Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Джумъазода Абдукарим

Разработка методов оптимизации термомагнитных свойств аморфных микропроводов и построение миниатюрных сенсоров на их основе

05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Панина Лариса Владимировна
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник кафедры
Технологий материалов электроники, НИТУ«МИСиС»

Москва – 2019

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Аморфные ферромагнитные микропровода (АФМ), в которых наблюдается эффект магнитоимпеданса (МИ) [1,2], представляют большой интерес для использования в миниатюрных сенсорных устройствах для измерения различных физических величин, включая сверхмалые магнитные поля. МИ зависит от магнитной микроструктуры и динамической восприимчивости, которые могут быть изменены не только с помощью внешнего магнитного поля, но и при воздействии механических напряжений и температуры [3-5]. Аморфные микропровода с относительно низкой температурой Кюри (T_c) недавно были предложены в качестве миниатюрных термочувствительных элементов для встраиваемых датчиков, работающих в промышленном температурном диапазоне от -40 до +85 С [6-7]. В частности, такие датчики очень востребованы для контроля композитного отверждения или воспалительных процессов в различных имплантатах. При приближении к температуре Кюри, T_c, фазового перехода ферромагнетик-парамагнетик все магнитные параметры: намагниченность насыщения, магнитная анизотропия, магнитострикция, коэрцитивная сила испытывают значительные изменения. В результате специфические магнитные эффекты, наблюдаемые в микропроводах, такие как магнитная бистабильность, быстрое переключение намагниченности и МИ демонстрируют очень большие изменения вблизи T_c. Изменение импеданса вблизи T_c может быть использовано для разработки датчиков температуры. При этом необходимо исследовать характер поведения МИ при приближении к T_c на различных частотах.

Температура Кюри аморфных сплавов на основе Fe и Co обычно находится в диапазоне 300-400 ℃ и является слишком высокой для применений в датчиках температуры. Следовательно, значение T_c должно быть снижено, что достигается изменением состава, например, добавлением Cr, Ni, Mo [8-9]. При этом необходимо сохранить необходимые магнитные свойства. Однако изменение температуры Кюри происходит скачком при добавлении различных элементов, например на 24-25 градусов при at% Cr. Возникает задача более плавного изменения T_c. В данной работе

с целью тонкой настройки T_c был предложен отжиг микропроводов двух составов FeCoBSiCrMo и FeCoBSiNi с низкой температурой Кюри.

Термический отжиг в присутствии магнитного поля, который легко можно применить к АФМП или всему МИ сенсорному элементу, представляет большой технологический интерес для улучшения его температурной стабильности без изменения его конструкции [10]. Однако отжиг может приводить к снижению чувствительности МИ [11]. Поэтому возникает задача улучшения стабильности сенсорного элемента при сохранении высокой чувствительности.

Основой устойчивого и надежного функционирования служит температурная стабильность магнитных свойств материала сенсорного элемента. В связи с этим в настоящей работе проводились исследования влияния условий отжига на температурную зависимость магнитных свойств микропроводов номинального состава $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}Mo_{1.69}B_{11.51}Si_{14.59}$, которые обладают чрезвычайно малой магнитострикцией в исходном состоянии и считаются перспективными для использования в приложениях, основанных на эффекте МИ.

Таким образом, исследование поведения импеданса вблизи температуры Кюри в аморфных проводах с низкой T_c, условий плавного изменения T_c, а также разработка методов температурной стабилизации МИ при сохранении высокой чувствительности являются актуальными задачами.

Цели и задачи. Целью данной работы являлась разработка методов модификации магнитных свойств аморфных микропроводов для применения в качестве температурных сенсорных элементов, а также принципов и технологии изготовления миниатюрных термочувствительных элементов для встроенных датчиков, работающих в промышленном температурном диапазоне.

Конкретные задачи работы заключались в следующем:

1. Оптимизация режимов токового отжига для улучшения температурной стабильности с сохранением высокой чувствительности МИ в аморфных сплавах с высокой T_c.
2. Исследование влияния термического отжига на температуру Кюри в аморфных микропроводах на основе сплавов FeCo с добавлением Cr и Ni, в которых возможно реализовать низкие T_c в промышленном интервале 40 - 80 С.

3. Исследование процессов намагничивания и МИ в аморфных микропроводах на основе сплавов FeCo с добавлением Cr и Ni вблизи температуры Кюри.
4. Разработка сенсоров температуры на основе изменения гармонического спектра, индуцированного при перемагничивании аморфных микропроводов, вблизи T_c.

