

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2014.09.018

忆阻器的图形用户界面设计 及在交叉阵列存储中的应用^①

段书凯, 吴洲莉, 冉馨淇, 董哲康

西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715

摘要: 研究了忆阻器的电荷控制和磁通量控制模型, 构建了忆阻器 Simulink 模型, 并对其仿真结果进行特性分析。提出了一种用于图像存储的忆阻器交叉阵列, 可以实现黑白、灰度图像的存储和输出, 并设计了基于 Matlab 的图形用户界面, 通过选择和设定输入电压和图像类型、参数大小, 便能直观准确地反映出忆阻器的行为特性及在二值和灰度图像上的存储特性, 为更加方便地研究忆阻器及应用提供了有效的方法。

关 键 词: 忆阻器; Simulink 模型; 交叉阵列; 图形用户界面; 图像存储

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2014)9-0108-10

忆阻器(Memristor)的概念由 Chua 在 1971 年提出, 得名于其电阻对所通过电量的依赖性, 被认为是电阻、电容和电感之外的第 4 种基本电路元件^[4]。对电阻的时间记忆特性使其在模型分析、基础电路设计、电路器件设计和对生物记忆行为的仿真等众多领域具有广阔的应用前景^[4]。2008 年 5 月, 惠普(HP)实验室的科学家在《Nature》上撰文宣布他们成功研制出了忆阻器, 证实了 Leon O. Chua 教授预言的第 4 种基本电路元件的存在。忆阻器开始引起更多学者的研究兴趣, 并可望成为电子学、材料科学等领域研究的新热点^[4]。

忆阻器独特的性能及可观的应用前景引起了广泛而强烈的关注^[7-15]。忆阻器的出现将可能从根本上改变传统电路, 具有引发电路革命的潜质。本文对忆阻器的原理及应用进行了研究, 先分析了其理论基础, 探讨了忆阻器与电荷、磁通量的关系, 为分析忆阻器特性及应用, 建立了 Simulink 模型, 设计了一种基于 MATLAB 的忆阻器图形用户界面(GUI)。以便直观准确地观察到忆阻值随电压的变化情况、电流-电压磁滞回线以及各种参数对其行为特性的影响。利用忆阻器交叉阵列在图像处理中的应用, 对二值和多值图像的存储进行了分析。

① 收稿日期: 2013-11-15

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(教技函[2013]47 号); 国家自然科学基金(61372139, 61101233, 60972155); 西南大学本科生科技创新基金(1232004); 教育部“春晖计划”科研项目(z2011148); 留学人员科技活动项目择优资助经费(渝人社办〔2012〕186 号); 重庆市高等学校优秀人才支持计划(渝教人〔2011〕65 号); 重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(渝教人〔2011〕65 号); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDKJ2014A009, XDKJ2013B011)。

作者简介: 段书凯(1973-), 男, 重庆奉节人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息处理、人工神经网络、非线性电路理论与应用等研究。

1 忆阻器模型建立

1.1 忆阻器的电荷控制和磁通量控制模型

惠普实验室发现的忆阻器模型^[5](图1), 它由一段纳米混合半导体材料, 即 TiO_2 和 TiO_{2-x} (内部形成氧空缺的 TiO_2)以及两端的铂电极构成. 氧空位(称为掺杂层)使 TiO_{2-x} 层具有导电性, TiO_2 不含掺杂层, 可以看成一个绝缘体^[2].

忆阻器的电阻 $R_m(t)$ 是两层二氧化钛之和:

$$R_m(t) = R_{\text{off}} + (R_{\text{on}} - R_{\text{off}}) \frac{w(t)}{D} = R_{\text{off}} + (R_{\text{on}} - R_{\text{off}})x(t) \quad (1)$$

其中 R_{off} 和 R_{on} 分别是 $w(t)=0$ 和 $w(t)=D$ 时忆阻器电阻的极限值^[6], 通常 $R_{\text{on}}/R_{\text{off}}=10^2 \sim 10^3$. 如图1所示, $w(t)$ 是掺杂层厚度, D 是 TiO_2 和 TiO_{2-x} 总厚度, 其中 $x(t)=w(t)/D$. 在理想(线性杂质迁移)的模型中:

$$\bar{w}(t) = \frac{u_v R_{\text{on}}}{D} i(t) \quad (2)$$

由电荷 $q(t) = \int_{-\infty}^t i(t) dt$, 将(2)式两边积分可得

$$w(t) = \frac{u_v R_{\text{on}}}{D} q(t) + w(0) \quad (3)$$

将(3)式带入(1)式, 得到电荷控制的忆阻值公式

$$R_m(t) = R_m(0) + kq(t) \quad (4)$$

(3)式和(4)式中: $w(0)$ 是初始时刻 $t=0$ 时 $w(t)$ 的宽度; u_v 是掺杂物迁移率, $u_v=10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$; 常数 $k = \frac{(R_{\text{on}} - R_{\text{off}}) u_v R_{\text{on}}}{D^2} < 0$; $R_m(0) = R_{\text{off}} + (R_{\text{on}} - R_{\text{off}}) \frac{w(0)}{D}$.

