

Программный пакет для приборно-технологического моделирования спинтронных приборов на основе магнитных туннельных переходов

И.А. Горячев¹, Г.Д. Демин^{1,3}, К.А. Звездин^{1,6}, Е. Зипунова¹, А.В. Иванов^{1,5}, И.М. Искандарова^{1,2},
А.А. Книжник^{1,2}, В.Д. Левченко^{1,5}, А.Ф. Попков^{3,4}, Б.В. Потапкин^{1,3}, С.В. Соловьев^{1,3}

¹ООО «КинтехЛаб», knizhnik@kintechlab.com

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

³НИУ «МИЭТ»

⁴Московский физико-технический институт (МФТИ)

⁵ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

⁶ФГБУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Аннотация — В работе представлено описание программного пакета для приборно-технологического моделирования спинтронных приборов на основе магнитных туннельных переходов. Приведены примеры применения данного программного пакета для решения основных проблем при проектировании элементов магниторезистивной памяти на эффекте переноса спина.

Ключевые слова — спинтроника, магнитная память, приборно-технологическое моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Спинтроника, являясь одним из перспективных направлений развития микроэлектроники, позволяет использовать магнитные степени свободы локализованных и транспортных электронов для создания новых функциональных микроэлектронных приборов. Важными вехами в развитии спинтроники являются открытие гигантского магниторезистивного эффекта в 1988 г. [1] и туннельного магнетосопротивления (tunneling magnetoresistance, TMR) в 1996 г. [2]. Эти открытия были успешно использованы для разработки считывающих головок жестких дисков с увеличенной плотностью записи [3]. Приборы магнитной памяти с произвольным доступом (MRAM) являются другим перспективным применением этих открытий. Эти приборы обеспечивают энергонезависимое хранение данных с энергией и временем чтения/записи, сравнимыми и превосходящими таковые для полупроводниковых оперативных устройств, при практически неограниченном числе циклов, что делает их перспективными кандидатами на универсальную энергонезависимую память [4]. Эти свойства приборов MRAM уже сейчас обеспечивают их успешное применение в качестве модулей памяти в широком диапазоне электронных устройств [5, 6, 7].

Для разработки новых спинтронных приборов необходимо иметь программные инструменты для моделирования характеристик таких приборов в зависимости от параметров прибора и свойств магнитных материалов. Однако, имеющиеся программные инструменты для приборно-технологического моделирования микроэлектронных устройств таких производителей как Synopsys [8], Silvaco [9], Cogenda [10] и т.п. не имеют методов и моделей для расчета динамики намагничивания в спинтронных приборах. С другой стороны, существует набор пакетов для моделирования спинтронных устройств (продукты компаний MagOasis [11], GoParallel [12] и т.п.), имеющих универсальные 3D решатели для микромагнитной задачи, но не умеющие рассчитывать распределения тепловых и механических полей, которые оказывают сильное влияние на характеристики спинтронного прибора и его работоспособность. Таким образом, ни один из указанных выше продуктов не обладает полной функциональностью, необходимой для приборно-технологического моделирования спинтронных устройств с учетом взаимодействия магнитных, тепловых и механических полей. Представленный в данной работе программный пакет принципиально отличается тем, что в основу закладывается необходимость проведения мультифизических и многоуровневых расчетов для спинтронных устройств.

II. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СПИНТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Базовым элементом рассматриваемых спинтронных приборов является магнитная ячейка, которая содержит один магнитный туннельный переход (МТП). МТП является многослойной наноструктурой, в которой два ферромагнитных (ФМ)

слоя разделены тонким (~ 1 нм) изолирующим слоем. Электрическая проводимость МТП определяется электронным туннелированием через изолирующий слой. Ключевым свойством МТП является зависимость электрического сопротивления от взаимной ориентации векторов намагничивания ФМ слоев. В частности, для антипараллельной ориентации векторов намагничивания сопротивление больше, чем для параллельной ориентации. TMR определяется как относительная разница сопротивлений антипараллельной и параллельной ориентаций векторов намагничивания. Недавно для туннельных барьеров на кристаллических MgO [13] были получены высокие значения TMR, превышающие 200% при комнатной температуре. Таким образом, при помощи TMR можно достаточно точно определить состояние намагниченности в МТП и использовать его для считывания информации. Ориентацию намагниченности в ФМ слоях МТП можно контролировать внешним магнитным полем (FI (field induced)) либо током через переход благодаря эффекту переноса спинового момента (STT (spin-transfer torque)) [14]. В последнее время изучаются также альтернативные варианты управления состоянием намагничивания, основанные на зависимости вертикальной анизотропии тонкого магнитного слоя от напряжения на МТП, эффекте продольного спин-орбитального переключения спинов и на магнитоэлектрическом эффекте в мультиферроидных структурах.