Научная новизна работы:

В последнее время предпринимаются значительные усилия для развития методов локального контроля температуры в практически важном диапазоне 20-100 °C. В данной диссертационной работе предложены новые методы измерения температуры, основанные на изменении параметров перемагничивания и магнитоимпеданса вблизи T_c в аморфных микропроводах из сплавов с низкой T_c. Были предложены составы аморфных микроповодов, для которых свойство магнитной би-стабильности сохраняется вплоть до температуры Кюри. Сигнал напряжения, индуцированный в процессе перемагничивания, характеризуется высшими гармониками, амплитуды которых резко изменяются при подходе к T_c. Другая задача разработки магнитных сенсоров связана с формированием термостабильных магнитных свойств. В результате решения поставленных задач были получены следующие новые результаты:

- Предложен токовый отжиг (ТО) микропроводов с удаленным контролем температуры для модификации их параметров (получен патент на полезную модель). Данная методика наведения геликоидальной/циркулярной анизотропии в проводах с отрицательной магнитострикцией позволяет получить высокую температурную стабильность поведения МИ при сохранении высокой чувствительности изменения импеданса при воздействии слабого магнитного поля.
- Для плавного изменения температуры Кюри в сплавах с $T_c = 40 - 70$°C были разработаны режимы отжига. В аморфных микропроводах состава $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ с исходной температурой $T_c = 61.5$ °C продемонстрировано изменение T_c в интервале 53,5 – 68 °C , а в микроапроводах состава $Fe_5Co_{27.4}B_{12.26}Si_{12.26}Ni_{43.08}$ с температурой T_c = 48 °C - в интервале 48 – 72 °C.
- Впервые были получены температурные зависимости магнитоимпеданса вблизи T_c в микропроводах на основе сплавов FeCo с добавлением Cr. При

увеличении частоты (более 100 МГц) наблюдается монотонное уменьшение импеданса в нулевом поле при приближении к T_c. Такое поведение было объяснено теоретически, используя модель магнитной восприимчивости в проводах с осевой анизотропией.

- Проведено исследование температурных зависимостей гармонического спектра, генерируемого при перемагничивании аморфных микропроводов с низкой температурой Кюри (вблизи T_c) и продемонстрировано значительное изменение амплитуд высших гармоник вблизи T_c.
- Разработана методика бесконтактного измерения температуры, основанная на зависимости амплитуд высших гармоник от температуры, а также предложено использование отношения амплитуд высших гармоник, что позволяет проводить калибровку в процессе измерений.

Практическая значимость работы

- Разработана методика и оборудование для проведения токового отжига с удаленным контролем температуры, на основе полученных результатов получен патент на полезную модель.
- Получена зависимость высокочастотного импеданса от температуры вблизи температуры Кюри, что представляет интерес для разработки миниатюрных датчиков температуры.
- Разработана методика стабилизации температурных зависимостей и увеличения чувствительности МИ сенсорного элемента.
- Разработана методика контроля диапазона температур датчиков, работающих в промышленном температурном диапазоне путем термических обработок.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Токовый отжиг индуцирует температурно-стабильную циркулярную анизотропию в аморфных микропроводах состава $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}B_{11.51}Si_{14.59}Mo_{1.69}$, что обуславливает температурные изменения импеданса на МГц частотах менее 0,04 %/Э°С и рекордно высокую чувствительность к магнитному полю более 190 %/Э.

2. Термический отжиг микропроводов из сплавов $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ и $Fe_5Co_{27.4}B_{12.26}Si_{12.26}Ni_{43.08}$ позволяет контролировать изменение температуры Кюри в диапазонах 53,5 – 68 ℃ и 48 – 72 ℃, соответственно.
3. Магнитоимпеданс (МИ) в аморфных микропроводах претерпевает существенные изменения вблизи температуры Кюри, причем поведение МИ вблизи T_c отличается для низких (меньше частоты ферромагнитного резонанса) и высоких частот, при этом на частотах более 100 МГц МИ аморфных микропроводов из сплава FeCoBSiCrMo с низкой температурой Кюри показывает монотонное уменьшение при подходе к T_c, что при нулевом магнитном поле составляет 3,5 %/℃.
4. Методика бесконтактного контроля температуры, основанная на сохранении свойства магнитной би-стабильности микропроводов из аморфных сплавов $(FeCr)_{12.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Mo_{0.08}$ при приближении к температуре Кюри, генерации высших гармоник в спектре сигнала электрического напряжения, возникающего при перемагничивании и их резкого падения вблизи температуры Кюри.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в выборе объектов исследования и постановке задач исследования, проводил исследования, анализировал полученные результаты и принимал участие в написании статей. Автором создана установка для проведения температурных измерений магнитного гистерезиса и МИ микропроводов. При участии автора проводились работы по улучшению технических характеристик устройства для проведения токового отжига с удаленным контролем температуры. Автор принимал непосредственное участие в разработке термических методов управления свойствами микропроводов, также под руководством автора были разработаны технология изготовления температурного чувствительного элемента.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: The III International Baltic Conference on Magnetism (IBCM)

