

基于忆阻器的矩形波信号发生器

俞周芳

(浙江师范大学 电子工程系, 浙江 金华 321004)

摘要: 利用忆阻器独特的电路学性质, 设计了一个基于忆阻器的新型矩形波信号发生器。电路中不含有分立的电容元件, 输出波形频率和幅值精确可调。用 PSPICE 进行仿真分析, 仿真结果验证了该方案的有效性。

关键词: 忆阻器; 矩形波信号发生器; PSPICE

中图分类号: TN389

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)24-0029-03

Memristor-based rectangle wave generator

Yu Zhoufang

(Department of Electronic Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: A new rectangle wave generator based on memristor is proposed using the unique circuit properties of memristor. The proposed circuit does not contain discrete capacitor element, while the frequency and amplitude of output waveform can be adjusted accurately. The simulation results verify the validity of the scheme in PSPICE simulation analysis.

Key words: memristor; rectangle wave generator; PSPICE

1971年,加州伯克利大学教授 CHUA^[1]从电路变量关系完备性角度考虑,首次提出了忆阻器(Memristor)的概念,并预言忆阻器是除电容、电感、电阻之外的第四种基本电路元件。2008年,HP实验室一个由 Stanley Williams^[2]领导的研发小组采用掺杂的二氧化钛(TiO₂)薄膜成功设计出世界上首个能工作的忆阻器物理模型。自此,对忆阻的应用推广掀起了研究热潮,包括高密度非易失性存储器、可重构逻辑和可编程逻辑、信号处理、神经网络以及控制系统等^[3-7]。

常见的信号发生器除了正弦波振荡电路外,还有矩形波等非正弦波发生电路。矩形波信号通常用作数字电路的信号源或模拟电子开关的控制信号,也是其他非正弦波发生器的基础。本文利用忆阻器独特的电学性质,设计了一个不含有分立电容元件的新型矩形波信号发生器,并对电路的工作原理进行了理论分析。PSPICE 仿真结果验证了该方案的有效性。

1 忆阻器数学模型

HP 二氧化钛忆阻器的基本原理是掺了氧空位的掺杂区和非掺杂区的接触面在外界激励下产生漂移,从而引起元件导电性能的变化。经过大量实验,HP实验室建立了流控型忆阻器在边界条件下($0 \leq w \leq D$)的微分形式的数学模型:

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

$$\frac{dw}{dt} = \mu v \frac{R_{on}}{D} i(t) \quad (2)$$

式中, R_m 为忆阻器的阻值, D 为薄膜的总厚度, w 为掺杂层厚度, R_{off} 和 R_{on} 分别为接触面处于边界时忆阻器的最大和最小阻值, μv 为理想情况下的杂质迁移率。

已知忆阻器满足欧姆定律,根据电流与电荷、电压与磁通量之间的积分关系,参考文献[8]在HP忆阻器数学模型的基础上推导出了忆阻器的磁通量控制模型:

$$R_m(\varphi) = \sqrt{R_{w0}^2 - 2r\varphi(t)} \quad (3)$$

式中, R_{w0} 为忆阻器的初始状态,其中比例因子 $r = \mu w R_{on} (R_{off} - R_{on}) / D^2$ 。

假设忆阻器上的偏压电压的幅度为 V_m ,则在有效磁通范围内,将忆阻器从初始状态 w_0 转换到任意状态 w 所需要的时间为 T_w :

$$T_w = \frac{1}{r} \int_{R_{w0}}^{R_w} \frac{R_m}{V_m} dR_m \quad (4)$$

2 基于忆阻器的脉冲信号发生器电路

最基本的矩形波信号发生器是由电压比较器和RC积分电路组成。但电路中需要分立的片外大容量电容元件能耗大,不利于单片集成。已知忆阻器的阻值与流经

硬件纵横

Hardware Technique

的电荷有关,则控制忆阻器上偏置电压的极性就能控制其阻值的变化,整个操作类似于电容、电感等储能元件的充放电过程。因此,忆阻器可以替换RC积分电路中的电容元件,同时利用忆阻器内在的延迟特性来实现振荡功能。基于忆阻器的矩形波信号发生器电路主要包括忆阻振荡器电路和幅值调节电路两部分,如图1所示。

