

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Данилов Георгий Егорович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
СКАНИРУЮЩЕЙ ГМИ-МАГНИТОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

1.3.8 Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Гудошников Сергей Александрович

Москва – 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Аморфные ферромагнитные микропровода, покрытые стеклянной оболочкой, с диаметром металлической жилы 10–20 микрометров, обладают уникальными электродинамическими характеристиками. В слабых магнитных полях в микропроводах на основе кобальта может наблюдаться эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ), заключающийся в существенном изменении импеданса микропровода при возбуждении небольшим высокочастотным током [1]. На основе этого эффекта развиваются технологии создания миниатюрных высокочувствительных ГМИ-датчиков для измерения однородных магнитных полей, таких как вариации магнитного поля Земли или остаточные поля внутри магнитных экранов. Благодаря своим малым размерам ГМИ-датчики могут использоваться и в сканирующих магнитометрах, предназначенных для измерения и визуализации неоднородных локальных магнитных полей вблизи поверхности образцов. Анализ распределения магнитных полей позволяет получать дополнительную информацию о намагниченности и ряде других магнитных характеристик образцов.

В настоящее время существуют различные методы сканирующей магнитометрии, которые используются в биомедицинских приложениях (магнитокардиография и магнитоэнцефалография), в области магнитного неразрушающего контроля и при проведении научных физических исследований. Эти методы отличаются чувствительностью по уровню регистрируемого магнитного сигнала, размерами измеряемых магнитных неоднородностей, диапазоном внешних подмагничивающих полей и температур, стоимостью и т. д. Например, метод магнитно-силовой микроскопии позволяет визуализировать локальные магнитные неоднородности размерами порядка несколько микрометров, но данный метод позволяет получать только качественное изображение магнитных неоднородностей. Метод СКВИД-магнитометрии обладает рекордной (менее 0,01 нТл) чувствительностью по магнитному полю, однако из-за большого расстояния между датчиком и исследуемым объектом (необходимости охлаждения датчиков до криогенных температур) позволяет различать магнитные неоднородности объектов размерами порядка 5–10 мм. Для сканирующих магнитометров с датчиками на основе эффекта Холла характерна невысокая чувствительность по магнитному полю (порядка 1 мкТл), но они позволяют детектировать магнитные особенности размерами в доли миллиметров.

В данной работе для измерения локальных магнитных полей слабомагнитных образцов предлагается использовать новый магнитный ГМИ-датчик на основе аморфного ферромагнитного микропровода с циркулярной магнитной анизотропией [2]. Такие ГМИ-датчики позволяют измерять магнитные особенности размерами порядка единиц миллиметров

и при этом характеризуются высокой магнитной чувствительностью, порядка 10 нТл. Ожидается, что применение ГМИ-датчиков существенно расширит возможности метода сканирующей магнитометрии при исследованиях локальных магнитных свойств новых слабомагнитных материалов и образцов.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью данной работы являлось дальнейшее развитие методов и средств сканирующей ГМИ-магнитометрии для количественного измерения и визуализации пространственного распределения магнитных полей рассеяния вблизи образцов с малым, менее $1 \text{ мкА}\cdot\text{м}^2$ магнитным моментом, представляющих собой слаботочные проводящие структуры, ансамбли магнитных наночастиц и аморфные ферромагнитные микропровода.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Модернизация имеющегося сканирующего ГМИ-магнитометра, включающая:
 - добавление источника продольного магнитного поля для намагничивания образцов,
 - оптимизацию измерительной части, обеспечивающей регистрацию перпендикулярной компоненты магнитного поля вблизи поверхности намагниченного образца,
 - разработку специализированного программного обеспечения для регистрации и визуализации распределения перпендикулярной компоненты магнитного поля и сравнения с модельными расчетами.
2. Разработка методик магнитной калибровки выходного сигнала ГМИ-датчика и проведение количественных измерений перпендикулярной компоненты локальных неоднородных магнитных полей рассеяния образца; определение пространственного разрешения сканирующего ГМИ-магнитометра.
3. Разработка методики и проведение количественных измерений магнитных полей рассеяния вблизи поверхности образцов с остаточным магнитным моментом менее $1 \text{ мкА}\cdot\text{м}^2$; исследования остаточной намагниченности образцов, содержащих микроконцентрации магнитных наночастиц оксида железа.
4. Разработка методики и проведение количественных измерений магнитных полей рассеяния вблизи поверхности образцов при их намагничивании продольным магнитным полем; исследования распределения намагниченности образцов аморфных ферромагнитных микропроводов на основе Fe.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальный метод сканирующей ГМИ-магнитометрии с улучшенными характеристиками по магнитной чувствительности (до 10 нТл), пространственному разрешению (до 1,3 мм) и возможностью задания продольного поля подмагничивания в

диапазоне ± 600 А/м может быть использован для изучения пространственных распределений перпендикулярной компоненты магнитных полей объектов с магнитным моментом менее $1 \mu\text{A}\cdot\text{m}^2$.

2. Способ магнитной калибровки сканирующего ГМИ-магнитометра по известному пространственному распределению магнитного поля двухпроводной линейной токовой структуры, позволяет определить эффективный размер ГМИ-датчика, его магнитную чувствительность и получить количественное распределение локальных магнитных полей, порождаемых исследуемым объектом.

3. Количественные данные пространственных распределений магнитных полей образцов знаков текста, напечатанных на лазерном принтере и содержащих микроколичества наночастиц оксида железа, могут быть использованы при определении остаточной намагниченности и остаточного магнитного момента, а также концентрации магнитных наночастиц оксида железа, содержащихся в отдельном текстовом знаке

4. Измерение пространственных распределений магнитных полей образцов аморфных ферромагнитных микропроводов на основе Fe, при их намагничивании в продольных магнитных полях, позволяет определить величину намагниченности насыщения, ширину замыкающих доменов и значение критического магнитного поля, при котором происходит скачкообразное переключение намагниченности микропровода.

Научная новизна. Представленный в данной работе метод сканирующей магнитометрии, в котором в качестве чувствительного элемента используется ГМИ-датчик, является новым. В работе впервые предложена специальная процедура калибровки ГМИ-датчика, позволяющая получать количественные значения неоднородных локальных магнитных полей вблизи исследуемых объектов.

Для образцов знаков текста, содержащих микроконцентрации магнитных наночастиц оксида железа Fe_3O_4 , впервые получены их количественные магнитные изображения и определена величина остаточного магнитного момента. Показано, что неинвазивные измерения остаточного магнитного момента образцов текстов могут использоваться для их идентификации в задачах судебной экспертизы.

Помимо образцов, содержащих ансамбли магнитных наночастиц для одномерных магнетиков в виде аморфных ферромагнитных микропроводов на основе Fe, впервые показано, что распределение магнитных полей вблизи отрезка микропровода позволяет получить данные о распределении намагниченности микропровода и оценить ширину замыкающих доменов микропровода во внешнем поле произвольной величины.

Практическая значимость работы. Представленные в работе результаты являются примерами потенциальных применений разработанного высокочувствительного миниатюрного ГМИ-датчика и метода сканирующей ГМИ-магнитометрии в целом. В частности, результаты измерений магнитных полей рассеяния вблизи токовых структур показывают возможность бесконтактного определения расположения токовых линий, нахождения величины тока в них, обнаружения неисправностей в виде закороток в электронных схемах и другие применения.

На основе полученных результатов измерений остаточных магнитных полей знаков текста, содержащих микрограммы магнитных наночастиц, могут быть разработаны методы определения подлинности документов и ценных бумаг для применений в задачах судебной экспертизы, а также методы определения микроколичеств магнитного вещества в смесях или биологических тканях.

Возможность регистрации магнитных полей миллиметровых отрезков аморфных ферромагнитных микропроводов показывает потенциальную возможность разработки на их основе магнитных микрометок, которые могут устанавливаться на поверхности различных изделий и обеспечивать подтверждение их подлинности.

Достоверность полученных результатов. В работе были получены результаты, основанные на проведении экспериментов с применением современного научного оборудования и стандартных методов статистической обработки данных. Набор взаимодополняющих экспериментальных методик, воспроизводимость результатов и правильный выбор приближений позволили добиться достоверности полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты научно-квалификационной работы были представлены на 7 российских и международных конференциях в виде стендовых и устных докладов: The Joint European Magnetic Symposia 2020 JEMS2020 (7-11.12.2020, онлайн), 11th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (17-23.10.2021, Мугла, Турция), VIII Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” (22-26.08.2022, Казань, РФ), 12th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (13-19.10.2022, Олюдениз, Турция), Современная химическая физика XXXIV Симпозиум (16-25.09.2022, Туапсе, РФ), L Международная научно-практическая конференция «Российская наука в современном мире» (30.11.2022, Москва, РФ), Современная химическая физика XXXV Симпозиум (18-28.09.2023, Туапсе, РФ).

Результаты диссертационного исследования были получены в рамках выполнения 2 грантов: гранта Российского научного фонда №20–19–00607, <https://rscf.ru/project/20-19->

00607, программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», проект СП1-П01.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в критическом анализе литературы по теме диссертационной работы. Выполнил значительный объем экспериментальных исследований (подготовка образцов, разработка методик исследований, проведение измерений, разработка программного обеспечения и написание технической документации к ней, визуализация результатов). Принимал участие в разработке теоретических моделей, формировании научных положений, анализе и оформлении результатов в виде публикаций и научных докладов.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 2 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых Scopus, а также 1 статья опубликована в журнале из списка рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, и 7 тезисах докладов. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ рег. № 2023682992 и 1 патент на изобретение рег. № 2814644.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и списка собственных публикаций. Полный объем работы составляет 96 страниц, включая 37 рисунков, 1 таблицу, 14 формул, 113 литературных ссылок и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, выделяются ключевые положения, выносимые на защиту и показано научное и практическое значение полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы и проведен анализ существующих методов сканирующей магнитометрии, позволяющих измерять и визуализировать неоднородные локальные магнитные поля вблизи поверхности образцов. Основное внимание уделено особенностям сканирующих магнитометров, в которых в качестве чувствительного элемента используется ГМИ-датчик.