at Svetlogorsk, Kaliningrad, Russia, from 18th to 22nd of August 2019. The 8th International Workshop on Magnetic Wires (IWMW 2019) at Svetlogorsk (Kaliningrad region, Russia), 21st –22nd August 2019. The 25th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2018) at the Frentani Convention Centre, in Rome, Italy, from July 2nd – 6st 2018; The Joint European Magnetic Symposia (JEMS2018) at the conference center Rheingoldhalle in Mainz, Germany from the 3rd to the 7th of September 2018; The International Magnetics Conference (Intermag) 2017 in Dublin, Ireland, from April 24th to April 28th, 2017; The Joint European Magnetic Symposia (JEMS2016) from 21-26 august 2016, SECC: Scottish Exhibition and Conference Centre, Glasgow, UK; All-Russia Science & Technology Conference "Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development" MES-2016, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences: Moscow 124365, Russian Federation, 3 October 2016; «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (HMMM-XXIII), г. Москва, МИРЭА, от 30 июня - 5 июля 2018; Moscow International Symposium on Magnetism, MISM 2017, Magnetism Department, Faculty of Physics M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, July 1-5, 2017;

Публикации:

По материалам данной диссертационной работы были опубликованы 11 статей в научных международных и российских журналах, в том числе 8 статей в зарубежных журналах, входящих в базу WOS, 8 статьи в журналах из базы Scopus и 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Получен один патент на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, общих выводов, списка публикации по теме диссертации и списка используемой литературы. Вся работа изложена на 106 страницах и содержит 2 таблицы и 62 рисунков. Список используемой литературы включает 149 наименований.

Основное содержание работы

Во введение приведена актуальность проводимых исследований, сформулирована основная цель и конкретные задачи работы, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, также приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена апробация работы.

Первая глава диссертации представляет собой литературный обзор, связанный с тематикой диссертации. В литературном обзоре рассмотрены методы получения аморфных микропроводов, влияние химического состава на основные магнитные параметры (магнитная анизотропия, магнитострикция, температура Кюри). Также особое внимание уделено зависимости магнитоимпеданса и формы петель гистерезиса аморфных микропроводов от температуры и создания сенсоров на их основе. Приведено влияние термообработки на свойства микропроводов и методы температурной стабилизации. В конце первой главы сделаны выводы по литературному обзору и приведены основные цели и задачи исследования на основе проведенного анализа.

Во второй главе приведены данные исследуемых образцов, их особенности и методы модификации их свойств (токовый отжиг, термический отжиг). Рассмотрены основные методики измерения МИ характеристик проводов и петель намагничивания, а также приведены методы термообработки для модификации магнитной структуры, улучшения температурной стабильности магнитных характеристик и контроль температуры Кюри. Для исследования температурной стабильности магнитных свойств аморфных микропроводов в стеклянной оболочке, изготовленных методом Тейлора-Улитовского [12-13] с высокой температурой Кюри, был выбран микропровод состава $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}Mo_{1.69}B_{11.51}Si_{14.59}$ с T_c = 340 °C, имеющий общий диаметр 24,7 мкм и диаметр металлического сердечника 19,4 мкм. Для температурных датчиков были выбраны аморфные микропровода состава $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ с температурой Кюри T_c = 61,5 °C с общим диаметром 27,3 мкм и диаметром металлической жилы 17,7 мкм; и $Fe_{4.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_8Mo_{0.08}$ с $T_c = 72$ °C с общим диаметром 31 мкм и диаметром металлической жилы 17,2 мкм.

Для анализа структурных свойств образцов был использован рентгеновский дифрактометр (XRD) с CuKα-излучением. Фазовое превращение исследовались с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), а для исследования магнитных свойств использовались: индуктивный и вибрационный (магнитометр МВ-07) методы измерения петли гистерезиса, и векторный анализатор цепей для измерения высокочастотного импеданса. Температуру Кюри определяли по температурному поведению индуктивности, измеренной измерителем RLC на частоте 1 кГц. Также для исследования влияния температуры на амплитуду высших гармоник использовался селективный усилитель напряжения (lock-in-amplifier).

