 的存储介质. 在结构设计方面研 究最广泛的方法是将忆阻与传统的 CMOS、FPGA 构建混合电路<sup>[112-116]</sup>.器件制备方面, NIST 的学 者通过溶液处理的方法得到 Al/TiO<sub>2</sub>/Al 柔性忆阻 开关电阻比超过  $10^5$ , 非易失时间超过  $1.2 \times 10^6$  秒 (约14天), 阈值电压小于10伏<sup>[117]</sup>. 密歇根大学Jo 等制备的 Ag/a-Si/p-Si 忆阻写入时间低于 10 纳秒, 持久性超过105个周期,非易失时间在7年左右,缩 放能力小于 30 纳米[118]. 2009 年,清华大学的研究 人员在 Ag/ZnO: Mn/Pt 材质结构上发现阻变双稳 态现象,高阻态和低阻态的阻值比率达到107,对于 存储稳定性有很大提高[119]. 2010年,惠普公司已 经宣布和韩国 HYNIX 公司合作, 有望于 2013 年推 出和目前 Flash 同等价格的高容量商用化的忆阻存 储器产品. 2011 年美国 UMich 的学者提出了一种 忆阻交叉阵列存储器的自控制写和擦除电路,给出 了读、写、擦除操作的流程,提出在忆阻电路上串联 一个二极管,利用二极管的正向导通性,减小漏电 流<sup>[80]</sup>. 文献 [120] 提出在忆阻交叉阵列中每一个交 叉点上串联一个三极管和一个忆阻,称为1T1M结 构, 以减小反向电流, 文献 [121] 对文献 [120] 中提 出的 1T1M 交叉阵列结构应用 SPICE 进行了仿真, 以证明 1T1M 交叉阵列结构的有效性. 2011 年美 国惠普实验室的 Qureshi 等提出在忆阻交叉阵列的 读电路中应用电压分压器或 sigma delta 电路, 在写 电路中应用逆变器开关来减小漏电流[122].在忆阻 交叉阵列性质的仿真上, 文献 [123] 基于图形处理单 元 (Graphic processing unit, GPU) 平台, 对忆阻 交叉阵列性质进行了仿真,该平台能使仿真的速度 比在普通 CPU 机器上快 50 倍. 2012 年沙特阿拉 伯 KAUST 的 Zidan 等分析了忆阻存储器的漏电流 问题,提供了一个噪声容限指标,应用一个三端点忆 阻设备作为门控来解决漏电流问题<sup>[124]</sup>.在忆阻存储 器应用方面, 西南大学的胡小方等提出了一种用于 图像存储的忆阻交叉阵列,可以实现黑白、灰度和彩 色图像的存储和输出<sup>[72]</sup>,之后,该团队又提出了一 种基于忆阻的 RRAM — 可与现代计算机系统相兼 容的纳米级二值存储器实现方案[76]. 2011 年美国 Texas A & M 大学的学者设计了一种忆阻存储器的 读写电路和外围电路,详细研究了该电路在读写过 程中的动力学特性,分析了读写"0"和"1"时所需 的脉冲长度和宽度,给出了忆阻存储阵列电路<sup>[125]</sup>. 忆阻进行逻辑运算[126-127],可将数据处理和存储电 路两者合一, 而现在的数字系统逻辑运算或数据处 理与存储模块是分离的.

# 4.4 在模拟电路中的应用

基于忆阻的 FPGA (Memristor-based field programmable gate array, mrFPGA) 相比于传统 的 FPGA, 有着较大的优势. 不仅制造过程和当前 CMOS 工艺兼容, 而且 mrFPGA 中可编程的互联 线由于忆阻的加入, 使得 FPGA 整体面积明显减小, 同时提供了电容屏蔽, 也减小了互联延迟, 实验表明 mrFPGA 面积节省了 5.5 倍, 速度提高了 2.3 倍, 功 耗降低了 1.57 倍<sup>[128]</sup>. 基于忆阻的超宽带接收器可 以用于多载波信号的解调和解扩<sup>[129]</sup>. 忆阻可被应用 于各种信号处理, 比如信号整流和信号延时, 也可以 用于产生很多种实用的波形信号, 蔡少棠教授最早 于 1971 年就给出了一个用忆阻制成的四阶阶梯波 形发生器<sup>[1]</sup>.利用忆阻建立了一些基于忆阻的可编 程模拟电路.其主要思想是设计一个电路,该电路中 将低电压加在模拟电路中工作的忆阻上,即改变忆 阻阻值的大小;用高电压脉冲对忆阻的状态进行编 程,即设置忆阻的开关状态,从而用在可编程阈值比 较器、增益可编程放大器、可编程开关控制施密特 触发器、频率可编程的张弛振荡器<sup>[130]</sup>等中.

