

忆阻电路的基本性质及其应用*

宋德华¹⁾ 吕梦菲¹⁾ 任翔¹⁾ 李萌萌¹⁾ 组云霄^{2)†}

1) (北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

2) (北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

(2011年6月24日收到; 2011年10月28日收到修改稿)

对有边界的忆阻元件与电容、电感的串、并联电路分别进行了研究, 分析了电路所具有的特性和频率及元件的电容、电感对电路的影响, 通过仿真验证了理论结果. 根据有边界的忆阻元件及其构成电路的性质研究, 对其潜在的应用进行了预测.

关键词: 忆阻元件, 电容, 电感, 电路特性

PACS: 81.05.Bx, 61.82.Fk, 05.45.-a

1 引言

2008年惠普实验室的 Williams 等^[1]在纳米尺度下成功制作出了基于金属和金属氧化物的忆阻元件, 由此, 忆阻元件受到了相关领域研究人员的广泛关注^[2-12]. 人们对忆阻元件的线性化分析、近似分析、性质和潜在应用进行了广泛研究, 但这些研究只局限于无边界忆阻元件的性质和应用, 而现实中的忆阻元件有边界, 有边界忆阻元件与无边界忆阻元件相比具有独特的性质. 所以, 本文应用有边界忆阻元件的数学模型分析其在电路中的性质, 并对其潜在应用进行预测.

2 有边界忆阻元件的数学模型

文献[1]中给出的电流激励下忆阻元件的电压电流关系只适用于无边界忆阻元件, 为了研究电容、电感与有边界忆阻元件串、并联电路的特性, 需要对文献[1]中给出的电压电流关系进行修正.

对文献[1]中给出的电流激励下忆阻元件的电压电流关系进行有边界修正如下:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \begin{cases} \mu_v \frac{R_{on}}{D} i(t) & w \in (0, D), \\ 0 & i(t) < 0, \text{ 且 } w = 0; \\ & i(t) < 0, \text{ 且 } w = D, \end{cases} \quad (1)$$

$$u(t) = \left[R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right] i(t), \quad (2)$$

其中 D 表示忆阻元件的长度, w 是表示忆阻元件的掺杂宽度, μ_v 表示离子在均匀场中移动情况的常数, R_{off} 表示忆阻元件全部未掺杂时的电阻值, R_{on} 表示忆阻元件全部掺杂时的电阻值, i 表示通过忆阻元件的电流, u 表示忆阻元件两端的电压, t 表示时间.

文献[12]中给出了电压激励下有边界忆阻元件的数学模型, 电压电流关系如下:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{D}{2\mu_v R_{on} A} \frac{1}{\sqrt{\frac{\int_{t_1}^t u(t) dt}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C'}{A}}} u(t) & w \in (0, D), \\ \frac{u(t)}{R_{off}} & w = 0, \\ \frac{u(t)}{R_{on}} & w = D, \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$A = \frac{1}{2\mu_v} - \frac{R_{off}}{R_{on}\mu_v}, \quad B = \frac{DR_{off}}{R_{on}\mu_v}, \\ C' = \frac{R_{off}}{2R_{on}\mu_v} w^2(0) - \frac{1}{2\mu_v} w^2(0) - \frac{DR_{off}}{R_{on}\mu_v} w(0).$$

* 北京邮电大学大学生研究创新基金资助的课题.

† E-mail: zuyx@bupt.edu.cn

3 有边界忆阻元件基本电路的性质

3.1 忆阻元件与电容串联

对图 1 所示的忆阻元件与电容串联的电路, 假设通过的电流为 $i(t) = I_m \sin(2\pi f_i t)$, $w(0) = 0$, I_m 表示电流峰值, f_i 为电流源频率, 图中 M 表示忆阻元件.

