

На правах рукописи

**Михайлов Алексей Павлович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА  
ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПЕРЕНОСА СПИНА**

Специальность 01.04.04 —  
«Физическая электроника»

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный — 2020

Работа прошла апробацию в лаборатории физики магнитных гетероструктур и спинтроники для энергосберегающих информационных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Белановский Анатолий Дмитриевич**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет»

Защита состоится 28 декабря 2020 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ЛФИ.01.04.04.001 по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>.

Работа представлена «07» октября 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

# Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** За последние двадцать-тридцать лет микроэлектроника добилась значительных успехов, в частности благодаря заметному улучшению процессов литографии и разработке технологий напыления тонких плёнок. Это стало толчком к появлению новой дисциплины на стыке магнетизма и микроэлектроники: спиновой электроники. Эта дисциплина процветает с момента открытия в 1988 году явления гигантского магнитосопротивления, которое привело к появлению магнитных датчиков первого поколения, которые затем использовались в считывающих головках жёстких дисков. Затем было разработано второе поколение считывающих головок, на этот раз основанное на туннельном магнитосопротивлении, что позволило значительно увеличить плотность хранения информации. Именно с открытием туннельного магнитосопротивления связано появление магнитной памяти с произвольным доступом, или MRAM. Промышленность проявила интерес к развитию этой технологии. Motorola (точнее, её подразделение Freescale Semiconductor Inc., которое в 2008 году создало для разработки MRAM компанию Everspin Technologies) была первой, кто выпустил MRAM в 2003 году с собственной техникой записи (Toggle-MRAM). Несколько лет назад теоретическое предсказание возможности управления намагниченностью материала с помощью спин-поляризованного тока породило концепцию магнитной памяти, не требующей внешнего магнитного поля для записи информации (STT-MRAM). В июне 2019 года компания Everspin начала пилотное производство 1 Гб чипа памяти STT-MRAM. В России разработкой этого типа памяти с 2016 года занимается компания Крокус Наноэлектроника, в которой автор работает с августа 2016 года.

Магниторезистивная память с произвольным доступом (MRAM) имеет потенциал универсальной памяти — она может быть одновременно быстрой, энергонезависимой, плотной и долговечной. MRAM отличается от более ранних воплощений магнитной памяти тем, что предлагает достаточно большие сигналы для плотного соединения электронного КМОП-считывания с магнитной памятью в компактной структуре устройства, конкурентоспособной с современными полупроводниковыми запоминающими устройствами. Автономная (stand-alone) память обычно ценится за одну из особенностей: скорость, плотность или экономичность. При этом из существующих типов па-

мяти SRAM является самой быстрой, Flash-память наиболее плотная, а DRAM обладает наименьшей стоимостью при производстве. Преимущество MRAM заключается в том, что этот тип памяти сочетает в себе все вышеперечисленные качества, хотя и не является лучшей ни в одной отдельной характеристике. Встроенная память для специализированных интегральных схем или кэширования микропроцессора часто требует гибкости по сравнению с узкой оптимизацией производительности, что делает применение MRAM перспективным. Этот тип памяти является крайне универсальным из-за его способности гибко выполнять разнообразные задачи при относительно небольших затратах. По состоянию на конец 2018 – начало 2019 годов MRAM уникален среди новых типов памяти тем, что он предлагает как высокую скорость работы, так и высокую надёжность (много циклов перезаписи до ухудшения свойств). Это делает его особенно привлекательным в качестве замены SRAM для высокоуровневого кэша (умеренная скорость, но требуется существенно большая плотность). Дополнительными преимуществами MRAM над полупроводниковой памятью являются ее радиационная стойкость, что позволяет применять её в таких приложениях, как, например, аэрокосмическая отрасль.

Коммерциализация MRAM зависит от преимуществ, предлагаемых магнитным туннельным переходом (MTJ). Толщина туннельного барьера MTJ может быть настроена с точностью до долей нанометра (если быть точным — с точностью до одного атомного слоя), чтобы задать его сопротивление, идеально подходящее для недорогих КМОП-транзисторов. Изменение сопротивления между магнитными состояниями достаточно велико для быстрого обнаружения усилителями, но мало для простой схемы записи со сбалансированными токами возбуждения. Все, что задействовано в «back end of line» (BEOL) процессе производства MRAM, должно выбираться с высокой степенью тщательности, чтобы получить наилучший MTJ. Необходимо одновременно оптимизировать сопротивление устройства MTJ, магнитосопротивление, ток записи, ток считывания, напряжение пробоя туннельного барьера, устойчивость сохранённых данных ко времени и к внешним магнитным полям, а также все вышеперечисленные параметры во всем рабочем диапазоне температур. При этом многие вопросы на сегодняшний день мало изучены.

Многие результаты настоящей работы были апробированы экспериментально на образцах ООО «Крокус Нанoeлектроника», однако, ввиду нали-

чия коммерческой ценности указанных экспериментальных результатов они не были включены автором в работу. В результате работы в компании ООО «Крокус Нанозлектроника» был создан тестовый чип памяти STT-MRAM объёмом 4 Кбит, доказавший работоспособность технологии и ее готовность к промышленному применению.

**Целью** данной работы является исследование влияния магнитного поля и температуры на свойства ячеек памяти STT-MRAM, разработка методов анализа свойств ячеек памяти на основе быстро получаемых экспериментальных результатов во всем диапазоне температур.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать методы исследования ошибок операций ячеек памяти MRAM, а также алгоритм исследования работоспособности различных дизайнов ячеек памяти.
2. Экспериментально исследовать параметры композиций магнитных материалов.
3. Исследовать энергетические барьеры между двумя стабильными состояниями ячеек памяти MRAM при различных механизмах обращения намагниченности, в том числе и при воздействии внешних магнитных полей.
4. Исследовать влияние температуры на свойства ячеек памяти MRAM.
5. Исследовать влияние разброса ячеек в массиве по размерам на интегральные свойства ячеек памяти MRAM в массиве.

**Научная новизна:**

1. Создан код для моделирования ошибок операций в приближении макроспина на GPU. Проверено соответствие результатов расчёта с помощью этого кода с другими численными решениями. Проведено сравнение результатов расчёта с аналитическими решениями.
2. Предложен новый косвенный метод расчёта глубоких ошибок операций ячеек памяти STT-MRAM, основанный на расчёте вероятностей переключения ячеек памяти от начального направления намагниченности и распределения намагниченности по направлениям в начальный момент времени.

3. Предложены новые методы расчёта полей анизотропии формы ячеек памяти MRAM с использованием микромагнитного моделирования.
4. Получено аналитическое уравнение для вычисления энергетического барьера ячеек в форме эллиптического цилиндра с обращением намагниченности через доменную стенку. Проведено сравнение полученного решения с простой аналитической формулой и с результатами микромагнитного моделирования.
5. Проведено экспериментальное исследование температурных зависимостей базовых параметров композиций магнитных материалов работоспособных ячеек памяти STT-MRAM.
6. Предложен и реализован метод экспериментального получения фактора температурной стабильности работоспособных ячеек памяти STT-MRAM с использованием переменных магнитных полей.
7. Проведено детальное аналитическое исследование температурных зависимостей ошибок операций STT-MRAM на основе полученных экспериментальных данных для свойств композиции материалов ячеек памяти.
8. Получены уравнения для определения эффективного уровня ошибок непреднамеренной записи при считывании для массива ячеек памяти STT-MRAM с учётом плотности электрического тока и разброса ячеек памяти в массиве по размерам.

