

文章编号:1671-251X(2013)06-0066-04 DOI:

杨彪,潘炼. 基于改进忆阻器的高通滤波器设计与仿真[J]. 工矿自动化,2013,39(6):66-69.

# 基于改进忆阻器的高通滤波器设计与仿真

杨彪, 潘炼

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**针对传统的忆阻器模型存在不能很好地与 HP 实验室提出的忆阻器物理模型中忆阻器的阻值变化特点相符的问题,提出了一种改进的带有阈值电压的忆阻器模型,该模型能很好地模拟忆阻器的“激活”现象,其特性与 HP 实验室的忆阻器物理模型相符;基于该改进模型设计了一种高通滤波器电路,该电路通过改变忆阻器阻值控制电路的输出信号来改变忆阻器的阻值,从而实现了滤波器截止频率的调节。SPICE 仿真结果验证了设计的正确性。

**关键词:**忆阻器;高通滤波器;SPICE 仿真

中图分类号:TD60 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Design and simulation of high-pass filter based on improved memristor

YANG Biao, PAN Lian

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

**Abstract:**In view of problem that traditional memristor model cannot conform to resistance variation characteristics of the memristor of physical model proposed by HP laboratory, the paper proposed an improved memristor model with threshold voltage. The model can simulate "activation" of the memristor very well, and its characteristics conform to the ones of memristor physical model in HP laboratory. Based on the improved model, a high-pass filter circuit was designed and it can change resistance of the memristor by changing output signal of resistance control circuit of the memristor, so as to realize cut-off frequency adjustment of the filter. The SPICE simulation result shows correctness of the design.

**Key words:**memristor; high-pass filter; SPICE simulation

## 0 引言

2008年,HP实验室发现了一种具有记忆功能的非线性电阻,即忆阻器,它在关掉电源后,仍能记忆通过的电荷。这意味着,如果突然停机,然后重新启动,用户关机之前打开的所有应用程序和文件仍在屏幕上<sup>[1-3]</sup>。目前,忆阻器这种用途还不能被任何电阻器、电容器和电感器的电路组合所复制。

传统的忆阻器模型不能很好地与 HP 实验室提

出的忆阻器物理模型中忆阻器的阻值变化特点相符。本文提出了一种改进的忆阻器模型,并基于该改进模型,设计了一种基于忆阻器的高通滤波器电路。SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 仿真结果验证了设计的正确性。

## 1 忆阻器基本特性

从电路变量关系完整性角度定义了增量忆阻  $M(Q)$  来描述磁通量  $\Phi$ 、电荷量  $Q$  间的这一关系:

收稿日期:2013-03-15。

基金项目:湖北省教育厅重点支持项目(D20121103);武汉科技大学绿色制造与节能减排科技研究中心开放基金资助项目(A1204);武汉科技大学冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室开放基金资助项目(Y201112)。

作者简介:杨彪(1986-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程,E-mail:543929244@qq.com。

$$M(Q) = d\Phi/dQ \quad (1)$$

满足式(1)的电路元件被称为忆阻器。

同时,由  $d\Phi = Udt$ ,  $dQ = Idt$  可得

$$M(Q) = U/I \quad (2)$$

因此,增量忆阻具有与电阻相同的量纲。由式(1)可知,忆阻器在某一时刻  $t_0$  的忆阻阻值决定于通过它的电流从  $t = -\infty$  到  $t = t_0$  的时间积分,从而呈现出电阻的时间记忆特性。当  $\Phi-Q$  关系曲线为直线时,相应地,  $M(Q) = R$ , 忆阻器呈线性非时变电阻。

也可定义如下的一个方程组来描述忆阻器:

$$\begin{cases} U(t) = R(\omega, I, t)I(t) \\ d\omega/dt = f(\omega, I, t) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $U(t)$  为忆阻器两端的电压;  $I(t)$  为通过忆阻器两端的电流;  $\omega$  为忆阻器的状态变量;  $R$  为一个标量,叫做忆阻抗。

