

Динамическая модель ячейки памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления

А.И. Костров, А.Л. Данилюк, В.Р. Стемпицкий, В.Е. Борисенко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
kostrov@ntlab.com

Аннотация — Разработана динамическая поведенческая модель ячейки спиновой памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления. Модель реализует магнитную гистерезисную и временную характеристики на основе уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта. Применение модели продемонстрировано для элемента памяти MRAM нового поколения в интегральном исполнении на кремнии. Рассчитаны переходные и вольт-амперные характеристики ячейки памяти для различных значений толщины туннельного диэлектрика, показана динамика угла намагниченности свободного ферромагнитного слоя в зависимости от тока, протекающего в шинах записи. Рассчитана величина туннельного магнитосопротивления, задержка переключения состояний ячейки памяти и максимальная рабочая частота.

Ключевые слова — MRAM, Verilog-A, спинтроника, эквивалентная схема, моделирование, модель.

I. ВВЕДЕНИЕ

Структуры спинтроники, такие как магнитные туннельные переходы, магниторезистивные спиновые вентили и триггеры находят все большее применение в датчиках, логических устройствах и элементах памяти с произвольным доступом [1].

Магниторезистивная энергонезависимая память MRAM является перспективной технологией, обладающей необходимыми преимуществами для того, чтобы стать универсальной. Она имеет ряд уникальных особенностей, открывающих широкие рыночные перспективы. Основные свойства MRAM: энергонезависимость, произвольный доступ, число циклов перезаписи – более 10^{15} , радиационная стойкость, скорость чтения/записи 12 нс (для модуля 32 Мбит), время хранения данных – более 10 лет, низкая плотность токов переключения, возможность интеграции с КМОП технологическим процессом [2].

Средства схемотехнического компьютерного проектирования, которые моделируют поведение спинтронных структур в электронных схемах, в настоящее время практически отсутствуют.

Целью работы является разработка электрической эквивалентной схемы и динамической поведенческой

модели на языке схемотехнического проектирования Verilog-A для ячейки спиновой памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления в магнитном туннельном переходе (Magnetic Tunnel Junction – MTJ).

II. КОНСТРУКЦИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЯЧЕЙКИ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ

В основе ячейки спиновой памяти MRAM нового поколения лежит наноструктура, состоящая из p -MTJ и n -MTJ, каждый из которых содержит диэлектрический слой оксида алюминия (AlO_x) или магния (MgO) толщиной 1-3 нм, помещенный между ферромагнитным слоем металла и полупроводником (рис. 1). Один из ферромагнитных слоев может менять направление намагниченности на противоположное. Магнитный слой спин-коллектора (n -MTJ) является магнитомягким. Его направление намагниченности может меняться в зависимости от прикладываемого магнитного поля, создаваемого токами шин записи. Магнитный слой спин-инжектора (p -MTJ) является магнитотвердым, его направление намагниченности не изменяется. При приложении потенциала между эмиттером и коллектором в ячейке возникает ток [3].

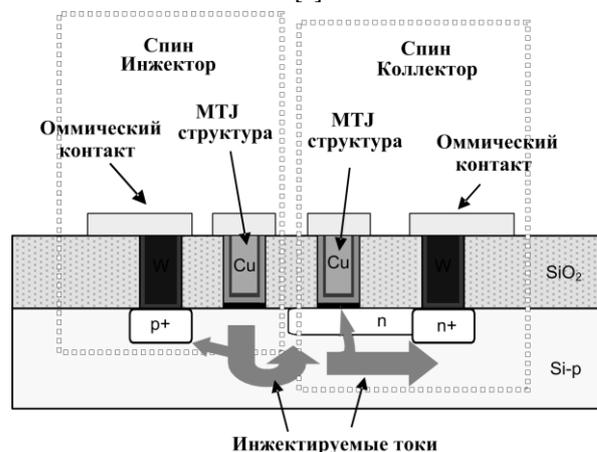


Рис. 1. Конструкция ячейки памяти MRAM в интегральном исполнении

Сопротивление ячейки памяти зависит от относительной ориентации намагниченности ферромагнитных слоев. Его величина минимальна, если слои намагничены в одинаковом направлении и максимальна при антипараллельной намагниченности. Сопротивление описывается функцией разности между углами намагниченности ферромагнитных слоев

$$R = R_{MIN} + \frac{1}{2}(R_{MAX} - R_{MIN})(1 - \cos(\theta_{M1} - \theta_{M2})) \quad (1)$$

где R_{MIN} и R_{MAX} – сопротивления структуры для параллельной и антипараллельной намагниченности соответственно, θ_{M1} и θ_{M2} – углы намагниченностей свободного и закрепленного слоев соответственно относительно магнитного поля, создаваемого током шины записи.