又因物理限制条件 $R_{\text{on}} \leq R_m(t) \leq R_{\text{off}}$, 由电荷量与忆阻值的关系得:

$$\frac{R_{\text{off}} - R_m(0)}{k} \leq q(t) \leq \frac{R_{\text{on}} - R_m(0)}{k} \quad (5)$$

令

$$Q_{\text{min}} = \frac{R_{\text{off}} - R_m(0)}{k} \quad Q_{\text{max}} = \frac{R_{\text{on}} - R_m(0)}{k}$$

表示将初始状态为 $w(0)$ 的忆阻器设置为最大阻值和最小阻值需要的电荷量. 由(1)~(5)式可以得到忆阻值与通过的电荷量之间的关系, 即为电荷控制忆阻器模型:

$$R_m(t) = \begin{cases} R_{\text{off}} & q \leq Q_{\text{min}} \\ R_0 + kq(t) & Q_{\text{min}} < q < Q_{\text{max}} \\ R_{\text{on}} & q \geq Q_{\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

根据磁通量 $\varphi(t) = \int_0^t R_m(t) i(t) dt = \int_{q(0)}^{q(t)} R_m(t) dq(t)$ 的定义, 可以得到忆阻器的磁通量与电荷量之间的关系:

$$\varphi(t) = \begin{cases} R_{\text{off}}q(t) + c_1 & q \leq Q_{\text{min}} \\ \frac{k}{2}q^2(t) + R_m(0)q(t) & Q_{\text{min}} < q < Q_{\text{max}} \\ R_{\text{on}}dq(t) + c_2 & q \geq Q_{\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$c_1 = -\frac{[R_{\text{off}} - R_m(0)]^2}{2k} \quad c_2 = -\frac{[R_{\text{on}} - R_m(0)]^2}{2k}$$

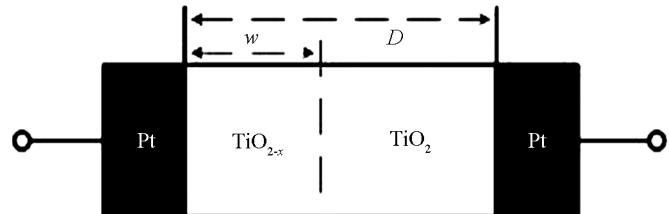


图1 忆阻器模型

将(7)式带入(6)式得到忆阻器磁通量与忆阻值的关系, 即磁通量控制忆阻器模型:

令

$$c_3 = R_{\text{off}} + c_1 = \frac{R_{\text{off}}^2 - R_{\text{m}}^2(0)}{2k} \quad c_4 = R_{\text{on}} + c_2 = \frac{R_{\text{on}}^2 - R_{\text{m}}^2(0)}{2k}$$

$$R_{\text{m}}(t) = \begin{cases} R_{\text{off}} & q < c_3 \\ \sqrt{2k\varphi(t) + M^2(0)} & c_3 \leq q < c_4 \\ R_{\text{on}} & q \geq c_4 \end{cases} \quad (8)$$

图 2(a)表示电荷与忆阻值的关系, 忆阻值随电荷的增加而减小, 直到达到最小值; 图 2(b)则表示正弦信号输入下忆阻器伏安特性是一个滞回曲线。当电压开始正向递增时, 随着流经电荷的增多, 电流增大, 电压达到最大值后, 电流开始减小, 但电流的变化一直滞后于电压的变化; 图 2(c)表明忆阻值随着磁通量的增加而逐渐减小。在低阻阶段, 忆阻值变化率较大, 反之较小, 当忆阻值达到极限时, 它将一直保持这一状态, 除非有反向电压^[1]; 图 2(d)为忆阻值与电压关系曲线。当输入电压为正时, 忆阻值随之逐渐减小, 反之, 忆阻值随之逐渐增大^[1]。