Чтобы обеспечить стабильность намагниченности ФМ слоя, энергетический барьер для предотвращения ее спонтанного переключения из-за тепловых флуктуаций должен быть достаточно высоким. Величина барьера для переключения намагниченности определяется магнитной анизотропией, которая может быть обусловлена формой функциональных слоев (используется эллиптическая форма для стабилизации ориентации намагниченности вдоль длинной оси эллипса), магнитной анизотропией ФМ материала или поверхностной магнитной анизотропией на интерфейсе между слоями. Для повышения стабильности намагниченности в ФМ слоях (надежность хранения данных) необходимо увеличивать магнитную анизотропию в системе, однако, это неизбежно повышает полевые и токовые пороги переключения намагниченности при записи информации.

Для решения этой проблемы была предложена концепция термоассистированного переключения (thermally assisted switching, TAS): уменьшение энергетического барьера за счет разогрева [15]. Существует два метода реализации TAS для преодоления проблемы масштабирования энергонезависимых магнитных элементов, а именно, термоассистированная полевая запись [16, 17] и термоассистированный перенос спинового вращательного момента [18, 19]. Термический разогрев

решает проблему уменьшения энергетического барьера в обоих случаях.

В концепции TAS-MRAM направления намагниченности слоя записи закреплены обменным взаимодействием на интерфейсе «ферромагнетик / антиферромагнетик», а термический разогрев используется в процессе записи, чтобы увеличить температуру выше температуры Нееля антиферромагнетика, для того чтобы отпустить намагниченность слоя. Затем производится запись (переключение намагниченности), после охлаждения конфигурация сохраняется. Таким образом, концепция TAS-MRAM разрешает противоречие между надежностью хранения данных и экономичностью процесса переключения и открывает путь для дальнейшего уменьшения размеров приборов MRAM [20].

Схема токовой ячейки памяти FI TAS-MRAM показана на рис. 1а. Она включает в себя один элемент МТП, соединенный с шиной и с переключающим транзистором, и одну полевую шину для генерации магнитного поля для переключения МТП. Тепловой разогрев элемента МТП достигается пропусканием тока через элемент МТП, в то время как для измерения значения TMR в элементе МТП используются меньшие токи. Структура элемента МТП ячейки TAS-MRAM показана на рис. 1б. Она включает в себя свободный (чувствительный) ФМ слой; туннелирующий диэлектрический слой MgO; синтетический антиферромагнетик (SAF), который состоит из двух ФМ слоев, разделенных тонким слоем Ru; и антиферромагнитный (АФ) слой, отвечающий за закрепление намагниченности ближайшего ФМ слоя в SAF. Типичная толщина ФМ слоев в элементе МТП — 2–3 нм, толщины же туннелирующего слоя MgO и слоя Ru — менее или около 1 нм.

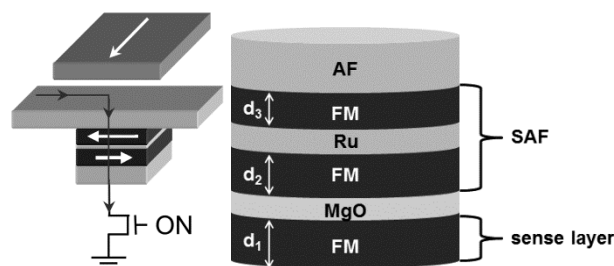


Рис. 1. (а) Принципиальная схема ячейки памяти FI TAS-MRAM и (б) структура элемента МТП прибора FI TAS-MRAM

Таким образом, современные спинтронные приборы на основе МТП представляют собой сложные многослойные наноструктуры, содержащие ФМ и АФ слои, использующие эффекты обменного взаимодействия между слоями и процессы переноса спинового вращательного момента. Кроме того, спинтронные приборы с термоассистированным переключением используют Джоулев разогрев для перемагничивания слоев, что неизбежно приводит к возникновению механических напряжений в приборе.

Представляемый программный пакет позволяет описывать данные эффекты и моделировать магнитную динамику и термомеханику в спинтронных наноструктурах с учетом их взаимного влияния.

III. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА

Программный пакет для приборно-технологического моделирования спинтронных устройств на основе МТП содержит набор программных компонент для описания различных физических характеристик приборов:

- 1) программная компонента магнитной динамики для описания эволюции намагниченности в слоях спинтронных приборов;
- 2) программная компонента для расчета распределений температуры, электрического тока и механических напряжений в спинтронном приборе.

Данные программные компоненты могут быть совместно использованы для проведения мультифизических расчетов.

В свою очередь, программная компонента магнитной динамики содержит несколько модулей для моделирования эволюции намагниченности с разной степенью детализации:

- 1) – модуль макроспиновой магнитной динамики;
- 2) – модуль гранулярной модели на основе метода Монте-Карло;
- 3) – модуль микромагнитной динамики;
- 4) – модуль атомистической микромагнитной динамики.

Наличие этих модулей позволяет применять моделирование магнитной динамики в широком диапазоне пространственных и временных масштабов: от исследования влияния атомистического строения на магнитные свойства до описания поведения на макроскопических временах.

Кроме того, программная компонента магнитной динамики содержит модуль расчета спинового транспорта в туннельном переходе с магнитными электродами, который позволяет рассчитывать TMR и спиновые вращательные моменты, переносимые электронами проводимости в туннельной спин-вентильной структуре.