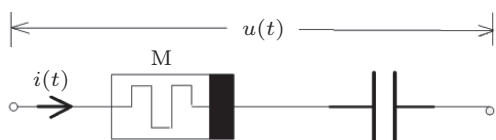


图 1 忆阻元件与电容串联的电路

当 $w \in (0, D)$ 时, 对 (1) 式积分并代入 (2) 式, 由基尔霍夫电压定律 (KVL) 得

$$\begin{aligned}
 u(t) &= \left[\frac{R_{on}}{D} \int_{-\infty}^t \mu_v \frac{R_{on}}{D} i(t) dt \right. \\
 &\quad \left. + R_{off} \left(1 - \frac{1}{D} \int_{-\infty}^t \mu_v \frac{R_{on}}{D} i(t) dt \right) \right] i(t) \\
 &\quad + \int_0^t \frac{1}{C} t dt \\
 &= \left[\mu_v \frac{R_{on}^2}{D^2} \int_{-\infty}^t i(t) dt \right. \\
 &\quad \left. + R_{off} \left(1 - \frac{R_{on} \mu_v}{D^2} \int_{-\infty}^t i(t) dt \right) \right] i(t) \\
 &\quad + \frac{1}{C} \int_0^t t dt \\
 &= \left\{ \mu_v \frac{R_{on}^2}{D^2} f(t) + R_{off} \left[1 - \frac{R_{on} \mu_v}{D^2} f(t) \right] \right\} i(t) \\
 &\quad + \frac{1}{C} f(t),
 \end{aligned}$$

其中 C 为电容元件的电容值, 由此得到:

$$u(t) = \begin{cases} R_{off} i(t) + \frac{1}{C} f(t) & w = 0, \\ \left\{ \mu_v \frac{R_{on}^2}{D^2} f(t) + R_{off} \left[1 - \frac{R_{on} \mu_v}{D^2} f(t) \right] \right\} i(t) \\ \quad + \frac{1}{C} f(t) & w \in (0, D), \\ R_{on} i(t) + \frac{1}{C} f(t) & w = D, \end{cases} \quad (4)$$

其中 $f(t) = \frac{I_m}{2\pi f} [1 - \cos(2\pi f_i t)]$. 取 $R_{on} = 100 \Omega$, $R_{off} = 12560 \Omega$, 得到的仿真图形如图 2 和图 3 所示.

由图 2 可知, 电流频率不同, 电路的特性不同, 频率越低, 电路的电阻变化范围越大, 而且曲线越

接近于直线. 忆阻元件和电容串联后电路的 $i-u$ 曲线依然是斜“8”字形, 但是已经不成中心对称, 交叉点的位置向上偏移, 这主要是受到电容的影响. 改变频率可以改变“8”字交叉点的位置, 频率越大交叉点的位置越低, 不同的电容值, “8”交叉点的位置也不同, 电容值越低, 交叉点对应的电流越大, 直到电路的 $i-u$ 曲线接近于圆. 图 2 中频率为 2.5 kHz 时, 忆阻元件到了边界, 电路的 $i-u$ 曲线发生了比较大的变化, 出现了直线部分, 棱角明显.

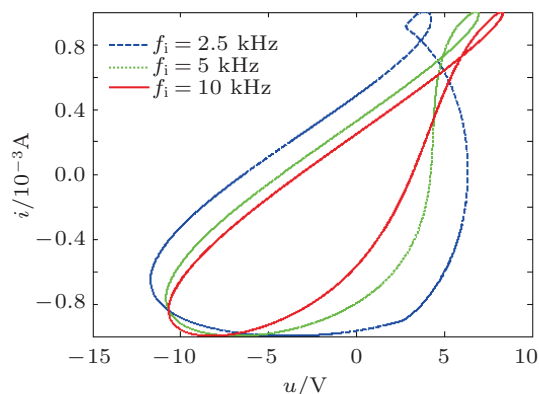


图 2 忆阻元件与电容串联时电流源频率对 $i-u$ 曲线的影响

由图 3 可以看出不同电容值对电路特性的影响. 电容值越低, 电容对电路特性的影响越明显, 电阻的变化范围越大, 而且随电压变化得越慢. 这是由于电容值越小, 电容的等效电阻越大, 对电路特性的影响越大.