根据式(1)~式(3), HP 实验室提出了一种二端电子器件的边界漂移模型,图1为忆阻器物理模型。填充在模型两端的金属 Pt 电极之间的是由金属氧化物  $TiO_2$  和  $TiO_{2-x}$  混合而成的纳米半导体材料,假设该半导体材料的薄膜厚度为  $D$ 。在该模型中,混合的半导体材料薄膜包含 2 个部分:一部分主要由  $TiO_{2-x}$  材料组成,该材料内部包含大量的氧空穴,导电性很高,这一含有较高氧空穴的区域被定义为掺杂区,其阻值很小;另一部分主要由半导体材料  $TiO_2$  组成,由于不含氧空穴,因而被定义为非掺杂区,具有很高的阻抗。 $\omega$  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<sup>[2]</sup>。当  $\omega/D = 1$  时,整个器件均为掺杂区,设此时忆阻器的阻值为  $R_{on}$ , 即  $R_{on}$  为忆阻器阻值的极小值;当  $\omega/D = 0$  时,整个器件均为非掺杂区,设此时忆阻器的阻值为  $R_{off}$ , 即  $R_{off}$  为忆阻器阻值的极大值。通过  $\omega/D$  变化可以反映出忆阻器阻值的变化。

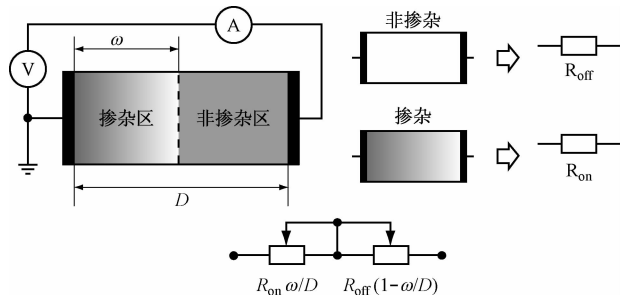


图1 HP 实验室提出的忆阻器物理模型

## 2 忆阻器的改进模型及仿真

根据对忆阻器基本特性的分析,本文认为:存在某一阈值电压  $U_T$ , 当忆阻器两端的电压超过  $U_T$  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  $U_T$  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<sup>[4]</sup>。因此,可以建立一种带有阈值电压的忆阻器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,由此可见,杂质的迁移速率与忆阻器两端的电压有关。

为了便于计算和建模,将杂质迁移速率简化为

$$\mu_v = \delta(|U_M| - U_T)\mu \quad (4)$$

式中:  $\delta(j) = \begin{cases} 1, & j \geq 0 \\ 0, & j < 0 \end{cases}$ ;  $U_M$  为施加在忆阻器两端的电压;  $\mu$  为极限速率。

掺杂区和非掺杂区边界的漂移速率为

$$\frac{dx}{dt} = kI(t)f(x) \quad (5)$$

式中:  $x$  为掺杂物分布率;  $k = \frac{R_{on}\mu_v}{D^2}$ ;  $f(x)$  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,该窗函数可以较好模拟 HP 实验室发现的忆阻器内部杂质的非线性漂移现象)。

基于以上分析,本文提出了一种改进的忆阻器模型,如图2所示,该模型主要由比较器和带反馈的积分器组成。

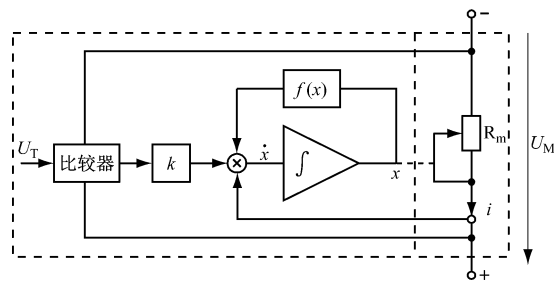
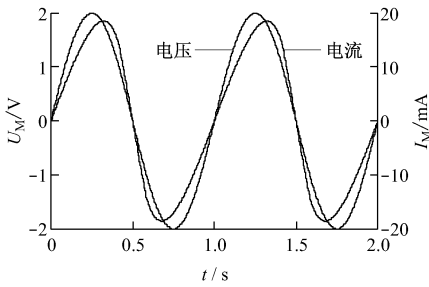


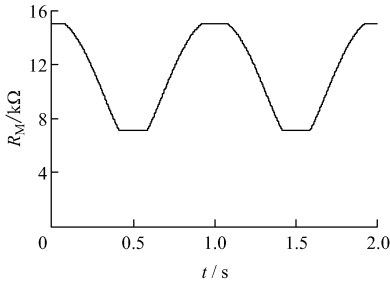
图2 改进的忆阻器仿真模型结构

在该仿真模型两端施加正弦电压激励  $U_M = U_0 \sin(2\pi\omega_0 t)$  时,其电流的响应曲线如图3(a)所示。当  $\omega_0 = 1$  Hz 时,忆阻器的  $I-U$  曲线为一条滞回曲线,当  $\omega_0 = 10$  Hz 时,忆阻器的  $I-U$  曲线近似为一条直线,如图3(c)所示。忆阻器阻值的变化情况如图3(b)所示,对比图3(a)可知,当电压  $|U_M| < 1$  V 时,忆阻器的阻值  $R_M$  不变;当  $|U_M| > 1$  V 时,

