

一种改进的 WO_x 忆阻器模型及其突触特性分析

孟凡一 段书凯 王丽丹 胡小方 董哲康

An improved WO_x memristor model with synapse characteristic analysis

Meng Fan-Yi Duan Shu-Kai Wang Li-Dan Hu Xiao-Fang Dong Zhe-Kang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 148501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.148501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米级尺寸参数对钛氧化物忆阻器的特性影响

[Influence of length parameter on the characteristics of nanoscale titanium oxide memristor](#)

物理学报.2015, 64(10): 108502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108502>

单轴应变硅 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管电容特性模型

[A model of capacitance characteristic for uniaxially strained Si N-metal-oxide-semiconductor field-effect transistor](#)

物理学报.2015, 64(6): 067305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.067305>

两类纳米级非线性忆阻器模型及串并联研究

[Two types of nanoscale nonlinear memristor models and their series-parallel circuits](#)

物理学报.2014, 63(12): 128502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.128502>

非化学计量比靶材溅射制备 Cu-Al-O 薄膜的光学电学性质研究

[Electrical and optical properties of Cu-Al-O thin films sputtered using non-stoichiometric target](#)

物理学报.2011, 60(11): 117307 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.117307>

一种改进的 WO_x 忆阻器模型及其突触特性分析*孟凡一¹⁾ 段书凯^{1)†} 王丽丹¹⁾ 胡小方²⁾ 董哲康¹⁾

1)(西南大学电子信息工程学院, 重庆 400715)

2)(香港城市大学机械与生物医学工程系, 香港 999077)

(2014年12月19日收到; 2015年3月16日收到修改稿)

忆阻器被定义为第四种基本电子元件, 其模型的研究呈现多样性. 目前, 忆阻器模型与忆阻器实际特性的切合程度引起了研究者的广泛关注. 通过改变离子扩散项, 提出了一种新的 WO_x 忆阻器模型, 更好地匹配了忆阻器的实际行为特性. 首先, 新的模型不仅能够描述忆阻器的一般特性, 而且能够俘获记忆丢失行为. 另外, 将新的忆阻器作为神经突触, 分析了脉冲速率依赖可塑性、短期可塑性、长期可塑性, 并发现了与生物系统中极为相似的“经验学习”现象. 最后, 考虑到温度与离子扩散系数的关系, 探讨了温度对突触权值弛豫过程的影响. 实验表明, 新忆阻器模型比原来的模型更切合实际, 且更适合作为突触而应用到神经形态系统之中.

关键词: 忆阻器, 离子扩散, 突触可塑性, 温度

PACS: 85.35.-p, 73.40.Sx, 73.43.Cd, 87.19.lw

DOI: 10.7498/aps.64.148501

1 引言

忆阻器(memristor)的概念是由加州大学伯克利分校的蔡少棠教授根据电路理论的完备性于1971年提出的^[1], 它代表着磁通量和电荷之间的关系, 并被认为是电阻、电容、电感之外的第四种基本电路元件^[1,2]. 2008年, 惠普实验室Strukov等^[2]在做 TiO_2 交叉阵列实验时, 首次研制出了忆阻器, 引起了世界各国研究者的关注.

从惠普实验室研制出忆阻器以来, 已陆续提出了各种忆阻器模型. 例如, 文献^[3]中惠普忆阻器的非线性漂移模型, 文献^[4]中关注磁畴壁运动的自旋忆阻器紧密模型, 文献^[5]中关注阈值特性的磁通控制忆阻器模型. 这些模型是基于离子迁移的, 虽然符合忆阻器的基本特性, 但还有许多实际的行为特性并未体现出来. 尤其在忆阻器作为突触时,

离子迁移模型能够模拟突触的非线性传输特性, 但对于长期可塑性(long-term plasticity, LTP)、短期可塑性(short-term plasticity, STP)及生物系统中的记忆消退现象却无法解释, 这是目前离子迁移模型所共有的不足. 因此, 找到一种能够拟合上述现象的数学模型很有必要.

忆阻器的纳米级尺寸、低功耗、非挥发性及记忆功能使它在电阻随机存取存储器^[6,7]、混沌系统^[8]、智能控制^[9]、神经网络^[10,11]、交叉阵列^[12,13]、信号处理和电路设计等^[14,15]领域有着广泛的应用. 尤其在生物功能仿真方面, 一个合适的忆阻器可作为突触巧妙地应用到神经形态系统之中. 同时, 忆阻器的行为特性也受许多因素的影响. 比如, 文献^[16]从材料的角度分析了杂质漂移和隧道势垒共存的情况下二氧化钛忆阻器的参数变化; 文献^[17]从温度变化的角度分析了钛氧化物忆阻器导电性能的变化; 文献^[18]从尺寸的角度分析了横截面

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: 教技函[2013]47号)、国家自然科学基金(批准号: 61372139, 61101233, 60972155)、教育部“春晖计划”科研项目(批准号: z2011148)、留学人员科技活动项目(批准号: 渝人社办[2012]186号)、重庆市高等学校优秀人才支持计划(批准号: 渝教人[2011]65号)、重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(批准号: 渝教人[2011]65号)和中央高校基本科研业务费(批准号: XDJK2014A009, XDJK2013B011)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: duansk@swu.edu.cn

积的变化对忆阻器导电性能的影响. 然这些研究都是在离子迁移模型的基础上进行的, 并没有考虑因离子迁移引起的浓度变化, 进而因浓度差所导致的离子扩散对忆阻器导电特性的影响. 文献 [19] 提出了一种二氧化钛忆阻器的离子扩散模型, 但没有考虑温度对离子扩散的影响. 本文在文献 [20] 所提的 WO_x 忆阻器模型的基础上, 将其与该忆阻器的实际特性进行了比较, 发现了明显的不足之处, 通过改进离子扩散项, 完善了原数学模型的不足, 能够更好地匹配该忆阻器的实际行为特性. 从忆阻突触的角度, 依次探究了不同幅值、宽度、间隔的脉冲对突触权值的影响, 分析了忆阻突触的可塑性和记忆丢失的原因, 即氧空穴因浓度之差会在输入脉冲间隔内后向扩散. 考虑到温度会影响离子扩散, 探讨了温度对忆阻突触权值的影响, 改进后的模型具有更强的生物功能.

本文结构安排如下: 第2部分介绍了参考文献 [20] 中 WO_x 忆阻器模型, 并通过与忆阻器的实

际特性相比较指出了原模型存在的不足; 第3部分改进了离子扩散项, 提出了一种新的忆阻器模型, 研究了它的非线性传输特性; 第4部分分析了改进后忆阻突触的可塑性, 包括脉冲速率可塑性、长期可塑性、短期可塑性以及“经验学习”现象; 第5部分探讨了温度对离子扩散和改进后忆阻突触的影响; 第6部分对全文进行了概括和总结.

2 WO_x 忆阻器模型

忆阻器的一个典型应用就是作为神经突触应用到神经形态系统之中, 为了模拟突触的非线性传输特性, 已经制作了多种不同材料的忆阻器. 文献 [20, 21] 介绍了一种 Pd/ WO_x /W 结构的忆阻器, 这种元件包含一个顶部钯电极、一个氧化钨开关层和一个底部钨电极, 其基本结构和实际中观察到的输入输出特性如图 1 所示.