Принцип работы большинства сканирующих магнитометров заключается в относительном перемещении миниатюрного магнитного датчика вблизи поверхности образца,

поточечном измерении распределения компоненты магнитного поля над его поверхностью и последующем представлении полученных данных в виде двумерных или трехмерных изображений магнитного поля, порождаемого намагниченностью образца. К наиболее распространенным сканирующим магнитометрам относятся магнитно-силовые микроскопы [3], сканирующие Холл- [4] и СКВИД-магнитометры [5,6]. Относительно недавно появились сканирующие ГМИ-магнитометры [7], в которых используются высокочувствительные ГМИ-датчики [8]. Указанные методы различаются по уровню магнитной чувствительности, пространственному разрешению, динамическому диапазону, уровню внешних подмагничивающих полей, рабочей температурой и т. д. На рисунке 1 приведена сравнительная диаграмма магнитных полей и характерных размеров образцов, для которых целесообразно использование того или иного метода сканирующей магнитометрии. Как следует из представленных данных, сканирующие ГМИ-магнитометры занимают промежуточное положение между магнитно-силовыми микроскопами и сканирующими СКВИД-магнитометрами.

Особенности сканирующих ГМИ-магнитометров определяются характеристиками ГМИ-датчиков. В данной работе используется ГМИ-датчик на основе аморфного ферромагнитного микропровода (АФМ) с циркулярной магнитной анизотропией [8]. АФМ покрыты стеклянной оболочкой, с диаметром металлической жилы 10–20 микрон, обладают уникальными магнитомягкими свойствами, которые определяются составом металлической жилы и особой технологией их изготовления (метод Улитовского – Тейлора) [9]. В слабых магнитных полях в АФМ на основе кобальта может наблюдаться эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ), заключающийся в значительном (более 100%) изменении компонент тензора импеданса АФМ при воздействии внешнего магнитного поля. В нашем случае, в используемом ГМИ-датчике измеряется недиагональная компонента тензора импеданса АФМ (недиагональный ГМИ-эффект) [10].

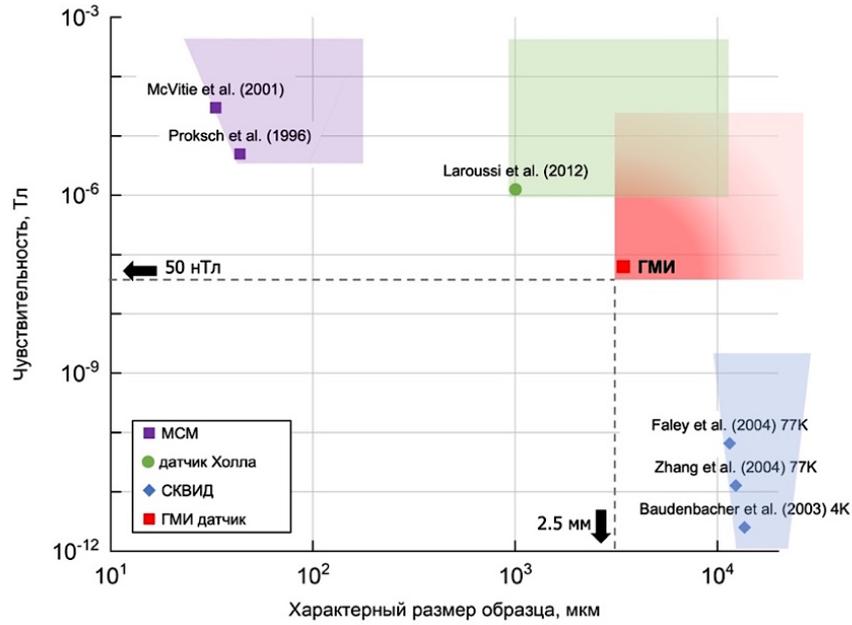


Рисунок 1 – Сравнение характеристик различных сканирующих магнитометров. Красная область обозначает диапазон магнитных полей и характерных размеров образцов доступных сканирующему ГМИ-магнитометру.

В прототипе измерительной системы ГМИ-датчик был изготовлен из отрезка аморфного ферромагнитного микропровода (АФМ) в стеклянной оболочке с составом металлической жилы Co-Fe-Cr-Si-B диаметром 13,5 мкм, полным диаметром 26 мкм и длиной 4 мм. К концам отрезка АФМ были припаяны тонкие подводящие провода для задания возбуждающего переменного тока. На микропровод была намотана миниатюрная приемная катушка диаметром 0.5 мм и длиной 4 мм [7]. Вся конструкция крепилась на небольшой текстолитовой плате, причем один конец АФМ был вынесен за пределы текстолитовой платы, чтобы иметь возможность этим концом приблизиться к исследуемому объекту. Схема регистрации сигналов ГМИ-датчика и его передаточная вольт-полевая характеристика приведены на рисунке 2а, б, соответственно.

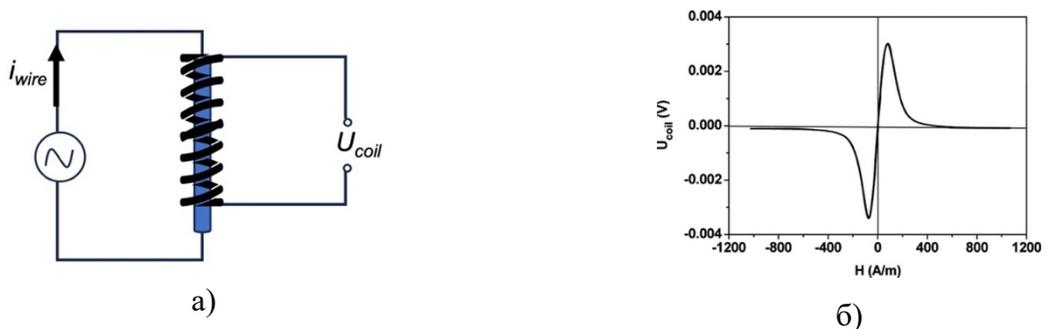


Рисунок 2 – Электрическая схема регистрации сигналов ГМИ-датчика (а) и его передаточная вольт-полевая характеристика (б).

На рисунке 3а показано взаимное расположение ГМИ-сенсора и образца в процессе сканирования и поточечного измерения вертикальной компоненты магнитного поля над образцом, а на рисунке 3б приведена структурная схема прототипа сканирующего ГМИ-магнитометра. Следует подчеркнуть, что измерения проводятся внутри магнитного экрана, ослабляющего магнитное поле Земли ($\sim 50\ 000$ нТл) более чем в 500 раз, до уровня 100 нТл. Динамический диапазон сканирующего ГМИ-магнитометра составлял $\pm 10\ 000$ нТл. В работах [7,8] приведены результаты измерений магнитных полей различных объектов, таких как разнообразные токовые структуры, ансамбли магнитных наночастиц, аморфные ферромагнитные микропровода и др. Данные результаты показывают что, сканирующие ГМИ-магнитометры, благодаря сочетанию малых размеров и высокой магнитной чувствительности ГМИ-датчиков, могут расширить область исследований локальных магнитных свойств слабомагнитных материалов и образцов.

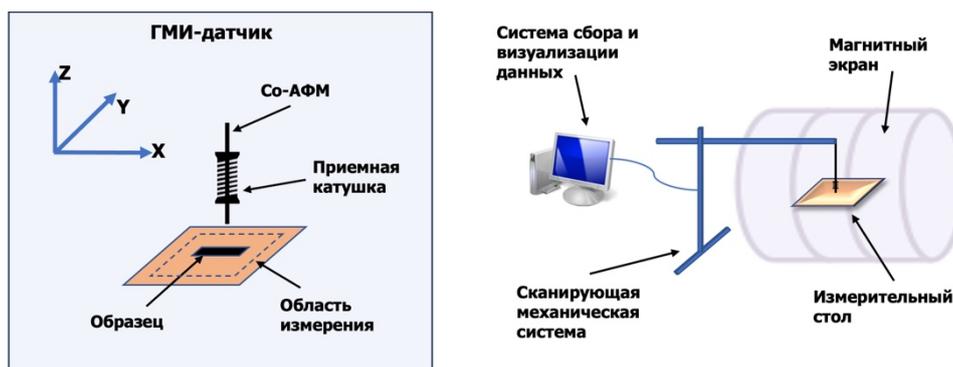


Рисунок 3 – Схема прототипа сканирующего ГМИ-магнитометра и детальное изображение измерительной части, показывающее взаимную ориентацию исследуемого образца и ГМИ-сенсора.

Поэтому целью данной работы являлось дальнейшее развитие методов и средств сканирующей ГМИ-магнитометрии для количественного измерения и визуализации пространственного распределения магнитных полей рассеяния вблизи образцов с малым, менее $1\ \mu\text{A}\cdot\text{m}^2$ магнитным моментом, представляющих собой слаботочные проводящие структуры, ансамбли магнитных наночастиц и аморфные ферромагнитные микропровода.

Во второй главе представлено описание проведенной модернизации сканирующего ГМИ-магнитометра, в ходе которой в существующий лабораторный макет были дополнительно включены система колец Гельмгольца, обеспечивающая задание продольного магнитного поля в диапазоне ± 600 А/м ($\pm 750\ 000$ нТл), и ГМИ-датчик с улучшенными характеристиками по магнитной чувствительности (10 нТл) и пространственному разрешению

(~1,3 мм). Было разработано специализированное программное обеспечение для обработки и визуализации магнитных данных. Сделанные усовершенствования позволили проводить измерения пространственного распределения перпендикулярной компоненты магнитного поля вблизи поверхности исследуемых объектов при их намагничивании внешним магнитным полем.

