

一种改进的忆阻器的 SPICE 模型及其仿真

段宗胜, 甘朝晖, 王 勤

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 忆阻器(Memristor)是一种具有记忆功能的无源电子元件,其概念由蔡少棠于 1971 年提出.2008 年 HP 实验室发现了一种基于电阻开关的二端非易失记忆器件,从而证实了忆阻器的存在.在研究 HP 实验室发现的忆阻器的基础上,分析了目前一些忆阻器模型的优缺点,设计了一种改进的忆阻器模型.经过 PSPICE 仿真验证,该模型成功地模拟了 HP 实验室发现的忆阻器物理模型的基本特性.

关键词: 忆阻器;模型;仿真

中图分类号: TM50

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)08-0193-07

An Improved Memristor SPICE Model and Simulation

DUAN Zong-sheng, GAN Zhao-hui, WANG Qin

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Memristor is a passive electronic device with a non-volatile memory, which is proposed by Leon Chua in 1971. A 2-terminal non-volatile memory device based on resistance switching was found in HP labs in 2008, and that proved the existing of memristor. In this paper we analyze two modeling methods of memristor and then design an improved model of memristor based on the physical model of memristor that found by HP labs. It can be found that the characteristics of the improved model correspond to the physical model of HP labs by PSPICE simulation.

Key words: memristor; model; simulation

1 引言

在电路理论中有四种基本变量:电流 i 、电压 v 、电荷 q 和磁通量 ϕ ,从数学上分析,其中任意两个变量之间的关系存在着六种可能性,即

$$\left\{ \begin{array}{l} dv = R \cdot di \\ d\phi = L \cdot di \\ dq = C \cdot dv \\ d\phi = v \cdot dt \\ dq = i \cdot dt \\ \phi = ?q \end{array} \right. \quad (1)$$

以上六种变量关系中,前面的五种关系已经很早以前就被发现了,其中 R 、 L 和 C 分别是现有的三种基本电路元件:电阻、电感和电容,但是磁通量 ϕ 和电荷 q 之间的关系迟迟未能确定.美国加州大学伯克利分校的蔡少棠教授^[1]猜想磁通量 ϕ 和电荷 q

之间的关系为 $d\phi = Mdq$,其中 M 被他定义为忆阻值.忆阻是一个与电阻具有相同量纲的物理量,在数值上等于施加在忆阻器两端的电压和流经忆阻器的电流之比.2008 年 HP 实验室发现了一种具有记忆功能的纳米双端电阻^[2],其电气特性与蔡少棠教授预测的忆阻器特性相符,从而证实了第四种基本电路元件——忆阻器的存在.忆阻器实际上就是一个具有记忆功能的非线性电阻^[3],这一特性使其非常适合用于制造非易失性存储设备,也为开发具有类似人类大脑处理、存储信息能力的模拟式计算机铺平了道路.

目前忆阻器仅存在于实验室环境中,大批量的工业化生产还在进一步研究中,这一现状制约了忆阻器的应用研究.因此,根据忆阻器实际的物理特性建立忆阻器的数学模型则成为分析和研究忆阻器的必要条件.

采用电阻、电容和电感等无源电子元件以及受控电源构造忆阻器的 SPICE 模型是目前常用的忆阻器建模方法之一^[4-8]. 该方法利用储能元件电容和受控电源构成的积分电路对通过忆阻器的电流进行积分, 得到电容两端的电压, 该电压正比于流经忆阻器的电荷, 也间接地反映了忆阻器阻值的变化. 尽管通过这种方法得到的忆阻器 SPICE 模型的 $I-V$ 曲线, q/ϕ 曲线以及频率特性等与 HP 实验室发现的忆阻器的物理模型大致相符, 但是, 这些模型仅仅简单地假设忆阻器的阻值与流经器件的电荷成正比, 因而使得这类模型无法描述忆阻器在“高电压”时所体现出的“激活”特性^[9].

Y. V. Pershin 和 M. Di Ventra^[9-10] 提出了一种使用忆阻器实现“可编程”模拟电路的方法. 他们借助数字电位器的概念构造了一种忆阻器模型, 该模型在器件两端的电压低于阈值电压时表现为普通的模拟电路元件, 在器件两端的电压高于阈值电压时表现出忆阻特性, 利用幅值高于阈值电压的电压信号去改变忆阻器的状态可以实现“可编程”电路. 但是建立在数字电位器基础上的忆阻器模型, 其可变化的忆阻值受电位器的精度限制, 而且与忆阻器阻值非线性变化的特点不符.