Т.к. в ячейке памяти ферромагнитный (магнитотвердый) слой спин-инжектора является фиксированным и его направление намагниченности не меняется, то угол θ_{M2} равен нулю. Дальнейшие расчеты приводятся для угла намагниченности магнитомягкого ферромагнетика относительно магнитотвердого θ_M .

Основным параметром, обуславливающим возможность использования ячейки в качестве запоминающего элемента, является туннельное магнитосопротивление (TMR). Величина TMR определяет содержимое ячейки как «0» или «1» при прохождении через структуру тока чтения.

В рассматриваемой ячейке памяти MRAM намагниченность свободного слоя задается магнитным полем, создаваемым перпендикулярно расположенными шинами записи: вертикальной (битовой – bit line) и горизонтальной (словарной – word line). Величина поля переключения для свободного слоя выбирается такой, что поле одной шины является недостаточным для изменения намагниченности. Только протекание тока в обеих шинах записи формирует магнитное поле, достаточное для переключения бита, или позволяющее выбрать один бит из большого массива ячеек.

III. ДИНАМИКА НАМАГНИЧЕННОСТИ СВОБОДНОГО СЛОЯ

Динамика намагниченности в наноструктуре с магнитным туннельным переходом описывается уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта [4]

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \mu_0 \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H} + \frac{\alpha}{|\mathbf{M}|} \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \quad (2)$$

где \mathbf{M} – магнитный момент свободного слоя, \mathbf{H} – эффективное внешнее магнитное поле (вектор с тремя направлениями), γ – гиромагнитное отношение, α – постоянная затухания Гильберта для материала слоя, μ_0 – магнитная постоянная.

Для тонких пленок кристаллографическая анизотропия формы устанавливает вектор намагниченности в направлении плоскости пленки и динамическая намагниченность в плоскости может быть определена в виде

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\mu_0 \gamma \left(\alpha + \frac{1}{\alpha} \right) \mathbf{M}' \times (\mathbf{M}' \times \mathbf{H}') \quad (3)$$

где $\mathbf{M}' = (M_x, M_y)$, $\mathbf{H}' = (H_x, H_y)$ – компоненты намагниченности и напряженности внешнего поля в плоскости пленки. Магнитный элемент моделируется как однодоменный. Соответственно модуль вектора становится постоянной величиной $|\mathbf{M}| \equiv M_s$ (M_s – намагниченность насыщения материала слоя), чтобы вектор \vec{M}' полностью описывался его углом θ_M по отношению к оси x . Из уравнения (3) следует зависимость изменения угла θ_M во внешнем магнитном поле:

$$\frac{d\theta_M}{dt} = \mu_0 \gamma \left(\alpha + \frac{1}{\alpha} \right) (H_y \cos \theta_M - H_x \sin \theta_M) \quad (4)$$

Приведем полученное выражение к эквивалентному виду, равному сумме моментов, действующих на магнитный элемент (точнее, момент на единицу объема).

$$0 = \mu_0 M_s (H_y \cos \theta_M - H_x \sin \theta_M) - \frac{M_s}{\gamma(\alpha + 1/\alpha)} \frac{d\theta_M}{dt} \quad (5)$$

В выражении (5) два первых члена определяют момент, обусловленный внешним магнитным полем H_x и H_y , формируемым протекающим током в словарной и битовой шинах. В работе предложена упрощенная модель для определения поля, формируемого шинами записи, которое пропорционально плотности тока в шине. Третий член определяет демпфирующий (успокаивающий) момент. В тонкопленочных структурах сильные размагничивающие поля ограничивают направление намагниченности в плоскости пленки. В тонких пленках направление магнитного момента полностью описывается его углом в плоскости θ_M и динамическая характеристика ослабляет эффективный момент успокоения пропорционально скорости вращения намагниченности.

