

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Минеральные ассоциации и минералогические критерии генезиса астроблем / В.Л. Масайтис, М.А. Гневушев, Р.И. Шафрановский // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. – 1979. – Вып. 3. С. 257–273.
2. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе / А.С. Фиалков. – М. : Аспект-пресс, 1997. – 717 с.
3. Haddad, M. Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior / M. Haddad, R. Zitoune, H. Bougherara, F. Eyma, V. Castanié // Composites Part B: Engineering. – 2014. – V. 57. – P. 136–143.
4. Пул, Ч. Техника ЭПР-спектроскопии / Ч. Пул. – М.: Мир, 1970. – 557 с.
5. Микроволновый нагрев диэлектриков в рабочей камере с ограниченным объемом / В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Электронное приборостроение. – 2002. – Вып. 1(22). – С. 62.
6. Математическое моделирование микроволнового нагрева трехмерной диэлектрической среды / В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Электронное приборостроение. – 2003. – Вып. 6(34). – С. 64.
7. Abramovitch, R. Application of microwave energy to organic synthesis: improved technology / R. Abramovitch, D. Abramovitch, K. Iyanar, K. Tamareselvy // Tetrahedron Lett. – 1991. – V. 32, № 39. – P.5251–5254.

## СИНХРОНИЗАЦИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ БИСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЭЛЕМЕНТЕ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ

**Д. А. Подрябинкин**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь, e-mail: podryabinkin@bsuir.by*

Приведены результаты моделирования синхронизации переключения бистабильных состояний в элементе резистивной памяти на основе оксида гафния, стимулированного шумом из состояния с высоким сопротивлением в состояние с низким сопротивлением.

**Ключевые слова:** оксид гафния; резистивная память; переключение сопротивления; бистабильные состояния; синхронизация.

## SYNCHRONIZATION OF SWITCHING OF BISTABLE STATES IN A RESISTIVE MEMORY ELEMENT BASED ON HAFNIUM OXIDE

**D. A. Podryabinkin**

---

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Browka 6, 220013, Minsk, Belarus  
Corresponding author: D. A. Podryabinkin (podryabinkin@bsuir.by)*

The results of modeling the synchronization of switching of bistable states in a resistive memory element based on hafnium oxide, stimulated by noise from a state with a high resistance to a state with a low resistance, are presented.

**Key words:** hafnium oxide; resistive memory; switching resistance; bistable states; synchronization.

## ВВЕДЕНИЕ

Наноструктуры на основе оксидов металлов, перспективны для применения в качестве подзатворных диэлектриков в металл-окисел-полупроводник (МОП) транзисторах и энергонезависимой резистивной памяти с произвольной выборкой (RRAM) [1]. У таких оксидов высокая диэлектрическая проницаемость в сочетании с большой энергией запрещенной зоны и термодинамически стабильная граница с кремнием.

Элемент резистивной памяти включает слой наноразмерного оксидного диэлектрика толщиной 5–12 нм, металлические или полупроводниковые электроды. Путем импульсной электроформовки в диэлектрике формируются наноразмерные проводящие нити (филаменты) диаметром порядка 30–50 нм. Для получения в них бистабильных центров с контролируруемыми параметрами следует выбирать режимы электроформовки таким образом, чтобы с одной стороны достичь высокой концентрации ловушечных состояний (порядка  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>), а с другой обеспечить их переключение из одного энергетического состояния в другое при достижении пороговой величины плотности тока. Это может быть достигнуто путем первоначального разогрева материала в филаментах до высокой температуры и последующего остывания в условиях низкой теплоотдачи, что обеспечивается, например, низкой величиной коэффициента теплопроводности оксида гафния. При этом формируется метастабильная структура (стеклообразное вещество) в проводящих каналах (филаментах), которая и функционирует как переключатель при взаимодействии с электронами проводимости. Эти электроны возбуждают метастабильные центры и переводят их в другое энергетическое состояние. Механизм перехода с одного в другое энергетическое состояние ловушек всей системы достигается за счет синхронизации при наличии шума, который является тем компонентом, за счет которого осуществляется стохастическая синхронизация. При снятии внешнего напряжения система возвращается в исходное состояние с высокой проводимостью.