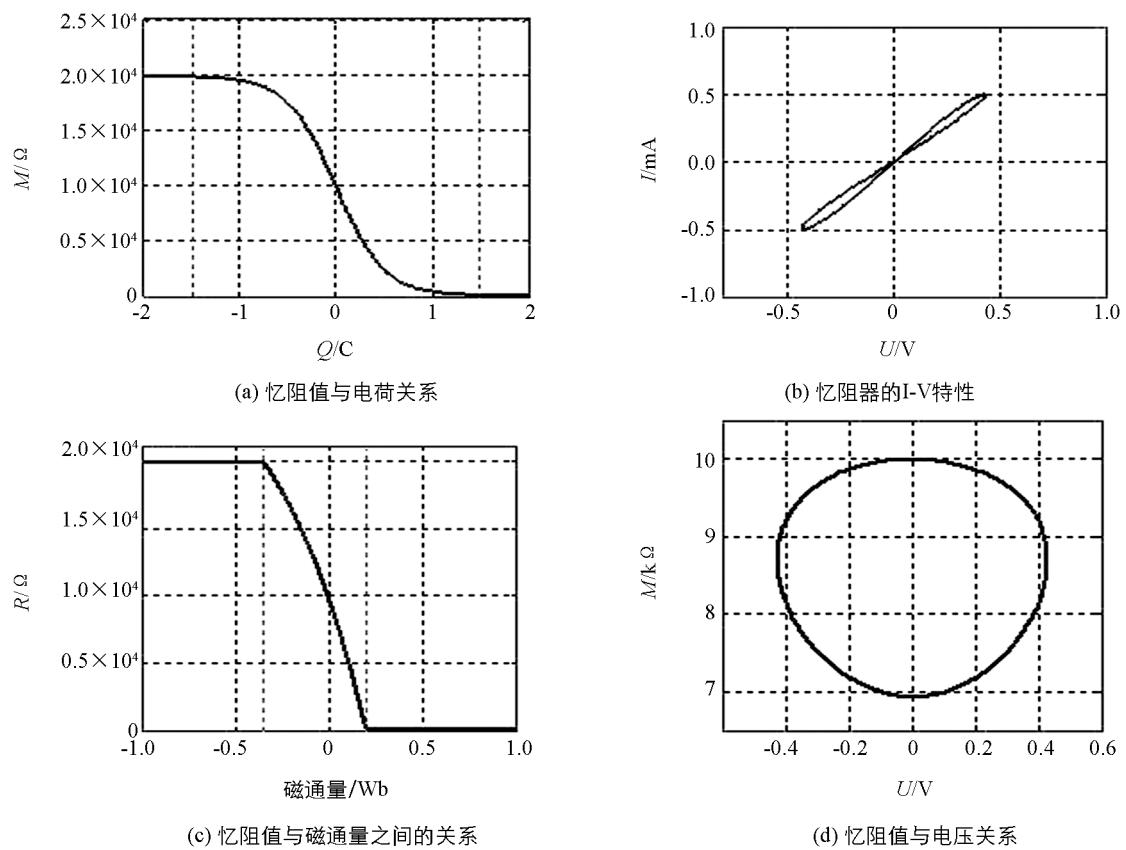


图 2 忆阻器特性关系曲线

1.2 忆阻器的 Simulink 模型构建

基于上述理论, 构建了忆阻器的 Simulink 模型(图 3)。该模型由输入信号模块(Sine Wave)、窗函数模块($f(x)$)、忆阻器基本参数模块(R_{on} , R_{off} , D)和显示模块(Out)等部分组成。其中, 窗函数 $f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p}$ 。在忆阻器为理想情况时, 窗函数 $f(x) = 1$ 。

通过构建的忆阻器 Simulink 模型, 可以观察到在输入为正弦波信号的情况下忆阻器典型的电流—电压滞后环, 忆阻器的磁滞效应得以验证。同时, 还能看到忆阻值随电荷的变化($Q-R$)、电荷随磁通量的变化(flux-Q)、忆阻值随电压的变化($v-R$)、电流随电压的变化($v-i$)等关系的仿真图像, 仿真结果见图 4。

