

文章编号:1009-3087(2014)04-0134-07

HP TiO_2 忆阻线性和非线性模型及其特征分析

包伯成¹, 武花干², 乔晓华³, 胡丰伟¹

(1. 常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 南京理工大学 电子工程系, 江苏 南京 210094;
3. 江苏理工学院 电气信息工程学院, 江苏 常州 213001)

摘 要: 为了分析 HP TiO_2 忆阻模型的本质特征, 比较基本模型与非线性窗函数模型之间本质特征的差异, 概述了几种典型的 HP TiO_2 忆阻非线性窗函数模型的特点, 开展了 HP TiO_2 忆阻基本模型的本质特征分析, 并对几种非线性窗函数模型的本质特征进行了比较。结果表明, 对于任意忆阻初始状态和任意振幅与频率的正弦电流激励, HP TiO_2 忆阻模型都能呈现出紧磁滞回线特征; 不同的非线性窗函数模型的特征受其非线性漂移的影响, 所产生的输出电压和忆阻值有着不同的瞬态过渡过程, 且忆阻初始状态值越大, 非线性漂移影响就越严重, 导致部分 HP TiO_2 忆阻模型性能失效。

关键词: 忆阻模型; 窗函数; 特征; 初始状态

中图分类号: N93; TN60; TN387

文献标志码: A

Linear and Nonlinear Models of HP TiO_2 Memristor and Their Printfingher Analyses

BAO Bocheng¹, WU Huagan², QIAO Xiaohua³, HU Fengwei¹

(1. School of Info. Sci. and Eng., Changzhou Univ., Changzhou 213164, China;

2. Dept. of Electric Eng., Nanjing Univ. of Sci. and Technol., Nanjing 210094, China;

3. School of Electrical and Info. Eng., Jiangsu Univ. of Technol., Changzhou 213001, China)

Abstract: To analyze the printfingers of HP TiO_2 memristor model and compare the differences between the printfingers of the basic model and nonlinear window function models, the features of several typical HP TiO_2 memristor nonlinear window function models were summarized and a unified model of HP TiO_2 memristor was proposed. The printfingher analysis of HP TiO_2 memristor basic model was further developed and the printfingher comparisons of several nonlinear window function models were then performed. The results demonstrated that all HP TiO_2 memristor models can exhibit hysteresis loops pinched at the origin for any memristor initial state and any amplitude and frequency of the sinusoidal current stimulus. The printfingers of different nonlinear window function models are effected by the corresponding nonlinear drifts, which result in that the generated output voltages and memristances have different transient transition processes, and the effects of the nonlinear drifts become more serious with the increasing memristor initial state values, causing the performances failure of a part of HP TiO_2 memristor models.

Key words: memristor model; window function; printfingher; initial state

根据电路基本变量组合完备性原理, 在文献[1]中 Chua 预测了描述电荷和磁通关系——忆阻元件的存在性, 并定义了这类元件为忆阻器。由于在现实中没有发现这类器件, 长期以来, 关于忆阻及其电路的研究并没有引起科学界和工程界的重视。直到惠普实验室 Strukov 等^[2]报道了忆阻器的实现

性, 才重新引起了人们开展忆阻物理器件制造^[3-7]、忆阻建模与分析^[8-15]及其忆阻应用电路^[16-22]等全方位研究的兴趣。

自惠普实验室成功制作出了基于金属和金属氧化物的纳米级忆阻器^[2]之后, 有关基于不同材料制成的具有不同特性的忆阻器件的研究成果相继得到

收稿日期: 2014-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277017); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012583)

作者简介: 包伯成(1965—), 男, 教授。研究方向: 混沌信息动力学、记忆元件与记忆系统。E-mail: mervinbao@126.com

网络出版时间: 2014-7-1 17:35:39 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20140701.1735.001.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

了报道,例如,基于电子磁性特性的电子自旋忆阻器^[3]、具有亚纳秒开关特性的氧化钽忆阻器^[4]、铁电忆阻器^[5]、铁电隧道忆阻器^[6]和发光忆阻器^[7]等等。这些忆阻器件有些难以给出具体的数学关系式或者忆阻模型数学描述过于复杂,致使这类物理器件进一步研究成果较少。除此之外,文献[23-24]也对以往报道的具有记忆效应的一些物理器件或系统模型进行了特性分析,例如,流控放电管模型、热敏电阻模型和钨丝灯模型等,这些物理器件模型也具有不同的忆阻特征。

