

На правах рукописи

Ветошко Петр Михайлович

**ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ ОДНОРОДНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ФЕРРИТ-
ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНОК В ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ
МАГНИТНЫХ СЕНСОРОВ**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)

Научный руководитель: Шавров Владимир Григорьевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией магнитных явлений в
микрорелектронике ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Официальные оппоненты: Грановский Александр Борисович,
профессор, доктор физико-математических наук,
профессор кафедры магнетизма физического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
г. Москва

Красноперов Евгений Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
начальник лаборатории Федерального государственного
бюджетного учреждения «Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Челябинский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ЧелГУ»), г. Челябинск

Защита состоится « 9 » июня 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д004.003.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института Физики Металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН) по адресу: 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН, а также на сайте www.imp.uran.ru.

Автореферат разослан «___» апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д004.003.01,
д.ф.-м.н.

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время в мире идут интенсивные поиски явлений и способов, позволяющих регистрировать магнитные поля с высокой чувствительностью и пространственным разрешением. Это диктуется потребностью таких областей, как системы безопасности, а также такими важными научными направлениями, как спинтроника и медицина. Например, бурное развитие медицинских методов диагностики с применением магнитных наночастиц, таких как иммуноферментный анализ, гипертермия и транспорт лекарств обуславливает вновь возникающие потребности в сверхчувствительных магнитных измерениях для диагностики “in-vivo” магнитных наномаркеров для обнаружения и локализации патологий. Самыми чувствительными датчиками магнитного поля на сегодняшний день являются охлаждаемые сверхпроводящие квантовые магнитометры (СКВИД-магнитометры), работающие при гелиевой температуре, но эти приборы дороги и мало технологичны.

Особое место среди средств регистрации магнитных полей занимают магнитомодуляционные сенсоры с использованием магнитоупорядоченного материала, поскольку они обеспечивают наибольшую энергию взаимодействия с исследуемым полем, то есть чрезвычайно высокую чувствительность, не требуют охлаждения, дешевы и технологичны.

Принцип действия магнитомодуляционного датчика (феррозонда) основан на регистрации нарушения симметрии петли гистерезиса магнитного сердечника в присутствии измеряемого поля, возникающего вследствие нелинейности процесса намагничивания. Такое нарушение симметрии порождает четные гармоники сигнала перемагничивания, амплитуда которых пропорциональна величине измеряемого поля.

Чувствительность феррозондов определяется флуктуациями магнитной энергии сердечника, возникающими в процессе перемагничивания, которые, как правило, на много порядков превышают энергию взаимодействия магнитного сердечника с измеряемым магнитным полем. Причина этого состоит в том, что физическая картина процесса перемагничивания сердечника феррозонда чрезвычайно сложна. Это неравновесный и нестационарный процесс, сопровождающийся, как правило, образованием доменных структур, динамических неустойчивостей и т.д. Традиционным способом решения этой проблемы является использование магнитных сердечников с высокой намагниченностью и малой анизотропией на основе железо-никелевых сплавов. Это позволяет уменьшить размер и увеличить число доменов в пределах магнетика, то есть тем самым получить более гладкое усреднение кривой перемагничивания. Однако, при этом сохраняется стохастический характер возникновения и уничтожения доменов в процессе перемагничивания, сама кривая зависимости намагниченности от приложенного к магнетику поля по-прежнему состоит из множества ступенек, связанных с процессами перестройки доменной структуры – скачками Баркгаузена.

Существует альтернативный подход к решению этой проблемы, который заключается в контроле процесса перемагничивания в основном объеме чувствительного элемента магнитометра. Такой контроль может быть осуществлен посредством насыщения магнетика в каждый момент времени

процесса перемагничивания. С практической точки зрения интерес к таким магнитомодуляционным сенсорам связан с тем, что их чувствительность и пространственное разрешение приближаются к теоретическому пределу, обусловленному тепловыми флуктуациями в магнитоупорядоченной среде. До сих пор исследования процессов перемагничивания когерентным вращением намагниченности в основном проводились на тонких пермаллоевых пленках, однако для насыщения пермаллоевой пленки толщиной более 100 нм перпендикулярно ее краю требуется приложить поле, сравнимое с намагниченностью самой пленки. Это ограничивает угол поворота намагниченности и соответственно применение принципов симметрии для измерения магнитного поля. Очевидно, что дисперсия анизотропии, характерная для поликристаллических материалов, а также высокая намагниченность пермаллоя стали основными препятствиями при реализации детерминированных процессов перемагничивания. В результате чувствительность датчиков на основе пермаллоя составляет в лучшем случае 10^{-7} Э/Гц^{0.5}.

В этой связи использование в качестве сердечников магнитометров высокосовершенных монокристаллических эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов представляется весьма перспективным для повышения чувствительности сенсоров. Помимо высокого структурного совершенства и отсутствия дефектов такие пленки обладают стабильными и однородными по объему параметрами магнитной анизотропии, что особенно важно для снижения шума, обусловленного вращением намагниченности. Кроме того, многие ферриты-гранаты отличаются рекордно низким параметром затухания, что, согласно флуктуационно-диссипационным соотношениям, способствует повышению предельной чувствительности сенсора.

Тем не менее, несмотря на очевидные преимущества перемагничивания когерентным вращением именно ферритов-гранатов, существует лишь крайне ограниченное число работ, посвященных созданию и исследованию магнитомодуляционных датчиков на таких материалах. В первую очередь это связано со специфическими требованиями, налагаемыми условиями монокристаллическости на материальные константы феррита-граната и форму рабочего элемента сенсора.

Прежде всего, необходимо определить состав и кристаллографическую ориентацию монокристаллической пленки феррита-граната, чтобы скомпенсировать влияние кубической анизотропии на вращение вектора намагниченности в плоскости пленки. Достижение монокристаллического состояния требует детального анализа распределения намагниченности, возникающего в объеме рабочего тела сенсора, в зависимости от формы элемента, величины намагниченности и приложенного магнитного поля. Для оптимального выбора режима возбуждения необходимы экспериментальные данные о магнитной восприимчивости чувствительного элемента сенсора в зависимости от частоты вращения и величины возбуждающего поля.

Цель и задачи работы: выяснение особенностей перемагничивания монокристаллических пленок замещенных ферритов-гранатов в зависимости от состава, формы образца, кристаллографической ориентации, величины намагниченности, одноосной и кубической анизотропии в диапазоне насыщающих полей 10 - 20 Э и в диапазоне частот 10^3 - 10^6 Гц с целью реализации возможности регистрации сверхслабых магнитных полей вплоть до 10^{-9} Э и менее.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести теоретическое и экспериментальное исследование динамики намагничивания эпитаксиальной феррит - гранатовой пленки с ориентацией (111) в диапазоне частот до 1 МГц с учетом первой и второй констант кубической магнитной анизотропии.
2. На основании полученных данных изготовить образцы пленок феррита-граната, с эффективным полем анизотропии в плоскости пленки, менее 0,1 Э.
3. Реализовать метод измерения полного вектора магнитного поля путем регистрации ангармонизма вращения вектора намагниченности в пленке феррита-граната с кристаллографической ориентацией (111).
4. Провести теоретические анализ и экспериментальные исследования величины тепловых флуктуаций намагниченности в объеме чувствительного элемента на основе монокристаллической пленки феррита-граната.
5. Определить распределение намагниченности в краевых областях пленочного образца феррита-граната и выяснить критерии перехода в насыщенное состояние, с учетом влияния краевых областей пленки. Изготовить образцы с минимальным полем насыщения в плоскости пленки.

Научная новизна и практическая значимость работы. В диссертации определены условия, при которых наступает компенсация вкладов от кубической анизотропии четвертого и шестого порядков в эффективную анизотропию в плоскости (111) кубического магнетика.

Изготовлены образцы замещенных редкоземельных ферритов-гранатов с наведенным в плоскости полем анизотропии менее, чем $3 \cdot 10^{-2}$ Э, что на два порядка величины меньше, чем в незамещенном железо-иттриевом гранате. Определены критерии минимизации уровня магнитного шума сенсора с учетом вкладов от магнитного материала и возбуждающего резонатора.

Методом микромагнитного моделирования обоснована и экспериментально реализована схема снижения поля насыщения магнитной пленки в форме диска путем плавного уменьшения толщины в направлении края диска.