为了解决上述方法的诸多不足, 本文提出了一种新的忆阻器模型, 在 Zdeněk BIOLEK 等^[4-5] 提出的 SPICE 模型基础上引入了阈值电压, 当忆阻器两端电压低于阈值电压时, 忆阻器状态变化很小或者基本不变, 当忆阻器两端电压高于阈值电压时, 忆阻器状态发生改变. 通过 PSPICE 仿真, 发现此模型的忆阻值呈非线性连续变化, $I-V$ 特性和频率特性等与 HP 实验室发现的忆阻器的物理模型相符.

2 忆阻器的物理模型与基本特性

定义如下一个方程组来描述忆阻器:

$$V(t) = R(w, I, t)I(t) \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = f(w, I, t) \quad (3)$$

式中, $V(t)$ 表示忆阻器两端的电压, $I(t)$ 表示通过忆阻器两端的电流, w 表示忆阻器的状态变量, R 为一个标量, 叫做忆阻抗, 单位为欧姆(Ω).

根据式(2)和(3), HP 实验室的 Strukov D. B. 等人提出了一种二端电子器件的物理模型, 在状态变量 w 的特定区间内, 其特征与理想忆阻器相似^[2].

该模型如图 1 所示, 在两金属电极之间为金属

氧化物半导体材料, 假设该半导体材料薄膜厚度为 D . 在半导体薄膜中存在一个含高浓度掺杂物的区域(即掺杂区), 其阻值很小, 剩余的区域掺杂物浓度较低(即非掺杂区), 阻值很大. w 为状态变量, 表示掺杂区的长度, 其范围为 $[0, D]$. 当给忆阻器施加了一个外部偏置电压时, 掺杂区和非掺杂区的边界会随着带电杂质的漂移而移动^[2]. 当 $w/D=1$ 时, 整个器件均为掺杂区, 设此时忆阻器的阻值为 R_{on} ; 当 $w/D=0$ 时, 整个器件均为非掺杂区, 设此时忆阻器的阻值为 R_{off} . 通过 w/D 的变化可以反映出忆阻器阻值的变化, 由此可以得到

$$R_M(w) = R_{on} \cdot \frac{w}{D} + R_{off} \left(1 - \frac{w}{D}\right) \quad (4)$$

$$v(t) = R_M(w)i(t) \quad (5)$$

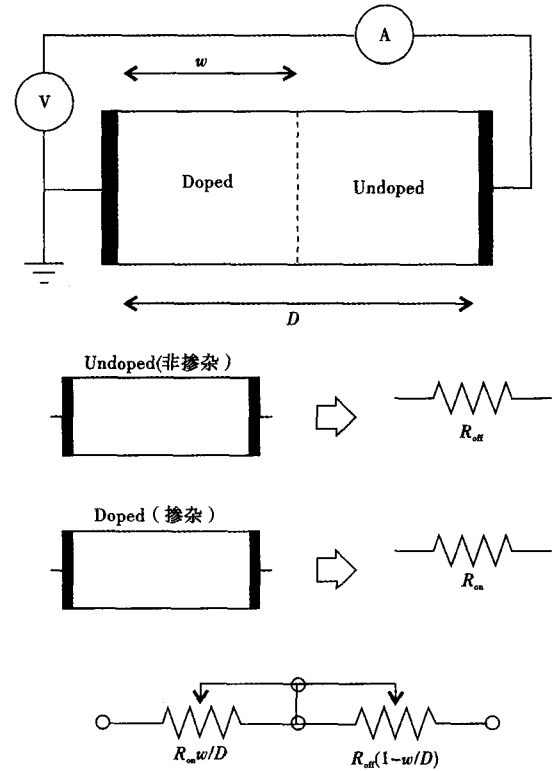


图 1 忆阻器的物理模型

Strukov D. B. 等人发现, 在该物理模型中, 当掺杂区和非掺杂区的边界靠近忆阻器两端的金属电极(即 w 接近 0 或者 D)时, 杂质的迁移会受到明显的抑制. 在这种情况下, 需要更多的电荷或者更强的电场才能使掺杂区和非掺杂区的边界到达忆阻器任一端的金属电极. 由于杂质迁移具有这种非线性的特点, 使得忆阻器的阻值呈非线性变化.