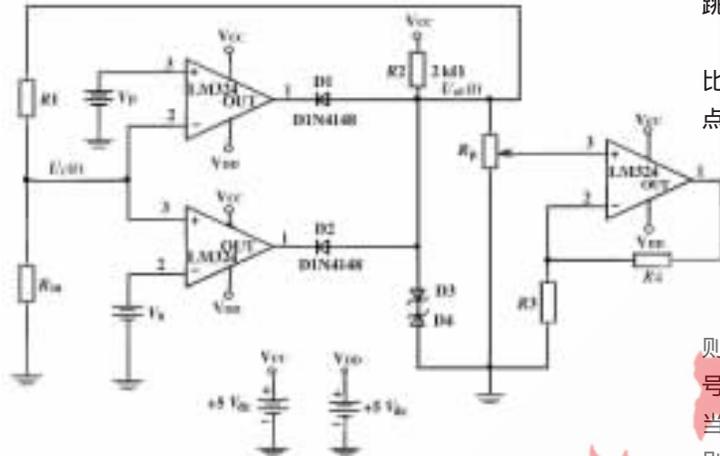


图1 忆阻矩形波信号发生器电路

2.1 忆阻振荡器电路

忆阻振荡器电路由双限比较器和忆阻器负反馈电路构成。图2为双限比较器的传输特性。双限比较器有两个门限电压,即上门限电压 V_p 和下门限电压 V_n ,且 $V_n < V_p$ 。当输入信号位于两个门限电压之间时,比较器的输出为高电平 V_{oh} ,否则输出为低电平 V_{ol} 。

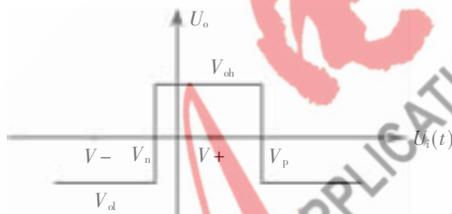


图2 双限比较器传输特性

假设忆阻器在正向偏置电压下阻值变大,反之阻值变小。在比较器输入端,忆阻器 R_m 和反馈电阻 R_1 构成分压电路,则忆阻器上的电压为:

$$U_i(t) = U_{ol}(t) \frac{R_m}{R_m + R_1} = U_{ol}(t) \frac{1}{1 + R_1/R_m} \quad (5)$$

由式(5)可知,振荡器的工作点 $U_i(t)$ 与忆阻器的阻值成正比,而且 $U_i(t)$ 是由输出信号直接反馈到比较器输入端的, $U_i(t)$ 的极性与输出信号的极性一定相同,因此 $U_i > V_p$ 和 $V_n < U_i < 0$ 这两种情况就不需要考虑。假设接通电源后比较器的初始工作点位于 $0 < U_i < V_p$,则电路的状态变化过程如下:

(1)比较器的输出为高电平,忆阻器在正向偏置电压下,阻值变大,工作点右移,当忆阻器上的电压略大于 V_p 时,电路输出发生翻转。

(2)工作点跳变到 V^- 位置,由于比较器的输出为低电平,因此忆阻器上的偏置电压小于0。忆阻器在反向偏置电压下阻值变小, $|U_i(t)|$ 变小,工作点继续右移。

(3)当比较器的工作点右移到达 V_n 位置时,电路输出再一次发生翻转。

(4)比较器的输出变为高电平,此时比较器的工作点跳变到 V^+ 位置,重新返回状态(1)。

同理,如果双限比较器初始工作点位于 $U_i < V_n$,此时比较器的输出为低电平,忆阻器的阻值开始减小,工作点随之移到 V_n 位置后发生跳转,电路同样可以产生振荡。从上述对电路状态的分析中发现,电路的正半周期为工作点从 V^+ 位置移动到 V_p 所需要的时间,负半周期为工作点从 V^- 位置移动到 V_n 所需要的时间。忆阻器的阻值是连续可变的,可认为在临界点位置(V_n 和 V_p)时,忆阻器阻值在跳转瞬间保持不变,则由双限比较器的传输特性可知,对于一个给定输入信号 U_i ,都有对应着唯一的忆阻器等效阻值。不难求得,当 $U_i = V_n$ 和 $U_i = V_p$ 时对应的忆阻器的阻值 R_{mn} 和 R_{mp} 分别为:

$$R_{mn} = R_1 \frac{V_n}{V_{oh} - V_n}, R_{mp} = R_1 \frac{V_p}{V_{oh} - V_p} \quad (6)$$