在所有忆阻物理器件模型中,研究并应用最为广泛的是 HP TiO₂ 忆阻线性杂质漂移模型^[2,8,21-22,24]和 HP TiO₂ 忆阻非线性窗函数模型^[10-12,16-17,25-27]。基于 HP TiO₂ 忆阻的线性和非线性数学模型,文献[8]采用运算放大器、模拟乘法器、MOS 场效应管、电阻和电容等分立固态组件开发了一种模拟器,来等效实现线性杂质漂移模型的对端口特性;文献[10]提供了一种非线性窗函数的 SPICE 模型;文献[11]描述了忆阻-电容、忆阻-电感和忆阻-电容-电感等组成的简单忆阻电路的常规性能;文献[16-17]则基于非线性模型分别构造了2个不同的忆阻混沌电路,生成了相应的混沌吸引子;文献[21]提出了由4个相同忆阻元件构成的忆阻桥电路,能完成零、负和正的突触加权,通过外接3个晶体管能完成神经细胞的突触运算;文献[22]设计了对称的和非对称的忆阻双门张弛振荡器,推导了振荡频率和振荡条件的一般表达式,介绍了忆阻不同失配时的4种特殊情况,并用 PSPICE 仿真验证了分析结果;文献[26-27]则分别提出了新的含非线性窗函数的 HP TiO₂ 忆阻模型,更好地逼近物理器件的真实性能,但数学模型较为复杂、涉及较多的物理参量。

尽管 HP TiO₂ 忆阻模型得到了广泛的研究和应用,但 HP TiO₂ 忆阻模型的本质特征以及基本模型与非线性窗函数模型的本质特征之间有着什么样的不同^[24],目前涉及的文献较少。因此,有必要系统地对 HP TiO₂ 忆阻线性杂质漂移模型(即基本模型)及其典型的非线性窗函数模型进行特点概述,并开展它们的特征分析及其相应的特征比较。

1 HP TiO₂ 忆阻模型

HP TiO₂ 忆阻模型大致可分为线性杂质漂移模型和非线性窗函数模型2大类。线性杂质漂移模型是 HP TiO₂ 忆阻基本模型,所有非线性窗函数模型

都是基于该基本模型的。

1.1 线性杂质漂移模型

图1为惠普实验室给出的纳米级忆阻的基本模型^[2]。

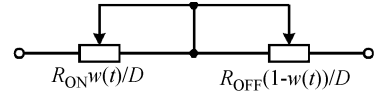


图1 HP TiO₂ 忆阻的基本模型

Fig.1 Basic model of HP TiO₂ memristor

该忆阻元件是由未掺杂部分(undoped)与掺杂部分(doped)组成的, D 为元件的长度, $w(t)$ 为元件的掺杂区域的宽度, μ_v 为离子在均匀场中的平均迁移率。当 $w(t) = 0$ 时,对应的元件电阻值为 R_{OFF} ,当 $w(t) = D$ 时,对应的元件电阻值为 R_{ON} 。忆阻元件上流过的电流 $i(t)$ 与 $w(t)$ 变化率成线性关系。HP TiO₂ 忆阻的数学模型为:

$$M(t) = R_{ON}x(t) + R_{OFF}(1 - x(t)) \quad (1)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = ki(t) \quad (2)$$

式中: $M(t)$ 为忆阻模型的忆阻值;状态变量 $x(t) = w(t)/D$, $x(t) \in (0, 1)$; $k = \mu_v R_{ON}/D^2$ 。因此,忆阻的电压与电流关系为:

$$v(t) = M(t)i(t) = [R_{OFF} + (R_{ON} - R_{OFF})x(t)]i(t) \quad (3)$$

式中, $x(t) = kq(t)$, $q(t)$ 为电流 $i(t)$ 通过忆阻的电荷量。在 $R_{ON} \ll R_{OFF}$ 条件下,可以得到:

$$M(t) = R_{OFF}[1 - kq(t)] \quad (4)$$

上述 HP TiO₂ 忆阻的基本模型被称为线性杂质漂移模型。线性杂质漂移模型的含义是忆阻杂质与非杂质分界面的漂移速度在 $[0, D]$ 范围内保持恒定。

HP TiO₂ 忆阻的基本模型建立了较为简单的数学关系,简化了将其纳入基本电路中的分析、仿真过程,是从 HP TiO₂ 忆阻直接得出的模型,能够较好地反映物理器件的真实特性。但是,线性杂质漂移模型忽略了器件的边界效应,有些独特的特性不能如实反映出来。采用对分界面漂移速度加窗函数^[2,10-11,25]的方式能有效地解决这一问题,实现忆阻的非线性建模。