在忆阻器两端施加一个正弦电压激励 $v(t) = v_0 \sin(\omega_0 t)$ 时, 电流响应曲线如图 2 所示, 由于忆阻

器的阻值发生变化,其电流曲线和电压曲线不会在同一时刻到达峰值.图 3 中,忆阻器的 $I-V$ 曲线为一条滞回曲线,当外加激励信号的频率提高 10 倍时,其 $I-V$ 曲线近似为一条直线,此时忆阻值基本不变.这是因为忆阻器的杂质迁移速率受其材料限制,在外加“高频”激励信号的一个周期内,忆阻器没有充分的时间去调整阻值的变化,故而忆阻器此时表现为普通的电阻元件.

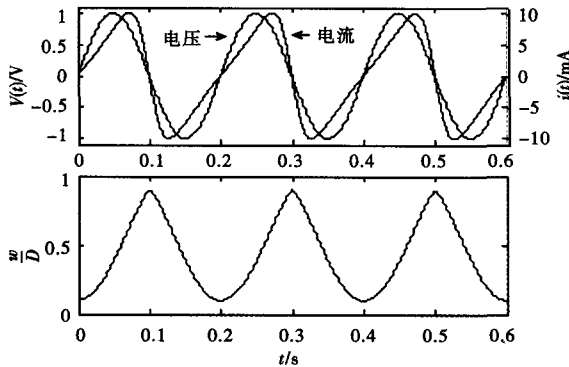


图 2 电压、电流和 w/D 的变化曲线

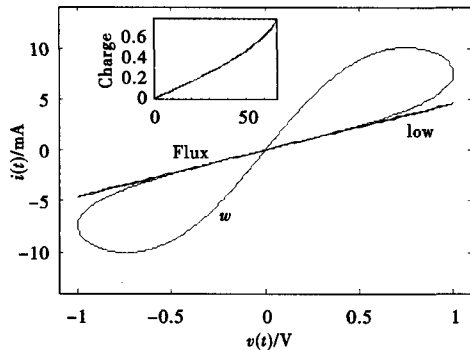


图 3 忆阻器的 $I-V$ 曲线

3 忆阻器仿真模型分析

在 HP 实验室发现忆阻器之后,许多研究忆阻器基本特性及其仿真模型的论文开始出现.利用现有模拟电子元件、受控电源和微控制器等组成的复杂电路去模拟忆阻器的基本电气特性,是目前构造忆阻器仿真模型的主要方法.

3.1 基于电容和受控电源的忆阻器模型

使用电容和受控电源的忆阻器模型较为常见.尽管具体的实现方法略有不同,但它们的主要结构基本类似,本文仅以 Zdeněk BIOLEK 等人提出的模型进行详细分析.

由 HP 实验室的物理模型可知,掺杂物分布率

w/D 的变化反映着忆阻器阻值的变化.令 $x = \frac{w}{D}$,

则掺杂区和非掺杂区的边界漂移速率 $\frac{dx}{dt}$ 取决于掺杂区的阻抗、通过忆阻器的电流以及其他因素^[4],即:

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot i(t) \cdot f(x), \quad k = \frac{\mu_v R_{on}}{D^2} \quad (6)$$

式中, $\mu_v = 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ 表示杂质平均移动速率,其大小与金属氧化物半导体材料有关. $f(x)$ 为窗函数,用于表征当 x 接近 0 或者 1 时忆阻器内部杂质的非线性迁移情况.

根据式(5)和(6),Zdeněk BIOLEK 等人设计了一种忆阻器模型,其方框图^[4]如图 4 所示,忆阻器的记忆效应是通过一个带反馈的积分器来实现的,通过改变掺杂区和非掺杂区的边界位置 x 来控制忆阻器的阻值变化,忆阻器中杂质的非线性漂移特性是通过窗函数 $f(x)$ 来实现的.

