

具有经验学习特性的忆阻器模型分析

邵楠^{1)†} 张盛兵¹⁾ 邵舒渊²⁾

1) (西北工业大学计算机学院, 西安 710072)

2) (西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

(2019年5月26日收到; 2019年7月2日收到修改稿)

类似人类记忆的短期、长期记忆现象在不同材料忆阻器的实验研究中有过多次报道. 在多篇这类忆阻器的研究文献中还报道了经验学习特性: “学习-遗忘-再学习”实验中, 短期记忆遗忘后再次学习, 记忆恢复的速度明显比初次学习的记忆形成速度更快. 本文对这类忆阻器已有数学模型在“学习-遗忘-再学习”实验中的特性给出进一步分析. 仅考虑短期、长期记忆现象的忆阻模型在该实验中表现为较快速再次学习特性, 再次学习的记忆恢复速度较快主要是由于脉冲间隔期间的遗忘速度比初次学习时更慢. 考虑经验学习特性的忆阻模型在再学习阶段的记忆恢复速度更快主要是因为脉冲作用时的记忆增速更快, 同时仍然存在脉冲间隔期间的遗忘速度减慢. 与经验学习特性相关的状态变量的物理意义可利用连通两电极的导电通道的周围区域在不同外加电压作用下的变化来给出解释.

关键词: 忆阻器, 经验学习特性, 短期记忆, 长期记忆

PACS: 85.35.-p, 73.43.Cd, 87.19.lv

DOI: 10.7498/aps.68.20190808

1 引言

类似人类记忆与学习特性的实验现象在多篇不同材料忆阻器的实验研究中有过多次报道^[1–30]. 在这些研究中, 通常将忆阻器阻值的变化定义为忆阻器记忆的形成与遗忘: 阻值减小则记忆逐渐形成, 阻值增大则记忆逐渐消失. 这类忆阻器在外加电压作用下会形成类似人类记忆的短期记忆 (short-term memory, STM) 和长期记忆 (long-term memory, LTM), 记忆形成后移除外加电压, 短期记忆会被较快遗忘, 长期记忆可持续存在较长时间. 更多的脉冲激励作用下可使得更多的短期记忆逐渐变为长期记忆, 后面的讨论中, 将这类忆阻器称为 STM→LTM 忆阻器.

经验学习特性在多篇 STM→LTM 忆阻器实验研究文献中有过多次报道^[21–30]. 图 1 给出观察

经验学习特性的“学习-遗忘-再学习”实验过程的示意说明, 其中, 图 1(a) 为该实验中所施加的电压, 图 1(b)—图 1(d) 给出忆阻器记忆在该实验的不同阶段的变化情况. 在初次学习阶段, 如图 1(b) 所示, 连续脉冲激励作用下忆阻器记忆逐渐形成; 在遗忘阶段, 如图 1(c) 所示, 作用在忆阻器上的脉冲激励被移除, 忆阻器的短期记忆逐渐被遗忘; 当再次施加脉冲激励, 如图 1(d) 所示, 忆阻器的记忆恢复到遗忘之前的状态所经历的脉冲数量明显比初次学习阶段形成相同的记忆所经历的脉冲数量更少.

文献 [31–36] 对 STM→LTM 忆阻器的数学模型给出讨论. 文献 [31] 在文献 [37] 所设计的具有遗忘特性的忆阻模型的基础上, 根据 STM→LTM 忆阻器实验研究中所报道的短期、长期记忆现象, 设计了 STM→LTM 忆阻模型, 该模型的设计并没有考虑经验学习特性. 文献 [32–34] 对文献 [31] 中所设计的 STM→LTM 忆阻模型在“学习-遗忘-再

† 通信作者. E-mail: shao@mail.nwpu.edu.cn

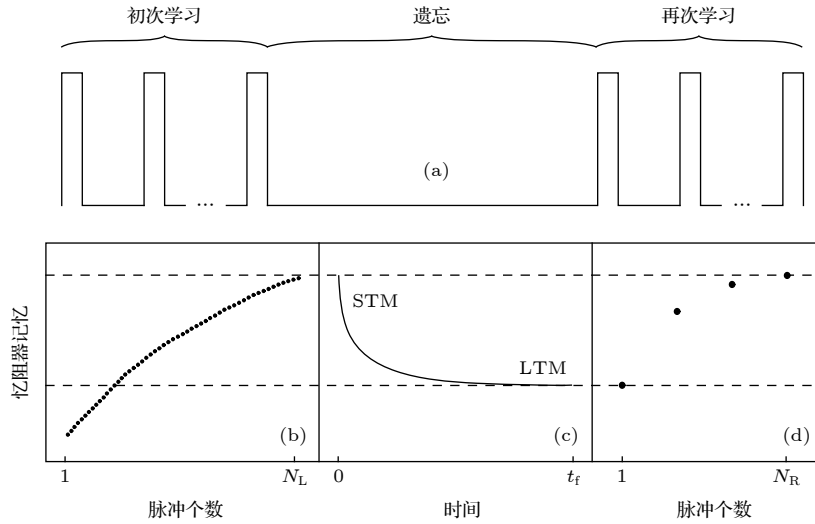


图1 “学习-遗忘-再学习”实验过程的示意说明 (a) 实验各个阶段施加在忆阻器上的电压; (b)—(d) 依次为初次学习过程、遗忘过程、再次学习的记忆恢复过程中忆阻器记忆的变化情况, 横坐标中 N_L , t_f , N_R 分别表示初次学习的脉冲数量、遗忘过程的时长、再次学习的记忆恢复过程所经历的脉冲数量

Fig. 1. Illustration of “learning-forgetting-relearning” experiment: (a) The applied voltage in each period of this experiment; (b)–(d) the change of memristor memory during the first learning process, forgetting process, and the memory recovery period of relearning process, respectively. N_L , t_f , and N_R stand for the number of applied pulses in the first learning process, the forgetting time, and the number of applied pulses in the memory recovery period of the relearning process, respectively.

学习”实验中的特性给出仿真分析, 认为该模型同时也能够描述经验学习特性. 文献 [35] 在对上述模型的分析中发现, 该模型的部分特性 (包括该模型所描述的经验学习特性) 与 STM→LTM 忆阻器实验研究中所报道的相关现象并不完全一致, 其中, 在经验学习特性方面, 并不是所有的 STM→LTM 忆阻器的实验研究中都报道了“学习-遗忘-再学习”实验的现象, 即由已报道的实验研究文献并不能得出经验学习特性是 STM→LTM 忆阻器的固有特性这一结论, 另外, 该模型在“学习-遗忘-再学习”实验中的仿真结果与已报道的这类忆阻器的经验学习特性并不完全相同, 文献 [35] 重新设计了 STM→LTM 忆阻器的数学模型, 并在新模型的基础上通过将模型中的一个参数重新定义为新状态变量, 设计得到具有经验学习特性的 STM→LTM 忆阻模型, 该模型能够更好地描述这类忆阻器的实验研究中所报道的实验现象. 文献 [36] 在文献 [35] 中模型的基础上, 对于存在感觉记忆现象的 STM→LTM 忆阻模型给出设计, 并对模型状态变量的物理意义给出讨论.