### 4.5 在人工智能计算机上的应用

随着计算机的飞速发展, 激起了人们对"机器能 否像人一样思维"的进一步研究, 人工智能与计算 机的融合成为人们关注的话题, 而人工智能计算机 则成为目前计算机发展的一种趋势, 它可以模拟大 脑思维, 是第五代计算机. 人工智能计算机突破了传 统的冯·诺依曼式机器的模式, 舍弃了二进制结构, 把许多处理机并联起来, 并行处理信息, 速度大大提 高. 它的智能化人机接口使人们不必编写程序, 只需 要发出命令或提出要求, 计算机就会完成推理和判 断, 并且给出解释. 未来的计算机发展将向着超高 速、超小型、并行处理和智能化方向发展, 将出现量 子计算机、光子计算机、分子计算机和纳米计算机, 这些类型的计算机将具有感知、思考、判断、学习 及一定的自然语言能力, 使计算机进入人工智能时 代<sup>[131]</sup>.

#### 4.6 生物行为仿真

对生物记忆行为的电路仿真,是忆阻另一个极 具吸引力的应用. Pershin 等利用忆阻参与组成的 电路仿真了多头绒泡菌对环境刺激的学习行为,应 用该电路对外加激励的电学响应模仿了生物对外界 环境刺激的响应行为. 忆阻的记忆特性被 Pershin 等证实是单细胞生物 (比如阿米虫) 的自适应行为的 一种可能模拟机制<sup>[132]</sup>. 因为具有与神经系统中神 经键行为类似,忆阻可以用于对大脑部分功能的模 仿<sup>[133]</sup>. 可以相信,忆阻在对生物记忆、学习行为的 电路仿真中将发挥更加重要的作用.

# 5 总结与展望

自从 2008 年惠普实验室制作出第一款忆阻元 件开始,世界各国学者越来越多地关注并开始从各 个方面来研究忆阻,忆阻的出现有望延续摩尔定律. 忆阻具有记忆特性、纳米级尺寸、快速开关以及耗 电量低等特点,这些特点为研制其各种应用,提供了 极大的可能性.今后,随着材料、电子、系统、自动 化等学科的发展,忆阻的研究将会成为越来越热门 的研究方向,主要集中在以下三个方面:1)忆阻系 统的动力学行为及应用;2)成本低廉的忆阻制造方

#### 法和新型制造工艺; 3) 忆阻及忆阻产品的产业化.

#### References

- Chua L O. Memristor the missing circuit element. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507-519
- 2 Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, Williams R S. The missing memristor found. *Nature*, 2008, 453(7191): 80-83
- 3 Tour J M, He T. Electronics: the fourth element. Nature, 2008, 453(7191): 42-43
- 4 Borghetti J, Snider G S, Kuekes P J, Yang J J, Stewart D R, Williams R S. "Memristive" switches enable "stateful" logic operations via material implication. *Nature*, 2010, 464(7290): 873-876
- 5 Mathur N D. The fourth circuit element. Nature, 2008, 455(7217): E13
- 6 Memristor.org. Types of memristors [Online], available: http://www.memristor.org/reference/295/types-of-memristors, December 1, 2012
- 7 Chua L O, Kang S M. Memristive devices and systems. Proceedings of the IEEE, 1976, **64**(2): 209–223
- 8 Qu Xiang, Xu Wen-Ting, Xiao Qing-Hua, Liu Bin, Yan Zhi-Rui, Zhou Qi-Gang. Research progress on resistive random access memory materials. *Materials Review*, 2012, **26**(6): 31 -35

(曲翔,徐文婷,肖清华,刘斌,闫志瑞,周旗钢. 忆阻器材料的研究 进展. 材料导报,2012,26(6):31-35)