Практическая значимость заключается в том, что на основе исследования процесса циркулярного вращения намагниченности в плоскости тонкой пленки феррита-граната построен магнитометр с уровнем собственного шума 10^{-9} ЭГц^{0.5} (100 фТл/Гц^{0.5}). Продемонстрированный уровень чувствительности на два порядка величины лучше уровня существующих магнитомодуляционных сенсоров. В модельных экспериментах показана возможность регистрации магнитокардиограмм мелких животных. Применение новых датчиков по сравнению с традиционными сверхпроводящими магнитометрами имеет преимущество в экономичности, удобстве эксплуатации, технологичности.

Работы по применению новых датчиков поддержаны грантами: МНТЦ 3134 «Демонстрация использования магнитно-индукционных методов в системах обнаружения и противодействия контрабанде оружия», РФФИ 14-07-00943 «Магнитомодуляционные сенсоры на эпитаксиальных пленках феррит-граната с рекордной чувствительностью», РФФИ 14-32-00010 «Сверхчувствительные сенсоры магнитного поля для магнитокардиографии».

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Существует оптимальная комбинация параметров: кристаллографической ориентации, констант K_1 и K_2 кубической анизотропии, одноосной анизотропии и намагниченности магнитной пленки, которая обеспечивает нулевое поле анизотропии в плоскости пленки

феррита-граната с ориентацией (111).

2. Эпитаксиальные пленки феррита-граната состава $Tm_3Fe_{4.3}Sc_{0.7}O_{12}$ с ориентацией (111) демонстрируют величину поля анизотропии в плоскости пленки около 0.03 Э. Это на два порядка меньше, чем анизотропия в плоскости (111) феррит-гранатовых пленок стехиометрического состава $Y_3Fe_5O_{12}$.

3. Ангармонизм вращения вектора намагниченности пленки феррита-граната, вызванный совместным действием циркулярно вращающегося в плоскости пленки насыщающего поля и произвольно направленного внешнего квазистационарного измеряемого поля несет в себе информацию обо всех трех компонентах вектора измеряемого поля.

4. Полный шум сенсора определяется суммой вкладов электромагнитной системы и магнитного материала. Собственный магнитный шум эпитаксиальной пленки феррита-граната определяется намагниченностью насыщения и параметром диссипации магнитного материала пленки. Доминирующим является вклад от возбуждающей электромагнитной системы. Полный шум сенсора снижается при уменьшении поля насыщения магнитной пленки и увеличении частоты вращения намагниченности.

5. Величина поля насыщения магнитной пленки феррита-граната в форме диска может быть существенно снижена путем плавного уменьшения толщины в направлении края диска.

6. Уровень собственных шумов магнитометра, использующего циркулярное вращение намагниченности в плоскости тонкой пленки феррита-граната, составляет не более 10-9 Э/Гц^{0.5}, что на два порядка ниже уровня шума существующих магнитомодуляционных сенсоров. Увеличение чувствительности достигнуто благодаря высокой степени насыщения пленки феррита-граната, малой величине поля анизотропии в плоскости вращения, а также низкому уровню диссипации в феррите-гранате.

Апробация работы. Результаты исследований, вошедших в диссертацию, докладывались на:

- 38-th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials. Minneapolis, Minnesota, november 15-18, 1993;
- 6-th European Magnetic Materials and Applications Conference. Vien, Austria, September 4-8, 1995;
- 7-th International Symposium on Non-linear Electromagnetic Systems. Cardiff, Wales, September 17-20, 1995;
- 7th International conference on ferrites. Bordeaux, France, September 3-6, 1996;
- 1st European Conference on Magnetic Sensors & Actuators. Iasi, Romania, July 22-24, 1996;
- 3rd European Conference on Magnetic Sensors & Actuators. Dresden, Germany, July 19-21, 2000;
- International Scientific Scholl: High Sensitivity Magnetometer-Sensors & Applications. Port-Bail, France, November 4-8, 2002;
- 4th European Conference on Magnetic Sensors & Actuators. Athens, Greece, July 3-5, 2002;
- Eurosensors XVII Conference. Guimaraes, Portugal, September 21-24, 2003;
- Юбилейной XX международной школе-семинаре "Новые магнитные материалы микроэлектроники", приглашенный доклад. Москва, 12-16

- июня, 2006;
- Ninth World Congress "Biosensors-2006", oral talk. Toronto, Canada, May 10-12, 2006;
- 6th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators "EMSA-2006", oral talk. Bilbao, Spain, July 2-5, 2006;
- Доклад на заседании секции "Магнетизм" Научного совета РАН по физике конденсированных сред. Москва, 8 декабря, 2006;
- 6th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, "EMSA-2008", oral talk. Caen, France, 30 June - 2 July, 2008;
- 11th International Conference on Advanced Materials. Rio de Janeiro, Brasil, Sept.20-25, 2009;
- MPMNS' 10. Donetsk, Ukraine, May 29, 2010;
- 8th European Magnetic Sensors Conference (EMSA). Bodrum, Turkey, July 4-7, 2010;
- 9th European Magnetic Sensors & Actuators Conference. Prague, Czech., 1-4 of July, 2012;
- V Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism": Nanomagnetism (EASTMAG-2013), invited oral talk. Russky Island, Vladivostok, Russia. 15-21 September 2013;
- Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2014). Moscow, 29 June – 3 July 2014;
- 10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, EMSA-2014, Vienna, Austria, July 6 – 9, 2014;
- 20th International Conference on Magnetism, Barcelona, Spain, 5-10 July 2015;
- 11th European Magnetic Sensors and Actuators Conference (EMSA), invited oral talk. Torino, Italy, 11–16 July, 2016;
- VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2016), oral talk. Krasnoyarsk, Russia, August 15 -19, 2016;
- 8th Joint European Magnetic Symposia (JEMS2016), oral talk. Glasgow, UK, August 21-27, 2016.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 45 работ, из них – 18 статей в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, 3 патента РФ и 24 тезиса докладов на научных международных и российских конференциях.

Личный вклад автора заключался в постановке цели и конкретных задач исследования, проведении измерений магнитной восприимчивости магнитных пленок, анализе полученных данных, подбором состава эпитаксиальных пленок феррита-граната, микромагнитном моделировании распределения намагниченности и измерении шумовых характеристик магнитометров. Результаты, изложенные в диссертации, получены автором в кооперации с сотрудниками лаборатории Магнитных явлений ИРЭ РАН, микромагнитное моделирование проводилось в кооперации с сотрудниками отдела проектирования микроэлектронных компонентов для нанотехнологий ИППМ РАН, магнитные измерения проводились в кооперации с сотрудниками группы магнитооптики и плазмоники Российского Квантового Центра, эпитаксиальный рост пленок ферритов-гранатов проводился совместно с сотрудниками НПО «Карат».

Соответствие диссертации паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пункту

2. «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий» паспорта специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитированной литературы из 175 наименований. Диссертация изложена на 134 страницах, включая 2 приложения, содержит 5 таблиц, 81 формулу и 71 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведено краткое описание состояния проблемы, сформулирована цель работы, научная новизна, описана структура диссертации, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор основных свойств магнитных материалов и способов перемагничивания чувствительных элементов магнитных сенсоров с внешней модуляцией. Показано, что порог чувствительности магнитного сенсора с внешней модуляцией может быть уменьшен вплоть до предельных значений при перемагничивании путем когерентного вращения. Выявлены преимущества применения железоиттриевого граната в качестве рабочего материала магнитного сенсора.

Вторая глава содержит теоретические и экспериментальные исследования магнитной восприимчивости кубического магнетика при перемагничивании путем когерентного вращения в плоскости монокристаллической тонкой магнитной пленки.

В первом параграфе обоснован выбор кристаллографической ориентации пленки, и получены уравнения движения намагниченности для ориентации (111). Показана возможность регистрации напряженности и ориентации квазистационарного магнитного поля по измерению ангармонизма вращения намагниченности в плоскости пленки. Найдено соотношение первой и второй констант кристаллографической анизотропии, при котором наведенная в плоскости анизотропия равна нулю. Как было показано в [1], для кубического магнетика перемагничивание в плоскости (111) является изотропным по первой константе кубической анизотропии, т.е. разложение свободной энергии магнетика по углу поворота в плоскости (111) начинается со второй константы кубической анизотропии. Однако данный вывод был сделан в предположении, что вектор намагниченности не покидает этой плоскости.

В реальном случае траектория движения вектора намагниченности при вращении в плоскости (111) является более сложной, кристаллографическая анизотропия выводит вектор намагниченности из плоскости, и возникают дополнительные анизотропные силы пропорциональные углу выхода из плоскости. Здесь, чтобы корректно описать движение вектора намагниченности, необходимо учесть квадратичные члены по углу выхода из плоскости и первые две константы кубической анизотропии [A1, A10, A17].