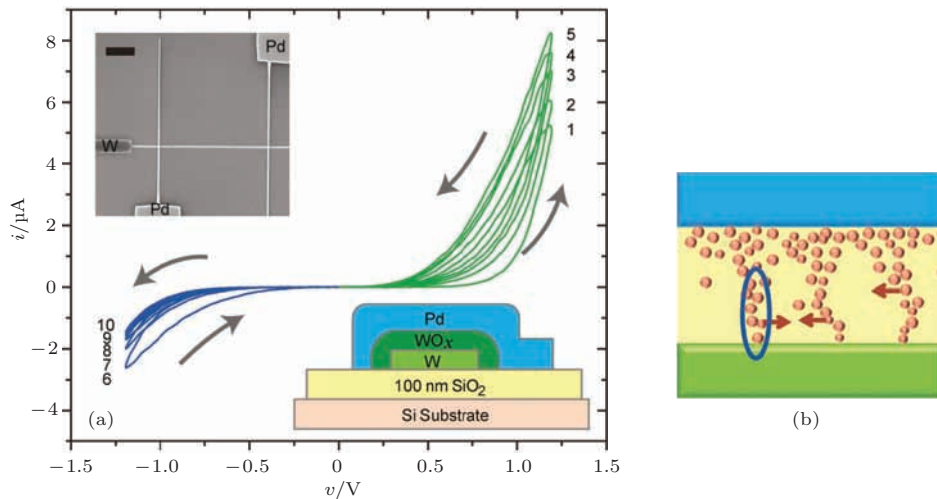


图 1 (网刊彩色) 文献 [21] 中关于 WO_x 忆阻器的介绍 (a) 结构及实际的 $v-i$ 曲线; (b) 实际中观察到的离子扩散和迁移, 带蓝色小圆圈的箭头方向是扩散方向, 迁移是相反方向

Fig. 1. (color online) The introduction about WO_x memristor in Ref. [21]: (a) structure and the physical $v-i$ curve; (b) the ion diffusion and migration observed in physical, direction of the arrow with blue circle is the ion diffusion, the opposite one is ion migration.

从图 1(a) 可以看出, 无论在正电压作用下还是在负电压作用下, 相邻扫描周期的 $v-i$ 曲线都发生了交叠, 这是由于在扫描间隔内, 偏压作用下氧空穴的前向迁移作用小于因浓度差而引起的后向扩散作用所造成的, 这与传统忆阻器的离子迁移模型很不相同. 为了对这种忆阻器进行数学建模, 文献 [20] 考虑到在偏压作用下, 金属-半导体-金属结构可能产生肖特基势垒和隧道效应, 该元件正是通

过外部电压改变二者之间的关系来进行工作的. 基于此, 建立了 WO_x 忆阻器的数学模型, 它的特性方程如下:

$$i = (1 - w)\alpha[1 - \exp(-\beta v)] + w\gamma \sinh(\delta v), \quad (1)$$

状态方程为

$$\frac{dw}{dt} = \lambda \sinh(\eta v) f(w) - \frac{w}{\tau}, \quad (2)$$

$$f(w) = 0.25[(\text{sign}(v) + 1)(\text{sign}(1 - w) + 1)]$$

$$+ (\text{sign}(-v) + 1)(\text{sign}(w) + 1)], \quad (3)$$

其中, v 表示输入电压, i 表示流经忆阻器的电流. (1) 式是 v - i 特性方程, 方程右端表示的是两个并联的导电通道, 第一项是肖特基项, 第二项是隧道项. 它们的相关权重由内部状态变量 w 所决定, 与传统的代表掺杂区、非掺杂区边界位置的状态变量不同, w 是代表导电区域面积的规范面积指数, 也可以认为是器件的电导率, 且在 $[0, 1]$ 之间变化; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$ 都是受材料特性决定的正参数, 依次为肖特

基势垒高度、隧道势垒高度、肖特基势垒区域的耗尽层宽度、导电区域有效的隧道距离和表面影响参数, 它们都与 w 无关 [20]. 方程 (2) 描述的是随输入电压而变化的状态变量变化率方程, $-w/\tau$ 即是文献 [20] 所考虑的离子扩散项, 其中, τ 是一个正的扩散时间常数. 该方程表示状态变量的变化不仅与输入信号有关, 还与当前的状态变量有关. 方程 (3) 表示的是一个窗函数, 旨在使 w 在 $[0, 1]$ 之间变化.

根据方程 (1), (2), (3) 进行 MATLAB 仿真, 得到仿真结果如图 2 所示.

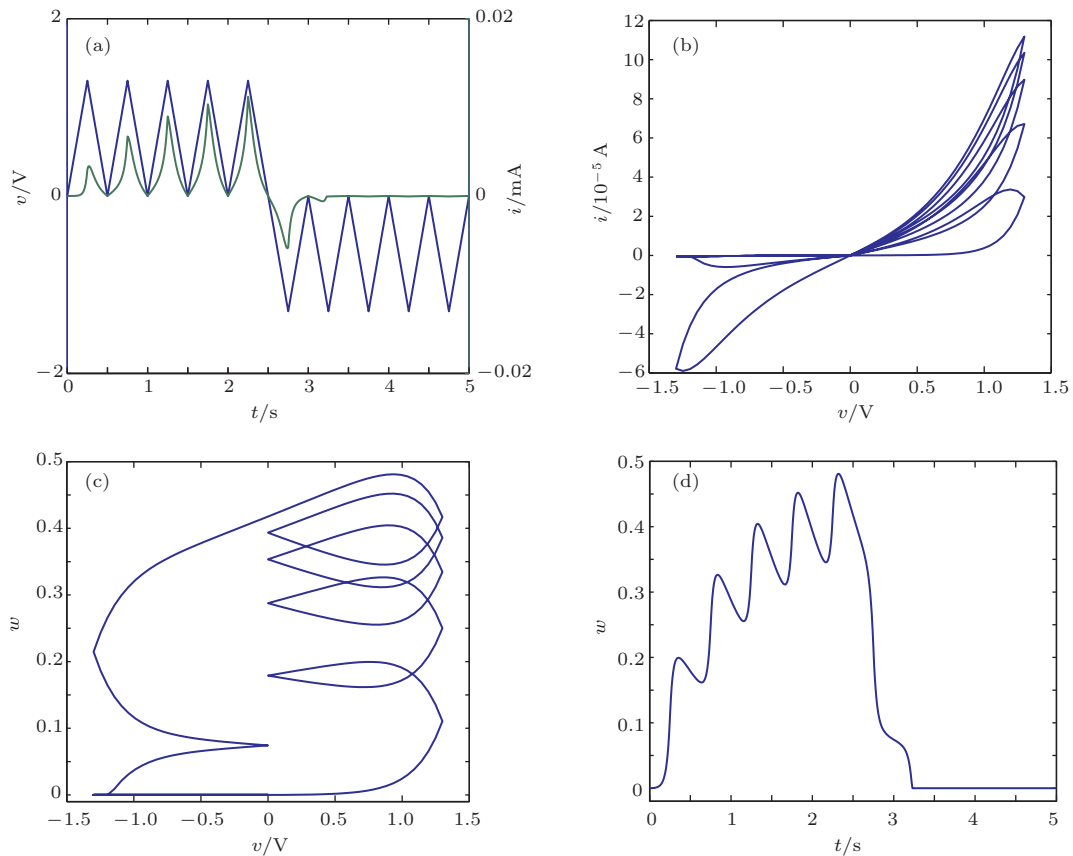


图 2 原始 WO_x 忆阻器在连续正(负)电压输入下的仿真结果 (a) v - t , i - t 曲线; (b) v - i 曲线; (c) v - w 曲线; (d) w - t 曲线

Fig. 2. The simulation results of the primary WO_x memristor with continuous positive (negative) voltage input: (a) v - t and i - t curve; (b) v - i curve; (c) v - w curve; (d) w - t curve.

