

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИППМ РАН

д.т.н., профессор

Гаврилов Сергей Витальевич



«04» декабря 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Неъматова Махсудшо Гайратовича
**«Разработка методов модификации магнитомеханических свойств
аморфных микропроводов для построения высокочувствительных
миниатюрных датчиков механических напряжений»**, представленную на
соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности
05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники»

Диссертационная работа Махсудшо Гайратовича Неъматова посвящена разработке способов воздействия на аморфные микропровода для целенаправленного управления их магнитомеханическими свойствами, что важно в случае их применения в высокочувствительных датчиках контроля упруго-деформированного состояния объектов различного назначения с бесконтактным считыванием первичной информации. Актуальность исследования заключается в широких перспективах использования эффекта магнитного импеданса (МИ) для регистрации очень слабых и локальных магнитных полей, упругих напряжений и деформации.

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. Основная цель работы заключается в разработке методов модифицирования свойств аморфных микропроводов, а также принципов и технологии изготовления на их основе высокочувствительных датчиков упругих напряжений.

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

- Исследование механизмов магнитной анизотропии, наведенной в аморфных микропроводах на основе сплавов Со в процессе отжига постоянным электрическим током.
- Определение оптимальных условий отжига для достижения заданных параметров циркулярной анизотропии и магнитострикции.
- Разработка режимов отжига для оптимизации магнитной структуры проводов.
- Изучение влияния внешних и внутренних механических напряжений на процессы перемагничивания проводов с различным типом магнитной анизотропии и выявление путей достижения значительного изменения амплитуд высших гармоник сигнала сенсора при внешних механических

воздействиях за счет управления типом магнитной анизотропии и доменной структуры проводов.

- Способы достижения высокой чувствительности импеданса в отсутствие внешних магнитных полей.
- Разработка конструкции сенсора механических напряжений на основе аморфных микропроводов на основе сплава CoFeSiBCr с оптимизированной магнитной структурой. Разработка сенсорной ячейки и возбуждающих плоских катушек для измерения механических напряжений с дистанционным опросом.

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

1. Методика бесконтактного контроля механических напряжений с автокалибровкой, заключающаяся в измерении и анализе спектра электрического отклика, индуцированного при перемагничивании аморфного микропровода с магнитной анизотропией, наведенной механическим напряжением.
2. Методика формирования в проводе магнитной анизотропии (обычно не присущей аморфным микропроводам на основе Co с положительной магнитострикцией) с циркулярным распределением намагниченности в периферийном слое за счет использования токового отжига.
3. Достижение рекордно высоких значений чувствительности магнитного импеданса к внешним механическим напряжениям без применения дополнительного поля смещения.

Практическая значимость работы, прежде всего, связана с разработкой новых типов миниатюрных сенсоров механических напряжений, которые могут использоваться как для измерения локальных упругих напряжений, так и для мониторинга состояния материалов, конструкций и биологических тканей. Датчики, основанные на генерации высших гармоник

и регистрации реакции сенсорного элемента на внешние воздействия, могут рассматриваться в качестве альтернативы оптоволоконным и пьезоэлектрическим датчикам.

Достигнуто рекордное значение чувствительности МИ к внешним механическим нагрузкам, превышающее 165 % в диапазоне значений упругих напряжений $\sigma_{ex} < 100$ МПа на частотах 50 - 100 МГц без применения подмагничивающего поля или тока смещения.

Предложены методика и оборудование для проведения токового отжига с удаленным контролем температуры. На методику получен патент.

Обоснованность полученных автором результатов и выводов подтверждается согласованием предложенных теоретических моделей с экспериментальными данными и результатами независимых исследований. Результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях. Материалы данной диссертационной работы изложены в 8 статьях, опубликованных в научных международных и российских журналах и сборниках, в том числе 4 – в зарубежных журналах, входящих в базу WOS, 6 – в журналах из базы Scopus и 4 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

По тексту диссертационной работы можно высказать следующие замечания:

1. Методы бесконтактной регистрации сигналов перемagnetизирования известны, поэтому следовало отчетливо подчеркнуть, в чем состоит их оригинальность при оценке механического напряжения в микропроводах.
2. При изложении методики экспериментов по изучению влияния упругих напряжений на сигнал чувствительного элемента неясно описана геометрия приложения нагрузки и расположения провода в измерительной ячейке, от которых в значительной мере зависят

результаты измерений и их интерпретация.

3. Не обосновано использование новых терминов типа «анизотропия с циркулярной легкой осью». Имеются устоявшиеся термины «циркулярная анизотропия», «геликоидальная анизотропия».
4. При интерпретации обнаруженных эффектов при отжиге не рассмотрена возможность частичной трансформации структуры материала провода от метастабильного аморфного к аморфно-кристаллическому состоянию.

Заключение

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки качества диссертационной работы, которая написана доступным научным языком, хорошо иллюстрирована и логически обоснована.

Автореферат диссертации полностью соответствует основному содержанию диссертационной работы.

Учитывая отмеченные выше актуальность, научную новизну и практическую значимость работы, можно заключить, что диссертация Неъматова Махсудшо Гайратовича являет собой научную работу, выполненную на тему, представляющую значительный интерес. Изложенные в работе результаты исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

Таким образом, диссертационная работа содержит решение актуальной задачи по разработке методов модифицирования магнитомеханических свойств аморфных микропроводов для построения высокочувствительных миниатюрных датчиков механических напряжений, соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», и может рассматриваться как завершенная научно-квалификационная работа, а ее автор, Неъматов Махсудшо Гайратович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – «технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании отдела проектирования микроэлектронных компонентов для нанотехнологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН) «02» декабря 2019 г., протокол № 07.

Заведующий отделом проектирования
микроэлектронных компонентов
для нанотехнологий ИППМ РАН
доктор технических наук, доцент



Скиданов Владимир Александрович

Докторская диссертация защищена по специальности
05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах

Контакты ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН)

Сайт организации: <http://www.ippm.ru>

Почтовый адрес: 124365 Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3

Контактный телефон: +7 (499) 729 9890

Email: ippm@ippm.ru