

УДК 621.382

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ НА ЭФФЕКТЕ ТУННЕЛЬНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

А.И. КОСТРОВ, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ, Т.Н. РОДИНА, А.Л. ДАНИЛЮК, В.Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 3 декабря 2009*

Разработана электрическая модель ячейки памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления (МОЗУ — магниторезистивное оперативное запоминающее устройство) в интегральном исполнении на кремнии. Приведены электрические эквивалентные схемы и топологическое исполнение ячейки памяти на основе магнитных туннельных переходов (МТП), которые включают наноструктуры ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник. Модель описана на языке Verilog-AMS для схемотехнического моделирования устройств спинтроники в системах автоматизированного проектирования интегральных микросхем и систем-на-кристалле. Приведены экспериментальные данные и результаты тестирования модели в системе сквозного проектирования Cadence Design System.

*Ключевые слова:* магниторезистивная память, спинтроника, магнитный туннельный переход, электрическая модель, эквивалентная схема, Verilog-AMS.

### Введение

Исследование магниторезистивных структур ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник как энергонезависимых элементов для хранения информации привело к значительным успехам в области разработки и проектирования интегрированных элементов памяти. Магниторезистивная энергонезависимая память (далее — МОЗУ) является перспективной технологией, обладающей всеми необходимыми преимуществами для того, чтобы стать универсальной, и имеет ряд уникальных особенностей, открывающих широкие рыночные перспективы. Основные свойства магниторезистивной памяти: энергонезависимость, произвольный доступ, высокое число циклов перезаписи (более  $10^{16}$ ), радиационная стойкость, скорость чтения/записи соизмерима с оперативными запоминающими устройствами (порядка  $10^8$  с<sup>-1</sup>), время хранения данных — более 10 лет, низкие плотности токов переключения [1].

Существует несколько различных конструкций магниторезистивной памяти, которые можно условно разделить на три поколения. Они различаются внутренней структурой и организацией режима записи: переключение магнитным полем, переключение спинполяризованным током, температурно-индуцированное переключение. Несмотря на конструкторско-технологические отличия, в основе всех МОЗУ лежит магнитный туннельный переход МТП. Каждое решение характеризуется своими недостатками и преимуществами, но основным критерием является возможность серийного производства, так как МОЗУ обладает всеми характеристиками для того, чтобы заменить существующие на рынке типы полупроводниковой памяти (статическая, динамическая, flash). В настоящее время активно ведутся работы по моделированию и проектированию магниторезистивной памяти третьего поколения на основе структур ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник, которые являются наиболее перспективными для производства по технологическим нормам менее 90 нм [2].

Схемотехническое моделирование магнитных и спинтронных цифровых устройств сдерживается отсутствием точных и адекватных электрических моделей магнитных структур,

пригодных для использования в современных комплексах проектирования интегральных микросхем (ИМС) и систем-на-кристалле.

В работе описана электрическая модель ячейки памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления с использованием аналитической физической модели для спиновых компонент тока через магнитный туннельный переход.

Для проведения расчетов и программной реализации разработанной модели использовался язык смешанного поведенческого моделирования Verilog-AMS (Analog-Mixed Signal), поддерживаемый комплексами схемотехнического проектирования мировых лидеров в области САПР (Cadence, Mentor Graphics, Synopsys). Возможности Verilog-AMS позволяют описать эквивалентную схему с помощью зарезервированных директив для последующего расчета мгновенных значений токов в ветвях и напряжений в узлах эквивалентной схемы. Компоненты эквивалентной схемы (источники тока, управляемые напряжением, резисторы, конденсаторы) могут быть инициализированы как постоянным значением, так и с помощью аналитических выражений, отражающих протекание физических процессов в структуре. Параметры, входящие в аналитические выражения, являются параметрами электрической модели.

Тестовые расчеты и проверка функционирования модели проводились в системе сквозного проектирования Cadence Design Systems на платформе Cadence Virtuoso в программе моделирования Spectre 5.1. Полученные результаты показали достаточную точность и адекватность модели, что позволяет использовать их для схемотехнического проектирования магнитных электронных приборов, таких как МОЗУ, в современных комплексах САПР ИМС.