Рассматривается монокристаллическая пленка кубического магнетика с ориентацией (111). В плоскости пленки приложено достаточное для насыщения поле H , совершающее циркулярное вращение с частотой ω (рис. 1). Выражение для плотности свободной энергии U , с точностью до

членов третьего порядка по углу выхода вектора намагниченности \mathbf{M} из плоскости θ имеет вид [A1, A17]:

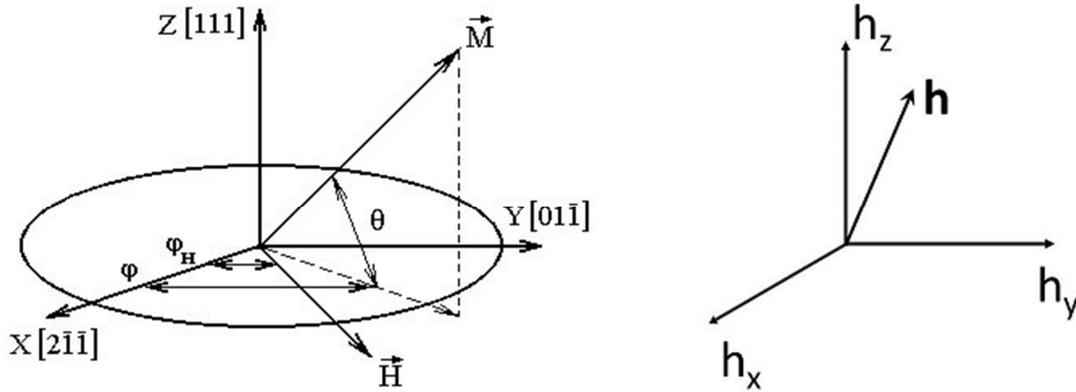


Рис. 1. Пленка феррит-граната во вращающемся в плоскости (111) магнитном поле \mathbf{H}

$$\begin{aligned}
 U = & -MH \cos(\varphi - \varphi_H) - Mh_x \cos \varphi - Mh_y \sin \varphi - \theta Mh_z \\
 & + \frac{K_2}{108} \cos 6\varphi - \theta \frac{\sqrt{2}}{3} \left(K_1 + \frac{K_2}{6} \right) \cos 3\varphi \\
 & + \theta^2 \left(2\pi M^2 + \frac{1}{2} MH \cos(\varphi - \varphi_H) + \frac{1}{2} Mh_x \cos \varphi - \frac{1}{2} Mh_y \sin \varphi \right),
 \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{M} - намагниченность, θ - угол выхода намагниченности из плоскости, K_u - константа одноосной анизотропии, K_1 и K_2 - константы кубической анизотропии четвертого и шестого порядков, φ - угол между проекцией намагниченности на плоскость пленки и осью [211], $\varphi = \omega t$, где ω - круговая частота вращающегося поля \mathbf{H} , а h_x , h_y и h_z - ортогональные компоненты вектора измеряемого магнитного поля \mathbf{h} .

Выражения для компонент вектора \mathbf{H} в декартовой системе координат имеют вид:

$$H_x = H \cos \omega t, H_y = H \sin \omega t, H_z = 0. \quad (2)$$

Комплексная восприимчивость магнетика в плоскости пленки $\chi = \chi' - j\chi''$ получается путем решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта в сферических координатах[2, 3]:

$$\chi' = \frac{\omega_M^2 (\omega_R^2 - \omega^2)}{(\omega_R^2 - \omega^2)^2 + \omega_D^2 \omega^2}, \quad (3)$$

$$\chi'' = \frac{\omega_M^2 \omega_D \omega}{(\omega_R^2 - \omega^2)^2 + \omega_D^2 \omega^2}, \quad (4)$$

где частоты ω_R , ω_D и ω_M выражаются в виде:

$$\omega_R = \gamma \left((4\pi M + H)(H + Ch_z \cos 3\varphi + H_c \cos 6\varphi) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

$$\omega_D = \alpha \gamma \left(2(H + 2\pi M) + Ch_z \cos 3\varphi + H_c \cos 6\varphi \right), \quad (6)$$

$$\omega_M = \gamma \left(M(4\pi M + H) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Здесь γ - гиромагнитный фактор, α - константа затухания, эффективные константы H_c и C равны:

$$H_C = \frac{K_2}{3M} - \frac{2\left(K_1 + \frac{K_2}{6}\right)^2}{M(4\pi M^2 - 2K_u + MH)}, \quad (8)$$

$$C = \frac{3\sqrt{2}\left(K_1 + \frac{K_2}{6}\right)}{4\pi M^2 - 2K_u + MH}. \quad (9)$$

Эти константы слабо зависят от магнитного поля и могут считаться константами материала.

Упростив выражения для χ , поскольку $\omega_R \gg \omega$, получаем:

$$\chi'(\varphi) = \frac{M}{H} \left(1 - \frac{h_X}{H} \sin \varphi - \frac{h_Y}{H} \cos \varphi - \frac{Ch_Z}{H} \cos 3\varphi - \frac{H_C}{H} \cos 6\varphi \right). \quad (10)$$

Как следует из выражения (10), измеряя магнитную восприимчивость в зависимости от угла между направлением [211] и проекцией вектора намагниченности на плоскость (111), можно определить величины h_X , h_Y , Ch_Z и H_C путем выделения Фурье компонент из зависимости $\chi'(\varphi)$:

$$h_X = \frac{H^2}{M} * \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \chi'(\varphi) \sin \varphi d\varphi, \quad (11)$$

$$h_Y = \frac{H^2}{M} * \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \chi'(\varphi) \cos \varphi d\varphi, \quad (12)$$

$$Ch_Z = \frac{H^2}{M} * \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \chi'(\varphi) \cos 3\varphi d\varphi, \quad (13)$$

$$H_C = \frac{H^2}{M} * \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \chi'(\varphi) \cos 6\varphi d\varphi. \quad (14)$$

Полученные соотношения (11-13) дают возможность построить алгоритм одновременного измерения всех трех компонент магнитного поля путем измерения компонент тензора восприимчивости тремя катушками, окружающими магнитную пленку [A10, A19].

Величина H_C (14) представляет собой поле анизотропии в плоскости вращения пленки и может принимать нулевое значение даже при ненулевом значении константы C , что позволяет убрать из сигнала неинформативную шестую гармонику по частоте накачки, сохранив при этом чувствительность сенсора по трем направлениям [A1, A10]. В частном случае применения магнитных материалов без ярко выраженных анизотропных свойств, например, Sc-замещенного ЖИГа или других изотропных материалов, константы K_1 и $K_2 = 0$. Тогда согласно (8) и (9) величины C и H_C равны нулю, и возможно только измерение компонент h_X и h_Y .

С целью проверки соотношения (10) зависимости $\chi'(\varphi)$ исследовались в эксперименте. Полученные данные показаны на рис.2 – рис.4. Определенные из эксперимента с помощью (13-14), а также найденные по формулам (8-9) значения C и H_C приведены в таблице 1. Из сравнения данных таблицы 1 с соотношениями (8-9) можно видеть, что уменьшение наведенного поля анизотропии в плоскости (111) Pr-замещенных и Sc-замещенных феррит-гранатов происходит по разным сценариям: в случае замещения ионов Fe^{3+} в октаэдрических позициях ионами Sc^{3+} происходит уменьшение константы K_1 , при этом величина H_C , благодаря квадратичной зависимости от K_1 , соответственно уменьшается. В случае внедрения в додекаэдрические позиции ионов Pr^{3+} , уменьшение H_C происходит преимущественно за счет линейного по K_u увеличения плоскостной анизотропии.

