

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертационную работу**  
**Попова Вячеслава Валерьевича**  
**«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**

Обнаруженный двадцать лет назад эффект гигантского магнитоимпеданса (ГМИ) привлекает большое внимание исследователей во всем мире. В первую очередь это связано с широкими перспективами использования этого эффекта для создания нового поколения высокочувствительных сенсоров магнитного поля. Во-вторых, аморфные микропровода, проявляющие эффект ГМИ, могут быть использованы для создания новых композитных материалов для высокочастотных приложений. В-третьих, исследование ГМИ имеет и фундаментальное научное значение, связанное с решением проблемы взаимодействия высокочастотных электромагнитных полей с магнитомягкими проводниками. Следует также подчеркнуть важность исследования аморфных микропроводов, так как они представляют собой новый класс магнитомягких материалов, магнитные и электрофизические свойства которых мало изучены. Из вышесказанного следует, что тема диссертационной работы В.В. Попова, безусловно, является весьма актуальной как в фундаментальном отношении, так и с точки зрения прикладных аспектов.

Новизна диссертационной работы вытекает непосредственно из названия диссертации. Действительно, до настоящего времени подавляющее большинство исследований ГМИ ограничивалось верхней частотой порядка нескольких гигагерц. Принципиальным достижением диссертанта явилось существенное продвижение изучения ГМИ в область СВЧ, что потребовало решения целого комплекса методических, теоретических и экспериментальных задач.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы, включающего 124 ссылки. Общий объем диссертационной работы составляет 152 страницы, в том числе 43 рисунка.

Первый раздел работы представляет собой подробный литературный обзор экспериментальных исследований ГМИ и существующих теоретических моделей этого эффекта. Во втором разделе предложен метод

определения импеданса и эффективной магнитной проницаемости аморфного микропровода в диапазоне СВЧ, а также разработана методика учета вклада высших волноводных мод при измерении импеданса. В третьем разделе приводятся результаты экспериментального исследования влияния механических напряжений и постоянного тока на ГМИ аморфных микропроводов с отрицательной магнитострикцией в СВЧ диапазоне. В четвертом разделе на основе предложенной автором феноменологической модели перемагничивания микропровода с геликоидальной анизотропией проведен анализ наблюдавшихся экспериментальных зависимостей.

Из новых результатов, полученных в диссертационной работе, приведем некоторые из них, представляющие, по нашему мнению, наибольший интерес и значение.

1. Автором решены прямая и обратная задачи взаимодействия электромагнитной волны с микропроводом в прямоугольном волноводе и установлена связь между коэффициентом отражения, магнитной проницаемостью микропровода и его импедансом.
2. Разработана и теоретически обоснована волноводная методика исследования ГМИ с использованием созданного спектрометра-рефлектометра СВЧ-диапазона. Предложен способ повышения точности измерения ГМИ аморфных микропроводов, основанный на экспериментальном определении вклада высших волноводных мод.
3. На основе полученных зависимостей импеданса аморфного микропровода от величины приложенного растягивающего напряжения предложена оригинальная методика оценки константы магнитострикции, и исследовано влияние соотношения диаметра металлической жилы и толщины стеклянного покрытия на величину магнитострикции аморфного микропровода.
4. Установлено, что приложение скручивающих напряжений формирует геликоидальную магнитную структуру в микропроводе, что приводит к гистерезису зависимости импеданса от внешнего поля и возникновению скачкообразного изменения импеданса при некоторых значениях поля.
5. Показано, что пропускание через микропровод постоянного тока приводит к асимметрии в зависимости импеданса от поля, а также к изменению положения и величины скачка импеданса.
6. Впервые предложена феноменологическая модель процессов перемагничивания аморфного микропровода в присутствии внешних

