

## 荷控忆阻器记忆衰退的寄生效应

沈怡然 李付鹏\* 王光义

(杭州电子科技大学现代电路与智能信息研究所 杭州 310018)

**摘要:** 荷控忆阻器在寄生元件存在的情况下, 可能发生记忆衰退现象。该文采用忆阻器动力学路线图和仿真的方法, 研究了忆阻器寄生电阻和寄生电容对其动力学特性的影响。理论和仿真分析发现, 理想荷控(流控)忆阻器在直流和交流激励下, 寄生电阻或寄生电容单独存在时不发生记忆衰退现象, 但在寄生电阻和寄生电容同时存在的情况下会发生记忆衰退, 其机理是寄生元件形成放电通路, 从而导致荷控忆阻器产生了记忆衰退。

**关键词:** 忆阻器; 记忆衰退; 寄生效应

中图分类号: TN601

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)04-0844-07

DOI: 10.11999/JEIT190865

## The Role of Parasitic Elements in Fading Memory of A Charge Controlled Memristor

SHEN Yiran LI Fupeng WANG Guangyi

(Institute of Modern Circuit and Intelligent Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In the presence of parasitic elements, fading memory may occur in charge controlled memristors. The effects of parasitic resistance and capacitance on the dynamic characteristics of memristor are studied by using the dynamic route map and simulation method. The oretical and simulation analysis shows that the ideal charge controlled (current controlled) memristor does not have fading memory when the parasitic resistance or capacitance exists alone under the excitation of DC and AC, but fading memory occurs when the parasitic resistance and capacitance exist at the same time. The mechanism is that the parasitic elements form discharge path, which leads to fading memory of the charge controlled memristor.

**Key words:** Memristor; Fading memory; Parasitic effects

### 1 引言

Chua<sup>[1,2]</sup>于1971年首次提出忆阻器(memristor)概念, 直到2008年5~6月份, HP实验室在《Nature》连发3篇论文报导了一种TiO<sub>2</sub>忆阻器的发现<sup>[3-5]</sup>, 首次在物理实现和理论上证实了纳米忆阻器的物理存在, 引起了业界和学术界的极大震撼, 从而使忆阻器成为国内外一个争先研究的热点<sup>[6]</sup>。

忆阻器是一种具有记忆性的非线性电阻, 一般情况下其阻值具有二值(低电阻 $R_{ON}$ , 高电阻 $R_{OFF}$ )非易失性。与目前的存储器用高低电压表示0,1状态不同, 忆阻器用其固有的二值电阻 $R_{ON}$ 和 $R_{OFF}$ 表示0,1状态, 断电后仍保持其状态记忆性。目前的研究已表明: 忆阻器在存储器、逻辑电路、神经网络

和非线性电路等领域有着极为重要的应用潜能。

尽管忆阻纳米器件具有“模拟”的非易失性存储能力, 即它在断电时可以存储无限连续的状态, 但在适当的周期性激励下, 其过去的历史被逐渐抹去, 因此, 其稳态行为是唯一的, 这种历史擦除效应的动态现象被称为记忆衰退。基于忆阻器的ReRAM (redox-based Resistive switching Random Access Memory)的一个严重问题是开关过程的可变性和再现性。使用单脉冲编程时, 低阻态和高阻态显示出较大的分布, 这可能导致读取失败。在连续循环后, ReRAM单元可能会出现故障, 并卡在低阻态或高阻态中。这个问题可以通过优化“设置脉冲”和“复位脉冲”的幅度来缓解。但是这种方法需要不对称的电压幅度, 因此需要控制电路提供额外的电压电平。由于基于化合价变化机制(Valence Change Mechanism, VCM)的忆阻器件(如HP TiO<sub>2</sub>忆阻器)的“设置”和“复位”动力学特性不同, 需要不对称的电压幅值。尽管VCM器件的“设置”转换通常是非常突然的, 但“复位”过程是逐渐进行

收稿日期: 2019-11-01; 改回日期: 2019-12-26; 网络出版: 2020-01-06

\*通信作者: 李付鹏 lfp\_99@hdu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61771176, 61801154)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61771176, 61801154)