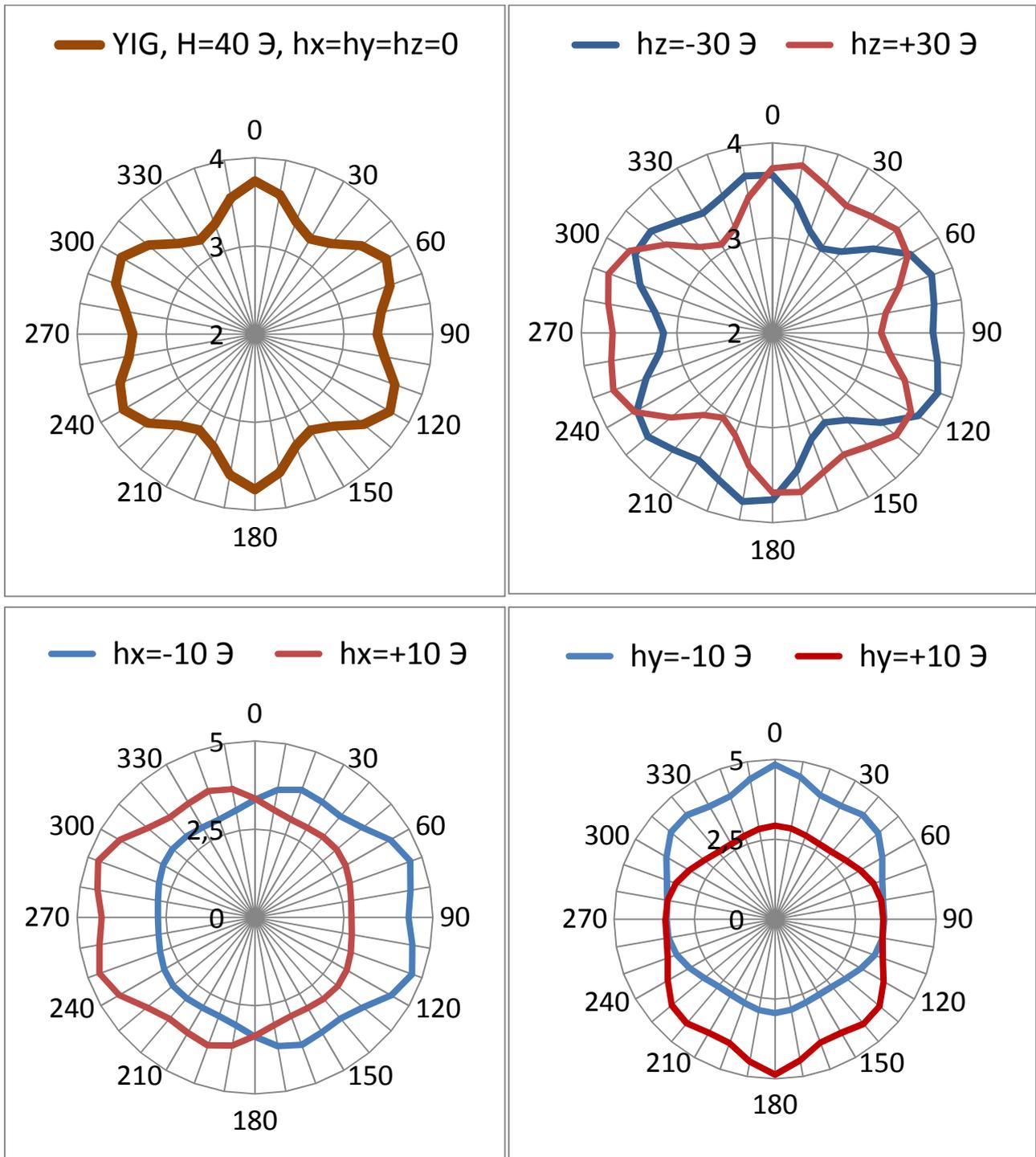


Рис. 2. Измеренные угловые зависимости магнитной восприимчивости в плоскости пленки $\chi'(\varphi)$ в насыщающем поле $H=40$ Э и различных постоянных полях h_x , h_y и h_z , для феррит-граната $Y_3Fe_5O_{12}$. При воздействии нормального к плоскости пленки $-h_z$ и плоскостных $-h_x$ и h_y полей, в зависимости $\chi'(\varphi)$ по углу φ появляются дополнительные гармонические составляющие на третьей и первой гармониках, согласно формуле (10).

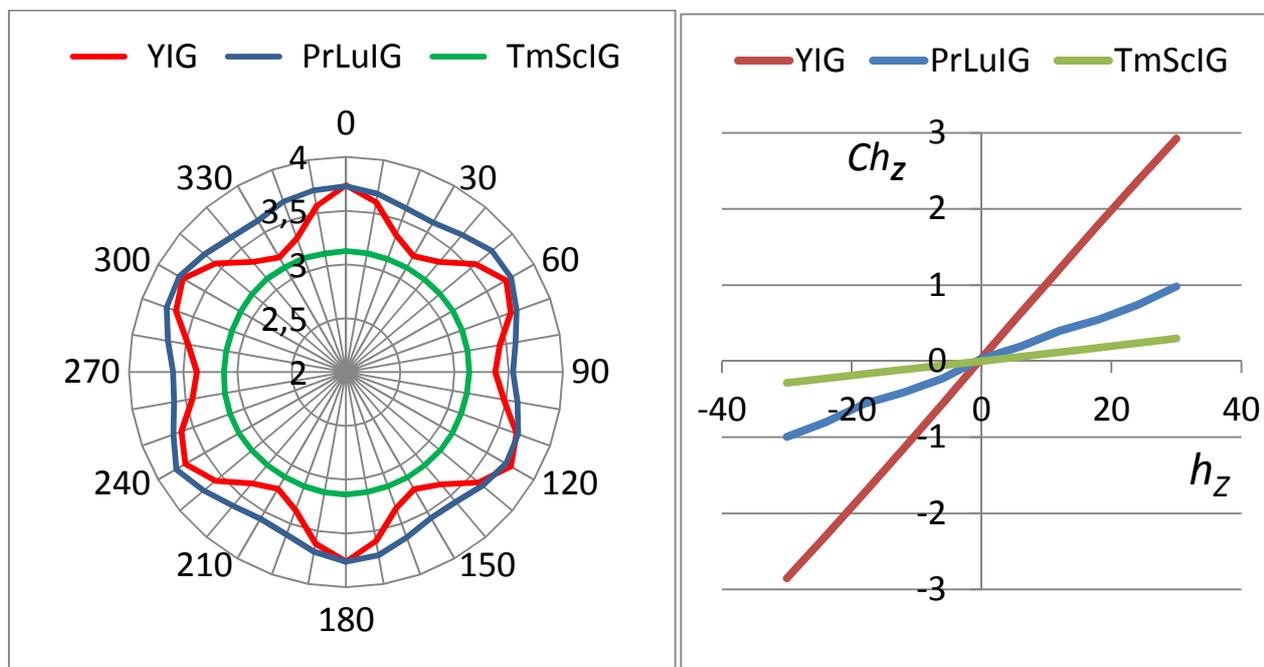


Рис. 3.

Рис. 4.

Рис. 3 – Экспериментальные угловые зависимости $\chi'(\varphi)$ в насыщающем поле $H=40$ Э и нулевом постоянном ($h_x=h_y=h_z=0$) для феррит-гранатов трех различных составов: $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG), $Lu_{2.15}Pr_{0.85}Fe_5O_{12}$ (PrLuIG) и $Tm_3Fe_{4.3}Sc_{0.7}O_{12}$ (TmScIG).

Рис. 4 – Измеренные зависимости величины Ch_z от напряженности магнитного поля h_z , приложенного по нормали к плоскости пленки для пленок составов YIG, PrLuIG и TmScIG.

Таблица 1. Сравнение теоретических и экспериментальных значений величин H_C и C .

Химическая Формула	K_1 , эрг/см ³	K_2 , эрг/см ³	K_u , эрг/см ³	$4\pi M$, Г	H_C , Э Теор.	H_C , Э Эксп.	C Теор.	C Эксп.
$Y_3Fe_5O_{12}$	$-6 \cdot 10^3$	~ 0	~ 0	1750	2.5	2.5	0.095	0.1
$Lu_{2.15}Pr_{0.85}Fe_5O_{12}$	$-6 \cdot 10^3$	~ 0	$-1.5 \cdot 10^5$	1800	0.9	0.92	0.045	0.036
$Y_3Fe_{4.99}Ru_{0.01}O_{12}^*$	~ 0	$-3 \cdot 10^3$	~ 0	1750	6.5	6.6	0.001	0.001
$Tm_3Fe_{4.3}Sc_{0.7}O_{12}$	$-0.6 \cdot 10^3$	~ 0	~ 0	1600	0.026	0.03	0.012	0.011

Экспериментальные величины H_C определялись по формуле (14) из зависимостей $\chi'(\varphi)$, представленных на рис. 3, а величины C - из рис. 4.

Величины K_1 , Ku и $4\pi M$ определены по составу феррита-граната [4-7].