文献 [32–34] 中所报道的 STM→LTM 忆阻模型在“学习-遗忘-再学习”实验中的仿真结果虽然与相关实验研究所报道的经验学习特性并不完全一致, 但仿真结果所反映的应该是文献 [31] 中的

STM→LTM 忆阻模型的固有特性, 将该特性称为“较快速再次学习特性”. 尚未看到有文章对文献 [35] 中的不考虑经验学习特性的 STM→LTM 忆阻模型在“学习-遗忘-再学习”实验中的特性给出讨论; 文献 [32–34] 中之所以将“较快速再次学习特性”认为是“经验学习特性”, 是因为两特性的实验过程相同, 实验现象也相似, 这两个特性的关系尚未给出讨论; 文献 [36] 仅对文献 [35] 的模型中与短期、长期记忆现象相关的状态变量的物理意义给出分析, 并没有讨论该模型中与经验学习特性相关的状态变量的物理意义.

本文将对文献 [35] 所提出的 STM→LTM 忆阻模型在“学习-遗忘-再学习”实验中的特性给出进一步分析. 本文首先对文献 [35] 中的 STM→LTM 忆阻模型给出介绍, 然后对于不考虑经验学习特性的 STM→LTM 忆阻模型在“学习-遗忘-再学习”实验中的特性给出分析, 以验证较快速再次学习特性确实是 STM→LTM 忆阻模型的固有特性; 对于具有经验学习特性的 STM→LTM 忆阻模型中的参数对遗忘之后再次学习的记忆恢复速度的影响给出分析, 并根据分析结果对“较快速再次学习特性”和“经验学习特性”的关系给出讨论; 最后对模型中与经验学习特性相关的状态变量的物理意义给出分析.

2 STM→LTM 忆阻模型

文献 [35] 中所设计的 STM→LTM 忆阻器的数学模型为

$$I = (1 - w)f_{\text{off}}(V) + wf_{\text{on}}(V), \quad (1)$$

$$\dot{w} = \frac{F_w - w}{T_w}, \quad (2)$$

$$\dot{w}_{\text{min}} = \frac{F_{\text{min}} - w_{\text{min}}}{T_{\text{min}}}, \quad (3)$$

$$\dot{\tau}_{w0} = f_{\tau}(V)f_{\text{win}}(\tau_{w0}, V), \quad (4)$$

(1) 式为基于状态的伏安方程, 其中 I 为流过忆阻器的电流, V 为忆阻器两端的电压, $f_{\text{off}}(\cdot)$ 和 $f_{\text{on}}(\cdot)$ 分别描述了忆阻器高阻状态和低阻状态的伏安特性, 状态变量 $w \in [0, 1]$ 的变化描述了忆阻器记忆的形成与遗忘. 状态方程 (2) 给出在输入电压 V 作用下 w 随时间 t 的变化规律, 其中 $F_w \in [0, 1]$ 描述了 w 的变化方向,

$$F_w = f_F(V, w_{\text{min}}, w_{\text{max}}) = w_{\text{min}}(1 - f_u(V)) + w_{\text{max}}f_u(V), \quad (5)$$

其中 $0 \leq w_{\text{min}} \leq w \leq w_{\text{max}}$, w_{min} 描述了忆阻器长期记忆, $f_u(V)$ 定义如下:

$$f_u(V) = \begin{cases} 1 - [1 + (a_+V)^{b_+}]^{-1}, & V \geq 0 \\ 0, & V < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 a_+ 和 b_+ 均为正常数; $T_w > 0$ 描述了 w 在不同电压作用时变化的快慢,

$$T_w = f_T(V, \tau_{w0}, \tau_{w+}, \tau_{w-}) = \begin{cases} \tau_{w+} + (\tau_{w0} - \tau_{w+}) [1 + (a_+V)^{b_+}]^{-1}, & V \geq 0 \\ \tau_{w-} + (\tau_{w0} - \tau_{w-}) [1 + (-a_-V)^{b_-}]^{-1}, & V < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

其中 $0 < \tau_{w-} \leq \tau_{w+} \leq \tau_{w0}$, $a_-, b_-, \tau_{w+}, \tau_{w-}$ 均为正常数, τ_{w0} 描述了遗忘过程中忆阻器的记忆遗忘的快慢. 状态方程 (3) 给出长期记忆 w_{min} 的变化规律, 其中 $F_{\text{min}} = f_F(V, 0, w)$, $T_{\text{min}} = f_T(V, \tau_{\text{min}0}, \tau_{\text{min}+}, \tau_{\text{min}-})$, $\tau_{\text{min}0}, \tau_{\text{min}+}, \tau_{\text{min}-}$ 均为常数, 且 $0 < \tau_{\text{min}-} \leq \tau_{\text{min}+} \leq \tau_{\text{min}0}$. 状态方程 (4) 给出状态变量 τ_{w0} 在外加电压作用下的变化规律, 其中

$$f_{\tau}(V) = \begin{cases} k_{\tau+} \left\{ 1 - [1 + (a_+V)^{b_+}]^{-1} \right\}, & V \geq 0 \\ -k_{\tau-} \left\{ 1 - [1 + (-a_-V)^{b_-}]^{-1} \right\}, & V < 0 \end{cases}, \quad (8)$$

$k_{\tau+}$ 和 $k_{\tau-}$ 均为正常数, 窗口函数 $f_{\text{win}}(\cdot)$ 用以限定 τ_{w0} 的变化范围,

$$f_{\text{win}}(\tau_{w0}, V) = 0.25 \{ (f_s(V) + 1) [k(f_s(\tau_{w0_max} - \tau_{w0}) + 1) + 2(1 - k)] + (f_s(-V) + 1)(f_s(\tau_{w0} - \tau_{w0_min}) + 1) \}, \quad (9)$$

其中 $0 < \tau_{w0_min} \leq \tau_{w0} \leq \tau_{w0_max}$, 函数 $f_s(\cdot)$ 定义为

$$f_s(x_s) = \begin{cases} 1, & x_s > 0 \\ -1, & x_s \leq 0 \end{cases}, \quad (10)$$

k 取值为 0 或 1, 它决定 τ_{w0} 的上限是否存在: 若 $k = 1$, τ_{w0} 存在上限 τ_{w0_max} , 此时 $\tau_{w0_min} \leq \tau_{w0} \leq \tau_{w0_max}$; 若 $k = 0$, τ_{w0} 无上限, 此时 $\tau_{w0} \geq \tau_{w0_min}$.

上述 STM→LTM 忆阻模型中, w_{max} 的定义决定了模型所描述的忆阻器是否具有经验学习特性: 若 w_{max} 为常数 1, 则模型所描述的忆阻器无经验学习特性; 若 $w_{\text{max}} \in [w, 1]$ 为状态变量, 其状态方程为

$$\dot{w}_{\text{max}} = \frac{F_{\text{max}} - w_{\text{max}}}{T_{\text{max}}}, \quad (11)$$

其中 $F_{\text{max}} = f_F(V, w, 1)$, $T_{\text{min}} = f_T(V, \tau_{\text{max}0}, \tau_{\text{max}+}, \tau_{\text{max}-})$, $\tau_{\text{max}0}, \tau_{\text{max}+}, \tau_{\text{max}-}$ 均为常数, 且 $0 < \tau_{\text{max}-} \leq \tau_{\text{max}+} \leq \tau_{\text{max}0}$, 此时模型所描述的忆阻器具有经验学习特性.