Модуль макроспиновой магнитной динамики является наиболее огрубленной моделью магнитной динамики, в которой предполагается, что распределение намагниченности в ФМ слоях магнитных приборов однородно. Данное описание позволяет сильно увеличить скорость интегрирования уравнений магнитной динамики и проводить быстрый анализ поведения системы при различных воздействиях, а также быстро рассчитывать рабочие характеристики приборов, такие как кривые магнетосопротивления и др. Такой подход широко используется при построении фазовых диаграмм надежности работы спинтронных приборов, которые

требуют проведения большого количества параметрических расчетов, а также для оптимизации параметров прибора, например, его геометрии, по заданным целевым функциям.

Модуль гранулярной модели на основе метода Монте-Карло предназначен для моделирования динамики спинов в гетероструктуре, состоящей из ФМ и АФ поликристаллических слоев, с учетом случайного теплового возбуждения спинов в процессе их движения под действием внутренних и внешних полей. Модуль может использоваться для описания динамики в спинтронных устройствах с учетом температурного разогрева выше температуры АФ блокировки, а также для моделирования процесса температурной релаксации поля обменного смещения в обменно-связанной гетероструктуре с ансамблем АФ зерен.

Модуль микромагнитной динамики содержит микромагнитную модель для описания динамики процессов намагничивания в слоях прибора на основе решения уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта, с учетом 1) температурной зависимости намагниченности (модель Блоха), 2) влияния спин-поляризованного тока на динамику намагниченности (формализм Слончевского), 3) обменных полей на интерфейсе ФМ/АФ и в АФ структурах. gggg

Модель атомистической магнитной динамики является наиболее детальной и рассматривает каждый атом кристаллической решетки и состояние его собственного магнитного момента. Такой подход позволяет учесть влияние неоднородного состава, дефектов материала, шероховатостей и границ сложной формы, а также взаимодействие магнитных моментов атомов разного сорта для ФМ и АФ материалов. Модуль использует оптимизированные структуры данных и алгоритмы для эффективного выполнения на высокопроизводительных вычислительных системах на основе GPU.

Модуль расчета спинового транспорта в туннельном переходе применяется для расчета магнетосопротивления магнитной гетероструктуры с диэлектрическими и полупроводниковыми туннельными слоями, вольт-амперной характеристики магнитного туннельного перехода, а также вращательных моментов, создаваемых спин-поляризованными составляющими туннельного тока для включения их в уравнения микро- и макроспиновой динамики в магнитных слоях элементов спинтронных приборов.

Программная компонента для расчета термических, электрических полей и механических напряжений в спинтронных приборах рассчитывает статические и динамические распределения указанных полей при заданных граничных условиях для напряжения на электродах и при фиксированной температуре и механических смещениях на границе. Программная компонента учитывает зависимость основных физических свойств материалов (теплопроводности,

электропроводности) от локальной температуры, зависимость TMR от напряжений и температуры, наличие остаточных механических напряжений в различных слоях прибора, и использует эласто-пластическую модель деформации материалов.

Для построения мультифизической модели обеспечено сопряжение решений микромагнитной модели и задачи о распределении температуры, тока и механических напряжений. Для этого реализован обмен данными между программными компонентами и периодически проводится синхронизация данных между ними. Программная компонента для расчета распределений температуры, тока и напряжений передает эти распределения в модули расчета магнитной динамики для описания магнитных свойств материалов, зависящих от температуры, и процессов переноса спинового момента, а также для учета магнитоупругого взаимодействия в ФМ и АФ слоях. В свою очередь, модули расчета магнитной динамики передают в данную программную компоненту рассчитанные значения TMR.

Интегрирование по времени уравнений микромагнитной динамики и уравнений для распределений температуры, тока и механических напряжений требует при заданной точности интегрирования в общем случае различных временных шагов. Поэтому для сопряжения обеих программных компонент использован метод расщепления по процессам, когда интегрирование уравнений каждой из моделей происходит поочередно. Поскольку для магнитной динамики шаг интегрирования обычно определяется скоростью магнитной прецессии и слабо зависит от времени (типичное значение шага — 10^{-13} – 10^{-14} с), он оказывается меньше типичного шага по времени для интегрирования уравнений расчета распределений температуры, тока и механических напряжений (типичное значение шага для этой модели — 10^{-11} – 10^{-12} с). Поэтому в программной реализации метода расщепления по процессам используется шаг интегрирования из тепловой задачи в качестве конечного времени для интегрирования уравнений магнитной динамики.

Структура устройства задается в послойном виде с использованием параметрического расширения формата GDS. На основе послойного представления структуры устройства программа выполняет генерацию трёхмерной структуры прибора, которая записывается в формате Netgen CSG. Пример трёхмерной структуры спинтронного устройства FI TAS MRAM с массивом МТП приведен на рис. 2. **Ошибка! Источник ссылки не найден..** На основе сгенерированной трёхмерной структуры программа затем осуществляет генерацию сетки тетраэдрических конечных элементов с использованием библиотеки Netgen [21]. Программная компонента расчета распределений температуры, тока и механических напряжений использует нерегулярную тетраэдрическую сетку. В то же время, решение задачи магнитной динамики удобнее выполнять на

регулярной прямоугольной сетке. Поскольку программные компоненты в общем случае используют различные сетки, то осуществляется отображение указанных величин между сетками разных программных компонент и модулей.