### **Практическая значимость**

Результаты научной работы нашли непосредственное отражение в процессе разработки STT-MRAM в ООО «Крокус Нанoeлектроника», в которой автор работал с 2016 года инженером по дизайну и тестированию (с апреля 2019 и по ноябрь 2020 – старшим инженером по дизайну и тестированию). Основываясь на результатах научной работы, был создан тестовый чип памяти STT-MRAM объёмом 4 Кбит, доказавший работоспособность технологии и ее готовность к промышленному применению. Предложены новые конструкции комбинированных бит памяти MRAM, обеспечивающие повышенную устойчивость к внешним магнитным полям. Предложены новые конструкции сердечников микро- и наноразмерных индукторов и трансформаторов на основе магнитной анизотропии формы.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Программный код `msmiprt` для стохастического моделирования переключения ячеек памяти STT-MRAM в приближении макроспина.
2. Алгоритм исследования свойств дизайнов ячеек памяти STT-MRAM должен включать в себя вычисление/моделирование/измерение вероятности спонтанного переключения (или, аналогично этому, фактора температурной стабильности или энергетического барьера), вычисление/моделирование величины критической плотности тока, а также вычисление/моделирование/измерение ошибок записи (WER) и непреднамеренной записи (RDR).
3. В массиве ячеек памяти вероятность (эффективная) возникновения ошибок непреднамеренной записи определяется аналогично вероятности ошибок непреднамеренной записи одиночной ячейки с той разницей, что для определения вероятности непреднамеренной записи в массиве ячеек используется величина эффективного фактора температурной стабильности вместо фактора температурной стабильности медианной ячейки массива памяти.
4. Зависимость поля перпендикулярной анизотропии и намагниченности насыщения композиции материалов от температуры с хорошей точностью соответствует  $0.3\%/^{\circ}C$  относительно значения при комнатной температуре.
5. Методики определения полей анизотропии ячеек памяти MRAM сложной формы с использованием микромагнитного моделирования.
6. Точка перехода между механизмом однородного обращения и обращения через образование доменной стенки ячеек памяти MRAM с намагниченностью в плоскости соответствует  $AR \approx 2.2$  и слабо зависит от других параметров ячеек MRAM в рамках допустимого диапазона параметров.
7. Показатель степени в уравнении Шеррока в применении к стабильности ячеек памяти MRAM с путём наименьшей энергии между двумя стабильными состояниями, определяющимся когерентным обращением намагниченности, с хорошей точностью равен  $3/2$  практически при всех направлениях намагниченности, за исключением области менее  $10^{\circ}$  в окрестности направлений поля вдоль и перпенди-

кулярно оси ячеек, в которых показатель степени резко падает от значения равного 2.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

1. 58-ая научная конференция МФТИ, 23-28 ноября 2015.
2. Joint MMM-Intermag conference, Jan. 2016.
3. XXI Международный симпозиум "Нанofизика и наноэлектроника Нижний Новгород, 13-16 марта 2017.
4. Moscow International Symposium on Magnetism, Москва, 1-5 июля 2017.
5. 2018 European School on Magnetism, 17-28 сентября 2018.
6. Выступление на научном семинаре Института Прикладных Исследованиях Республики Башкортостан, руководитель, член-корр. РБ, д.ф.-м.н. Сабитов К.Б., июль 2018.
7. Выступление на кафедре теоретической физики БашГУ, заведующий кафедрой, д.ф.-м.н., профессор Вахитов Р.М., июль 2019.
8. Научный доклад в Физическом Институте Академии Наук им. Лебедева, заведующий кафедрой, академик РАН Гуревич А.В., июль 2019.

**Личный вклад.**

В работах [1; 2] автором произведены расчёты динамики вектора намагниченности ячеек памяти с помощью кода `msmirt`. Первоначальная базовая версия этого кода была написана Алексеем Хвальковским, роль автора заключается в доработке кода, которая включала в себя включение возможности учёта ряда физических эффектов, в том числе учёта полей размагничивания соседних магнитных слоёв и зависимости параметров композиции магнитных материалов от температуры, а также работа над глубокой оптимизацией кода, позволившая ускорить производительность кода более чем в 20 раз. Также автором было произведено сравнение результатов вычисления кода `msmirt` с другими, ранее существовавшими решениями. Результаты исследований приведены в третьей главе диссертационной работы.

В работах [3–5] автором произведены расчёты энергетических барьеров ячеек памяти MRAM с помощью микромагнитного кода `FastMag`, в том числе и в зависимости от внешнего магнитного поля различной величины и

направления. Результаты исследований приведены в пятой главе диссертационной работы.

В работе [6] автором проведена общая постановка задачи, разработка и проведения анализа экспериментальных результатов. Также автором была написана программа для анализа экспериментальных результатов с помощью скриптового языка JMR. Результаты исследований приведены в четвёртой главе диссертационной работы.

В работе [7] автором проведена общая постановка эксперимента по измерению характеристик композиции магнитных материалов от температуры, в том числе поиск и квалификация различных измерительных установок, а также автором была написана программа для анализа экспериментальных результатов с помощью скриптового языка JMR. Все выводы и результаты измерений получены непосредственно автором, в том числе автором введён новый термин эффективных ошибок непреднамеренной записи для массива ячеек и предложена формула для вычисления. Результаты исследований приведены в шестой главе диссертационной работы.

В работах [8; 9] автором были предложены и произведены расчёты размеров магнитных блоков, а также предложена многослойная конструкция сердечника. Автором нарисованы чертежи, по которым были произведены опытные образцы. Результаты приведены в приложении диссертационной работы.

Все прочие выводы и результаты научной работы получены автором лично.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, индексируемых в базе данных RSCI, 2 — в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, 3 — в тезисах докладов, 3 — в патентах.

## **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** диссертационной работы имеет обзорный характер. В главе приведены общие сведения о микромагнетизме и спинтронике. Приведено подробное описание физики, лежащей в основе магнитной анизотропии и магнитного туннельного перехода, а также приведено общее описание памяти в микроэлектронике.

**Вторая глава** также имеет обзорный характер и посвящена детальному рассмотрению свойств магниторезистивной памяти, а также истории развития магниторезистивной памяти, включая разбор преимуществ и недостатков ранее существовавших дизайнов ячеек памяти MRAM. Подробно рассмотрены способность ячеек сохранять записанную в них информацию, принципы считывания информации и возмущения, возникающие при прохождении через ячейку электрического тока. В главе сделаны выводы о границах применимости всех описанных технологий и дизайнов магниторезистивной памяти.

**Третья глава** посвящена моделированию стохастической динамики массивов ячеек памяти STT-MRAM в приближении макроспина.

В первом параграфе третьей главы описан код `msmirt`, написанный автором совместно с А.В. Хвальковским. В основе кода `msmirt` лежит следующая нормализованная форма уравнения ЛЛГС:

$$\frac{1 + \alpha^2}{\gamma} \frac{d\vec{m}}{dt} = \vec{m} \times [(H_{\text{eff}} - H_S) - \vec{m} \times (\alpha H_{\text{eff}} - H_S)], \quad (1)$$

где введено обозначение  $H_S$  — характеризующее поле спинового тока, определяемое как

$$H_S = \eta \frac{J\hbar}{2eM_S t} \vec{m}_{\text{RL}}. \quad (2)$$

Эффективное поле  $\vec{H}_{\text{eff}}$  включает в себя поле тепловых флуктуаций с распределением белого шума следующим образом:

$$\langle H_{\alpha,i}^{fl} \rangle = 0, \quad \langle H_{\alpha,i}^{fl} H_{\beta,i}^{fl} \rangle = 2D\delta_{ij}\delta_{\alpha\beta}, \quad (3)$$

где  $i$  и  $j$  индексы моментов,  $\alpha, \beta = x, y, z$  и мощность шума  $D$  равна

$$D = \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma M_S V dt}}. \quad (4)$$

Здесь  $k_B$  - постоянная Больцмана и  $dt$  шаг по времени.

В модели макроспина важно учитывать взаимодействие случайного поля между всеми слоями в многослойной ячейке памяти MRAM. Чтобы вычислить поле рассеяния, создаваемое одним магнитным слоем ячейки памяти в другом магнитном слое, создаётся отдельная микромагнитная модель исследуемой ячейки; вычисляется тензор поля рассеяния между слоями и усредняются его компоненты в каждом слое. Этот усреднённый тензор поля рассеяния для каждого слоя затем используется в модели макроспина.

В коде `msmiprt` реализована стандартная схема интегрирования по времени Хоена, соответствующего методу Рунге-Кутты второго порядка, чтобы обеспечить сходимость к интегралу Стратоновича.

Для эффективной программной имплементации описанных уравнений проведён детальный анализ архитектуры GPU и принципов GP-GPU программирования на языке CUDA в приложении к численному решению стохастического уравнения Ландау—Лифшица—Гильберта—Слончевского (ЛЛГС) для многослойной ячейки STT-MRAM в приближении макроспина.

Во втором параграфе третьей главы описан предложенный метод анализа зависимостей вероятностей переключения ячеек памяти STT-MRAM от плотности приложенного тока и параметров ячеек, таких как толщина свободного слоя, коэрцитивное поле, намагничённость насыщения и других возможных параметров. Использование взвешенной регрессии позволяет построить достоверную аппроксимацию (квадратичную, кубическую или, при необходимости, более высоких порядков) вероятностей переключения от рассматриваемых параметров. Наиболее ценным является то, что метод позволяет не только предсказывать поведение ячеек памяти, но и даёт возможность создать простую математическую модель, которая может быть использована в дальнейшем для разработки логики чипа памяти. Задача выполнялась под руководством к.т.н. Д.Р. Лещинера.