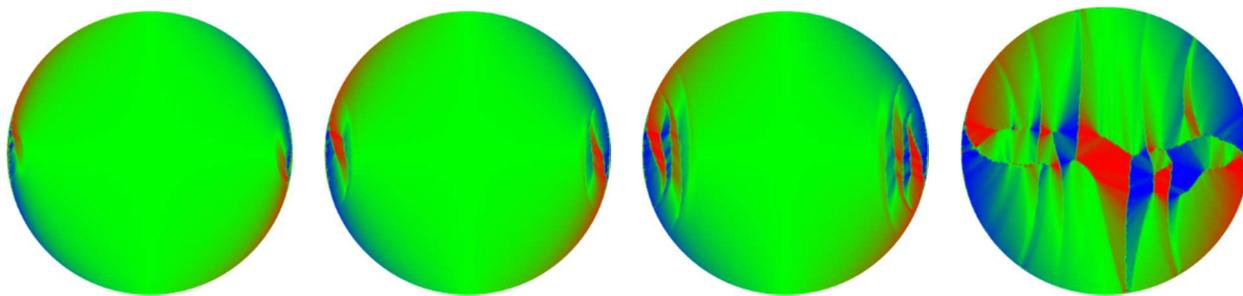


Рис. 5. Распределение намагниченности для одноступенчатого диска при последовательном уменьшении внешнего магнитного поля, слева направо – 20 Э, 10 Э, 5 Э, 2.5 Э.

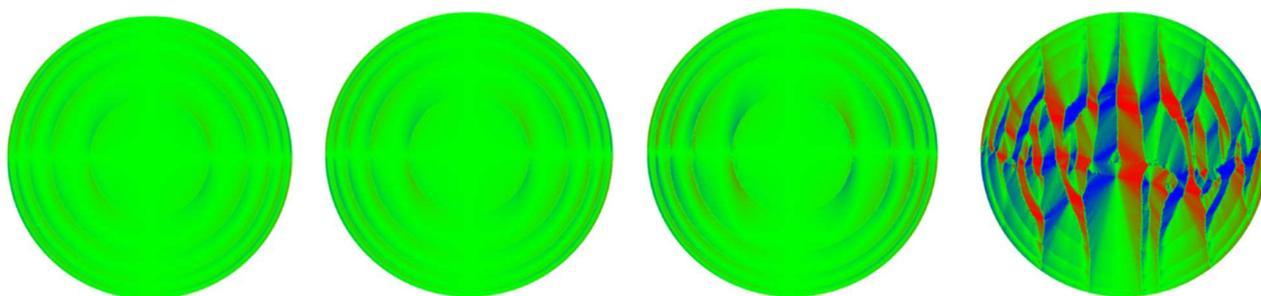


Рис. 6. Распределение намагниченности для пятиступенчатого диска при последовательном уменьшении внешнего магнитного поля, слева направо – 20 Э, 10 Э, 5 Э, 2.5 Э.

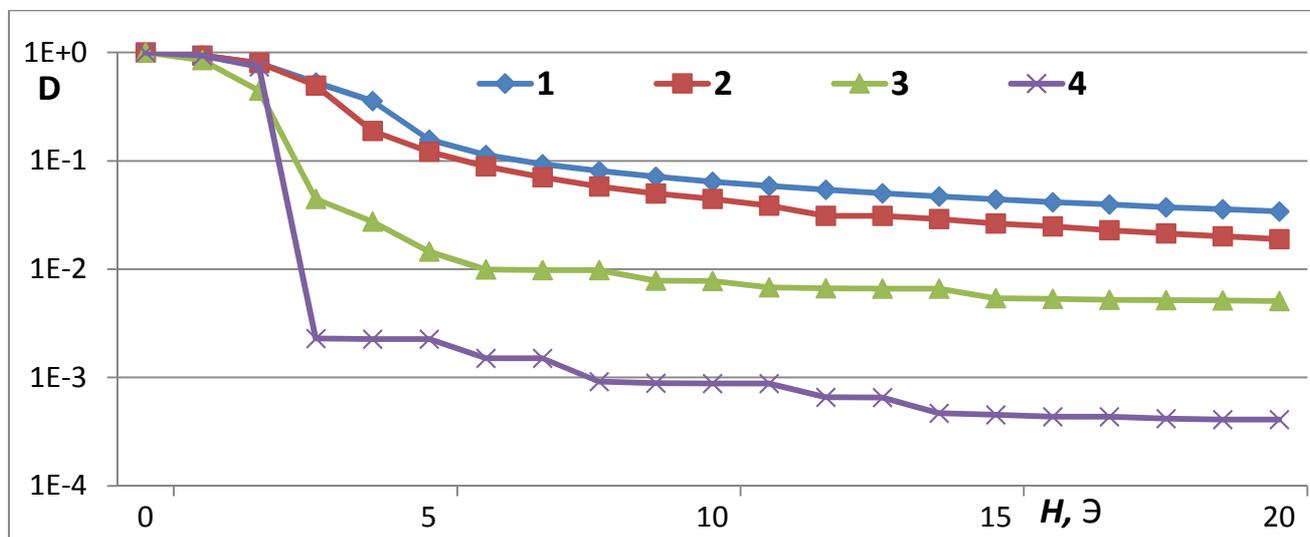


Рис. 7. Зависимость фактора деполяризации от величины насыщающего поля в плоскости для дисков: 1-одноступенчатый с вертикальным краем, 2-одноступенчатый с наклоном 45 градусов, 3-пятиступенчатый с наклоном 45 градусов, 4-непрерывный эллиптический профиль.

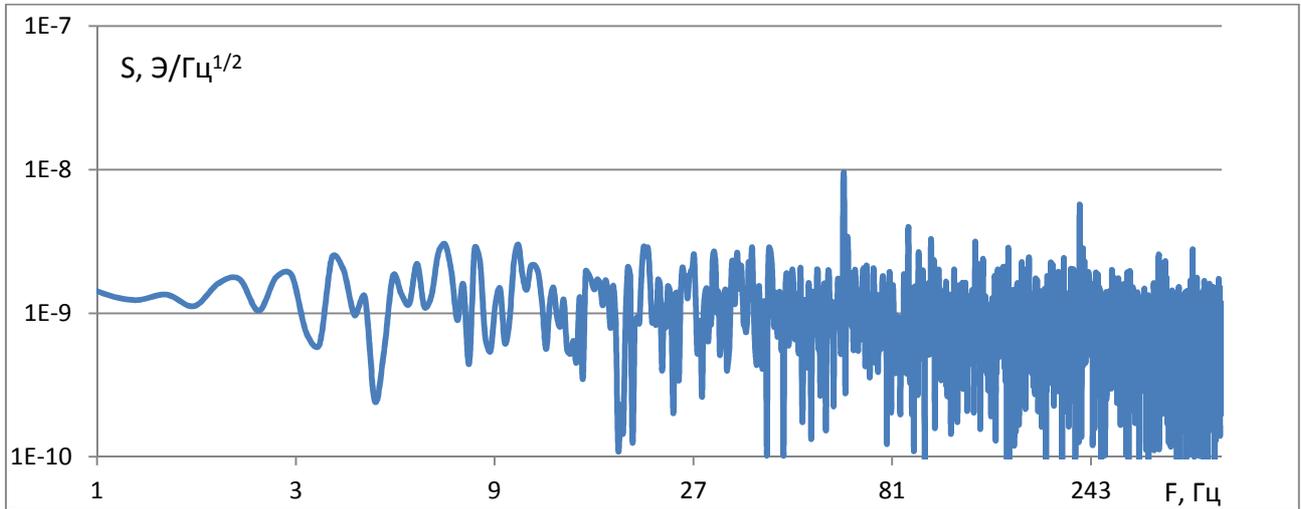


Рис. 8. Спектральная плотность магнитных шумов сенсора в диапазоне частот 1 – 500 Гц.

Третья глава посвящена оценке термодинамических флуктуаций в сенсоре с учетом тепловых возбуждений в магнетике и возбуждающих катушках. Оценка шумов производилась исходя из флуктуационно-диссипационных соотношений [5]:

$$\langle H_f^2 \rangle_\omega = \frac{T}{\pi\omega V} \cdot \frac{\chi''(\omega, H)}{|\chi(\omega, H)|^2}; \quad (15)$$

после подстановки выражений для магнитной восприимчивости (3-4):

$$\langle H_f^2 \rangle_\omega = \frac{T}{\pi\omega V} \cdot \frac{\omega_D \omega}{\omega_M^2} = \frac{T}{2\pi V} \cdot \frac{\alpha}{\gamma M}. \quad (16)$$

Формула (16) показывает, что удельные тепловые флуктуации магнитного поля определяются только феноменологическим фактором затухания Гильберта – α .