图 2 中, $\alpha = 0.5 \times 10^{-7}$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 4 \times 10^{-6}$, $\delta = 2$, $\eta = 5$, $\lambda = 0.005$, $\tau = 1$, w 的初始值为 0. 从图 2(a) 可以看出, 在正连续输入下电流逐渐增大, 但在负连续输入下, 电流急剧减小接近于 0. 由图 2(b) 观察到, 在正半部分连续输入下, 迟滞回路产生了明显的交叠, 这是由氧空穴的后向扩散所引起的, 与图 1(a) 中所描述的实际情况类似. 但在负半部分却没有交叠, 这与图 1(a) 中的实际情况大不相同, 说明原数学模型没有拟合出负连续输入

情况下的离子扩散, 这是一种非对称的变化过程, 图 2(c) 从电导率随输入电压变化的角度进一步说明了这一点. 图 2(d) 显示, 在正连续输入下, 电导率 w 总体逐渐增大, 但当输入连续负电压时, w 快速减小到 0, 说明器件达到了高阻态.

图 2 中所示的实验结果表明了原模型的不足, 这主要是没有考虑负连续输入下的离子扩散, 以至于不能与实际的忆阻器相匹配. 此外, 文献 [20] 所添加的离子扩散项 $-w/\tau$, 对于输入电压为 0 时的

情况, 即当 $dw/dt = -w/\tau$ 时(可表示一个遗忘函数), 无论器件电导率的初始状态 (w_0) 为何值, 都将随时间趋近于 0, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} w = 0$ (如图 3(a) 所

示). 这与文献 [21] 中所介绍的实际忆阻突触的记忆遗忘曲线大相径庭 (如图 3(b) 所示), 显然原数学模型是不全面的.

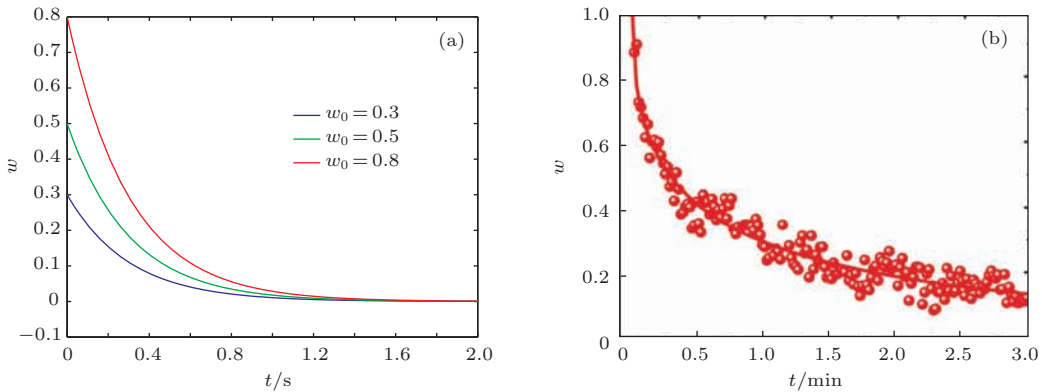


图 3 (网刊彩色) 忆阻突触遗忘曲线 (a) 原模型中电导率不同初始值时的遗忘曲线; (b) 文献 [21] 中实际的遗忘曲线
 Fig. 3. (color online) The forgetting curve of memristor synaptic: (a) the forgetting curves with different initial values of the conductivity in the primary model; (b) the physical forgetting curve in Ref.[20].

3 改进的 WO_x 忆阻器模型

迁移和扩散是离子常见的运动形式. 一般的离子迁移是指在外界电场的作用下所引发的离子运动, 而扩散主要是由浓度差所诱发的 [19], 当然也受物质材料、温度等的影响. 针对上述数学

模型的不足, 我们对扩散项改进为 $-(w - \mu)/\tau$, $\mu \in [0, 1]$ 作为新的扩散项, 即输入电压为 0 时, $dw/dt = -(w - \mu)/\tau$, 该扩散项同样可表示为一遗忘函数, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} w = \mu$ 可看作记忆的最终保留值, 它的实际意义可理解为因电极表面氧化还原反应而引起的离子浓度变化 [19].

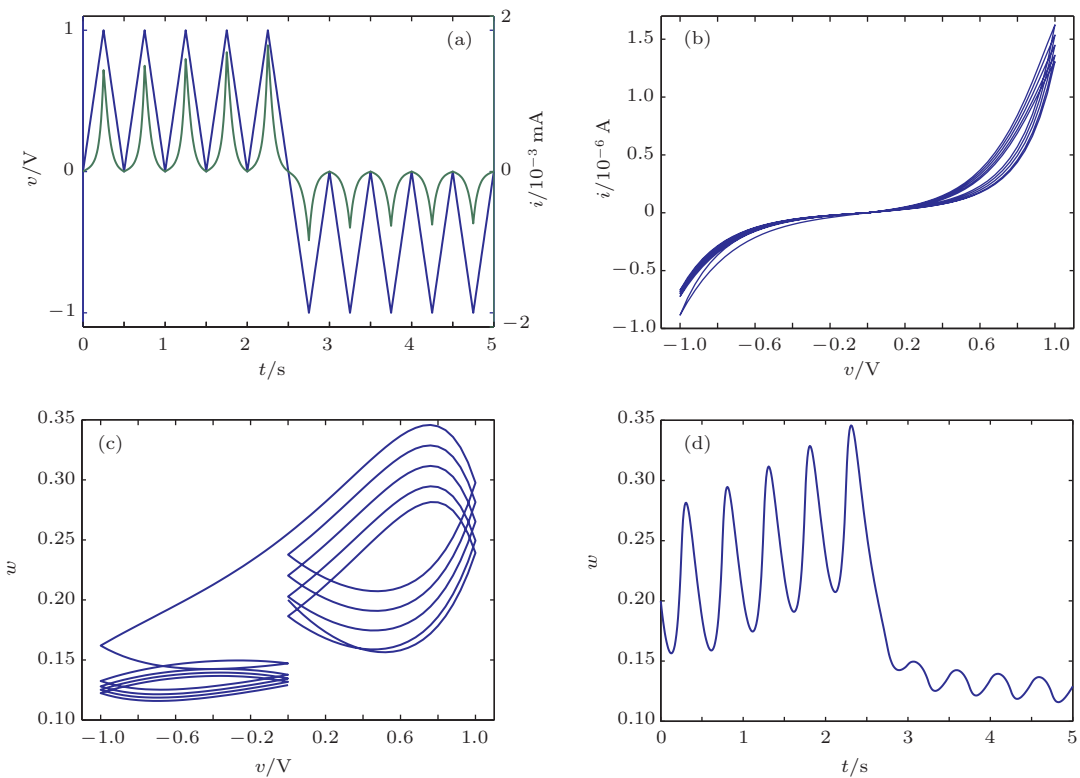


图 4 改进后的忆阻器在连续正(负)输入下的仿真结果 (a) $v-t$, $i-t$ 曲线; (b) $v-i$ 曲线; (c) $v-w$ 曲线; (d) $w-t$ 曲线
 Fig. 4. The simulation results of the improved WO_x memristor with continuous positive (negative) input: (a) $v-t$, $i-t$ curve; (b) $v-i$ curve; (c) $v-w$ curve; (d) $w-t$ curve.