### **Конструктивные особенности и функционирование запоминающих устройств на спиновых эффектах**

В основе МОЗУ лежит наноструктура, содержащая МТП, которая состоит из диэлектрического слоя оксида алюминия ( $\text{AlO}_x$ ) или магния ( $\text{MgO}$ ) толщиной 1–3 нм, помещенного между двумя ферромагнитными слоями. Каждый из магнитных слоев имеет свое направление намагниченности. Верхний магнитный слой является магнитомягким. Его направление намагниченности может меняться. Магнитный слой основания является магнитотвердым, его направление намагниченности заблокировано и не изменяется. При приложении потенциала к магнитному туннельному переходу в нем возникает ток, который состоит из двух спиновых компонент. В отсутствие рассеяния по спине смешивание их не происходит [3].

Основным параметром МТП, который оказывает существенное влияние на возможность использования его в качестве запоминающего элемента ячейки памяти МОЗУ, является туннельное магнитосопротивление (ТМС), величина которого определяет содержимое ячейки как "0" или "1" при прохождении через структуру тока чтения.

При проектировании магниторезистивной памяти, пригодной для серийного производства, возникает проблема, связанная с высокой чувствительностью к случайному перемагничиванию ячеек. Для улучшения параметров ячейки памяти предложена многослойная структура, в которую введены дополнительные материалы (в частности, искусственный антиферромагнитный слой), уменьшающие вероятность ложного перемагничивания. Однако такая структура ограничивает высокую степень интеграции и совместимость с КМОП технологическим процессом, что является серьезным недостатком.

Эти причины привели к появлению запоминающих устройств на основе квантовых проводников (рис. 1), которые являются наиболее перспективными для производства по технологическим нормам менее 130 нм [4]. В такой ячейке изменяется проводимость между двумя магнитными структурами ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник. Такие ячейки имеют высокую плотность упаковки (размеры порядка  $113 \times 75$  нм), низкие плотности токов переключения ( $10^6$ – $10^7$  А/см<sup>2</sup>), которое осуществляется импульсами тока в шинах записи, возможность интеграции с планарным КМОП технологическим процессом. Переключение ячейки импульсами тока в шинах записи создает магнитное поле на магнитном туннельном переходе эмиттера. Такой механизм предотвращает ошибочное переключение соседних ячеек памяти [5].

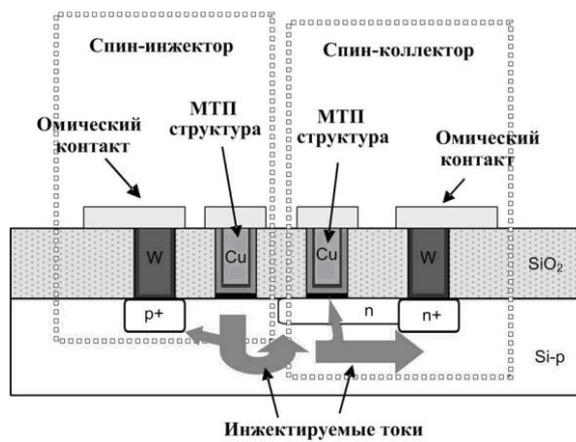


Рис. 1. Ячейка памяти МОЗУ на основе квантовых проводников в интегральном исполнении

### Эквивалентная схема и электрическая модель ячейки памяти

Эквивалентная схема полупроводниковой структуры используется для описания функционирования как отдельного элемента, так и фрагмента ИМС. При этом каждый элемент или фрагмент заменяется соответствующим набором резисторов, конденсаторов, индуктивностей, источников тока и напряжения с известными (из выходных данных физико-топологического моделирования) зависимостями их параметров от напряжения (тока).

Исследуемая ячейка памяти состоит из двух магнитных туннельных переходов, сформированных на кремниевой пластине и разделенных  $p$ - $n$ -переходом. Для построения эквивалентной схемы применен принцип декомпозиции ячейки и последовательной замены ее двумя отдельными МТП-структурами. Были разработаны эквивалентные схемы для каждой структуры ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник в статическом режиме. Для этого использовались модельные зависимости для параметров схемы, аппроксимации поведения искомых функций, а именно: моделирования спин-зависимого туннелирования с учетом зарядки поверхностных состояний, рекомбинации носителей заряда, рассеяния на потенциальном рельефе, реального вида потенциального рельефа [6]. Выражения для источников тока получали из физико-топологических моделей электронной эмиссии с учетом барьера Шоттки в случае невырожденного полупроводника и модели токопереноса на поверхностных состояниях со следующими модификациями: введение факторов неидеальности, сопротивлений для описания омического падения напряжения, параметров масштабирования [7].