的。开关动力学中的设置/复位不对称使得寻找低阻态和高阻态之间可靠切换的操作条件成为一个挑战。与VCM器件串联的附加电阻可将“复位”动力学从逐渐过渡转变到突然过渡。此外,已经证明高阻态的电阻值也会影响设置器件所需的电压。因此,开关动力学可能依赖于编程电阻的状态,增加了寻找稳定的开关状态切换窗口的挑战。因此,了解开关过程的复杂动力学对于实现可靠的器件操作至关重要。最近发现忆阻器构成的ReRAM具有记忆衰退性质。这意味着ReRAM在周期电压信号连续激励下的动态行为渐进地变化为动态响应,动态响应仅由输入电压信号决定,而不是由器件的初始状态决定。衰减记忆效应的出现意味着在对称电压激励下可以找到稳定的开关切换窗口。

关于忆阻器的记忆衰退效应的最初报道见于Ascoli等人的文献[7],在这篇文献中作者运用电路理论的分析方法研究了Strachan等人提出的氧化钽忆阻器的数学模型,发现这种惠普实验室制造的氧化钽忆阻器中出现了一种特殊的动态现象,称为记忆衰退现象。紧接着,Ascoli等人[8,9]又研究了CNN(Cellular Nanoscale Network)以及ReRAM中忆阻器的记忆衰退。值得注意的是,在随后发表的两篇论文[10,11]中,Ascoli等人研究了双稳态忆阻器的局部记忆衰退。最近,Ascoli等人又在IEEE发表了文献[12],总结了多种忆阻器的记忆衰退机理。由此可见,历史擦除效应并不是HP实验室中氧化钽纳米器件的独有属性。对其它许多基于不同材料和物理原理的忆阻器进行分析,都可以发现记忆衰退现象。

本文研究了理想荷控忆阻器[13],发现这种忆阻器本身不发生记忆衰退显现,然而考虑了寄生电阻和寄生电容同时存在的情况下会出现记忆衰退。本文指出,忆阻器中的寄生元件构成放电通路的情况下,可能发生记忆衰退现象。本文的组织结构如下:第2节给出了记忆衰退的数学定义;第3节指出理想荷控忆阻器不存在记忆衰退;第4节分析考虑寄生元件后理想荷控忆阻器的记忆衰退特性;第5节是结束语。

## 2 记忆衰退现象

Boyd和Chua[14]证明了具有衰退记忆的动态系统具有唯一的稳态解。令集合 $X$ 包含所有的状态解,这些状态解是对集合 $K$ 中的所有输入应用算符 $N$ 得到的,即

$$X = \{x = Nu | u \in K\} \quad (1)$$

无论 $X$ 中初始条件为何值,对于 $K$ 中的任意输入,初值问题式(1)可能有且最多只有一个渐近解。本文考虑1维情形下式(1)表示的初值问题。

如图1所示,对状态初值为 $x_0$ 的忆阻器施加两个输入信号 $\hat{u}(t) \in K$ 和 $\tilde{u}(t) \in K$ ,这两个信号在 $t \in [0, T]$ 不同,而在 $t > T$ 以后相同。两输入信号 $\hat{u}(t)$ 和 $\tilde{u}(t)$ 作用下在 $t = T$ 时刻的解分别表示为 $\hat{x}_T = \hat{x}(T) \in X$ 和 $\tilde{x}_T = \tilde{x}(T) \in X$ 。在 $t = T$ 时刻之后,相当于不同初值 $\hat{x}(T)$ 和 $\tilde{x}(T)$ 但激励相同的状态演化。如果 $T$ 之后的演化使 $\hat{x}_T$ 和 $\tilde{x}_T$ 中携带的初值信息逐渐消退,则会导致系统出现唯一的渐近解。即,在 $t > T$ 后 $\hat{x}(t)$ 和 $\tilde{x}(t)$ 随着时间的演化最终在 $t = T_s$ 时刻趋于相同,收敛到同一个渐近稳定解,称为忆阻器的记忆衰退现象[12]。