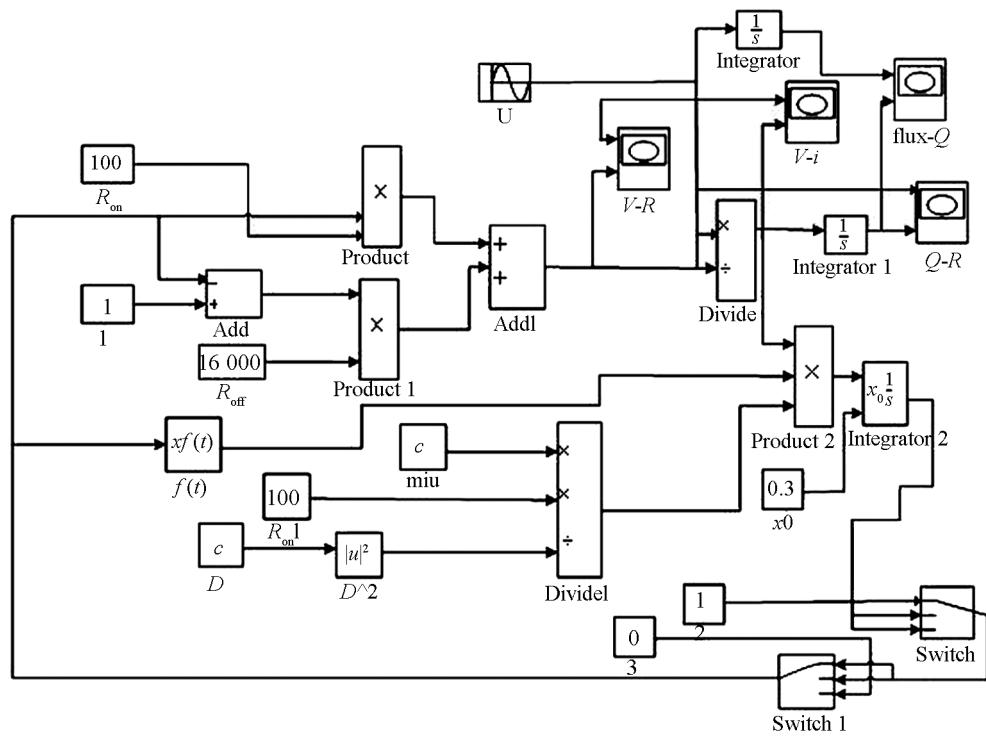


图3 忆阻器的Simulink模型

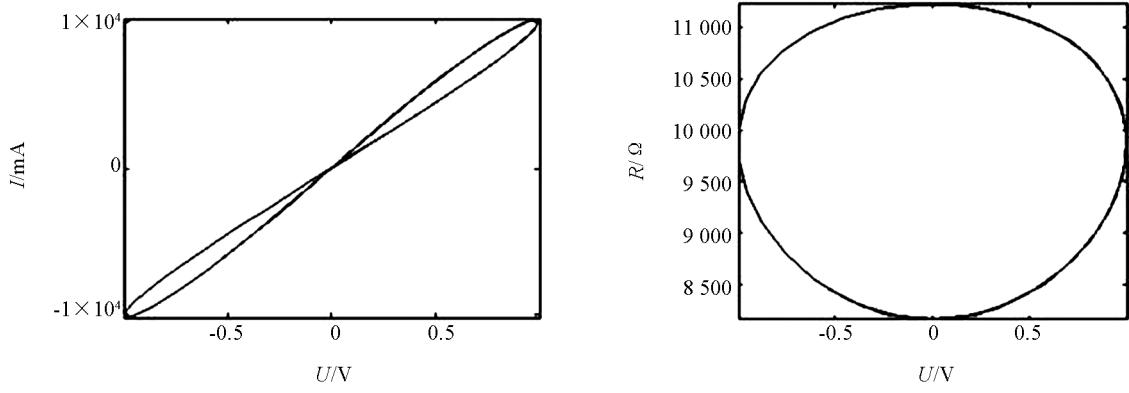


图4 忆阻器Simulink仿真结果

2 图形用户界面(GUI)设计及忆阻器的应用分析

2.1 忆阻器的图形用户界面(GUI)

本文设计了基于 Matlab 的忆阻器图形用户界面(图 5), 可以更加直观地显示忆阻器的特性。界面主要包括以下几个方面: 图形显示窗口、输入波形、输出曲线、参数选择、图像存储类型选择及模式选择等。在该界面上, 上端为输入信号显示窗口和输出信号显示窗口, 界面左边有二值和灰度图像选择按钮, 选择后可以通过显示窗口反映出忆阻器的存储特性。界面左下端为输入电压信号选择, 根据不同的选项可以选择正弦波信号、方波信号、正弦平方信号、先正后负正弦平方信号和先正后负方波信号。界面下端中部为模式选择, 分为经典模式和用户自定义模式。在每个模式中设有详细的选项供用户自行修改参数大小和类型, 主要包括: 未掺杂时忆阻器电阻 R_{off} 、完全掺杂时忆阻器电阻 R_{on} 、掺杂层厚度与总的二氧化钛层厚度比值初始值 x_0 , 信号频率 Freq、幅度 $|AM|$ 等。界面下端右部为显示选项, 可以根据

选项类型设置显示类型.

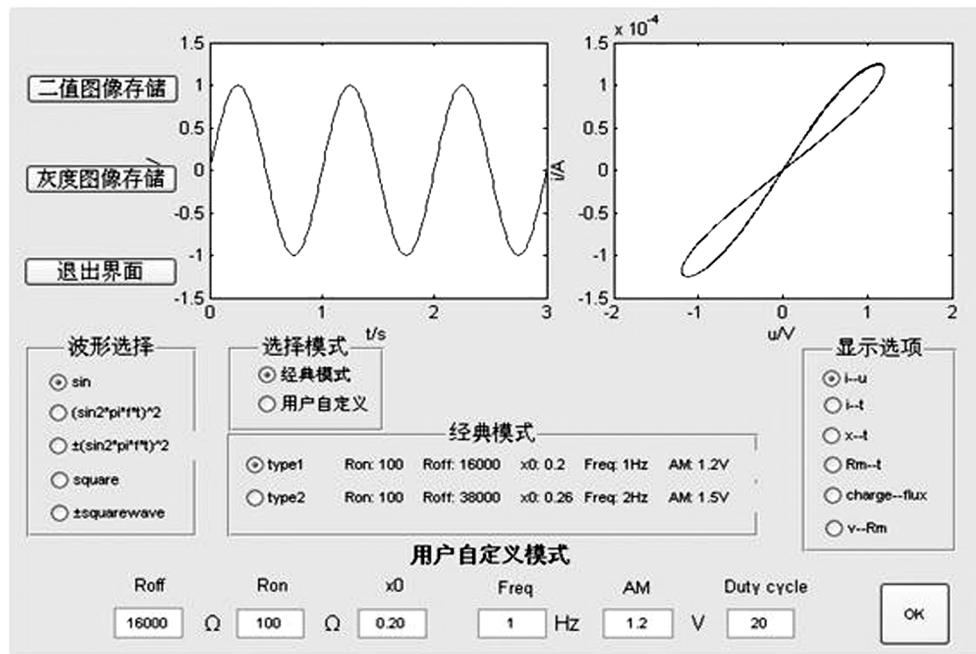


图 5 基于 MATLAB 的忆阻器的图形用户界面

该界面特点可以分为五类: ① 输入电压信号可以自由切换. 选定输入信号后, 便可根据右下端的显示窗口选项选择需要观察的曲线图像, 包括: 电流 i 与电压 v , 状态变量 x 、电流 i 与时间 t 及电荷 $charge$ 与磁通量 $flux$ 等的关系曲线; ② 输入电压信号与忆阻器的参数之间可以灵活调节, 并且可以根据用户的需要进行设定; ③ 提供了两种典型的输入信号和忆阻器模型的参数, 在这两组参数下可以观察到忆阻器的特性曲线; ④ 实现了二值和灰度图像存储和输出功能, 利用输入和显示窗口能够形象地观察到忆阻器交叉阵列的存储特性; ⑤ 具有可维护性. 界面是基于 MATLAB 的 GUI 实现的, 用 MATLAB 编写程序, 可读性强, 维护方便, 可编译连接为可执行文件. 也可以根据忆阻器的发展, 对该模型进行扩展和升级.