1.2 非线性窗函数模型

为了对忆阻物理器件的真实情况进行模拟,在式(2)右侧乘一个窗函数即可得到 HP TiO₂ 忆阻非线性窗函数模型,即:

$$\frac{dx(t)}{dt} = kF_n(x)i(t) \quad (5)$$

式中, $F_n(x)$ ($n = 2, 3, 4, 5$) 为窗函数,依次代表 HP

窗函数^[2]、Joglekar 窗函数^[11]、Biolek 窗函数^[10]和 Prodromakis 窗函数^[25]。

Strukov 等在提出 HP TiO₂ 忆阻的基本模型的同时,也提出了一个简单的窗函数来解决器件的边界效应^[2]。该窗函数按照状态变量 x 可表示为:

$$F_2(x) = x - x^2 \quad (6)$$

式(6)所表示的窗函数称之为 HP 非线性窗函数。当 $x = 0$ 和 $x = 1$ 时,有 $F_2(x) = 0$, 因此忆阻处于 OFF 态的边界效应就可得到解决。但该窗函数在器件物理尺度的大部分范围内强加了非线性漂移因素。而且,该窗函数缺乏必要的灵活性,依然存在边界状态问题。

忆阻杂质与非杂质分界面的漂移速度在 $[0, D]$ 范围内应保持一个恒定速度,但分界面趋近于物理器件边缘时其漂移速度应锁定为零。Jogleka 和 Wolf^[11] 针对线性杂质漂移模型存在不能处理边界效应的严重缺陷,提出了一个新的窗函数来反映漂移速度锁定情况。Joglekar 窗函数为:

$$F_3(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \quad (7)$$

式中, p 为一个正整数, $x \in (0, 1)$ 。当 $p \rightarrow \infty$ 时,含 Joglekar 窗函数的 HP TiO₂ 忆阻非线性模型等效于一个理想忆阻。特殊情况下,当 $p = 1$ 时, Joglekar 窗函数退化为 HP 窗函数,仅存在一个为 4 的尺度因子。

含 Joglekar 窗函数的忆阻非线性模型存在着末端状态问题,即当离子漂移到达边界点 ($x = 0$ 或 $x = 1$) 后就永远保持既有状态,再施加反向电流也无法改变忆阻的阻值。

Biolek 窗函数^[10]可以较好地避免末端状态问题,该窗函数除了变量 x 和 p 外,还考虑了流经忆阻的电流 i , 该函数到达边界点后不会锁定在既有状态,施加反向电流即可改变其阻值,使其正常工作。Biolek 窗函数为:

$$F_4(x) = 1 - (x - \text{stp}(-i))^{2p} \quad (8)$$

式中, p 为一个正整数, $x \in (0, 1)$, i 为忆阻的电流, $\text{stp}(\cdot)$ 为阶跃函数且有:

$$\text{stp}(i) = \begin{cases} 1, & i \geq 0; \\ 0, & i < 0. \end{cases}$$

Prodromakis 等^[25]考虑到实际的掺杂物理器件的非线性特性并综合了上述 3 种非线性窗函数的特点,提出了一种新的窗函数。Prodromakis 窗函数可表示为:

$$F_5(x) = j \{ 1 - [(x - 0.5)^2 + 0.75]^p \} \quad (9)$$

式中: p 和 x 与上述定义一致; j 为一个尺度标量,作

为第 2 级控制参数。对于任意确定的参数 p , 选取 j 为合适的值, 可以上下调节 $F_5(x)$ 的尺度。因此, Prodromakis 窗函数可以很方便地调节忆阻模型的尺度范围。

1.3 HP TiO₂ 忆阻统一模型

HP TiO₂ 忆阻线性杂质漂移模型和非线性窗函数模型可以统一表示为:

$$\begin{cases} v = M(x)i, \\ M(x) = R_{\text{ON}}x + R_{\text{OFF}}(1 - x), \\ \text{d}x/\text{d}t = kF_n(x)i \end{cases} \quad (10)$$

式中: i 为输入电流; v 为输出电压; R_{ON} 、 R_{OFF} 和 k 为系统参数; x 为状态变量; $M(x)$ 代表忆阻模型的忆阻值; $F_n(x)$ ($n = 1, 2, 3, 4, 5$) 分别代表 HP 线性窗函数和 4 种非线性窗函数, 其中, $F_1(x)$ 表示的 HP 线性窗函数其实是一个常数(见表 1)。式(10)即为 HP TiO₂ 忆阻线性杂质漂移模型, 反映出 HP TiO₂ 忆阻模型是一种流控(或荷控)忆阻。

表 1 HP TiO₂ 忆阻模型窗函数

Tab.1 Mechanical properties of steel bar

窗函数	HP 线性	HP 非线性	Joglekar	Biolek	Prodromakis
表达式	$F_1(x) = 1$	式(6)	式(7)	式(8)	式(9)

为了便于分析, 下面只考虑 HP TiO₂ 忆阻基本模型以及分别含有 Joglekar 窗函数、Biolek 窗函数与 Prodromakis 窗函数 3 种 HP TiO₂ 忆阻非线性模型, 并分别设定 3 种非线性窗函数中的控制参数 $p = 1$, 且 Prodromakis 窗函数的另一个控制参数 $j = 1$ 。在此情况下, 有关系式 $F_2(x) = F_5(x)$, 因此, HP 非线性窗函数属于 Prodromakis 窗函数的一种特例。可绘出 $F_1(x)$ 和 $F_n(x)$ ($n = 3, 4, 5$) 4 种窗函数在 $x \in (0, 1)$ 范围内的曲线如图 2 所示。图 2 中也画出了 $F_2(x)$ 曲线, 与 $F_5(x)$ 曲线完全重叠在一起了。