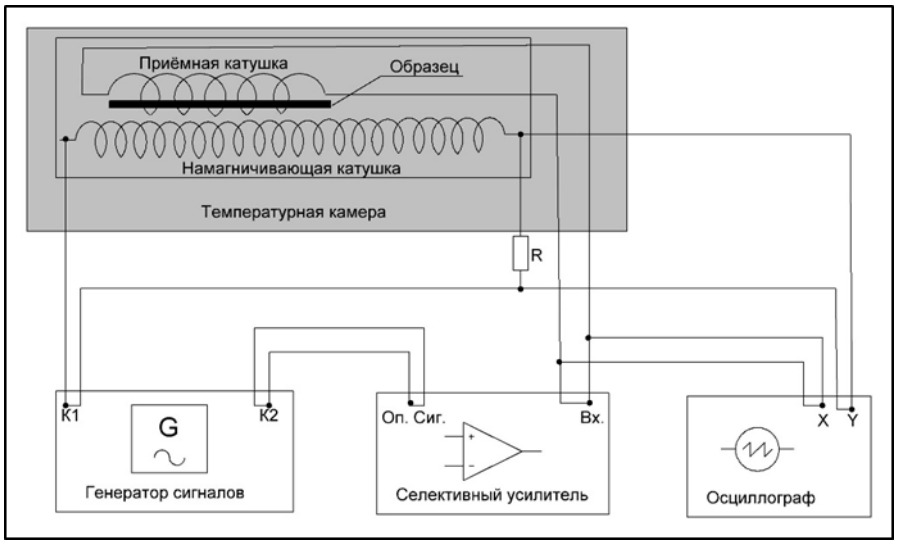

Рисунок 1 – Принципиальная схема модернизированной установки (Lock-in amplifier) с температурной камерой для измерения зависимости высших гармоник от температуры

<u>В третьей главе</u> представлены экспериментальные исследования влияния температуры на магнитную структуру и МИ в аморфных микропроводах при $T \ll T_c$. Обсуждается механизм влияния температуры на магнитную структуру и МИ при $T \ll T_c$. В частности, особое внимание уделено стабилизации магнитных свойств и МИ путем термообработки (термический и токовый отжиг). Также было исследовано влияние стеклянной оболочки на внутренние механические напряжения и температурные зависимости магнитной анизотропии и МИ.

Внутренние напряжения в аморфных микропроводах со стеклянной оболочкой возникают из-за неоднородности закалки, условий вытяжки и различных коэффициентов теплового расширения стекла и металла. Все эти вклады имеют сильную температурную зависимость благодаря структурной релаксации метастабильного аморфного состояния и релаксации термоупругих напряжений, возникающих при охлаждении микропроводов от температуры затвердевания до комнатной температуры из-за различия температурных коэффициентов расширения стекла и металла.

Магнитная анизотропия в аморфных сплавах имеет два основных вклада, обусловленных усредненной магнитокристаллической анизотропией или анизотропией, индуцированной отжигом в магнитном поле, и магнитоупругой анизотропией. Магнитная энергия U определяется как

$$U = U_m - \boldsymbol{M} \cdot \boldsymbol{H}_{ex}, \qquad (1)$$

$$U_m = -K\,(\boldsymbol{n_k} \cdot \boldsymbol{M})^2/M^2 - \frac{3}{2}\lambda_s(\hat{\sigma}\boldsymbol{M}) \cdot \boldsymbol{M}\,/M^2$$

Здесь $\boldsymbol{M}$ - статическая намагниченность, $\boldsymbol{H}_{ex}$- внешнее поле, K - константа одноосной анизотропии, которая не связана с магнитоупругим взаимодействием, $\boldsymbol{n_k}$- направление одноосной легкой анизотропии, λ_s- коэффициент магнитострикции, а $\hat{\sigma}$- тензор напряжений, включающий вклад внутренних и внешних составляющих. Внутренние напряжения могут иметь довольно сложное распределение. Часто предполагается наличие осевых напряжений σ_i (растяжение провода со стеклянной оболочкой) или кручения σ_t (см. рис. 2а) Последнее соответствует эффектам растяжения и сжатия $\pm\sigma_t$, направленных перпендикулярно друг другу и под углом 45° относительно оси провода. Комбинация всех этих вкладов приводит к одноосной анизотропии спирального типа, описываемой углом α относительно оси провода:

$$U_m = -\left|\widetilde{K}\right| cos^2(\alpha - \theta) \qquad (2)$$

$$\widetilde{K} = \frac{K + (3/2)\lambda_s\sigma_i}{\cos 2\tilde{\alpha}}, \qquad \tilde{\alpha} = \frac{1}{2}\, tan^{-1}\frac{3|\lambda_s|\sigma_t}{|K + (3/2)\lambda_s\sigma_i|} \qquad (3)$$

В уравнениях (2-3), θ - угол между $\boldsymbol{M}$ и осью проволоки. Легкий угол α зависит от знака эффективной константы анизотропии $\widetilde{K}$: если $\widetilde{K}$ положительна $\alpha = \tilde{\alpha} < 45°$, а для $\widetilde{K}$ <0 угол α = 90 ° − $\tilde{\alpha}$. В случае $K + (3/2)\lambda_s\sigma_i = 0$ эффективная анизотропия $\widetilde{K} = 3|\lambda_s|\sigma_t$ и α = 45 °.