В третьем параграфе третьей главы приведён новый метод расчёта вероятностей глубоких ошибок спонтанного переключения при считывании, близкий по сути к идеям, заложенным в описанный выше метод аналитического вероятности переключения ячеек с помощью решения уравнения Фоккера-Планка. Метод основан на численном моделировании вероятностей переключения ячеек памяти от направления намагничённости и установившегося квазистационарного распределения намагничённости по направлениям при

заданном значении пропускаемого через ячейку памяти тока, сделанных, например, с помощью кода `msmirt`.

Вероятность переключения ячеек  $P_{\text{switched}}$  к моменту времени  $t$  есть сумма (интеграл) произведений вероятности переключения  $P$  ячейки с углом поворота намагниченности от оси ячейки  $\theta$  за время  $t$  на вероятность  $\rho$  ячейки иметь вектор намагниченности в направлении  $\theta$

$$P_{\text{switched}}(\theta, t) = \int_{\theta}^{\pi/2} P(\theta, t) \rho(\theta, t) d\theta. \quad (5)$$

Метод основан на использовании квазистационарного приближения, что верно для малых токов при времени протекания тока превышающей характерное время релаксации магнитного момента  $t_0 \cong 10$  нс. Таким образом, метод хорошо подходит для расчёта ошибок непреднамеренной записи (RDR), но не применим для расчёта ошибок записи (WER).

Была показана высокая точность метода вплоть до глубокого уровня ошибок. При этом, для построения зависимостей ошибок считывания от тока вплоть до указанной глубины ошибок было затрачено  $8236800 \times 40$  расчётных единиц (ячеек\*нс), а для расчёта предложенным методом  $11836800 \times 20$  расчётных единиц, что показывает практически двукратный прирост производительности и позволяет говорить о практической пользе предложенного метода.

В четвёртом параграфе третьей главы приведён алгоритм исследования работоспособности ячеек памяти STT-MRAM на примере проведённого автором численного моделирования динамики намагниченности нового дизайна ячеек памяти с помощью кода `msmirt`. Подобный алгоритм исследования рекомендуется применять до непосредственной разработки композиции магнитных материалов и экспериментальных исследований поведения ячеек памяти STT-MRAM.

Так исследование динамики вектора намагниченности и состояний ячеек памяти в отсутствии температурных флуктуаций позволяет с минимальным использованием вычислительных ресурсов определять энергопотребление рассматриваемого дизайна памяти, в том числе и в сравнении с иными, ранее существовавшими дизайнами. Уменьшение величины критической плотности тока, требуемой для возбуждения динамики вектора намагниченности, показывает потенциальное превосходство нового дизайна над ранее

существовавшими. Исследование динамики вектора намагниченности с учётом термофлуктуаций позволяет оценить способность ячеек памяти сохранять имеющуюся информация, оценить вероятность возникновения ошибок непреднамеренной записи при считывании и ошибок записи.

Изменение дизайна МТJ может привести также к ухудшению или улучшению способности ячеек памяти сохранять информацию. Ввиду сложности составления аналитических формул для энергетического барьера между двумя стабильными состояниями ячеек памяти, температурную стабильность тоже удобно исследовать численным моделированием, что было показано в предыдущей части работы.

Также описанные в четвёртом параграфе результаты показали, что оптимизированный код `msmiprt` эффективен в расчёте сложных многослойных ячеек STT-MRAM.

**Четвёртая глава** посвящена экспериментальным методам получения параметров композиции материалов ячеек памяти MRAM.

Как и для многих современных технологий, особенно в области микро- и наноэлектроники, метрология является ключевым компонентом для успешного развития и квалификации STT-MRAM. Несмотря на то, что параметры ячеек памяти не могут быть измерены напрямую на уровне материалов, что означает исследование свойств композиции тонких плёнок, осаждённых на кремниевую пластину, например, с помощью вакуумного напыления (PVD — *physical vapor deposition*), полученной информации оказывается достаточно для того чтобы сделать точную качественную оценку характеристик ячеек памяти STT-MRAM, построенных на основе данной композиции магнитных и немагнитных материалов. В четвёртой главе рассмотрены параметры ячеек, которые непосредственно могут быть измерены на уровне композиции материалов, применяемые для этого методы, а также рассмотрены некоторые экспериментальные результаты.

Основной техникой, используемой для квалификации материалов, является применение VSM (*vibrating-sample magnetometer* — магнетометр с вибрирующим образцом). Данный метод позволяет получить величину магнитного момента и охарактеризовать перпендикулярную магнитную анизотропию PMA (*perpendicular magnetic anisotropy*). Важно отметить, что возможности

метода в применении к характеристике STT-MRAM не ограничиваются указанными величинами.

Перпендикулярная магнитная анизотропия РМА характеризуется, в дополнение к намагниченности насыщения, полем анизотропии  $H_k$ . Данный параметр можно получить не только используя VSM, но также и с помощью установки МОКЕ (магнитооптический эффект Керра) или с помощью эффекта ферромагнитного резонанса FMR. Первый метод является очень быстрым, однако может быть сложным в интерпретации из-за разного вклада магнитных слоев, которых в композиции может быть много, а также не даёт никакой информации по величине намагниченности насыщения. Исследование с помощью метода ферромагнитного резонанса, напротив, является сложным (ввиду относительно слабого отклика из-за крайне малых толщин магнитных слоев) и затратным как по времени измерений, так и по времени обработки результатов. Тем не менее, важно отметить, что FMR является, пожалуй, наиболее доступным способом получения экспериментальных значений коэффициента Гильбертова затухания.

В первом параграфе четвёртой главы приведены результаты исследования зависимостей ряда параметров композиций материалов от температуры образцов на установке VSM. В работе представлены 2 варианта композиции материалов: образец А с намагниченностью в плоскости образца и образец Б с намагниченностью перпендикулярно плоскости образца. Для обоих образцов с ростом температуры наблюдается падение  $M_{St}$ , как это и предсказывает известная теория Киттеля  $m = \tanh m/t$ , где  $m$  — безразмерная намагниченность, а  $t$  — температура в единицах температуры Кюри материала. На рисунках 1а и 1б представлены полученные экспериментальные зависимости, а также аппроксимация полученных результатов. Для обоих образцов падение  $M_{St}$  от температуры составляет величину около 0.3 %/°C. Касательно поля перпендикулярной анизотропии, ввиду отрицательности его значения для образца А, было принято характерное для литературы обозначение  $M_{eff} = -H_k$ .

Во втором параграфе четвёртой главы рассматривается метод измерения характеристик тонких магнитных плёнок, предназначенных для применения в магнитной памяти на основе эффекта переноса спинового момента (Spin-Transfer-Torque Magnetic Random Access Memory или STT-MRAM), основанных на применении эффекта ферромагнитного резонанса (ФМР). Его

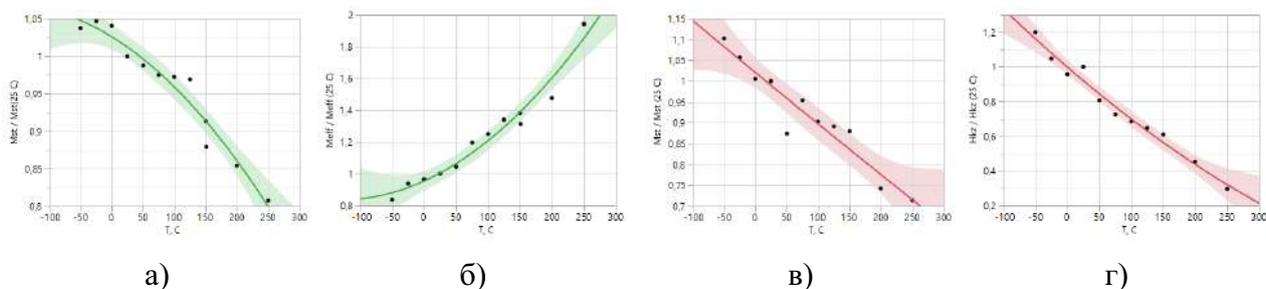


Рис. 1 — Температурные зависимости  $M_{St}$  и  $H_{kzFF} (M_{eff})$ , полученные на установке VSM. а) и б) для образца А, в) и г) для образца Б.

суть заключается в резонансном поглощении электромагнитных волн в системе связанных магнитных моментов, открытом Аркадьевым в начале XX века. Этот эффект проявляется, если ферромагнетик поместить в статическое магнитное поле и к образцу приложить переменное магнитное поле сверхвысокой частоты  $H_{свч}$ . Для каждой частоты электромагнитной волны существует коррелированное статическое магнитное поле  $H_{стат}$ , для которого наблюдается ФМР.