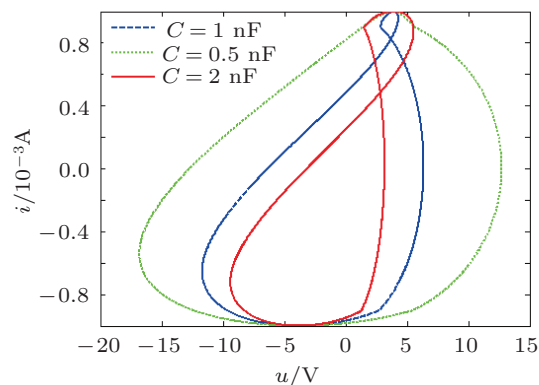


图 3 忆阻元件与电容串联时电容对 $i-u$ 曲线的影响

3.2 忆阻元件与电容并联

对图 4 所示忆阻元件与电容并联的电路, 假设两端的电压为 $u(t) = U_m \sin(2\pi f_u t)$, $w(0) = 0$, U_m 表示电压峰值, f_u 为电压源的频率.

当 $w \in (0, D)$ 时, 由 (3) 式和基尔霍夫电流定律 (KCL) 得

$$i(t) = -\frac{D}{2\mu_v R_{on} A} \frac{1}{\sqrt{\frac{\int_{t_1}^t u(t) dt}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C'}{A}}} u(t) + \frac{1}{C} \frac{du(t)}{dt}$$

$$= -\frac{D}{2\mu_v R_{on} A} \frac{1}{\sqrt{\frac{\frac{U_m}{2\pi f_u} [\cos(2\pi f_u t_1) - \cos(2\pi f_u t)]}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C'}{A}}} u(t) + 2\pi f_u C U_m \cos(2\pi f_u t),$$

由此得到

$$i(t) = \begin{cases} \frac{u(t)}{R_{off}} + f(t) & w = 0, \\ -\frac{D}{2\mu_v R_{on} A} \frac{1}{\sqrt{\frac{\frac{U_m}{2\pi f_u} [\cos(2\pi f_u t_1) - \cos(2\pi f_u t)]}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C'}{A}}} u(t) + f(t) & w \in (0, D), \\ \frac{u(t)}{R_{on}} + f(t) & w = D, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $f(t) = 2\pi f_u C U_m \cos(2\pi f_u t)$.

取 $R_{on} = 100 \Omega$, $R_{off} = 12560 \Omega$, 得到的仿真图形如图 5 和图 6 所示.

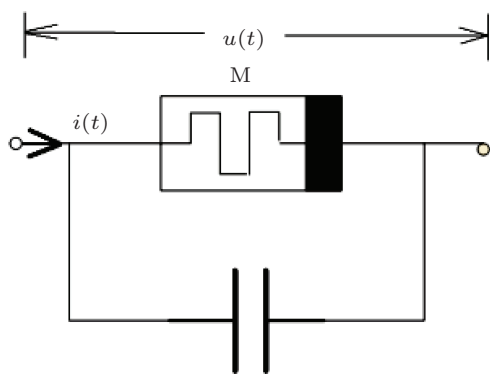


图 4 忆阻元件与电容并联的电路

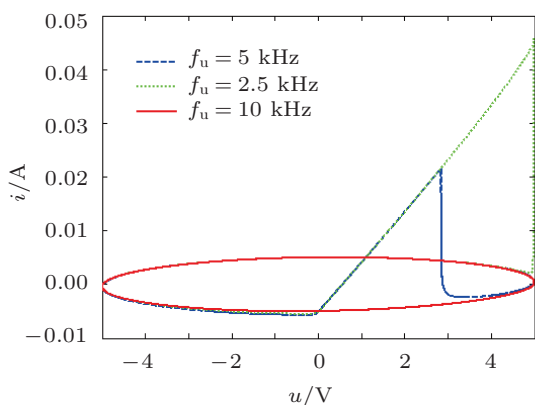


图 5 忆阻元件与电容并联时电压源频率对 $i-u$ 曲线的影响

由图 5 可以看出, 频率不同, 电路的特性不同, 频率越低, 忆阻元件越容易到达边界, 曲线出现跳变, 而且频率越低忆阻元件处于边界状态的时间越长, 跳变降落时的电压值越高. 但是频率并不影响跳变的起跳点, 这说明只要电压的峰值一定, 不同频率忆阻元件到达边界时的电压一致, 但是离开边界状态时的电压却不同. 频率为 10 kHz 时忆阻元件不会到达边界状态, 即忆阻元件这时可以看成是无边界的. 由图 5 可以看出, 频率为 10 kHz 时 $i-u$ 曲线由斜“8”字形变成了椭圆形.