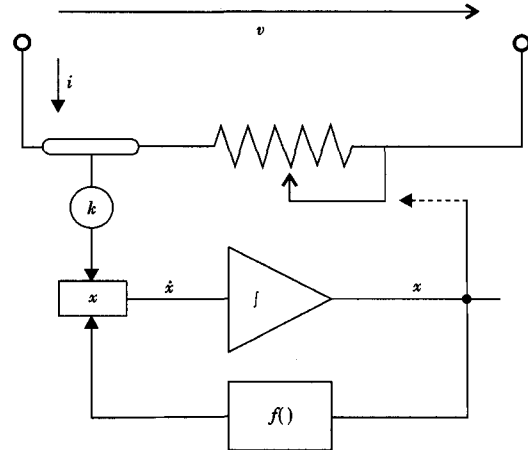


图 4 忆阻器仿真模型的方框图

根据方框图可以得到忆阻器的 SPICE 模型,如图 5 所示,忆阻器两端电压为 V_{mem} ,通过忆阻器的电流为 I_{mem} ,由此可以得到忆阻器的磁通量 E_{flux} 和流经忆阻器的电荷 E_{charge} .电容 C_x 两端的电压为 V_{Cx} , V_{Cx} 等于受控电流源 $kI_{mem}f(V_{Cx})$ 对时间的积分,令边界位置 $x = V_{Cx}$,则边界位置的初始值 x_0 等效于电容 C_x 的初始电压,其大小由忆阻器的初始阻值 R_{init} 决定.忆阻器的阻值 R_{MEM} 等于 R_{off} 与受控电压源 E_{mem} 之和,而 $E_{mem} = -\Delta R \cdot V_{Cx}$,因此可以得到:

$$R_{MEM} = R_{off} - x \cdot \Delta R, \quad \Delta R = R_{off} - R_{on} \quad (7)$$

$$x_0 = \frac{R_{off} - R_{init}}{\Delta R} \quad (8)$$

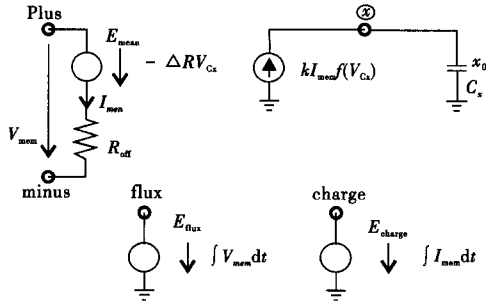


图5 忆阻器的 SPICE 模型

根据上述原理得到的忆阻器仿真模型,其电气特性与 HP 实验室提出的物理模型大致相符,Zdeněk BIOLEK 等人认为,忆阻器是一种纳米级器件,很小的电压即可以产生较大的电场,并导致粒子迁移呈现出明显的非线性特点^[2,4],但是 Zdeněk BIOLEK 并没有进一步分析杂质迁移所需的电场强度.而从图 3 中我们可以发现,当电压处于 $[0, 0.5]$ 区间时, $I-V$ 曲线的斜率(即忆阻器的电导)变化很小甚至基本不变,而在区间 $[0.5, 1]$ 内, $I-V$ 曲线的斜率呈非线性变化.为了解释这一现象,Y. V. Pershin 等人提出了一种具有“激活”特征的模型^[9,11].此外,Strukov D. B. 等人在研究 TiO_2 忆阻器内部杂质的迁移特性时发现:当忆阻器两端的电压较低时,忆阻器的状态变化呈指数衰减^[9,12],此时杂质的迁移率很低;随着电压的增大,杂质迁移率逐渐增大,忆阻器的状态变化也随之加剧.因此,他们认为利用杂质的这种非线性迁移特性可以很好地解释忆阻器的“激活”特征.

3.2 基于数字电位器的忆阻器模型

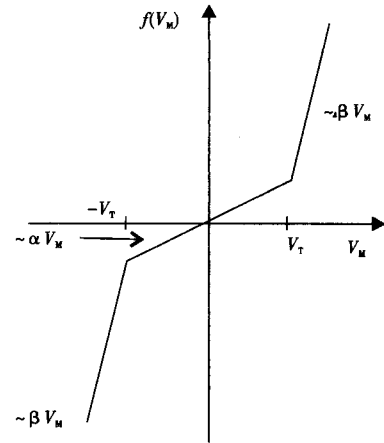
为了进一步分析这种与电压有关的“激活”特性,Y. V. Pershin 和蔡少棠等人在文献[13]中分析了一种压控型忆阻器,该忆阻器的阻值 R_M 在极小值 R_1 和极大值 R_2 之间变化,忆阻的变化率由函数 $f(V_M)$ 决定.