На практике для оценки диссипации энергии в ферритах-гранатах часто используется параметр ΔH – ширина линии ферромагнитного резонанса.

Обычно ΔH представляют в виде суммы вкладов в ширину линии от различных механизмов диссипации [2]:

$$\Delta H = \Delta H_0 + \Delta H_{in} + \Delta H_G + \dots, \quad (17)$$

где ΔH_0 – уширение линии, связанное с неоднородностью распределения намагниченности и анизотропии в объеме образца,

ΔH_{in} – рассеяние на дефектах с образованием спиновых волн,

ΔH_G – уширение, вызванное эффективным полем сил вязкого трения, пропорциональное скорости изменения намагниченности и выражаемое через константу α [2]:

$$\Delta H_G = \frac{\alpha}{\gamma M} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\alpha \omega}{\gamma}. \quad (18)$$

Приведем оценку эффективного стороннего магнитного поля, вызванного термомагнитными флуктуациями $\langle H_f^2 \rangle_\omega$ для ЖИГ пленки с параметрами

$\Delta H = 1$ Э на частоте 1 МГц, $M = 140$ Гаусс,

$V = 2.5 \cdot 10^{-4}$ см³ (1 см в диаметре и толщиной 3.2 мкм),

$T = 4.2 \cdot 10^{-14}$ эрг (300 К), $\gamma = 2.8$ МГц/Э.

Согласно (16), величина $\sqrt{\langle H_f^2 \rangle_\omega}$, определяющая шумовой вклад магнитного материала, при данных параметрах составляет $2,2 \cdot 10^{-11}$ Э/Гц^{0.5} (2.2 фТл/Гц^{1/2}). Примечательно, что $\langle H_f^2 \rangle_\omega$ явно не зависит от величины насыщающего поля. Такое обстоятельство связано с предположением о постоянстве величины $\alpha(\omega, H)$, что верно только при достаточно больших величинах насыщающего поля. При полях близких к порогу насыщения, α будет возрастать в связи с нарушением однородности распределения намагниченности в образце.

В случае реальных измерительных катушек ситуация несколько усложняется, выражение для флуктуационного поля принимает вид [A1]:

$$\langle H_f^2 \rangle_\omega = \frac{4T}{\omega V_0} \left(\frac{1}{Q_0} + \frac{Re(\mu_{eff})-1}{Q_M} \right) \cdot \frac{1}{(Re(\mu_{eff})-1)^2 \cdot \left(1 + \frac{4}{Q_M^2}\right)}, \quad (19)$$

где

$$\mu_{eff} = 1 + 4\pi\chi_{eff}, \quad (20)$$

$$\chi_{eff} = (\chi' - j\chi'') \cdot \frac{V}{V_0}, \quad (21)$$

V и V_0 - объемы магнитного материала и резонатора соответственно,

$$Q_M = \frac{\chi'(\omega, H)}{\chi''(\omega, H)} = \frac{\omega_R^2 - \omega^2}{\omega_D \omega} \approx \frac{\gamma H}{\omega \alpha} \quad (22)$$

- добротность магнитного материала, Q_0 - значение добротности катушки без магнетика. Из полученного соотношения для частоты $f = 150$ кГц оценим порог чувствительности магнитометра на основе тонкой пленки ЖИГ с указанными выше параметрами: $M = 140$ Э, $H = 10$ Э, $\Delta H = 1$ Э, $Q_M = 3.4 \cdot 10^4$, $Q_0 = 10$, толщина $d_0 = 640$ мкм, объем $V_0 = 5 \cdot 10^{-2}$ см³, ($V/V_0 = 10^{-2}$). При комнатной температуре из (21) находим $\chi_{eff}' = 14$, а из (20) получим $Re(\mu_{eff}) = 1.88$. Тогда величина $\sqrt{\langle H_f^2 \rangle_\omega}$ шумовых флуктуаций из (19) будет составлять около 10^{-9} Э/Гц^{0.5} (0.1 пТл/Гц^{1/2}). Это значение на 2 порядка превышает величину, полученную из (16) для магнетика без резонатора.

В выражении (19) соотношение между слагаемыми в первых скобках, т.е. Q_0^{-1} и $(Re \mu_{eff}-1)/Q_M$, отражает отношение потерь в резонаторе к потерям в магнитном материале. Поскольку $Q_M \gg Q_0$, выражение (19) может быть приведено к виду:

$$\langle H_f^2 \rangle_\omega \approx \frac{4T}{\omega V_0} \cdot \left(\frac{1}{Q_0} \right) \cdot \frac{1}{(Re(\mu_{eff})-1)^2} \quad (23)$$

и с учетом (3-4) представлено как

$$\langle H_f^2 \rangle_\omega \approx \frac{4T}{\omega} \cdot \frac{V_0}{Q_0} \cdot \frac{H^2}{(4\pi M)^2}. \quad (24)$$

Из (24) следует возможность уменьшения относительного вклада в шум сенсора от потерь в резонаторе, путем уменьшения величины H^2 , т.е. величины приложенного в плоскости пленки насыщающего магнитного поля.

Минимально возможное поле насыщения чувствительного элемента из феррит-гранатовой пленки ограничено двумя факторами: эффективной магнитной анизотропией в плоскости пленки и требованием подавления доменных структур, возникающих под воздействием размагничивающих

факторов. Как было показано во второй главе, эффективное поле магнитной анизотропии в пленках феррита-граната с ориентацией (111) может быть уменьшено до величин порядка 0.03 Э. В то же время, полное подавление доменных структур, возникающих на краях пленки, в общем случае возможно только при полях насыщения сравнимых с намагниченностью материала (~ 1000 Э).

Таким образом, оптимизация профиля краевой области феррит-гранатового чувствительного элемента является необходимым условием для дальнейшего повышения чувствительности датчиков на основе вращения намагниченности в магнитной пленке.

В главе 4 рассмотрены критерии перехода пленки в монокристаллическое состояние, описана установка для измерения степени насыщения магнетика, описана процедура оптимизации профиля толщины чувствительного элемента с целью уменьшения поля насыщения. Приведена блок-схема магнитометра и результаты магнитных измерений.

Оптимизация профиля края диска проводилась методами микромагнитного моделирования [8]. Известно, что ширина доменных границ в тонких пленках с плоскостной анизотропией увеличивается с уменьшением толщины [7], так что соответственно падает поле насыщения. Поэтому среди возможных профилей края диска был выбран ступенчатый, поскольку на практике, он может быть реализован с помощью многослойной литографии.

Результаты микромагнитного моделирования методом конечных разностей [А6, А9] показывают, что для материала типа Sc – Ir – замещенного ЖИГа с намагниченностью $4\pi M = 1000$ Гаусс, константой неоднородного обмена $A = 3$ пДж/м, анизотропией $K_u = \sim -1000$ Дж/м³ и $K_I = \sim 0$ Дж/м³ в базовой плоскости (111) для датчика диаметром 1 см и толщиной 6 мкм ступенчатая форма края пленки приводит к снижению порога насыщения с 25-30 Э до 5-7 Э. Более подробно влияние формы края пленки изучалось методом конечных элементов [А11]. Были исследованы следующие профили: непрерывный эллиптический, пятиступенчатый и одноступенчатый с различными углами наклона плоскостей между ступенями.

На рис. 5 изображены распределения намагниченности, полученные методом конечных элементов для одноступенчатого образца с вертикальными краями, на рис. 6 - для пятиступенчатого с наклоном плоскостей между ступенями под 45 градусов. В качестве критерия степени насыщения был выбран фактор деполяризации $D = 1 - \left(\frac{M_x}{M_s}\right)^2$, где M_x – средняя проекция вектора намагниченности всех элементов разбиения диска на направление ОХ, вдоль которого приложено насыщающее поле H_{sat} , M_s – намагниченность насыщения. При приближении распределения намагниченности пленки к однородному фактор деполяризации стремится к нулю.

Расчет показывает, что наклон ступеньки одноступенчатого профиля уменьшает фактор деполяризации в несколько раз (рис. 7, кривая 2). В то же время, пятиступенчатая аппроксимация эллиптического профиля на порядок улучшает однородность распределения намагниченности в сравнении с одноступенчатым (рис. 7, кривая 3).

