

МЕМРИСТОР – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2012 г. В.А. ВАСИЛЬЕВ, П.С. ЧЕРНОВ

Пензенский государственный университет

В последние годы внимание исследователей привлекают перспективные компоненты наноэлектроники, получившие название мемристоры. Теоретически предсказанные Л. Чуа ещё в 1971 году [1], впервые элементы с требуемыми характеристиками получены сравнительно недавно на основе тонких пленок TiO_2 [2]. Элементы памяти на основе мемристоров приближаются по своим характеристикам к получившей широкое распространение флэш-памяти и подают надежды в связи с рядом преимуществ [3]. Области возможного применения мемристоров включают в себя как цифровые, так и аналоговые устройства. В первую очередь это быстродействующая энергонезависимая память, а также логические элементы [4]. Эффект изменения сопротивления мемристора используется в перспективных резистивных элементах памяти ReRAM [5]. Свойство мемристоров изменять свое сопротивление находит применение в аналоговой технике для обработки сигналов [6], построения нейронных сетей [7], генераторов шума [8] и других приложений.

Мемристор представляет собой пассивный нелинейный элемент электрической цепи и является фундаментальным наравне с резистором, конденсатором и катушкой индуктивности. Его нельзя получить комбинацией этих трёх хорошо известных базовых элементов классической теории электрических цепей. В отличие от обычного нелинейного резистора, сопротивление мемристора зависит не от приложенного к нему в данный момент времени напряжения, а от напряжений (или токов) во все предыдущие моменты времени. При протекании тока через мемристор в одном направлении, его электрическое сопротивление увеличивается. Когда ток течёт в обратном направлении – сопротивление уменьшается. В отсутствии электрического тока сопротивление мемристора сохраняется, и в момент подачи напряжения оно в точности равно сопротивлению до момента прекращения подачи питания. То есть мемристор (сокращенно от «memory resistor») обладает энергонезависимой памятью.

В Табл. 1 приведены сравнительные характеристики применяемых в настоящее время типов памяти и мемристора.

Таблица 1

Характеристики различных типов памяти

	<i>Мемристор</i>	<i>DRAM</i>	<i>FLASH</i>	<i>HDD</i>
Время чтения, [нс]	10	10 – 50	25 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время записи, [нс]	0,2 – 20	10 – 50	200 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время хранения информации	годы	менее сек.	годы	Годы
Количество циклов записи	10^{12}	10^{16}	$10^3 - 10^6$	10^{15}
Энергия на запись одного бита, [пДж]	0,1 – 3	2	10 000	$(1-10) \cdot 10^9$

Существуют различные математические модели, описывающие поведение мемристора (1–3), однако отсутствуют его модели в присутствии шума. Построение такой модели открывает возможности для выявления новых свойств и установления характерных зависимостей.

Интерес представляет модель, не зависящая от конкретной физической реализации мемристора [9]. Соотношение между протекающим током и приложенным напряжением в общем случае имеет вид:

$$U(t) = R_M(q(t))I(t) = R_m \left[\int_{-\infty}^t I(t') dt' \right] I(t) \quad (1)$$

где U – напряжение, приложенное к мемристор, [В]; I – сила тока, [А]; q – заряд, [Кл]; R_M – сопротивление мемристора, [Ом]; R_m – сопротивление, не зависящее от времени, [Ом].

Пределы интегрирования $(-\infty, t)$ в выражении (1) говорят о том, что в отличие от обычного нелинейного резистора сопротивление мемристора R_M определяется не текущим значением тока, а его значениями во все предшествующие моменты времени.

В практических реализациях мемристора сопротивление R_M обычно зависит не только от количества прошедшего через него заряда, но и от других факторов, математически описываемых с помощью фазовых переменных состояния физической системы. Если принять совокупность этих переменных как координаты некоторого вектора x в фазовом пространстве, то выражение (1) можно обобщить, записав:

$$U(t) = R_M(x, t)I(t) \quad (2)$$

где x – вектор состояния. Также необходимо ввести уравнение, описывающее изменение во времени вектора состояния x :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (3)$$

Следует отметить, что величина R_M является скалярной величиной, хотя функция f является векторной.

Особенным свойством мемристоров является наличие гистерезиса вольтамперной характеристики. Форма кривой гистерезиса зависит от частоты входного сигнала. При больших частотах эффект гистерезиса пропадает, что можно объяснить тем, что сопротивление не успевает измениться за один период изменения входного сигнала и мемристор в таком режиме ведёт себя как обычный линейный резистор. При очень малых частотах гистерезис также не наблюдается, поскольку сопротивление успевает установиться до определенной величины при каждом из мгновенных значений поданного напряжения и мемристор в таком режиме работы ведёт себя как обычный нелинейный резистор.