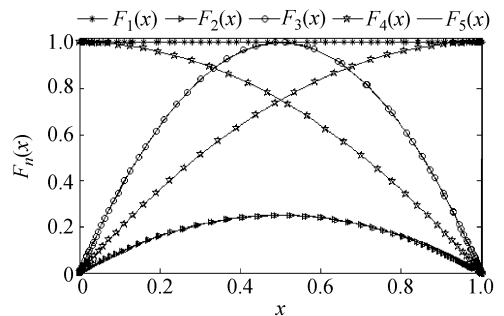


图 2 5 种窗函数在 $x \in (0, 1)$ 范围内的曲线

Fig.2 Five window function curves for $x \in (0, 1)$

从图 2 可见, 虽然 3 种非线性窗函数 ($F_n(x)$, $n = 3, 4, 5$) 或多或少能解决 HP TiO₂ 忆阻器的边界效应, 但在物理器件尺度 $(0, D)$ 范围内引入了非线性

漂移因素,使得忆阻杂质与非杂质分界面的漂移速度不能保持在恒定速度,从而影响了 HP TiO₂ 忆阻非线性模型的性能指标。当然,可以通过增大控制参数 p 的值来消除这种影响,但增加了 HP TiO₂ 忆阻非线性模型的复杂度,且容易导致非线性模型的性能失效。

2 HP TiO₂ 忆阻特征分析

一个器件是忆阻元件,必须呈现出 3 个本质特征^[24]:1) 当一个双极性周期信号驱动时,该器件在电压-电流平面上为一条在原点收缩的磁滞回线,且响应是周期的;2) 从临界频率始,磁滞旁瓣面积随激励频率增加而单调减少;3) 当频率趋近于无限大时,紧磁滞回线收缩为一个单值函数。以 HP TiO₂ 忆阻基本模型为例,对 HP TiO₂ 忆阻的本质特征进行阐述分析。

2.1 基本模型的特征

当 $F_1(x) = 1$ 时,式(10)所表示的 HP TiO₂ 忆阻模型是一个线性基本模型,其数学关系式可以统一描述为式(10)所示。设系统输入电流为 $i(t) = I \sin \omega t$,初始状态为 $x(0) = c$,则状态方程的解为:

$$x(t) = c + \frac{kI}{\omega}(1 - \cos \omega t) \quad (11)$$

系统的输出电压为:

$$v(t) = a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t \quad (12)$$

式中, $a_1 = (R_{ON} - R_{OFF})I\left(c + \frac{kI}{\omega}\right) + R_{OFF}I$, $a_2 = (R_{ON} - R_{OFF})\frac{kI^2}{2\omega}$ 。式(12)说明系统的输出电压是由激励频率的基波分量和 2 次谐波分量共同组成的,各分量前的系数取决于忆阻系统参数、忆阻初始状态和正弦电流激励的振幅与频率。

选择参数为 $k = 1 \times 10^4$, $R_{ON} = 100 \Omega$ 和 $R_{OFF} = 10 \text{ k}\Omega$ 。当输入正弦电流为 $i(t) = I \sin \omega t$ 时,在不同的振幅和频率的正弦电流激励下,以及在不同的忆阻内部初始状态作用下,式(10)所表示的 HP TiO₂ 忆阻基本模型在 $i-v$ 平面上的轨迹都能呈现出在原点收缩的紧磁滞回线特征,分别如图 3(a)、3(b)和 3(c)所示。图 3(a)结果对应于 $\omega = 5 \text{ rad/s}$ 和 $c = 0$,图 3(b)结果对应于 $I = 0.2 \text{ mA}$ 和 $c = 0$,图 3(c)结果对应于 $I = 0.2 \text{ mA}$ 和 $\omega = 5 \text{ rad/s}$ 。当输入电流为一个非纯正弦波形 $i(t)/\text{mA} = 0.2 \sin 5t + 0.15 \cos 10t$ 时,该器件也显示出在原点的紧磁滞回线,如图 3(d)所示。