Для ферромагнитных пленок одноосная анизотропия удерживает намагниченность в одном из двух противоположных направлений, что обусловлено кристаллической структурой и формой пленки. Анизотропия порождает вращающий (крутящий) момент, который зависит от угла между магнитным моментом θ_M и осью легкого намагничивания, такой, что момент равен нулю, когда намагниченность параллельна или антипараллельна оси легкого намагничивания. Ее вклад моделируется дополнительным моментом, который стремится повернуть намагниченность в направлении легкой оси (положительное или отрицательное направление оси x).

$$T_{anis} = -K_u \sin(2\theta_M) \quad (6)$$

где K_u – сила одноосной анизотропии. Выражение для баланса между моментами имеет вид [5]

$$0 = \mu_0 M_S (H_y \cos \theta_M - H_x \sin \theta_M) - K_u \sin(2\theta_M) - \frac{M_S}{\gamma(\alpha + 1/\alpha)} \frac{d\theta_M}{dt} \quad (7)$$

Первые три члена описывают поведение статическом режиме однодоменной частицы, четвертый член определяет динамическую или переходную характеристику.

Физическая модель, основанная на уравнении (7), описывает полную двумерную гистерезисную характеристику переключения и динамику намагниченности однодоменной тонкопленочной MTJ-структуры с одноосной анизотропией.

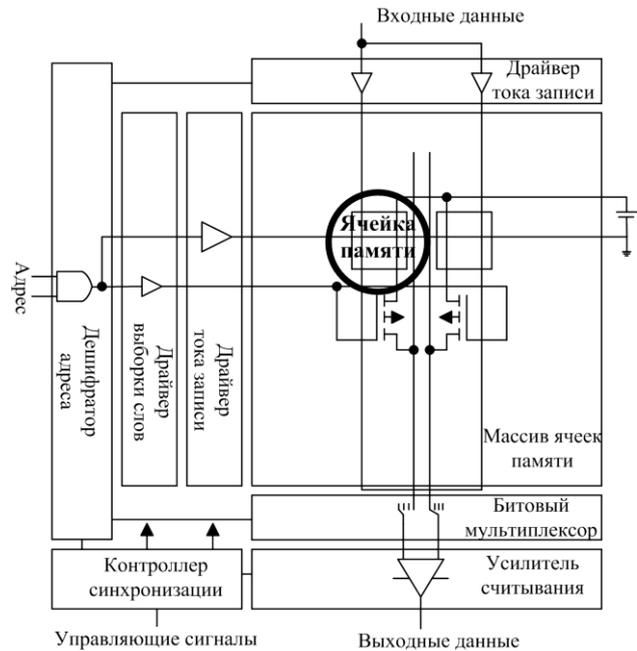
IV. РАЗРАБОТКА VERILOG-A МОДЕЛИ

Предложена структурная схема блока энергонезависимой магниторезистивной памяти с произвольным адресным доступом (MRAM) и архитектурой 2D-M (2 Dimensional Modified). Она подразумевает использование двух координатных входных линий для выбора ячейки из запоминающего массива и одну выходную шину данных. Выход каждой ячейки памяти связан с n -МОП транзистором строчной выборки. На рис. 2 представлены структурная схема блока MRAM и отдельной ячейки памяти.

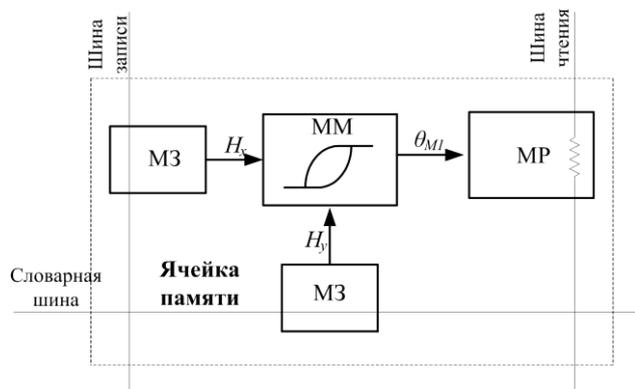
Разработана динамическая модель ячейки памяти, структурная схема которой состоит из трех модулей, показанных на рис. 2, б. Модуль записи (МЗ) определяет напряженность магнитного поля в зависимости от протекающего в шине тока. Магнитный модуль (ММ) моделирует изменение направления намагниченности свободного слоя в зависимости от магнитного поля, создаваемого током шины записи. Результатом работы модуля является определение угла намагниченности магнитомягкого ферромагнетика относительно магнитотвердого. Магниторезистивный модуль (МР) формирует выходную электрическую характеристику, исходя из направления намагниченности свободного ферромагнитного слоя.