鉴于离子扩散和氧化还原反应都会受输入电压的影响, 这里, 把与离子扩散有关的遗忘时间 τ 和与氧化还原反应有关的保留值 μ 都看作随输入电压而变化的变量. 改进后的模型可以表示为

$$i = (1 - w)\alpha[1 - \exp(-\beta v)] + w\gamma \sinh(\delta v), \quad (4)$$

$$\frac{dw}{dt} = \lambda \sinh(\eta v) - \frac{w - \mu}{\tau}, \quad (5)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = a \sinh(\eta v), \quad (6)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = b \sinh(\eta v) f(w), \quad (7)$$

$$f(w) = 0.25[(\text{sign}(v) + 1)(\text{sign}(1 - w) + 1) + (\text{sign}(-v) + 1)(\text{sign}(w) + 1)]. \quad (8)$$

方程 (4) 是忆阻器的电流、电压关系方程; (5) 式是改进之后的状态变量方程; (6), (7) 式分别是遗忘时间 τ 、记忆保留值 μ 的变化率方程, (7) 式中加入窗函数 $f(w)$ 是为了使 μ 在 $[0, 1]$ 之间变化; a, b 均是正系数. 改进后的忆阻器模型的 MATLAB 仿真结果如图 4 所示.

图 4 中, $\alpha = 0.5 \times 10^{-7}$, $\beta = 0.01$, $\gamma = 2 \times 10^{-7}$, $\delta = 4$, $\lambda = 0.05$, $\eta = 4$, $a = 0.001$, $b = 0.002$, τ 和 μ 的初始值分别为 0.15, 0.1. 从图 4(a) 可以看出, 在正半输入部分电流整体逐渐增大, 负半输入部分整体电流逐渐减小, 但不像图 2(a) 那样急剧减小到 0, 而是周期性变化, 符合实际忆阻器的基本特性. 图 4(b) 与图 2(b) 相比, 可以明显地观察到在正(负)连续输入下相邻迟滞回线都产生了交叠, 说明了离子扩散在两种输入情况下都存在. 图 4(c) 更加清楚地表明在正负连续输入下电导率随电压的变化曲线也都产生了交叠, 进一步证明了离子扩散的存在. 图 4(d) 与图 2(d) 相比, 在负连续输入电压到来时, 电导率 w 也是急速减小但不至 0, 且此后呈波动性变化, 与图 3(b) 中实际的遗忘规律相符合. 综合来看, 改进后的模型更加符合 WO_x 忆阻器的实际行为特性.

4 忆阻突触的可塑性

忆阻器可被看作一个两端元件, 它的一个重要应用就是作为神经突触应用在神经形态系统之中. 突触的一个重要特性就是它的可塑性^[22-24], 即通过调节输入脉冲来动态地改变突触权值的大小, 这

与压控忆阻器很相似. 忆阻器的状态变量 w (电导率) 可以用来作为突触权值. 为了探究改进后的忆阻器模型作为突触的可塑性, 从输入脉冲的幅值、宽度、间隔三个角度来进行试验.

首先, 探究脉冲幅值对突触权值的影响. 在此, 固定脉冲间隔 (0.16 s)、脉冲宽度 (0.04 s), 把三组不同幅值的脉冲施加到改进的忆阻器两端, 仿真结果如图 5 所示.

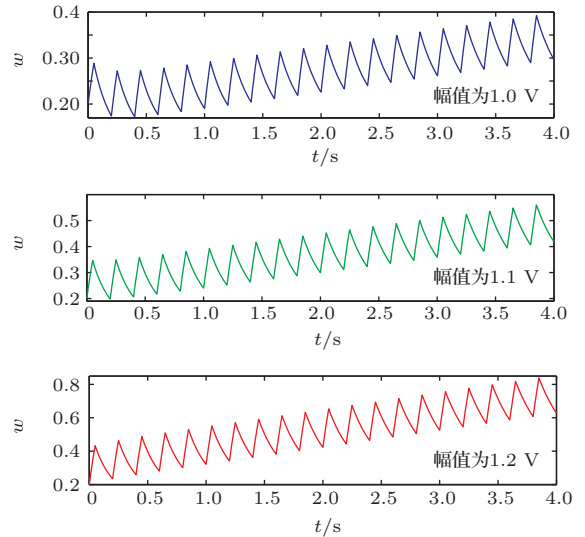


图 5 (网刊彩色) 不同幅值的脉冲作用下突触权值的变化曲线

Fig. 5. (color online) The change curves of synaptic weights under pulses with different amplitudes.

图 5 中, 蓝色曲线表示输入脉冲幅值为 1 V 时突触权值的变化趋势, 在脉冲持续时间内, 突触权值达到的最大值约为 0.39, 最终值为 0.3; 绿色曲线表示输入脉冲幅值 1.1 V 时突触权值的变化趋势, 其最大值约为 0.56, 最终值为 0.42; 红色曲线表示输入脉冲幅值为 1.2 V 时突触权值的变化趋势, 其最大值约为 0.84, 最终值为 0.63. 从图 5 可以看出, 在正脉冲的持续作用下, 突触权值会波折地逐渐增加, 而且当脉冲间隔和宽度一定时, 输入脉冲的幅值越大, 突触权值增加量越大.

继而研究脉冲宽度对突触权值影响. 这里, 将输入脉冲幅值 (1.0 V)、脉冲间隔 (0.06 s) 固定, 把三组不同信号宽度的脉冲加在忆阻器两端进行试验, 仿真结果如图 6 所示.

图 6 中, 蓝色曲线表示信号宽度为 0.02 s 的脉冲作用下的突触权值的变化, 突触权值达到的最大值为 0.27, 最终值为 0.24; 绿色曲线代表输入脉冲宽度为 0.04 s 时突触权值的变化, 其达到的最大值是 0.59, 最终值是 0.51; 红色曲线展示的是脉冲宽

度为0.06 s时突触权值的变化,其达到的最大值是0.68,最终值为0.62.可以明显地看出,幅值和间隔固定时,脉冲宽度越大,突触权值增加得越多.

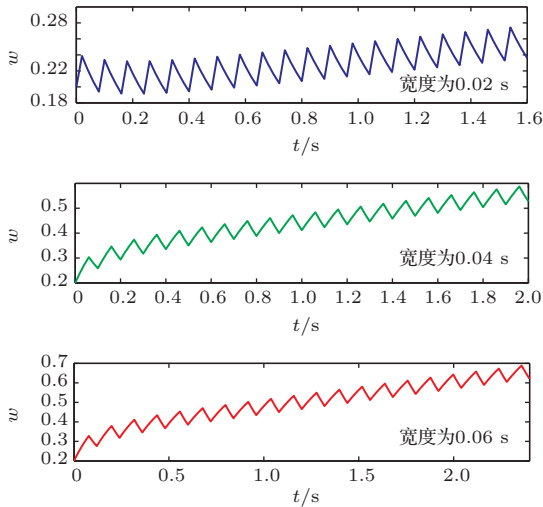


图6 (网刊彩色) 不同宽度的脉冲作用下突触权值的变化曲线
Fig. 6. (color online) The change curves of synaptic weights under pulses with different duration.

