



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«УТВЕРЖДАЮ»

Федеральное государственное
автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Балтийский федеральный университет
имени Иммануила Канта»
(БФУ им. И. Канта)

ул. А. Невского, 14, г. Калининград,
236016
тел.: (4012) 595-597, факс: (4012) 465-813
e-mail: post@kantiana.ru
http://www.kantiana.ru
ОКПО 02068255, ОГРН 1023901002949
ИНН 3906019856, КПП 390601001

Проректор по научной работе
Балтийский федеральный университет
имени Иммануила Канта,
кандидат физико-математических наук


_____ М.В. Демин
«5» декабря 202_ г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Беклемишевой Анны Владимировны на тему:
**«Пространственная манипуляция микро и нано магнитными частицами
с помощью ферромагнитных микропроводов»,**
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.8 - Физика конденсированного состояния

Диссертационное исследование Беклемишевой Анны Владимировны посвящено разработке новых систем и методов в микромагнетизме. В работе обсуждается перспектива создания встраиваемых датчиков магнитного поля и механических напряжений на основе ферромагнитных микропроводов. Эти же провода предлагается использовать для разработки микромагнитных устройств - манипуляторов нано и микрочастицами, обладающими парамагнитными и диамагнитными свойствами.

Актуальность исследований, проведенных в диссертационной работе
Биомедицина имеет большие перспективы применений магнитных нано и микрочастиц. Возможность неинвазивно захватывать, изолировать или

перемещать клетки, помеченные магнитными частицами, посредством внешнего магнитного поля открывает новые способы диагностики и лечения заболеваний. В качестве примера использования магнитных частиц можно привести доставку лекарств, тканевую инженерию и биосенсоры. Последние достижения в области регенеративной медицины стволовых клеток открывают новые возможности для улучшения медицинских технологий, но эти исследования также требуют расширенного контроля клеток. Для точного размещения клеток с магнитными метками внутри тела, без каких-либо каркасов, необходимо использовать магнитные поля заданной конфигурации. Тенденция к миниатюризации биомедицинских устройств приводит к необходимости генерации магнитных полей в наименьших объемах. Оба данных условия отражены в предлагаемых в работе магнитных микроманипуляторах на основе ферромагнитных микропроводов.

Основные проблемы, рассмотренные в диссертационной работе

Конструирование эффективных микромагнитных систем для пространственного манипулирования нано и микронными объектами различных свойств (парамагнитными, диамагнитными), а также решение задачи по разработке встраиваемых миниатюрных сенсорных элементов— являются основной проблематикой диссертационного исследования.

Сенсорные функции микропроводов обусловлены связью между электрическими и магнитными свойствами, что определяется зависимостью высокочастотного электрического дипольного момента микропроводов от поверхностного импеданса, который выражается как отношение тангенциальных компонент электрического и магнитного полей. Влияние магнитных свойств микропроводов на их дипольный электрический момент может быть значительным в области частот антенного резонанса и при условии не очень сильного скин-эффекта. Соответственно, в работе уделяется значительное внимание исследованию оптимальных условий, при которых электрический

дипольный момент зависит от магнитной структуры микропровода, которая может изменяться под действием внешнего магнитного поля или механических напряжений.

Другая часть исследований связана с реализацией пространственных манипуляций с нано и микронными частицами с помощью высокоградиентных магнитных полей, генерируемых магнитными полюсами на поверхности микропровода. Если провода намагничены вдоль оси, значительные градиенты магнитного поля имеют место в окрестности концов проводов. Для увеличения объема воздействия были предложены конфигурации с микропроводами, намагниченными перпендикулярно оси. Микропровода с циркулярной доменной структурой интересны для осуществления периодического изменения магнитного потенциала с помощью небольшого тока.

Теоретическая и практическая значимость

В диссертационном исследовании разработаны аналитические методы решения ряда фундаментальных задач - задачи рассеяния на единичном ферромагнитном проводе с импедансными граничными условиями, задачи диффузии при наличии магнитного потенциала, а также определения полей рассеяния от однородно намагниченного цилиндра. Это представляет фундаментальный интерес для конструирования микромагнитных манипулятивных систем.

Такие микросистемы возможно внедрить в широкий круг лабораторной диагностики в биомедицинских, аналитических и терапевтических целях. С помощью подобных систем возможно реализовывать сепарацию клеток, перераспределять состав клеточной суспензии и адресно доставлять лекарственные препараты. Полученные результаты достигаются благодаря высоким значениям пространственного градиента магнитного поля - порядка $10^3 - 10^5$ Тл/м, что необходимо для преодоления других сил (гравитации, вязкости, и т.д.) даже для частиц со слабыми магнитными свойствами.