Разработана электрическая эквивалентная схема магниторезистивного модуля для построения поведенческой динамической модели, описывающая спин-зависимое туннелирование, туннелирования на поверхностных состояниях и ловушках (рис. 3).

Эквивалентная схема включает два магнитных туннельных перехода n -MTJ и p -MTJ, диод D1 моделирует p - n -переход на границе раздела MTJ структур. Паразитные эффекты ячейки памяти включены в элементы эквивалентной схемы.



а)



б)

Рис. 2. Структурная схема блока памяти MRAM (а) и отдельной запоминающей ячейки (б)

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. Для решения этой проблемы при построения электрической модели предложен подход, основанный на использовании систем высокоуровневого поведенческого моделирования цифро-аналоговых систем Verilog-A/AHDL и Verilog-AMS/VHDL-AMS, позволяющие учитывать физические характеристики приборов.

Для реализации модели выбран программный язык поведенческого описания Verilog-A. Динамическое поведение ячейки памяти MRAM с использованием инструментария Verilog-A моделируется директивой sig_flow_H с функцией доступа H в единицах А/м для

задания компонент внешнего магнитного поля. Угол намагниченности свободного слоя представляется директивой *rotational*, определенной в стандартной библиотеке *disciplines.vams* языка Verilog-A. Это позволяет легко встраивать модуль ячейки памяти в SPICE-подобные программы схемотехнического моделирования. Для построения модели выбран иерархический подход декомпозиции полной схемы и последовательной замены небольших схемных фрагментов их поведенческими описаниями, которые затем объединяются в головном модуле с названием *mram_all*.

Для модуля шины записи (МЗ) в предложенной модели вычисляется напряженность внешнего магнитного поля, создаваемого протекающим в шине током в предположении, что шина является тонким проводником

$$H \sim j_s / 2, \quad (8)$$

где j_s – плотность тока, протекающего в шине.

В описании Verilog-A поле H определяется следующими выражениями: $V(vp,vn) <+ Rl * I(vp,vn)$; $H(hwwrite) <+ I(vp,vn)/(2 * W)$, где параметры W и Rl – ширина и сопротивление шины записи соответственно.

В модели ячейки памяти используются два модуля записи для задания вектора намагниченности в декартовой системе координат, один для битовой шины записи – задает компоненту H_x , второй для словарной шины записи – задает компоненту H_y .

Магнитный модуль (ММ) описывает поведение свободного слоя при воздействии на него компонент H_x и H_y магнитного поля, создаваемого протекающим в шинах записи токами. Эти поля определяются директивой *sig_flow_H*. Угол намагниченности представлен директивой *rotational* с использованием функций *Thea(M)* и *Tau(M)*.

Расчетная часть ММ построена с использованием выражения (5). В модуле используются следующие физические параметры: M_s – намагниченность насы-

щения, K_u – константа одноосной анизотропии, α – коэффициент затухания.

Магниторезистивный модуль (МР) моделирует эффект туннельного магнитосопротивления. Модуль определяет сопротивление ячейки памяти как функцию угла намагниченности магнитомягкого ферромагнетика относительно магнитотвердого. Учет зависимости сопротивления ячейки от приложенного напряжения к шине чтения реализован посредством выражения [6]

$$R(V) = R(0) \left(1 + \frac{d^2 \cdot e^2 \cdot m}{4 \cdot \hbar^2 \cdot \bar{\phi}} \cdot V^2 \right)^{-1}, \quad (9)$$

где $R(0)$ – сопротивление при нулевом смещении; d – толщина диэлектрика; $\bar{\phi}$ – высота туннельного барьера; e – заряд электрона; m – масса электрона; \hbar – редуцированная постоянная Планка.

Значения тока чтения через ячейку памяти определяются на основе расчета параметров эквивалентной схемы (рис. 3).

В данной работе рассматривается структура, состоящая из двух магнитных туннельных переходов (p -MTJ и n -MTJ), сформированных в подложке кремния p -типа. Детально параметры эквивалентной схемы рассмотрен в работах [7].