- 9 Yang J J, Miao F, Pickett M D, Ohlberg D A A, Stewart D R, Lau C N, Williams R S. The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches. *Nanotechnology*, 2009, 20(21): 215201
- 10 Yang J J, Zhang M X, Strachan J P, Miao F, Pickett M D, Kelley R D, Medeiros-Ribeiro G, Williams R S. High switching endurance in  $TaO_x$  memristive devices. Applied Physics Letters, 2010, **97**(23): 232102
- 11 Chang T, Jo S H, Kim K H, Sheridan P, Gaba S, Lu W. Synaptic behaviors and modeling of a metal oxide memristive device. Applied Physics A, 2011, 102(4): 857–863
- 12 Choi D, Lee D, Sim H, Chang M, Hwang H. Reversible resistive switching of  $SrTiO_x$  thin films for nonvolatile memory applications. Applied Physics Letters, 2006, **88**(8): 082904
- 13 Yan X B, Xia Y D, Xu H N, Gao X, Li H T, Li R, Yin J, Liu Z G. Effects of the electroforming polarity on bipolar resistive switching characteristics of  $SrTiO_{3-\delta}$  films. Applied Physics Letters, 2010, **97**(11): 112101-1–112101-3
- 14 Oblea A S, Timilsina A, Moore D, Campbell K A. Silver chalcogenide based memristor devices. In: Proceedings of the 2010 International Joint Conference on Neural Networks. Barcelona, Spain: IEEE, 2010. 1–3
- 15 Scott J C, Bozano L D. Nonvolatile memory elements based on organic materials. Advanced Materials, 2007, 19(11): 1452-1463
- 16 Kang E T, Neoh K G, Tan K L. Polyaniline: a polymer with many interesting intrinsic redox states. Progress in Polymer Science, 1998, 23(2): 277–324
- 17 Stewart D R, Ohlberg D A A, Beck P A, Chen Y, Williams R S. Molecule-independent electrical switching in Pt/organic monolayer/Ti devices. Nano Letters, 2004, 4(1): 133–136
- 18 Lai Y S, Tu C H, Kwong D L, Chen J S. Bistable resistance switching of poly (N-vinylcarbazole) films for nonvolatile memory applications. Applied Physics Letters, 2005, 87(12): 122101
- 19 Ling Q D, Liaw D J, Zhu C X, Chan D S H, Kang E T, Neoh K G. Polymer electronic memories: materials, devices and mechanisms. *Progress in Polymer Science*, 2008, **33**(10): 917–978

- 20 Buot F A, Rajagopal A K. Binary information storage at zero bias in quantum-well diodes. *Journal of Applied Physics*, 1994, **76**(9): 5552–5560
- 21 Chang L L, Esaki L, Tsu R. Resonant tunneling in semiconductor double barriers. Applied Physics Letters, 1974, 24(12): 593-595
- 22 Kim D J, Lu H, Ryu S, Bark C W, Eom C B, Tsymbal E Y, Gruverman A. Ferroelectric tunnel memristor. Nano Letters, 2012, **12**(11): 5697–5702
- 23 Hickmott T W. Low-frequency negative resistance in thin anodic oxide films. Journal of Applied Physics, 1962, 33(9): 2669-2682
- 24 Sawa A. Resistive switching in transition metal oxides. Materials Today, 2008, 11(6): 28–36
- 25 Yang J J, Pickett M D, Li X M, Ohlberg D A A, Stewart D R, Williams R S. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices. *Nature Nanotechnol*ogy, 2008, **3**(7): 429–433
- 26 Yang J J, Strachan J P, Miao F, Zhang M X, Pickett M D, Yi W, Ohlberg D A A, Medeiros-Ribeiro G, Williams R S. Metal/TiO<sub>2</sub> interfaces for memristive switches. Applied Physics A, 2011, **102**(4): 785–789
- 27 Wu J, McCreery R L. Solid-state electrochemistry in molecule/TiO<sub>2</sub> molecular heterojunctions as the basis of the TiO<sub>2</sub> "Memristor". *Journal of the Electrochemical Society*, 2009, **156**(1): 29–37
- 28 Wang X B, Chen Y R, Xi H W, Li H, Dimitrov D. Spintronic memristor through spin-torque-induced magnetization motion. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, **30**(3): 294–297
- 29 Widrow B, Pierce W H, Angell J B. Birth, life, and death in microelectronic systems. *IRE Transactions on Military Electronics*, 1961, **MIL-5**(3): 191–201
- 30 Pershin Y V, Di Ventra M. Spin memristive systems: spin memory effects in semiconductor spintronics. *Physical Re*view B, 2008, 78(11): 113309
- 31 Widrow B. An Adaptive "Adaline" Neuron Using Chemical "Memistors". Technical Report 1553-2, Stanford Electronics Laboratories, Stanford University, Stanford, California, 1960
- 32 Xia Q F, Pickett M D, Yang J J, Li X M, Wu W, Medeiros-Ribeiro G, Williams R S. Two- and three-terminal resistive switches: nanometer-scale memristors and memistors. Advanced Functional Materials, 2011, 21(14): 2660-2665
- 33 Driscoll T, Kim H T, Chae B G, Di Ventra M, Basov D N. Phase-transition driven memristive system. Applied Physics Letters, 2009, 95(4): 043503
- 34 Chua L. Resistance switching memories are memristors. Applied Physics A, 2011, 102(4): 765-783
- 35 Lan Hong-Bo, Ding Yu-Cheng, Liu Hong-Zhong, Lu Bing-Heng. Review of template fabrication for nanoimprint lithography. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(6): 1-13 (兰红波, 丁玉成, 刘红忠, 卢秉恒. 纳米压印光刻模具制作技术研究