3 较快速再次学习特性

本节将对上一节所介绍的 STM→LTM 忆阻模型当 w_{max} 为常数 1 时在“学习-遗忘-再学习”实验过程中的特性给出分析.

模型中, 状态变量 w 的大小反映了忆阻器的记忆状态. 在 w 的状态方程 (2) 式中, w 的变化方向和变化的快慢分别由 F_w 和 T_w 所描述. 图 2 给出 w_{min} 和 τ_{w0} 取不同值时 F_w 和 T_w 关于 V 的曲线. 在“学习-遗忘-再学习”实验中, 作用在忆阻器上的电压始终满足 $V \geq 0$ V. 当作用在忆阻器上

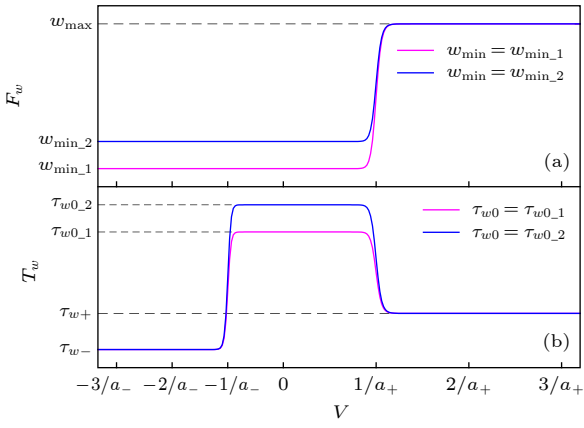


图 2 (a) F_w 和 (b) T_w 关于 V 的曲线, $b_+ = b_- = 35$

Fig. 2. Curves of (a) F_w and (b) T_w with respect to V , $b_+ = b_- = 35$.

的电压较大时 (例如脉冲激励作用阶段), $F_w \approx w_{\max}$, $T_w \approx \tau_{w+}$, w_{\max} , τ_{w+} 均为常数, 此时 w 的变化情况主要与 w 当前的大小有关. 当作用电压较小时 (例如脉冲间隔期间), $F_w \approx w_{\min}$, $T_w \approx \tau_{w0}$, 由状态方程 (3) 式和 (4) 式可知, w_{\min} 和 τ_{w0} 的大小与以往作用在忆阻器上的电压有关, 因此脉冲间隔期间 w 的变化情况不仅与 w 本身的大小有关, 同时还会受 w_{\min} 和 τ_{w0} 的大小的影响. 图 3 给出 w 初值和输入电压 V 一定, w_{\min} 和 τ_{w0} 取不同常数时, 状态变量 w 在一个脉冲周期内的变化情况, 仿真中 $a_+ = 2 \text{ V}^{-1}$, $b_+ = 35$, $\tau_{w+} = 0.1 \text{ s}$, 所施加脉冲信号的脉冲作用时间和脉冲间隔时间均为 0.05 s , 脉冲和脉冲间隔期间作用在忆阻器上的电压大小分别为 1 和 0.1 V , 仿真初始时刻 $w = 0.5$. 由图 3 给出的仿真结果可以看出, w_{\min} 和 τ_{w0} 的改变对脉冲作用阶段状态变量 w 的变化情况的影响并不明显, 而对脉冲间隔期间 w 的变化情况会有明显影

响: w_{\min} , τ_{w0} 越大, w 在脉冲间隔期间的遗忘过程越慢.

“学习-遗忘-再学习”实验中, 在初次学习阶段, 作用在忆阻器上的脉冲激励会使得 w , w_{\min} , τ_{w0} 均逐渐递增; 在遗忘阶段, w 逐渐递减至 w_{\min} , 而 w_{\min} 和 τ_{w0} 无明显变化; 在再次学习阶段状态变量 w_{\min} 和 τ_{w0} 均比初次学习阶段更大, 因此再次学习阶段的脉冲间隔期间 w 的遗忘速度比初次学习阶段更慢, 故与初次学习阶段相比, 再次学习阶段的每个脉冲周期内 w 的增长量更大, 记忆增量一定时所需经历的脉冲数量更少.

由图 3 给出的仿真结果还可以看出, 状态变量 w 在脉冲间隔期间的遗忘量随 w_{\min} 的增大而均匀递减; 该遗忘量也会随 τ_{w0} 的增大而逐渐递减, 但递减量随 τ_{w0} 的增大而逐渐减小. 这是由于状态方程 (2) 中, \dot{w} 与 w_{\min} 呈线性关系, 当仅 w_{\min} 变化时, 若 w_{\min} 的变化量一定, 则 \dot{w} 的变化量一定; \dot{w} 与 τ_{w0} 呈非线性关系, 当仅 τ_{w0} 变化时, τ_{w0} 的大小和 τ_{w0} 的变化量 $\Delta\tau_{w0}$ 都会对 \dot{w} 的变化量有所影响, 当 $\Delta\tau_{w0}$ 一定时, τ_{w0} 越大, \dot{w} 的变化量越小. 由上述分析可知, 在“学习-遗忘-再学习”实验中, 当所施加的脉冲信号一定时, τ_{w0} 初值越小, 再学习过程中完成记忆恢复所经历的脉冲数量越少.

图 4 给出 τ_{w0} 的初值不同的两组“学习-遗忘-再学习”过程仿真结果. 仿真中 $a_+ = 2 \text{ V}^{-1}$, $b_+ = 35$, $\tau_{w+} = 0.1 \text{ s}$, $\tau_{\min+} = 0.3 \text{ s}$, $\tau_{\min0} = 10^5 \text{ s}$, $k = 0$, $k_{\tau+} = 5$, 由于仿真中的作用电压始终非负, 因此参数 a , b , τ_{w-} , $\tau_{\min-}$, $k_{\tau-}$ 可取任意值; 初始时刻, 模型的各个状态变量均处于其下限; 所施加电压脉冲幅值和脉冲间隔的电压大小分别为 1 和 0.1 V , 脉

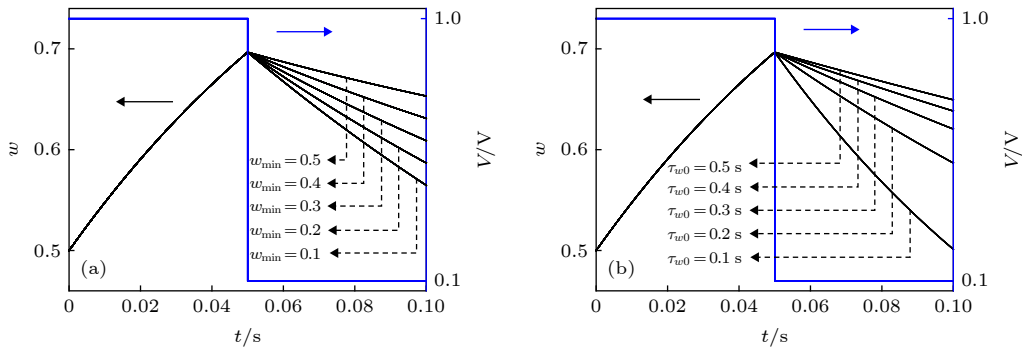


图 3 w_{\min} 和 τ_{w0} 的大小对状态变量 w 在一个脉冲周期内的变化情况的影响 (a) $\tau_{w0} = 0.2 \text{ s}$, w_{\min} 取值为不同常数时 w 的变化情况; (b) $w_{\min} = 0.2$, τ_{w0} 取值为不同常数时 w 的变化情况

Fig. 3. Variation of w within a pulse period when w_{\min} and τ_{w0} take different values: (a) Variation of w when $\tau_{w0} = 0.2 \text{ s}$ and w_{\min} takes different values; (b) variation of w when $w_{\min} = 0.2$ and τ_{w0} takes different values.