式(4)已经给出了在边界范围内($0 \leq w \leq D$),忆阻器从初始状态跳转到任意状态所需时间的计算公式。将式(5)和式(6)代入式(4),得电路的正半周期:

$$T_H = \frac{1}{r} \int_{R_{mn}}^{R_{mp}} \frac{R_m}{V_m} dR_m = \frac{R_{mp}^2 - R_{mn}^2 + R_1(R_{mp} - R_{mn})}{rV_{oh}} \quad (7)$$

同理,可得电路的负半周期:

$$T_L = \frac{R_{mn}^2 - R_{mp}^2 + R_1(R_{mn} - R_{mp})}{rV_{ol}} \quad (8)$$

这里 R_{mn} 、 R_{mp} 的值都不能超出边界极限电阻,通过调节反馈电阻 R_1 的值来调整矩形波的输出频率。为了保证振荡器的工作点能在两个门限电压位置处自动跳转,需要给忆阻器设置合适的初始阻值。在电路设计中,忆阻器的初始阻值最好与反馈电阻 R_1 保持一致。

2.2 幅值调节电路

忆阻振荡器的振荡频率与双限比较器的高低输出电平有关,由于运算放大器组成的双限比较器容易受到温度和电源电压影响,为了保证振荡器的正常工作,在比较器的输出端需要加上稳幅环节。稳压管双向限幅电路结构简单,选择不同稳压值的稳压管可以产生相应的输出电压,但电路的限幅特性受稳压管参数影响很大,而且输出信号的电压幅值完全取决于稳压管的稳压值。因此采用这种方法对输出电压进行调整很不方便,精度也比较低。

为了精确调节矩形波信号发生器输出信号的幅值,同时提高电路带负载能力,在图1忆阻振荡器电路的输出端并联了一个可调电位器 R_p 。通过 R_p 对输出电压进行取样,然后将取样电压连接到由运算放大器和电阻网

《微型机与应用》2012年第31卷第24期

硬件纵横

Hardware Technique

络 R_3 、 R_4 组成的同相比例放大电路。为减小对忆阻振荡器电路输出信号的影响,设计幅值调节电路时应选用大阻值电压取样电位器(可取 $100\text{ k}\Omega$)。经计算,矩形波信号发生器输出信号幅值的表示式为:

$$U_o(t) = U_{oi}(t) \frac{R_p}{100 \times 10^3} \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (9)$$

3 电路仿真

由于实际忆阻器是纳米级器件,尚未商业化生产,目前大多数研究者难以获得一个真正的忆阻器元件,为验证电路的有效性,进行了相关计算机仿真。本文所使用的忆阻器参考了参考文献[9]给出的 HP 忆阻器 SPICE 宏模型,忆阻器的基本参数设置为: $R_{on}=100\ \Omega$, $R_{off}=16\ \text{k}\Omega$, $D=10\ \text{nm}$, $\mu w=10^{-14}\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$, $p=100$ 。为方便计算,选择电路参数使得: $V_{oh}=1\ \text{V}$, $V_{op}=0.8\ \text{V}$, $V_n=-0.5\ \text{V}$, $R_3=R_4=10\ \text{k}\Omega$, $R_p=60\ \text{k}\Omega$ 。选择电路元器件为: LM324 四集成运放($\pm 5\ \text{V}$ 双电源供电)、D1N4001 二极管、D1N4148 双向稳压管。取反馈电阻 R_1 为扫描元件,设置其阻值在 $0.2\ \text{k}\Omega \sim 3\ \text{k}\Omega$ 之间连续可调,对图 1 所示电路进行瞬态分析。