接着,分析脉冲间隔对突触权值的影响.这里,固定输入脉冲的幅值(1.0 V)和脉冲宽度(0.04 s),通过输入三组不同间隔的脉冲来进行试验.

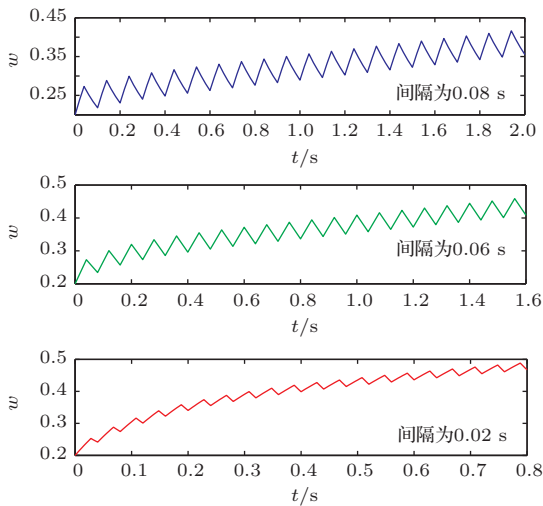


图7 (网刊彩色) 不同间隔的脉作用下对突触权值的变化曲线
Fig. 7. (color online) The change curves of synaptic weights under pulses with different intervals.

图7中,蓝色曲线表示脉冲间隔为0.08 s时突触权值的变化曲线,其达到的最大值约为0.41,最终值为0.36;绿色曲线是脉冲间隔为0.06 s时突触权值的变化曲线,其最大值为0.45,最终值为0.41;而红色曲线表示的是脉冲间隔为0.02 s时突触权值

的变化曲线,其最大值约为0.49,而最终值为0.47.从图7可以看出,当输入脉冲的幅值和宽度固定时,脉冲间隔越小,即脉冲速率越大,突触权值的变化量越大.

以上分别从脉冲的幅值、宽度、间隔三个方面研究了改进后的 WO_x 忆阻突触权值的可塑性.发现输入脉冲的幅值越大、宽度越宽、间隔越小突触权值增大得越快,且增大量也越多,这不仅为改进后的忆阻器模型作为突触提供了理论依据,还阐明了影响这种忆阻突触可塑性的因素.但我们还发现,虽然在正脉冲的持续作用下,突触权值整体会上会逐渐增加,可在脉冲间隔之内,却有减小的趋势.为了分析其中的原因,下面用单个脉冲进行试验.

将幅值、宽度、间隔分别为1.0 V, 0.1 s, 0.1 s的单周期脉冲依次输入到不考虑离子扩散和考虑离子扩散的忆阻器模型之中,观察单周期突触权值的变化情况.仿真结果如图8所示.

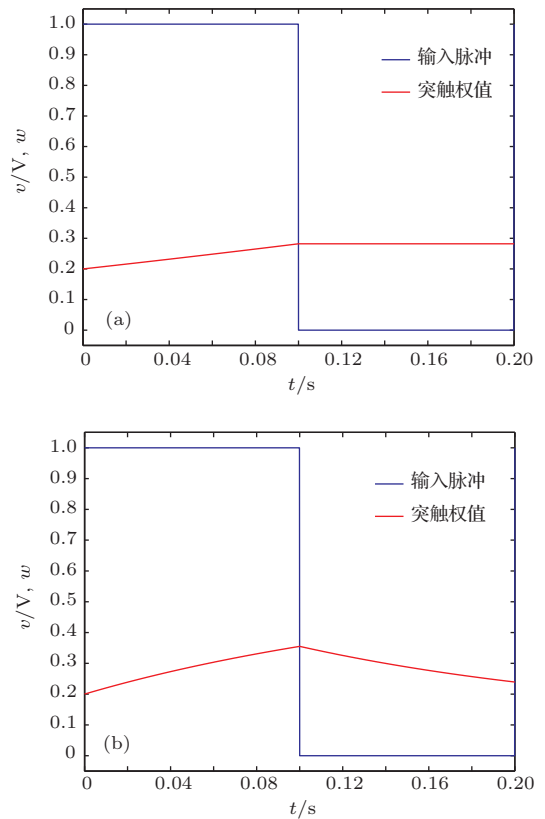


图8 (网刊彩色) 单周期脉冲作用下忆阻突触的变化曲线 (a) 不考虑离子扩散的情形; (b) 考虑离子扩散的情形
Fig. 8. (color online) The change curves of memristor synaptic under single cycle pulse: (a) the situation ignored ion diffusion; (b) the situation considered ion diffusion.

图8(a)和图8(b)的最大差别在于当脉冲信号消失后,图8(a)中的突触权值保持在消失前的状态

不再变化, 而图 8 (b) 中的突触权值会逐渐减小, 不过最终还是要大于权值的初始值. 之所以会有这种现象, 是因为当脉冲信号存在时, 忆阻器件内部的氧空穴 (带正电) 在外界电场的作用下向前迁移, 此过程中忆阻值逐渐减小, 而电导率 (突触权值) 逐渐增大, 这样会使前端的氧空穴浓度远大于后端. 当脉冲消失后, 不考虑离子扩散的模型认为此时的氧空穴不再移动, 即保持在脉冲消失前的位置, 从而之后的忆阻值、电导率 (突触权值) 都不再变化; 而考虑离子扩散的模型则认为, 由于存在浓度差, 当脉冲消失后, 扩散将起主导作用, 所以氧空穴会后向移动, 从而导致忆阻值增大、电导率 (突触权值) 减小. 如果再紧接着输入负电压, 则离子迁移方向与扩散方向相同, 将会使电导率减小得更快, 这也

是图 2 (d) 和图 4 (d) 中负脉冲到来时电导率急剧减小的原因.

鉴于以上脉冲幅值、宽度、间隔对突触权值的影响, 再加上对每周期脉冲信号消失之后因氧空穴浓度之差而引发的离子扩散的考虑, 我们可以想象当脉冲间隔足够小 (脉冲速率足够大) 时, 则在每周期内信号消失后, 氧空穴还没来得及及后向扩散, 下一个脉冲已经到来, 此时氧空穴会继续向前迁移, 从而使忆阻突触权值持续增加而不再有减小的趋势. 下面通过实验来说明问题. 将幅值、宽度分别为 1.0 V, 0.01 s 而间隔不同的脉冲信号分别加在改进的忆阻器两端, 作用相同时间之后, 得到如图 9 所示的结果.