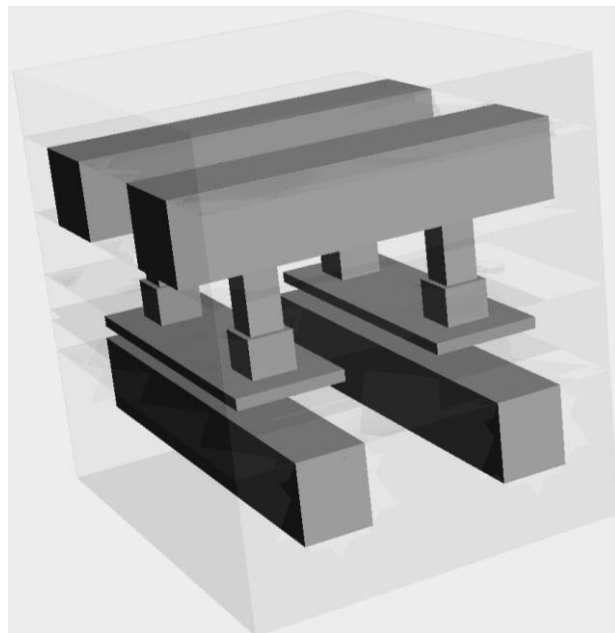


Рис. 2. 3D модель спинтронного устройства с четырьмя магнитными туннельными переходами, построенная из структуры, заданной в формате GDS

В результате решения задачи создаются файлы с информацией о полях температуры, электрического поля и механических напряжений в формате VTK [22] для трехмерной визуализации результатов.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве иллюстрации применения программного пакета для приборно-технологического моделирования спинтронных устройств на основе МТП рассмотрим основные проблемы, возникающие при разработке таких устройств.

А. Построение фазовых диаграмм надежности работы термоассистированной полевой магнитной памяти (FI TAS MRAM)

В термоассистированной полевой магнитной памяти (FI TAS MRAM) хранение информации реализуется в направлении намагниченности АФ слоя, который используется для обменного закрепления ФМ слоев. Операция записи при этом заключается в разогреве слоя АФ выше температуры разблокировки, при которой исчезает обменное закрепление ФМ слоя. После этого разогрева приложенное магнитное поле меняет ориентацию ФМ слоя, примыкающего к слою АФ. Величина создаваемого магнитного поля должна быть достаточной для преодоления барьеров переключения намагниченности слоев. Для исследования полей, необходимых для успешной записи в приборах FI TAS MRAM, были проведены

расчеты вероятности переключения магнитных слоев в зависимости от величины магнитного поля и магнитной анизотропии ФМ слоев с использованием модуля макроспиновой динамики. Рассчитанная диаграмма переключения в осях «величина магнитной анизотропии» / «внешнее поле» (K, H) приведена на рис. 3 для трехслойной структуры с синтетическим некомпенсированным АФ. Как видно из рисунка, на диаграмме имеются три области. Первая область (в левой части диаграммы) соответствует биполярному переключению, в котором все ФМ слои вращаются одновременно; вторая область (верхняя правая часть диаграммы) соответствует переключению только свободного (чувствительного) слоя (слои SAF не вращаются); третья область внизу диаграммы соответствует полному отсутствию переключения. Можно видеть, что для маленьких значений магнитной анизотропии ФМ слоев имеется критическое значение внешнего поля, при котором переключение становится возможным. Однако, для коэффициента магнитной анизотропии, большего, чем $K \geq 5K_0$, увеличение внешнего поля приводит к переключению только одного свободного слоя, а не к биполярному переключению, поскольку магнитостатическое сцепление между свободным слоем и слоями SAF недостаточно велико, чтобы преодолеть магнитную анизотропию в ФМ слоях. Таким образом, для успешной операции записи в приборах данного типа имеется верхний предел для коэффициента магнитной анизотропии ФМ материала.

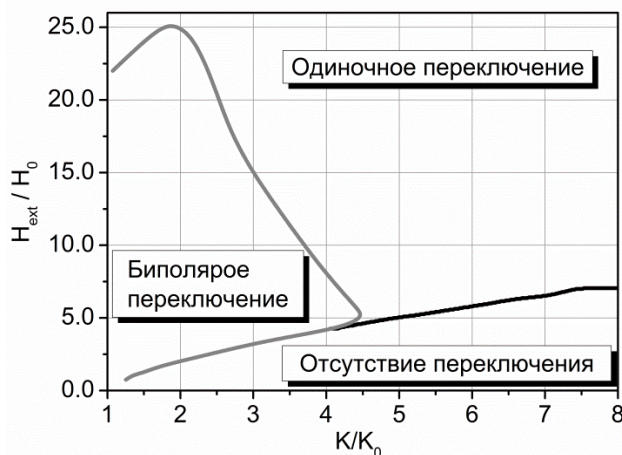


Рис. 3. Области различных типов переключения состояния МТП ячейки (операции записи) в устройствах FI TAS MRAM на плоскости параметров «анизотропия - магнитное поле», рассчитанные с использованием макроспиновой модели