В аморфных и нанокристаллических сплавах магнитострикция может существенно зависеть от $\hat{\sigma}$. Зависимость от растягивающего напряжения имеет вид:

$$\lambda_s(\sigma_i) = \lambda_s(0) - \beta\sigma_i \qquad (4)$$

Здесь $\lambda_s(0)$- значение магнитострикции в ненапряженном состоянии. Параметр β находится в пределах $(1-6)\cdot 10^{-10}$/MPa. Это означает, что при достаточно высоком σ_i магнитострикция может быть отрицательной, даже если $\lambda_s(0) > 0$, а направление легкой анизотропии близко к циркулярному, если $\sigma_i \gg \sigma_t$. С повышением температуры внутреннее напряжение снимается, магнитострикция становится положительной, а направление легкой анизотропии выравнивается ближе к оси провода. Возможное преобразование легкой анизотропии путем изменения σ_i показано на рис. 2б. При этом характер кривых намагничивания меняется: наклонная плоская петля превращается в прямоугольную петлю, а область гистерезиса значительно увеличивается.

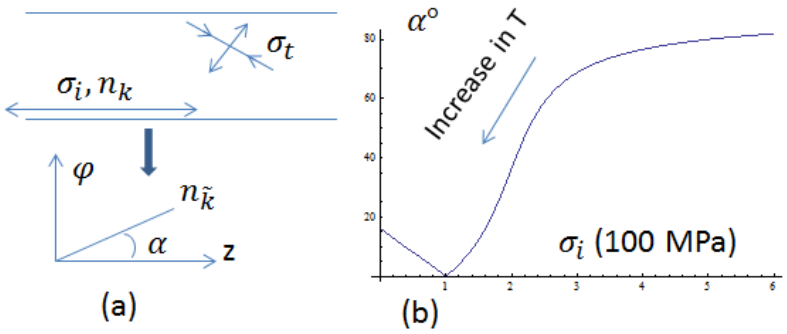

Рисунок 2 - а) - различные вклады в эффективную анизотропию, б) - зависимость угла легкой анизотропии α (относительно оси провода z) от растягивающего напряжения σ_i. Параметры, используемые для расчета: $\lambda_s(0) = 3\cdot 10^{-7}$, $\beta = 2\cdot 10^{-10} MPa^{-1}$, $\sigma_t = 40\ MPa$, $2K/M = 1\ Oe$.

В качестве аморфного сплава с высокой T_c используется состав $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}B_{11.51}Si_{14.59}Mo_{1.69}$, который обеспечивает хорошие магнитно-мягкие свойства и подходит для МИ приложений. Температура Кюри, найденная из ДСК и VSM, составляет около 340°C. При комнатной температуре в исходном состоянии магнитострикция отрицательна, и ее величина составляет около -10^{-7}.

Кривые гистерезиса, измеренные индуктивным методом для разных температур, показаны на рис. 3. Видно, что при комнатной температуре наблюдается наклонный (плоский) гистерезис с низким отношением остаточного значения к насыщению. Повышение температуры приводит к трансформации кривой намагничивания, которая становится прямоугольной с остаточным значением, почти равным насыщению. Такое преобразование в кривой намагничивания подразумевает, что с ростом температуры направление легкой анизотропии изменяется от циркулярного к осевому. Это можно объяснить изменением магнитострикции из-за частичного сброса внутренних напряжений при нагреве. Изменение легкой анизотропии с температурой приводит к соответствующему изменению зависимости импеданса от поля, которая показана на рис. 4. Когда легкая ось выравнивается ближе к оси провода, магнитная проницаемость μ_1 увеличивается, и в итоге импеданс достигает максимума при $H_{ex} = 0$. Изменение импеданса в слабых полях составляет почти 200 % при температуре 70 °C. При дальнейшем увеличении температуры максимум импеданса уменьшается, что соответствует увеличению эффективной анизотропии. Видно, что действительная и мнимая часть импеданса ведут себя одинаково.

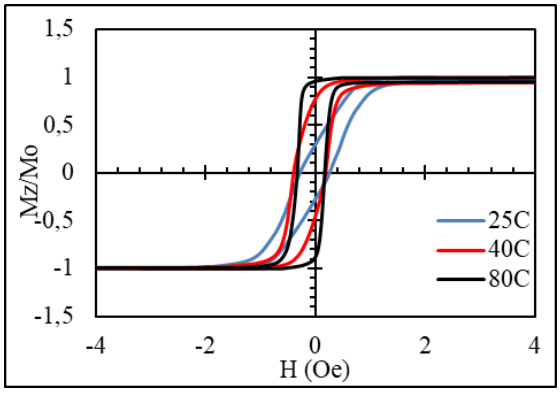

Рисунок 3 - Петля гистерезис микропроводов со стеклянной оболочкой состава $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}B_{11.51}Si_{14.59}Mo_{1.69}$ при разных температурах