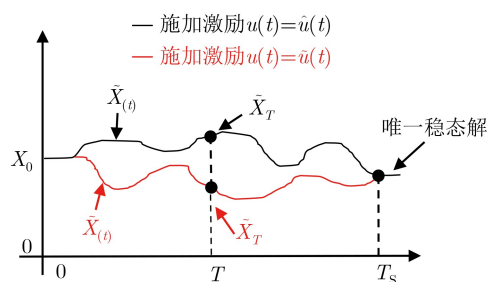


图1 记忆衰退概念示意图

## 3 理想荷控忆阻器不存在记忆衰退

所有忆阻器可以分为4类,分别为理想忆阻器、理想一般忆阻器、一般忆阻器和扩展忆阻器[13]。当忆阻器由电流源驱动时,称为电流控制忆阻器,流控忆阻器可以转化为荷控忆阻器。每个忆阻器由欧姆定律和状态方程定义,忆阻值依赖于一个或多个状态变量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。不失一般性,本文将状态变量的个数限制为1个。

对于理想忆阻器,其依赖于状态的欧姆定律和满足的状态方程为[13]

$$\left. \begin{aligned} v &= R(q)i \\ \frac{dq}{dt} &= i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

文献[13]认为满足式(2)定义的理想忆阻器其状态方程是可积的,因此,可以用状态方程 $dq/dt = i$ 替换欧姆定律式(2)中的 $i$ ,并将两边积分得

$$\varphi = \int_0^t v(t)dt = \int_0^q R(q)dq = \hat{\varphi}(q) \quad (3)$$

在此假定 $\varphi(0) = 0, q(0) = 0$ ,以上关系称为忆阻器的本构关系。

文献[14]给出了理想忆阻器不存在记忆衰退的数学证明,本文以理想荷控忆阻器为例,利用断电图(Power Off Plot, POP)和动力学路线图(Dynamic Route Map, DRM)证明其不存在记忆衰退。设荷控忆阻器的磁通-电荷关系为

$$\varphi = q + \frac{1}{3}q^3 \quad (4)$$

则忆阻器满足的欧姆定律和状态方程为

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{d\varphi}{dt} = (1 + q^2) \frac{dq}{dt} = R(q) i \\ \frac{dq}{dt} &= \frac{v}{1 + q^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

DRM是分析1阶忆阻器非线性动力学的有效工具<sup>[13]</sup>。在某一固定电压下的 $dq/dt - q$ 曲线为一条动力学路线，上半平面的动力学路线因 $dq/dt > 0$ 其状态向右运动，下半平面的动力学路线因 $dq/dt < 0$ 其状态向左运动。电压等于零时的 $dq/dt - q$ 曲线称为断电图<sup>[15]</sup>。图2中示出了理想荷控忆阻器在 $v \in \{-1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0\}$  V,  $q_m \in [-10, 10]$  C的DRM。它的POP与水平轴重合，意味着断电时每个记忆状态的实数值都对应着一个平衡点，不存在直流(DC)记忆衰退。

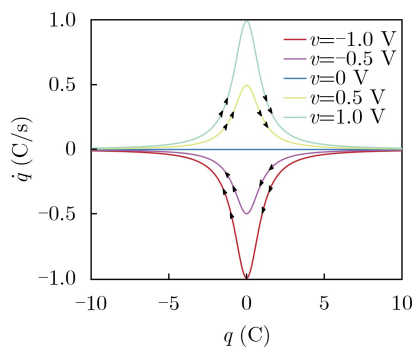


图2 理想荷控忆阻器DRM

当施加直流电压激励 $V_m = 1.0$  V, 并且状态初值属于集合 $q_0 \in \{-10, -5, 0, 5, 10\}$ , 依据式(5)可得忆阻器的状态响应, 如图3所示。

从图3中看出, 初值对于状态响应具有关键性的影响, 不同的初始值对应不同的响应曲线, 并且这些曲线在 $t \rightarrow \infty$ 时不会重合, 这表明该忆阻器在DC条件下始终携带其初值信息, 没有记忆衰退现象。

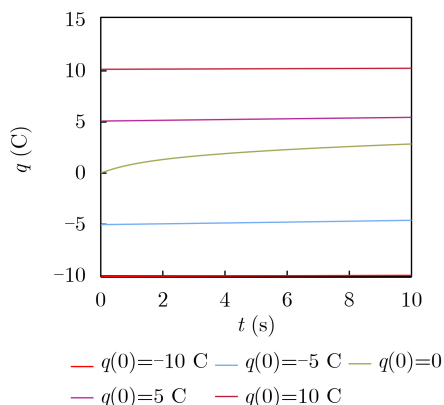


图3 理想荷控忆阻器在不同初值条件下的DC响应

从动力学路线图2看出, 对于大小相同、极性相反的输入电压其 $dq/dt - q$ 曲线关于水平轴对称, 这是交流(AC)输入条件下理想荷控忆阻器不出现记忆衰退现象的机理, 因为输入AC电压本身的对称性, 在负半周积累的电荷抵消了正半周积累的电荷, 状态电荷只能围绕在初值周围振荡。