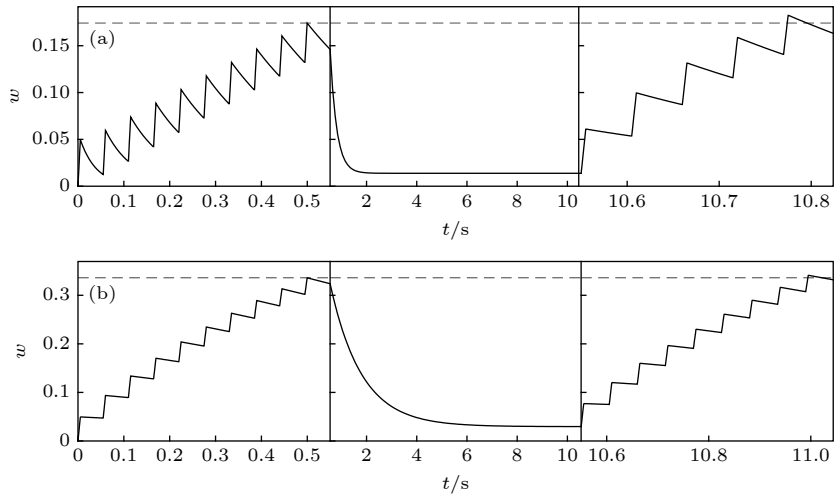


图 4 状态变量 τ_{w0} 的初值大小对于“学习-遗忘-再学习”过程中 w 的变化影响, 虚线标明初次学习阶段 w 所达到的最大值 (a) τ_{w0} 初值为 0.01 s; (b) τ_{w0} 初值为 1 s

Fig. 4. Influence of the initial value of τ_{w0} on the variation of w in “learning-forgetting-relearning” process. The maximum value of w during the first learning period is marked by a dashed line: (a) The initial value of τ_{w0} is 0.01 s; (b) the initial value of τ_{w0} is 1 s.

冲宽度和间隔的时长分别为 0.005 和 0.05 s. 两组仿真在初次学习阶段均经历 10 个脉冲激励. 当 τ_{w0} 初值为 0.01 s 时, 如图 4(a) 所示, 再学习阶段的记忆恢复仅需经历 5 个脉冲; 当 τ_{w0} 初值为 1 s 时, 如图 4(b) 所示, 再学习阶段的记忆恢复需经历 9 个脉冲.

由上述分析可以看出, 上一节介绍的 STM→LTM 忆阻模型当 w_{max} 为常数 1 时具有较快速再次学习特性是因为在脉冲激励过程中状态变量 w_{min} 和 τ_{w0} 会逐渐递增, w_{min} 的递增描述了忆阻器有更多的长期记忆形成, τ_{w0} 的递增描述了忆阻器遗忘曲线的时间常数逐渐增大, STM→LTM 忆阻器的长期记忆和遗忘曲线时间常数随脉冲激励而逐渐增大的现象在这类忆阻器的实验研究中均有所报道^[1-30], 因此, 较快速再次学习特性是 STM→LTM 忆阻器的固有特性.

4 经验学习特性

在第 2 节所介绍的 STM→LTM 忆阻器模型中, 若 w_{max} 为状态方程 (11) 所描述的状态变量, 此时的模型所描述的 STM→LTM 忆阻器具有经验学习特性.

状态变量 w_{max} 限定了 w 增长的上限, 因此 w 在脉冲激励作用时的增长过程将受到 w_{max} 的大小的影响. “学习-遗忘-再学习”实验过程中, 在初次学习阶段, w 和 w_{max} 比较接近, w 的增长会受

到 w_{max} 的限制; 在遗忘阶段, w 减小至 w_{min} , 而 w_{max} 并无明显变化; 之后的再学习阶段的初期, 由于 w_{max} 明显大于 w , 此时 w_{max} 对于 w 的增长的限制较小, 因此 w 将以更快的增速恢复至遗忘之前的状态, 当 w 逐渐接近 w_{max} 后, w 的增速将再次受到 w_{max} 的限制. 另外, 由于初次学习阶段 w_{min} 也有所增长, 因此在再次学习阶段的记忆恢复过程中, w 增长的“起点”更高; 由上一节中的分析可知, w_{min} 和 τ_{w0} 增长会使得 w 在脉冲间隔期间遗忘得更慢. 这两方面因素也会使得记忆恢复所经历的脉冲数量更少.

已报道的这类忆阻器的“学习-遗忘-再学习”实验中, 不同材料的忆阻器在该实验遗忘过程的记忆遗忘量以及再学习阶段的记忆恢复速度均有所不同. 表 1 给出文献 [21-30] 所报道的“学习-遗忘-再学习”实验中的相关数据.

模型中的状态变量 w , w_{min} , w_{max} 在脉冲电压作用时的最大增速分别由各自状态方程中的参数 τ_{w+} , τ_{min+} , τ_{max+} 所描述. 图 5—图 7 给出参数 τ_{w+} , τ_{min+} , τ_{max+} 大小的改变对于“学习-遗忘-再学习”实验中状态变量 w , w_{min} , w_{max} 的变化情况的影响, 仿真中除了参数 τ_{w+} , τ_{min+} , τ_{max+} 以外, $\tau_{w0_min} = 0.1$ s, $k_{r+} = 50$, $\tau_{max0} = 10^5$ s, 其他模型参数以及所施加的脉冲参数与图 4 仿真中的参数取值相同. “学习-遗忘-再学习”实验中忆阻器依次经历: 30 个脉冲的初次学习、100 s 的遗忘过程、30 个脉冲的再次学习. 仿真初始时刻的各个状态变量均处于其

表 1 文献 [21—30] 中所报道的“学习-遗忘-再学习”实验数据
Table 1. Experimental data of “learning-forgetting-relearning” experiment in References [21—30].

	初次学习脉冲数量	记忆遗忘量 ^{a)}	记忆恢复脉冲数量
文献[21]	80	~50%	4
文献[22]	50	~35%	7
文献[23]	80	~80%	12
文献[24]	50	~80%	20
文献[25]	30	~80%	20
文献[26]	50	~75%	25
文献[27] ^{b)}	40	~60%, ~40%	9, 4
文献[28] ^{b)}	40	~50%, ~40%	16, 6
文献[29] ^{b)}	50	~40%, ~30%, ~29%, ~20%	18, 12, 8
文献[30] ^{b)}	50	~80%, ~55%, ~25%	25, 12, 5

a) “记忆遗忘量”是根据各个文献中所报道的“学习-遗忘-再学习”实验的遗忘曲线, 对于记忆的遗忘量占初次学习所形成的记忆总量的比例给出估计, 各个数据前的“-”表示该数据是根据实验曲线所得的估计值. b) 在文献[27—30]所报道的实验中经历了多次“遗忘”与“再学习”过程, 表中对这几篇文章依次给出每次遗忘过程的遗忘比例, 以及每次再学习阶段的记忆恢复所经历的脉冲数量.