В зависимости от конкретного магнитного материала и его структуры ширина полосы частот резонансного поглощения изменяется. Измерение коэффициента поглощения образца во внешнем магнитном поле в зависимости от частоты сигнала — называется методом широкополосного ФМР. Описанный метод позволяет различить вклад собственного затухания в ширину резонансной линии (определяемого значением постоянной Гильберта) и других факторов. С помощью данного метода могут быть получены наиболее важные параметры для ферромагнетиков, такие как магнитная анизотропия, g-фактор Ланде и гильбертово затухание. Эти значения имеют ключевое значение для предсказания свойств и оптимизации параметров магниторезистивной памяти STT-MRAM.

В диссертационной работе предложено развитие методики измерений широкополосного ФМР с целью её применения для характеристики многослойной структуры композиции магнитных материалов для STT-MRAM. Способность ячеек памяти изменять состояния определяется величиной критического тока  $I_{c0}$ , характеризующего значение проходящего через ячейку памяти электрического тока, при котором эффект переноса спинового момента сравнивается с затуханием и, соответственно, возбуждается динамика намагниченности, что приводит к переключению. Величина критического тока  $I_{c0}$  пропор-

циональна константе гильбертова затухания  $\alpha$ , что делает её экспериментальное определение на уровне композиции материалов крайне важной задачей. Предложенный в работе метод позволяет определить постоянную затухания Гильберта. Для её определения широкополосным методом ФМР требуется получить частотные зависимости для резонансного поля и полной ширины на уровне половинной амплитуды резонансной линии.



Рис. 2 — Экранированный копланарный волновод (без крышки, лежит рядом), использованный для экспериментов.

Экспериментальная установка создана на базе Института общей физики им. А. М. Прохорова. Разработанная специально для проведения измерения (см. рисунок 2) волноводная линия с образцом располагается в статическом и однородном магнитном поле, которое может быть ориентировано как перпендикулярно (ООР-конфигурация), так и параллельно плоскости образца (IP-конфигурация). Волноводная линия с образцом подключена к векторному анализатору цепей с помощью фазостабильных СВЧ кабельных сборок с малыми потерями. Измерения проводятся в диапазоне частот  $10 \text{ МГц} \leq f \leq 30 \text{ ГГц}$ . При этом параметры линии измеряются в виде безразмерного комплексного параметра  $S_{ij}(f)$ . Калибровка в отсутствие образца, позволяет учесть потери и дисперсию в кабелях и копланарном волноводе и гарантировать измерение магнитных характеристик непосредственно исследуемого материала или композиции материалов.

Переменное магнитное поле микроволновой частоты, возникающее в образце в результате прохождения переменного тока через волноводную линию, находится в диапазоне от 100 МГц до 30 ГГц. Комплексный параметр пропускания  $S_{21}$  измеряется с помощью векторного анализатора цепей при ряде значений фиксированной частоты и изменении внешнего статического магнитного поля. Аппроксимацией полученных зависимостей  $S_{21}(H_{\text{стат}})$  при

разных фиксированных частотах определяются  $H_{res}(f)$  и  $\Delta H(f)$ . Для дальнейшего анализа удобнее использовать обратную зависимость  $f_{res}(H_{стат})$ . Полученные зависимости приведены на рисунке 3.

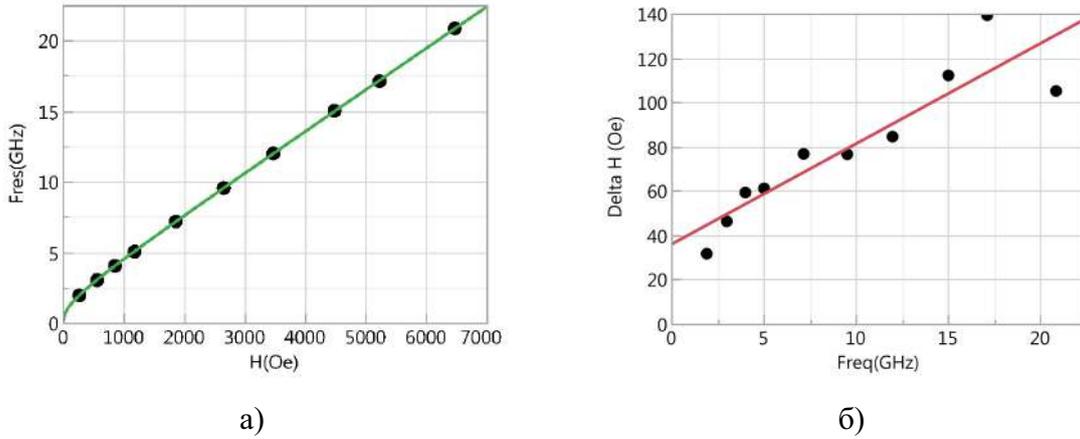


Рис. 3 — а) обратная экспериментальной зависимость  $f_{res}(H_{стат})$  и ее аппроксимация, б) экспериментальная зависимость уширения резонансной линии  $\Delta H(f)$  от частоты широкополосного ФМР.

Обратная зависимость  $f_{res}(H_{стат})$  аппроксимируется с помощью уравнения Киттеля:

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} (H_{res} - M_{eff}), \quad (6)$$

$$f^2 = \frac{\gamma^2}{4\pi^2} H_{res} (H_{res} + M_{eff}). \quad (7)$$

для соответствующей конфигурации (ООР или IP, соответственно) с двумя параметрами: эффективным магнитным моментом  $M_{eff}$  и гиромагнитным отношением  $\gamma$ , определяющим g-фактор линии ФМР. Результаты приведены на рисунке 3а. Полученная зависимость  $\Delta H(f)$  аппроксимируется с помощью следующего уравнения:

$$\Delta H = \frac{4\pi\alpha f}{\gamma} + \Delta H_0, \quad (8)$$

с параметрами  $\alpha$  и ненулевого уширения  $\Delta H_0$ , которое обычно связывается с неоднородностью локального резонансного поля.

Таким образом, представлена новая геометрия волноводной линии, которая обладает преимуществами по сравнению с существующими. Для образцов, представляющих из себя композицию магнитных материалов для производства STT-MRAM, разработанная установка позволяет определить следую-

щие параметры: гиромагнитное отношение  $\gamma$ , g-фактор Ланде, параметр гильбертова затухания  $\alpha$  и неоднородное уширение  $\Delta H_0$  и эффективная намагниченность  $M_{eff}$ , характеризующая результирующее поле анизотропии перпендикулярно плоскости образца для композиции материалов.

**Пятая глава** посвящена микромагнитному моделированию свойств магниторезистивной памяти, а также экспериментальному измерению фактора температурной стабильности IP-ячеек MRAM.

Первый параграф пятой главы посвящён моделированию и вычисление фактора температурной стабильности. Способность ячеек с течением времени сохранять информацию в англоязычной литературе принято называть retention или, иногда, retention error rate (RER), характеризуется по вероятности возникновения спонтанных ошибок, приведённой в уравнении

$$F(t) = 1 - \exp\left(\frac{-Nt}{\tau}\right) = 1 - \exp\left(\frac{-Nt}{\tau_0 \exp\left(\frac{E_b}{k_B T}\right)}\right). \quad (9)$$

Так как типичное значение  $\tau_0$  находится в диапазоне  $0.1 \div 10$  нс и для удобства часто применяют значение  $\tau_0 = 1$  нс при комнатной температуре. Фактор температурной стабильности равен отношению энергетического барьера, который должен быть преодолен намагниченностью свободного слоя ячейки памяти для того, чтобы произошло переключение между двумя стабильными состояниями ячейки памяти к температуре ячейки в единицах постоянной Больцмана  $k_B$ , что описано в (15).