图4示出了在正弦电压 $v = \sin(t)$ 激励下忆阻器状态变量 $q$ 随时间变化的规律, 从图中看出, 初值对于忆阻器状态具有决定性, 不同初始值对应忆阻器不同的状态, 因而理想荷控忆阻器不存在AC记忆衰退现象。

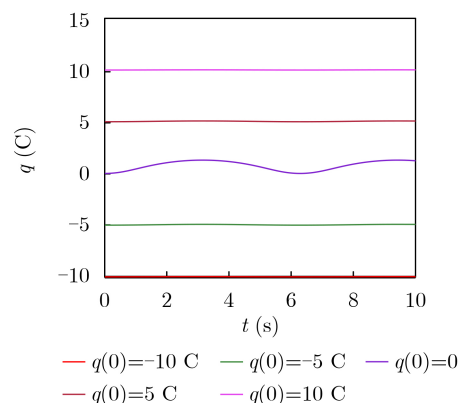


图4 理想荷控忆阻器在不同初值条件下的AC响应

理想或理想一般忆阻器不出现记忆衰退的原因是, 忆阻器在DC激励下理论上无法达到稳态<sup>[7,16]</sup>; 而交流激励下不会出现瞬态动力学, 从一开始这些器件就达到了稳态<sup>[7,17,18]</sup>。

为了进一步证实理想荷控忆阻器在AC激励下不存在记忆退化现象, 本文对其进行AC双音测试, 和三角波测试, 测试结果如图5所示。

图5(a)为激励电压 $v = \sin(2\pi f_1 t) + 0.8 \sin(2\pi f_2 t)$ , 其中 $f_1 = 25$  Hz,  $f_2 = 20$  Hz; 图5(b)是此电压激励下忆阻器的状态响应; 图5(c)为幅度 $\hat{v}_m = 2.75$  V, 周期 $T = 1$  s的三角波, 图5(d)为三角波激励下的状态响应。从图5中可以很明显地看出, 对应不同的初值忆阻器有不同的稳态响应, 它们互不重合, 没有渐进收敛到唯一的稳态值。