Спектральная плотность магнитных шумов сенсора представлена на рис. 8. Измерения проводились в трехслойной магнитно экранированной комнате АКЗВ, изготовленной фирмой Vacuumschmelze GmbH. Коэффициент подавления внешнего поля в пределах комнаты составлял 700 на частоте 1 Гц, 8000 на

частоте 10 Гц и более 50 000 на частоте 100 Гц.

Отсутствие вплоть до 1 Гц $1/f$ -составляющей в спектре собственных шумов магнетометра указывает на практически полностью насыщенное состояние магнитной пленки. Величина измеренной плотности шума составляет $\sim 1 \cdot 10^{-9}$ Э/Гц^{0.5} (100 фТл), что в пределах точности расчетов и измерений совпадает с теоретически предсказанной.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена и реализована методика измерения ультраслабых магнитных полей на основе процесса циркулярного вращения намагниченности в плоскости тонкой пленки феррита-граната. Показана чувствительность к измеряемому магнитному полю на уровне шума 10^{-9} Э/Гц^{0.5} (100 фТл/Гц^{0.5}).

2. Показано, что для реализации этой методики необходимо компенсировать влияние магнитокристаллической анизотропии в плоскости пленки; построена соответствующая теоретическая модель; изготовлены образцы замещенных редкоземельных ферритов-гранатов с наведенным в плоскости полем анизотропии менее, чем $3 \cdot 10^{-2}$ Э, что на два порядка величины меньше, чем в незамещенном железо-иттриевом гранате.

3. Теоретически обоснована и реализована на практике методика измерения всех трех компонент магнитного поля с помощью одного сенсора.

4. Разделены вклады магнитного шума от магнитного материала пленки и от флуктуаций тока в возбуждающей электромагнитной системе. Показано, что первый определяется величиной мнимой части магнитной восприимчивости, в то время как флуктуации тока пропорциональны полю насыщения магнетика. Эти флуктуации на два порядка величины больше, чем шумовой вклад от магнитного материала. Таким образом, для увеличения чувствительности сенсора необходимо, в первую очередь, уменьшать поле насыщения эпитаксиальной магнитной пленки. Проведенный эксперимент согласуется с теорией.

5. Методом микромагнитного моделирования обоснована и экспериментально реализована схема снижения поля насыщения магнитной пленки в форме диска путем плавного уменьшения толщины в направлении края диска. Такая форма магнетика препятствует образованию замыкающих доменов на краю диска, что приводит к увеличению чувствительности сенсора.

Основные публикации автора по теме диссертации

Публикации в журналах из списка ВАК

A1. Vetoshko, P. M. Epitaxial iron garnet film as an active medium of an even-harmonic magnetic field transducer / P. M. Vetoshko, M. V. Valeiko, P. I. Nikitin // Sensors and Actuators A. – 2003. – Vol. 106, N 1-3. – P. 270-273.

A2. Nikitin, P. I. Magnetic field sensors based on thin film multi-layer structures / P. I. Nikitin, S. I. Kasatkin, P. M. Vetoshko et al. // Sensors and Actuators A. – 2003. – Vol. 106, N 1-3. – P. 26-29.

A3. Vetoshko, P. M. Novel static criterion for magnetic sensor film saturation / P. M. Vetoshko, M. V. Valeiko, P. I. Nikitin // Sensor Letters. – 2007. – Vol. 5. – Pp. 189-191.

A4. Skidanov, V. Ultrasensitive core for magneto-optical fluxgate magnetometer with high space resolution / V.

- Skidanov, P. Vetoshko // *Procedia Engineering*. – 2010. – Vol. 5. – Pp. 989-992.
- A5. Skidanov, V. A. Hysteresis Loop Design by Geometry of Garnet Film Element with Single Domain Wall / V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko, A. L. Stempkovsky // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2011. – Vol. 266. – P. 012125.
- A6. Vetoshko, P. Magnetization Distribution Near Edge of YIG Film Core in Fluxgate Magnetometer / P. M. Vetoshko, V. A. Skidanov, A. L. Stempkovsky // *Sensor Letters*. – 2013. – Vol. 11. – Pp. 59-61.
- A7. Ветошко, П. М. Роль различных механизмов затухания в формировании установившегося режима прецессии намагниченности в магнитоупругой среде / П. М. Ветошко, В. Г. Шавров, В. И. Щеглов // *Труды XXII Международной конференции "Электромагнитное поле и материалы. Москва 21-22 ноября 2014"*. – С. 237-253.
- A8. Ветошко, П. М. Формирование магнитного затухания за счет упругой диссипации в схеме ротационного магнетометра / П.М. Ветошко, В. Г. Шавров, В. И. Щеглов // *Журнал радиоэлектроники*. – 2014. – № 11. – С. 1-56.
- A9. Skidanov, V.A. Modeling of Magnetization Distribution Near Shaped Boundary of Garnet Film Core in Fluxgate Magnetometer / V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko, A. L. Stempkovsky, L. Uspenskaya // *IEEE Transactions on magnetics*. – 2015. – Vol. 51, N 1. – P. 7000104.
- A10. Syvorotka, I.I. In-Plane Transverse Susceptibility of (111)-Oriented Iron Garnet Films / I. I. Syvorotka, P. M. Vetoshko, V. A. Skidanov at al. // *IEEE Transactions on magnetics*. – 2015. – Vol. 51, N 1. – P. 2000703.
- A11. Ветошко, П.М. Влияние профиля дискового магнитного элемента на поле насыщения и шум магнитомодуляционного сенсора магнитного поля / П. М. Ветошко, А. К. Звездин, В. А. Скиданов // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41, вып. 9. – С. 103-110.
- A12. Ветошко, П. М. Роль упругой диссипации в формировании затухания прецессии намагниченности в магнитоупругой среде / П.М. Ветошко, В. Г. Шавров, В. И. Щеглов // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41, вып. 21. С. 1-5.
- A13. Ветошко, П. М. Влияние подложки на магнитоупругие колебания в структуре «магнитная пленка – немагнитная подложка» / П. М. Ветошко, В. Г. Шавров, В. И. Щеглов // *Журнал радиоэлектроники*. – 2015. – № 8. – С. 1-33.
- A14. Ветошко, П. М. Магнитомодуляционный сенсор магнитного поля на базе пленок феррита-граната для магнитокардиографических исследований / П. М. Ветошко, Н. А. Гусев, Д. А. Чепурнова и др. // *Письма в ЖТФ*. – 2016. – Т. 42, вып. 16. – С. 64-71.
- A15. Чернов, А. И. Локальное зондирование магнитных пленок с помощью оптического возбуждения магнитостатических волн / А. И. Чернов, М. А. Кожяев, П. М. Ветошко и др. // *Физика твердого тела*. – 2016. – Т. 58. – С. 1093-1098.
- A16. Prokopov, A. R. Epitaxial BiGdSc iron-garnet films for magnetophotonic applications / A. R. Prokopov, P. M. Vetoshko, A. G. Shumilov at al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 671. – Pp. 403-407.
- A17. Rogachev, A. E. Vector magneto-optical sensor based on transparent magnetic films with cubic crystallographic symmetry/ A. E. Rogachev, P. M. Vetoshko, N. A. Gusev at al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2016. – Vol. 109, N 16. – P. 162403.
- A18. Ветошко, П.М. Регистрация магнитокардиограмм крыс с помощью сенсора магнитного поля на

основе феррит-гранатовых пленок / П.М. Ветошко, Н.А. Гусев, Д.А. Чепурнова, Е.В. Самойлова, А.К. Звездин, А.А. Коротаева // Медицинская Техника. – 2016. – № 4. – С. 15-18.

Патенты

A19. Пат. 2100819 Российская Федерация, G01R33/00, G01R33/02, G01R33/05. Магнитометер / Ветошко П.М. ; заявл. 30.09.1996. ; опубл. 27.12.1997, в Гос. реестре изобретений РФ 27.12.1997.

A20. Пат. 2177611 Российская Федерация. Измеритель магнитной восприимчивости / Никитин П. И., Ветошко П.М. ; заявл. 09.03.2000 ; опубликован 27.12. 2001. Бюл. N 36.

A21. Пат. 2447527 Российская Федерация. Способ и устройство для создания магнитного поля, локализованного в нанометровой области пространства / Ветошко П.М., Назаров А. А., Новак В. Р., Скиданов В.А., Стемповский А.Л. ; заявл. 27.04.2011. ; опубл. 10.04.2012 в Гос. реестре изобретений РФ 10.04.2012.

Материалы международных и национальных конференций

A22. P. I. Nikitin, P. M. Vetoshko, M. V. Valeiko. YIG magnetometers. // Proceedings of International Scientific Scholl "High Sensitivity Magnetometers-Sensors & Applications" Port-Bail, France, November 4-8, 2002. P. 23-24.