механических напряжений и постоянного тока, учитываящая существование в микропроводе центральной области с продольным направлением поля анизотропии. На основе предложенной модели проанализированы возможные равновесные состояния намагниченности в микропроводе в зависимости от внешних напряжений. Продемонстрировано, что результаты моделирования зависимостей ГМИ хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Все поставленные в работе задачи являются новыми, а полученные результаты оригинальны и вносят существенный вклад в понимание эффекта ГМИ в диапазоне СВЧ. Следует особенно отметить, что в работе автором не только приводятся результаты экспериментальных исследований ГМИ в аморфных микропроводах, но и предложена оригинальная модель перемагничивания микропровода, имеющая самостоятельное научное значение. Разработанный автором мультирезонансный метод измерения импеданса в диапазоне СВЧ имеет большое практическое значение, так как является более точным по сравнению с существовавшими ранее методами. Полученные в работе результаты по исследованию влияния механических напряжений на ГМИ могут быть использованы для практического применения новых композитных материалов, созданных на основе аморфных микропроводов в стеклянной оболочке.

Достоверность результатов не вызывает сомнений и определяется использованием современных методик измерений, высоким уровнем автоматизации эксперимента, большим количеством исследованных образцов, а также корректностью использованных теоретических подходов, основанных на методах классической электродинамики и теории упругости.

В качестве замечаний и вопросов, которые, на наш взгляд, недостаточно раскрыты в работе, отметим следующее.

1. Для корректного описания рассматриваемого в работе эффекта импеданс микропровода должен записываться в виде тензора, о чем автор упоминает в обзоре, формулы (1.11) и (1.12). Однако при описании и обсуждении результатов эксперимента в работе исследуется только диагональная компонента тензора импеданса, определяемая выражением (1.14). Для полноты и последовательности изложения следовало бы также проанализировать и зависимости для недиагональной компоненты импеданса.

2. При исследовании влияния механических напряжений и постоянного тока на магнитоимпеданс микропровода в работе приводятся

экспериментально измеренные зависимости коэффициента отражения от внешнего поля. При этом в подписях к рисункам указывается, что кривые соответствуют эффекту ГМИ, что является не совсем удачным, так как коэффициент отражения и импеданс имеют принципиально различные зависимости от поля.

3. При анализе влияния скручивающих напряжений на ГМИ в работе выделяются два вклада в свободную энергию. Первая составляющая связана с магнитоупругими деформациями, возникающими вследствие приложения скручивающих напряжений, а второе слагаемое учитывает неоднородность вращения образца под действием напряжений и связано с обменным взаимодействием. При этом предполагается, что составляющая, обусловленная обменным взаимодействием, является доминирующей, а вкладом магнитоупругих деформаций можно пренебречь. На наш взгляд, следовало бы привести количественные оценки и показать, когда это приближение справедливо.

4. Моделирование влияния постоянного тока на эффект ГМИ выполнено только для предельных случаев. На Рис. 4.11 приведены зависимости импеданса от поля только для таких значений тока, при которых механизм перемагничивания гарантировано изменяется. Группа зависимостей со скачками в импедансе соответствует нулевому току, а плавные зависимости импеданса от поля приведены только для значений постоянного тока, при которых гистерезис уже не наблюдается. Было бы уместным привести результаты теоретических расчетов вызванного постоянным током смещения поля срыва по аналогии с экспериментальными данными, показанным на Рис. 3.17.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не изменяют общей положительной оценки диссертации В.В. Попова, являющейся законченной научно-квалификационной работой.

Диссертация написана хорошим языком, читается достаточно легко, а технические погрешности в оформлении минимальны. Следует отметить также четкую логическую последовательность в изложении результатов работы.

Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Автореферат и публикации автора в престижных научных изданиях точно и полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что диссертационная работа «Гигантский магнитный импеданс в аморфных микропроводах в диапазоне сверхвысоких частот» отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Попов Вячеслав Валерьевич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:  
старший научный сотрудник  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»  
кандидат физико-математических наук



Бузников Никита Александрович

142717 Московская область, Ленинский район, пос. Развилка,  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»  
телефон: (498) 6574026, доб. 2127  
e-mail: N\_Buznikov@vniigaz.gazprom.ru

19.11.2014