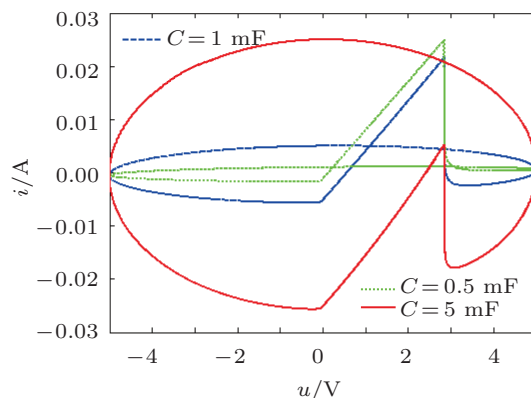


图 6 忆阻元件与电容并联时电容对 $i-u$ 曲线的影响

由图 6 可以看出电容对电路特性的影响. 电容值越大, 对电路的影响越大, 电路的 $i-u$ 曲线越接近于椭圆. 但是对于不同的电容值, 曲线跳变的起跳点和降落点都不变, 说明电容值不影响忆阻元件到达边界. 这主要是由于并联电路各支路的电压是相同的.

3.3 忆阻元件与电感串联

对图 7 所示的忆阻元件与电感串联的电路, 假设通过的电流为 $i(t) = I_m \sin(2\pi f_i t)$, $w(0) = 0$.

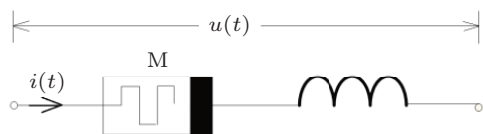


图 7 忆阻元件与电感串联的电路

当 $w \in (0, D)$ 时, 对 (1) 式积分并代入 (2) 式, 由 KVL 得

$$\begin{aligned}
 u(t) &= \left[\frac{R_{\text{on}}}{D} \int_{-\infty}^t \mu_v \frac{R_{\text{on}}}{D} i(t) dt \right. \\
 &\quad \left. + R_{\text{off}} \left(1 - \frac{1}{D} \int_{-\infty}^t \mu_v \frac{R_{\text{on}}}{D} i(t) dt \right) \right] i(t) \\
 &\quad + L \frac{di(t)}{dt} \\
 &= \left[\mu_v \frac{R_{\text{on}}^2}{D^2} \int_{-\infty}^t i(t) dt \right. \\
 &\quad \left. + R_{\text{off}} \left(1 - \frac{R_{\text{on}} \mu_v}{D^2} \int_{-\infty}^t i(t) dt \right) \right] i(t) \\
 &\quad + L \frac{di(t)}{dt} \\
 &= \left[\mu_v \frac{R_{\text{on}}^2}{D^2} f(t) + R_{\text{off}} \left(1 - \frac{R_{\text{on}} \mu_v}{D^2} f(t) \right) \right] i(t) \\
 &\quad + 2\pi f_i I_m \cos(2\pi f_i t),
 \end{aligned}$$

其中 L 表示电感元件的电感值. 由此可得

$$u(t) = \begin{cases} R_{\text{off}} i(t) + g(t) & w = 0, \\ \left\{ \begin{aligned} &\mu_v \frac{R_{\text{on}}^2}{D^2} f(t) \\ &+ R_{\text{off}} \left[1 - \frac{R_{\text{on}} \mu_v}{D^2} f(t) \right] \end{aligned} \right\} i(t) & w \in (0, D), \\ R_{\text{on}} i(t) + g(t) & w = D, \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned}
 g(t) &= 2\pi f_i I_m \cos(2\pi f_i t), \\
 f(t) &= \frac{I_m}{2\pi f_i} [1 - \cos(2\pi f_i t)].
 \end{aligned}$$

取 $R_{\text{on}} = 100 \Omega$, $R_{\text{off}} = 12560 \Omega$, 得到如图 8 和图 9 所示的仿真图形.