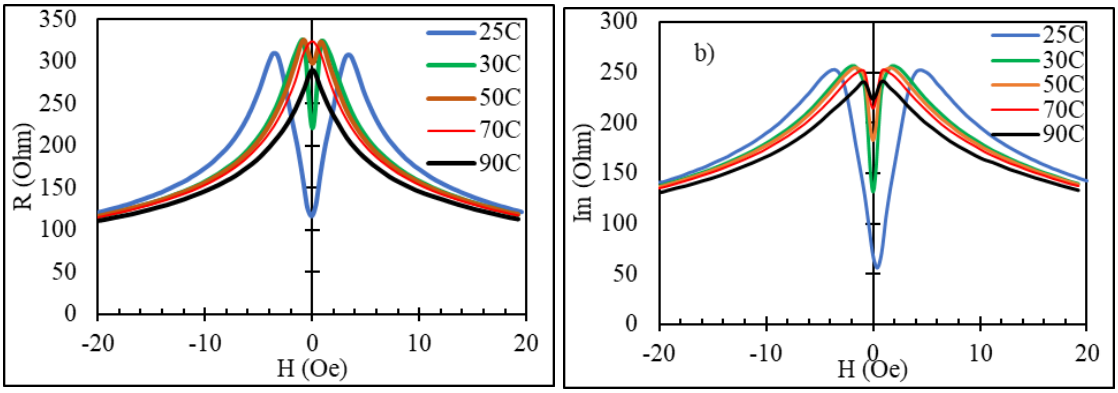

Рисунок 4. а) реальная и б) мнимая часть импеданса исходных микропроводов состава $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}$ $B_{11.51}Si_{14.59}Mo_{1.69}$ при разных температурах, измеренного на частоте 40 МГц.

Термическая обработка создает анизотропию вдоль направления локальной намагниченности в ферромагнитных доменах. Наличие растягивающего напряжения выравнивает намагниченность и индуцирует легкую ось вдоль напряжения, если магнитострикция положительна. Это помогает избежать больших колебаний температуры (рис. 5а). Отжиг проводился при температуре 300°C в течение различного времени (5-15 минут). Прямоугольная петля гистерезиса наблюдалась после отжига, что указывало на наличие осевой легкой анизотропии, которая не показала заметных изменений с температурой. Однако при отжиге в течение более короткого времени импеданс все еще демонстрировал изменения с температурой. На рис. 5б показано, что при оптимизации времени отжига может быть достигнута хорошая температурная стабильность, но максимальная чувствительность уменьшается.

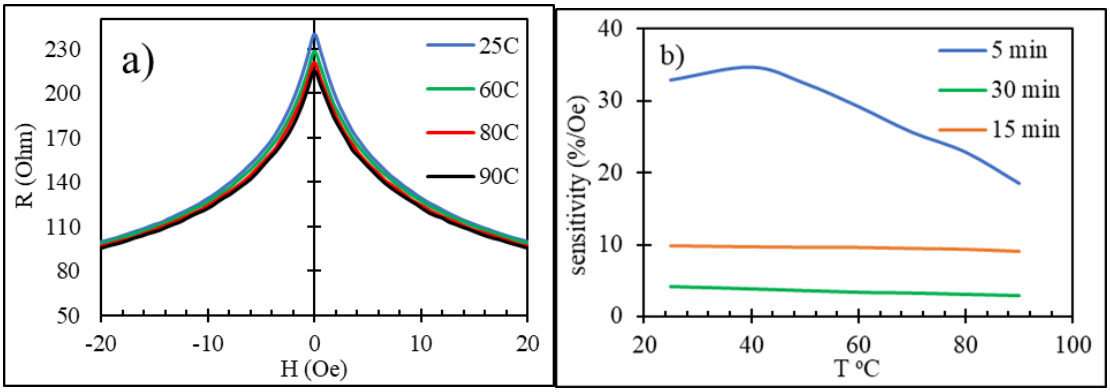

Рисунок 5 - a) - реальная часть импеданса микропровода состава $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}B_{11.51}Si_{14.59}Mo_{1.69}$ со стеклянной оболочкой, отожжённого при 300 ^{0}C в течении 5мин при разных температурах. b) – чувствительность , определенная как $100\%|\Delta Z/Z_{sat})|/H_m$, где Z_{sat} - импеданс в больших полях и H_m соответствует диапазону поля наибольшего изменения импеданса. Частота - 40 MHz.