A23. P. I. Nikitin, S. I. Kasatkin, A. M. Muravjov, P. M. Vetoshko, M. V. Valeiko, V. I. Konov, T. Meydan. Magnetic field sensors based on thin film multi-layer structures // Proceedings of the 4th European Magnetic Sensors and Actuators Conference, Athens, Greece, 3-5 July, 2002. P. S1_P2.

A24. P. M. Vetoshko, M. V. Valeiko, P. I. Nikitin. Novel 3D "Flux-Spin" Magnetometer // Proceedings of the 5th European Magnetic Sensors and Actuators Conference, Cardiff, UK, 4-7 July, 2004. P. M-P.18.

A25. P. M. Vetoshko, M. V. Valeiko, P. I. Nikitin. Novel static criterion for magnetic sensor film saturation // Proceedings of the 6th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators "EMSA-2006", Bilbao, Spain, July 2-5, 2006. P. 141.

A26. P. M. Vetoshko, M. V. Valeiko, P. I. Nikitin, I. I. Syvorotka. Multe-channel module system of highly sensitive room-temperature magnetometers // Proceedings of the 6th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators "EMSA-2008", Caen, France, 2008. P. MoP60.

A27. М. В. Валейко, П. М. Ветошко, П. И. Никитин. Нанослойные чередующиеся магнитные пленки и высокочувствительные магнетометры на их основе // Приглашенный секционный доклад и опубликованные тезисы в трудах Международного форума по нанотехнологиям. Москва. 3-5 Декабря, 2008. Т. 1. С. 728-730.

A28. V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko, A. L. Stempkovsky. Hysteresis Loop Design by Geometry of Garnet Film Element with Single Domain Wall // 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications. Sendai, Japan, July 12-16, 2010. P. 178.

A29. P. M. Vetoshko, V. A. Skidanov, A. L. Stempkovsky. Magnetization distribution near edge of YIG film core in fluxgate magnetometer // Book of Abstracts 8 th European Magnetic Sensors Conference (EMSA). Bodrum, Turkey, July 4-7, 2010. P. 78.

A30. V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko. Ultrasensitive Core for Magneto-optical Fluxgate Magnetometer with High

- Space Resolution // Proceedings of Eurosensors XXIV Conference. B5L-D Linz, Austria, September 5-8, 2010. Pp.1877-7058.
- A31. V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko. Effects of reversibility and irreversibility in uniaxial garnet elements magnetized by elastic domain wall motion // Abstracts of 20th International Conference on Soft Magnetic Materials. Kos, Greece. September 18-22, 2011. P. 448.
- A32. V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko, A. L. Stempkovsky. High Sensitive Microsensor for Magnetic Nanoparticle Detection in Biochip Channels and Vascular System // Proceedings of 2011 International Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Lucerne, Switzerland. 4-6 May, 2011. P. 207-208.
- A33. V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko, A. L. Stempkovsky. Magneto-optical Sensitive Elements for Single Magnetic Nanoparticle Detection // Book of Abstracts European Magnetic Sensors & Actuators Conference, Prague. 1-4 of July, 2012. P. 71.
- A34. V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko, A. L. Stempkovsky. Uniaxial Ferrite Garnet Elements with Two Domain Walls // Abstracts of III International Non Exchange Bias in Conference on Superconductivity and Magnetism, Istanbul. 29 of April – 4 of May 2012. P. 310.
- A35. I. I. Syvorotka, I. M. Syvorotka, V. G. Shavrov, V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko. Highly sensitive room temperature magnetometer based on epitaxial iron garnet film // V Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism": Nanomagnetism (EASTMAG-2013), invited oral talk. Russky Island, Vladivostok, Russia. 15-21 September 2013. Mo-6M-I3. P. 60.
- A36. P. M. Vetoshko, V. A. Skidanov, F. P. Vetoshko. Magnetostatic energy of the domain walls in uniaxial films of finite dimensions // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2014). Moscow, 29 June – 3 July 2014. 30PO-P-12. P. 293.
- A37. I. I. Syvorotka, I. M. Syvorotka, V. G. Shavrov, V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko. In-plane Transverse Susceptibility of (111)-oriented Iron Garnet Films // 10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, EMSA-2014, Vienna, Austria, July 6 – 9, 2014. TP43. P. 153.
- A38. P. M. Vetoshko, V. G. Shavrov, V. A. Skidanov, I. I. Syvorotka, I. M. Syvorotka. Sub-pT Sensitivity of Rotational Fluxgate Magnetometer Based on $Tm_3Fe_5-xSc_xO_{12}$ Garnet Film Core // 10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, EMSA-2014, Vienna, Austria, July 6 – 9, 2014. MP54. P.73.
- A39. P. M. Vetoshko, V. A. Skidanov, F. P. Vetoshko. Arbitrary Equilibrium State of Domain Wall in Uniaxial Garnet Film Sensitive Element // 10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, EMSA-2014, Vienna, Austria, July 6 – 9, 2014, Book of Abstracts, TP47, P. 157.
- A40. V. A. Skidanov, P. M. Vetoshko, F. P. Vetoshko, L. Uspenskaya, A. L. Stempkovskiy. Modeling of Magnetization Distribution near Shaped Boundary of Garnet Film Core in Fluxgate Magnetometer // 10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, EMSA-2014, Vienna, Austria, July 6 – 9, 2014. MP08, P. 27.
- A41. P. M. Vetoshko, M. A. Kozhaev, N. A. Gusev, A. K. Zvezdin, I. I. Syvorotka, I. M. Syvorotka, V. I. Belotelov. Enhancement of the magnetic field sensor sensitivity through tailoring of the magnetic disk profile // 20th International Conference on Magnetism, Barcelona, Spain, 5-10 July 2015. P. 2050.
- A42. P. M. Vetoshko, D. V. Dodonov, M. A. Kozhaev, I. I. Syvorotka, I. M. Syvorotka, A. K. Zvezdin, V. I. Belotelov. Excitation of a uniform rotational magnetization mode in easy-plane iron-garnet films for flux-gate

sensors // 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), Barcelona, Spain, 5-10 July 2015. P. 2069.

A43. P. M. Vetoshko. Ultrasensitive flux-gate magnetometer for biomagnetic measurements // The European Magnetic Sensors and Actuators Conference (EMSA), invited oral talk. Torino, Italy, 11 – 16 July 2016.

A44. P. M. Vetoshko, N. A. Gusev, V. I. Belotelov, A. K. Zvezdin. Ultrasensitive flux-gate magnetometer based on iron garnet film for biomedical applications // VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2016), Krasnoyarsk, Russia, oral talk. August 15-19, 2016. Abstracts. P. 525.

A45. P. M. Vetoshko. Vector measurement of magnetocardiogram // 8th Joint European Magnetic Symposia (JEMS2016), oral talk. August 21-27, Glasgow, UK, 2016.

Список цитированной литературы

- [1] Тикадзуми С. Физика магнетизма. Москва. Мир. 1987.
- [2] Скроцкий Г.В., Курбатов Л.В. Феноменологическая теория ферромагнитного резонанса // В сборнике “Ферромагнитный Резонанс” под ред. Вонсовского С.В. Москва. Наука. 1961.
- [3] Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. Москва. Наука. 1973.
- [4] Gangulee A. and Kobliska R. J. Magnetocrystalline anisotropy in epitaxially grown (Gd,Tm,Y)3(Fe,Ga)5O12 garnet thin films // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. P. 3333.
- [5] Azevedo A., Cinbis C., and Kryder M. H. Magnetic properties of praseodymium substituted iron garnet films // J. Appl. Phys. 1993. V. 74, P. 7450.
- [6] Slusky S. E. G., Dillon J. F., Brandle C. D., Norelli M. P., and Fratello V. J. Magnetic properties of praseodymium iron garnet and neodymium iron garnet // Phys.Rev.B. 1986. V. 34. P. 7918.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред. Москва. Наука. 1992.
- [8] Miyadai T. Ferrimagnetic Resonance in a Single Crystal of Thulium Garnet (Tm₃Fe₅O₁₂) // J. Phys. Soc. Japan. 1962. V. 17, P. 1899.
- [9] Hubert A. Stray-Field-Free and Domain Wall Configurations in Magnetic Films (II) // Phys. Stat. Sol. 1970. V. 38. P. 699.
- [10] <http://math.nist.gov/oommf/>