进展及其发展趋势. 机械工程学报, 2009, **45**(6): 1–13)

- 36 Xia Q F, Yang J J, Wu W, Li X M, Williams R S. Selfaligned memristor cross-point arrays fabricated with one nanoimprint lithography step. Nano Letters, 2010, 10(8): 2909-2914
- 37 Baidu.com. Atomic layer deposition [Online], available: http://baike.baidu.com/view/732968.htm, December 26, 2012

(Baidu.com. 原子层沉积 [Online], available: http://baike.baidu.com/view/732968.htm, December 26, 2012)

- 38 Choi B J, Jeong D S, Kim S K, Rohde C, Choi S, Oh J H, Kim H J, Hwang C S, Szot K, Waser R, Reichenberg B, Tiedke S. Resistive switching mechanism of TiO<sub>2</sub> thin films grown by atomic-layer deposition. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**(3): 033715
- 39 Kim S K, Kim W D, Kim K M, Hwang C S, Jeong J. High dielectric constant TiO<sub>2</sub> thin films on a Ru electrode grown at 250 °C by atomic-layer deposition. Applied Physics Letters, 2004, 85(18): 4112-4114
- 40 Wikipedia.org. Lift-off (microtechnology) [Online], available: http://en.wikipedia.org/wiki/Lift-off\_(microtechnology), December 25, 2012
- 41 Di Ventra M, Pershin Y V, Chua L O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors, and meminductors. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(10): 1717-1724
- 42 Drakakis E M, Yaliraki S N, Barahona M. Memristors and bernoulli dynamics. In: Proceedings of the 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and Their Applications. London, UK: IEEE, 2010. 1–6
- 43 Drakakis E M, Payne A J. A bernoulli cell-based investigation of the non-linear dynamics in log-domain structures. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2000, 22: 127-146
- 44 Georgiou P S, Barahona M, Yaliraki S N, Drakakis E M. Device properties of Bernoulli memristors. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(6): 1938–1950
- 45 Linares-Barranco B, Serrano-Gotarredona T. Memristance can explain spike-time-dependent-plasticity in neural synapses. *Nature Precedings*, 2009, hdl:10101/npre.2009. 3010.1
- 46 Joglekar Y N, Wolf S J. The elusive memristor: properties of basic electrical circuits. *European Journal of Physics*, 2009, 30: 661–675
- 47 Biolek Z, Biolek D, Biolková V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift. *Radio Engineering*, 2009, 18(2): 210-214
- 48 Benderli S, Wey T A. On SPICE macromodelling of TiO<sub>2</sub> memristors. *Electronics Letters*, 2009, **45**(7): 377–379
- 49 Prodromakis T, Boon P P, Papavassiliou C, Toumazou C. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(9): 3099– 3105
- 50 Buscarino A, Fortuna L, Frasca M, Valentina G L. A chaotic circuit based on Hewlett-Packard memristor. *Chaos*, 2012, 22(2): 023136
- 51 Kavehei O, Iqbal A, Kim Y S, Eshraghiam K, Al-Sarawi S F, Abbott D. The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 466(2120): 2175–2202
- 52 Itoh M, Chua L O. Memristor oscillators. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2008, 18(11): 3183–3206
- 53 Muthuswamy B, Kokate P P. Memristor-based chaotic circuits. IEEE Technical Review, 2009, 26(6): 415–426
- 54 Botta V A, Néspoli C, Messias M. Mathematical analysis of a third-order memristor-based Chua's oscillator. *TEMA Congresso Nacionalde Matematica Apllicada Computacional*, 2011, **12**(2): 91–99
- 55 Petras I. Fractional-order memristor-based Chua's circuit. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2010, 57(12): 975–979
- 56 Wang L D, Drakakis E, Duan S K, He P F, Liao X F. Memristor model and its application for chaos generation. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2012, 22(8): 1250205