В первом параграфе пятой главы работы рассматривается ячейка памяти в форме эллиптического цилиндра с длиной  $L$ , шириной  $w$  ( $L > w$ ) и толщиной  $t$ . Для определённости, считается, что плоскость ячейки находится в плоскости  $XY$ , а лёгкая ось (она же — большая) совпадает с осью  $X$ . Намагниченность насыщения  $M_S = 1100$  етл/см<sup>3</sup>, что соответствует CoFeB — типичному материалу, используемому в качестве свободного слоя ячеек памяти STT-MRAM. Для однородного обращения намагниченности свободного слоя FL, фактор температурной стабильности для ячеек с намагниченностью в плоскости может вычисляться с помощью уравнение (10). Заметим, что уравнение (10) верно только для однородного обращения вектора намагниченности и представлено на рисунке 4 (оранжевая линия).

$$\Delta = \frac{\Delta E}{k_B T} = \frac{H_{kx} M_S V}{2k_B T} = \frac{\pi^2 (M_S t)^2 w (AR - 1)}{k_B T}. \quad (10)$$

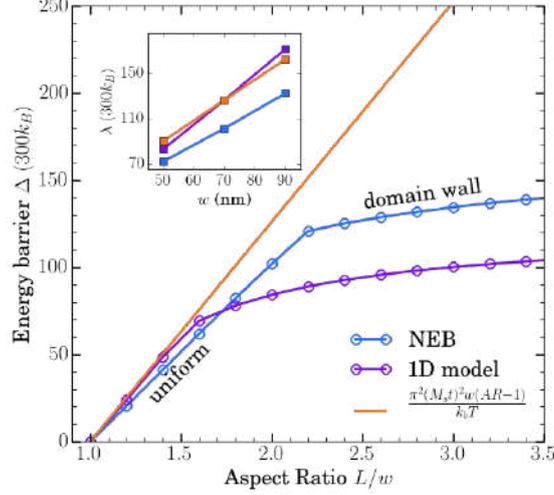


Рис. 4 — Сравнение расчётов NEB (синяя линия), приближения 1D модели (фиолетовая линия) и формулы (10) (оранжевая линия). Существует два вида переключения: однородное (линейная часть) и DW-опосредованное переключение (нелинейная часть). На вставке показан коэффициент  $\lambda$  как функция ширины  $w$  для разных подходов. Используются следующие параметры моделирования:  $w = 70$  нм,  $H_{kz} = 0$ , толщина 2.5 нм, обменная жёсткость  $A_{ex} = 10^{-6}$  эрг/см.

Поскольку критический ток  $I_{c0}$  зависит от анизотропии формы, нет необходимости увеличивать  $AR$ , чтобы улучшить способность ячейки сохранять информацию, потому что, как видно при  $AR_c > 2.2$ , эллиптическая ячейка переключается через доменную стенку. Коэффициент температурной стабильности остаётся практически постоянным и значительно ниже, чем предсказывает (10).

Чтобы проанализировать переход от однородного обращения намагниченности к обращению через DW, плотность свободной энергии записывается в сферических координатах, предполагая, что намагниченность как для однородного, так и для обращения через доменную стенку лежит в плоскости (т.е. 1D-модель)

$$\varepsilon = A_{ex} (\nabla \varphi(x))^2 + 2\pi M_s^2 (N_x \cos^2 \varphi(x) + N_y \sin^2 \varphi(x)), \quad (11)$$

где  $A_{ex}$  — обменная жёсткость и  $\varphi$  — азимутальный угол. Усреднённые факторы размагничивания  $N_{x,y,z}$  для эллиптического цилиндра могут быть вычислены численно следующим образом:

$$N_x = \frac{8}{3\pi^2\xi\epsilon^2}[AR^{-2}K(\epsilon^2) - E(\epsilon^2)] + \frac{2AR^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\phi \frac{\cos^2\phi}{g^2(\epsilon,\phi)} {}_2F_1 \left[ -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 2; -\frac{1}{\xi^2 g^2(\epsilon,\phi)} \right], \quad (12)$$

$$N_z = 1 + \frac{8}{3\xi\pi^2}K(\epsilon^2) - \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\phi \times {}_2F_1 \left[ -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 2; \frac{-1}{\xi^2 g^2(\epsilon,\phi)} \right], \quad (13)$$

$$N_y = 1 - N_x - N_z. \quad (14)$$

Здесь  $\xi = t/w$ ,  $\epsilon = \sqrt{1 - AR^2}$ ,  $g(\epsilon,\phi) = \sqrt{1 - \epsilon^2 \cos^2\phi}$ ,  ${}_2F_1 \left[ -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 2; x \right]$  — это гипергеометрическая функция, а  $K(x)$ ,  $E(x)$  — полные нормальные эллиптические интегралы Лежандра 1-го и 2-го рода соответственно.

В случае идеальной формы эллиптического цилиндра фактор температурной стабильности для когерентного обращения намагниченности может быть выражен как разность между энергией  $E_{\uparrow}$ , когда намагниченность лежит вдоль  $y$ , и энергией  $E_{\rightarrow}$ , когда намагниченность лежит вдоль оси  $x$ , так как эти направления совпадают с направлением максимума и минимума энергии соответственно, поэтому

$$\Delta = \frac{E_{\uparrow} - E_{\rightarrow}}{k_B T} = 2\pi M_s^2 V \frac{N_y - N_x}{k_B T}. \quad (15)$$

Далее в работе определяется энергетический барьер для случая переключения через доменную стенку. Предполагая, что доменная стенка имеет поляризацию, нормальную к поверхности доменной стенки, так называемая «tail-to-tail», минимизируется энергия (11) и получается выражение для угла  $\varphi(x)$

$$\varphi(x) = \tanh(x/l_e), \quad (16)$$

где  $l_e = \sqrt{\frac{A_{ex}}{2\pi M_s^2 (N_y - N_x)}}$ . Подставляя формулу (16) в формулу (11) и интегрируя по объёму, получается энергия  $E_{DW}$ , которая имеет максимум в центре эллип-

тического цилиндра. Ввиду громоздкости полученного интеграла и невозможности получения его аналитического решения, в работе он опущен.

Аналитическая аппроксимация фактора температурной стабильности как функции  $AR$  как для когерентного, так и для обращения через доменную стенку представлена на рисунке 4 (фиолетовая линия). Линейная часть может быть представлена в виде  $\Delta = \lambda (AR - 1)$  на вставке к рисунку 4, где представлен наклон  $\lambda$  как функция ширины эллиптического цилиндра  $w$ . Видно, что аналитические приближения хорошо согласуются с расчётами NEB.

В отдельной части первого параграфа пятой главы описывается экспериментальное исследование фактора температурной стабильности ячеек памяти MRAM, проведённое автором и его научным руководителем, А. Д. Белановским, в ООО "Крокус Нанoeлектроника".

На кремниевые 300 мм пластины, покрытые оксидом кремния, были напылены с помощью установки Singulus Timaris композиции материалов для IP-ячеек памяти. С помощью реактивного ионного травления на основе метанола были сформированы ячейки памяти с шириной до 100 нм (см. ??). Для проведения эксперимента было выбрано более 100 полностью рабочих ячеек памяти, которые помещаются в переменное магнитное поле. Измерение сопротивления происходит с помощью слабого электрического тока в виде повторяющихся коротких импульсов электрического тока напряжением около 100 мВ и длительностью в 500 нс. Примеры полученных описанным методом результатов приведены на рисунке 6.

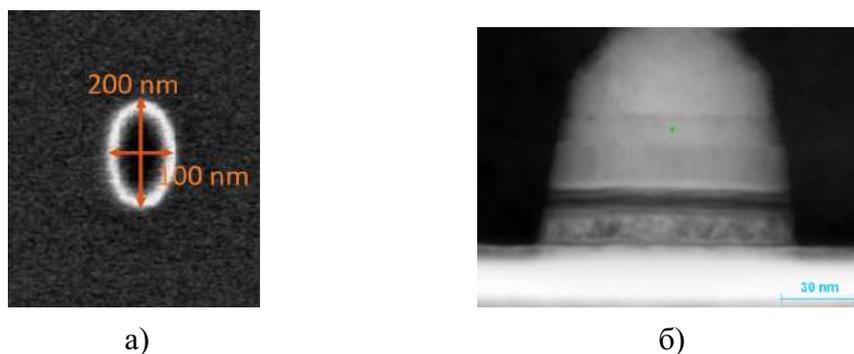


Рис. 5 — а) снимок сформированной ячейки памяти с помощью электронного микроскопа, б) поперечное сечение сформированной ячейки памяти, сделанное с помощью сфокусированного ионного пучка и снятое с помощью туннельного электронного микроскопа.

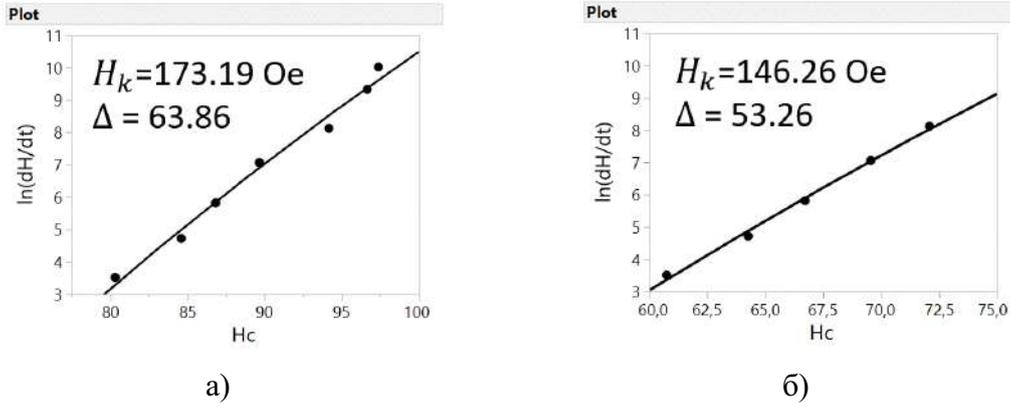


Рис. 6 — Примеры результатов обработки полученных экспериментальных данных.