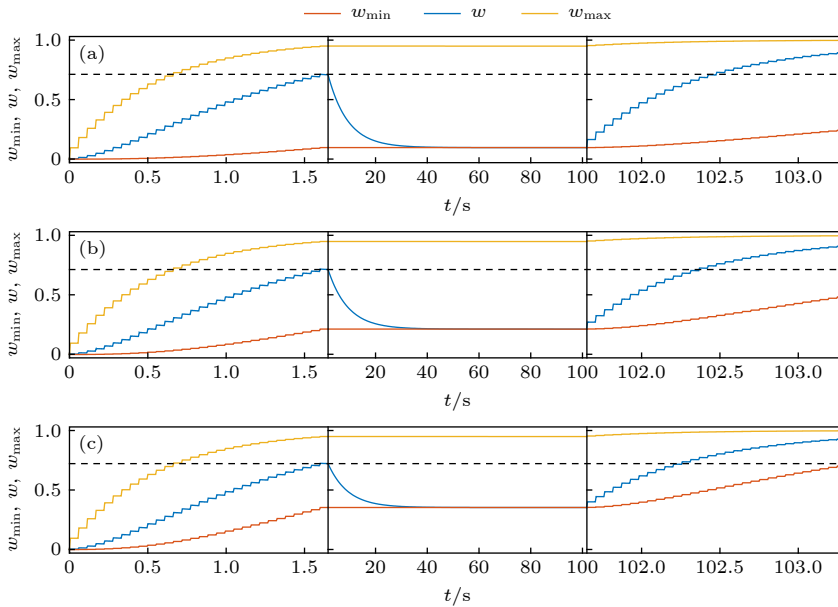


图 5 $\tau_{w+} = 0.06$ s, $\tau_{max+} = 0.05$ s, τ_{min+} 取不同值时的“学习-遗忘-再学习”实验仿真结果 (a) $\tau_{min+} = 0.5$ s; (b) $\tau_{min+} = 0.2$ s; (c) $\tau_{min+} = 0.1$ s. 虚线标出 w 在初次学习阶段所达到的最大值

Fig. 5. Simulations of “learning-forgetting-relearning” process when $\tau_{w+} = 0.06$ s, $\tau_{max+} = 0.05$ s, and τ_{min+} takes different values: (a) $\tau_{min+} = 0.5$ s; (b) $\tau_{min+} = 0.2$ s; (c) $\tau_{min+} = 0.1$ s. The maximum value of w during the first learning period is marked by a dashed line.

下限. 在初次学习阶段 w 所达到的最大值在图中用虚线标出.

参数 τ_{min+} 描述了 w_{min} 在脉冲激励作用时的最大增速: 当其他参数一定时, τ_{min+} 越小, w_{min} 在脉冲激励作用时的增长越快. 图 5 给出 $\tau_{w+} = 0.06$ s, $\tau_{max+} = 0.05$ s, τ_{min+} 取不同值时的“学习-遗忘-再学习”实验仿真结果. 在初次学习阶段, τ_{min+} 取值的不同会对 w_{min} 的增速有明显影响, 而对于 w 和 w_{max} 的增长速度影响并不明显. 在之后的遗

忘阶段, w_{min} 和 w_{max} 基本保持不变, w 将逐渐递减并收敛于 w_{min} . 由于 τ_{min+} 取不同值时在初次学习阶段 w_{min} 的增量不同, 因此在遗忘阶段 w 的收敛值以及在再学习阶段的记忆恢复所需的脉冲数量也有相应的区别: τ_{min+} 取值分别为 0.5, 0.2 和 0.1 s 时, 记忆恢复所经历的脉冲数量分别为 16, 14 和 12 个.

参数 τ_{w+} 描述了 w 在脉冲作用时的最大增长速度: 当其他参数一定时, τ_{w+} 越小, w 在脉冲激励

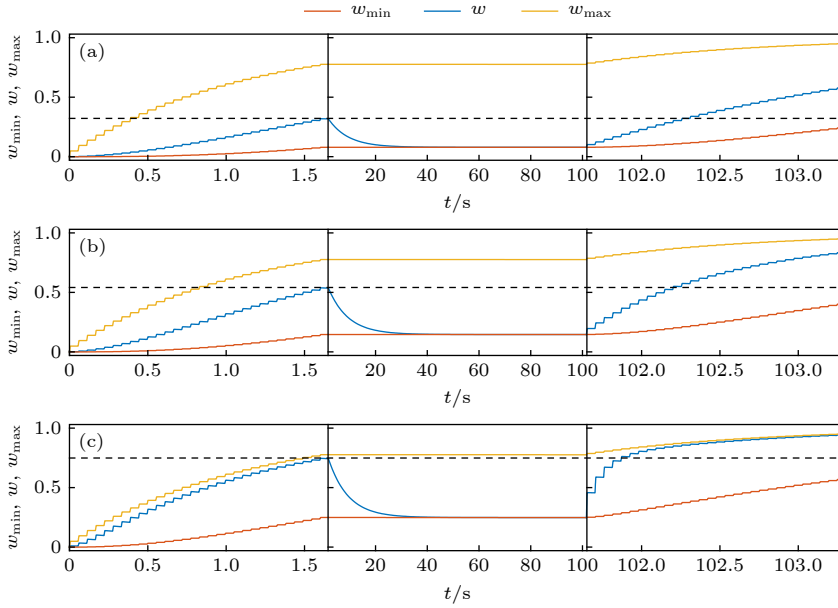


图 6 $\tau_{\min+} = 0.2$ s, $\tau_{\max+} = 0.1$ s, τ_{w+} 取不同值时的“学习-遗忘-再学习”实验仿真结果 (a) $\tau_{w+} = 0.15$ s; (b) $\tau_{w+} = 0.06$ s; (c) $\tau_{w+} = 0.01$ s. 虚线标出 w 在初次学习阶段所达到的最大值

Fig. 6. Simulations of “learning-forgetting-relearning” process when $\tau_{\min+} = 0.2$ s, $\tau_{\max+} = 0.1$ s, and τ_{w+} takes different values: (a) $\tau_{w+} = 0.15$ s; (b) $\tau_{w+} = 0.06$ s; (c) $\tau_{w+} = 0.01$ s. The maximum value of w during the first learning period is marked by a dashed line.

作用时的增长越快. 图 6 给出 $\tau_{\min+} = 0.2$ s, $\tau_{\max+} = 0.1$ s, τ_{w+} 取不同值时的“学习-遗忘-再学习”实验仿真结果. 在初次学习阶段, τ_{w+} 越小, 则 w 的增长过程越接近于其上限 w_{\max} 的增长过程; τ_{w+} 的大小对于 w_{\max} 的变化速度并无明显影响; w 限制了 w_{\min} 的变化上限, 当 w 增长速度变快时, w_{\min} 的增速也会有所增长, 因此 τ_{w+} 的减小也会使得 w 在遗忘过程的收敛值增大. 在再次学习阶段, 当 τ_{w+} 取值分别为 0.15 和 0.06 s 时, 如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 完成记忆恢复需分别经历 12 和 11 次脉冲激励, 记忆恢复前后脉冲作用下的记忆增速无明显变化; 当 $\tau_{w+} = 0.01$ s 时, 如图 6(c) 所示, 仅经历 5 次脉冲激励后就可使得 w 恢复在初次学习中所达到的最大值, 在之后的脉冲激励作用下 w 将跟随 w_{\max} 逐渐增长, 脉冲作用下的记忆增速在记忆恢复之后明显比记忆恢复阶段更小. 文献 [21,30] 中报道了再学习阶段记忆恢复后脉冲继续作用下的记忆增长情况: 文献 [21] 所报道的实验现象中, 再学习阶段记忆恢复速度比初次学习的记忆增速快得多, 在记忆恢复后记忆的增速会有明显的减慢, 减慢后的记忆增速与初次学习的记忆增速相似; 文献 [30] 中的忆阻器在再学习阶段的记忆恢复速度略快于初次学习的记忆增速, 记忆恢复后脉冲继

续作用下的记忆增速并无明显变化. 由图 6 所示仿真过程可知, 这两种情况的实验现象可通过调整参数 τ_{w+} 的大小来描述.