## 4 寄生元件对荷控忆阻器记忆衰退的影响

### 4.1 寄生串联电阻的影响

忆阻器的电极引线会产生寄生电阻, 单独考虑寄生串联电阻 $R$ 时的荷控忆阻器电路如图6所示。根据基尔霍夫电压和电流定律, 电路的动力学方程为

$$\frac{dq}{dt} = \frac{v}{R + 1 + q^2} \quad (6)$$

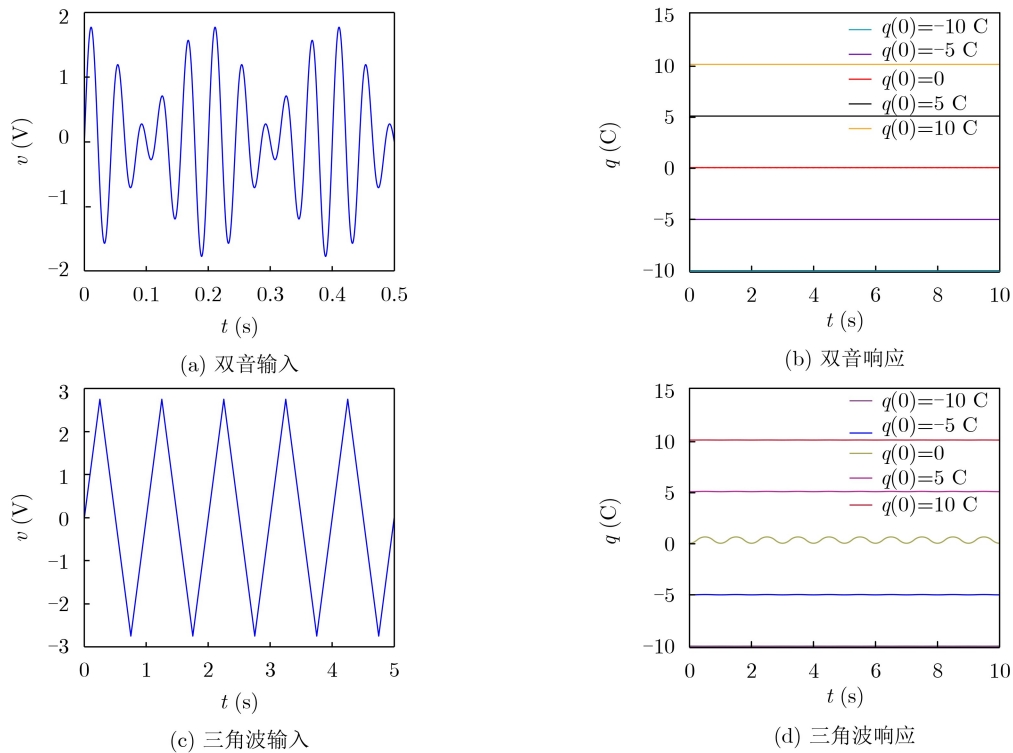


图5 双音测试和三角波测试

其中,  $q$ 是忆阻器的电荷。假设 $R = 0.01 \text{ k}\Omega$ , 据式(6)可得荷控忆阻器的动力学路线图, 如图7所示。

图7和图2比较几乎没有变化, 对称性没有被破坏。这是意料中的, 因为式(6)和式(5)比较, 仅等式右侧分母的常数项部分增加了一个 $R$ 值, 其余没有变化。根据图7推知, 寄生串联电阻不影响荷控忆阻器的记忆衰退性质。

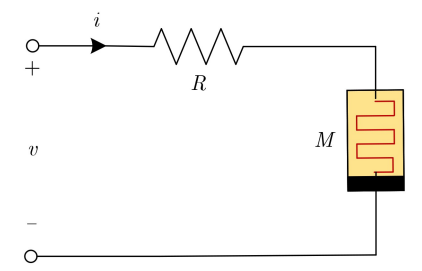


图6 理想荷控忆阻器和寄生电阻

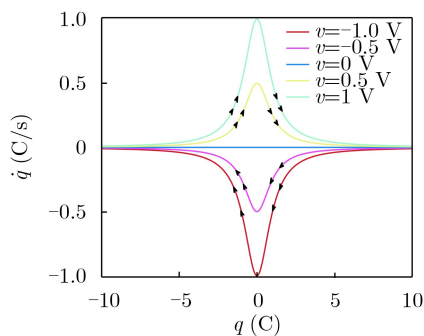


图7 考虑寄生电阻后的DRM

#### 4.2 寄生并联电容的影响

忆阻器多为金属-氧化物-金属、金属-绝缘体-金属结构, 两极之间自然存在寄生电容。仅考虑寄生并联电容后荷控忆阻器的电路如图8所示。根据基尔霍夫电压和电流定律, 电路的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq_m}{dt} &= \frac{v}{(1 + q_m^2)} \\ q &= Cv + q_m \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中,  $C$ 是寄生并联电容,  $q_m$ 是流经忆阻器的电荷,  $q$ 是电路总电荷。

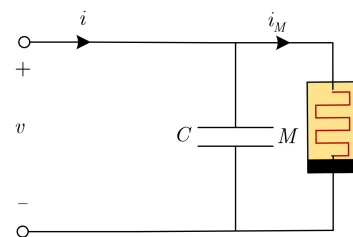


图8 理想荷控忆阻器和寄生电容

取电荷初值 $q_0 \in \{-10, -5, 0, 5, 10\}$ , 依据式(7)可得不同激励下忆阻器状态电荷的变化规律, 如图9所示。其中, 图9(a)是DC激励下的响应; 图9(b)是正弦激励下忆阻器的响应; 图9(c)是AC双音激励下忆阻器的响应; 图9(d)是AC三角波激励下忆阻器的响应。从图中可以看出, 无论哪种激励, 忆阻器的状态解都因初值不同而不同, 并不收敛到唯一