Второй параграф пятой главы посвящён методам определения поля анизотропии формы ячейки памяти MRAM. Влияние анизотропии формы является важным как для IP ячеек, так и для PP ячеек. Для IP ячеек анизотропия формы непосредственно определяет величину энергетического барьера. Поле анизотропии в этом случае находится аналитически из факторов размагничивания

$$H_{k\_demag} = 4\pi M_S(N_y - N_x). \quad (17)$$

Другой важный момент связан с тем, что как для IP, так и для PP ячеек памяти, поле перпендикулярной анизотропии определяется не только композицией материалов, для которой поле перпендикулярной может быть измерено непосредственно после осаждения композиции с помощью установок VSM, MOKE или SQUID, но и анизотропией формы ячеек памяти, причём чем ячейка меньше, тем зависимость от анизотропии формы становится существенней. Аналитический вид поправки к величине поля перпендикулярной анизотропии через параметры размагничивания следующий:

$$H_{kz} = H_{kz\_FF} + 4\pi M_S(1 - N_z). \quad (18)$$

Здесь  $H_{kz\_FF}$  — поле перпендикулярной анизотропии до формирования ячеек, FF (full-film) обозначает измерение параметра на образце в виде бесконечной плоскости. Данное предположение для описанных выше экспериментов можно считать с очень хорошей точностью верным, так как толщины магнитных

материалов имеют размеры в единицы нанометров, а площадь образца составляет около  $0.25 \text{ см}^2$ .

Более точно эффекты анизотропии формы могут быть рассчитаны с помощью численного моделирования. В работе, кроме непосредственного аналитического расчёта, предложены 3 метода, основанные на численном моделировании ячеек памяти.

Первый метод основан на расчёте кривой намагничивания, получаемой при приложении магнитного поля перпендикулярно лёгкой оси ячейки. В работе для этого использован программный пакет `mutax3`, основанный на методе конечных разностей.

Второй предложенный метод основан на моделировании Ланжевеновской динамики и эффекте ферромагнитного резонанса. Применение этого метода точно только для PP-ячеек, а для определения поля анизотропии IP ячейки вдоль лёгкой оси его применение несколько ограничено сложной формой ячейки и присутствием одновременно 2 типов анизотропии: лёгкая ось и лёгкая плоскость, что, ввиду наибольшего поля анизотропии поперёк плоскости ячейки, приводит к тому, что данный метод хорошо описывает только анизотропию поперёк плоскости ячейки.

Третий предложенный метод заключается в расчёте фактора температурной стабильности (энергетического барьера между двумя стабильными состояниями ячейки памяти в единицах  $k_B T$ ) в зависимости от величины внешнего магнитного поля, направленного вдоль лёгкой оси ячейки памяти, и аппроксимации полученных результатов с помощью формулы

$$\Delta(H_{ext}) = \Delta(H_{ext} = 0) \left( 1 \pm \frac{H_{ext}}{H_K} \right)^2 \quad (19)$$

с параметром  $H_K$ , представляющим поле анизотропии вдоль рассматриваемой оси.

Третий параграф пятой главы посвящён исследованию устойчивости ячеек памяти MRAM к магнитному полю произвольной направленности. Работа проводилась с помощью микромагнитного расчётного кода `FastMag` для GPU, основанного на разбиении ячеек STT-MRAM методом конечных элементов (FEM).

Моделирование энергетического барьера в зависимости от приложенного внешнего магнитного поля произвольного направления с помощью метода NEB кода FastMag показало, что для IP и PP ячеек, энергетический барьер которых определяется энергией однородного обращения, угловые зависимости фактора температурной стабильности с хорошей точностью описываются уравнением Шэррока

$$\Delta(H_{ext}) = \Delta(H_{ext} = 0) \left( 1 \pm \frac{H_{ext} (1 + t^2)}{H_K (1 - t^2 + t^4)^{1/2}} \right)^n, \quad (20)$$

где  $t = \tan \theta^{1/3}$ , а  $\theta$  — угол между направлением внешнего магнитного поля и лёгкой осью ячейки памяти STT-MRAM. При этом показатель степени для угла в  $45^\circ$  соответствует результатам, полученным в работах других авторов. Значения показателя степени для углов, отличных от  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$  получены впервые.

**Шестая глава** посвящена аналитическому исследованию критических свойств STT-MRAM на основе температурной зависимости свойств композиции материалов и размера ячеек.

Первый параграф пятой главы посвящён анализу влияния температуры на основные параметры работы ячеек памяти.

Используя аналитические зависимости фактора температурной стабильности IP и PP ячеек с механизмами обращения вектора намагниченности как через однородное обращение, так и через доменную стенку, и экспериментальные результаты из четвёртой главы, можно оценить зависимость фактора температурной стабильности от температуры, указанные зависимости приведены на рисунке 7. Для ячеек с намагниченностью поперёк плоскости зависимость фактора температурной стабильности в диапазоне от  $-40$  до  $125^\circ\text{C}$  оказывается значительной и может превышать 50 % от значения при комнатной температуре. При этом для ячеек с намагниченностью в плоскости меньше и доходит лишь до 30 %.

Важно отметить, что, ввиду более сильной зависимости для однородного механизма обращения, для ячеек с намагниченностью перпендикулярно плоскости точка перехода между механизмами обращения намагниченности может существенно смещаться от температуры, приводя к сложным зависимостям для фактора температурной стабильности.

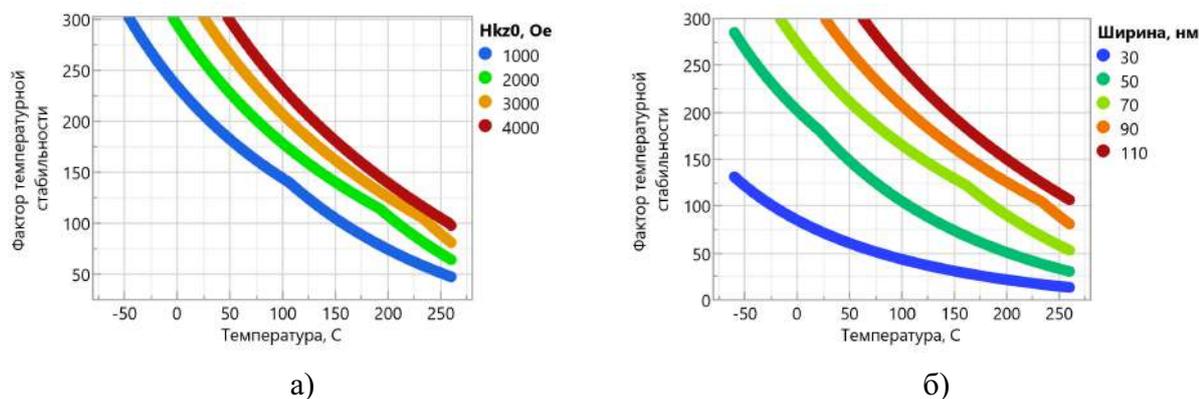


Рис. 7 — Аналитическая зависимость фактора температурной стабильности от температуры в зависимости от: а) поля перпендикулярной анизотропии композиции материалов  $H_{kz\_FF}$  при комнатной температуре, б) поперечного размера ячеек памяти.

Полученные зависимости для  $H_{kz}(T, w)$  приведены на рисунке 8. Как можно заметить, температурные зависимости оказывают на  $H_{kz}$  существенно большее влияние, чем небольшие флуктуации размеров ячеек.

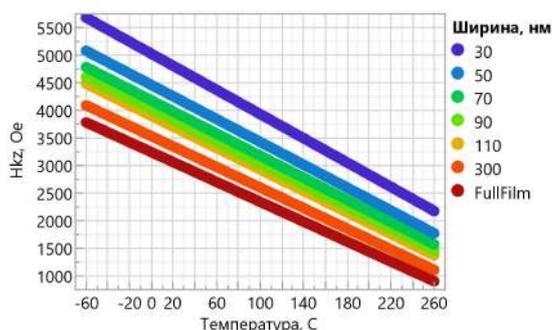


Рис. 8 — Температурные зависимости скорректированного поля перпендикулярной анизотропии в зависимости от поперечного размера ячейки памяти.