Для исследования поведения мемристора в присутствии шума, обычные дифференциальные уравнения (2, 3) необходимо заменить стохастическими дифференциальными уравнениями, при этом фазовые переменные, характеризующие внутреннее состояние мемристора, становятся стохастическими переменными и выражение (3) следует заменить уравнением:

$$dx = -\nabla V(x)dt + G(t)dW \quad (4)$$

где x – вектор переменных стохастического процесса; $V(x)$ – потенциал, присущий системе; W – Винеровский процесс; $G(t)$ – функция, задающая поступающий в систему сигнал.

Рассмотрим мемристор, внутреннее состояние которого характеризуется одной единственной переменной x и потенциалом с двумя устойчивыми состояниями вида:

$$V(x) = (x^2 - a^2)^2 \quad (5)$$

В случае мемристора на основе тонких плёнок оксидов металлов [2], величина x может соответствовать границе w областей высокой и низкой проводимостей.

В качестве функции $R_M(x, t)$ была выбрана линейная зависимость:

$$R_M = kx + b, \quad (6)$$

где k, b – безразмерные постоянные коэффициенты; x – стохастическая фазовая переменная, определяемая уравнением (4).

Таким образом, предлагаемая модель мемристора описывается следующими уравнениями:

$$I(t) = R_M^{-1}(t)U(t); \quad R_M(t) = k[x(t)] + b; \quad (7)$$

$$d[x(t)] = -\nabla V(x)dt + G(t)dW; \quad (8)$$

$$V(x) = c(x^2 - a^2)^2. \quad (9)$$

Параметрами модели являются безразмерные величины k, b, c, a . Функцией $G(t)$ определяется амплитуда и форма стохастического сигнала.

Рассмотрим поведение стохастической фазовой переменной x при наличии шума в системе. На Рис. 2 приведены временные диаграммы одной из реализаций стохастического процесса, полученные в результате численного решения уравнений (8, 9) со значениями параметров $a = 2; c = 0,041$.

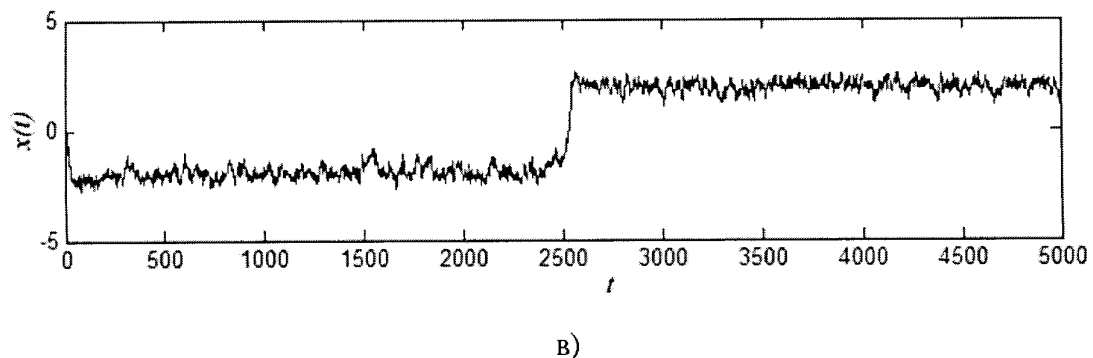
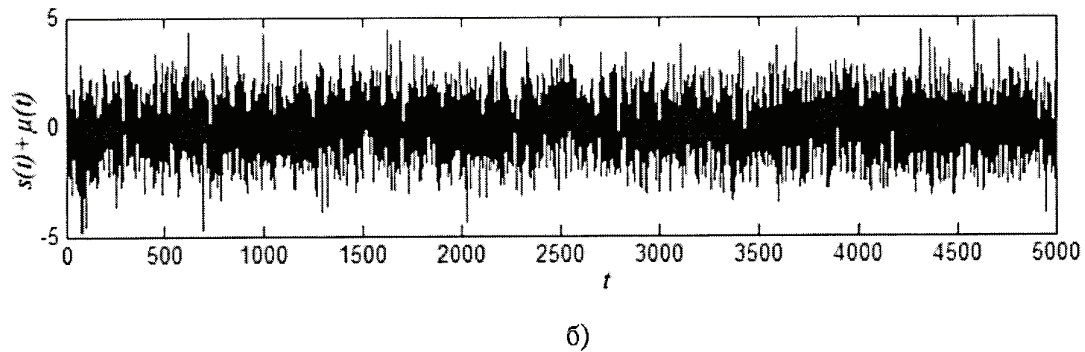
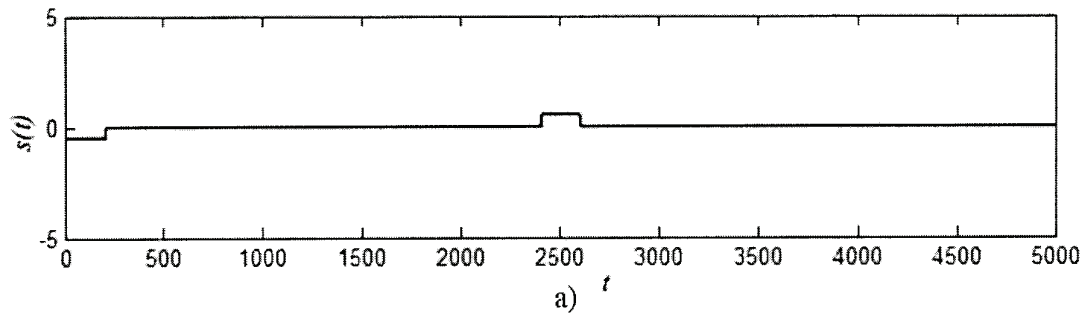