参数 $\tau_{\max+}$ 描述了 w_{\max} 在脉冲激励作用时的增速: $\tau_{\max+}$ 越小, w_{\max} 在脉冲激励作用时的增长越快; w_{\max} 限定了 w 的上限, w_{\max} 增速加快也会使得 w 和 w_{\min} 的增速加快. 图 7(a)—(c) 给出 $\tau_{\min+} = 0.1$ s, $\tau_{w+} = 0.15$ s, $\tau_{\max+}$ 取不同值时的“学习-遗忘-再学习”实验仿真结果. $\tau_{\max+}$ 的减小使得状态变量 w_{\max} , w , w_{\min} 在初次学习阶段的增长速度均明显加快. $\tau_{\max+}$ 取值分别为 0.1, 0.05 和 0.003 s 时, 再学习过程中记忆恢复所经历的脉冲数量分别为 10, 12 和 16. 由图 7(c) 的仿真结果可以看出, 当 w_{\max} 在脉冲作用下的增速非常快时, 记忆恢复过程的脉冲数量减少主要是因为 w_{\min} 在初次学习阶段的增长使得再学习阶段 w 的初值较大, 遗忘前后 w 在脉冲作用时的增速已无明显变化; 图 7(d) 给出 $w_{\max} = 1$ 、模型其他参数与图 7(a)—(c) 相同时的“学习-遗忘-再学习”实验仿真结果, 状态变量 w 和 w_{\min} 在图 7(d) 与图 7(c) 所示过程中的变化情况非常相似, 因此状态变量 w_{\max} 在脉冲作用下的增速远比 w 更快时的经验学习特性接近于上一节中所讨论的较快速再次学习特性.

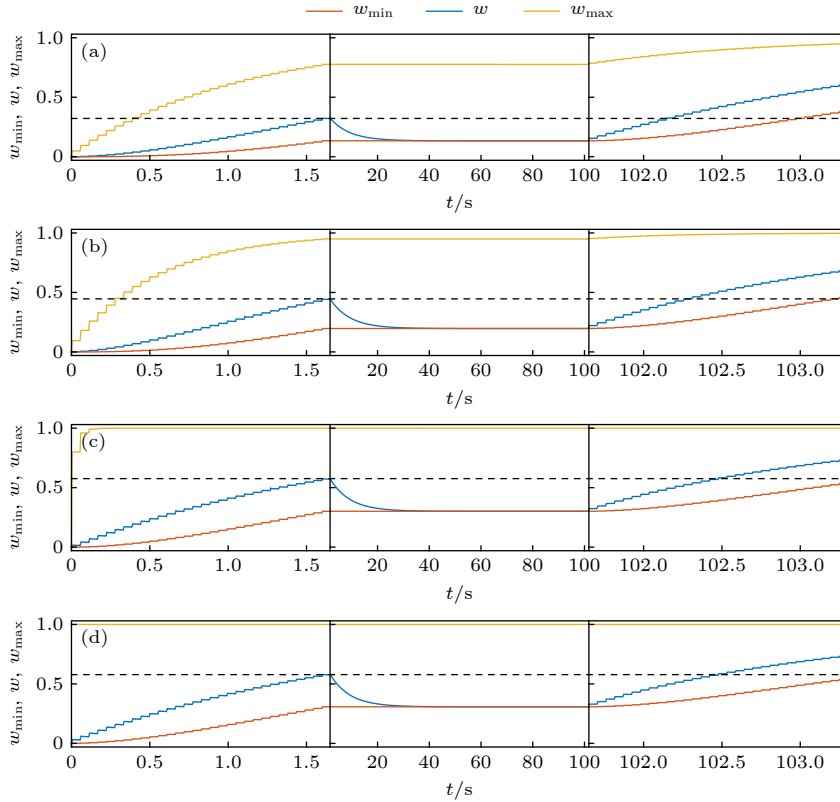


图 7 $\tau_{w+} = 0.15$ s, $\tau_{\min+} = 0.1$ s, $\tau_{\max+}$ 取不同值时的“学习-遗忘-再学习”实验仿真结果 (a) $\tau_{\max+} = 0.1$ s; (b) $\tau_{\max+} = 0.05$ s; (c) $\tau_{\max+} = 0.003$ s; (d) 当 w_{\max} 为常数 1, 模型其他参数与 (a)—(c) 相同时的“学习-遗忘-再学习”实验仿真结果. 虚线标出 w 在初次学习阶段所达到的最大值

Fig. 7. Simulations of “learning-forgetting-relearning” process when $\tau_{w+} = 0.15$ s, $\tau_{\min+} = 0.1$ s, and $\tau_{\max+}$ takes different values: (a) $\tau_{\max+} = 0.1$ s; (b) $\tau_{\max+} = 0.05$ s; (c) $\tau_{\max+} = 0.003$ s; (d) simulation of “learning-forgetting-relearning” process when $w_{\max} = 1$, and other parameters are the same as those used in (a)–(c). The maximum value of w during the first learning period is marked by a dashed line.

5 w_{\max} 的物理意义

在 STM→LTM 忆阻器的实验研究文献中, 通常利用连通两电极的导电通道在外加电压作用下的形成与消失来解释这类忆阻器的阻变机理 [1,2,5,8–12,14–16,18,19,22,24,26,28,29]. 外加正脉冲电压作用下, 两电极间的离子 (或空穴) 逐渐累积生长, 并形成连接两电极的导电通道, 两电极间的阻值逐渐减小, 忆阻器的记忆逐渐形成. 所形成的导电通道包括稳定和不稳定两部分: 移去施加在忆阻器两端的正脉冲后, 导电通道的稳定部分可持续存在较长时间, 这部分导电通道形成了忆阻器的长期记忆; 其不稳定部分会较快分解消失, 这一过程即为忆阻器的短期记忆的遗忘. 施加更多的正脉冲可使得更多的导电通道不稳定部分变为稳定部分, 不稳定部分越是趋于稳定, 则移除脉冲后不稳定部分的分解消失的速度越慢.

文献 [36] 对模型状态变量 w , w_{\min} , τ_{w0} 的物理意义已给出讨论: w 描述了导电通道的归一化面积, w_{\min} 描述了导电通道稳定部分的归一化面积, τ_{w0} 描述了在移除脉冲电压后导电通道不稳定部分消失的快慢. 在一段时间内, 只有位于导电通道周围的离子 (或空穴) 在外加脉冲电压作用下可参与进一步形成更多的导电通道, 即在这段时间内可形成的导电通道的大小存在一个上限, 具有经验学习特性的忆阻模型中, 状态变量 w_{\max} 即描述了当前时刻可形成的导电通道的归一化面积的上限. 这里将一段时间内可运动至导电通道附近并参与形成导电通道的离子 (或空穴) 所分部的区域称为导电通道的周围区域.