Температурные зависимости критической плотности тока для ячеек с намагниченностью поперёк плоскости приведены на рисунке 9. В диапазоне от  $-40$  до  $125$  °С изменение плотности критического тока не превосходит 30 % от значения при комнатной температуре. При этом зависимость от размеров ячеек оказывается минимальной, зависимость же от поля перпендикулярной анизотропии существенная и должна быть тщательно учтена. Указанные зависимости для критической плотности тока крайне важны, так как они характеризуют переключение ячеек памяти. Возможный диапазон токовых парамет-

ров ячеек должен быть заложен при проектировании чипа из-за его критического влияния на параметры используемых транзисторов.

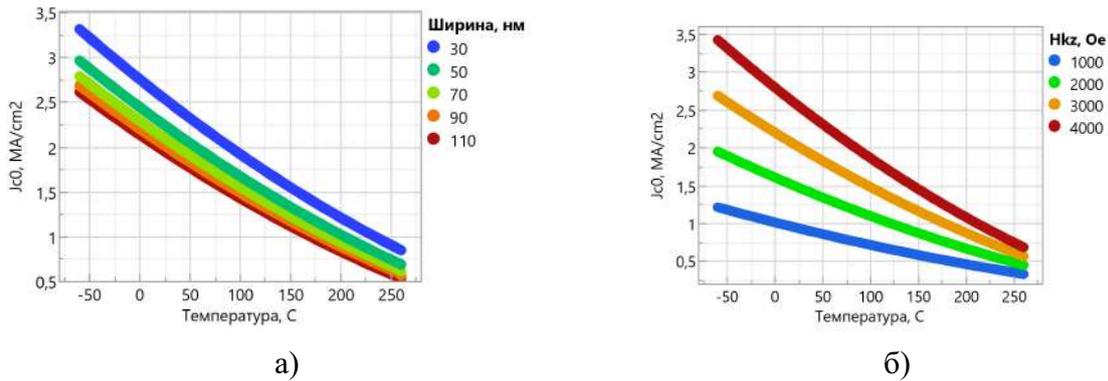


Рис. 9 — Аналитическая зависимость величины критической плотности тока  $J_{c0}$  от температуры в единицах MA/cm<sup>2</sup> в зависимости от: а) поперечного размера ячеек памяти, б) поля перпендикулярной анизотропии композиции материалов  $H_{kz\_FF}$  при комнатной температуре.

Второй параграф шестой главы посвящён изучению влияния разброса ячеек по размерам на параметры ячеек памяти. При работе с абстрактными ячейками памяти STT-MRAM аналитически или при численном моделировании обычно никак не учитывается тот факт, что в процессе формирования структур столь малого размера не удаётся добиться полной идентичности размеров. В частности, при часто используемом для формирования ячеек памяти процессе реактивного ионного травления разброс размеров ячеек может достигать 5 ÷ 10 %. Такой разброс с хорошей точностью описывается нормальным распределением с  $\sigma_w/w = 5$  %.

Как было показано в предыдущих частях работы, большинство параметров ячеек памяти STT-MRAM слабо зависят от ширины ячеек, наличие небольшого распределения по ширинам ячеек не должно оказать заметного влияния на эти параметры.

Рассмотрено влияние существующего разброса по размерам ячеек на фактор температурной стабильности. В работах Люка Тома на основе экспериментальных данных было сделано предположение о нормальном распределении для фактора температурной стабильности по массиву ячеек.

В диссертационной работе предложено выражение для вероятности непреднамеренного переключения ячеек памяти в массиве ячеек с разбросом по размерам ячеек памяти

$$P_{th} = 1 - \exp\left(\frac{-t_{tot}}{\tau_0 \exp(\Delta - \sigma_{\Delta}^2/2)}\right). \quad (21)$$

Величина  $\Delta_{eff} = \Delta - \sigma_{\Delta}^2/2$  называется эффективным фактором температурной стабильности.

Расчёт среднеквадратичного отклонения фактора температурной стабильности делается на основе известных формул статистики, а именно

$$\sigma_{\Delta}^2 = \int_0^{\infty} (\Delta_0 - \Delta(w))^2 \rho_w(w) dw. \quad (22)$$

Здесь  $\rho_w(w)$  — плотность вероятности ячейки иметь ширину  $w$ , подчиняющаяся нормальному распределению с заданным матожиданием  $w_0$  и дисперсией  $\sigma_w$ , а  $\Delta_0$  — матожидание для фактора температурной стабильности, с хорошей точностью равного  $\Delta(w_0)$ . Получившиеся зависимости для распределения фактора температурной стабильности по массиву ячеек (см. рисунок 10) имеют  $\sigma_w/w = 5\%$ .

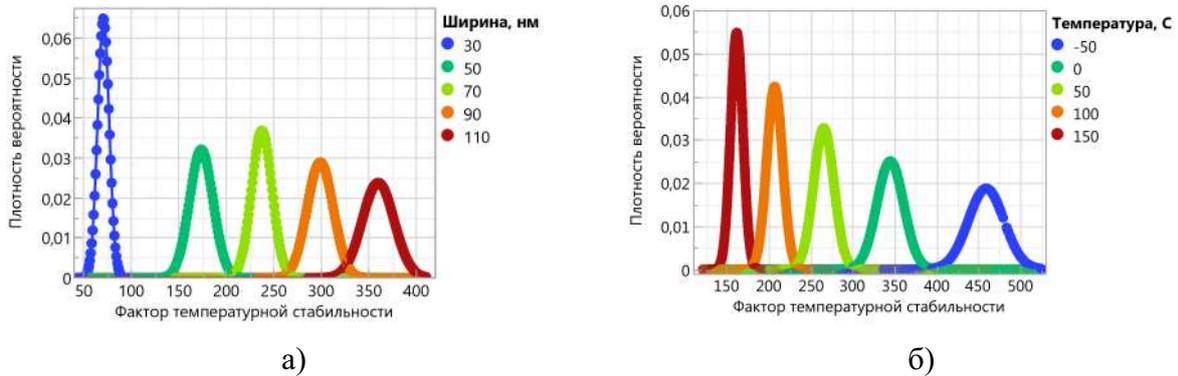


Рис. 10 — Плотность вероятности распределения фактора температурной стабильности ячеек памяти STT-MRAM в зависимости: а) от поперечного размера ячеек памяти и б) от температуры.

Воспользовавшись полученными распределениями для фактора температурной стабильности и их зависимостью от температуры, можно рассчитать температурную зависимость для эффективного фактора температурной стабильности, что показано на рисунке 11.

Крайне важно, что эффективное значение фактора температурной стабильности оказывается существенно ниже среднего значения фактора температурной стабильности по массиву ячеек. Поэтому при проектировании ячеек памяти для оценки их способности сохранять информацию стоит ориентиро-

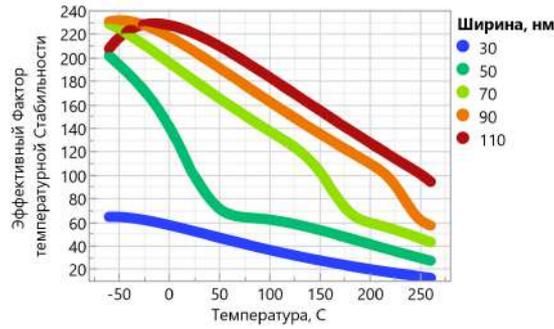


Рис. 11 — Аналитические зависимости эффективного фактора температурной стабильности от температуры при различных поперечных размерах ячеек памяти.

ваться именно значениями эффективного фактора температурной стабильности.

Ввиду того, что ошибки считывания также, как и распределение размеров ячеек по массиву, ведут к ренормализации фактора температурной стабильности в выражении для количества ошибок за определённое время, оба этих эффекта можно применить одновременно в общем выражении для эффективного RDR, то получим выражение

$$\text{RDR}_{eff}(t_{pw}, J, \Delta_{eff}) = 1 - \exp\left(\frac{-t_{pw}}{\tau_0 \exp\left((\Delta_0 - \sigma_{\Delta}^2/2) \left(1 - \frac{J}{J_{c0}}\right)^{\xi}\right)}\right), \quad (23)$$

что в приближении малых токов даст

$$\ln \text{RDR}_{eff} \approx \ln \frac{t_{pw}}{\tau_0} - (\Delta_0 - \sigma_{\Delta}^2/2) \left(1 - \frac{J}{J_{c0}}\right)^{\xi}. \quad (24)$$

Как и для фактора температурной стабильности, наибольшая разница между эффективным значением RDR для массива и медианным RDR наблюдается в области низких температур (см. рисунок 12). Однако в области высоких температур разница может оказаться критической и привести к невозможности производить считывание информации без существенного риска изменения состояния ячеек памяти.