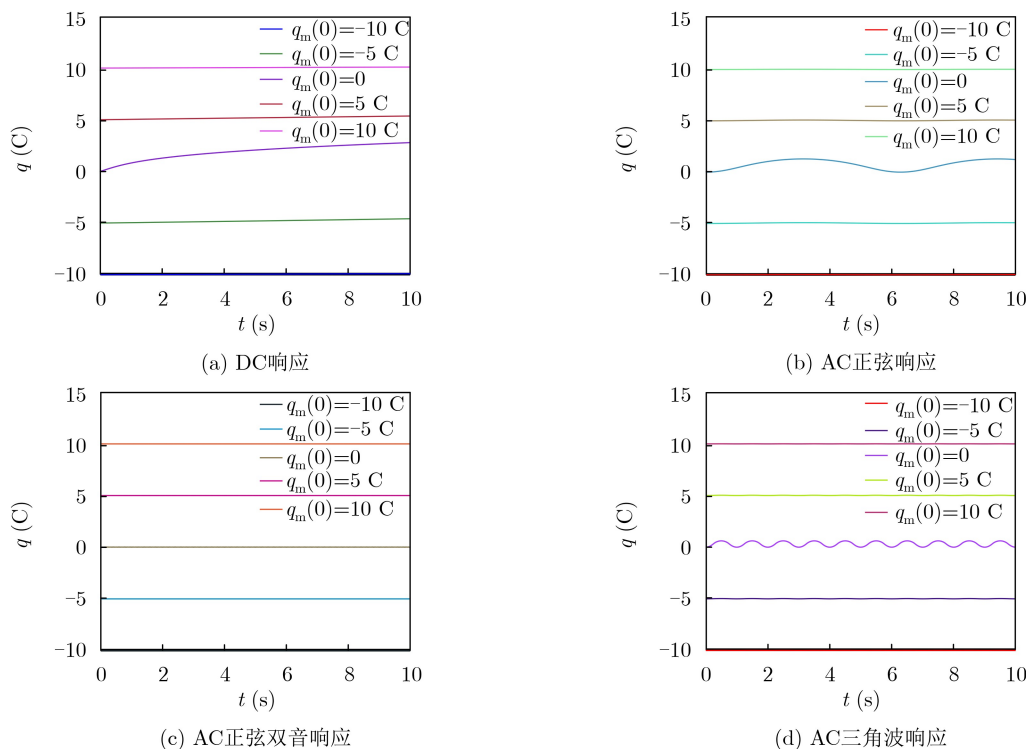


图9 寄生电容条件下忆阻系统的DC和AC响应

的稳定解。因此，单独寄生并联电容不影响忆阻器的记忆衰退性质。

### 4.3 寄生电阻与寄生电容同时存在时的影响

一般情况下，忆阻器的寄生电阻和寄生电容共存。同时考虑寄生电阻与寄生电容后，荷控忆阻器的电路如图10如所示。利用基尔霍夫电压和电流定律，可得到电路的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} v &= R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}(q - q_m) \\ \frac{1}{C}(q - q_m) &= (1 + q_m^2) \frac{dq_m}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

即

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= \frac{1}{R} \left[ v - \frac{1}{C}(q - q_m) \right] \\ \frac{dq_m}{dt} &= \frac{(q - q_m)}{C(1 + q_m^2)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中， $R = 0.01 \text{ k}\Omega$ ， $C = 10 \text{ nF}$ 。按照理想荷控忆阻器的情形，对电路分别施加DC、AC正弦、AC双音和AC三角波激励，得到的响应如图11所示。

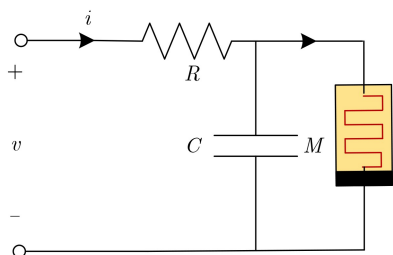


图10 考虑寄生电阻和寄生电容时的理想荷控忆阻器

从图11中看出，无论哪种激励，忆阻器系统的状态解都渐进收敛到唯一的稳态值，呈现了记忆衰退现象。此时忆阻器记忆衰退的机理可以理解为：由于忆阻器电路中出现了由寄生 $R$ 、 $C$ 元件构成的充放电通路，忆阻器中的电荷通过 $R$ 、 $C$ 支路充放电，导致了记忆衰退。需要注意的是，单个串联寄生电阻或单个并联寄生电容存在的情况下不发生记忆衰退，这是由于单个寄生元件无法形成充放电通路。