В отличие от ранее используемых ГМИ-датчиков [7], в новой конструкции ГМИ-датчика приемная катушка содержала 100 витков. Она изготавливалась из медной проволоки диаметром 20 мкм, её внутренний диаметр и высота были уменьшены до минимальных размеров. Катушка располагалась вблизи измерительного конца отрезка микропровода длиной 5 мм. Сам микропровод предварительно отжигался по определенной технологии, чтобы получить максимальный ГМИ отклик. В результате, как было установлено в дальнейших экспериментах, в разработанном ГМИ-датчике удалось значительно улучшить магнитную чувствительность и пространственное разрешение с 50 нТл до 10 нТл и с 2,4 мм до 1,3 мм, соответственно.

Для намагничивания исследуемого объекта в макет сканирующего ГМИ-магнитометра была включена система дополнительных колец Гельмгольца (КГ), обеспечивающая задание постоянного однородного магнитного поля вдоль оси Y . Разработанная конструкция обеспечивала возможность юстировки положения КГ таким образом, чтобы создаваемое вдоль оси Y магнитное поле было строго ортогонально оси ГМИ-датчика, измеряющего z -компоненту магнитного поля, $B_z(x, y)$. Выбранная ориентация исследуемого объекта, системы КГ и ГМИ-датчика приведена на рисунке 4 и позволяет, с одной стороны, задавать магнитное поле вдоль оси Y чтобы намагнитить исследуемый объект и минимизировать влияние на ГМИ-датчик, а с другой стороны, сохранить высокую чувствительность ГМИ-датчика при измерениях нормальной компоненты локальных магнитных полей $B_z(x, y)$, порождаемых намагниченностью объекта. В результате изготовленная система КГ обеспечивала возможность задания магнитных полей вдоль оси Y в пределах ± 600 А/м ($\pm 750\,000$ нТл). При этом магнитная чувствительность ГМИ-датчика по $B_z(x, y)$ компоненте магнитного поля сохранялась на уровне ~ 10 нТл, при полном динамическом диапазоне $\pm 20\,000$ нТл. Наличие системы КГ позволило методом сканирующей ГМИ-магнитометрии проводить измерения магнитных полей рассеяния образцов при их намагничении внешним продольным магнитным полем.

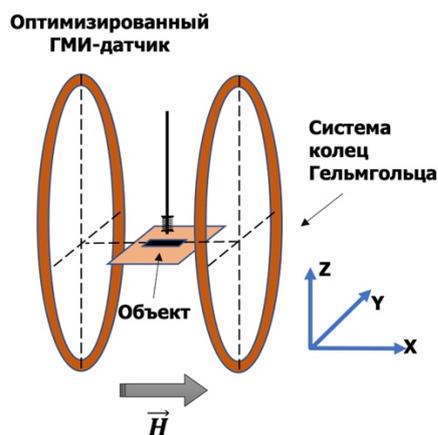


Рисунок 4 – Взаимная ориентация исследуемого объекта, системы КГ и ГМИ-датчика в модернизированной версии сканирующего ГМИ-магнитометра.

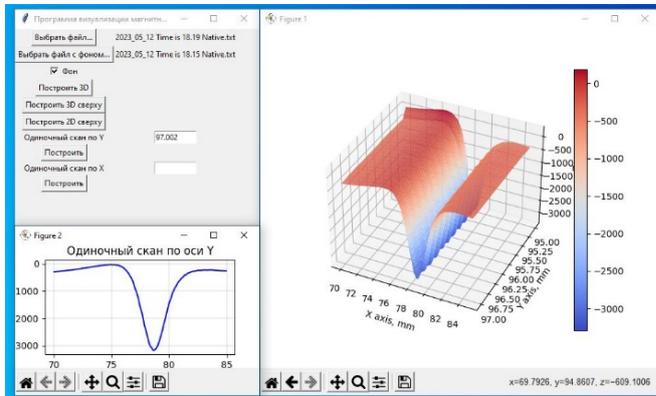
Специализированное программное обеспечение (далее – программа) предназначено для обработки и визуализации данных, на основе которых предлагается строить трехмерные и двумерные графики, аппроксимировать экспериментальные данные с задаваемыми теоретическими моделями и находить подгоночные параметры. Программа представляет собой отдельное оконное приложение, разработанное на языке Python 3.0. Интерфейс программы представлен на рисунке 5.

Программа имеет функционал для построения трехмерных графиков на основе обработанных данных – возможности включают настройку осей координат, выбор типа (2D или 3D) и масштабирование графика. Обработанные данные представляют собой таблицу с колонками X, Y, Z. Значения элементов из колонки Z соответствуют величинам магнитного поля и рассматриваются как z-координаты точек над плоскостью, определяемые координатами x и y. Построенная с помощью 3D-функции поверхность представляет собой сетчатую структуру, где цвет ячеек соответствует градиенту согласно величине магнитного поля.

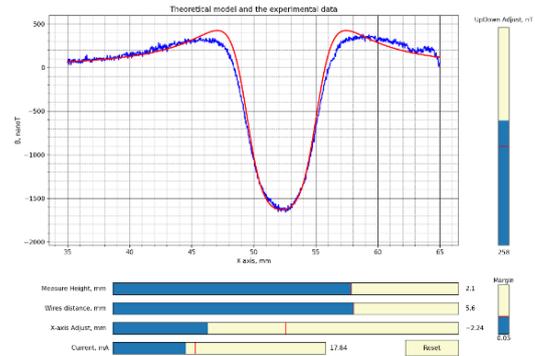
С помощью данной программы можно выделять произвольные вертикальные сечения из трехмерных графиков (рисунок 5а). Эта функция обеспечивает более детальное представление о таких проекциях (профилях). Также важной особенностью программы является аппроксимация экспериментальных данных в расчетных моделях на всём объеме доступных данных. Для решения этой задачи в программе реализован метод наименьших квадратов. В результате аппроксимации выдаются подгоночные параметры, то есть калибровочные коэффициенты, соответствующие конкретной расчетной модели (рисунок 6б).

Таким образом, разработанное специализированное программное обеспечение позволяет визуализировать пространственное распределение магнитных полей рассеяния и получить аналитические функции, наилучшим образом описывающие экспериментальные

данные. Полученные калибровочные параметры могут быть использованы для дальнейших количественных измерений магнитных полей токонесущих объектов.



а)



б)

Рисунок 5 – а) Интерфейс программы для построения трехмерных графиков; б) вид функционала аппроксимации экспериментальных данных с расчетными.

В третьей главе предложен и реализован способ получения количественных магнитных данных при измерениях с помощью сканирующего ГМИ-магнитометра. В качестве образца, создающего калибровочные магнитные сигналы, использовалась длинная двухпроводная линия (далее – двухпроводная линия) с протекающими по ней известными противоположно направленными токами $\pm I_0$. Необходимость дополнительной магнитной калибровки ГМИ-датчика при измерении быстро меняющихся в пространстве полей связана с эффективным усреднением неоднородного магнитного поля по длине отрезка микропровода ГМИ-датчика.

В процессе калибровочных испытаний в качестве образцов использовались двухпроводные линии шириной $2l$ и с известным протекающим током. Для двухпроводных линий с заданными параметрами (I, Δ) с помощью хорошо известных формул могут быть получены распределения нормальной компоненты магнитной индукции $B_z^*(I, x, z, \Delta)$ в произвольной точке с координатами (x, z) в исследуемой области пространства. Кроме этого, магнитное поле двухпроводной линии полностью совпадает с магнитным полем тонкого полосового перпендикулярно намагниченного магнетика тех же размеров, т. е. двухпроводные линии являются токовым аналогом перпендикулярно намагниченных образцов магнитного материала.

Рассмотрим бесконечную двухпроводную линию, лежащую в плоскости XY вдоль оси Y, с координатами проводов $x = \pm l$ (рисунок 6а). Пусть по проводам текут противоположно

направленные постоянные токи силой $\pm I_0$. С помощью известных формул распределение нормальной компоненты магнитной индукции можно записать в виде:

$$B_z(x, z, \Delta) = 2 \cdot 10^2 I_0 \left(\frac{x - \Delta}{(x - \Delta)^2 + z^2} - \frac{x + \Delta}{(x + \Delta)^2 + z^2} \right), \quad (1)$$

где: магнитная индукция B_z измеряется в нанотеслах, ток I_0 – в миллиамперах, а расстояния x , z в миллиметрах. Используя предварительные результаты расчетов магнитных полей двухпроводных линий, для дальнейших исследований были выбраны линии с промежуточными расстояниями $2\Delta_1 = 1,6$ мм $2\Delta_2 = 5,6$ мм. На рисунках бб,в приведены расчетные графики (профили) распределения вертикальной компоненты вектора индукции магнитного поля на высоте $z = 1$ мм и $1,4$ мм от указанных двухпроводных линий с протекающим по ним током амплитудой 10 мА.

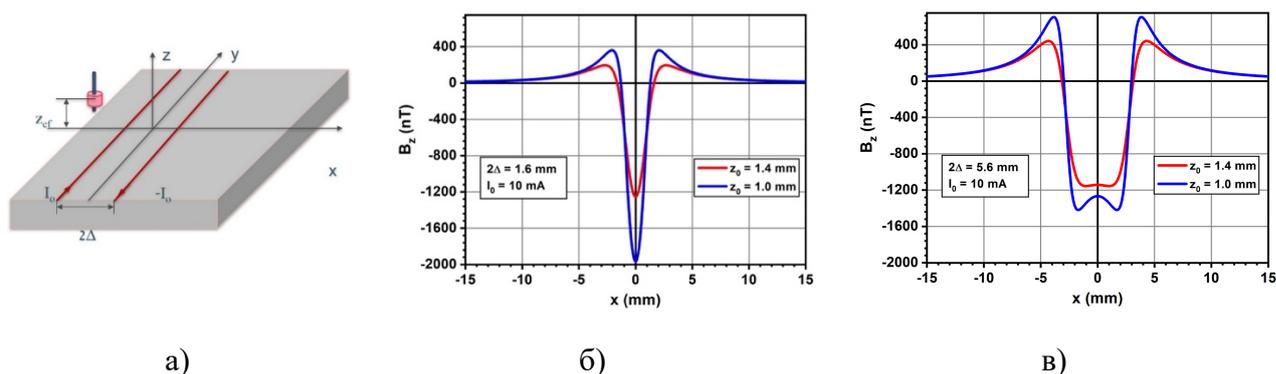


Рисунок 6 – а) Схематическое изображение чувствительного ГМИ-датчика и двухпроводной линии в сканирующем ГМИ-магнитометре; расчетные графики (профили) B_z компоненты над двухпроводной линией на высоте 1 мм и $1,4$ мм с током 10 мА: б) с промежуточным расстоянием $2\Delta_1 = 1,6$ мм; в) с промежуточным расстоянием $2\Delta_2 = 5,6$ мм.