В. Определение критических токов для магнитной памяти с переключением при помощи переноса спинового момента (STT MRAM)

Ключевая проблема переключения намагниченности на основе переноса спинового вращательного момента в приборах STT MRAM — это уменьшение критической плотности тока, которая определяется анизотропией и толщиной свободного

слоя, а также эффективностью спиновой поляризации. С использованием микромагнитного модуля в программной компоненте магнитной динамики были проведены расчеты вероятности переключения за счет переноса спинового момента для 1) параллельной намагниченности в эллиптическом слое записи из NiFe шириной 80 нм и длиной 160 нм, 2) перпендикулярной намагниченности в круговом слое записи диаметром 80 нм и перпендикулярной магнитной анизотропией $K = 5 \cdot 10^5$ Дж/м³ в зависимости от плотности тока для различной толщины слоя записи. Результаты расчета конечной намагниченности в слое за время 1 нс для начальной намагниченности $0.8 \cdot 10^6$ А/м в направлении длинной оси эллипса приведены на рис. 4. Как видно, критическая плотность тока переключения уменьшается с уменьшением толщины слоя записи и составляет порядка $3 \cdot 10^7$ А/см² для данной геометрии прибора.

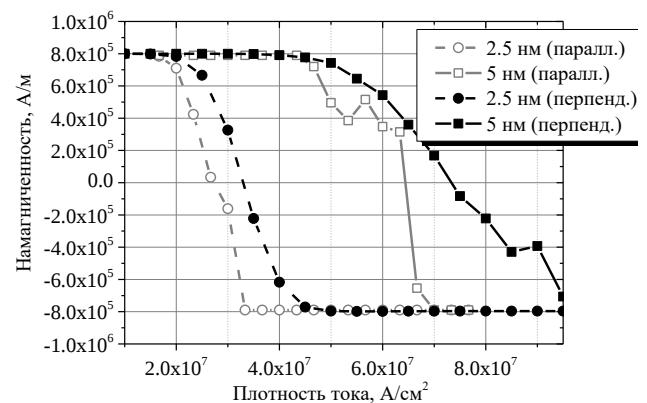


Рис. 4. Зависимость конечной намагниченности за время 1 нс для переключения STT MRAM от плотности тока для разных толщин слоя записи

С. Исследование надежности хранения информации в устройствах магнитной памяти STT MRAM

Сохранность записанной информации является одним из ключевых параметров устройств памяти. Можно оценить [15], что для обеспечения 10-летнего хранения данных энергетический барьер для переключения должен превышать $65 k_B T$, где T — температура и k_B — постоянная Больцмана, чтобы тепловые флуктуации не смогли привести к самопроизвольному переключению. Для наноразмерных устройств магнитной памяти переключение обычно осуществляется посредством однородного вращения намагниченности (механизм Стонера-Вольфарта). При этом энергетический барьер для переключения определяется произведением $K_u V$, где K_u — константа магнитной анизотропии (обычно используется анизотропия формы слоя записи), а V — объем магнитного элемента. Таким образом, для увеличения барьера можно поднимать величину магнитной анизотропии при помощи повышения аспектного отношения слоя записи, или же увеличивать объем слоя. Однако, при превышении некоторого критического порога, переключение намагниченности в устройствах STT MRAM может

произойти не путем однородного вращения намагниченности, а с помощью распространения доменной стенки. Для определения данного критического порога были проведены расчеты величины энергетического барьера для обоих механизмов переключения для эллиптического слоя записи шириной 80 нм, толщиной 2.5 нм и аспектного отношения в диапазоне от 1.5 до 3.2. Для этого использовался метод Nudged Elastic Band (NEB) [23], позволяющий рассчитать путь переключения для заданных начальных и конечных состояний системы и реализованный в модуле микромагнитной динамики. Результаты расчета барьеров переключения приведены на рис. 5. Как видно, для аспектного отношения > 2.2 барьер для однородного вращения превышает барьер для распространения доменной стенки, и при дальнейшем увеличении аспектного отношения барьер слабо меняется.