需要强调的是，AC记忆衰退现象并非由忆阻器有限的状态取值域引起。由于篇幅所限，本文仅考虑了典型的周期输入——单音，双音正弦波，三角波——来激励忆阻器器件并引发渐进的记忆衰退。然而得到的结论具有一般性，对于各种AC激励都是成立的。

综上所述，忆阻器寄生电阻或寄生电容单独存在时，忆阻器系统不存在放电通路，电荷不会泄漏，因此忆阻器可以保存其状态，也即不发生记忆衰退现象，而寄生电阻与寄生电容同时存在时，形成 $R$ 、 $C$ 放电通路，导致忆阻器储存的电荷被泄漏，因此发生记忆衰退现象。

## 5 结束语

有文献显示，在各种基于不同材料和物理原理的忆阻器中广泛地存在记忆衰退现象，为了解释这一现象，人们试图提出更精确的数学模型，以便解释忆阻器实验中观测到的有关数据。然而，为了更

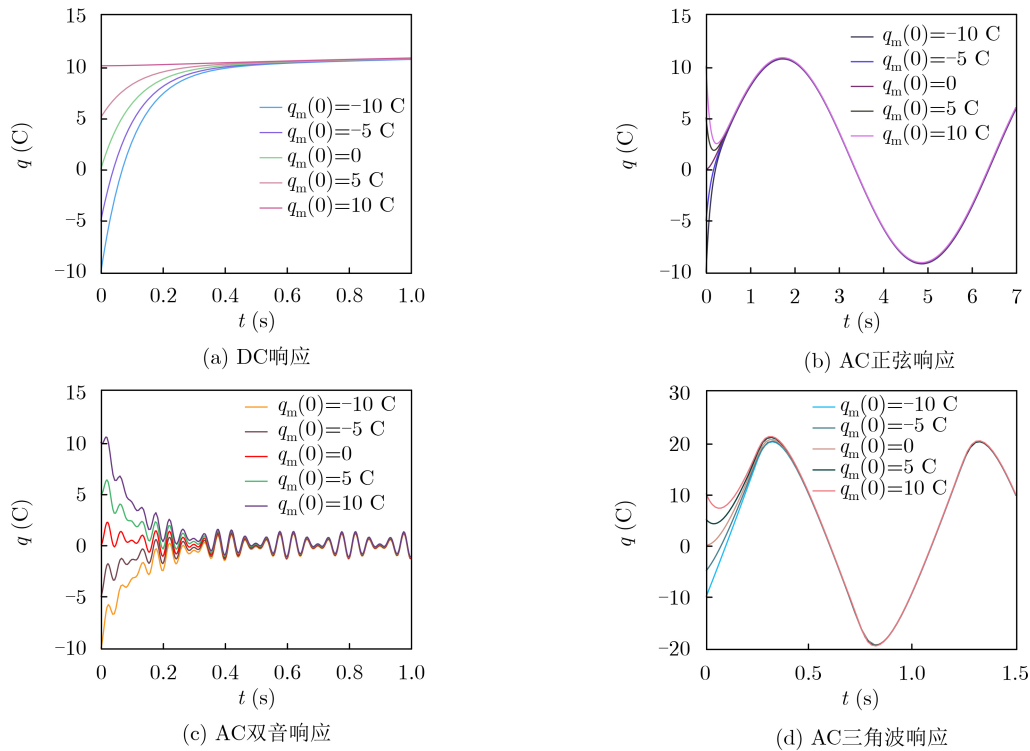


图 11 寄生电阻和电容同时存在时忆阻系统的DC和AC响应

清楚地揭示出忆阻器产生记忆衰退的机理, 需要从电路基本理论出发, 阐明记忆衰退现象发生的原因, 本文正是在这样的背景下产生的, 本文以理想荷控忆阻器作为研究例子, 指出正是忆阻器中的寄生元件引发了记忆衰退现象, 这为下一步制造忆阻器时有意识地利用或克服这一现象指明了方向。这里需要指出的是, 本文虽然研究了荷控忆阻器的忆阻衰退特性, 但是类似的分析方法同样适用于压控忆阻器, 由于文献[7]已经分析了一些典型的压控忆阻器的记忆衰退特性, 因此本文不再赘述。