Для тестовых измерений, из медной проволоки диаметром $0,04$ мм, были изготовлены два образца двухпроводных линий длиной 20 мм с промежуточными расстояниями $2\Delta_1 = 1,6$ мм и $2\Delta_2 = 5,6$ мм. При измерениях B_z компоненты магнитной индукции с помощью сканирующего ГМИ-магнитометра, величина задаваемого тока в изготовленные двухпроводные линии варьировалась от 3 до 30 мА. Измерения проводились над центральной частью двух указанных образцов двухпроводных токовых линий на трех разных высотах $0,1$ мм, $0,6$ мм и $1,1$ мм. Величина $0,1$ мм является минимальной высотой, на которой кончик отрезка микропровода ГМИ-датчика может позиционироваться относительно плоскости расположения образца двухпроводной линии не касаясь её. Вторая и третья высоты измерения

были выбраны выше первой на 0,5 мм и 1 мм, соответственно. При сканировании на каждой выбранной высоте измерялась серия из 10 проходов. Были проведены измерения нормальной компоненты магнитного поля, B_z , вдоль оси X на участке длиной 30 мм с интервалом в 0,05 мм, а расстояние между соседними измерениями по оси Y составляло 0,05 мм.

На рисунках 7а,б синим цветом показаны исходные экспериментальные профили B_z компоненты магнитной индукции над двухпроводными линиями с током 10 мА на высоте 0,1 мм, полученные с учетом калибровки ГМИ-датчиков в однородном магнитном поле. При этом расчетные профили магнитных полей над двухпроводными линиями с теми же параметрами с током 10 мА и на высоте 0,1 мм значительно отличались от экспериментальных данных.

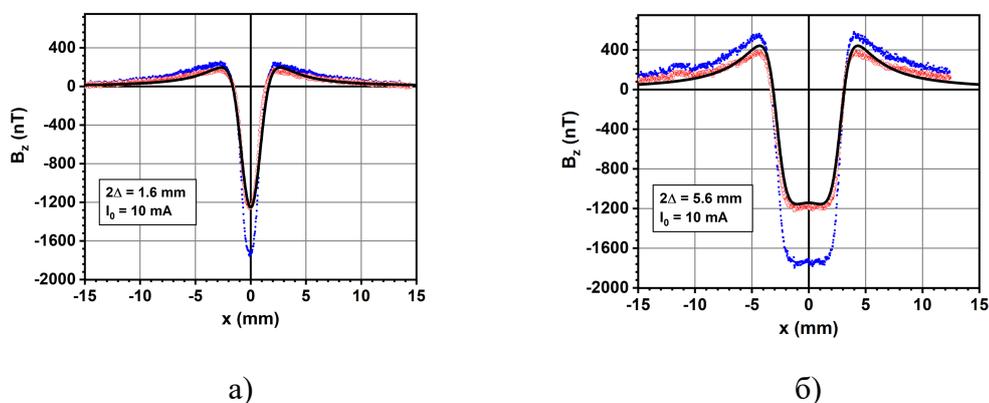


Рисунок 7 – Исходные экспериментальные данные (синие кривые), экспериментальные данные с учетом поправок (красные кривые) и расчетные графики (черные кривые) B_z компоненты над двухпроводной линией на высоте 1,4 мм с током 10 мА: а) с промежуточным расстоянием $2\Delta_1 = 1,6$ мм; б) с промежуточным расстоянием $2\Delta_2 = 5,6$ мм.

Было установлено, что для хорошего соответствия экспериментальных и расчетных данных по форме и амплитуде магнитного сигнала, необходимо ввести дополнительную эффективную высоту сканирования z_0 и ослабляющий коэффициент k , учитывающие размеры ГМИ-датчика и влияние на него неоднородного магнитного поля. Как следует из формулы (1) множитель внутри скобок определяет форму расчетной кривой, и с учетом фиксированного значения Δ , единственным параметром, влияющим на форму, является высота сканирования z_0 . При этом величина вертикальной компоненты магнитной индукции может быть определена введением ослабляющего коэффициента k .

Для нахождения параметров z_0 и k была разработана специализированная программа, основанная на методе наименьших квадратов, которая позволила добиться наилучшего совпадения экспериментальных и расчетных данных на всей области измерения. В нашем

случае это наилучшее совпадение по форме и амплитуде достигается при поправке к высоте $z_0=1,3$ мм и дополнительном ослабляющем коэффициенте $k = 1,4$.

Таким образом, с учетом статистической обработки данных было установлено, что должна быть сделана поправка высоты, на которой проводятся измерения, и эта поправка z_0 должна составлять $\sim 1,3$ мм, т.е. высоты $z_{эфф}$ при данных измерениях теоретически были равны $(0,1 + 1,3)$ мм = 1,4 мм, $(0,6 + 1,3)$ мм = 1,9 мм и $(1,1 + 1,3)$ мм = 2,4 мм, соответственно. Это означает, что при измерении локальных магнитных полей используемый ГМИ-сенсор характеризуется определенной добавкой к высоте, равной 1,3 мм. Во-вторых, при измерении локального неоднородного магнитного поля, в отличие от однородного магнитного поля, должен быть введен дополнительный ослабляющий коэффициент, равный $k = 1,4$. В случае двухпроводной линии формула (1) нахождения истинного значения величины магнитной индукции с учетом найденных поправок примет вид:

$$\frac{B_z^*(x, z, \Delta)}{1.4} = B_z(x, z_{eff} = z + 1.3, \Delta) \quad (2)$$

Данная формула применима для всех исследуемых двухпроводных линий с характерными размерами Δ до нескольких мм и для эффективных высот измерения z в несколько мм. Эта формула может быть использована для определения заранее неизвестных ширины Δ и силы тока I по измеренному профилю магнитного поля над произвольной двухпроводной линией.

На рисунках 7а,б красным цветом показаны результаты пересчета исходных экспериментальных данных с учетом найденных поправок (истинные значения), а гладкие черные линии соответствуют расчетным кривым B_z компоненты магнитной индукции над двухпроводными линиями с током 10 мА на высоте 1,4 мм.

Следует отметить, что при использовании образца в форме конечной замкнутой двухпроводной линии (вытянутого прямоугольника длиной $L \gg \Delta$ с площадью $S=2\Delta \times L$), по найденным значениям ширины Δ и силы тока I может быть определен ее магнитный момент, $M = I \times S$.

Поскольку магнитная индукция замкнутой двухпроводной линии совпадает с индукцией аналогичного по форме перпендикулярно намагниченного тонкого прямоугольного образца толщиной d , то для определения намагниченности J и полного магнитного момента M такого образца можно использовать формулы (1) и (2), где $J = I_{эфф}/d$ и $M = J \times d \times S$.

Проведенные исследования показали применимость формулы (2) при изучении реальных магнитных объектов, таких как токовые структуры, тонкие магнитные слои, содержащие магнитные наночастицы, тонкопленочные структуры, отрезки аморфных ферромагнитных микропроводов и др.

В четвертой главе представлены результаты количественных измерений магнитных полей рассеяния вблизи поверхности образцов с остаточным магнитным моментом менее $1 \text{ мкА}\cdot\text{м}^2$, выполненные с использованием модернизированной версии сканирующего ГМИ-магнитометра. В качестве исследуемых объектов использовались напечатанные на лазерном принтере образцы знаков текста, содержащие микроколичества наночастиц оксида железа, Fe_3O_4 и образцы отрезков аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа с составом металлической жилы $\text{Fe}_{74}\text{V}_{13}\text{Si}_{11}\text{C}_2$ и диаметром 17,3 мкм.

Исследования остаточной намагниченности образцов знаков текста, содержащих микроконцентрации магнитных наночастиц оксида железа.

Тонер лазерного принтера – это специальный краситель в виде порошка, который используется в электрографических устройствах печати. Тонер состоит из микрогранул со средними размерами от 3 до 10 мкм [11]. В процессе печати, микрогранулы порошка тонера спекаются между собой и термически закрепляются на бумаге. Характерная толщина слоя тонера при печати составляет от 3 до 6 мкм, в зависимости от установленного качества печати. Основой микрогранул тонера является полимер. Он связывает в единое целое все прочие составляющие и задает базовые характеристики по способности частиц тонера приобретать заряд и закрепляться на бумаге. Для придания тонеру необходимых свойств в состав полимерных микрогранул включают модификаторы, пигменты и специальные добавки, регулирующие электрический заряд и их поверхностные свойства. Магнитные тонеры для электрографических устройств печати дополнительно содержат в своем составе до 10% наночастиц оксида железа (магнетита), которые обеспечивают его магнитные свойства. После намагничения эти наночастицы сохраняют остаточную намагниченность, порождающую слабые локальные магнитные поля.

Магнитные свойства тонеров использовались для выявления признаков различия печатных документов, изготавливаемых методами электрофотографической печати. Так в работе [12], с помощью вибрационного магнитометра измерялись петли гистерезиса отдельных знаков текста напечатанных на принтерах фирм «Hewlett Packard» и «Canon». Было установлено, что наиболее значимыми отличительными признаками магнитных петель гистерезиса образцов напечатанных знаков являлись величина максимального магнитного

момента в насыщении и коэрцитивная сила. Характерные значения указанных параметров составили $(1-2) \times 10^{-6}$ А/м² и 4000–8000 А/м, соответственно. При этом величина остаточного магнитного момента (менее $\sim 10^{-7}$ А/м²), не превышала погрешности используемого вибрационного магнитометра. В работе [13] была продемонстрирована возможность измерять с помощью ГМИ-сканера остаточные магнитные поля текстовых знаков, напечатанных на бумажном носителе с помощью лазерного принтера.