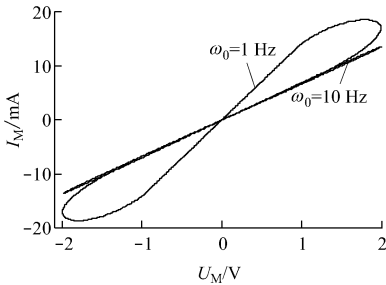
$R_M$ 开始发生变化。由此可见带阈值电压的模型可



(a) 施加正弦电压激励时忆阻器的电压、电流变化曲线



(b) 施加正弦电压激励时忆阻器的阻值变化曲线



(c) 施加正弦电压激励时忆阻器的 I-U 曲线

图3 改进的忆阻器模型的仿真曲线

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<sup>[5]</sup>。

### 3 基于改进忆阻器的高通滤波器设计及仿真

RC 高通滤波器电路如图 4 所示，与 RC 低通滤波器电路在电路结构上存在对偶关系，其中  $U_i$  为输入信号， $U_o$  为输出信号。

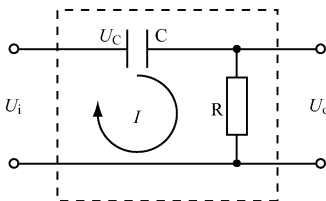


图4 RC 高通滤波器电路

由 Kirchhoff 电压定律和 Laplace 定律可知

$$U_o(s) = RI(s) \tag{6}$$

式中： $I(s)$  为环路电流， $I(s) = sCU_c(s) = sC(U_i - U_o)$ 。

则滤波电路的输出增益为

$$A_H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{sRC}{1 + sRC} = 1 - \frac{1}{1 + sRC} \tag{7}$$

由式(7)可知，RC 高通滤波器电路的输出增益与输入信号的频率、电阻和电容的大小有关。在该电路中，由于电阻和电容不变，当频率减小时，电路的输出增益减小，此时电路的输出信号  $U_o$  受到明显的抑制，从而达到了选择高频信号的目的。

基于改进忆阻器的高通滤波器电路如图 5 所示。 $A_1$  为理想运算放大器， $R_{M1}$  和  $R_{M2}$  为忆阻器， $R_{M1}$  阻值控制电路和  $R_{M2}$  阻值控制电路分别用于控制忆阻器  $R_{M1}$  和  $R_{M2}$  的阻值。该电路中的相关参数：忆阻器  $R_{M1}$  和  $R_{M2}$  的参数均为  $R_{on} = 100 \Omega$ ， $R_{off} = 16 \text{ k}\Omega$ ， $D = 10 \text{ nm}$ ， $\mu_v = 10^{-14} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ ， $U_T = 1.2 \text{ V}$ ；电容  $C = 0.001 \mu\text{F}$ ；电阻  $R_{c1} = R_{c2} = 10 \Omega$ ， $R = 100 \Omega$ 。

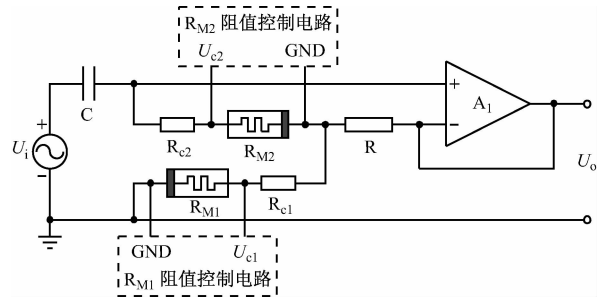


图5 基于改进忆阻器的高通滤波器电路

根据图 4，图 5 可等效为如图 6 所示的 RC 电路，其中可变电容  $C(t) = (R_{c2} + R_{M2})C/R$ ，可变电阻  $R(t) = R_{c1} + R_{M1} + R$ 。

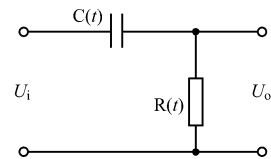
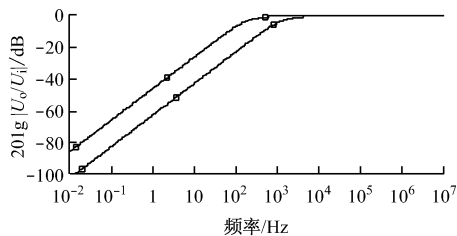