$$f(V_M) = \beta V_M + 0.5(\alpha - \beta) \times [|V_M + V_T| - |V_M - V_T|] \quad (9)$$

$$\dot{x} = f(V_M) \cdot \theta(x - R_1) \theta(R_2 - x) \quad (10)$$

式(9)和(10)中, x 为忆阻器的状态变量, V_M 为施加在忆阻器两端的电压, V_T 为阈值电压, α 和 β 为常量, θ 为阶跃函数.如图 6 所示,当 $|V_M| < V_T$ 时,忆阻器的状态函数 $f(V_M)$ 的斜率由 α 决定;当 $|V_M| > V_T$ 时,忆阻器的状态函数 $f(V_M)$ 的斜率由 β 决定.

令 $R_M = x$,即可以得到阻值变化与电压的关

图6 函数 $f(V_M)$ 曲线图

系.根据这种关系,Y. V. Pershin 等人提出了一种基于数字电位器的忆阻器模型,当外加电压低于阈值电压时,忆阻器表现为普通的电阻元件;当外加电压高于阈值电压时,忆阻器的阻值发生改变.他们将一种能使阻值发生变化的脉冲电压定义为忆阻器的控制信号,每一个脉冲信号改变一次忆阻器的阻值,利用这种控制信号可以改变忆阻器的阻值.该忆阻器模型的结构如图 7 所示,由数字电位器、模数转换器和微控制器组成,其中模数转换器用于采集忆阻器两端的电压 V_M ,电位器的阻值 R_M 由微控制器根据式(10)计算得到.

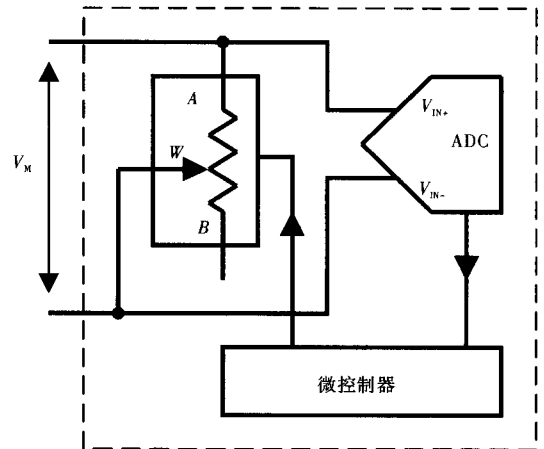


图7 基于数字电位器的忆阻器仿真模型结构图

尽管该模型可以近似地模拟忆阻器的一些特性,但是由于数字电位器的阻值是一个离散量,其精度有限,使得忆阻器模型的阻值呈离散变化,这一点与 HP 实验室提出的物理模型中忆阻器阻值变化的特点不符.

4 改进的模型原理及其特性

综合前面对忆阻器基本特性的分析,本文认为:存在某一阈值电压 V_T ,当忆阻器两端的电压超过 V_T 时,忆阻器的阻值呈非线性变化,此时忆阻器处于“激活”状态;当忆阻器两端的电压低于 V_T 时,忆阻器的阻值变化很小或者基本不变,此时忆阻器处于“未激活”状态.因此,可以建立一种带有阈值电压的 SPICE 模型来模拟忆阻器的“激活”特性.

由于忆阻器阻值的变化率与杂质迁移速率成正比,当忆阻器两端的电压较低,忆阻器的阻值变化率呈指数减缓^[12],由此可见杂质迁移速率与忆阻器两端的电压有关.

当忆阻器两端电压小于阈值电压时,杂质迁移速率很小甚至为 0,即此时器件两端的电场不足以使杂质发生大规模迁移;当忆阻器两端电压大于阈值电压时,电场随之不断增强,杂质迁移速率开始呈指数增加;当杂质迁移速率增加到一定程度时达到极限速率 μ , μ 的大小与忆阻器的材料有关.将这一使杂质发生大规模迁移的临界电场所对应的电压定义为阈值电压 V_T .为了便于计算和建模,可以将杂质迁移速率简化为以下表达式:

$$\mu_v = \delta(|V_M| - V_T) \cdot \mu$$

$$\text{其中 } \delta(j) = \begin{cases} 1, & j > 0 \\ 0, & j < 0 \end{cases} \quad (11)$$