2.2 忆阻器图形用户界面仿真结果和应用分析

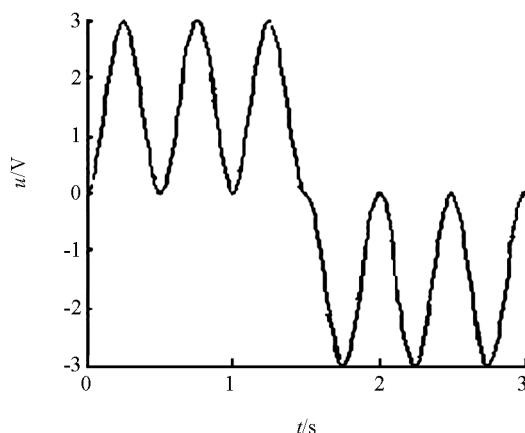
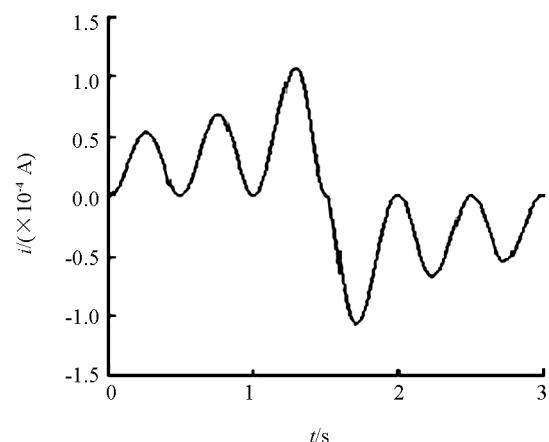
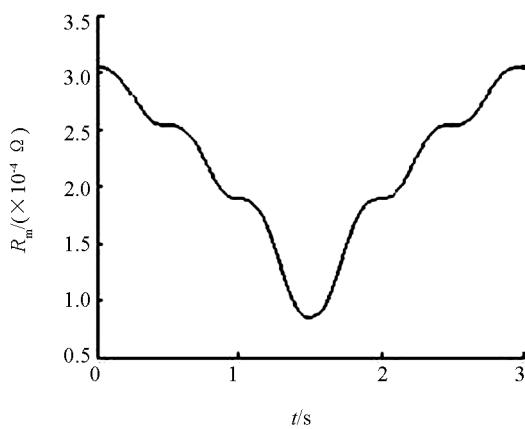
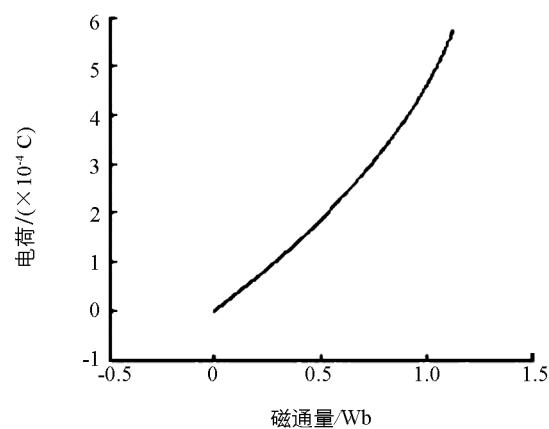
该图形用户界面可以对惠普忆阻器模型进行仿真, 并能展示出忆阻器的各种特性曲线, 包括典型的电压—电流磁滞现象和二值、灰度图像的存储及输出. 首先, 根据界面显示的关系曲线图分析忆阻器在两种工作状态下的实验仿真.

当信号 $v(t) = \pm U_0 (\sin \omega t)^2$ 输入时(图 6), 设定输入电压的频率 $f = 2$ Hz 和幅度 $U_0 = 3$ V, 并且使忆阻器的内部状态变量 x 在 $(0, 1)$ 范围内变化. 当输入电压为正值时, x 从 x_0 逐渐增加, 由忆阻器工作原理可知, R_m 会随着 x 的变大而减小, 直到减小到最小值 17.6 k Ω . 这样, 电流的幅度就会不断地变大, 但是电流的变化始终滞后于电压的变化, 就出现了电压—电流磁滞现象. 当输入负电压时, x 逐渐减小, R_m 便会由小增大, 使得电流的幅度依次减小.

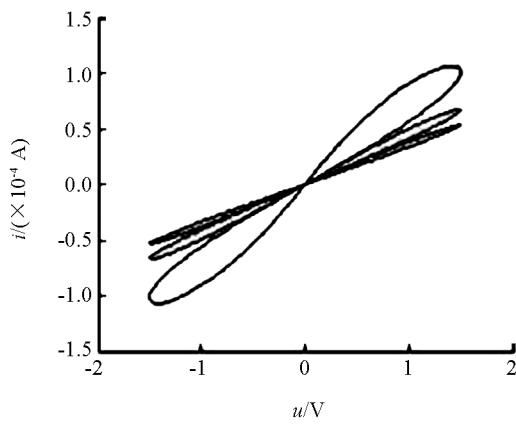
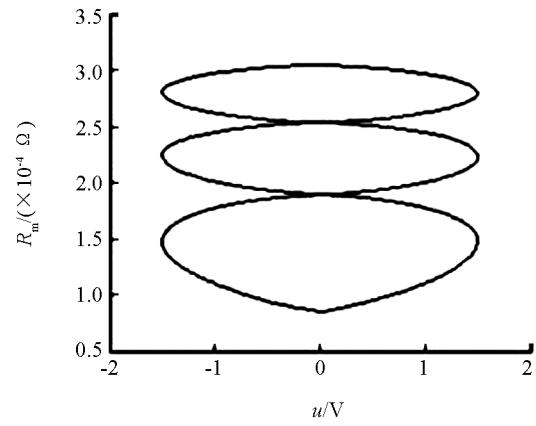
当输入的电压为先正后负的方波时(图 7), 电压幅度 $U_0 = 3$ V, 频率 $f = 1$ Hz, 占空比为 20%. 连续输入正电压, 忆阻器内部状态变量 x 从 x_0 呈阶梯状增加, R_m 随之逐渐减小, 电流幅度不断增大. 当 x 增大到 1 的时候, R_m 达到最小值, 此时忆阻器就相当于一个普通电阻, 电流和电压关系成正比. 接下来连续输入负电压, x 逐渐减小到 x_0 , R_m 随之增大到初始值, 使得电流的幅度也逐渐减小.

