



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**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

«УТВЕРЖДАЮ»

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

М.В. Демин

2022 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Алам Саед Али Джунаид на тему:

**«Влияние механических напряжений и температуры на высокочастотный
магнитоимпеданс (МИ) в микропроводах из сплавов на основе Со»,**

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8 - Физика конденсированного состояния

Актуальность исследований, проведенных в диссертационной работе

Диссертационная работа Алам Джунаид посвящена исследованию влияния механических напряжений и температуры на магнитоимпеданс (МИ) аморфных микропроводов при гигагерцовых частотах. Эти исследования важны для применения в высокочувствительных датчиках контроля упругодеформированного состояния и температуры объектов различного назначения с бесконтактным считыванием первичной информации. Актуальность исследования заключается в широких перспективах использования МИ эффекта для регистрации очень слабых и локальных магнитных полей, упругих напряжений, деформаций и температуры.

Аморфные ферромагнитные микропровода обладают потенциалом технических приложений в самых различных областях: в медицине для регистрации магнитных полей от различных органов (магнитная кардиография), в дефектоскопии для неразрушающего контроля, в геодезии, авто-, авиа и космической технике и т.д. В сравнении с другими датчиками сенсорные элементы на основе магнитных микропроводов имеют ряд преимуществ по быстродействию, чувствительности, миниатюрности, потреблению энергии, себестоимости. Размер сенсорных элементов, не превышающий 100 мкм, позволяет встраивать их в состав композитных материалов и регистрировать слабые локальные деформации и изменения температуры изделий. Подобные разработки ведутся в ведущих научных центрах мира (США, Японии, Китае).

Поставленные автором цели и задачи по их достижению являются логически обоснованными и отражают актуальность темы диссертации.

Цели и задачи работы

Основная цель работы заключается в исследовании микроволнового импеданса аморфных микропроводов при воздействии внешних факторов-механических напряжений и температуры, и установление связи с микромагнитной структурой.

Для достижения поставленной цели автором были сформулированы и решены конкретные задачи, среди которых следует выделить:

- Разработка прецизионных методов измерения импеданса аморфных микропроводов в ГГц-ой области частот. Необходимость этой калибровки обусловлена методом измерения, при котором измеряемый элемент (ферромагнитный провод) не может быть непосредственно соединен с коаксиальными кабелями.
- Установление механизмов изменения импеданса при изменении магнитной структуры и определение условий получения высокой чувствительности импеданса к воздействию механических напряжений на ГГц частотах.

- Исследование поведения магнитоимпеданса вблизи температуры Кюри. Для практических применений были разработаны составы с низкой температурой Кюри (в диапазоне 48-62 °С).

При решении этих задач были определены способы достижения высокой чувствительности импеданса в отсутствие внешних магнитных полей.

Научная новизна

В ходе выполнения работы диссертантом получен ряд результатов, обладающих значительной **научной новизной**, наиболее важными из которых, на наш взгляд, являются следующие:

1. Эффект магнитоимпеданса используется в миниатюрных сенсорах слабого магнитного поля, операционная частота которых лежит в МГц области частот. Увеличение операционной частоты позволит улучшить такие характеристики, как чувствительность и быстродействие МИ сенсоров. Это также важно для разработки инновационных беспроводных сенсорных элементов. В работе развиты методы прецизионных исследований поведения МИ на повышенных частотах- до нескольких ГГц, причем возможно определение абсолютной величины импеданса.
2. Достигнуты рекордно высокие значения чувствительности магнитного импеданса к внешним механическим напряжениям в отсутствие дополнительных полей, подмагничивающих микропровод, на ГГц частотах. Это оказалось возможным при использовании микропроводов с увеличенной константой магнитострикции, что было реализовано с помощью отжига током частично кристаллизованных микропроводов.
3. Впервые были получены МИ характеристики в зависимости от температуры при подходе к температуре Кюри (T_c) на ГГц частотах для микропроводов двух составов. Сплавы были выбраны с разным знаком константы магнитострикции, чтобы реализовать два предельных типа анизотропии: анизотропию с легкой осью вдоль провода и анизотропию с легким направлением намагниченности вдоль азимута. Результаты показывают, что относительное изменение импеданса при повышении температуры от комнатной до T_c остается

высоким (140-300%) вплоть до ГГц частот, и зависит от типа магнитной анизотропии и наличия магнитного поля.

Практическая значимость работы, прежде всего, связана с важностью исследований для разработки новых типов миниатюрных сенсоров механических напряжений и температуры, которые могут использоваться как для измерения локальных упругих напряжений, так и для мониторинга состояния материалов, конструкций и биологических тканей. Такие датчики могут рассматриваться в качестве альтернативы оптоволоконным и пьезоэлектрическим датчикам.

Достигнуто рекордное значение чувствительности МИ к внешним механическим нагрузкам, превышающее 300 % в диапазоне значений упругих напряжений < 400 МПа на частоте 2.1 ГГц, причем без использования подмагничивающих полей или токов смещения. Температурные изменения импеданса на уровне 50% регистрируются также для ГГц частот.

Обоснованность полученных автором результатов и выводов подтверждается согласованием экспериментальных данных с результатами других независимых исследований. Результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях. Материалы данной диссертационной работы изложены в 4 статьях, входящих в базы данных WOS и Scopus.

По тексту диссертационной работы можно высказать следующие замечания:

1. В главе 2 при обсуждении экспериментальных методик не выделен личный вклад автора в разработку тех или иных методов измерений, не ясно, насколько используемые методы являются оригинальными.
2. В этой же главе при изложении методики экспериментов по изучению влияния упругих напряжений на сигнал чувствительного элемента недостаточно подробно описана геометрия приложения нагрузки и расположения провода в измерительной ячейке, от чего в значительной мере должны зависеть как получаемые результаты, так и их интерпретация.
3. В выводах по работе не отражена возможность трансформации

структуры материала жилы провода от аморфного состояния к кристаллическому или аморфно-кристаллическому состоянию.

4. В работе приводятся данные о температурах Кюри исследованных образцов (48 и 61 °С), однако ничего не говорится ни о том, каким методом были получены эти значения, ни о том, с какой точностью они измерены. Данные по температурной зависимости намагниченности отсутствуют.

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

Заключение

Диссертационная работа Алам Саед Али Джунаид выполнена на высоком экспериментальном уровне, полученные результаты являются новыми, имеют научную и практическую значимости, а их достоверность не вызывает сомнений. Это позволяет утверждать, что все задачи исследования выполнены, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертационная работа **«Влияние механических напряжений и температуры на высокочастотный магнитоимпеданс (МИ) в микропроводах из сплавов на основе Со»**, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС".

Соискатель, Алам Саед Али Джунаид заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и одобрен на заседании Учёного совета ОНК «ИВТ» 30 сентября 2022 г., протокол № 1

Председатель Учёного совета,
д. ф.-м. н, профессор

Юров А. В.