由式(6)和(11)可以得到掺杂区和非掺杂区边界的漂移速率:

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot i(t) \cdot f(x)$$

其中

$$k = \frac{R_{on}}{D^2} \cdot \delta(|V_M| - V_T) \cdot \mu \quad (12)$$

基于以上分析,本文提出了一种改进的忆阻器 SPICE 模型,如图 8 所示,该模型主要由比较器和带反馈的积分器组成.其主要参数有 R_{on} 、 R_{off} 、初始阻值 R_{init} 、半导体氧化物材料厚度 D 、窗函数参数 p 、杂质迁移速率 μ 和阈值电压 V_T .由式(12)可知,利用积分器对流过忆阻器的电流进行积分可以得到掺杂区和非掺杂区的边界位置 x ,将 x 代入式(7)可以计算出忆阻器的阻值.比较器用于比较忆阻器两端电压 V_M 与阈值电压 V_T 的大小,由式(11)可知,当 $|V_M| > V_T$ 时,忆阻器杂质的迁移速率为 μ ,当 $|V_M| < V_T$ 时,杂质的迁移速率为 0.

此模型的基本结构与 Zdeněk BIOLEK 所提出

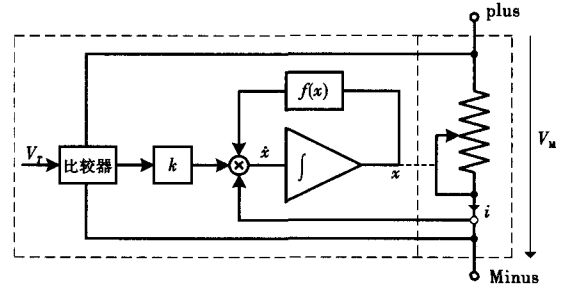


图 8 改进的忆阻器仿真模型结构图

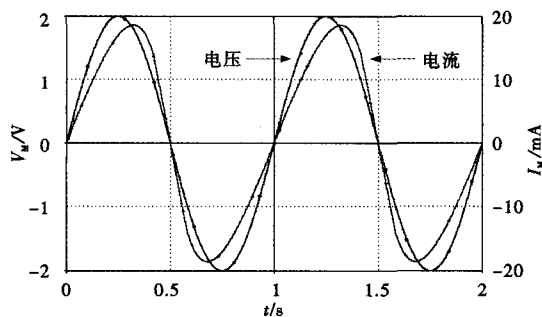
的模型类似,比较式(6)和(12)可知,两者的不同之处在于此模型的参数 k 不仅与 R_{on} 、 D 和 μ 有关,还与忆阻器两端的电压 V_M 和阈值电压 V_T 的大小有关.当 $|V_M| > V_T$ 时, $\frac{dx}{dt} \neq 0$,此时忆阻器阻值呈非线性连续变化;当 $|V_M| < V_T$ 时, $\frac{dx}{dt} = 0$,此时忆阻器的阻值保持不变.

在该仿真模型两端施加正弦电压激励 $V_M = V_0 \sin(2\pi\omega_0 t)$ 时,其电流的响应曲线如图 9(a) 所示;当 $\omega_0 = 1$ Hz 时,忆阻器的 $I-V$ 曲线为一条滞回曲线,当 $\omega_0 = 10$ Hz,忆阻器的 $I-V$ 曲线近似为一条直线,如图 9(c) 所示;忆阻器阻值的变化情况如图 9(b) 所示,对比图 9(a) 可知,当电压 $|V_M| < 1$ V 时,忆阻器的阻值 R_M 不变,当 $|V_M| > 1$ V 时, R_M 开始发生变化.由此可见带阈值电压的模型可以很好地模拟忆阻器的“激活”现象,并且与 HP 实验室的物理模型相符.

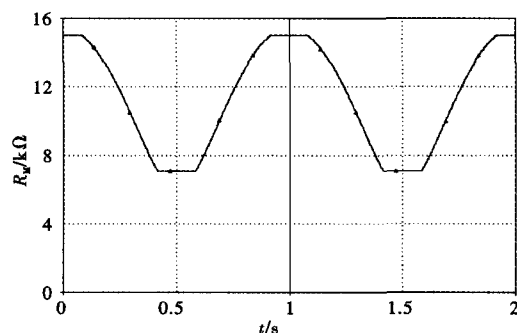
5 改进的忆阻器模型的仿真应用

由式(12)可知,在改进的忆阻器模型中,只有施加在忆阻器两端的电压高于阈值电压时,忆阻器的阻值才发生改变,反之,忆阻器的阻值保持不变.因此,当忆阻器工作在小信号模拟电路中的时候,可以采用幅值大于阈值电压的控制信号去改变忆阻器的阻值.