调节反馈电阻 R_1 的阻值,电路能够输出 $0 \sim 80\ \text{Hz}$ 的低频矩形波信号。图 3 给出了当反馈电阻 $R_1=2\ \text{k}\Omega$ 时电路的仿真输出波形。从图中可以看出,忆阻器的阻值在 $R_{on}=2\ \text{k}\Omega$ 与 $R_{off}=8\ \text{k}\Omega$ 之间振荡,比较器的工作点分别在 $0.5\ \text{V} \sim 0.8\ \text{V}$ 、 $-0.8\ \text{V} \sim -0.5\ \text{V}$ 之间来回移动,此时矩形波信号发生器的输出波形幅值为 $1.2\ \text{V}$,振荡频率约为 $2\ \text{Hz}$,误差小于 5% ,与理论预测值 $f=1.905\ \text{Hz}$ 基本符合。

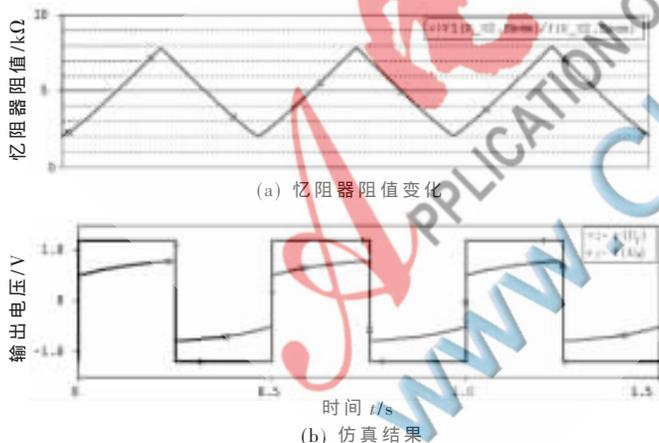


图 3 PSPICE 仿真输出波形

忆阻器的出现不仅丰富了现有的电路元件类型,更以其独特的电学性质在电路设计方面给人们提供了新的思路。本文设计的基于忆阻器的矩形波信号发生器,通过忆阻器内在的延迟响应来实现振荡器功能。经 PSPICE 仿真分析,结果表明系统设计理论可行。该电路的特点是: (1) 输出的矩形波信号频率和幅值可调; (2) 忆阻器是纳米级器件,有利于单片集成; (3) 电路不含有分立的电容元件,避免了大电容难以集成的困难,有利于减少寄生效应的影响。

《微型机与应用》2012 年 第 31 卷 第 24 期

参考文献

- [1] CHUA L O. Memristor—the missing circuit element[J]. IEEE Transactions on Circuits Theory, 1971,18(5):507–519.
- [2] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008,453(7191):80–83.
- [3] VARGHESE D, GANDHI G. Memristor based high linear range differential pair[C]. Proceeding of IEEE, 2009:935–938.
- [4] PERSHIN Y V, VENTRA M D. Experimental demonstration of associative memory with memristive neural networks [J]. Neural Netw., 2010,23(7):881–886.
- [5] HO Y, HUANG G, LI P. Nonvolatile memristor memory: device characteristics and design implications[C]. Proceeding of IEEE/ACM Int. Aided Design (ICCAD), 2009:485–490.
- [6] WEY T A, BENDERLI S. Amplitude modulator circuit featuring TiO_2 memristor with linear dopant drift[J]. Electronics Letters, 2009, 45(22): 1103–1108.
- [7] XIA Q, ROBINETT W, CUMBIE M W, et al. Memristor-CMOS hybrid integrated circuits for reconfigurable logic[J]. Nano Lett., 2009,9(10):3640–3645.
- [8] RADWAN A G, ZIDAN M A, SALAMA K N. HP memristor mathematical model for periodic signals and DC[C]. IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2010:861–864.
- [9] BIOLEK Z, BOILEK D, BIOLKOVA V. SPICE Model of memristor with nonlinear dopant drift[J]. Radio Engineering, 2009,18(2):210–214.

(收稿日期:2012-10-30)

作者简介:

俞周芳,女,1987年生,硕士研究生,主要研究方向:传感器与信号检测。

欢迎网上投稿 www.pcachina.com

33