- 57 Muthuswamy B, Kokate P P. Memristor-based chaotic circuits. IEEE Technical Review, 2009, 26(6): 417–429
- 58 Wen S P, Zeng Z G, Huang T W. Adaptive synchronization of memristor-based Chua's circuits. *Physics Letters A*, 2012, **376**(44): 2775–2780
- 59 Wen S P, Shen Y, Zeng Z G, Cai Y X. Chaos analysis and control in a chaotic circuit with a PWL memristor. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Information Science and Engineering. Nanjing, China: IEEE, 2011. 1030 -1033
- 60 Sun J W, Shen Y, Zhang G D. Transmission projective synchronization of multi-systems with non-delayed and delayed coupling via impulsive control. *Chaos*, 2012, **22**(4): 043107
- 61 Muthuswamy B. Implementing memristor based chaotic circuits. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2010, 20(5): 1335–1350
- 62 Bao Bo-Cheng, Wang Qi-Hong, Xu Jian-Ping. On memristor based five-order chaotic circuit. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 66-70 (包伯成, 王其红, 许建平. 基于忆阻元件的五阶混沌电路研究. 电路 与系统学报, 2011, 16(2): 66-70)
- 63 Bao Bo-Cheng, Shi Guo-Dong, Xu Jian-Ping, Liu Zhong, Pai Sai-Hu. Dynamical analysis of two memristor chaotic oscillators. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2011, **41**(8): 1135– 1142 (包伯成、史国栋、许建平、刘中、潘赛虎、含两个忆阻器混沌电路的

动力学分析. 中国科学: 技术科学, 2011, **41**(8): 1135-1142)

- 64 Bao B C, Ma Z H, Xu J P, Liu Z, Xu Q. A simple memristor chaotic circuit with complex dynamics. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2011, 21(9): 2629-2645
- 65 Song Y F, Shen Y, Yi C. Chaos control of a memristor-based Chua's oscillator via backstepping method. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Information Science and Engineering. Nanjing, China: IEEE, 2011. 1081–1084
- 66 Iu H H C, Yu D S, Fitch A L, Sreeram V, Chen H. Controlling chaos in a memristor based circuit using a Twin-T notch filter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2011, **58**(6): 1337–1344
- 67 Ishaq A A, Srinivasan K, Murali K, Lakshmanan M. Observation of chaotic beats in a driven memristive Chua's circuit. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2011, 21(3): 737-757
- 68 Bao B C, Xu J P, Liu Z. Initial state dependent dynamical behaviors in a memristor based chaotic circuit. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(7): 070504
- 69 Donato C, Giuseppe G. On the simplest fractional-order memristor-based chaotic system. Nonlinear Dynamics, 2012, 70 (2): 1185-1197
- 70 Zhang X, Zhou Y Z, Bi Q, Yang X H, Zu Y X. The mathematical model and properties of memristor with border constraint. Acta Physica Sinica, 2010, 59(9): 6673-6680
- 71 Corinto F, Ascoli A. Memristor based-elements for chaotic circuits. Nonlinear Theory and Its Applications, 2012, 3(3): 336-356
- 72 Hu Xiao-Fang, Duan Shu-Kai, Wang Li-Dan, Liao Xiao-Feng. Memristive crossbar array with applications in image processing. *Science China: Information Sciences*, 2011, 41(4): 500-512

(胡小方,段书凯,王丽丹,廖晓峰. 忆阻器交叉阵列及在图像处理中的应用. 中国科学:信息科学, 2011, **41**(4): 500-512)

- 73 Zaplatilek K. Memristor modeling in Matlab<sup>®</sup> & Simulink<sup>®</sup>. In: Proceedings of the 5th European Conference on European Computing Conference. Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2011. 62-67
- 74 Yi W, Perner F, Qureshi M S, Abdalla H, Pickett M D, Yang J J, Zhang M X M, Medeiros-Ribeiro G, Williams R S. Feedback write scheme for memristive switching devices. *Applied Physics A*, 2011, **102**(4): 973–982
- 75 Eshraghian K, Cho K R, Kavehei O, Kang S K, Abbott D, Kang S M S. Memristor MOS content addressable memory (MCAM): hybrid architecture for future high performance search engines. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) System*, 2011, **19**(8): 1407–1417
- 76 Duan Shu-Kai, Hu Xiao-Fang, Wang Li-Dan, Li Chuan-Dong, Mazumder P. Memristor-based RRAM with applications. Science China: Information Sciences, 2012, 42(6): 754-769 (段书凯, 胡小方, 王丽丹, 李传东, Mazumder P. 忆阻器阻变随机 存取存储器及其在信息存储中的应用. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(6): 754-769)
- 77 Hu Xiao-Fang. Research on Memristor Based on Ovalatile Memory [Master dissertation], Southwest University, China, 2012 (胡小方. 基于忆阻器的非易失性存储器研究 [硕士学位论文], 西南 大学, 中国, 2012)
- 78 Tian Xiao-Bo. Research on Circuit Characteristics and Application of Memristor [Master dissertation], National University of Defense Technology, China, 2009 (田晓波. 忆阻器电路特性与应用研究 [硕士学位论文], 国防科学技术大学,中国, 2009)
- 79 Batas D, Fiedler H. A memristor SPICE implementation and a new approach for magnetic flux-controlled memristor modeling. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2011, 10(2): 250-255
- 80 Idongesit E E, Mazumder P. Self-controlled writing and erasing in a memristor crossbar memory. *IEEE Transactions* on Nanotechnology, 2011, **10**(6): 1454–1463
- 81 Liu Mei-Qin. Delayed standard neural network model and its application. Acta Automatica Sinica, 2005, **31**(5): 750-758 (刘妹琴. 时滞标准神经网络模型及其应用. 自动化学报, 2005, **31**(5): 750-758)
- 82 Jo S H, Chang T, Ebong I, Bhadviya B B, Mazumder P, Lu W. Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems. Nano Letters, 2010, 10(4): 1297–1301
- 83 Pershin Y V, Di Ventra M. Experimental demonstration of associative memory with memristive neural networks. *Neu*ral Networks, 2010, 23(7): 881–886
- 84 Wang H, Li H, Pino R E. Memristor-based synapse design and training scheme for neuromorphic computing architecture. In: Proceedings of the 2012 International Joint Conference on Neural Networks. Brisbane, Australia: IEEE, 2012. 1-5
- 85 Xia Q F, Robinett W, Cumbie M W, Banerjee N, Cardinali T J, Yang J J, Wu W, Li X M, Tong W M, Strukov D B, Snider G S, Medeiros-Ribeiro G, Williams R S. Memristor-CMOS hybrid integrated circuits for reconfigurable logic. Nano Letters, 2009, 9(10): 3640-3645
- 86 Gao S Y, Duan S K, Wang L D. RTDs based cellular neural/nonlinear networks with applications in image processing. Advanced Materials Research, 2012, 403–408: 2289– 2292