Тестовые расчеты вольт-амперных (ВАХ), динамических и частотных характеристик предложенной модели проводились для ячейки MRAM, содержащей наноструктуры $\text{CoFe/MgO/Si-}n$, $N=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($\Phi_s=4.42 \text{ эВ}$, $\Phi_M=4.8 \text{ эВ}$, $\Phi_{SM}=-0.38 \text{ эВ}$) и $\text{CoFe/MgO/Si-}p$, $N=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($\Phi_s = 5.02 \text{ эВ}$, $\Phi_M = 4.8 \text{ эВ}$, $\Phi_{SM}=0.24 \text{ эВ}$) при комнатной температуре. Расчетные параметры: N – концентрация основных носителей полупроводника; Φ_s , Φ_M – работы выхода полупроводника и металла соответственно. Для расчетов использовалась программа схемотехнического моделирования Spectre, входящая в состав системы проектирования Cadence.

Динамическая модель ячейки памяти MRAM содержит 24 параметра, из них 3 топологические.

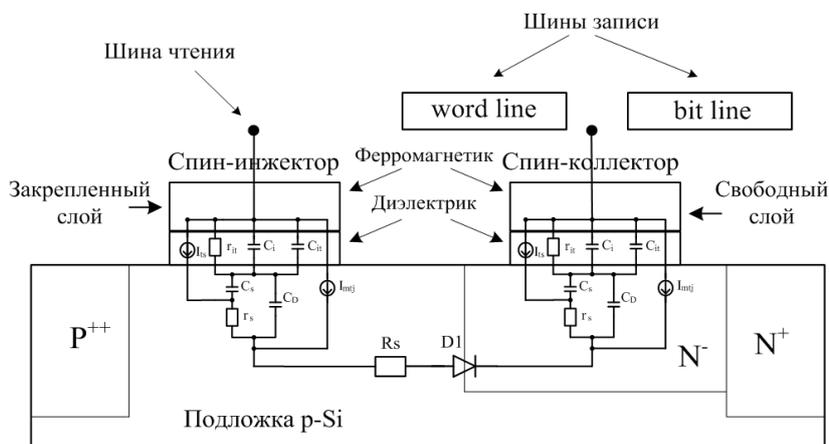


Рис. 3. Электрическая эквивалентная схема ячейки памяти

V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования переходных процессов исследуемой ячейки памяти MRAM представлены на рис. 4. Последовательности токовых импульсов, приложенных к битовой и словарной шинам записи, показаны на верхних графиках. На нижнем графике показано изменение выходного напряжения ячейки в шине чтения в зависимости от входных токов шин записи.

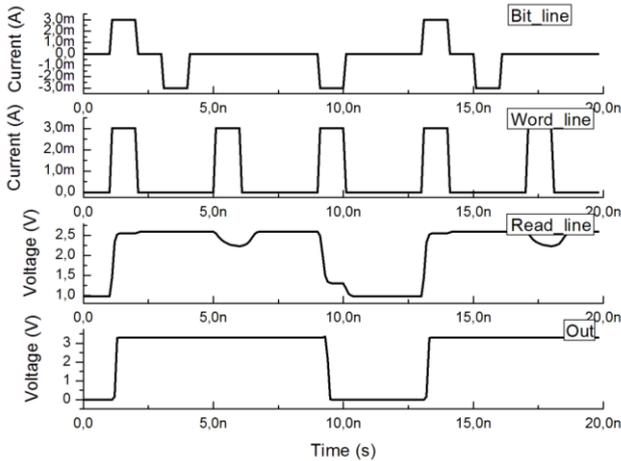


Рис. 4. Результаты моделирования записи информации в ячейку памяти MRAM токами, протекающими в битовой и словарной шинах

Последовательность управляющих импульсов следующая: первый положительный токовый импульс с амплитудой 3 мА, превышающий порог переключения ячейки, приложен к битовой шине (одновременно с положительным импульсом 3 мА словарной шины) для переключения свободного слоя из начального низкого сопротивления (угол между намагниченностями ферромагнитных слоев 0°) в состояние высокого сопротивления (угол = 180°).

Второй (отрицательный) импульс битовой шины меньшей амплитуды (-3 мА) не приводит изменению выходного напряжения, так как плотность тока не достигает порогового значения. Третий токовый импульс, приложенный к словарной шине, также недостаточен для переключения. Его результатом является небольшое временное изменение намагниченности и как результат малое изменение сопротивления на время длительности импульса. Четвертая комбинация противоположных импульсов на словарной и битовой шинах приводят к развороту намагниченности на 180° . В результате ячейка памяти переключается в исходное состояние с низким сопротивлением.