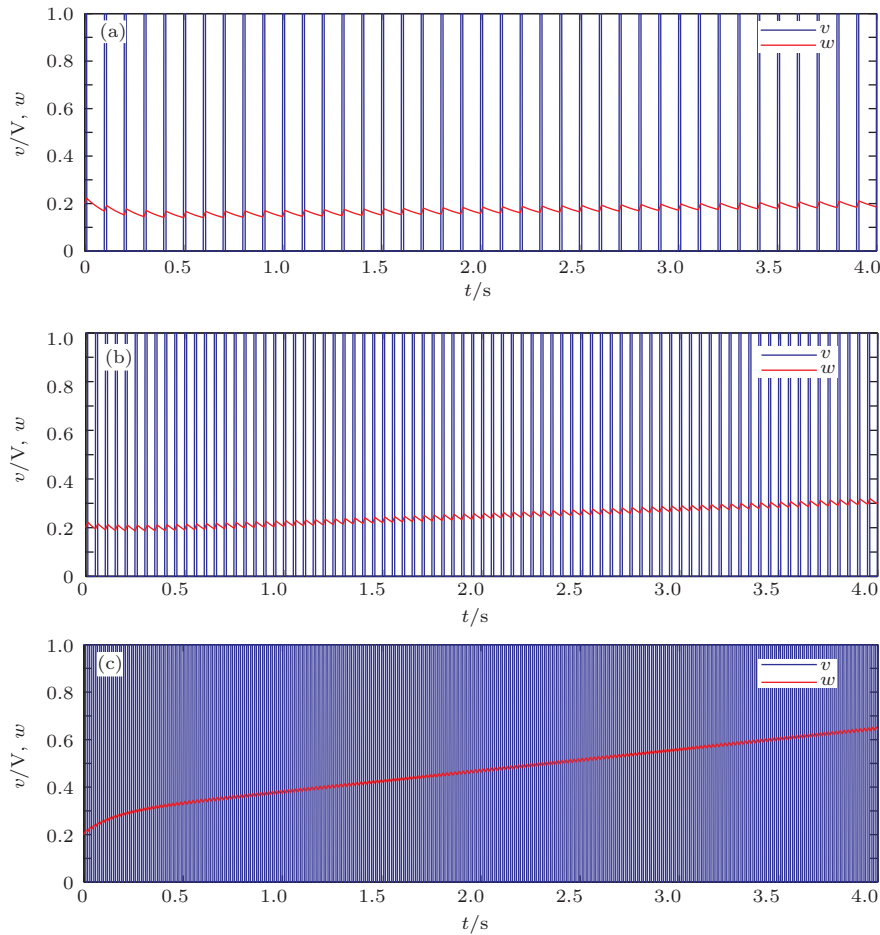


图 9 (网刊彩色) 不同速率的脉冲作用下突触权值的变化曲线 (a) 间隔为 0.09 s 时的实验结果; (b) 间隔为 0.04 s 时的实验结果; (c) 间隔为 0.01 s 时的实验结果

Fig. 9. (color online) The change curves of memristor synaptic under pulses with different rates: (a) the experiment result when the interval is 0.09 second; (b) the experiment result when the interval is 0.04 second; (c) the experiment result when the interval is 0.01 second.

从图 9 (a)—图 9 (c) 可以明显地观察到, 随着输入脉冲速率的增加, 突触权值的变化越来越快,

且变化量也越来越大, 这和前边所研究的结果相符. 此外, 我们还发现图 9 (a) 中的有些时间段内,

突触权值持续减小, 而图 9(b) 和图 9(c) 中却没有此现象, 这主要是因为当脉冲间隔过大时, 元件内部氧空穴的后向扩散占主导作用, 前向迁移不足以弥补后向扩散, 所以会使高低阻值分界线后移, 以至于整体阻值增大、电导率减小、突触权值减小. 同时, 在图 9(a) 和图 9(b) 中有些时间突触权值变化量很小, 这主要是因为离子的前向迁移和后向扩散达到了平衡, 使高低阻值分界线维持不变, 所以会使突触权值基本维持不变. 在图 9(c) 中可以明显地观察到突触权值随着脉冲速率的进一步增加几乎是持续性地增大, 这是因为高速率的脉冲使离子的前向迁移作用远大于脉冲间隔之后的后向扩散作用, 所以会使氧空穴持续前移, 从而使整体的忆阻值减小, 电导率(突触权值)增大. 可见, 脉冲速率的大小决定了氧空穴的迁移和扩散的主导地位, 从而影响了突触权值的变化快慢和变化量, 这便是

神经网络中的脉冲速率依赖可塑性.

上面讨论了不同输入脉冲对突触权值的影响, 研究了改进后的忆阻器作为突触的可塑性及其决定因素. 下面将讨论忆阻突触的 STP 和 LTP, 二者分别与心理学中的短期记忆(short-term memory, STM) 和长期记忆(long-term memory, LTM) 相似, 其中 STP 是神经元之间连接的临时加强, 只持续数秒钟甚至更短, 而 LTP 是神经元之间连接的永久性加强, 持续几个小时甚至数年 [23]. 此外, 可以通过反复刺激训练将 STP 转化为 LTP. 下面通过实验进行说明.

将不同数量的相同刺激脉冲(幅值 1.2 V, 脉冲宽度 0.05 s, 间隔 0.05 s) 分别加在改进的忆阻器模型两端, 观察突触权值的变化趋势, 并分析其遗忘时间 τ 和记忆最终保留值 μ , 仿真结果如图 10.

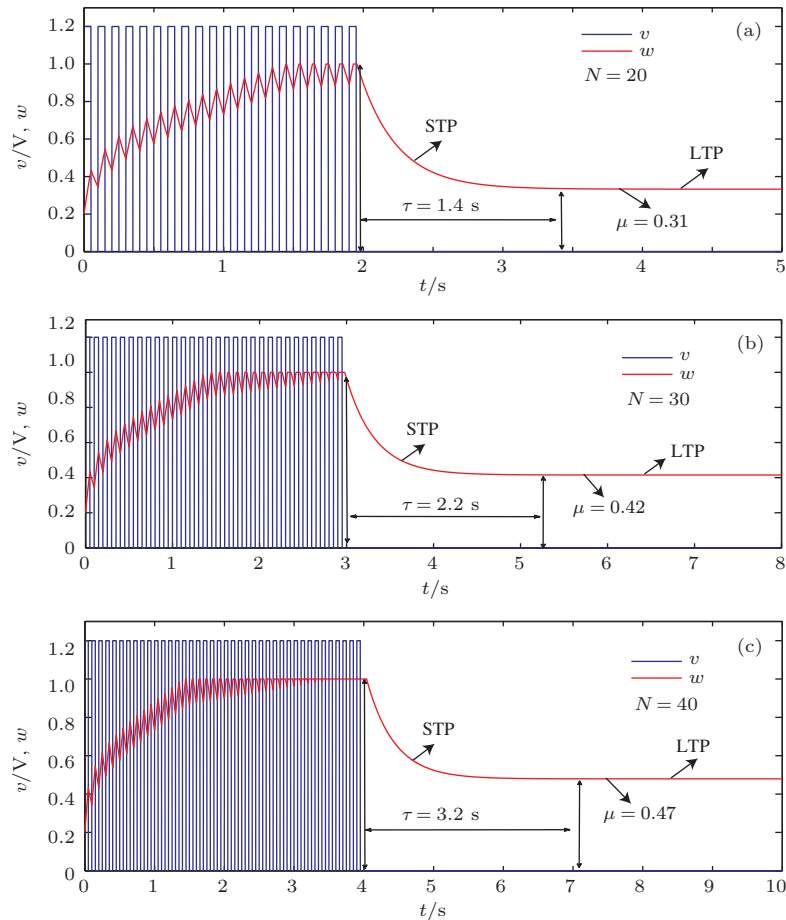


图 10 (网刊彩色) 不同数量的相同脉冲作用下 STP 和 LTP 的变化曲线 (a) 输入 20 个脉冲时的实验结果; (b) 输入 30 个脉冲时的实验结果; (c) 输入 40 个脉冲时的实验结果

Fig. 10. (color online) The change curves of STP and LTP under the same pulses with different number: (a) the experiment result with 20 pulses input; (b) the experiment result with 30 pulses input; (c) the experiment result with 40 pulses input.