通过对建立的忆阻器 Simulink 模型输入不同的电压脉冲, 可以观察到如图 4 所示的忆阻器阻值变化规律. 利用给忆阻器施加宽度相同幅度不同的电压脉冲, 忆阻值会产生相应变化的原理实现二值图像的存储; 利用给忆阻器施加幅度相同宽度不同的电压脉冲, 忆阻值会有对应改变的原理实现灰度和彩色图像的存储. 基于这个特性, 曾提出应用于图像处理的忆阻器交叉阵列. 本文设计的基于 MATLAB 的忆阻器图

形用户界面中,利用到忆阻器交叉阵列在图像处理中的应用。下面主要介绍忆阻器交叉阵列对二值图像和灰度图像的存储和输出计算机仿真结果。

(a) 输入电压 u 波形(a) 输出电流 i 曲线(c) 忆阻器电阻 R_m 曲线

(d) 电荷与磁通量关系

(e) 电流 i 与电压关系

(f) 忆阻值与电压关系

图 6 正负正弦波输入下忆阻器 GUI 的仿真结果

1) 二值图像的存储与输出

二值图像存储和输出步骤如下:

步骤 1 输入一幅二值图像,可以得到该图像的矩阵。

步骤 2 将二值图像每个像素点的值(0 或 1)转化为对应的写电压(0 和 1 值分别对应写电压 0.5 V 和 1 V),并将该电压施加给交叉阵列中对应处的忆阻器。

步骤 3 在对忆阻器施加对应电压的作用下, 忆阻值会发生变化, 写操作结束后, 二值图像以最后记录的忆阻值的形式存储到忆阻器交叉阵列中.

步骤 4 给交叉阵列中的忆阻器施加 0.1 V 的输入电压(读电压), 得到对应的读电流.

步骤 5 设置阈值电流(0.03 mA), 将步骤 4 得到的电流与阈值电流相比, 确定读电流对应的像素值(小于阈值的读电流对应像素值 0, 大于阈值的读电流对应像素值 1).

步骤 6 将读出的图像显示出来, 完成二值图像的输出. 仿真结果见图 8.