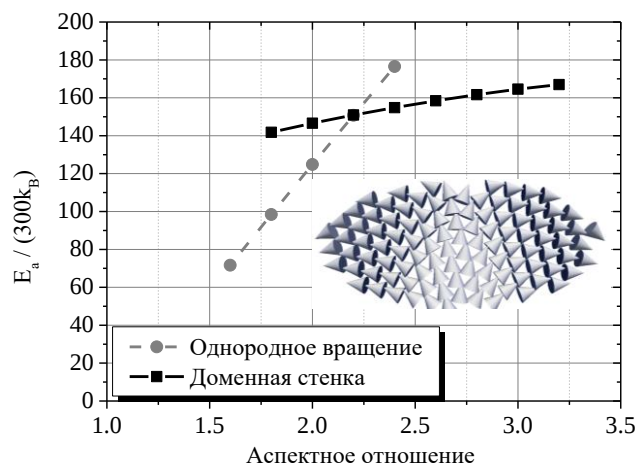


Рис. 5. Зависимость энергетического барьера для переключения STT MRAM для механизма однородного вращения и распространения доменной стенки (показано на вставке) от аспектного отношения для слоя записи STT MRAM

D. Определение критических токов для переключения термоассистированной полевой магнитной памяти (FI TAS MRAM)

Как было сказано выше, операция записи в прибор FI TAS MRAM осуществляется пропусканием электрического тока через элемент МТП. АФ слой разогревается выше температуры блокировки, и происходит размагничивание свободного слоя, что позволяет провести запись.

Рассмотренная в этом примере структура, показанная на рис. 2, представляет собой массив из четырех магнитных туннельных переходов, соединенных двумя перемычками и двумя верхними шинами, а также включает две полевые шины. Массив МТП и подводящие шины инкапсулированы в матрице оксида кремния.

Пример рассчитанного распределения температуры в области МТП приведен на рис. 6. Как видно из рисунка, повышение температуры локализуется только

в области магнитного туннельного перехода, где происходит генерация тепла в слое MgO. Вне слоя мы видим уменьшение температуры в соседних слоях, вдали же от МТП температура практически не отличается от комнатной. Таким образом, может требоваться небольшая мощность Джоулева нагрева для перезаписи такого элемента. Действительно, расчет показал, что для достижения температуры блокировки слоя АФ равной 500 К в МТП необходима плотность тока около 4 MA/cm^2 , что существенно меньше плотности тока, требуемой для переключения STT MRAM (см. рис. 4).

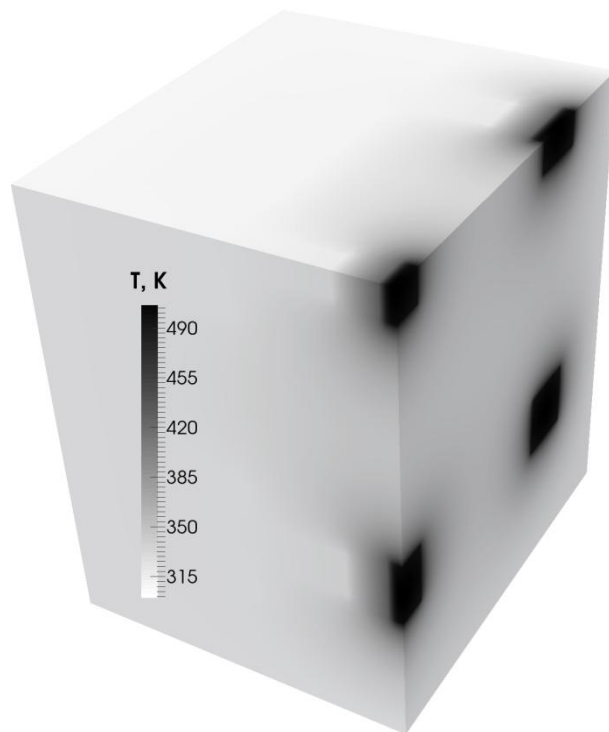


Рис. 6. Рассчитанное распределение температуры во время операции записи (структура обрезана тремя плоскостями, проходящими через центр одного МТП)

Дополнительно отметим, что из-за низкого значения теплопроводности материалов перемычки и диэлектрической матрицы имеет место большой и неоднородный нагрев этих слоёв, что вызывает механические напряжения в них из-за различия коэффициентов температурного расширения материалов. Эти напряжения, в свою очередь, передаются в ФМ слои МТП. Следовательно, можно ожидать, что величины механических напряжений в МТП значительно различаются во время операций чтения (при отсутствии разогрева) и записи. Расчет показал различие механических напряжений до 1.5 ГПа для данной модельной структуры. Механические напряжения, возникающие в ФМ слоях МТП, могут заметно влиять на магнитные свойства МТП, в частности, на величину TMR [24].

V. ВЫВОДЫ

В данной работе представлено описание программного пакета для приборно-технологического моделирования спинтронных приборов на основе магнитных туннельных переходов. Пакет содержит многоуровневую и мультифизическую модель для описания магнитной динамики и расчета распределения температуры, электрического тока и механических напряжений и позволяет моделировать магнитную динамику и термомеханику в спинтронных приборах с учетом их взаимного влияния. Приведены примеры применения данного программного пакета для решения основных проблем при проектировании новых спинтронных приборов, таких, как определение критических параметров для переключения намагниченности в спинтронных приборах, а также оценки стабильности хранения записанной в магнитной форме информации.