由图 8 可以看出频率对电路特性有明显的影 响. 频率越低, 电路的电阻变化越慢, 曲线越接近于

直线. 忆阻元件和电感串联与忆阻元件和电容串联的区别在于“8”字形的交叉点向下偏移, 而且频率越高, 斜“8”字形的交叉点越低. 这主要是由于频率既影响忆阻元件阻值的变化, 又改变电感的等效电阻的阻值, 频率越高, 电感对电路的影响越明显.

由图 9 可知, 电感值不同, 电路的特性也不同. 电感值越大, 电感对电路的影响越大, $i-u$ 曲线斜“8”字形交叉点的位置越低.

对比图 8 和图 9 可以看出, 频率和电感值都能影响 $i-u$ 曲线斜“8”字形交叉点的位置. 图 8 中频率为 2.5 kHz 时, 忆阻元件到达了边界状态, 电路的 $i-u$ 曲线出现线性部分, 棱角明显. 图 9 中不同电感值下的忆阻元件都到达了边界状态, 说明改变电感值不会影响忆阻元件到达边界状态.

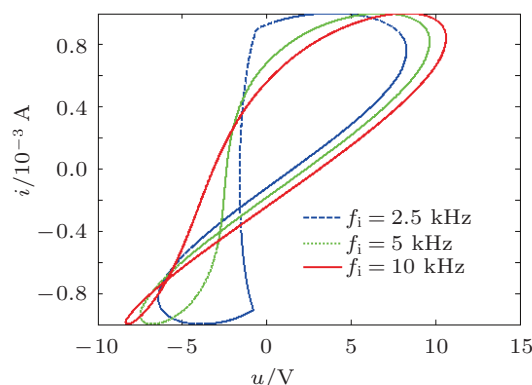


图 8 忆阻元件与电感串联时电流源频率对 $i-u$ 曲线的影响

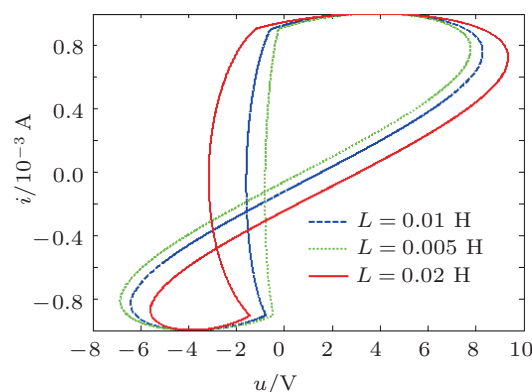


图 9 忆阻元件与电感串联时电感值对 $i-u$ 曲线的影响

3.4 忆阻元件与电感并联

对图 10 所示忆阻元件与电感并联的电路, 假设两端的电压为 $u(t) = U_m \sin(2\pi f_u t)$, $w(0) = 0$.

当 $w \in (0, D)$ 时, 由 (3) 式和 KCL 得

$$i(t) = -\frac{D}{2\mu_v R_{on} A} \frac{1}{\sqrt{\frac{\int_{t_1}^t u(t)dt}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C'}{A}}} u(t) + \frac{1}{L} \int_0^t u(t)dt$$

$$= -\frac{D}{2\mu_v R_{on} A} \frac{1}{\sqrt{\frac{\frac{U_m}{2\pi f_u} [\cos(2\pi f_u t_1) - \cos(2\pi f_u t)]}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C'}{A}}} u(t) + \frac{U_m}{2\pi f_u L} [1 - \cos(2\pi f_u t)],$$

