

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Попова Вячеслава Валериевича
«Гигантский магнитный импеданс в аморфных микропроводах в диапазоне
сверхвысоких частот»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Актуальность темы исследования. Аморфные и нанокристаллические сплавы являются относительно новым классом материалов, обладающих целым комплексом необычных физических свойств. Особого интереса заслуживают аморфные материалы, полученные в виде микропроводов. В частности, обнаруженные уникальные магнитные свойства и магнитная бистабильность аморфных микропроводов обусловили их широкое практическое применение при изготовлении высокочувствительных датчиков магнитных полей, напряжений, деформаций и т.д., а также в качестве новых типов кодирующих и сенсорных устройств.

Одним из наиболее важных с практической точки зрения эффектов, свойственных микропроводам, является эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ). Датчики магнитного поля на основе эффекта ГМИ в настоящее время выпускаются в интегральном исполнении и широко используются в измерительной технике. Однако, проблемы, связанные с дальнейшим повышением чувствительности и расширением динамического диапазона измерений, требуют более глубокого понимания физических механизмов, отвечающих за эффект ГМИ.

Перспективным является также направление, связанное с использованием магнитных микропроводов в качестве наполнителя для многофункциональных композиционных материалов. Поскольку такого рода композиты обычно находят свое применение в диапазоне сверхвысоких частот, то для моделирования и управления их свойствами необходимо систематическое изучение особенностей СВЧ ГМИ.

Таким образом, диссертационная работа Попова В.В., целью которой является установление закономерностей влияния ряда внешних факторов на взаимодействие электромагнитных волн СВЧ диапазона с аморфными магнитомягкими микропроводами на основе кобальта, является своевременной и важной.

Содержание диссертации. Диссертация включает введение, четыре раздела, выводы и список цитируемой литературы из 124 наименований. Полный объем работы составляет 152 страницы.

Во **введении** сформулированы цель работы, ее задачи, основные научные результаты.

В первом разделе диссертации выполнен обзор литературы по теме исследования. В обзоре приводится информация о методике изготовления аморфных микропроводов, возникающих при этом механических напряжениях, статических магнитных свойствах, основных модельных представлениях о СВЧ-импедансе, а также сформулированы проблемы, которые требуют более полного изучения.

Во втором разделе приводится описание разработанной автором волноводной методики измерения импеданса микропроводов. В основу методики положено решение электродинамической задачи рассеяния на тонком проводнике, помещенном в прямоугольный волновод. На этапе экспериментальной проверки методики показано, как можно уменьшить погрешность определения импеданса с помощью калибровки по измерениям с немагнитным образцом. Показано, что достигнута высокая точность измерения абсолютного значения импеданса.

В третьем разделе собраны экспериментальные результаты, относящиеся к магнитным свойствам микропроводов и эффекту ГМИ. В первую очередь выполнены измерения в полях, при которых выполняются условия ФМР. Такие измерения преследуют две цели: (а) путем сравнения с известными литературными данными показать применимость волноводной методики к измерениям свойств микропроводов и (б) определить намагниченность насыщения материала провода. Большая часть экспериментального раздела посвящена исследованию эффектов, возникающих при перемагничивании в слабых магнитных полях. Получено большое число экспериментальных кривых, иллюстрирующих влияние на эффект ГМИ механических напряжений (аксиального растяжения и кручения) и постоянного тока. Зависимость ширины пика ГМИ от приложенного аксиального напряжения использована для определения величины константы магнитострикции провода. К наиболее интересным результатам этого раздела следует отнести следующее. При закручивании провода его магнитная структура видоизменяется, и на зависимостях ГМИ наблюдается магнитный гистерезис с характерными резкими срывами импеданса при некоторых критических значениях поля. Экспериментально показано, что величиной этого критического поля можно управлять путем приложения аксиальных и крутильных напряжений, а также пропускаемым через провод постоянным током.