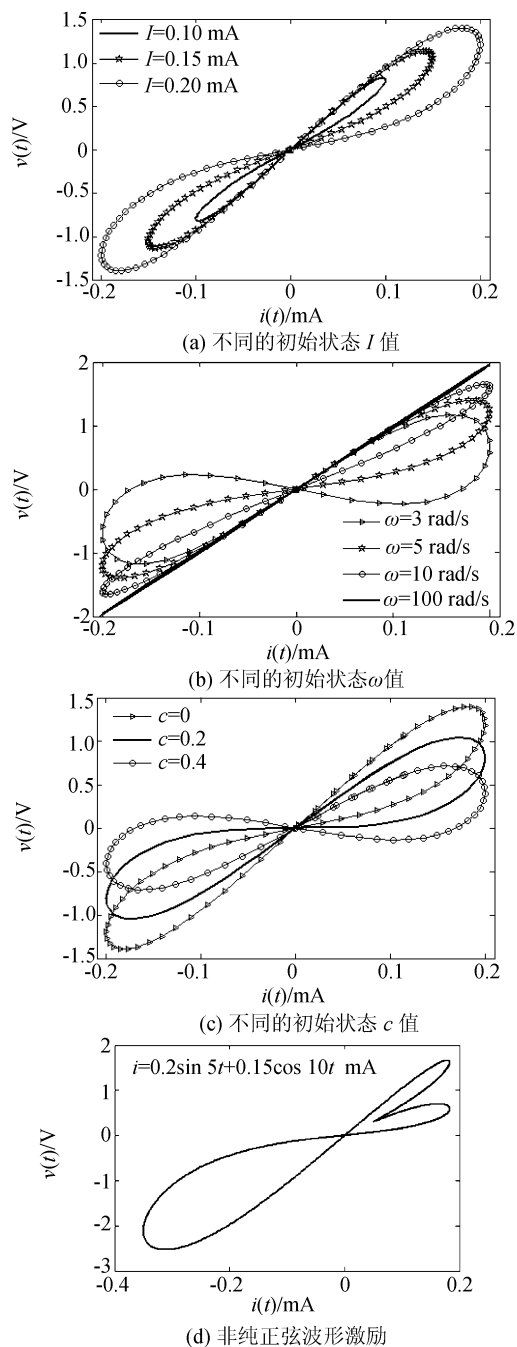


图 3 HP TiO₂ 忆阻紧磁滞回线特征

Fig. 3 Pinched hysteresis loops of HP TiO₂ memristor

此外,从图 3(b)可知,随着正弦电流激励的频率 ω 值的增大,紧磁滞回线的旁瓣面积不断减小,且紧磁滞回线逐步趋近于一条直线函数。因此,HP TiO₂ 忆阻基本模型符合一个忆阻元件的本质特征。进一步地,在正弦电流激励下,式(10)所表示的流控 HP TiO₂ 忆阻呈现出一条横截的紧磁滞回线^[24],在 $i = 0$ 处紧磁滞回线有 2 个不同的斜率。

总之,一个动力学系统之所以能被称为忆阻元件,需满足以下条件:该动力学系统的状态变量在任

意初始条件下,受到任意振幅和频率的正弦激励信号驱动时,其紧磁滞回线特征必须在原点处紧缩。

2.2 忆阻模型的特征比较

以 HP TiO_2 忆阻基本模型和 3 种非线性窗函数模型($F_n(x)$, $n=3,4,5$)为分析对象,比较 HP TiO_2 忆阻模型的特征。

选择以上相同忆阻系统参数为 $k=1 \times 10^4$, $R_{\text{ON}}=100 \ \Omega$ 和 $R_{\text{OFF}}=10 \ \text{k}\Omega$ 。当输入电流为 $i(t)/\text{mA}=0.1 \sin 3t$ 且忆阻初始状态分别为 $x(0)=0.1$ 和 $x(0)=0.5$ 时,HP TiO_2 线性与非线性模型的紧磁滞回线、所产生的输出电压时域波形以及忆阻值时域波形分别如图 4 和 5 所示。需要说明的是,忆阻初始状态 $x(0)$ 必须在 $(0,1)$ 范围中选择,不然就超出了物理器件的两端边缘。