从图 10(a)—图 10(c) 可以明显地看出, 随着刺激数目的增加, 遗忘时间 τ 从 1.4 s 逐渐增加到了 3.2 s, 这表明遗忘速率在逐渐减小. 同时, 还可以看出记忆保留值 μ 从 0.31 增大到了 0.47, 这表明 LTM 得到了加强, 通过重复的脉冲刺激完成了从 STM 到 LTM 的过渡, 这与自然界中生物的记忆功能有

很大的相似性, 从侧面反映了这种改进的忆阻器强大的仿生功能.

在实验中, 我们发现了一个比较奇特的现象, 如果在 STM 逐渐向 LTM 转化的过程(弛豫过程)中, 若进行重新刺激, 则只需要很少的刺激就能使记忆恢复, 仿真结果如图 11 所示.

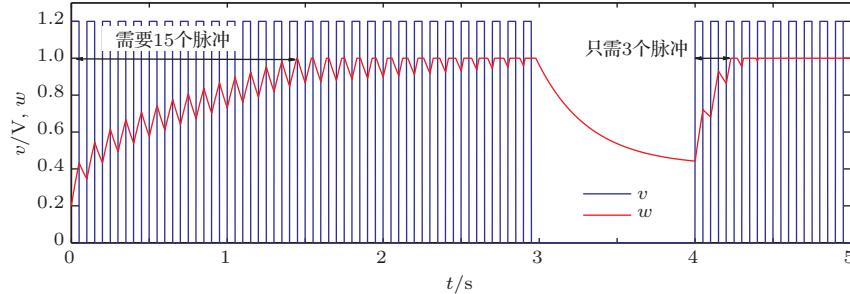


图 11 (网刊彩色) 重新刺激引发的“经验学习”现象

Fig. 11. (color online) The “learning-experience” phenomenon caused by re-stimulating.

从图 11 可以明显地看出, 在第一次刺激过程中, 突触权值(记忆级别)从初始值 0.2 首次达到最大值 1 需要 15 个脉冲, 而在 STP 到 LTP 转化的遗忘弛豫过程中, 若重新进行刺激只需要 3 个脉冲就可以恢复到最大记忆级别. 这表明具有“经验学习”过程的这种忆阻突触元件将会使遗忘信息的重新学习变得更加容易, 这与自然界生物的学习、记忆恢复有着惊人的相似之处. 同时, 这也是 STP 向 LTP 过渡的另一种表现形式.

冲时间依赖可塑性和非线性过渡特性, 然而用这些模型来对生物突触进行全面的模拟是不现实的, 因为并不是所有的突触功能都包含在上述模型之中. 除了离子迁移, 浓度梯度引起的离子扩散也能为忆阻器带来新的动态过程, 这样便导致了其他突触现象的出现, 比如 LTM 和 STM 等.

5 温度对忆阻突触的影响

针对本文中改进的 Pd/WO_x/W 忆阻器模型, 外界正电场使氧空穴向前迁移, 使导电区域面积增大, 忆阻值减小. 然而, 如上所述, 一些现象尤其是 STP 和 LTP 并不能被离子迁移模型所解释, 这时就不得不考虑因离子浓度梯度而引起的离子扩散现象.

为了更好地模拟生物系统中的记忆丢失现象, 研究者们改进了多种多样的可以表示这种遗忘行为的数学模型. 然而, 到目前为止还没有统一的标准. 为了方便, 这里用一个指数衰减方程来描述 STP 的弛豫过程:

众所周知, 扩散系数受到温度的影响^[25], 如果将 STP 与离子扩散相联系, 那么温度必然会影响到 STP 的弛豫时间, 这样弛豫时间 τ 将随温度而变化, 记为 $\tau'(T)$, 则方程 (9) 可改写成

$$w(t) = w_1 + d(w_0 - w_1) \exp(-t/\tau), \quad (9)$$

$$w(t) = w_1 + d(w_0 - w_1) \exp(-t/\tau'(T)). \quad (10)$$

其中, $w(t)$ 表示 t 时刻的突触权值, w_0 表示初始时刻的突触权值, w_1 为衰减至平稳状态时的突触权值; τ 正如上文所述, 是一个衰减时间常数; d 是一个正的系数^[23].

扩散过程的弛豫时间方程如下:

$$\tau'(T) = \frac{4L^2}{\pi^2 n(T)}. \quad (11)$$

自从惠普实验室首次提出以 TiO_{2-x} 离子迁移为基础的忆阻器物理模型之后, 许多团队围绕着离子迁移提出了多种多样的忆阻器模型, 比如 Ag₂S, Si:Ag 模型等. 这些模型可以很好地模拟突触的脉

其中, L 是初始浓度宽度, $n(T)$ 是与温度有关的扩散系数, 根据玻尔兹曼分布规律, 有

$$n(T) = n_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (12)$$

其中, n_0 是当温度为无穷大时的扩散系数, E 表示离子扩散的激活能量, k 是玻尔兹曼常数^[23]. 根

据方程 (10), (11), (12), 我们可以进行不同温度下 STP 的 MATLAB 仿真, 结果如图 12.

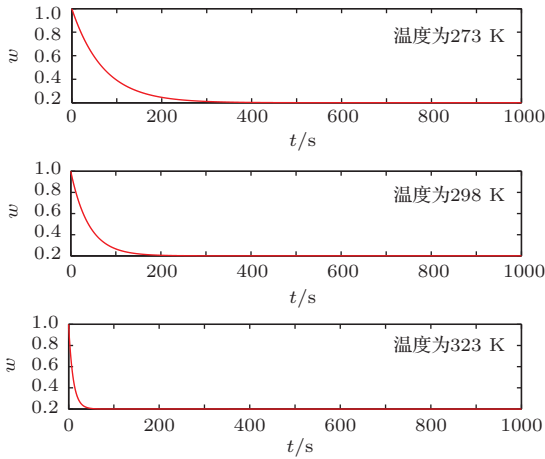


图 12 不同温度下 STP 弛豫过程中突触权值的变化曲线
Fig. 12. The change curves of synaptic weight under different temperatures in the STP relaxation process.

从图 12 可以明显地看出, 随着温度的增加, 突触权值衰减得越来越快, 同时扩散时间(弛豫时间)也越来越短, 即遗忘速率越来越大. 这是由于高温导致氧空穴后向扩散越来越快而引起的. 可见, 温度也是影响这种忆阻突触的重要因素.