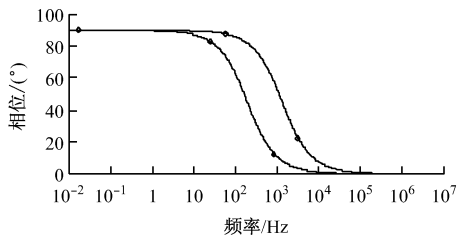
图6 基于改进忆阻器的高通滤波器电路等效电路

由截止频率  $f_c = \frac{1}{2\pi R(t)C(t)} = \frac{R}{2\pi(R_{c1} + R_{M1} + R)(R_{c2} + R_{M2})C}$  可知，在  $t = 0 \text{ s}$  时， $R_{M1}$  和  $R_{M2}$  的阻值均为  $9 \text{ k}\Omega$ ，则  $C(t) = 0.0901 \mu\text{F}$ ， $R(t) = 9.11 \text{ k}\Omega$ ，此时高通滤波器电路的截止频率  $f_{c1} = 194.00 \text{ Hz}$ 。

在高通滤波器电路输入端施加正弦激励信号，该激励信号的幅值小于忆阻器的阈值电压。通过 SPICE 仿真得到该电路的幅频、相频响应曲线，如图 7 所示。



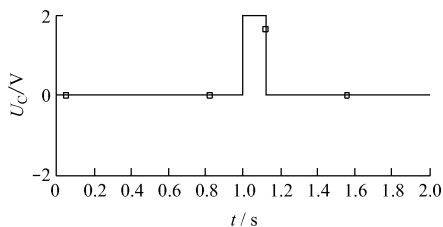
(a) 幅频响应曲线



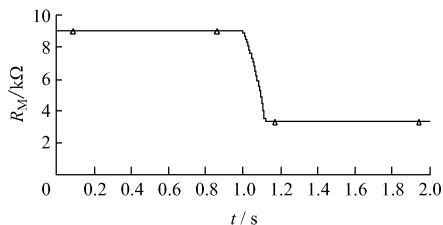
(b) 相频响应曲线

图7 基于改进忆阻器的高通滤波器电路的响应曲线

在  $t=1.0$  s 时,  $R_{M1}$  阻值控制电路和  $R_{M2}$  阻值控制电路均输出如图 8(a) 所示的控制信号  $U_C$ , 持续时间为 0.12 s, 使得  $R_{M1}$  和  $R_{M2}$  的阻值为 3.32 k $\Omega$ , 如图 8(b) 所示。当 2 个控制电路的输出信号不不同时, 忆阻器的阻值变化则不相同。当  $t=1.12$  s 时  $C(t)=0.0333 \mu\text{F}$ ,  $R(t)=3.43 \text{ k}\Omega$ , 从而得到此时高通滤波器电路的截止频率  $f_{c2}=1394.16 \text{ Hz}$ , 如图 7(a) 所示。由此可见, 利用上述高通滤波器电路可以很好地实现截止频率的调节。



(a) 阻值控制电路的输出信号



(b) 忆阻器阻值的变化曲线

图8 高通滤波器电路中忆阻器阻值控制曲线

## 4 结语

根据忆阻器的特性提出一种改进的忆阻器模型, 并基于该模型设计了高通滤波器电路, 通过改变忆阻器的阻值, 可以实现滤波器截止频率的调节。SPICE 仿真结果验证了设计的正确性。由于仿真实验中基于忆阻器的滤波器采用的是传统的一阶 RC 滤波器的电路结构, 这一类型的滤波器的幅频响应曲线衰减较慢。而高阶有源滤波电路的幅频响应曲线具有较快的衰减速率, 因此, 可以将忆阻器应用到高阶滤波电路中, 从而提高基于忆阻器的滤波器的幅频响应曲线的衰减速率。

## 参考文献:

- [1] 田晓波. 忆阻器电路特性与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [2] PERSHIN Y V, VENTRA M D. Current - voltage characteristics of semiconductor/ferromagnet junctions in the spin-blockade regime[J]. Phys. Rev. B, 2008, 77(7):073301/1-073301/4.
- [3] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, et al. The missing memristor found [J]. Nature, 2008, 453(5):80-83.
- [4] BIOLEK D, BIOLEK Z, BIOLKOVA V. PSPICE modeling of meminductor [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2011, 66(1):129-137.
- [5] CHEN Y, JUNG G Y, OHLBERG D A A, et al. Nanoscale molecular-switch crossbar circuits [J]. Nanotechnology, 2003, 14(4):462-468.