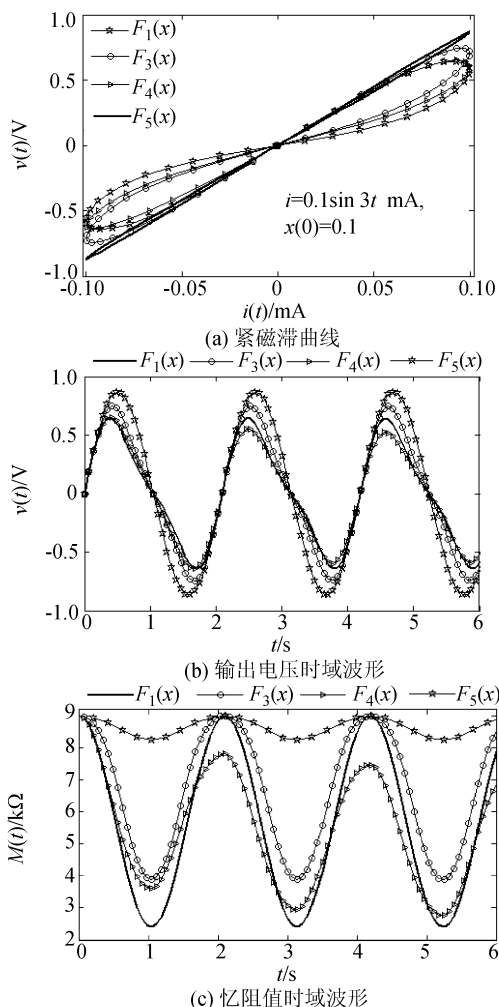


图 4 $x(0)=0.1$ 时忆阻模型的特征比较

Fig. 4 Feature comparison of memristor models when $x(0)=0.1$

从图 4 和 5 可观察到,在同一个正弦电流激励 $i(t)$ 下,对于不同的忆阻初始状态 $x(0)$,HP TiO_2 忆阻基本模型和非线性窗函数模型都能呈现出紧磁滞

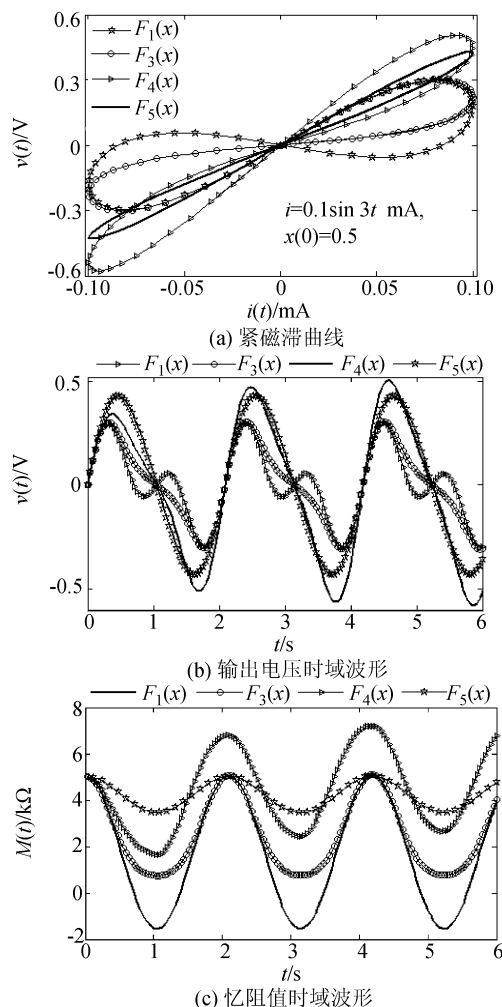


图 5 $x(0)=0.5$ 时忆阻模型的特征比较

Fig. 5 Feature comparison of memristor models when $x(0)=0.5$

回线特征。如图 4(a) 和 5(a) 所示,基本模型(对应的窗函数为 $F_1(x)$)所展示的回线旁瓣面积最大,而 Prodromakis 窗函数模型所展示的回线旁瓣面积最小。如图 4(b) 和 5(b) 所示,在 HP TiO_2 忆阻端口所产生的输出电压时域波形中,当 $x(0)=0.1$ 时,Prodromakis 窗函数模型的输出电压动态幅度最大,Biolek 窗函数模型的输出电压动态幅度最小;当 $x(0)=0.5$ 时,Biolek 窗函数模型的输出电压动态幅度则最大,基本模型的输出电压动态幅度反而最小。如图 4(c) 和 5(c) 所示,基本模型的忆阻值动态范围最大,Prodromakis 窗函数模型的忆阻值动态范围最小,并且随着 $x(0)$ 增大,Joglekar 窗函数模型的忆阻值动态范围减小且往下偏移。此外,当 $x(0)=0.5$ 时,HP TiO_2 忆阻基本模型的忆阻值随着时间演化出现了负值区间,这时基本模型已不能真实反映实际器件的物理机理了,导致其性能完全失效。

特别地,从图 4 和 5 也可观察到,3 种 HP TiO_2

忆阻非线性窗函数模型都存在着不相同的瞬态过渡过程,且与忆阻初始状态 $x(0)$ 有关。

对于上述忆阻系统参数和正弦电流激励,当忆阻初始状态分别为 $x(0) = 0.1$ 和 $x(0) = 0.5$ 时,在 $t = 0 \sim 300$ s 范围内,HP TiO₂线性与非线性模型所产生的输出电压时域波形以及忆阻值时域波形分别如图6和7所示。