Для моделирования работы магнитного туннельного перехода в динамическом режиме статическую эквивалентную схему дополнили электрическими элементами, отражающими реально существующие области в кремниевой пластине и протекающие в них физические процессы. Электрическая эквивалентная схема МТП-структуры для динамического и статического режимов представлена на рис. 2.

Элементы эквивалентной схемы, моделирующие динамические свойства, следующие:  $I_{mj}$  и  $I_{ts}$  — источники тока, управляемые напряжением, моделирующие спин-зависимое туннелирование и туннелирование на поверхностных состояниях соответственно;  $C_i$  — емкость диэлектрика;  $C_D$  — диффузионная емкость полупроводника;  $C_{it}$ ,  $r_{it}$  — емкость и сопротивление, учитывающие поверхностные ловушки в полупроводнике;  $C_s$ ,  $r_s$  — емкость и сопротивление, учитывающие перезарядку поверхностных состояний;  $R_s$  — последовательное омическое сопротивление в области полупроводника.

Исследование разработанной эквивалентной схемы проводилось для структуры CoFe/MgO/Si-n.

Результаты моделирования вольт-амперных характеристик (ВАХ) в статическом режиме для различных значений толщины диэлектрика MgO и их сравнение с экспериментальными данными представлены на рис. 3.

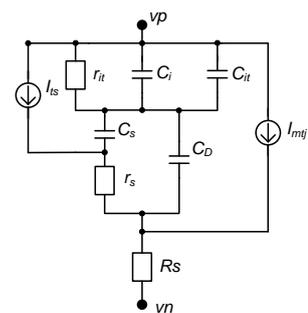


Рис. 2. Эквивалентная схема МТП структуры

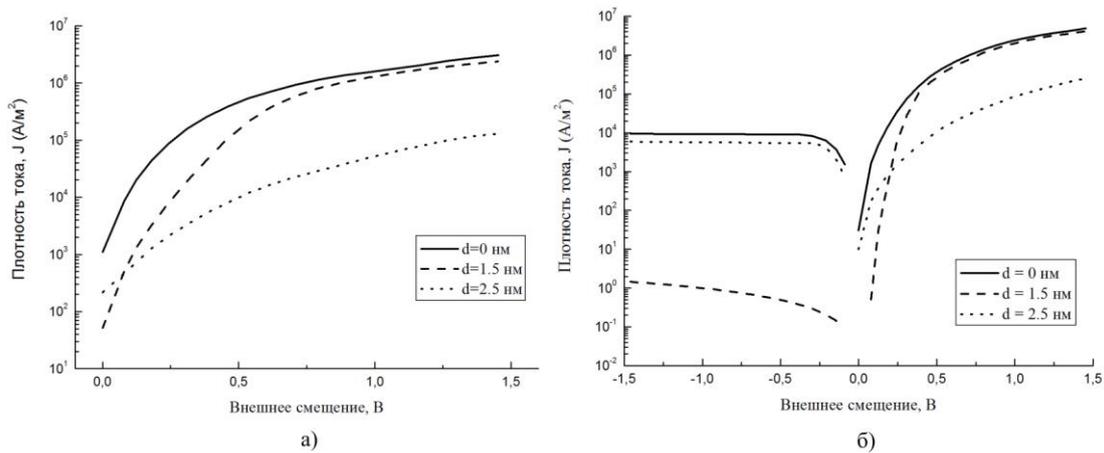


Рис. 3. ВАХ структуры CoFe/MgO/Si-n для толщины MgO 0; 1,5; 2,5 нм:  
 а — результаты моделирования; б — экспериментальные данные.

Моделирование МТП проводилось для трех значений толщины туннельного диэлектрика: 0; 1,5; 2,5 нм. Нулевая толщина соответствует структуре ферромагнетик/полупроводник с барьером Шоттки. Для этого значения также характерна наибольшая величина плотности тока (порядка  $10^6$  А/м<sup>2</sup> при напряжении 1 В). С увеличением толщины диэлектрика плотность туннельного тока понижается и составляет  $10^5$  А/м<sup>2</sup> при напряжении 1 В для  $d=2,5$  нм. Результаты моделирования представлены в логарифмическом масштабе, что позволяет оценить отклонение ВАХ реальной структуры от идеализированной. Отклонение (область насыщения) ВАХ связано с омическим падением напряжения на последовательном сопротивлении полупроводника, моделируемого резистором  $R_s$ .

Из полученных ВАХ следует, что результаты численных расчетов удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным в диапазоне изменения напряжения от 0 до 1,5 В.