- 87 Hu J, Wang J. Global uniform asymptotic stability of memristor-based recurrent neural networks with time delays. In: Proceedings of the 2010 International Joint Conference on Neural Networks. Barcelona, Spain: IEEE, 2010. 1-8
- 88 Aubin J P, Cellina A. Differential Inclusions. New York: Springer-Verlag, 1984. 30–35
- 89 Filippov A F. Differential equations with discontinuous right-hand side. Matematicheskii Sbornik, 1960, 51(93): 1, 99–128
- 90 Aubin J P, Frankowska H. Set-valued Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 20–25
- 91 Wu A L, Zhang J, Zeng Z G. Dynamic behaviors of a class of memristor-based hopfield networks. *Physics Letters A*, 2011, **375**(15): 1661–1665
- 92 Wen S P, Zeng Z G. Dynamics analysis of a class of memristor-based recurrent networks with time-varying delays in the presence of strong external stimuli. *Neural Processing Letters*, 2012, **35**(1): 47–59
- 93 Zhang G D, Shen Y, Sun J W. Global exponential stability of a class of memristor-based recurrent neural networks with time-varying delays. *Neurocomputing*, 2012, 97: 149–154
- 94 Wen S P, Zeng Z G, Huang T W. Exponential stability analysis of memristor-based recurrent neural networks with time-varying delays. *Neurocomputing*, 2012, **97**: 233–240
- 95 Wu A L, Zeng Z G. Dynamic behaviors of memristor-based recurrent neural networks with time-varying delays. *Neural Networks*, 2012, **36**: 1–10
- 96 Bao G, Zeng Z G. Multistability of periodic delayed recurrent neural network with memristors. Neural Computing and Applications, 2013, DOI: 10.1007/s00521-012-0954-x
- 97 Wu A L, Zeng Z G, Zhu X S, Zhang J. Exponential synchronization of memristor-based recurrent neural networks with time delays. *Neurocomputing*, 2011, **74**(17): 3043–3050
- 98 Wu A L, Wen S P, Zeng Z G. Synchronization control of a class of memristor-based recurrent neural networks. *Information Sciences*, 2012, **183**(1): 106–116
- 99 Chai Tian-You, Zhang Ya-Jun. Nonlinear adaptive switching control method based on unmodeled dynamics compensation. Acta Automatica Sinica, 2011, **37**(7): 773-786 (柴天佑, 张亚军. 基于未建模动态补偿的非线性自适应切换控制方 法. 自动化学报, 2011, **37**(7): 773-786)
- 100 Adhikari S P, Yang C J, Kimand H, Chua L O. Memristor bridge synapse-based neural network and its learning. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2012, **23**(9): 1426–1435
- 101 Bao G, Zeng Z G. Analysis and design of associative memories based on recurrent neural network with discontinuous activation functions. Neurocomputing, 2012, 77(1): 101– 107
- 102 Shin S, Kim K, Kang S M S. Memristor-based fine resolution programmable resistance and its applications. In: Proceedings of the 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems. Milpitas, CA: IEEE, 2009. 948-951
- 103 Chen Shan-Ben, Wu Lin, Zhang Quan, Zhang Fu-En. A self learning artificial neural network control of uncertain objects. Acta Automatica Sinica, 1997, 23(1): 112–115 (陈善本, 吴林, 张铨, 张福恩. 不确定对象的人工神经网络自学习控 制方法. 自动化学报, 1997, 23(1): 112–115)
- 104 Wu A L, Zeng Z G. Anti-synchronization control of a class of memristive recurrent neural networks. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2013, 18(2): 373-385