由此可得

$$i(t) = \begin{cases} \frac{u(t)}{R_{off}} + f(t) & w = 0, \\ -\frac{D}{2\mu_v R_{on} A} \frac{1}{\sqrt{\frac{\frac{U_m}{2\pi f_u} [\cos(2\pi f_u t_1) - \cos(2\pi f_u t)]}{A} + \frac{B^2}{4A^2} - \frac{C'}{A}}} u(t) + f(t) & w \in (0, D), \\ \frac{u(t)}{R_{on}} + f(t) & w = D, \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$f(t) = \frac{U_m}{2\pi f_u L} [1 - \cos(2\pi f_u t)].$$

取 $R_{on} = 100 \Omega$, $R_{off} = 12560 \Omega$, 得到如图 11 和图 12 所示的仿真图形.

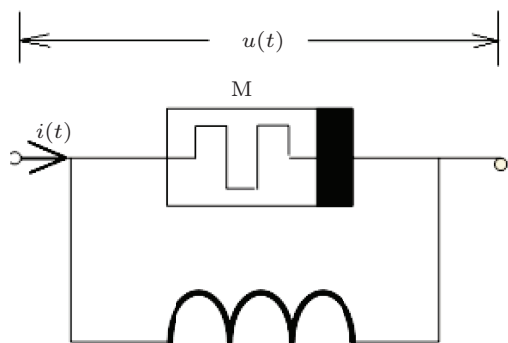


图 10 忆阻元件与电感并联的电路

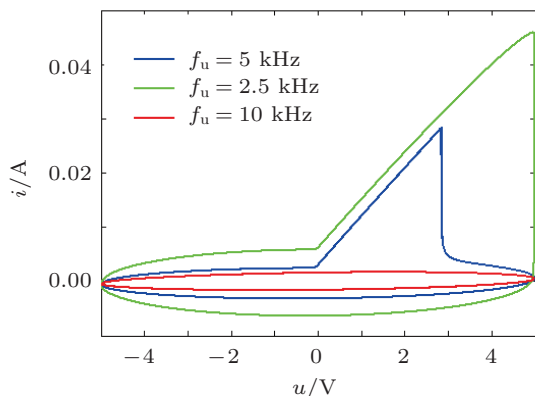


图 11 忆阻元件与电感并联时电压源频率对 $i-u$ 曲线的影响

由图 11 可以看出忆阻元件和电感并联后, 电路的 $i-u$ 曲线不再是单个忆阻元件的斜“8”字形. 由于频率既能改变忆阻元件的电阻变化情况, 也能改变电感在电路中的电阻, 所以频率越高, 电感对电路的影响越明显; 相反, 频率越低, 忆阻元件对电路的影响越明显. 从图 11 还可看出, 频率为 2.5 和 5 kHz 时忆阻元件都到达了边界状态, 曲线出现了明显的突变. 可见电感与忆阻元件并联后并没有改变忆阻元件到达边界的条件, 这是因为并联电路两支路的电压均为激励电压. 并联使电路的总体电流发生变化, 电路整体的 $i-u$ 曲线从斜“8”字形变成图 11 所示的形状. 从图 12 可以看出, 电感越小对电路的影响越大, 跳变越不明显. 对比图 11 和图 12 可知, 电感不影响图像的跳变点, 而频率可以改变电路的跳变点. 频率越低跳变的电压值越大, 这主要是由于频率越低, 忆阻元件在边界停留的时间越长, 跳变越晚.

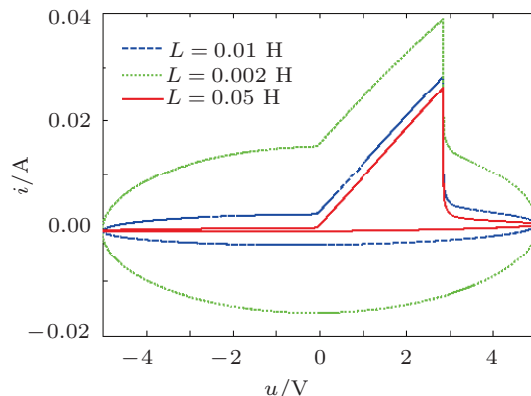


图 12 忆阻元件与电感并联时电感对 $i-u$ 曲线的影响

4 有边界忆阻元件的应用

4.1 忆阻元件在快速读写中的应用

忆阻元件的 $i-u$ 曲线受激励电源频率、掺杂电阻比和初始掺杂宽度的影响^[12]. 激励电源的频率越大, 忆阻元件在 R_{on} 和 R_{off} 之间的转换速度越快, 但是频率越大, 忆阻元件越接近于线性电阻, 阻值变化得越小, 跳变越不明显.