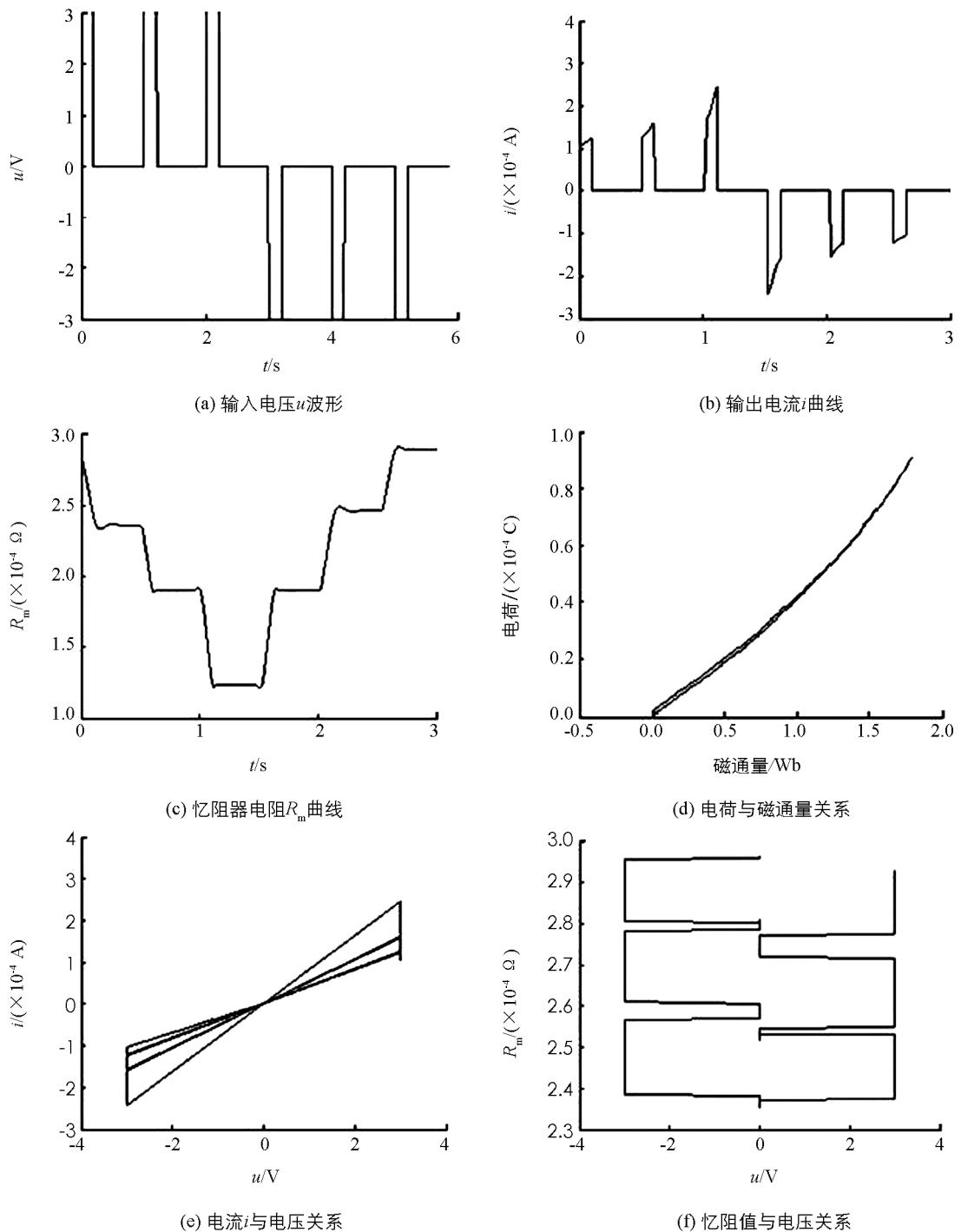


图 7 正负方波输入下忆阻器 GUI 的仿真结果

2) 灰度图像存储和输出

灰度图像存储和输出的步骤如下:

步骤1 设置忆阻器阻值等级,使其分别对应灰度图像中不同的像素值. 给忆阻器施加一个1 V 直流输入电压(写电压), 控制电压的持续时间, 以实现256种不同宽度的电压脉冲, 从而得到256个对应不同灰度值的忆阻值.

步骤2 设置比较电流. 给上述不同的忆阻值施加0.1 V 输入电压(读电压), 得到256个比较电流, 对应256个灰度值.

步骤3 输入一幅灰度图像, 得到该灰度图像的矩阵.

步骤4 根据不同的像素值, 给交叉阵列中对应点处的忆阻器施加不同宽度的写脉冲电压(幅度为1 V), 得到对应的忆阻值. 灰度图像以忆阻值的形式存储到忆阻器交叉阵列中.

步骤5 给交叉阵列中的忆阻器施加0.1 V 的输入电压(读电压), 获得对应的读电流. 当电压小于写电压阈值时, 不会改变忆阻器已有的阻值, 忆阻器可以看作理想的定值电阻.

步骤6 将读电流与步骤2中设置的比较电流进行比较, 确定读电流对应的像素值.

步骤7 将读出的图像显示出来, 完成灰度图像的输出. 仿真结果见图9.

综上, 可以看出忆阻器的电流与电压之间具有滞后关系, 会出现磁滞回线; 忆阻器的阻值总是大于零, 忆阻值会随着外加输入信号的变化而变化, 但是外加输入信号消失后, 忆阻值会被自动保存下来; 而调节忆阻器自身的参数, 或调节输入信号的幅值AM和频率f, 都能使忆阻器达到最大和最小值^[2]. 忆阻器交叉阵列通过改变施加电压改变忆阻器的阻值状态, 实现存储操作; 存储灰度图像时, 不同宽度的脉冲可通过控制写操作的时间获得.

图8为忆阻器交叉阵列用于存储二值图像的GUI仿真结果. 输入一个典型的二值图像, 通过对对应忆阻器分别施加0.5 V和1 V的写电压, 可以比较容易的得到忆阻器的高、低阻值, 从而达到存储图片的效果; 最后对忆阻器施加读电压, 读出该二值图像并显示出来, 便得到如图8所示的输出结果.