Модель МТП-структуры является основой для построения эквивалентной схемы ячейки памяти МОЗУ, которая используется для исследования статических и динамических характеристик. В качестве примера была промоделирована ячейка памяти МОЗУ на основе двух магнитных туннельных переходов  $n$ -МТП и  $p$ -МТП. Разработанная эквивалентная схема для ячейки, сформированной в подложке кремния  $p$ -типа, представлена на рис. 4.

Эквивалентная схема состоит из двух магнитных туннельных переходов  $n$ -МТП и  $p$ -МТП, которые различаются параметрами основных элементов. На схеме диод D1 моделирует  $p$ - $n$ -переход на границе раздела МТП-структур. Эквивалентная схема не учитывает паразитных элементов ячейки, в частности, паразитный  $p$ - $n$ - $p$  транзистор, емкости проводников, влияние подложки. Для определения временных зависимостей токов в ветвях и напряжений в узлах эквивалентной схемы рассматриваемой ячейки памяти она должна быть преобразована на основе законов электротехники и рассчитана путем решения уравнений Кирхгофа. Однако это трудоемкий процесс и сопровождается большим количеством ошибок для сложных схем. В следующем разделе показан новый подход для решения этой проблемы с использованием систем высокоуровневого поведенческого моделирования на примере построения электрической модели.

Тестовые расчеты проводились для ячейки МОЗУ, состоящей из наноструктур CoFe/MgO/Si- $n$ ,  $N=1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> ( $\Phi_S = 4,42$  эВ,  $\Phi_M = 4,8$  эВ,  $\Phi_{SM} = \Phi_S - \Phi_M = -0,38$  эВ) и CoFe/MgO/Si- $p$ ,  $N = 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> ( $\Phi_S = 5,02$  эВ,  $\Phi_M = 4,8$  эВ,  $\Phi_{SM} = \Phi_S - \Phi_M = 0,24$  эВ) при комнатной температуре. Расчетные параметры:  $N$ -концентрация основных носителей полупроводника;  $\Phi_S$ ,  $\Phi_M$  — термодинамические работы выхода полупроводника и металла соответственно.

Рассчитано ТМС ячейки памяти МОЗУ, которое определяется как отношение разности плотностей токов при параллельной и антипараллельной намагниченности ферромагнетиков к плотности тока при параллельной намагниченности. Плотности токов для различных направлений намагниченности ферромагнетиков моделировались изменением сопротивления, представляющим спин-зависимый токоперенос через структуру.

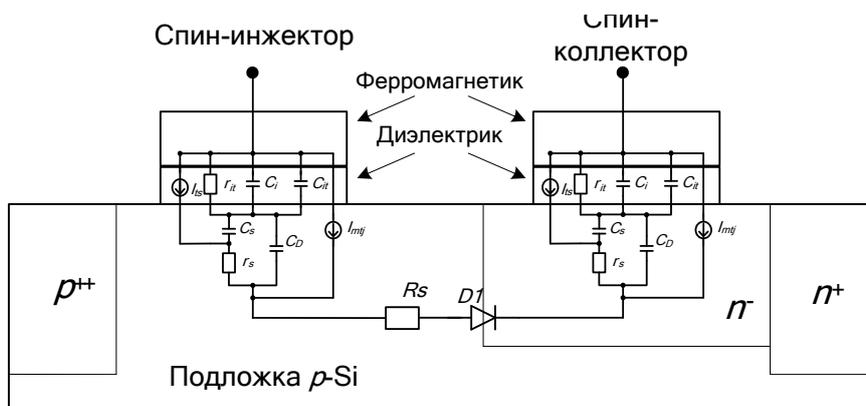


Рис. 4. Эквивалентная схема ячейки памяти МОЗУ на основе МТП структуры.

На рис. 5 показаны ВАХ ячейки памяти для параллельной и антипараллельной намагниченности эмиттера ( $p$ -МТП) и коллектора ( $n$ -МТП) и ТМС ячейки.