В четвертом разделе теоретически анализируются полученные в предыдущем разделе результаты. Материал последнего раздела условно можно разделить на две части. Вначале строится строгая феноменологическая модель, в которой учтены все возможные механизмы, отвечающие за магнитную структуру провода. Например, при записи выражения для магнитоупругой энергии закрученного провода используется не только магнитострикционное слагаемое, но и дополнительный член, возникающий вследствие неоднородного обменного взаимодействия. Это существенное дополнение

к существующим моделям позволяет ввести несколько топологических состояний, посредством которых осуществляются все возможные способы перемангничивания микропровода. На втором этапе, развитая строгая модель подвергается существенному упрощению, целью которого является привязать теоретическое моделирование к эксперименту. В результате сформулирована так называемая «core-shell модель», предполагающая, что в объеме провода можно выделить две взаимодействующие области с различными собственными типами анизотропии. Такая простая, на первый взгляд, модель, тем не менее, качественно описывает наблюдаемые в эксперименте особенности полевых зависимостей эффекта ГМИ.

Научная новизна и практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Впервые установлена природа магнитного гистерезиса, который наблюдается вблизи нулевого магнитного поля. Показано, что магнитную структуру провода можно представить в виде системы двух взаимодействующих областей – центральной области с аксиальным типом анизотропии и приповерхностной области с циркулярной или геликоидальной анизотропией. Срывы на полевых зависимостях ГМИ связаны со скачкообразным изменением намагниченности в приповерхностной области провода, обусловленным перемангничиванием его центральной части.

2. Экспериментально и теоретически показано, что приложение механических напряжений изменяет магнитную структуру провода и, соответственно, регистрируемый ГМИ-отклик. Ширина пика ГМИ в основном обусловлена анизотропией приповерхностной области металлической жилы. Растяжение и кручение провода приводят к увеличению вклада оболочки, а значит и к уширению кривых ГМИ. Срывы вблизи нулевого поля связаны с эффективной анизотропией намагниченной аксиально центральной области. Экспериментально установлено, что приложение напряжений по-разному влияет на поле срыва. Оно возрастает с увеличением аксиального растяжения и убывает при кручении провода. Аналогичные зависимости получены и при теоретическом моделировании.

3. Практически важные результаты получены при изучении влияния на эффект ГМИ постоянного тока. Показано, что с помощью тока можно управлять положением магнитного гистерезиса, выбором полярности тока зеркально смещать его относительно нулевого поля, добиваться высокой чувствительности ГМИ к изменению поля и, что является наиболее интересным с практической точки зрения, устанавливать безгистерезисный режим перемангничивания провода, который связан с изменением механизма перемангничивания. Критерием, по которому можно судить об изменении механизма перемангничивания, является сдвиг поля насыщения – в

определенных условиях поля насыщения убывает, а при достижении порогового значения тока начинает возрастать.

Обоснованность и достоверность научных выводов диссертации обеспечивается комплексным характером исследований с применением надежно верифицированных экспериментальных методов СВЧ спектроскопии, а также современных вычислительных методов, применяющихся при обработке экспериментальных результатов. Волноводная методика измерения импеданса верифицируется путем прямых измерений с немагнитными проводами, а также с помощью измерения кривых ферромагнитного резонанса. Достоверность результатов, относящихся к эффекту ГМИ и его особенностям вблизи нулевого магнитного поля, подтверждается тем, что обнаруженные эффекты качественно совпадают для всей серии образцов. Это позволяет сделать вывод о том, что они являются не случайными, а действительно отображают особенности магнитной структуры провода. Обоснованность теоретических результатов также не вызывает сомнений, поскольку предложенные модели построены логично с использованием физически обоснованных допущений. Результаты моделирования качественно совпадают с экспериментальными кривыми и не противоречат известным из литературы данным. Более того, в некоторых случаях разработанная в диссертации модель позволяет дать более строгое объяснение наблюдаемым эффектам.

Основные вопросы и замечания.

1. При решении задачи взаимодействия магнитного микропровода с полем электромагнитной волны объемное распределение тока в проводе заменяется линейным током (выражение (2.4)). Ниже в работе приводится оценка погрешности, возникающей в результате такой аппроксимации. Оценка сделана для микропроводов с радиусом, не превышающим 100 мкм. Каким образом была выполнена оценка погрешности, и как изменится погрешность в проводах с большим радиусом?