ПОДДЕРЖКА

Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEFI57614X0023).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Nguyen V.D.F., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 61. P. 2472–2475.
- [2] Moodera J.S., Kinder L.R., Wong T.M., Meservy R. Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions // *Phys. Rev. Lett.* 1995. V. 74. P. 3273–3276.
- [3] Ruigrok J.J.M., Coehoorn R., Cumpson S.R., Kesteren H.W. Disk recording beyond 100 Gb/in.²: Hybrid recording? // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. P. 5398–5403.
- [4] Åkerman J. Toward a Universal Memory // *Science*. 2005. V. 308. P. 508–510.
- [5] Попков А.Ф., Звездин К.А., Чиненков М.Ю., Дюжев Н.А., Звездин А.К. Спиновый транспорт и проблемы магнитной оперативной памяти (MRAM) // *Инженерная физика*. 2012, № 9, С. 19–34.
- [6] Chen Y., Li H.H., Wang X., Zhu W., Xu W., and Zhang T. A 130 nm 1.2 V/3.3 V 16 Kb spin-transfer torque random access memory with nondestructive self-reference sensing scheme // *IEEE J. Solid-State Circuits*. 2012. V. 47, P. 560–573.
- [7] Dieny B., Sousa R., Bandiera S., Castro Souza M., Auffret S., Rodmacq B., Nozieres J.P. Extended scalability and functionalities of MRAM based on thermally assisted writing / *Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE International*. 2011. P. 1.3.1–1.3.4.
- [8] URL: www.synopsys.com (дата обращения 24.03.2016).
- [9] URL: www.silvaco.com (дата обращения 24.03.2016).
- [10] URL: www.cogenda.com (дата обращения 24.03.2016).
- [11] URL: www.magoasis.com (дата обращения 24.03.2016).
- [12] URL: www.goparallel.net (дата обращения 24.03.2016).
- [13] Parkin S.S.P., Kaiser C., Panchula A., Rise P.M., Hughes B., Samant M., Yang S.-H. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers // *Nature Materials*. 2004. V. 3. P. 862–867.
- [14] Huai Y. Spin-Transfer Torque MRAM (STT-MRAM): Challenges and Prospects // *AAPPS Bulletin*. 2008, V. 18. P. 33–40.
- [15] Åkerman J., DeHerrera M., Durlam M., Engel B., Janesky J., Mancoff F., Slaughter J., Tehrani S. Magnetic Tunnel Junction Based Magnetoresistive Random Access Memory // Ed. by Johnson M.: Elsevier Academic Press. 2004.
- [16] Deak, J. Thermal magnetic random access memory / *IEEE International Conference on Computer Design New Memory Technologies*, San Jose, CA Oct. 4, 2005.
- [17] Purnama B., Nozaki Y., Matsuyama K. Micromagnetic simulation of thermally assisted magnetization reversal in magnetic nanodots with perpendicular anisotropy // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. V. 310. P. 2683–2685.
- [18] Pinna D., Mitra A., Stein D.L., Kent A.D. Thermally assisted spin-transfer torque magnetization reversal in uniaxial nanomagnets // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 262401.
- [19] Butler W.H., Mewes T., Mewes C.K.A., Visscher P.B., Rippard W.H., Russek S.E., Heindl R. Switching Distributions for Perpendicular Spin-Torque Devices within the Macrospin Approximation // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. V. 48. P. 4684–4700.
- [20] Prejbeanu I.L., Bandiera S., Alvarez-Herault J., Sousa R.C., Dieny B., Nozieres J.-P. Thermally assisted MRAMs: ultimate scalability and logic functionalities // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2013. V. 46. P. 074002.
- [21] URL: <https://gitlab.asc.tuwien.ac.at/jschoeberl/ngsolve-docu/wikis/home> (дата обращения 24.03.2016).
- [22] URL: <http://www.vtk.org> (дата обращения 24.03.2016).
- [23] Bessarab P.F., Uzdin V.M., and Jonsson H. Method for finding mechanism and activation energy of magnetic transitions, applied to skyrmion and antivortex annihilation // *Computer Physics Communications*. V. 196. 2015. P. 335–347.
- [24] Loong L.M., Qiu X., Neo Zh.P., Deorani P., Wu Y., Bhatia C.S., Saeys M., Yang H. Strain-enhanced tunneling magnetoresistance in MgO magnetic tunnel junctions // *Scientific Reports*. 2014. V. 4. Article number 6505.

Software package for Technology Computer-Aided Design of spintronic devices based on magnetic tunneling junctions

I.A. Goryachev¹, G.D. Demin^{1,3}, K.A. Zvezdin^{1,6}, E.V. Zipunova¹, A.V. Ivanov^{1,5}, I.M. Iskandarova^{1,2}, A.A. Knizhnik^{1,2}, V.D. Levchenko^{1,5}, A.F. Popkov^{3,4}, B.V. Potapkin^{1,3}, S.V. Solov'ev^{1,3}

¹Kintech Lab Ltd, knizhnik@kintechlab.com

²National Research Centre «Kurchatov Institute»

³ National Research University of Electronic Technology

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology

⁵ Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Science

⁶ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Science

Keywords — spintronics, magnetic memory, technology computer aided design.