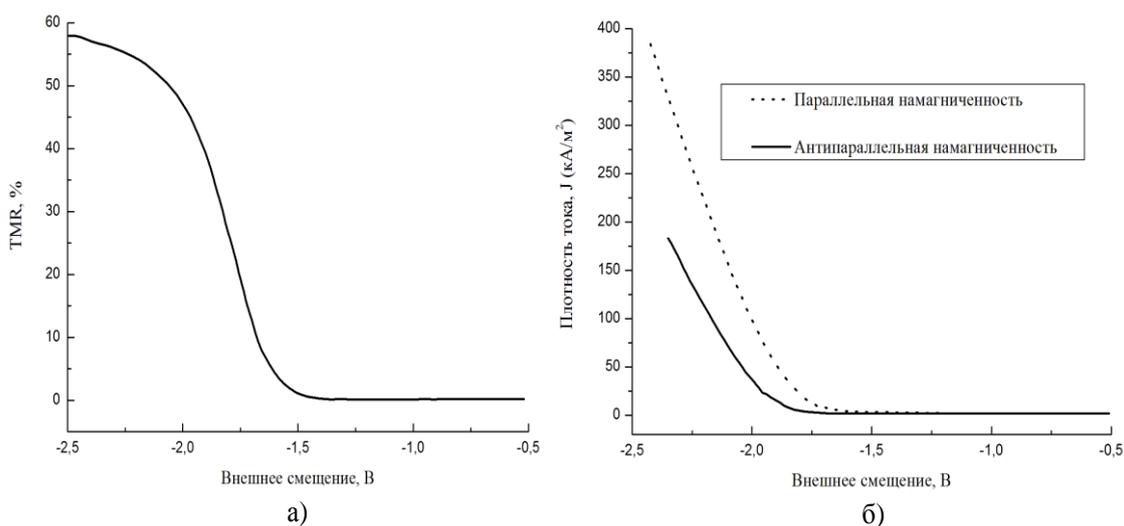


Рис. 5. ВАХ ячейки МОЗУ из  $p$ -МТП эмиттера и  $n$ -МТП коллектора для их параллельной и антипараллельной намагниченности (а); ТМС как функция приложенного напряжения (б)

Как видно из рис. 5, туннельный ток через ячейку памяти начинает протекать при напряжении смещения порядка  $-1,5$  В, что связано с падением напряжения на МТП-структурах и  $p$ - $n$ -переходе. ТМС ячейки памяти увеличивается от 2% до значения 60% при изменении напряжения смещения в диапазоне от  $-1,5$  В до  $-2,5$  В. Величина туннельного магнитосопротивления позволяет сделать вывод о возможности использования такой ячейки в качестве запоминающего элемента, реализованного в интегральном исполнении на кремнии. При напряжении питания памяти 1,8 В ТМС составляет 30%. Характерные величины плотностей токов составляют  $29,16 \cdot 10^3$  А/м<sup>2</sup> и  $20,41 \cdot 10^3$  А/м<sup>2</sup> параллельной и антипараллельной намагниченностей ферромагнетиков соответственно.

Основным динамическим параметром ячейки памяти является среднее время задержки распространения сигнала, которое определяется как среднее арифметическое задержки перехода от низкого уровня входного сигнала к высокому и обратно,  $t_d$ . Это время зависит (в первом приближении без учета топологии и межсоединений разрядных и битовых шин с распределенными параметрами) от длительностей фронтов нарастания и спада, величины внешней нагрузки и от внутренней структуры ячейки. Для данной конструкции ячейки МОЗУ динамические характеристики измерялись для входного прямоугольного импульса с частотой 1 ГГц, длительность фронтов нарастания и спада импульсов  $t_{rise} = t_{fall} = 50$  пс.

Параметры задержки распространения сигнала лежат в пикосекундном диапазоне, что делает возможным использование структуры в качестве ячейки памяти. Рассчитанное время задержки  $t_d$  не превышает 10 пс без учета влияния паразитных составляющих.

На основе топологически связанных компонентов *n*-МТП и *p*-МТП структур разработана электрическая модель ячейки магниторезистивной памяти, учитывающая физические эффекты, происходящие в моделируемой структуре, а также конструктивные особенности областей кремниевой пластины, которые описаны элементами эквивалентной схемы.

Параметры электрической модели ячейки памяти МОЗУ представлены в таблице.