В ходе данного исследования, в качестве образцов использовались напечатанные на лазерном принтере HP-2200 узкие полоски с размерами 1,6×5 мм, 1,6×20 мм и 5,6×20 мм. После намагничивания в перпендикулярном магнитном поле их остаточная намагниченность порождает слабые магнитные поля идентичные магнитным полям замкнутых двухпроводных линий тех же размеров.

На рисунке 8, приведено изображение участка поверхности, напечатанной на лазерном принтере прямоугольной полоски, полученное с помощью силового электронного микроскопа при увеличении 2000. На изображении хорошо просматривается спеченный слой микрогранул тонера. При еще большем увеличении, (рисунок 8б), в изображении спеченной полимерной матрицы четко видны наночастицы магнетита (белые точки) с размерами от 100 нм до 200 нм. Согласно работе [14] удельная намагниченность насыщения наночастиц оксида железа составляет, в среднем, 60 А·м²/кг.

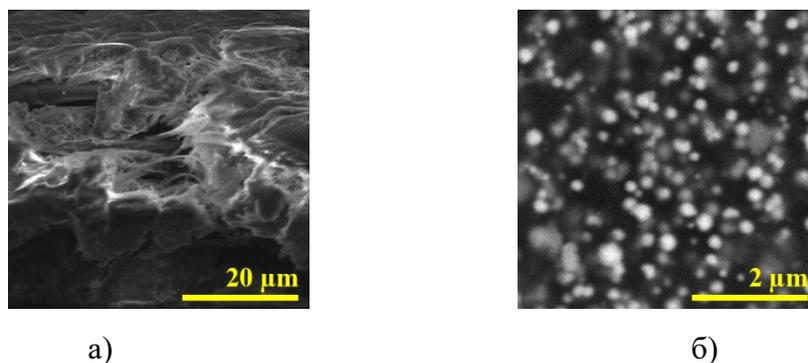


Рисунок 8 – Микрофотографии поверхности спеченного слоя микрогранул тонера, полученные с помощью силового электронного микроскопа: (а) с увеличением 2000, (б) с увеличением 20000.

Для определения магнитных характеристик исследуемого тонера были выполнены измерения петли гистерезиса на вибрационном магнитометре. В качестве образца использовалась напечатанная на лазерном принтере полоска размером 1,6×5 мм. При измерениях образец намагничивался магнитным полем перпендикулярным плоскости образца. Измерение проводилось на самой чувствительной шкале вибрационного

магнитометра с диапазоном ± 50 мкА·м². На рисунке 9а приведена полная петля гистерезиса исследуемого образца. Видно, что намагниченность образца приближается к насыщению в магнитном поле ≈ 200 кА/м. В максимальном приложенном магнитном поле 640 кА/м величина магнитного момента образца $M_s = 2,8$ мкА·м². На вставке на рисунке 9а приведена часть петли гистерезиса в области нулевых магнитных полей. Коэрцитивная сила имеет значение $H_c \approx 5$ кА/м, а величина остаточного магнитного момента $M_r \approx 0,1$ мкА·м².

Используя величину магнитного момента образца в насыщении, измеренную на вибромагнитометре (2,8 мкА·м²) и исходя из величины удельной намагниченности насыщения оксида железа 60 А·м²/кг, можно оценить количество магнитных наночастиц в нем. Из простой пропорции получается, что количество наночастиц в образце составляет $\sim 46,6$ мкг, а средняя концентрация магнитных наночастиц на единицу площади составляет ~ 6 мкг/мм².

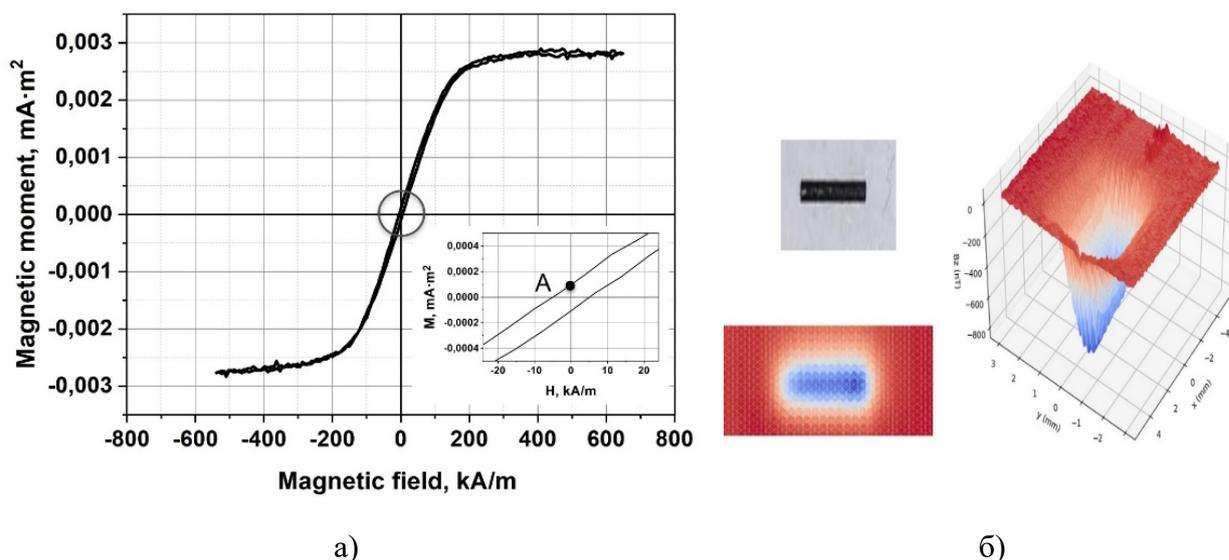


Рисунок 9 – а) Петля гистерезиса напечатанной на лазерном принтере полоски тонера, размером 1.6 мм × 5 мм тонера при намагничивании в перпендикулярном поле. На вставке показана часть петли гистерезиса в области нулевых магнитных полей; б) пространственное магнитное изображение остаточной намагниченности этого же образца после намагничивания в перпендикулярном магнитном поле (соответствует точке А на петле гистерезиса).

Для сравнения этот же образец был измерен с помощью сканирующего ГМИ-магнитометра. Перед измерениями образец предварительно намагничивался в перпендикулярном магнитном поле величиной 640 кА/м. Измерения были выполнены на расстоянии 0,1 мм (эффективная высота 1,4 мм) от поверхности образца. На рисунке 9б приведены общий вид исследуемой полоски тонера и его магнитное изображение в двумерном

цветном представлении и в трехмерном представлении, когда по вертикальной оси отложены значения измеренной вертикальной компоненты магнитного поля, связанной с остаточной намагниченностью образца тонера. Оценка величины остаточного магнитного момента образца, по измерениям на сканирующем ГМИ-магнитометре, оказалась равной $0,046 \text{ мкА} \cdot \text{м}^2$.

С помощью сканирующего ГМИ магнитометра были проведены детальные исследования остаточной намагниченности напечатанных на лазерном принтере HP-2200 полосок тонера длиной 20 мм и шириной $2A_1 = 1,6 \text{ мм}$ и $2A_2 = 5,6 \text{ мм}$. Измерения были выполнены на тех же высотах 0,1 мм, 0,6 мм и 1,1 мм, что и в случае образцов двухпроводных токовых линий. Перед измерениями образцы намагничивались в перпендикулярном поверхности постоянном магнитном поле, величиной 600 кА/м. Экспериментальные графики распределения B_z^{**} компоненты магнитного поля, порождаемого остаточной намагниченностью материала тонера указанных образцов, приведены на рисунке 10.

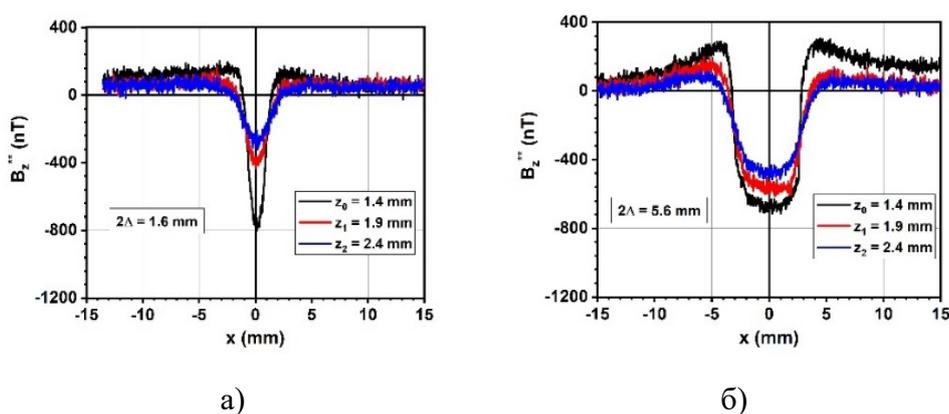


Рисунок 10 – Экспериментальные распределения B_z^{**} компоненты магнитного поля, измеренные на разных высотах, над образцами перпендикулярно намагниченных тонеров шириной 1.6 мм (а) и 5.6 мм (б).

Как следует из представленных данных, сигналы от образцов намагниченных тонеров соответствуют сигналам двухпроводных линий. Однако, амплитуды сигналов оказались в несколько раз ниже по сравнению с данными на рисунке 7. Как и в случае двухпроводных линий, для расчета эффективного тока, соответствующего остаточной намагниченности на толщине образца M/S , использовались выражения (1), (2). Расчеты (с учетом найденных поправок z_0 и k) проводились для всех шести серии измерений. Было найдено, что величина остаточной намагниченности исследуемых образцов составила $5,8 \pm 0,6 \text{ мА}$.

Надежное измерение магнитных сигналов, порождаемых остаточной намагниченностью образца, может являться отличительным значимым признаком используемого тонера и печатающего устройства.