综合来看, 可以将该忆阻突触的工作原理进行如下解释: 首先, 在正脉冲作用下, 氧空穴因受到外界电场的作用而逐渐向前迁移致使忆阻值减小, 且脉冲的幅值越大、宽度越宽、忆阻值减小得越多; 其次, 迁移导致前后两端氧空穴浓度产生差异, 在脉冲间隔内, 外界电场消失, 此时因浓度差而形成的后向扩散起主导作用, 氧空穴后移, 忆阻值又增大, 外界正脉冲再次到来, 又使氧空穴前移, 所以忆阻值会波折地减小(突触权值波折地增大); 如果脉冲间隔很小, 即脉冲速率很大时, 在脉冲间隔内, 氧空穴还没来得及后向扩散, 下一个脉冲已经到来, 所以会导致忆阻值持续性地减小(突触权值持续性地增大); 经过数个脉冲的作用之后, 忆阻值达到一定的值, 而氧空穴的前后浓度差也很显著, 此时, 如果反向输入脉冲, 氧空穴的迁移方向将与扩散方向同时向后, 所以忆阻值会急剧增大(突触权值急速减小), 若温度很高, 将更加有利于氧空穴的后向扩散, 权值减小得将更快; 在向后迁移、扩散过程中, 氧空穴有机会与负离子结合形成不稳定的化合物, 只需要很少的能量便可以破坏化学键而分离成氧空穴和负离子, 所以当再次输入正向脉冲时, 只需几个脉冲便可以使记忆恢复到最大级别.

6 结 论

本文在原有 WO_x 忆阻器数学模型的基础上, 通过仿真展示了它与忆阻器实际特性的差异, 指出了原数学模型的不足. 基于此, 改进了离子扩散项, 添加了两个新的内部状态变量弛豫时间 τ 和记忆保留值 μ . 新的模型不仅可以描述忆阻器的一般特性, 还具有切实的记忆丢失行为, 更好地拟合了该忆阻器的实际特性. 此外, 脉冲速率依赖可塑性、短期可塑性、长期可塑性及生物系统中的“经验学习”现象都在改进的忆阻器模型中被发现, 这是原来的模型所不具有的, 且温度会影响 STP 过程的弛豫时间及记忆丢失的快慢, 数值仿真结果很好地证明了上述结论. 这种改进的忆阻器模型具有很好的仿生功能, 可以更好地作为突触应用在神经形态系统之中.

参考文献

- [1] Chua L O 1971 *IEEE Trans. Circ. Th.* **18** 507
- [2] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, Williams R S 2008 *Nature* **453** 80
- [3] Birolek Z, Birolek D, Biolková V 2009 *Radioengineering* **18** 210
- [4] Chen Y R, Wang X B 2009 *IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures*, San Francisco, CA USA, July 30–31, 2009 p7
- [5] Wu H G, Bao B C, Chen M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 118401
- [6] Jo S H, Kim K H, Lu W 2009 *Nano Lett.* **9** 870
- [7] Duan S K, Hu X F, Wang L D, Li C D, Mazumder P 2012 *Sci. China: Inf. Sci.* **55** 1446
- [8] Yener S C, Kuntman H H 2014 *Radioengineering* **23** 1140
- [9] Dong Z K, Duan S K, Hu X F, Wang L D, Li H 2014 *Sci. World J.* **2014** 394828
- [10] Cantley K D, Subramaniam A, Stiegler H J, Chapman R A, Vogel E M 2011 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **10** 1066
- [11] Adhikari S P, Yang C J, Kim H, Chua L O 2012 *IEEE Trans. Neural Networks and Learning Systems* **23** 1426
- [12] Hu X F, Duan S K, Wang L D, Liao X F 2011 *Sci. China: Inf. Sci.* **41** 500 (in Chinese) [胡小方, 段书凯, 王丽丹, 廖晓峰 2011 中国科学: 信息科学 **41** 500]
- [13] Afifi A, Ayatollahi A, Raissi F 2009 *IEEE Circuit Theory and Design* Antalya, August 23–27, 2009 p563
- [14] Dong Z K, Duan S K, Hu X F, Wang L D 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 128502 (in Chinese) [董哲康, 段书凯, 胡小方, 王丽丹 2014 物理学报 **63** 128502]
- [15] Tian X B, Xu H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 088501
- [16] Tian X B, Xu H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 068401

- [17] Xu H, Tian X B, Bu K, Li Q J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 098402 (in Chinese) [徐晖, 田晓波, 步凯, 李清江 2014 物理学报 **63** 098402]
- [18] Tian X B, Xu H, Li Q J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 048401 (in Chinese) [田晓波, 徐晖, 李清江 2014 物理学报 **63** 048401]
- [19] Chen L, Li C D, Huang T W, Ahmad H G, Chen Y R 2014 *Phys. Lett. A* **378** 2924
- [20] Chang T, Jo S H, Kim K H, Sheridan P, Gaba S, Lu W 2011 *Appl. Phys. A* **102** 857
- [21] Chang T, Jo S H, Lu W 2011 *ACS Nano* **5** 7669
- [22] Ohno T, Hasegawa T, Tsuruoka T, Terabe K, Gimzewski J K, Aono M 2011 *Nat. Mater.* **10** 591
- [23] Wang Z Q, Xu H Y, Li X H, Yu H, Liu Y C, Zhu X J 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 2759
- [24] Bhagya V, Srikumar B N, Raju T R, Shankaranarayana Rao B S 2015 *J. Neurosci. Res.* **93** 104
- [25] So H S, Choi S H, Seo K S, Seo C S, So S Y 2014 *KSCE J. Civ. Eng.* **18** 2227

An improved WO_x memristor model with synapse characteristic analysis*

Meng Fan-Yi¹ Duan Shu-Kai¹† Wang Li-Dan¹ Hu Xiao-Fang² Dong Zhe-Kang¹

1) (School of Electronics and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

2) (Department of Mechanical and Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

(Received 19 December 2014; revised manuscript received 16 March 2015)

Abstract

Memristor is defined as the fourth basic electronic element, the studies on its models exhibit diversity. Now, the matching extent between memristor model and natural memristor has received researchers' wide attention. A new memristor model is proposed by changing the ion diffusion term of the WO_x memristor, namely, adding another two internal state variables τ and μ which denote the relaxation time and retention, respectively, and the improved model can simulate natural memristor better. Firstly, the new one is able to not only describe the general characteristics of a memristor, but also capture the memory loss behavior. In addition, the new memristor can be considered as a neural synapse, under the action of the input pulses with different amplitudes, duration and intervals, the spike rate dependent plasticity, short-term plasticity (STP), and long-term plasticity (LTP) are analyzed, and the "learning experience" phenomenon which is very similar to the biological system is discovered, most of which is due to the back diffusion of the oxygen vacancies during the intervals of the input pulses which are caused by the concentration difference. Moreover, an exponential decay equation is built to describe the relaxation process of STP. Finally, taking into consideration the relationship between temperature and ion diffusion coefficient, the effect of temperature on the relaxation process of STP is discussed. Experimental results show that the new memristor model can better match the actual behavior characteristics, and more suitably acts as a synapse for being applied to neuromorphic systems.

Keywords: memristor, ion diffusion, synapse plasticity, temperature

PACS: 85.35.-p, 73.40.Sx, 73.43.Cd, 87.19.lw

DOI: 10.7498/aps.64.148501

* Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. [2013]47), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61372139, 61101233, 60972155), the "Spring Sunshine Plan" Research Project of Ministry of Education of China (Grant No. z2011148), the Technology Foundation for Selected Overseas Chinese Scholars, Ministry of Personnel in China (Grant No. [2012]186), the University Excellent Talents Supporting Foundation of Chongqing, China (Grant No. [2011]65), the University Key Teacher Supporting Foundation of Chongqing, China (Grant No. [2011]65), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant Nos. XDJK2014A009, XDJK2013B011).

† Corresponding author. E-mail: duansk@swu.edu.cn