ABSTRACT

In this work we present a description of the software package for technology computer-aided design (TCAD) of spintronic devices based on magnetic tunneling junctions (MTJ). Such devices are promising for development of next-generation of non-volatile memory devices with fast switching times and low-energy consumption.

The software package contains the multiphysics and multiscale model for description of magnetic dynamics and calculation of distributions of temperature, electrical current and mechanical stresses in spintronic devices taking into account their mutual interference.

We present the examples of application of this software package for solution of basic problems in development of new spintronic devices, such as calculation of critical parameters for switching of magnetization in spintronic devices and analysis of reliability of stored information in these devices.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement 14.576.21.0023, project identifier RFMEFI57614X0023).

REFERENCES

- [1] Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Nguyen V.D.F., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 61. P. 2472–2475.
- [2] Moodera J.S., Kinder L.R., Wong T.M., Meservey R. Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions // *Phys. Rev. Lett.* 1995. V. 74. P. 3273–3276.
- [3] Ruigrok J.J.M., Coehoorn R., Cumpson S.R., Kesteren H.W. Disk recording beyond 100 Gb/in.²: Hybrid recording? // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. P. 5398–5403.
- [4] Åkerman J. Toward a Universal Memory // *Science*. 2005. V. 308. P. 508–510.
- [5] Popkov A.F., Zvezdin K.A., Chnenkov M.Yu., Dyujev N.A., Zvezdin A.K. Spinovyy transport i problemy magnitnoy operativnoy pamjati (MRAM) // *Inzhenernaja fizika*. 2012, № 9, C. 19–34 (in Russian).
- [6] Chen Y., Li H.H., Wang X., Zhu W., Xu W., and Zhang T. A 130 nm 1.2 V/3.3 V 16 Kb spin-transfer torque random access memory with nondestructive self-reference sensing scheme // *IEEE J. Solid-State Circuits*. 2012. V. 47, P. 560–573.
- [7] Dieny B., Sousa R., Bandiera S., Castro Souza M., Auffret S., Rodmacq B., Nozieres J.P. Extended scalability and functionalities of MRAM based on thermally assisted writing / *Electron Devices Meeting (IEDM)*, IEEE International. 2011. P. 1.3.1–1.3.4.
- [8] URL: www.synopsys.com (accessed 24.03.2016).
- [9] URL: www.silvaco.com (accessed 24.03.2016).
- [10] URL: www.cogenda.com (accessed 24.03.2016).
- [11] URL: www.magoasis.com (accessed 24.03.2016).
- [12] URL: www.goparallel.net (accessed 24.03.2016).
- [13] Parkin S.S.P., Kaiser C., Panchula A., Rise P.M., Hughes B., Samant M., Yang S.-H. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers // *Nature Materials*. 2004. V. 3. P. 862–867.
- [14] Huai Y. Spin-Transfer Torque MRAM (STT-MRAM): Challenges and Prospects // *AAPPS Bulletin*. 2008, V. 18. P. 33–40.
- [15] Åkerman J., DeHerrera M., Durlam M., Engel B., Janesky J., Mancoff F., Slaughter J., Tehrani S. Magnetic Tunnel Junction Based Magnetoresistive Random Access Memory // Ed. by Johnson M.: Elsevier Academic Press. 2004.
- [16] Deak, J. Thermal magnetic random access memory / *IEEE International Conference on Computer Design New Memory Technologies*, San Jose, CA Oct. 4, 2005.
- [17] Purnama B., Nozaki Y., Matsuyama K. Micromagnetic simulation of thermally assisted magnetization reversal in magnetic nanodots with perpendicular anisotropy // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. V. 310. P. 2683–2685.
- [18] Pinna D., Mitra A., Stein D.L., Kent A.D. Thermally assisted spin-transfer torque magnetization reversal in uniaxial nanomagnets // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 262401.
- [19] Butler W.H., Mewes T., Mewes C.K.A., Visscher P.B., Rippard W.H., Russek S.E., Heindl R. Switching Distributions for Perpendicular Spin-Torque Devices within the Macrospin Approximation // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. V. 48. P. 4684–4700.
- [20] Prejbeanu I.L., Bandiera S., Alvarez-Herault J., Sousa R.C., Dieny B., Nozieres J.-P. Thermally assisted MRAMs: ultimate scalability and logic functionalities // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2013. V. 46. P. 074002.
- [21] URL: <https://gitlab.asc.tuwien.ac.at/jschoeberl/ngsolve-docu/wikis/home> (дата обращения 24.03.2016).
- [22] URL: <http://www.vtk.org> (дата обращения 24.03.2016).
- [23] Bessarab P.F., Uzdin V.M., and Jonsson H. Method for finding mechanism and activation energy of magnetic transitions, applied to skyrmion and antivortex annihilation // *Computer Physics Communications*. V. 196. 2015. P. 335–347.
- [24] Loong L.M., Qiu X., Neo Zh.P., Deorani P., Wu Y., Bhatia C.S., Saeys M., Yang H. Strain-enhanced tunneling magnetoresistance in MgO magnetic tunnel junctions // *Scientific Reports*. 2014. V. 4. Article number 6505.