Для бистабильных состояний взаимодействие с электронами приводит не только к переходу в возбужденное состояние, но и способствует снижению энергии их ионизации вплоть до их делокализации. Также, в данном случае, бистабильные ловушечные состояния могут переходить в верхнее энергетическое состояние, не напрямую взаимодействуя с электронами, а за счет воздействия шума и периодической силы. В качестве периодической силы в данном случае выступает колебательные моды ловушечных центров. Фликер-электроны из-за флуктуаций эмиссии с поверхности катода, взаимодействуя с решеткой филаментов, генерируют шум, который способствует, в данных условиях, переходу системы ловушек в проводящее состояние посредством стохастического резонанса. Здесь возможен переход всей системы ловушек в высокопроводящее состояние за счет эффекта стохастической синхронизации, требующей наличия определенного взаимодействия между ловушками [2]. В данном случае это может быть как кулоновское взаимодействие, так и дипольное.

## МОДЕЛЬ СИНХРОНИЗАЦИИ

Для моделирования синхронизации двух симметрично связанных бистабильных осцилляторов используем систему дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{cases} dx / dt = ax + bx^2 + cx^3 + \gamma(y - x) + A \cos(\Omega t + \phi) + \sqrt{2D}\xi_1(t) \\ dy / dt = (a + \Delta)y + by^2 + cy^3 + \gamma(x - y) + A \cos(\Omega t + \phi) + \sqrt{2D}\xi_2(t) \end{cases}$$

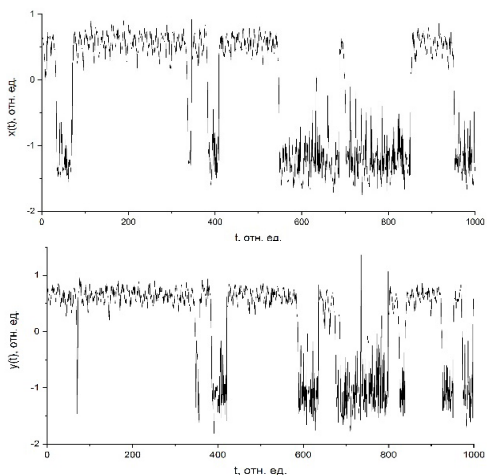
где  $\xi_{1,2}(t)$  – функции, генерирующие белый шум,  $\gamma$  – коэффициент связи,  $x, y$  – обобщенная координата ловушечного состояния, характеризующая тип его потенциальной энергии,  $a, b, c$  – параметры бистабильного ловушечного центра, описывающие вид потенциальной энергии,  $A, \Omega, \varphi$  – амплитуда, частота и фаза колебаний ловушечного центра,  $D$  – интенсивность шума,  $\Delta$  – параметр расстройки частоты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

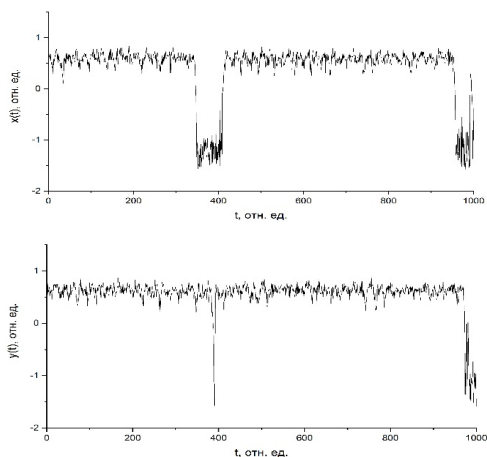
Моделирование электронного переключения бистабильных ловушечных состояний проводили на примере диоксида гафния: энергия термической ионизации ловушек 0,5 эВ, частота колебаний 10–12 ГГц, концентрация ловушек  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , интенсивность шума – 0,08–0,15.