- 105 Wang Wei-Ling. Study on Memristor Chaos and Its Application in Speech Secure Communication System [Master dissertation], Hangzhou Dianzi University, China, 2012 (王伟玲. 忆阻器混沌及其在语音保密通信系统中的应用研究 [硕士 学位论文], 杭州电子科技大学, 中国, 2012)
- 106 Bao B C, Liu Z, Xu J P. Steady periodic memristor oscillator with transient chaotic behaviours. *Electronics Letter*, 2010, 46(3): 228–230
- 107 Bao Bo-Cheng, Liu Zhong, Xu Jian-Ping. Dynamical analysis of memristor chaotic oscillator. Acta Physica Sinica, 2010, **59**(6): 3785-3793 (包伯成,刘中,许建平. 忆阻混沌振荡器的动力学分析. 物理学报, 2010, **59**(6): 3785-3793)
- 108 Bao Bo-Cheng. Chaotic Dynamical Systems: Extensionand Analysis [Ph. D. dissertation], Nanjing University of Science and Technology, China, 2010 (包伯成. 混沌动力学系统延拓与分析 [博士学位论文], 南京理工大 学, 中国, 2010)
- 109 Bao B C, Liu Z, Xu J P. Transient chaos in smooth memristor oscillator. *Chinese Physics B*, 2010, **19**(3): 030510
- 110 Wang Li-Dan, Duan Shu-Kai. Random Bit Generator Based on Chaotic Oscillator and Its Application, China Patent 201110051856.8., September 2011 (王丽丹,段书凯. 混沌振荡器及其作为随机比特发生器的应用. 中 国专利 201110051856.8., 2011 年 9 月)
- 111 Cong Qiu-Bo. The latest MRAM storage capacity upgrade to 16 Mb. *EDN China*, 2010, **17**(7): 12 (丛秋波. 最新 MRAM 存储能力提升到 16 Mb. 电子设计技术, 2010, **17**(7): 12)
- 112 Cuniberti G, Richter K, Fagas G. Introducing Molecular Electronics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 447–477
- 113 Dong C, Chen D M, Haruehanroengra S, Wang W. 3-D nF-PGA: a reconfigurable architecture for 3-D CMOS/nanomaterial hybrid digital circuits. *IEEE Transactions on Circuits* and Systems I: Regular Papers, 2007, 54(11): 2489–2501
- 114 Rose G S, Cabe A C, Gergel-Hackett N, Majumdar N, Stan M R, Bean J C, Harriott L R, Yao Y X, Tour J M. Designing CMOS/molecular memories while considering device parameter variations. ACM Journal of Emerging Technologies in Computing Systems, 2007, **3**(1): 1–22
- 115 Strukov D B, Likharev K K. CMOL FPGA: a reconfigurable architecture for hybrid digital circuits with two-terminal nanodevices. Nanotechnology, 2005, 16(6): 888–900
- 116 Hu Shu-Kai. Database Application Oriented Memristor Memory Technology [Master dissertation], National University of Defense Technology, China, 2011 (胡舒凯. 面向数据库应用的忆阻器存储器技术 [硕士学位论文], 国 防科学技术大学, 中国, 2011)
- 117 Gergel-Hackett N, Hamadani B, Dunlap B, Suehle J, Richter C, Hacker C, Gundlach D. A flexible solutionprocessed memristor. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, 30(7): 706-708
- 118 Jo S H, Kim K H, Lu W. Programmable resistance switching in nanoscale two-terminal devices. Nano Letters, 2009, 9(1): 496-500
- 119 Cao X, Li X M, Gao X D, Yu W D, Liu X J, Zhang Y W, Chen L D, Cheng X H. Forming-free colossal resistive switching effect in rare-earth-oxide Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films for memristor applications. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(7): 073723-1-073723-5
- 120 Mustafa J, Rüdiger A, Waser R. Comparison of three different architectures for active resistive memories. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2007, 61(5): 345-352