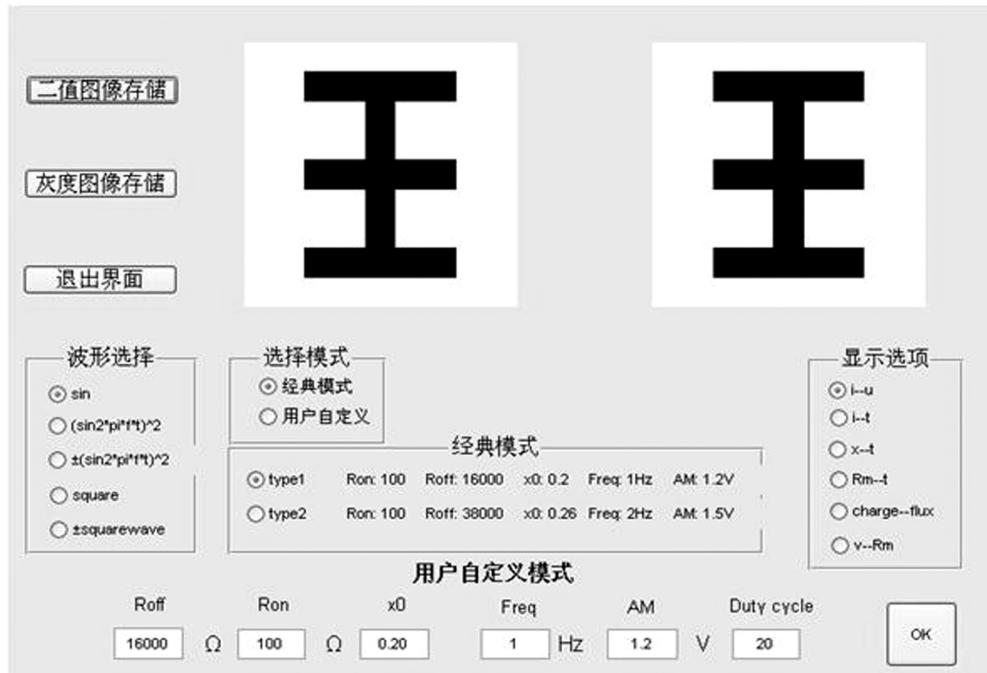


图8 忆阻器存储二值图像 GUI 仿真结果

对于多值MRRAM, 有256级灰度值需要存储, 所以要严格控制对应的写电压大小; 给交叉阵列中的忆阻器施加的读电压, 应小于写电压阈值, 保证不会改变忆阻器已有的阻值, 以便得到更加准确的输出结果. 如图9所示, 当将图9(a)所示的灰度图像作为输入时, 可得到如图9(b)所示的仿真输出结果, 可以看出输出结果与输入一致; 仿真结果的准确性验证了多值MRRAM存储灰度图像的有效性, 也为灰度图像

处理提供了新的方案。

GUI 仿真结果表明, 忆阻器能够以不同的忆阻值存储不同的输入信息进而实现二值和多值信息的存储, 验证了忆阻器交叉阵列用于图像处理的可行性^[1]。



(a) 灰度图像输入



(b) 灰度图像输出

图 9 忆阻器存储灰度图像 GUI 仿真结果

3 结 论

本文分析了惠普实验室的忆阻器磁通量控制模型, 探讨了电荷与磁通量的关系的变化范围, 并建立了忆阻器的 Simulink 模型, 验证了典型的磁滞效应等性质; 提出了忆阻器交叉阵列, 可以应用于二值和多值图像的存储; 设计了基于 MATLAB 的忆阻器图形用户界面, 可以通过改变忆阻器模型的参数或者输入信号的参数以及图像类型, 反映各种电路变量之间的关系图像和忆阻器的图像存储特性。界面操作方便, 显示直观, 并具有可维护性和拓展性, 为忆阻器的研究提供了一个方便的演示平台。

参考文献:

- [1] 段书凯, 胡小方, 王丽丹, 等. 忆阻器阻变随机存取存储器及其在信息存储中的应用 [J]. 中国科学, 2012, 42(6): 754—769.
- [2] 胡柏林, 王丽丹, 黄艺文, 等. 忆阻器 Simulink 建模和图形用户界面设计 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(9): 1673—9868.
- [3] 胡小方, 段书凯, 王丽丹, 等. 忆阻器交叉阵列及在图像处理中的应用 [J]. 中国科学, 2011, 41(4): 500—512.
- [4] CHUA L O. Memristor-The Missing Circuit Element [J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507—519.
- [5] WANG Li-dan, DRAKAKIS EMMANUEL, DUAN Shu-kai, et al. Memristor Model and Its Application for Chaos Generation [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2012, 22(8): 1250205—1—1250205—14.
- [6] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, et al. The Missing Memristor Found [J]. Nature, 2008, 453: 80—83.
- [7] CHEN Y, WANG X. Compact Modeling and Corner Analysis of Spintronic Memristor [C] // IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures, San Francisco, CA. 2009: 7—12.
- [8] PERSHIN Y V, VENTRA M D. Spin Memristive Systems: Spin Memory Effects in Semiconductor Spintronic [J]. Physical Review B, 2008, 78(11): 3309—3312.
- [9] LIU S Q, WU N J, IGNATIEV A. Electric-Pulse-Induced Reversible Resistance Change Effect in Magneto Resistive Films [J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(19): 2749.
- [10] BUOT F A, RAJAGOPAL A K. Binary Information Storage at Zero Bias in Quantum-Well Diodes [J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(9): 5552—5561.

- [11] GERGEL-HACKETT N, HAMADANI B, DUNLAP B. A Flexible Solution-Processed Memristor [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, 30(7): 706–708.
- [12] ZAKHIDOV A A, Jung B, Slinker J D. A Light-Emitting Memristor [J]. *Organic Electronics*, 2010, 11(1): 150–153.
- [13] DRISCOLL T, KIM H T, CHAE B. Phase-Transition Driven Memristive System [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(4): 043503.
- [14] BIOLEK Z, BIOLEK D, BIOLKOVÁ V. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift [J]. *Radioengineering*, 2009, 18(2): 210–214.
- [15] DRAKAKIS E M, YALIRAKI S N, BARAHONA M. Memristors and Bernoulli Dynamics [C] // International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and Their Applications, Berkeley, CA, USA, 2010.
- [16] 高士咏, 段书凯, 王丽丹. 忆阻细胞神经网络及图像去噪和边缘提取中的应用 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(11): 1673–9868.

The Design of a Graphical User Interface for a Memristor and Its Application in Memory of Memristive Crossbar Array

DUAN Shu-kai, WU Zhou-li, RAN Xin-qi, DONG Zhe-kang

School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: A memristor is a passive nonlinear two-terminal circuit element with memory capacity. Its resistance can be changed by controlling the current or voltage. In this paper, the charge-controlled model and the magnetic flux-controlled model of HP memristor are studied. A Simulink model is built and the characteristics of the memristor are analyzed by the corresponding simulation results. A memristor-based crossbar array is proposed, which can realize storage and output for binary, grayscale and color images. A graphical user interface for studying the memristor's features is designed based on Matlab software. Some input signals, pictures and parameters can be chosen or set to observe the corresponding output. This is an effective method for studying memristors and their application.

Key words: memristor; Simulink model; crossbar array; graphical user interface; image storage

责任编辑 潘春燕