2. В работе определены значения константы магнитострикции для нескольких микропроводов одного и того же состава, но различного диаметра (таблица 3.2). Из результатов измерений следует, что с увеличением отношения d/D (d – диаметр металлической жилы, D – общий диаметр микропровода со стеклом) абсолютное значение константы магнитострикции увеличивается. В чем причина такого увеличения и насколько эти данные коррелируют с результатами других исследовательских групп?

3. При изучении влияния на эффект ГМИ постоянного электрического тока не учитывается его тепловое действие. Известно, что в аморфных сплавах под действием

температуры, механических напряжений и внешних полей возможны процессы направленной перестройки ближнего порядка. Эти процессы происходят тем быстрее, чем выше температура. Поскольку диаметр металлической жилы используемых в работе проводов не превышает 20 мкм, то даже небольшие по величине токи могут приводить к существенному нагреву образца. Из текста диссертации не ясно, как контролировалась температура провода и насколько обратимыми являются полученные зависимости?

Также, как замечание необходимо отметить тот факт, что на графиках и в тексте работы значения тока приведены в миллиамперах. Более уместным было бы указывать величину плотности тока, что позволило бы сравнивать результаты для проводов различного диаметра.

4. На рис. 3.7 приводятся экспериментальные кривые ГМИ в диапазоне частот порядка сотен МГц, которые, помимо наличия двух пиков, отличаются острой формой вблизи нулевого поля. На всех экспериментальных графиках, полученных в диапазоне СВЧ, кривые ГМИ либо гладкие, либо имеют характерные резкие срывы. С чем связано это различие?

5. В проводах на основе кобальта (с отрицательной константой магнитострикции) может реализовываться «бамбуковая» доменная структура. Имеется достаточно большое число экспериментальных работ, в которых встречно намагниченные циркулярные домены достаточно хорошо различимы магнитооптическими методами. Вместе с тем, предложенная в диссертации теоретическая модель основывается на предположении о том, что область вблизи поверхности образца представляет собой монодомен. Обоснования этого предположения приводятся в пункте 4.2.5. Вопрос состоит в том, насколько модель и ее предсказания будут выполняться в случае, если приповерхностная область провода будет разбита на домены?

Необходимо также отметить некоторые стилистические проблемы, без которых, наверное, не обходится ни одна объемная работа.

1. На некоторых рисунках, включенных в автореферат, использован слишком мелкий шрифт, что затрудняет их восприятие. Вместе с тем, в самой диссертации этого недостатка автору удалось избежать.

2. Несколько странным выглядит выбор осей на вставке к рис. 3.10, иллюстрирующей изменение магнитострикции провода от соотношения диаметров металлической жилы к общему диаметру образца: ось ординат направлена в сторону уменьшения абсолютного значения изображенной на ней физической величины.

Следует отметить, что указанные выше замечания не влияют на достоверность научных положений и общую положительную оценку представленной к защите

диссертационной работы, и могут в значительной степени рассматриваться как пожелание для будущей работы.

Полнота изложения диссертации в опубликованных работах. Экспериментальные и теоретические результаты работы своевременно опубликованы в авторитетных научных журналах и полностью раскрывают ее содержание. Работа докладывалась на нескольких международных конференциях и достаточно широко известна в научном сообществе, что косвенно подтверждается тем фактом, что опубликованные по теме диссертации статьи цитируются в научных журналах последних лет. Автореферат написан лаконично и полностью соответствует структуре диссертации.

Вывод. Диссертационная работа Попова В.В. «Гигантский магнитный импеданс в аморфных микропроводах в диапазоне сверхвысоких частот» отвечает всем требованиям ВАК к диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений. Автор работы Попов В.В. заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник отдела физики тонких пленок
Института магнетизма НАН Украины и МОН Украины,
доктор физико-математических наук, профессор



Товстолыткин Александр Иванович

03142, Украина, г. Киев, просп. Вернадского, 36-б
Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины
Телефон: +380 44 424 90 95
E-mail: atov@imag.kiev.ua

Подпись Товстолыткина А.И. удостоверяю.

Ученый секретарь

Института магнетизма НАН Украины и МОН Украины,
кандидат физико-математических наук



Хребтов Аркадий Олегович