***Исследования намагниченности образцов аморфных ферромагнитных
микропроводов на основе Fe***

К другому классу слабомагнитных образцов, которые были детально исследованы с помощью сканирующего ГМИ магнитометра, относятся аморфные ферромагнитные микропровода на основе Fe. Данные микропровода характеризуются положительной константой магнитострикции ($\lambda_s \sim +(1-3) \times 10^{-5}$) [15]. Петля гистерезиса в таких микропроводах имеет прямоугольную форму [16] с характерным полем перемагничивания $H_c \sim 80-400$ А/м, а процесс перемагничивания происходит одним гигантским скачком Баркгаузена (быстрое движение доменной стенки (ДС) вдоль оси микропровода) [17]. Распространение ДС в ферромагнитных микропроводах является предметом интенсивных исследований, связанных с методами воспроизводимой инжекции ДС, управлением распространением ДС, ее структурой [18] и др. В работах [19,20] было показано, что распространение ДС начинается с концов микропровода, где замыкающие домены существуют из-за действия размагничивающего поля. Возможность измерения магнитных полей рассеяния от замыкающих доменов в железных микропроводах была продемонстрирована в [21] при температуре кипения жидкого азота с помощью сканирующего магнитометра на основе ВТСП СКВИДа (высокотемпературный сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) и в [7] при комнатной температуре с помощью сканирующего ГМИ магнитометра.

В ходе данного исследования, в качестве образцов использовались отрезки аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа, в стеклянной оболочке, изготовленные по технологии Улитовского-Тейлора из сплава состава $Fe_{74}B_{13}Si_{11}C_2$. Данные микропровода характеризовались диаметром металлической жилы 17,3 мкм и полным диаметром 28,2 мкм. Исследуемые отрезки микропроводов имели длину 6,5 мм и 15,5 мм.

При измерениях методом сканирующей ГМИ-магнитометрии были получены изображения магнитных полей рассеяния образцов микропроводов в различных внешних однородных магнитных полях. Для сравнения, с использованием метода вибрационной магнитометрии, была измерена петля гистерезиса образца микропровода длиной 6.5 мм (рисунок 13).

На рисунке 11а показано двумерное изображение $B_z(x,y)$ компоненты магнитного поля над образцом микропровода длиной 6.5 мм (черный отрезок в центре), измеренное на высоте $Z_0 \sim 1$ мм методом сканирующей ГМИ-магнитометрии. Данное магнитное изображение было получено при воздействии магнитного поля КГ, величиной 400 А/м, направленного вдоль оси микропровода, в котором микропровод намагничивается до состояния близкого к насыщению. Вблизи концов отрезка микропровода, в его магнитном изображении, наблюдаются два

симметричных локальных экстремума с противоположными знаками. Такое распределение вертикальной компоненты магнитного поля свидетельствует о наличии «магнитных зарядов» на концах отрезка микропровода [22]. На рисунке 11б показан отдельный магнитный скан $B_z(x)$, измеренный вдоль оси микропровода. Видно, что амплитуда магнитных полей рассеяния на концах отрезков достигает значений ± 8200 нТл и спадает к нулю при удалении от конца на расстояние $x > 2L$.

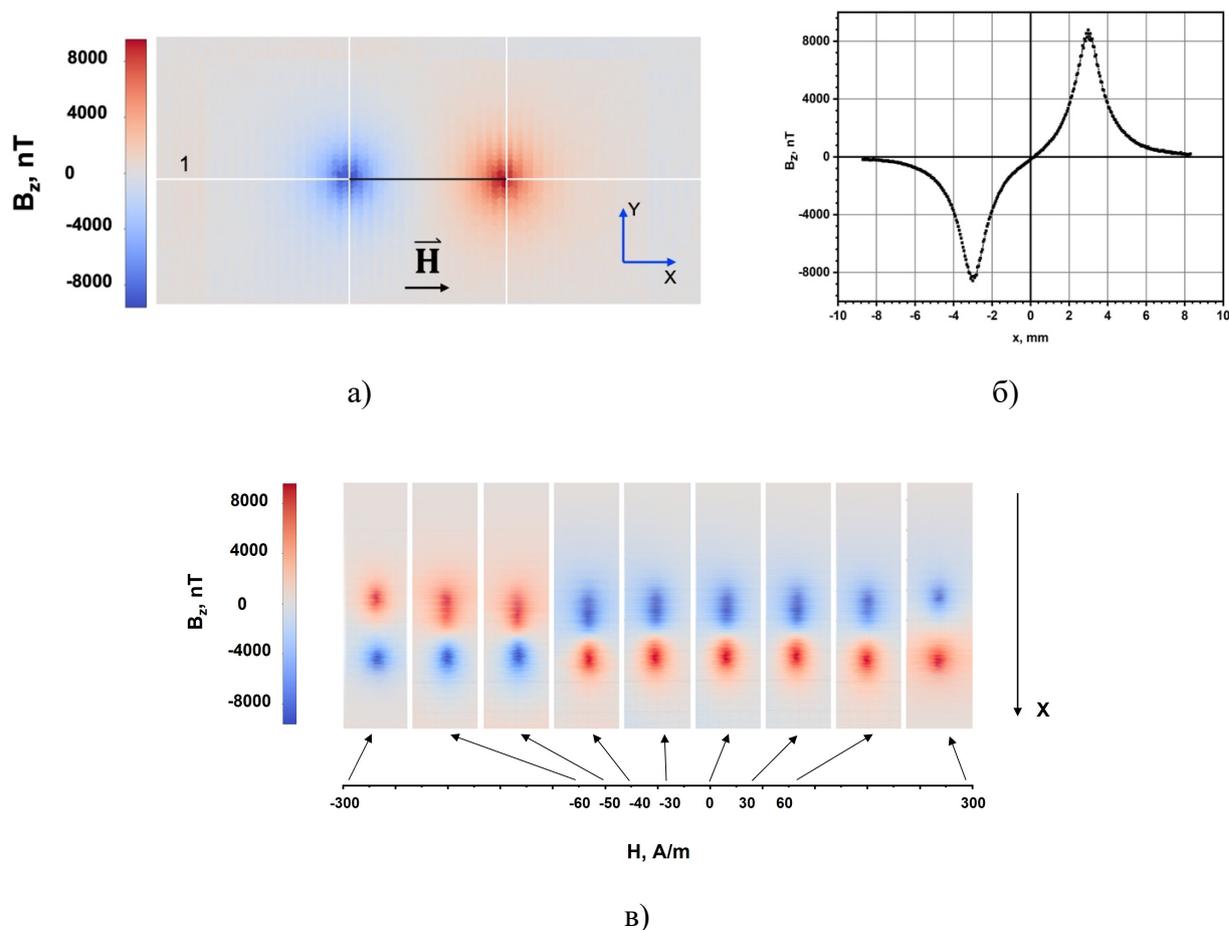


Рисунок 11 – Магнитные изображения образца микропровода длиной 6.5 мм, на расстоянии 1 мм, в продольном магнитном поле 400 А/м (а) двумерное магнитное изображение микропровода; (б) магнитный профиль $B_z(x)$ вдоль оси «1», параллельной оси микропровода; в) магнитные изображения, полученные при различных внешних продольных магнитных полях.

На рисунке 11в показана серия магнитных изображений 6,5-мм микропровода в зависимости от величины продольного магнитного поля КГ. Как следует из представленных магнитных изображений, при максимальном значении подмагничивающего поля (+300 А/м), положительный и отрицательный максимумы $B_z(x,y)$ компоненты магнитного поля локализованы вблизи концов микропровода. При уменьшении подмагничивающего поля до

нуля и смене знака вплоть до значения -40 А/м максимумы вытягиваются вдоль оси микропровода. Затем, при значении поля -50 А/м, цвет максимумов в магнитном изображении изменяется на противоположный, что указывает на скачкообразное перемагничивание микропровода [23]. Дальнейшее увеличение отрицательного подмагничивающего поля ($+300$ А/м) приводит к локализации отрицательного и положительного максимумов $B_z(x,y)$ вблизи концов микропровода.

Интерпретация полученных магнитных изображений проводилась с учетом того, что микропровод характеризуется положительной константой магнитострикции ($\lambda_s \sim +(1-3) \times 10^{-5}$) и продольное намагничивание микропровода энергетически более выгодно [24]. Исходя из этого, во внешнем продольном магнитном поле вдали от концов микропровода средняя по поперечному сечению намагниченность должна иметь только продольную компоненту J_0 близкую к намагниченности насыщения, $J_0 \approx J_s$. Вблизи концов микропровода сильное магнитостатическое взаимодействие приводит к спаданию продольной компоненты намагниченности и расплыванию магнитного заряда вдоль оси микропровода. Все вышесказанное позволяет полагать, что измеряемая компонента магнитной индукции $B_z(x,y)$ полностью определяется магнитным диполем с плечом $2L$ и магнитными зарядами $\pm qm = \pm \pi r_0^2 J_0$, каждый из которых распределен в продольном направлении на длинах u_1 и u_2 .

Рассмотрим отрезок микропровода радиусом r_0 и длиной $2L$, который расположен вдоль оси X . Предположим, что заряды на концах микропровода распределены равномерно с постоянными плотностями $\rho_{m1} = -q_m/u_1$ при $-L \leq x \leq -L + u_1$ и $\rho_{m2} = -q_m/u_2$ при $L - u_2 \leq x \leq L$. Пусть сканирование происходит на высоте Z_0 над микропроводом, тогда распределение вертикальной компоненты индукции над таким физическим диполем описывается выражением:

$$B_z(x, y, z, u_1, u_2, L) = \frac{\mu_0 J_0 \pi r_0^2}{4\pi} [b_{z1}(x, y, z, u_1, L) - b_{z2}(x, y, z, u_2, L)], \quad (3)$$

$$b_{z1}(x, y, z, u_1, L) = \frac{z}{u_1(y^2 + z^2)} \left[\frac{L + x - u_1}{\sqrt{(L + x - u_1)^2 + y^2 + z^2}} - \frac{L + x}{\sqrt{(L + x)^2 + y^2 + z^2}} \right],$$

$$b_{z2}(x, y, z, u_2, L) = \frac{z}{u_2(y^2 + z^2)} \left[\frac{L - x - u_2}{\sqrt{(L - x - u_2)^2 + y^2 + z^2}} - \frac{L - x}{\sqrt{(L - x)^2 + y^2 + z^2}} \right],$$

где: μ_0 – магнитная постоянная обозначена, y – горизонтальная координата поперек микропровода и z – вертикальная координата, а слагаемые в скобках b_{z1} , b_{z2} описывают вклад левого и правого конца микропровода, соответственно. В случае длинного микропровода

вклад левого конца микропровода дает малую поправку при вычислении индукции вблизи его правого конца, поэтому в формуле (3) можно ограничиться слагаемым b_{z2} .