На рис. 5. показана динамика изменения угла намагниченности θ_M магнитомягкого ферромагнетика относительно магнитотвердого при протекании токов в шинах записи.

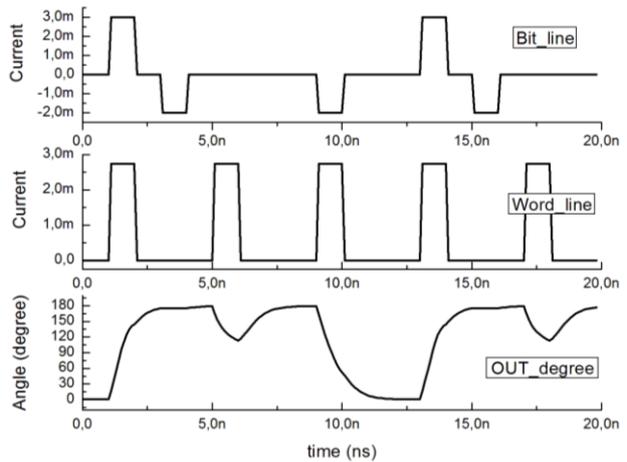


Рис. 5. Изменение угла вектора намагниченности при протекании токов в шинах записи

Показанная последовательность входных импульсов, приложенных к шинам записи, иллюстрирует адресацию к ячейке памяти в составе запоминающего массива. Импульс битовой шины выбирает в массиве столбец ячеек, импульс словарной шины – строку. Выбранной является ячейка памяти, находящаяся на пересечении словарной и битовой шин, т.е. при одновременном прохождении через нее токов записи.

При протекании в шинах записи токов противоположной полярности ячейка переключается из значения «0» в «1». Совпадающие токовые импульсы переключают ячейку из «1» в «0».

Второй и третий одиночные импульсы могут использоваться для выбора других ячеек, расположенных на соответствующих битовой и словарной шинах. Протекание тока в них не вызывает переключения состояний рассматриваемой ячейки, как показано на рис. 4, 5.

В результате проведенных расчетов установлено, что для осуществления переключения ячейки MRAM необходимы значения токов, протекающих в шинах записи, порядка 2- 3 мА.

Основным динамическим параметром ячейки памяти является среднее время задержки распространения сигнала, t_D . Это время зависит (в первом приближении без учета топологии и межсоединений словарных и битовых шин с распределенными параметрами) от длительностей фронтов нарастания и спада, величины внешней нагрузки, времени изменения намагниченности ферромагнетиков и от внутренней структуры ячейки. Динамические характеристики представленной конструкции ячейки MRAM измерялись для входного прямоугольного импульса с частотой 200 МГц и длительностью фронтов нарастания и спада импульсов $t_{rise} = t_{fall} = 50$ пс.

Задержка перехода из низкого уровня выходного сигнала к высокому (t_{LH}) составляет 369 пс, из высокого к низкому (t_{HL}) – 288 пс. Среднее время распростране-

ния сигнала $t_D = (t_{LH} + t_{HL})/2 = 329$ пс. Рассчитанная задержка распространения сигнала через ячейку памяти позволяет ожидать корректную работоспособность на частоте порядка 2 ГГц.

На рис. 6 показаны ВАХ ячейки памяти для трех значений толщины туннельного диэлектрика – 0.5, 1.5, 2 нм, полученные в результате экспериментальных измерений и моделирования. Как видно, результаты моделирования достаточно точно соответствуют экспериментальным данным. Из графика можно определить ожидаемую величину тока чтения в рабочем режиме при изменении толщины диэлектрика. Для рабочего напряжения 3.3 В ток чтения составляет 1.05, 0.85, 0.4 мА для соответствующих толщин MgO.

На рис. 7 показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ячейки памяти, рассчитанная для пяти значений толщины туннельного диэлектрика – 1, 1.5, 2, 2.5, 3 нм.