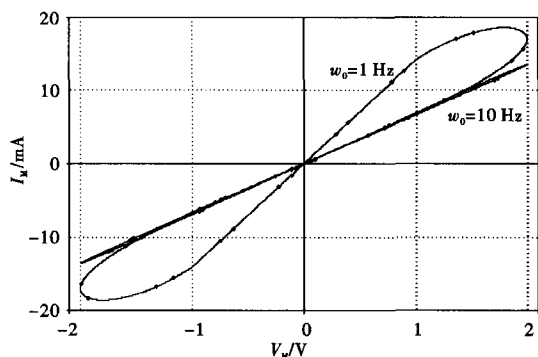
基于此,设计了一种忆阻器控制电路,用于产生可以使忆阻器阻值发生变化的电压信号.如图 10 所示,该电路分为忆阻器工作电路和忆阻器控制电路两部分.其中忆阻器工作电路中的电压源 V_s 峰值的绝对值小于忆阻器的阈值电压 V_T .忆阻器控制电路主要由两个模拟开关组成,当 V_{cp} 为高电平时,模拟开关 1 闭合,控制电路输出端 $V_c = V_{pp}$;当 V_{cn} 为高电平时,模拟开关 2 闭合,控制电路输出端 $V_c = -V_{pp}$; V_{cp} 和 V_{cn} 不同时为高电平.



(a) 电压电流曲线图



(b) 忆阻器阻值点变化曲线图



(c) 忆阻器 \$I-V\$ 曲线图

图 9 忆阻器 SPICE 模型的仿真曲线

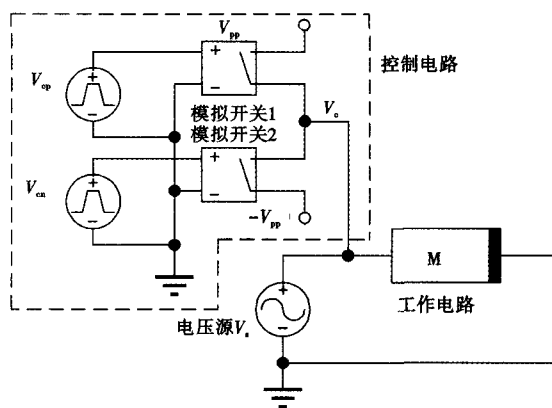


图 10 忆阻器控制电路

当忆阻器工作在图 10 所示的电路时,通过改变

控制信号 V_c 可以改变忆阻器的阻值,从而改变忆阻器电路的工作状态. 当 V_{cp} 高电平持续时间为 0.02 s 时,控制信号 $V_c = V_{pp}$,忆阻器阻值 R_M 的曲线如图 11(a)所示;当 V_{cp} 高电平持续时间为 0.1 s 时,控制信号 $V_c = V_{pp}$,忆阻器阻值 R_M 的曲线如图 11(b)所示;当 V_{cn} 高电平持续时间为 0.02 s 时,控制信号 $V_c = -V_{pp}$,忆阻器阻值 R_M 的曲线如图 11(c)所示.