Варьируя в (3) высоту наблюдения z_0 , амплитудный коэффициент $A = \mu_0 J_0 \pi r_0^2 / 4\pi$ и ширину равномерного распределения концевых зарядов $u_{1,2}$, было достигнуто максимальное совпадение серий экспериментальных и расчетных профилей $B_z(x_0, y, z_0)$ и $B_z(x, y_0, z_0)$, полученных для разных x_0 и y_0 и разных высот измерений z_0 . Определив значение амплитудного коэффициента, можно найти значение намагниченности в средней части отрезка микропровода $J_0 = 4\pi A / m_0 \pi r_0^2$ при любом заданном внешнем поле. В частности, по значению коэффициента в максимально доступном внешнем поле, когда $J_0 \approx J_s$, можно найти намагниченность насыщения микропровода.

Было установлено, что наилучшее совпадение расчетных и измеренных профилей было получено при выборе высоты сканирования $z_0 \sim 1$ мм. Степень совпадения экспериментальных и расчетных данных показывает достаточность предложенной модели для описания свойств изучаемых микропроводов. Хорошее соответствие экспериментальных и расчетных кривых на рисунке 12 означает, что динамика положения максимума $B_z(x)$, при изменении внешнего поля H_x , полностью определяется шириной размытия (расплывания) магнитных зарядов u . В достаточно большом внешнем поле 320 А/м параметр $J_0 \approx 7,2 \cdot 10^5$ А/м. Данная величина может служить оценкой предельной намагниченности J_s .

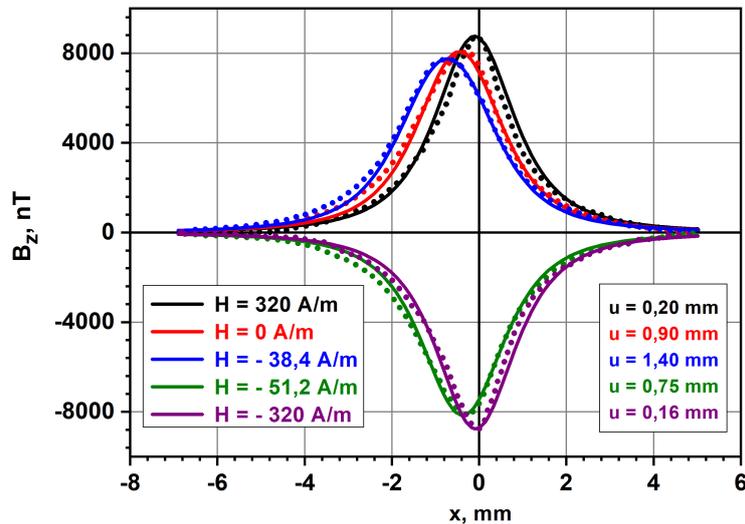


Рисунок 12 – Экспериментальные и теоретические профили компоненты индукции $B_z(x)$ над правым концом микропровода длиной 15,5 мм во внешнем продольном поле H_x разной величины. Слева указаны значения внешних продольных магнитных полей, соответствующие представленным кривым; справа приведены расчетные значения ширины равномерного распределения магнитных зарядов на конце микропровода.

Добившись совпадения экспериментального и расчетного графиков можно вычислить и полный магнитный момент отрезка микропровода, он равен $M = 4\pi A(2L - u)/\mu_0$. Определяя, по описанной процедуре для каждого значения внешнего поля коэффициент A и ширину размытия заряда u , можно найти зависимость $M(H)$. Так, для микропровода в нулевом магнитном поле величина размытия заряда $u = 2$ мм и полный магнитный момент будет равен $M(0) = 0,96 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{м}^2$. После переворота, при $H = -70 \text{ А/м}$ размытие резко уменьшится, $u = 0,3$ мм, и полный момент $M(-70) = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{м}^2$, а в большом поле, $H = 640 \text{ А/м}$ размытие еще уменьшится, $u = 0,05$ мм, и момент $M(640) = 1,18 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

На рисунке 14, для сравнения, приведены петля гистерезиса образца микропровода длиной 6.5 мм, измеренная с помощью вибрационного магнитометра и профили нормальной компоненты поля (вставки 1–4), измеренные с помощью сканирующего ГМИ магнитометра на высоте ~ 1 мм, при значениях магнитного поля, указанных соответствующими точками на петле гистерезиса.

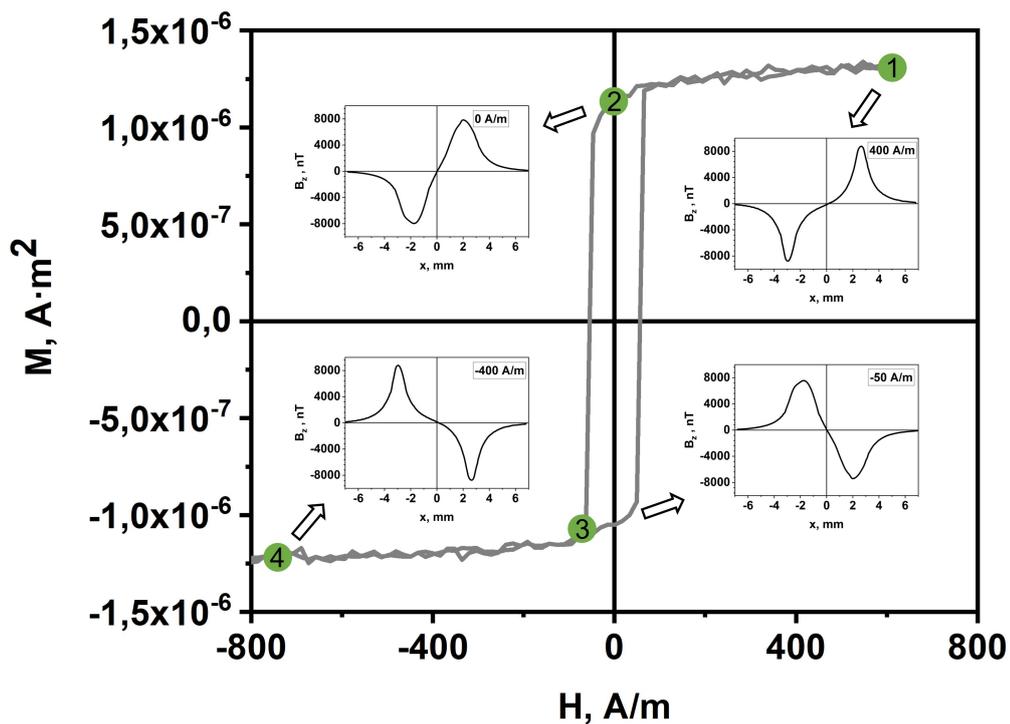


Рисунок 13 – Петля гистерезиса образца микропровода длиной 6.5 мм. Вставки 1–4 показывают профили $B_z(x)$, вдоль оси микропровода на высоте 1 мм при различных значениях магнитного поля (точки 1–4 на петле гистерезиса), измеренные с помощью сканирующего ГМИ-магнитометра

Видно, что в малых полях подмагничивания экстремумы индукции слегка уменьшаются по амплитуде и расширяются, смещаясь к центру отрезка микропровода. Важно

подчеркнуть, что подбор соответствующих модельных параметров для экспериментальных профилей позволяет количественно изучить эволюцию структуры намагниченности микропровода в разных магнитных полях. В случае отрезка железного микропровода изменение продольной намагниченности при уменьшении продольного поля полностью определяется ростом концевых замыкающих доменов.

В заключении приводятся **основные результаты** диссертационного исследования:

1. Разработан сканирующий магнитометр на основе ГМИ-датчика с улучшенной разрешающей способностью ~ 10 нТл и пространственным разрешением $\sim 1,3$ мм для количественных измерений и визуализации пространственного распределения перпендикулярной компоненты магнитного поля вблизи поверхности исследуемых объектов при воздействии внешнего продольного магнитного поля в диапазоне ± 600 А/м.
2. Разработано специализированное программное обеспечение позволяющее визуализировать пространственное распределение магнитных полей рассеяния исследуемых образцов. Программа позволяет рассчитывать калибровочные коэффициенты, которые используются для получения количественных распределений магнитных полей рассеяния.
3. Предложен способ магнитной калибровки выходного сигнала ГМИ-датчика для количественных измерений локальных неоднородных магнитных полей по известному пространственному распределению магнитного поля двухпроводной линейной токовой структуры. В процессе калибровочных испытаний найдены поправочные коэффициенты $k = 1,4$ и $z_{эфф} = 1,3$ мм, с учетом которых рассчитываются реальные значения B_z величины магнитной индукции.
4. Измерены пространственные магнитные изображения образцов знаков текста, напечатанных на лазерном принтере. Получены значения остаточной намагниченности, магнитного момента и микроконцентрации магнитных наночастиц оксида железа Fe_3O_4 , являющиеся магнитными характеристиками тонера, которые могут использоваться для его идентификации в задачах судебной экспертизы.
5. Измерены пространственные магнитные изображения образцов аморфных ферромагнитных микропроводов на основе Fe при воздействии продольных магнитных полей. На основе полученных изображений определены: величина намагниченности насыщения микропровода, значение критического магнитного поля при котором происходит скачкообразное переключение намагниченности микропровода и ширина его замыкающих доменов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Danilov G.**, Grebenshchikov Yu., Odintsov V., Churyukanova M., Gudoshnikov S. Measurements of stray magnetic fields of Fe-rich amorphous microwires using a scanning GMI magnetometer // *Metals*. — 2023. — Vol. 13(4) — P. 800. (SJR Q1 IF: 2,69, DOI: 10.3390/met13040800).
- A2. Gudoshnikov S., Danilov G.**, Gorelikov E., Grebenshchikov Yu., Odintsov V., Venediktov S. Scanning Magnetometer Based On Magnetoimpedance Sensor For Measuring A Remnant Magnetization Of Printed Toners // *Measurement*. — 2022. — Vol. 204 — P. 112045. (SJR Q1 IF: 5.131, DOI: 10.1016/j.measurement.2022.112045).
- A3. Данилов Г. Е.**, Гудошников С. А. Измерение остаточных магнитных полей слабомагнитных материалов, содержащих магнитные наночастицы // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2022. — №12 (126). (GeoRef K1, DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.104).
- A4. Данилов Г. Е.** Измерения магнитных полей рассеяния аморфных ферромагнитных микропроводов на основе Fe помощью сканирующего ГМИ магнитометра // *Российская наука в современном мире. Сборник статей I международной научно-практической конференции*. – Москва, Россия, 2022. – С. 142–143.
- П1. Данилов Г.Е.**, Гудошников С.А., Гребенщиков Ю.Б., Одинцов В.И. Программный комплекс для анализа магнитных полей рассеяния слабомагнитных объектов «H2omega» / Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ, рег. № 2023682992 от 01.11.2023. — М.: Роспатент, 2023.
- П2. Гудошников С.А., Данилов Г.Е.**, Гребенщиков Ю.Б., Одинцов В.И. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС" (RU). Способ определения петель гистерезиса аморфных ферромагнитных микропроводов на основе железа. Патент No 2814644 РФ, МПК G01R 33/12, G01R 33/1215; Заявл.18.10.23; Опубл. 04.03.24, Бюл.No7.
- T1. Gudoshnikov S., Danilov G.**, Gorelikov E., Liubimov B., Odintsov V., Venediktov S. Peculiarities of measuring local magnetic fields using a scanning magnetic microscope based on a magnetoimpedance sensor // *Book of abstracts of The Joint European Magnetic Symposia (JEMS 2020)*. — Virtual, 2020. — P. 66.
- T2. Gudoshnikov S., Danilov G.**, Gorelikov E., Tarasov V., Grebenshchikov Yu., Odintsov V., Venediktov S. Scanning Magnetometer Based on A Magnetoimpedance Sensor for Nondestructive Evaluation of Materials Containing Magnetic Nanoparticles // *Book of abstracts of 11th International*

Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (APMAS-2021). — Mugla, Turkey, 2021. — P. 28.

T3. Danilov G., Tarasov V., Grebenshchikov Yu., Odintsov V., Gudoshnikov S. Scanning GMI magnetometer for measuring stray magnetic fields of amorphous ferromagnetic microwires // EASTMAG-2022 Book of Abstracts. Vol. 2 — Kazan, Russia, 2022. — P. 464.

T4. Gudoshnikov S., **Danilov G.**, Tarasov V., Grebenshchikov Yu., Odintsov V., Popova A., Venediktov S. Magnetic non-destructive testing using a scanning GMI magnetometer // EASTMAG-2022 Book of Abstracts. Vol. 2 — Kazan, Russia, 2022. — P. 462.

T5. Гребенщиков Ю.Б., **Данилов Г.Е.**, Игнатов А.С., Гудошников С.А. Метод сканирующей магнитометрии для определения характеристик слабомагнитных и магнитно-мягких материалов // XXXIV Симпозиум “Современная химическая физика»: сборник тезисов. — Туапсе, Россия, 2022. — С. 189.

T6. Gudoshnikov S., **Danilov G.**, Tarasov V., Grebenshchikov Yu., Odintsov V. Non-Destructive Method of Scanning Magnetometry for Determining Magnetization of Weakly Magnetic and Magnetically Soft Materials // Book of abstracts of 12th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (APMAS-2022). — Mugla, Turkey, 2022. — P. 68.

T7. Гребенщиков Ю.Б., **Данилов Г.Е.**, Тарасов В.П., Гудошников С.А. Определение магнитных характеристик аморфного ферромагнитного микропровода на основе железа с помощью магнитного сканера // XXXV Симпозиум “Современная химическая физика»: сборник тезисов. — Туапсе, Россия, 2023. — С. 213.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Panina, L.V., Mohri, K.: Magneto-impedance effect in amorphous wires. *Appl. Phys. Lett.* 65,1189–1191 (1994).
2. Sandacci, S., Makhnovskiy, D., Panina, L., Mohri, K., Honkura, Y.: Off-diagonal impedance in amorphous wires and its application to linear magnetic sensors. *IEEE Trans. Magn.* 40(6),3505–3511 (2004).
3. McVitie, S., Ferrier, R. P., Scott, J., White, G. S., & Gallagher, A. (2001). Quantitative field measurements from magnetic force microscope tips and comparison with point and extended charge models. *Journal of Applied Physics*, 89(7), 3656-3661.
4. Araujo, J.F.D.F.; Reis, A.L.A.; Oliveira, V.C., Jr.; Santos, A.F.; Luz-Lima, C.; Yokoyama, E.; Mendoza, L.A.F.; Pereira, J.M.B.; Bruno, A.C. Characterizing Complex Mineral Structures in Thin Sections of Geological Samples with a Scanning Hall Effect Microscope. *Sensors* 2019, 19, 1636.

5. S.A Gudoshnikov; B.Ya Liubimov; L.V Matveets; O.V Snigirev; A.G Maresov; A.F Prokoshin; V.T Borisov; N.A Usov (2002). Study of amorphous ferromagnetic microwires using a scanning SQUID microscope., 372-376(part-P1), 271–273.
6. Faley, M. I., Pratt, K., Reineman, R., Schurig, D., Gott, S., Atwood, C. G., ... & Fagaly, R. L. (2004). High temperature superconductor dc SQUID micro-susceptometer for room temperature objects. *Superconductor Science and Technology*, 17(5), S324.
7. S. Gudoshnikov, V. Tarasov, B. Liubimov, V. Odintsov, S. Venediktov, A. Nozdrin, Scanning magnetic microscope based on magnetoimpedance sensor for measuring of local magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 510,2020, 166938.
8. Gudoshnikov, S., Usov, N., Nozdrin, A., Ipatov, M., Zhukov, A., Zhukova, V.: Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire. *Phys. Status Solidi A*. 211, 980–985 (2014).
9. Chiriac H. Preparation and characterization of glass covered magnetic wires // *Materials Science and Engineering: A*. - 2001. - Vol. 304–306, No 1–2. - P. 166– 171.
10. Dufay, Basile & Saez, Sebastien & Dolabdjian, Christophe & Yelon, Arthur & Menard, David. (2012). Characterization of an Optimized Off-Diagonal GMI-Based Magnetometer. *IEEE Sensors Journal*. 13. 379-388.
11. Ataefard M. et al. Effect of micro-and nanomagnetite on printing toner properties // *The Scientific World Journal*. – 2014. – T. 2014.
12. Lobanov N. N. et al. Differentiation of magnetic composites in terms of their nanostructural organization // *Doklady Chemistry*. – SP MAIK Nauka/Interperiodica, 2009. – T. 426. – C. 96-100.
13. Gudoshnikov S. et al. Scanning magnetometer based on magnetoimpedance sensor for measuring a remnant magnetization of printed toners // *Measurement*. – 2022. – T. 204. – C. 112045.
14. Volkov, S. Gudoshnikov, N. Usov, A. Volkov, M. Moskvina, A. Maresov, O. Snigirev, S. Tanaka, SQUID-measurements of relaxation time of Fe₃O₄ superparamagnetic nanoparticle ensembles, *J. Magn. Magn. Mater.* 300 (2006), e294.
15. Varga R. Fast domain wall dynamics in thin magnetic wires // Nova Science Publishers, Inc.: New York, NY, USA. – 2009. – C. 251-272.
16. Varga R. et al. Single-domain wall propagation and damping mechanism during magnetic switching of bistable amorphous microwires // *Physical review letters*. – 2005. – T. 94. – №. 1. – C. 017201.
17. Vázquez M. (ed.). *Magnetic nano-and microwires: design, synthesis, properties and applications*. – Woodhead Publishing, 2015.

18. Calle E., Vázquez M., del Real R. P. Time-resolved motion of a single domain wall controlled by a local tunable barrier // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2020. – T. 498. – C. 166093.
19. Zhukova V. et al. Switching field fluctuations in a glass-coated Fe-rich amorphous microwire // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2002. – T. 249. – №. 1-2. – C. 131-135.
20. Zhukova V. et al. Domain wall propagation in micrometric wires: Limits of single domain wall regime // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – T. 111. – №. 7.
21. Gudoshnikov S. et al. Measurements of stray magnetic fields of amorphous microwires using scanning microscope based on superconducting quantum interference device // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2007. – T. 316. – №. 2. – C. 188-191.
22. Rastislav Varga; Yuriy Kostyk; Kornel Richter; Arcady Zhukov; Manuel Vazquez (2009). Domain-wall dynamics in bistable magnetic microwires. , 206(4), 608–612.
23. A. Chizhik, A. Stupakiewicz, A. Maziewski, A. Zhukov, J. Gonzalez, J. M. Blanco; Direct observation of giant Barkhausen jumps in magnetic microwires. *Appl. Phys. Lett.* 5 July 2010; 97 (1): 012502.
24. Usov, N.A., Antonov, A.S., Lagar'kov, A.N.: Theory of giant magneto-impedance effect in amorphous wires with different types of magnetic anisotropy. *J. Magn. Magn. Mater.* 185, 159–173 (1998).