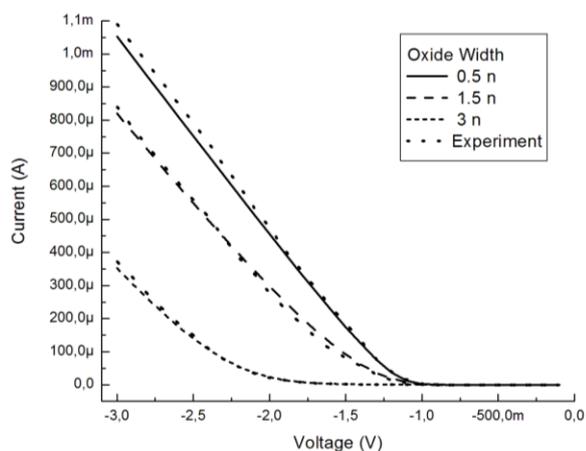


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования ВАХ ячейки памяти с экспериментальными данными

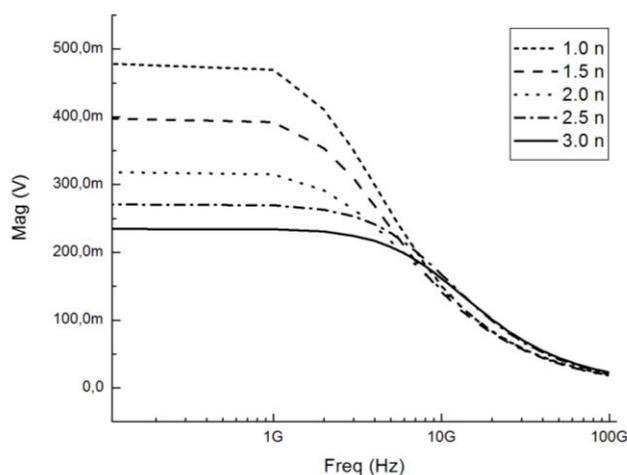


Рис. 7. АЧХ ячейки памяти для различных значений толщины туннельного диэлектрика (0.5, 1.5, 2, 3 нм)

АЧХ позволяет определить амплитуду выходного сигнала и максимальную рабочую частоту. Установлено, что для толщины диэлектрика 1 нм амплитуда составляет 486 мВ, максимальная частота 1.73 ГГц. Для толщины диэлектрика 3 нм амплитуда составляет 245 мВ, максимальная частота 3.25 ГГц.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана динамическая модель ячейки магнито-резистивной памяти на основе магнитного туннельного перехода. Для проектирования использовался язык схемотехнического поведенческого описания Verilog-A, входящий в состав коммерческих SPICE-подобных программ для проектирования ИМС.

В модели реализовано поведение свободного слоя ячейки памяти при воздействии на него компонент магнитного поля, создаваемого протекающими токами в шинах записи.

Показано, что для переключения ячейки памяти необходимы значения токов записи порядка 2-3 мА. Рассчитанные задержки переключения моделируемой ячейки определяют работоспособность на частоте до 3 ГГц. Для рабочего напряжения 3.3 В ток чтения составляет 1.05, 0.85, 0.4 мА для соответствующих толщин диэлектрика 0.5, 1.5, 2 нм.

Разработанная модель позволит проводить анализ и проектирование спинтронных и гибридных устройств, совместимых с КМОП технологическим процессом, с использованием систем компьютерного проектирования интегральных микросхем.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chappert C., Fert A. The emergence of spin electronics in data storage // *Nature Materials*. 2007. Vol. 6, P. 813-823.
- [2] Nebashi R., Sakimura N., Honjo H., et al. A 90nm 12ns 32Mb 2T1MTJ MRAM // *ISSCC Dig. Tech. Papers*. 2009. P. 462-463.
- [3] Kostrov A.I., Stempitski V.R., Kazimirchik V.N. Simulation of magnetic tunnel junction in ferromagnetic/insulator/semiconductor structure // *Proceedings of the SPIE*. 2009. Vol. 7377. P. 73770P-13.
- [4] Landau L., Lifshitz E. Theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies // *Phys. Z. Sowjetunion*. 1935. Vol. 8. P. 153.
- [5] Kohn R.V. and Slastikov V.V. Effective dynamics for ferromagnetic thin films: a rigorous justification // *Proceedings of the Royal Society A*. 2005. Vol. 461. P. 143-154.
- [6] Zhao W., Belhaire E., Mistral Q., Chappert C., Javerliac V., Dieny B., Nicolle E. Macro-model of Spin-Transfer Torque based Magnetic Tunnel Junction device for hybrid Magnetic-CMOS design // *Proceedings of IEEE International Behavioral Modeling and Simulation Workshop*. 2006. P. 40-43.
- [7] Костров А.И., Стемпицкий В.Р., Родина Т.Н., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. Электрическая модель ячейки памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления // *Доклады БГУИР*. 2010. No.2 (48). С. 23-29.