Рис. 1. Графики функций $s(t)$, $(s(t)+\mu(t))$, $x(t)$.

Стохастический сигнал, поступающий в систему и описываемый функцией $G(t)$, складывается из гауссова шума μ и полезного сигнала s . На Рис. 1а показан исходный сигнал $s(t)$, представляющий собой два разделённых по времени прямоугольных импульса. На Рис. 1б приведена сумма сигнала и гауссова шума $(s(t)+\mu(t))$, являющаяся

стохастическим сигналом, поступающим в систему. На Рис. 1в приведён результат численного решения уравнения (8), то есть реакция системы на входной сигнал.

Из графиков (Рис. 2) видно, что амплитуда шума больше амплитуды сигнала в 2,6 раз, но несмотря на это система реагирует на сигнал и переходит в одно из устойчивых состояний ($x = \pm 2$), определяемых параметром a рассматриваемой модели, в соответствии с полярностью исходного сигнала.

Рассматриваемая система обладает памятью, поскольку даже после окончания импульса, переводящего её в одно из устойчивых состояний, она остаётся в данном состоянии до следующего «программирующего» импульса и шум сам по себе не способен воздействовать на состояние системы.

Следует отметить, что в отсутствии шума, одного только сигнала недостаточно для изменения устойчивого состояния, то есть наличие шума является необходимым условием функционирования системы, что является признаком стохастического резонанса.

Стохастический резонанс присущ нелинейным системам, какими в общем случае и являются системы, подчиняющиеся уравнениям (7–9), и заключается в том, что шум, действующий на систему, способствует её переходу в одно из устойчивых состояний. То есть шум эффективно усиливает полезный слабый сигнал, который в его отсутствие не смог бы перевести систему в другое состояние.

Таким образом, на основе предложенной модели мемристора установлено, что рассмотренный мемристор работоспособен при наличии шумов и более того, его функционирование основано на их присутствии в системе.

Данный результат является весьма интересным и говорит о перспективности мемристора, как компонента наноэлектроники, поскольку в связи с тенденцией миниатюризации устройств, всем современным функциональным элементам электроники приходится работать в агрессивных условиях классических и квантовых шумов, интенсивность которых увеличивается с уменьшением размеров системы. Хотя явление памяти в макроскопических элементах электрических цепей встречается довольно редко, при переходе к микро- и наноразмерам данный феномен оказывается вездесущим, о чем свидетельствуют многочисленные публикации результатов экспериментальных исследований, обнаруживающих гистерезис характеристик, присущий мемристорам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chua L.O.* Memristor - The Missing Circuit Element // *IEEE Trans. Circuit Theory*, v. 18, 1971. – p. 507-519
2. *Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S.* The missing memristor found // *Nature*, v. 453, 2008. – p. 80-83.
3. *Ho Y., Huang G.M., Li P.* Nonvolatile Memristor Memory: Device Characteristics and Design Implications // *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design*, 2009. – p. 485-490.
4. *Borghetti J., Snider G.S., Kuekes P.J., Yang J.J., Stewart D.R., Williams R.S.* "Memristive Switches Enable 'Stateful' Logic Operations via Material Implication // *Nature*, v. 464, 2010. – p. 873-876.
5. *Chua L.O.* Resistance switching memories are memristors // *Applied Physics A* 102, 2011. – p. 765–783.
6. *Wang W., Yu Q., Xu C., Chui Y.* Study of filter characteristics based on PWL memristor // *ICCCAS*, 2009. – p. 969 – 973.
7. *Pershin Y.V., Di Ventra M.* Experimental demonstration of associative memory with memristive neural networks // *Neural Networks*, v. 23, Issue 7, 2010. – p. 881-886.
8. *Sun W., Li C., Yu J.* A memristor based chaotic oscillator // *ICCCAS*, 2009. – p. 955-957.
9. *Pershin Y.V., Di Ventra M.* Memory Effects in Complex Materials and Nanoscale Systems // *Advances in Physics*, v. 60, Issue 2, 2011. – p. 145 – 227.