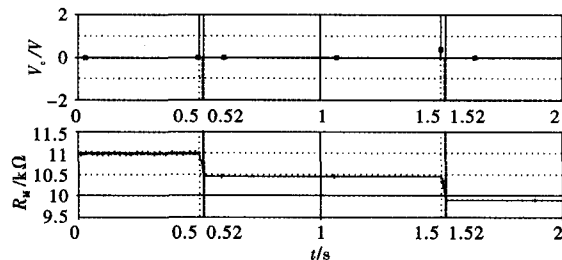
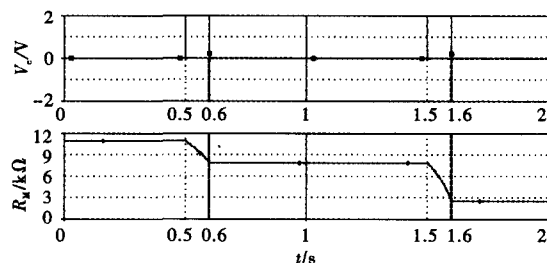
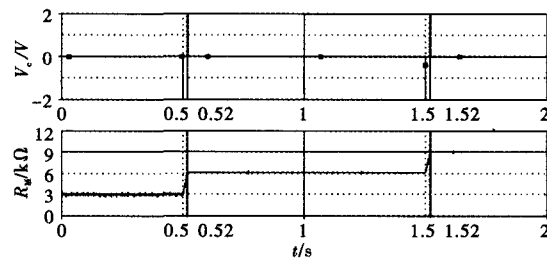
(a) $V_c = 2$ V,持续时间为 0.02 s(b) $V_c = 2$ V,持续时间为 0.1 s(c) $V_c = -2$ V,持续时间为 0.02 s

图 11 控制信号与忆阻器的阻值变化曲线

由以上结果可知,忆阻器的阻值变化与控制电压的极性和施加时间的长短有关. 当控制信号为正时,忆阻器阻值减小;当控制信号为负时,忆阻器阻值增加. 控制信号施加的时间越长,阻值变化越大,直至达到极限值(即最大值 R_{off} 或最小值 R_{on}). 通过调节控制信号的极性和保持时间,可以控制忆阻器阻值的连续变化.

6 结束语

本文简要讨论了 HP 实验室提出的忆阻器物理模型的一些基本特性,并指出了忆阻器阈值电压存

在的可能性.在重点分析了 Zdeněk BIOLEK 和 Y. V. Pershin 等人所提出的忆阻器仿真模型的基础上,提出了一种新的忆阻器仿真模型.通过 PSPICE 仿真得到的该模型的 $I-V$ 特性和频率特性等与 HP 实验室所提出的物理模型所表现出来的电气特性一致,同时也很好地模拟了忆阻器二端电压较高时的“激活”特性.改进的模型不仅解决了忆阻器阻值离散化的问题,而且其电平形式的控制信号比脉冲形式的控制信号更易于实现和控制.

参考文献:

- [1] Chua L O. Memristor-the missing circuit element[J]. IEEE Trans Circuit Theory 18, 1971:507-519.
- [2] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R. et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008,453(1):80-83.
- [3] Chua L O. Resistance switching memories are memristors[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2011(102):765-783.
- [4] Biolek D, Biolek Z, Biolkova V. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift[J]. Radio Engineering, 2009,18(2): 210-214.
- [5] Biolek D, Biolek Z, Biolkova V. SPICE modeling of memristive, memcapacitive and meminductive systems[J]. Circuit Theory and Design, 2009, ECCTD 2009. 2009:249-252.
- [6] Sharifi M J, Banadaki Y M, General spice models for memristor and application to circuit simulation of memristor-based synapses and memory cells[J]. Journal of Circuits, Systems, and Computers,2010,19(2): 407-424.
- [7] Rak A, Cserey G. Macromodeling of the memristor in SPICE[J]. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions, 2010: 632-636.
- [8] Batas D, Fiedler H, A memristor spice implementation and a new approach for magnetic flux controlled memristor modeling[J]. Nanotechnology, IEEE Transactions, 2011,10(2): 250-255.
- [9] Pershin Y V, Di Ventra M. Practical approach to programmable analog circuits with memristors[J]. IEEE Transactions on Circuits and System I: Regular Papers, 2010, 57(8): 1657-1862.
- [10] Pershin Y V, Di Ventra M. Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors [J]. Electronics Letters, 2010: 517-518.
- [11] Pershin Y V, S La Fontaine, M Di Ventra, Memristive model of amoeba's learning [J]. Phys Rev E, 2009 (80): 21-26.
- [12] Strukov D B Williams R S, Exponential ionic drift: Fast switching and low volatility of thin-film memristors [J]. Appl Phys A-Mater Sci Process, 2009, 94 (3): 515-519.
- [13] Di Ventra M, Pershin Y V, Chua L O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors, and meminductors[J]. Proceedings of the IEEE, 2009: 1717-1724.

作者简介:

段宗胜 男,(1987—),硕士研究生,研究方向为忆阻器、EDA 技术及应用.