Содержание работы

В работе представлены 4 главы. В первой главе приведен обзор основных проблем по теме диссертационного исследования, включая свойства аморфных ферромагнитных микропроводов, эффект магнитоимпеданса на ГГц частотах, а также рассмотрены некоторые актуальные аналоги микро манипуляторных систем.

Во второй главе исследуется динамический магнитоэлектрический эффект – зависимость высокочастотного электрического момента от магнитной структуры, которая может изменяться под действием внешних факторов. Решается внешняя задача рассеяния электромагнитных волн на одиночном ферромагнитном проводе, при этом на границе с проводом используются импедансные граничные условия, которые включают поверхностный импеданс магнитного провода. Аналитически рассматривается конфигурация, соответствующая имеющимся экспериментальным результатам, когда высокочастотный отклик модулируется магнитным полем низкой частоты. Теоретические результаты качественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Третья глава посвящена разработке различных конфигураций микропроводных систем на основе расчёта и моделирования магнитных полей, создаваемых однородно намагниченными микропроводами. Моделирование полей осуществлялось на основании точного решения магнитостатической задачи. Наиболее интересны следующие конфигурации микропроводных систем: три или четыре продольно намагниченных микропровода, создающие локальную точку захвата, что может использоваться для создания магнитного пинцета. В областях захвата – на краях микропровода - образуются максимумы магнитного потенциала, и парамагнитные частицы могут быть захвачены и перемещены между ними при изменении намагниченности провода. Другая интересная магнитная конфигурация создается парой диаметрально намагниченных микропроводов. При близком расположении микропроводов моделирование

показывает наличие энергетического профиля с двумерными минимумами, позволяющими реализовать диамагнитный захват над системами микропроводов.

В четвертой главе исследуется цито совместимость поверхности микропроводов, контактирующих в процессе эксперимента с клеточными структурами, и анализируется влияние магнитных полей на клеточный цикл. Эксперимент был проведен совместно с биологами НИЦЭМ им. Н. Ф. Гамалеи и НИИ вирусологии им. Ивановского. Наблюдение за динамикой клеточной активности в присутствии микропроводов происходило в течении нескольких суток, данные по оценке летальной концентрации фиксировались для разных периодов. Выживаемость клеточной линии в присутствии микропроводов и в эталонных пробах (без микропроводов) одинаковы в рамках статистической погрешности. В некоторых пробах выживаемость при наличии микропроводов в посеве даже выше. Исследование показало отсутствие негативного влияния микромагнитных манипуляторов на клеточный цикл, соответственно, перспективность применения микропроводов для биомедицинских задач.

Основные результаты работы опубликованы в 6-ти статьях реферируемых международных и российских научных журналах, все статьи входят в базу WOS, получен патент, работе была оказана гранатовая поддержка (РФФИ, ФСИ).

Автореферат отражает все основные результаты, приведенные в диссертационной работе. Сама диссертация является законченным научным трудом, по содержанию и объему соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Между тем по работе имеется ряд замечаний.

1. Задача рассеяния, помимо резистивных и магнитных потерь, должна включать и радиационные потери, которыми пренебрегается. Насколько они важны? Это не обсуждается в работе.

2. Многие параметры задаются без соответствующего пояснения. Например, отношение длины провода к радиусу выбирается порядка 20.

Насколько это важно? Была ли проведена оптимизация геометрических параметров? Также, используются некоторые составы микропроводов. На каком основании они были выбраны? Эти вопросы следовало бы обсудить более подробно.

3. В работе проводится только качественное сравнение теоретических результатов с экспериментом. Между тем, используя в теории параметры, соответствующие эксперименту, можно было бы провести более детальное сравнение.

4. В работе указывается важность решеток микропроводов. Между тем моделирование проводится в основном для одиночного провода или нескольких проводов.

5. Работа не свободна от грамматических неточностей.

Данные замечания не снижают общую высокую оценку работы, которая, безусловно, выполнена на современном научно-техническом уровне, а ее результаты имеют фундаментальное и прикладное значения.

Диссертационная работа **«Пространственная манипуляция микро и нано магнитными частицами с помощью ферромагнитных микропроводов»** отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученой степени в НИТУ «МИСиС», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Беклемишева Анна Владимировна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», протокол №2 от 02 декабря 2022 г.

Председатель Ученого совета,

д.ф.-м.н., профессор

Юров А. В.