图 8 给出“学习-遗忘-再学习”实验中导电通道及其周围区域在外加电压作用下的变化情况. 在初次学习阶段, 如图 8(a) 所示, 连续的脉冲激励作用下不断有更多的离子 (或空穴) 逐渐移动至导电通

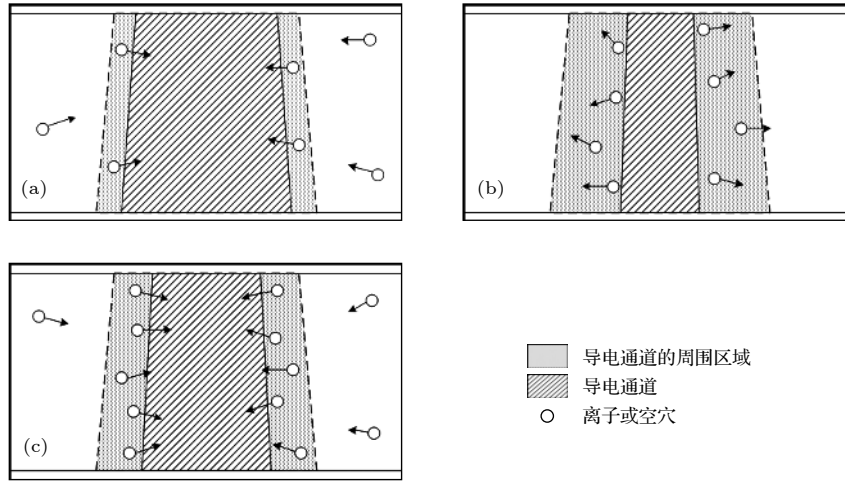


图 8 忆阻器两电极间导电通道及其周围区域在“学习-遗忘-再学习”实验中的变化情况 (a) 初次学习阶段; (b) 遗忘阶段; (c) 再次学习的记忆恢复阶段

Fig. 8. Change of the conductive channel and its surrounding area during different periods of the “learning-forgetting-relearning” process: (a) The first learning process; (b) the forgetting process; (c) the memory recovery period of the relearning process.

道的周围区域, 并参与形成连通两电极的导电通道, 导电通道及其周围区域均逐渐增宽, 并且导电通道中有更多的不稳定部分逐渐变为稳定部分, 在这一阶段模型状态变量 w , w_{\max} , w_{\min} 均逐渐增大; 在遗忘阶段, 如图 8(b) 所示, 导电通道的不稳定部分逐渐分解消失, 构成这部分导电通道的离子 (或空穴) 在离开导电通道后仍然分布在导电通道的周围区域, 因此经历遗忘过程之后, 连接两电极的导电通道的宽度减小, 而导电通道的稳定部分以及导电通道的周围区域的大小基本不变, 在这一过程中模型状态变量 w 减小至 w_{\min} , 而 w_{\min} 和 w_{\max} 基本不变; 在之后的再次学习阶段, 如图 8(c) 所示, 由于导电通道的周围区域之中存在大量的离子 (或空穴), 在脉冲电压作用下导电通道将快速恢复到遗忘之前的宽度, 之后以类似初次学习阶段的速度逐渐增宽, 这一过程中 w 首先快速增长回到遗忘之前的状态, 当 w 接近于 w_{\max} 时, w 跟随 w_{\max} 逐渐增长.

模型中的参数 $\tau_{\min+}$, τ_{w+} , $\tau_{\max+}$ 分别描述了导电通道的稳定部分、导电通道、导电通道的周围区域这三个部分在脉冲电压作用时的增长速度: $\tau_{\min+}$ 越小, 则在脉冲电压作用下导电通道的不稳定部分变为稳定部分的速度越快; τ_{w+} 越小, 则位于导电通道周围区域的离子 (或空穴) 在脉冲电压作用下形成导电通道的速度越快; $\tau_{\max+}$ 越小, 则脉冲电压作用下离子 (或空穴) 运动进入导电通道的周围区域的速度越快. 若 $\tau_{\max+}$ 的取值接近其下限 0,

则脉冲电压作用时导电通道的周围总是存在充足的离子 (或空穴), 此时导电通道在脉冲电压作用时的增长过程不会明显受到离子 (或空穴) 分布情况的限制; 在脉冲间隔期间, 导电通道不稳定部分的分解速度仍然会随着所经历的脉冲数量的增多而逐渐减慢. 此时忆阻器在“学习-遗忘-再学习”实验中表现接近于较快速再次学习特性.

6 结 论

本文对于文献 [35] 中所设计的 STM→LTM 忆阻模型在“学习-遗忘-再学习”实验中的特性给出进一步分析. 当模型中的 w_{\max} 为常数 1 时, STM→LTM 忆阻模型在“学习-遗忘-再学习”实验中表现为较快速再次学习特性, 再学习过程记忆增速较快主要是由于 w_{\min} 和 τ_{w0} 的增长使得脉冲间隔期间的遗忘速度减慢. 当 w_{\max} 为状态方程 (11) 所描述的状态变量时, 模型在“学习-遗忘-再学习”实验中表现为经验学习特性, 遗忘前后的两次学习过程的记忆增速的差别主要是由于遗忘之后 w_{\max} 对脉冲作用时的记忆增长的限制比遗忘之前更小, 同时遗忘速度的减慢对遗忘前后的两次学习速度的影响仍然存在; 模型中参数 $\tau_{\min+}$, τ_{w+} , $\tau_{\max+}$ 的大小决定了再学习阶段的记忆恢复的快慢, 当 $\tau_{\max+}$ 的大小接近其下限 0 时, 模型在“学习-遗忘-再学习”实验中的表现接近于 $w_{\max} = 1$ 时的较快速再次学习特性. w_{\max} 的物理意义可利用导电通道的周围区

域在不同外加电压作用下的变化来给出解释.