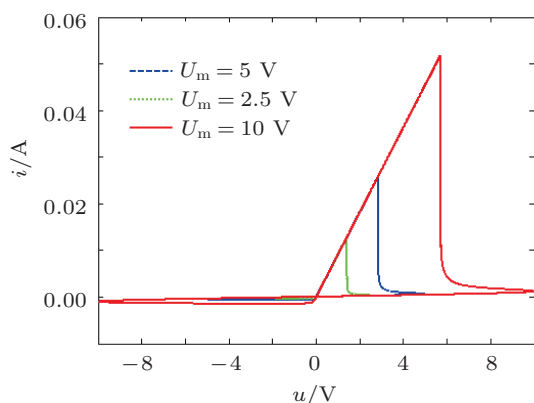


图 13 忆阻元件两端的电压峰值对 $i-u$ 曲线的影响

图 13 为不同电压峰值时的 $i-u$ 曲线, 可见电压峰值越大, 忆阻元件越容易到达边界状态, 而且跳变越明显. 在高频时, 依然可以通过增大电压来使忆阻元件达到边界状态, 实现比较大的电流或电压跳变. 这样就可以解决高频跳变不明显的缺点, 从而达到通过忆阻元件在高频电压下实现快速读写.

4.2 忆阻元件在调频中的应用

在线性电路中, 输出信号总是与输入信号同频率, 不可能产生新的频率成分, 如果采用非线性器件, 可能会使输出信号波形产生非线性失真, 产生新的频率分量. 由于增量忆阻 $M(q)$ 值变化的忆阻元件的 $i-u$ 曲线是非线性的^[2], 可以将电流 i 用电压 u 展开为下式所示的幂级数

$$i = a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3 \dots \quad (8)$$

假定近似取至二次项, 即

$$i = a_0 + a_1u + a_2u^2, \quad (9)$$

当输入为 $u(t) = U_m \cos(2\pi f_u t)$ 时, 代入 (9) 式得

$$\begin{aligned} i &= a_0 + a_1U_m \cos(2\pi f_u t) \\ &\quad + a_2U_m^2 \cos^2(2\pi f_u t) \\ &= I_0 + I_{1m} \cos(2\pi f_u t) \\ &\quad + I_{2m} \cos(4\pi f_u t), \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} I_0 &= a_0 + \frac{1}{2}a_2U_m^2, \\ I_{1m} &= a_1U_m, \\ I_{2m} &= \frac{1}{2}a_2U_m^2. \end{aligned}$$

传统的调频电路由二极管等元件组成, 二极管的 $i-u$ 曲线是固定的, 而忆阻元件的 $i-u$ 曲线受激励电源频率、掺杂电阻比和初始掺杂宽度的影响, 所以可以通过改变这些参数, 得到不同的 $i-u$ 曲线, 实现更多种类的调频电路. 传统调频电路需要设计参数让二极管工作在非线性区, 而忆阻元件本身就是非线性元件, 不需要设置电路参数使其工作在非线性区. 所以忆阻元件在调频、信号处理等方面有广阔的应用前景.

4.3 存储

有边界的忆阻元件的 $i-u$ 曲线有明显的跳变, 而且在与电感、电容的串并联电路中跳变依然很明显, 可以利用其产生的高低电平实现 0, 1 存储, 与传统的存储器件相比, 忆阻元件的电阻是其本身的状态, 利用其进行信息存储, 存储和读取都可以是即时性的, 速度快. 同时电路中没有电容、电感的充放电过程, 在不改变存储信息时, 电路不耗电. 因此忆阻元件具有体积小、耗能低等优点, 应用前景非常广泛.