### 参考文献

- [1] CHUA L O. Memristor—the missing circuit element[J]. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1971, 18(5): 507–519. doi: 10.1109/TCT.1971.1083337.
- [2] CHUA L O and KANG S M. Memristive devices and systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1976, 64(2): 209–223. doi: 10.1109/PROC.1976.10092.
- [3] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, *et al.* The missing memristor found[J]. *Nature*, 2008, 453(7191): 80–83. doi: 10.1038/nature06932.
- [4] TOUR J M and HE Tao. Electronics: The fourth element[J]. *Nature*, 2008, 453(7191): 42–43. doi: 10.1038/453042a.
- [5] YANG J J, PICKETT M D, LI Xuema, *et al.* Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices[J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3(7): 429–433. doi: 10.1038/nnano.2008.160.
- [6] VONGEHR S and MENG Xiangkang. The missing memristor has not been found[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 11657. doi: 10.1038/srep11657.
- [7] ASCOLI A, TETZLAFF R, CHUA L O, *et al.* History erase effect in a non-volatile Memristor[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2016, 63(3): 389–400. doi: 10.1109/TCSI.2016.2525043.
- [8] ASCOLI A, TETZLAFF R, CHUA L O, *et al.* Fading memory effects in a memristor for cellular nanoscale network applications[C]. The 2016 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, Dresden, Germany, 2016: 421–425.
- [9] MENZEL S, WASER R, SIEMON A, *et al.* On the origin of the fading memory effect in ReRAMs[C]. The 27th IEEE 2017 International Symposium on Power and Timing Modeling, Optimization and Simulation, Thessaloniki, Greece, 2017: 1–5.
- [10] ASCOLI A, TETZLAFF R, and CHUA L O. The first ever real Bistable Memristors—Part I: Theoretical insights on local fading memory[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2016, 63(12): 1091–1095. doi: 10.1109/TCSII.2016.2604567.
- [11] ASCOLI A, TETZLAFF R, and CHUA L O. The first ever real bistable memristors -- Part II: Design and analysis of a local fading memory system[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2016, 63(12): 1096–1100. doi: 10.1109/TCSII.2016.2613560.
- [12] ASCOLI A, TETZLAFF R, and MENZEL S. Exploring the

- dynamics of real-world Memristors on the basis of circuit theoretic model predictions[J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2018, 18(2): 48–76. doi: [10.1109/MCAS.2018.2821760](https://doi.org/10.1109/MCAS.2018.2821760).
- [13] CHUA L. Five non-volatile memristor enigmas solved[J]. *Applied Physics A*, 2018, 124(8): Artical No. 563. doi: [10.1007/s00339-018-1971-0](https://doi.org/10.1007/s00339-018-1971-0).
- [14] BOYD S and CHUA L. Fading memory and the problem of approximating nonlinear operators with Volterra series[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1985, 32(11): 1150–1161. doi: [10.1109/TCS.1985.1085649](https://doi.org/10.1109/TCS.1985.1085649).
- [15] CHUA L. Everything you wish to know about memristors but are afraid to ask[J]. *Radioengineering*, 2015, 24(2): 319–368. doi: [10.13164/re.2015.0319](https://doi.org/10.13164/re.2015.0319).
- [16] ASCOLI A, SLESAZECK S, MAHNE H, *et al.* Nonlinear dynamics of a locally-active memristor[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2015, 62(4): 1165–1174. doi: [10.1109/TCSI.2015.2413152](https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2413152).
- [17] CHUA L O. 3 new theorems on memristors[C]. The 7th Workshop and MC Meeting Memristors-Devices, Models, Circuits, Systems and Applications, Dubrovnik, Croatia, 2018.
- [18] CORINTO F, ASCOLI A, and GILLI M. Analysis of current-voltage characteristics for memristive elements in pattern recognition systems[J]. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2012, 40(12): 1277–1320. doi: [10.1002/cta.1804](https://doi.org/10.1002/cta.1804).
- 沈怡然: 男, 1979年生, 实验师, 研究方向为非线性电路与系统.  
李付鹏: 男, 1986年生, 助理实验师, 研究方向为非线性电路与系统.  
王光义: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为非线性电路与系统.