Чтобы избежать огромных изменений в магнитной структуре и связанных с ней температурных зависимостей, необходимо исключить разрушительные эффекты магнитоупругих взаимодействий и установить равномерную одноосную анизотропию. Для получения большей чувствительности МИ к температуре необходимо получить циркулярную анизотропию достаточно малой величины. Это было сделано при помощи токового отжига.

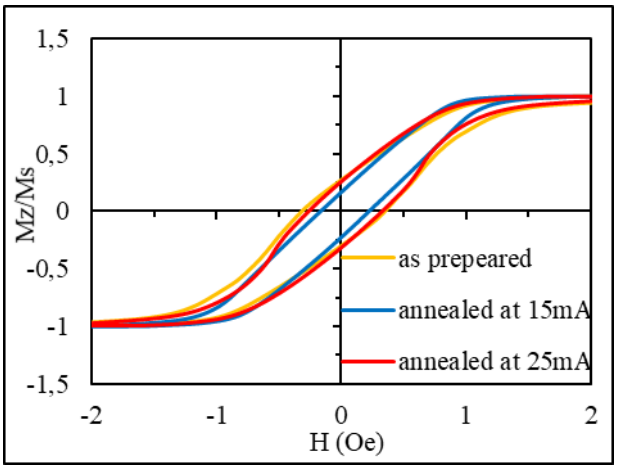

Рисунок 6 - Сравнение петель гистерезиса исходных и отожженных током микропроводов током 15 мА (~ 95 ℃) и 25 мА (~ 190 ℃) в течение 1 часа.

После токового отжига, который вызывает нагрев в присутствии кругового магнитного поля, петли гистерезиса слегка изменяются, как показано на рис. 6. Нагревание приводит к снятию напряжений и уменьшению магнитоупругой анизотропии. В то же время индуцируется одноосная анизотропия с легкой осью вдоль окружности. Образование анизотропии связано с направленным упорядочением атомных пар вдоль локальных спонтанных намагниченностей, которые выровнены круговым магнитном полем, индуцированном током. Величина индуцированной анизотропии K_U зависит от состава сплава и условий отжига [14]. Сплавы на основе одного 3d-элемента (в нашем случае Co) имеют гораздо меньшую индуцированную

анизотропию. Равновесное значение K_U пропорционально квадрату намагниченности насыщения, взятому при температуре отжига T_{an}. Следовательно, T_{an} должна быть достаточно ниже, чем T_c. Однако, при низкой T_{an} кинетика процесса слишком медленная и равновесие не достигается. Мы обнаружили, что наилучшая температурная стабильность эффективной анизотропии и процессов намагничивания достигается при умеренном токе отжига 25 мА, что соответствует температуре отжига около 190 ℃.

Влияние температуры (менее 100°C) на наведенную анизотропию несущественно, однако отжиг не устраняет полностью внутренние напряжения. Напряжения, связанные с быстрым затвердеванием, ослабляются, однако напряжения, связанные с разницей в коэффициентах теплового расширения стекла и металла, не полностью устраняются при нагревании и могут быть причиной изменений магнитных свойств от температуры. При увеличении наведенной анизотропии их влияние уменьшается. Кривые намагничивания микропроводов после токового отжига для различных температур представлены на рис. 7. При силе тока 15 мА, повышение температуры до 90°C не изменяет форму петли гистерезиса, хотя угол наклона увеличивается. Кривые гистерезиса проводов, отожженных током 25 мА, не показывают заметных изменений при температурах до 60°C.

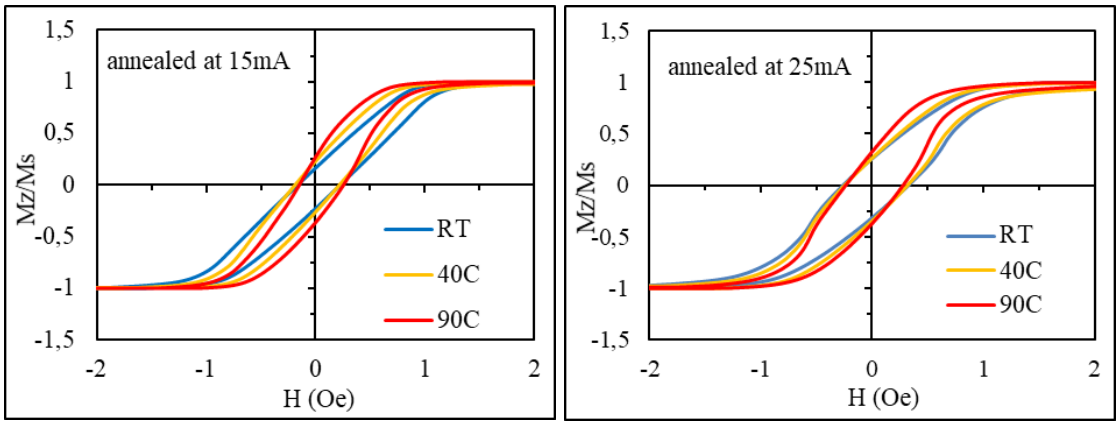

Рисунок 7 - Петли гистерезиса аморфных микропроводов со стеклянной оболочкой, отожженных током при разных температурах. (a) I_{an} =15 мА, (b) I_{an} =25 мА.