4.4 加密通信

忆阻元件是典型的无源非线性元件, 其 $i-u$ 曲线是斜“8”字形, 在含有忆阻元件的非线性电路中会产生混沌现象^[13-16], 具有非常好的随机性. 在忆阻元件与电容、电感的串、并联电路中, 可以通过改变电容或电感值很容易地改变电路 $i-u$ 曲线的形状, 通过这种非线性电路产生的随机数具有更好的随机性. 采用含有忆阻元件的电路产生随机数对信息进行加密难以破解, 从而增强通信的安全性. 忆阻元件在加密通信中有非常好的应用前景.

5 结论

本文对文献 [1] 中给出的忆阻元件的电压电流关系进行了有边界修正, 并利用修正后的数学模型、通过电压激励和电流激励两种方式研究了有边界忆阻元件分别与电容、电感串、并联的电路特性, 分析了频率、电感值和电容值对电路特性的影响. 解释了忆阻元件在调频中的应用原理, 指出

了有边界忆阻元件在调频中的独特优点;深入分析了忆阻元件在快速读写中的应用,高频高压有利于有边界忆阻元件实现快速读写;进一步研究了有边

界忆阻元件在数据存储方面的优势. 总之,有边界忆阻元件具有独特的性质,应用前景广阔.

-
- [1] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, Williams R S 2008 *Nature* **453** 80
- [2] Chua L O 1971 *IEEE Trans. Circuit Theory* **18** 507
- [3] Chua L O, Kang S M 1976 *Proc. IEEE* **64** 209
- [4] Dmitri B S, Gregory S S, Duncan R S, Stanley W 2008 *Nature* **453** 45
- [5] James M, He T 2008 *Nature* **453** 42
- [6] Wey T A, Benderli S 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **45** 1103
- [7] Chen G 2008 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **8** 55
- [8] Di V M, Pershin Y V, Chua L O 2009 *Proc. IEEE* **97** 1717
- [9] Wang X B, Chen Y R, Xi H W, Li H, Dimitrov D 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 294
- [10] Chen X M, Wu G H, Bao D H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 093501
- [11] Witrisal K 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **45** 1103
- [12] Zhang X, Zhou Y Z, Bi Q, Yang X H, Zu Y X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6673 (in Chinese) [张旭, 周玉泽, 闭强, 杨兴华, 祖云霄 2010 物理学报 **59** 6673]
- [13] Zhang X F, Chen Z Y, Bi Q S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3057 (in Chinese) [张晓芳, 陈章耀, 毕勤胜 2010 物理学报 **59** 3057]
- [14] Xu Z, Liu C X, Yang T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 131 (in Chinese) [许喆, 刘崇新, 杨韬 2010 物理学报 **59** 131]
- [15] Bao B C, Liu Z, Xu J P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3785 (in Chinese) [包伯成, 刘中, 许建平 2010 物理学报 **59** 3785]
- [16] Zhang J Z, Wang A B, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3793 (in Chinese) [张建忠, 王安帮, 王云才 2009 物理学报 **58** 3793]

Basic properties and applications of the memristor circuit*

Song De-Hua¹⁾ Lü Meng-Fei¹⁾ Ren Xiang¹⁾ Li Meng-Meng¹⁾ Zu Yun-Xiao^{2)†}

1) (*School of Information and Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

2) (*School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

(Received 24 June 2011; revised manuscript received 28 October 2011)

Abstract

The circuits of memristor with border constraint, connected with capacitance and inductance in series, and with capacitance and inductance in parallel are studied separately. The properties of the circuits and the influences of frequency and element parameters on circuit are analyzed. Theories are proved by simulation. Potential applications are predicted based on the properties of memristor with border constraint and its related circuits.

Keywords: memristor, capacitance, inductance, properties of circuit

PACS: 81.05.Bx, 61.82.Fk, 05.45.-a

* Project supported by the Research Innovation Fund for College Students of Beijing University of Posts and Telecommunications, China.

† E-mail: zuyx@bupt.edu.cn