При увеличении амплитуды воздействия шума до  $D = 0.2$  – возникают переходы между бистабильными состояниями, а также появляется синхронизация между бистабильными центрами (см. рисунок 1). Даже при увеличенном параметре расстройки частоты ( $D=0.2, \Delta=0.3$ ), появляются бистабильные состояния и происходит синхронизация двух симметрично связанных бистабильных осцилляторов.

При уменьшении частоты внешнего воздействия синхронизация остается, но переходы между бистабильными состояниями происходят реже (см. рисунок 2).

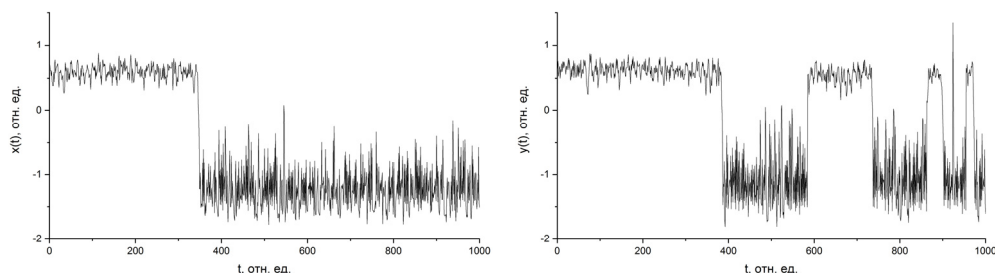


**Рисунок 1. – Переключение между бистабильными состояниями и синхронизация между центрами  $x$  и  $y$ .**  
 $A = 0,2; \Delta = 0,2; D = 0,2; \Omega = 0,5;$   
 $\varphi = 0; \gamma = 0,05; a = 1, b = -1, c = -1$



**Рисунок 2. – Переключение между бистабильными состояниями и синхронизация между центрами  $x$  и  $y$ .**  
 $A = 0,1; \Delta = 0,1; D = 0,2; \Omega = 0,3;$   
 $\varphi = 0; \gamma = 0,05; a = 1, b = -1, c = -1$

При уменьшении амплитуды внешней силы ( $A = 0,1$ ) и ( $D = 0,2, \Delta = 0,1$ ) через некоторое время происходит нарушение синхронизации. При этом у первого осциллятора перестают переключаться бистабильные состояния, а у второго осциллятора наоборот происходят переключения (см. рисунок 3).



**Рисунок 3. – Переключение между бистабильными состояниями и синхронизация между центрами  $x$  и  $y$ .**

$A = 0,1; \Delta = 0,1; D = 0,2; \Omega = 0,5; \varphi = 0; \gamma = 0,05; a = 1, b = -1, c = -1$

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Показано, что воздействие шума стимулирует переключение бистабильных ловушечных состояний в диоксиде гафния в составе элемента RRAM из одного бистабильного состояния в другое за время порядка нескольких наносекунд. С увеличением интенсивности шума растет разброс значений выходного сигнала, происходит переключение и образуются метастабильные состояния. С увеличением амплитуды периодического воздействия частота переключений из одного состояния в другое растет. С ростом частоты периодического воздействия увеличивается частота переключений, а с увеличением фазы увеличивается время нахождения ловушечного центра в метастабильном состоянии. При этом происходит стохастическая синхронизация двух ловушечных состояний.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки элементов резистивной памяти с высоким быстродействием.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ**

1. Zahoor, F. Resistive Random Access Memory (RRAM): an Overview of Materials, Switching Mechanism, Performance, Multilevel Cell (mlc) Storage, Modeling, and Applications / F. Zahoor, T.Z. Azni Zulkifli, F.A. Khanday // *Nanoscale Res Lett.* – 2020. – V.15, № 90. – P. 1–26.
2. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка / В.С. Анищенко [и др.] // *УФН.* – 1999. – Т.169, № 1. – С. 7–38.