参考文献

- [1] Chang T, Jo S H, Lu W 2011 *ACS Nano* **5** 7669
- [2] Yang R, Terabe K, Yao Y P, Tsuruoka T, Hasegawa T, Gimzewski J K, Aono M 2013 *Nanotechnology* **24** 384003
- [3] Lei Y, Liu Y, Xia Y D, Gao X, Xu B, Wang S D, Yin J, Liu Z G 2014 *AIP Adv.* **4** 077105
- [4] Xiao Z G, Huang J S 2016 *Adv. Electron. Mater.* **2** 1600100
- [5] Kim M K, Lee J S 2018 *ACS Nano* **12** 1680
- [6] Luo W Q, Yuan F Y, Wu H Q, Pan L Y, Deng N, Zeng F, Wei R S, Cai X J 2015 *15th Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS)* Beijing, China, October 12–14, 2015 p7457490
- [7] Wang L G, Zhang W, Chen Y, Cao Y Q, Li A D, Wu D 2017 *Nanoscale Res. Lett.* **12** 65
- [8] La Barbera S, Vuillaume D, Alibart F 2015 *ACS Nano* **9** 941
- [9] Kim H J, Park D, Yang P, Beom K, Kim M J, Shin C, Kang C J, Yoon T S 2018 *Nanotechnology* **29** 265204
- [10] Ohno T, Hasegawa T, Tsuruoka T, Terabe K, Gimzewski J K, Aono M 2011 *Nat. Mater.* **10** 591
- [11] Nayak A, Ohno T, Tsuruoka T, Terabe K, Hasegawa T, Gimzewski J K, Aono M 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 3606
- [12] Ohno T, Hasegawa T, Nayak A, Tsuruoka T, Gimzewski J K, Aono M 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 203108
- [13] Pan Y, Wan T, Du H, Qu B, Wang D, Ha T J, Chu D 2018 *J. Alloys Compd.* **757** 496
- [14] Zhou L, Mao J Y, Ren Y, Yang J Q, Zhang S R, Zhou Y, Liao Q, Zeng Y J, Shan H, Xu Z, Fu J, Wang Y, Chen X, Lv Z, Han S T, Roy V A L 2018 *Small* **14** 1800288
- [15] Liu J, Yang H F, Ji Y, Ma Z Y, Chen K J, Zhang X X, Zhang H, Sun Y, Huang X F, Oda S 2018 *Nanotechnology* **29** 415205
- [16] Lee T H, Hwang H G, Woo J U, Kim D H, Kim T W, Nahm S 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 25673
- [17] Park Y, Park M J, Lee J S 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1804123
- [18] Lin Y, Zeng T, Xu H Y, Wang Z Q, Zhao X N, Liu W Z, Ma J G, Liu Y C 2018 *Adv. Electron. Mater.* **4** 1800373
- [19] Wang S P, He C L, Tang J, Yang R, Shi D X, Zhang G Y 2019 *Chin. Phys. B* **28** 017304
- [20] Mao J Y, Zhou L, Ren Y, Yang J Q, Chang C L, Lin H C, Chou H H, Zhang S R, Zhou Y, Han S T 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 1491
- [21] Wang Z Q, Xu H Y, Li X H, Yu H, Liu Y C, Zhu X J 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 2759
- [22] Li S Z, Zeng F, Chen C, Liu H Y, Tang G S, Gao S, Song C, Lin Y S, Pan F, Guo D 2013 *J. Mater. Chem. C* **1** 5292
- [23] Zhang C C, Tai Y T, Shang J, Liu G, Wang K L, Hsu C, Yi X H, Yang X, Xue W H, Tan H W, Guo S S, Pan L, Li R W 2016 *J. Mater. Chem. C* **4** 3217
- [24] Park Y, Lee J S 2017 *ACS Nano* **11** 8962
- [25] Yan X B, Wang J J, Zhao M L, Li X Y, Wang H, Zhang L, Lu C, Ren D L 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 013503
- [26] Ren Y, Hu L, Mao J Y, Yuan J, Zeng Y J, Ruan S, Yang J Q, Zhou L, Zhou Y, Han S T 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 9383
- [27] Liu G, Wang C, Zhang W B, Pan L, Zhang C C, Yang X, Fan F, Chen Y, Li R W 2016 *Adv. Electron. Mater.* **2** 1500298
- [28] Zhang B, Wang C, Wang L X, Chen Y 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 4023
- [29] Li Y, Chu J X, Duan W J, Cai G S, Fan X H, Wang X Z, Wang G, Pei Y L 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 24598
- [30] Zhang S R, Zhou L, Mao J Y, Ren Y, Yang J Q, Yang G H, Zhu X, Han S T, Roy V A L, Zhou Y 2019 *Adv. Mater. Technol.* **4** 1800342
- [31] Chen L, Li C D, Huang T W, Chen Y R, Wen S P, Qi J T 2013 *Phys. Lett. A* **377** 3260
- [32] Chen L, Li C D, Huang T W, Hu X F, Chen Y R 2016 *Neurocomputing* **171** 1637
- [33] Meng F Y, Duan S K, Wang L D, Hu X F, Dong Z K 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 148501 (in Chinese) [孟凡一, 段书凯, 王丽丹, 胡小方, 董哲康 2015 物理学报 **64** 148501]
- [34] Shao N, Zhang S B, Shao S Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 128503 (in Chinese) [邵楠, 张盛兵, 邵舒渊 2016 物理学报 **65** 128503]
- [35] Shao N, Zhang S B, Shao S Y 2017 *Chin. Phys. B* **26** 118501
- [36] Shao N, Zhang S B, Shao S Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 018501 (in Chinese) [邵楠, 张盛兵, 邵舒渊 2019 物理学报 **68** 018501]
- [37] Chang T, Jo S H, Kim K H, Sheridan P, Gaba S, Lu W 2011 *Appl. Phys. A* **102** 857

Analysis of memristor model with learning-experience behavior

Shao Nan^{1)†} Zhang Sheng-Bing¹⁾ Shao Shu-Yuan²⁾

1) (*School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

2) (*School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

(Received 26 May 2019; revised manuscript received 2 July 2019)

Abstract

The behavior of transition from short-term memory (STM) to long-term memory (LTM) has been observed and reported in the experimental studies of memristors fabricated by different materials. This kind of memristor in this paper is named STM→LTM memristor. In some of these experimental researches, the learning-experience behavior observed in the “learning-forgetting-relearning” experiment is also reported. When the memristor is restimulated by pulses after forgetting the STM, its memory will quickly return to the highest state that has been reached before the forgetting period, and the memory recovery during the relearning period is obviously faster than the memory formation in the first learning process. In this paper, the behavior of the existing STM→LTM memristor model in the “learning-forgetting-relearning” experiment is further discussed. If w_{\max} , the upper bound of the memory level, is a constant with a value of 1, the STM→LTM memristor model exhibits no learning-experience behavior, and this model shows a faster relearning behavior in the “learning-forgetting-relearning” experiment. The relearning process is faster because the memory forgetting during pulse-to-pulse interval in the relearning process is slower than that in the first learning process. In the STM→LTM memristor model with learning-experience behavior, w_{\max} is redesigned as a state variable in $[0,1]$, and its value will be influenced by the applied voltage. The memory formation in the first learning process is relatively slow because w_{\max} limits the memory formation speed when the pulse is applied. After the forgetting process, the limitation of w_{\max} on the pulse-induced memory formation is less obvious, so the memory of the device increases at a faster speed during the memory recovery of the relearning process. In this case, the forgetting speed still becomes slower after each pulse has been applied. If the pulse-induced w_{\max} increase is so fast that w_{\max} will quickly increase to its upper bound after a few pulses have been applied in the first learning process, and the learning-experience behavior is similar to the faster relearning behavior when $w_{\max} = 1$. In most of experimental research papers about the STM→LTM memristor, the change of the memristance can be explained by the formation and annihilation of the conductive channel between two electrodes of a memristor. During a certain period of time, the ions (or vacancies), which can be used to form the conductive channel, are only those that are around the conductive channel, which indicates that there should be an upper bound for the size of the conductive channel within this time period. The area in which ions (or vacancies) can be used to form the conductive channel is called the surrounding area of the conductive channel. In the model, w_{\max} can be understood as the size of the conductive channel’s surrounding area, and it describes the upper bound of the width of the conductive channel.

Keywords: memristor, learning-experience behavior, short-term memory, long-term memory

PACS: 85.35.-p, 73.43.Cd, 87.19.lv

DOI: 10.7498/aps.68.20190808

† Corresponding author. E-mail: shao@mail.nwpu.edu.cn