**Параметры электрической модели ячейки памяти МОЗУ**

Параметр	Описание	Значение
AREA	Площадь магнитного туннельного перехода, мкм <sup>2</sup>	1
TEMP	Температура окружающей среды, °С	20
FM	Работа выхода из металла, эВ	4,8 (CoFeB, CoFe)
FS	Работа выхода из полупроводника, эВ	4,42 ( <i>n</i> -Si, $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) 5,04 ( <i>p</i> -Si, $p_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ )
FT	Высота туннельного барьера, эВ	1
D	Толщина диэлектрического слоя, нм	2
N	Коэффициент неидеальности для тока	1,01
RSS	Последовательное сопротивление полупроводника, Ом	10 <sup>3</sup>
CJO	Емкость структуры при нулевом смещении, пФ	1
VJ	Потенциал подложки, В	0,7
FC	Коэффициент, характеризующий напряжение, при котором определена величина барьерной емкости	0,5
M	Показатель степени для диффузионной емкости	0,5
TT	Время пролета носителей через структуру, пс	1
RIT	Сопротивление, учитывающее ловушки на границе раздела диэлектрик/полупроводник, Ом	10 <sup>3</sup>
CIT	Емкость, учитывающая ловушки на границе раздела диэлектрик/полупроводник, пФ	1
RS	Сопротивление, учитывающее поверхностные ловушки в полупроводнике, Ом	1,5·10 <sup>3</sup>
CS	Емкость, учитывающая поверхностные ловушки в полупроводнике, пФ	2

## Заключение

Разработана и программно реализована с использованием языка смешанного поведенческого моделирования Verilog-AMS электрическая модель магнитного туннельного перехода, которая является основой для схемотехнического моделирования ячейки памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления в интегральном исполнении на кремнии в среде современных программных комплексов САПР.

Результаты моделирования ВАХ наноструктур CoFe/Si-*n*, CoFe/MgO/Si-*n* свидетельствуют об адекватности предложенной модели в диапазоне изменения входного напряжения от 0 до 1,5 В. С увеличением толщины диэлектрика плотность туннельного тока понижается и составляет 10<sup>5</sup> А/м<sup>2</sup> при напряжении 1 В для  $d=2,5$  нм.

Моделирование ячейки памяти на основе топологически связанных компонентов *n*-МТП и *p*-МТП (CoFe/MgO/Si-*p* и CoFe/MgO/Si-*n*) показало, что туннельный ток через ячейку памяти начинает протекать при напряжении смещения порядка –1,5 В, что связано с падением напряжения на МТП-структурах и *p-n*-переходе. ТМС ячейки памяти увеличивается от 2% до значения 60% при изменении напряжения смещения в диапазоне от –1,5 В до –2,5 В. При напряжении питания памяти 1,8 В ТМС составляет 30 %.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о возможности использования исследуемой ячейки памяти в качестве запоминающего элемента, реализованного в интегральном исполнении на кремнии.

Авторы выражают благодарность проф. Франсуа Арно Давитая (François Arnaud d'Avitaya), координатору проекта ЕМАС (Strep-No.017412), проф. Хуберту Брюклю (Hubert Bruckl) и сотрудникам лаборатории наносистем и нанотехнологий Австрийского исследовательского центра за предоставленные для сравнения экспериментальные данные и ценные советы при обсуждении полученных результатов.

# THE ELECTRICAL MODEL OF MAGNITORESISTIVE MEMORY CELL

A.I. KOSTROV, V.R. STEMPITSKY, T.N. RODINA, A.L. DANILYUK, V.E. BORISENKO

## Abstract

The electrical model of magnetoresistive memory cell (MRAM — magnetoresistive random-access memory) on silicon technology has been developed. Electrical equivalent circuits and layout performance of the memory cell based on magnetic tunnel junctions (MTJ) which include the ferromagnetic/insulator/semiconductor nanostructures are presented. The model is realized with Verilog-AMS behavioral language for computer simulations of spintronic devices in computer-aided design systems of integrate circuits and systems-on-chips. Experimental data and testing results of the model in Cadence Design System are presented.

## Литература

1. *Gallagher W.J., Parkin S.S.* // IBM J. Res. Develop. 2006. Vol. 50. P. 5–23.
2. *Uhrmann T., Dimopoulos T., Brückl H., et al.* // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103, P. 063709-063709–5.
3. *Sidorova T.N., Danilyuk A.L. et al.* // Proc. of the SPIE. 2009. Vol. 7377. P. 737708-6.
4. *Панфиленок А.С., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 4. С. 89–94.
5. *Sidorova T.N., Danilyuk A.L., d'Avitaya F.A., Lazzari J.-L.* // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. 2009. P. 307–310.
6. *Игнатенко С.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // ЖТФ. 2005. Т. 75, № 6. С. 8–12.
7. *Kostrov A.I., Stempitski V.R., Kazimirchik V.N.* // Proc. of the SPIE. 2009. Vol. 7377. P. 73770P–13.