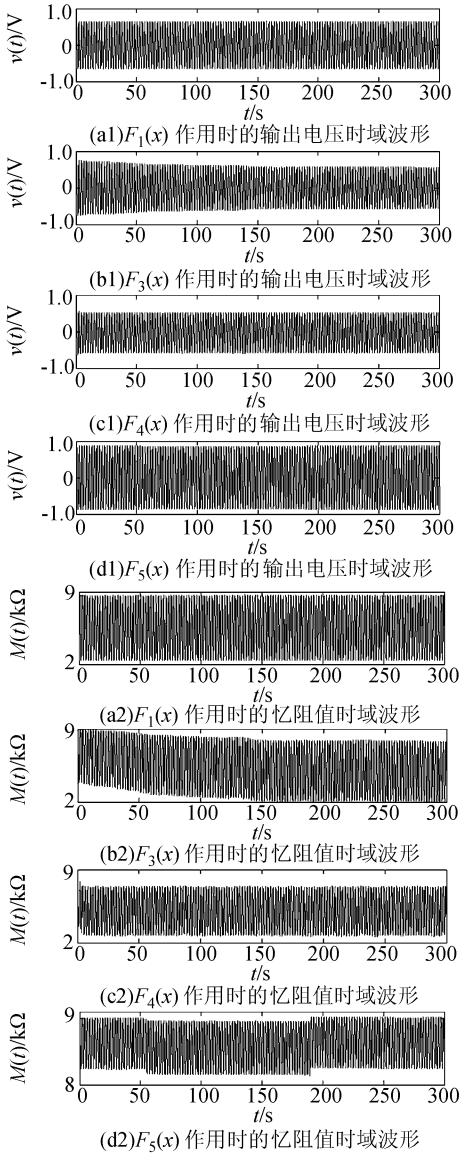


图6 $x(0) = 0.1$ 时忆阻模型的时域波形

Fig. 6 Domain-time waveforms of memristor model when $x(0) = 0.1$

观察图6和7输出电压与忆阻值的时域波形,可发现3种非线性窗函数模型均存在着瞬态过渡过程,且随着忆阻初始状态 $x(0)$ 的增大,瞬态过渡过程将会变得更加明显。比较图6和7的结果可知,在3种非线性窗函数模型中,Biolek窗函数模型的瞬态过渡过程最短,几秒时间后,输出电压与忆阻值

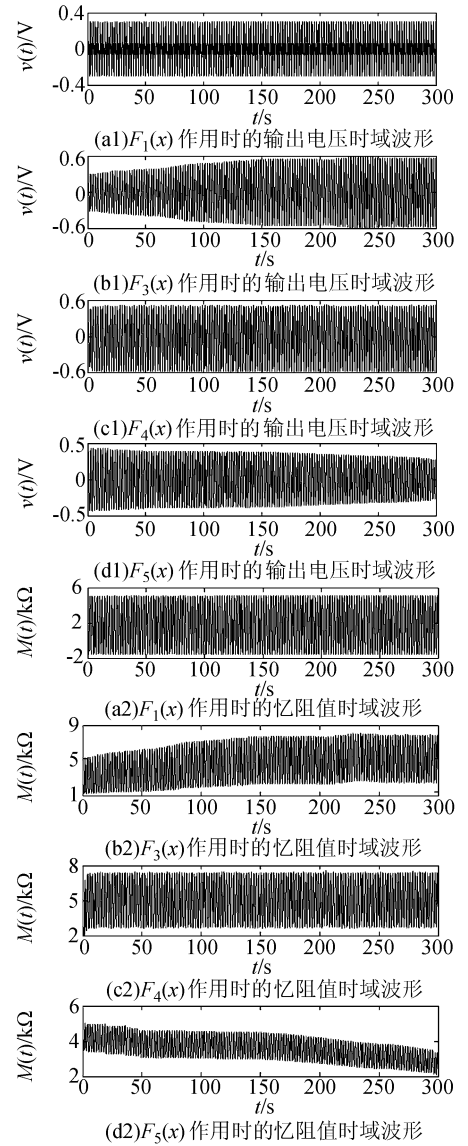


图7 $x(0) = 0.5$ 时忆阻模型的时域波形

Fig. 7 Domain-time waveforms of memristor model when $x(0) = 0.5$

的时域波形即可进入到较稳定的动态范围内以类正弦波形振荡;而Prodromakis窗函数模型的瞬态过渡过程最长,在整个时间区间内几乎无法稳定下来,忆阻值的时域波形漂移现象很严重。当忆阻初始状态进一步增大至 $x(0) = 0.9$ 时,从数值仿真结果可看到Joglekar窗函数模型的忆阻值随着时间的演化会发生极性上的反转,这时Joglekar窗函数模型与基本模型的性能一样完全失效。