**Приложение А** посвящено описанию полученных автором на основе результатов диссертационной работы патентов, в том числе одного патента по магниторезистивной памяти и двух патентов по применению эффекта магнит-

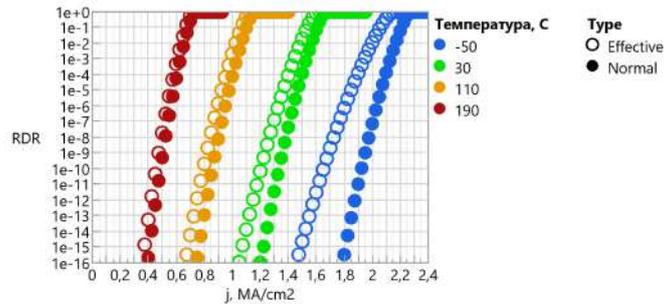


Рис. 12 — Сравнение зависимостей эффективных ошибок непреднамеренной записи ячеек памяти STT-MRAM от плотности электрического тока  $J$  в единицах  $\text{MA}/\text{cm}^2$ , для ячеек с медианной шириной 90 нм и результирующем поле перпендикулярной анизотропии в 3000 Э без учёта распределения ячеек по размерам в массиве и с учётом распределения ячеек по размерам в массиве.

ной анизотропии формы и ряда других эффектов в наборе компонент пассивной микроэлектроники.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Предложен метод построения аналитической модели ячеек памяти STT-MRAM с применением взвешенной регрессии в зависимости от ряда параметров. Рассматриваемый метод позволяет не только предсказывать поведение ячеек памяти, но и даёт возможность создать простую математическую модель, которая может быть использована в дальнейшем для разработки логики чипа памяти.
2. Глубоко доработан код `msmirt` для стохастического моделирования ячеек памяти STT-MRAM в приложении макроспина на GPU, с дополнением для учёта ряда физических эффектов (Джоулев нагрев, зависимость анизотропии от магнитного поля, учёт наведённого магнитного поля в многослойной ячейке памяти). Код апробирован на решении задач и верифицирован, в частности, тест на распределение Больцмана в присутствии внешнего магнитного поля показал точное соответствие с аналитическим решением. Сравнение результатов показало хорошее совпадение динамики распределения намагниченности, полученное методами стохастического моделирования массива ячеек, с аналитическим решением уравнения Фоккера-Планка.

Доказана его эффективность и производительность в решении ряда практических задач.

3. Предложен новый косвенный метод расчёта глубоких ошибок операций ячеек памяти STT-MRAM, основанный на расчёте вероятностей переключения ячеек памяти от начального направления вектора намагниченности и распределения векторов намагниченности по направлениям в начальный момент времени. Показана высокая точность метода вплоть до глубокого уровня ошибок.
4. Описан алгоритм исследования новых дизайнов STT-MRAM с помощью стохастического моделирования на примере исследования работоспособности DD-MTJ. Исследование динамики вектора намагниченности и состояний ячеек памяти в отсутствии температурных флуктуаций позволяет с минимальным использованием вычислительных ресурсов определять энергопотребление рассматриваемого дизайна памяти, в том числе и в сравнении с иными, ранее существовавшими дизайнами. Уменьшение величины критической плотности тока, требуемой для возбуждения динамики вектора намагниченности, показывает потенциальное превосходство нового дизайна над ранее существовавшими. Исследование динамики вектора намагниченности с учётом термофлуктуаций позволяет оценить способность ячеек памяти сохранять имеющуюся информация, оценить вероятность возникновения ошибок непреднамеренной записи при считывании и ошибок записи при операциях записи.
5. Проведено экспериментальное исследование температурных зависимостей базовых параметров композиций магнитных материалов работоспособных ячеек памяти MRAM. Исследования производились для двух конфигурациях композиций магнитных материалов: одна композиция с вектором намагниченности в плоскости образца и одна с вектором намагниченность направленным по нормали к плоскости образца. Полученные результаты находятся в соответствии с опубликованными ранее результатами других авторов для схожих конфигураций магнитных материалов.
6. Предложено развитие методики измерений широкополосного ФМР с целью её применения для характеристики многослойной структуры

композиции магнитных материалов для STT-MRAM. Представлена новая геометрия волноводной линии, которая обладает преимуществами по сравнению с существующими. Проведено экспериментальное исследование характеристик композиций магнитных материалов ячеек памяти STT-MRAM с помощью установки ФМР.

7. Получена аналитическая аппроксимация фактора температурной стабильности как функции  $AR$  как для когерентного, так и для обращения через доменную стенку. Проведено исследование с помощью кода FastMag зависимостей энергетического барьера ячеек памяти STT-MRAM от параметров ячейки и внешнего магнитного поля произвольной направленности. Показана высокая чувствительность IP ячеек ко внешнему магнитному полю, а также высокая устойчивость к нему PP ячеек.
8. Предложены новые методы определения полей анизотропии формы ячеек памяти MRAM с применением микромагнитного моделирования.
9. Показано, что показатель степени в уравнении Шеррока в применении к стабильности ячеек памяти MRAM с путём наименьшей энергии между двумя стабильными состояниями, определяющимся когерентным обращением намагниченности, с хорошей точностью равен  $3/2$  практически при всех направлениях намагниченности, за исключением области менее  $10^\circ$  в окрестности направлений поля вдоль оси и перпендикулярно оси ячеек, в которых показатель степени резко спадает от значения равного 2.
10. С использованием описанного выше алгоритма исследования дизайнов STT-MRAM, проведено аналитическое исследование ошибок операций STT-MRAM с использованием полученных экспериментальных зависимостей для свойств композиции материалов ячеек памяти.
11. Получены уравнения для определения эффективного уровня ошибок RDR для массива ячеек памяти STT-MRAM с учётом плотности электрического тока и разброса ячеек памяти в массиве по размерам.
12. На основе проведённых исследований был предложен и запатентован новый дизайн комбинированных ячеек памяти STT-MRAM с на-

магнитичностью в плоскости, обладающий повышенной устойчивостью к воздействию внешнего магнитного поля, а также дизайн комбинированных ячеек памяти, позволяющий проверять достоверность записанной информации.

13. На основе проведённых исследований анизотропии формы и устойчивости ко внешним магнитным полям предложен и запатентован новый дизайн ферромагнитных сердечников для технологий кремниевой микроэлектроники. Описанная технология позволила предложить и запатентовать новый дизайн катушек индуктивности и микротрансформаторов нано- и микрометрового размера.

## **Публикации автора по теме диссертации**

1. Magnetic memory with a switchable reference layer / A. V. Khvalkovskiy [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2018. — Vol. 124, no. 13. — P. 133902.
2. *Khvalkovskiy A. V., Mikhailov A. P., Apalkov D.* Self-initializing dual MTJ MRAM cell design. // *MMM Intermag 2016 Joint Conference, January 11-15, 2016, San Diego, California: Abstracts*. — 2016.
3. Energy barrier and domain wall thermal reversal in magnetic elliptic cylinders / A. D. Belanovsky [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2018. — Vol. 124, no. 22. — P. 223903.
4. Thermal stability vs cell size for IP STT-MRAM: theory and experiment. / A. D. Belanovsky [и др.] // *Moscow International Symposium on Magnetism, 1 – 5 July 2017: Book of Abstracts*. — 2017.
5. Tolerance of IP and PP MRAM to external magnetic field. / A. P. Mikhailov [и др.] // *Moscow International Symposium on Magnetism, 1 – 5 July 2017: Book of Abstracts*. — 2017.
6. Применение эффекта ферромагнитного резонанса для квалификации STT-MRAM / А. П. Михайлов [и др.] // *Журнал Радиоэлектроники*. — 2020. — № 8.
7. Температурные зависимости свойств памяти STT-MRAM / А. П. Михайлов [и др.] // *ТРУДЫ МФТИ*. — 2020. — т. 12, № 3. — с. 104–122.

8. Сердечник катушки индуктивности (варианты): патент № 2705175 / А. П. Михайлов [и др.]. — 2018. — Бюл. № 31.
9. *Михайлов А. П., Дмитриев Н. Ю.* Тонкоплёночный тороидальный сердечник с анизотропией формы, катушка индуктивности и трансформатор, его содержащие: патент № 2716282. — 2018. — Бюл. № 8.