- 121 Yakopcic C, Taha T M, Subramanyam G, Pino R E, Rogers S. Analysis of a memristor based 1T1M crossbar architecture. In: Proceedings of the 2011 International Joint Conference on Neural Networks. California, USA: San Jose, 2011. 3243-3427
- 122 Qureshi M S, Pickett M, Miao F, Strachan J P. CMOS interface circuits for reading and writing memristor crossbar array. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2011. 2954–2957
- 123 Bavandpour M, Shouraki S B, Soleimani H, Ahmadi A, Makhlooghpour A A. Simulation of memristor crossbar structure on GPU platform. In: Proceedings of the 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012). Tehran, Iran: IEEE, 2012. 178–183
- 124 Zidan M A, Fahmy H A H, Hussain M M, Salama K N. Memristor-based memory: the sneak paths problem and solutions. *Microelectronics Journal*, 2012, 44(2): 176–183
- 125 Ho Y, Huang G M, Li P. Dynamical properties and design analysis for nonvolatile memristor memories. *IEEE Trans*actions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2011, 58(4): 724-736
- 126 Lehtonen E, Laiho M. Stateful implication logic with memristors. In: Proceedings of the 2009 IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures. Washington, DC. USA: IEEE, 2009. 33–36
- 127 Wang Le-Yi. Research progress of the memristor and its application foreground. *Electronic Components and Materials*, 2010, **29**(12): 71-74 (王乐毅. 忆阻器研究进展及应用前景. 电子元件与材料, 2010, **29**(12): 71-74)
- 128 Cong J, Xiao B J. MrFPGA: a novel FPGA architecture with memristor-based reconfiguration. In: Proceedings of the 2011 IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures. San Diego, CA: IEEE, 2011. 1–8
- 129 Witrisal K. A memristor-based multicarrier UWB receiver. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2009. 679-683
- 130 Pershin Y V, Di Ventra M. Practical approach to programmable analog circuits with memristors. *IEEE Trans*actions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2010, 57(8): 1857–1864
- 131 Zhang Da-Peng. A survey of the development of computers for pattern recognition and image processing (PRIP). Acta Automatica Sinica, 1989, 15(1): 84-93 (张大鹏. 模式识别与图象处理 (PRIP) 计算机发展评述. 自动化学 报, 1989, 15(1): 84-93)
- 132 Pershin Y V, La Fontaine S, Di Ventra M. Memristive model of amoeba learning. *Physical Review E*, 2009, 80(2): 021926-1-021926-6
- 133 Williams S. How we found the missing memristor. IEEE Spectrum, 2008, 45(12): 28–35



**王小平** 华中科技大学自动化学院教授. 2003 年获得华中科技大学控制科学与工 程系博士学位. 主要研究方向为系统建 模与仿真. E-mail:

wangxiaoping@mail.hust.edu.cn

(WANG Xiao-Ping Professor at the School of Automation, Huazhong University of Sciences and Technology.

She received her Ph. D. degree in the Department of Control

Science and Engineering, Huazhong University of Sciences and Technology in 2003. Her research interest covers system modeling and simulation.)



沈 铁 华中科技大学自动化学院教授. 1998 年获得华中科技大学控制科学与工 程系博士学位. 主要研究方向为忆阻系 统动力学分析. 本文通信作者. E-mail: yishen64@163.com

(SHEN Yi Professor at the School of Automation, Huazhong University of Sciences and Technology. He received

his Ph. D. degree in the Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Sciences and Technology in 1998. His research interest covers memristor system dynamic analysis. Corresponding author of this paper.)



吴计生 华中科技大学自动化学院博士 研究生. 2012 年获得华中科技大学控制 科学与工程系硕士学位. 主要研究方向 为忆阻存储技术.

E-mail: wujisheng1112@163.com

(**WU Ji-Sheng** Ph. D. candidate at the School of Automation, Huazhong University of Science and Technology.

He received his master degree in the Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology in 2012. His main research interest is memristor memory technology.)



**孙军伟** 华中科技大学自动化学院博士 研究生. 2011 年获得郑州轻工业学院电 气信息工程学院硕士学位. 主要研究方 向为忆阻, 混沌控制, 混沌同步. E-mail: junweisun@yeah.net (**SUN Jun-Wei** Ph.D. candidate at

the School of Automation, Huazhong University of Science and Technology.

He received his master degree at the College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry in 2011. His research interest covers memristor, chaotic control, and chaotic synchronization.)



**李 薇** 华中科技大学自动化学院博士 后.2010 年获得华中科技大学控制科学 与工程系博士学位.主要研究方向为新 型传感技术,忆阻存储技术及其应用. E-mail: vivily.li@gmail.com

(**LI Wei** Post-doctor at the School of Automation, Huazhong University of Science and Technology. She received

her Ph. D. degree in the Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology in 2010. Her research interest covers new sensing technology and memristor storage technology and its applications.)