3 结论

HP TiO₂忆阻基本模型与非线性窗函数模型都是用于刻画纳米级忆阻器件的数学模型,但这些模型都受到物理器件外在边缘的限制只能部分反映该

物理器件的真实性能。通过对几种典型的 HP TiO_2 忆阻非线性窗函数模型的特点概述及其特征比较分析,可以更清晰地了解到这些忆阻线性和非线性模型的性能指标,有助于基于 HP TiO_2 忆阻模型的实际应用电路的设计与分析,有着较好的理论物理意义和工程应用价值。不同的 HP TiO_2 忆阻模型在各种忆阻应用电路中所表现出的不同电路特性尚有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Chua L O. Memristor—The missing circuit element[J]. IEEE Transaction on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507–519.
- [2] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008, 453: 80–83.
- [3] Wang X B, Chen Y R, Xi H W, et al. Spintronic memristor through spin torque induced magnetization motion[J]. IEEE Electron Device Letters, 2009, 30(3): 294–297.
- [4] Torrezan A C, Strachan J P, Medeiros-Ribeiro G, et al. Sub-nanosecond switching of a tantalum oxide memristor[J]. Nanotechnol, 2011, 22(48): 485203.
- [5] Chanthbouala A, Garcia V, Cherifi R O, et al. A ferroelectric memristor[J]. Nature Materials, 2012, 11(10): 860–864.
- [6] Kim D J, Lu H, Ryu S, et al. Ferroelectric tunnel memristor[J]. Nano Letter, 2012, 12(11): 5697–5702.
- [7] Zakhidov A A, Jung B, Slinker J D, et al. A light-emitting memristor[J]. Organic Electron, 2010, 11(1): 150–153.
- [8] Kim H, Sah M P, Yang C J, et al. Memristor emulator for memristor circuit applications[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(10): 2422–2431.
- [9] Budhathoki R K, Sah M P, Adhikari S P, et al. Composite behavior of multiple memristor circuits[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(10): 2688–2700.
- [10] Biolk Z, Biolk D, Biolková V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift[J]. Radio Engineering, 2009, 18(2): 210–214.
- [11] Joglekar Y N, Wolf S J. The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits[J]. European Journal of Physics, 2009, 30(4): 661–675.
- [12] Song Dehua, Lü Mengfei, Ren Xiang, et al. Basic properties and applications of the memristor circuit[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(11): 118101. [宋德华, 吕梦菲, 任翔, 等. 忆阻电路的性质及其应用[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 118101.]
- [13] Hu Fengwei, Bao Bocheng, Wu Huagan, et al. Equivalent circuit analysis model of charge-controlled memristor and its circuit characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(21): 218401. [胡丰伟, 包伯成, 武花干, 等. 荷控忆阻器等效电路分析模型及其电路特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(21): 218401.]
- [14] Bao Bocheng, Feng Fei, Dong Wei, et al. Voltage-current relationship and equivalent circuit implementation of parallel flux-controlled memristive circuits[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(6): 068401.
- [15] Bao Bocheng, Zou Xiang, Hu Wen, et al. Voltage-Current relationship of active memristor and frequency characteristic of active memristive circuit[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 593–597. [包伯成, 邹相, 胡文, 等. 有源忆阻器伏安关系与有源忆阻电路频率特性研究[J]. 电子学报, 2013, 41(3): 593–597.]
- [16] Wang L D, Drakakis E, Duan S K, et al. Memristor model and its application for chaos generation[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2012, 22(8): 1250205.
- [17] Buscarino A, Fortuna L, Frasca M, et al. Memristive chaotic circuits based on cellular nonlinear networks[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2012, 22(3): 1250070.
- [18] Bao B C, Xu J P, Zhou G H, et al. Chaotic memristive circuit: Equivalent circuit realization and dynamical analysis[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(12): 120502.
- [19] Bao B C, Shi G D, Xu J P, et al. Dynamics analysis of chaotic circuit with two memristors[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(8): 2180–2187.
- [20] Wu Huagan, Bao Bocheng, Feng Fei. Analysis of simple memory chaotic system and its circuit realization[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(1): 134–139. [武花干, 包伯成, 冯霏. 简单记忆混沌系统分析与电路实现[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 46(1): 134–139.]
- [21] Kim H, Sah M P, Yang C J, et al. Memristor bridge synapses[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(6): 2061–2070.
- [22] Fouda M E, Khatib M A, Mosad A G, et al. Generalized analysis of symmetric and asymmetric memristive two-gate relaxation oscillators[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(10): 2701–2708.
- [23] Chua L. Resistance switching memories are memristors[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2011, 102(4): 765–783.
- [24] Adhikari S P, Sah M P, Kim H, et al. Three fingerprints of memristor[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(11): 3008–3021.
- [25] Prodromakis T, Peh B P, Papavassiliou C, et al. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58(9): 3099–3105.
- [26] Kvatinisky S, Friedman E G, Kolodny A, et al. TEAM: Threshold adaptive memristor model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(1): 211–221.
- [27] Corinto F, Ascoli A. A boundary condition-based approach to the modeling of memristive nano-structures[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(11): 2713–2726. (编辑 赵婧)