Известно, что эффективные параметры анизотропии (поле и направление анизотропии, коэрцитивная сила) зависят от соотношения диаметров металлической жилы к общему диаметру $(d\ /\ D)$, которое контролирует термоупругие напряжения [15-16]. Поэтому интересно исследовать температурное поведение МИ в проводах без стеклянного покрытия.

Кривые гистерезиса проводов после снятия стекла в исходном и отожженном состояниях показаны на рис. 8. После снятия стекла форма кривой гистерезиса изменяется от наклонной (плоской) к прямоугольной. Это преобразование можно объяснить исчезновением сильного растягивающего напряжения, создаваемого стеклянной оболочкой. Эти петли гистерезиса очень похожи на петли проводов со стеклянной оболочкой, нагретых до температуры 90°C. Можно предположить, что при этой температуре термоупругие напряжения практически ослаблены, поэтому магнитные свойства исходных проводов при повышенных температурах аналогичны свойствам проводов после снятия стекла. При снятии основного напряжения, влияющего на направление анизотропии, петли гистерезиса мало зависят от температуры. Однако, аксиальная анизотропия ухудшает характеристики МИ, а токовый отжиг использовался, чтобы установить круговую анизотропию. После отжига с $I_{an} = 25 - 30$мА наблюдается гистерезис круговой формы, указывающий на то, что процесс намагничивания протекает путем смещения доменных стенок и вращения намагниченности. Что касается эффекта нагрева, эти кривые гистерезиса показывают едва заметные изменения, как показано на рис. 8 (б).

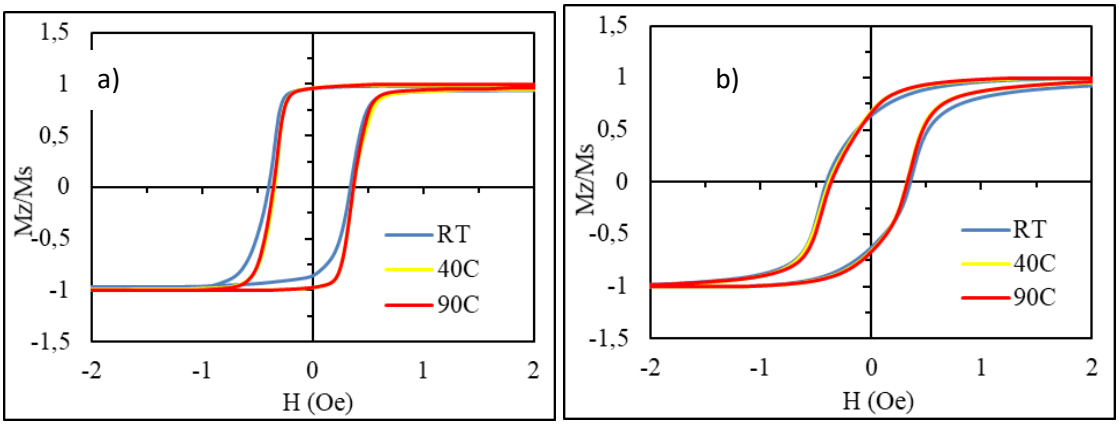

Рисунок 8 - Петли гистерезиса микропроводов после снятия стекла, измеренные при разных температурах до (a) и после токового отжига $I_{an} = 25$ mA (b).

МИ-характеристики микропроводов после удаления стекла приведены на рис. 9a. Видно, что после удаления стекла все еще наблюдается импеданс с двумя пиками, что свидетельствует о существовании поверхностного слоя с циркулярной/геликоидальной анизотропией. С повышением температуры два пика почти сливаются, поэтому циркулярная анизотропия исчезает, вероятно, из-за дальнейшего ослабления внутренних напряжений. Однако, это изменение импеданса от температуры значительно меньше, чем в исходных проводах со стеклянной оболочкой (по сравнению с рис. 4a). Это указывает на главную роль термоупругих напряжений, создаваемых интерфейсом стекло-металл, в формировании магнитоупругой анизотропии и связанных с ней температурных эффектов.

Рисунок 9б показывает МИ характеристики проводов после токового отжига без стеклянной оболочки, которые демонстрируют двухпиковое поведение из-за индуцированной циркулярной анизотропии токовым отжигом. Кривые показывают повышенную чувствительность по отношению к магнитному полю и превосходную стабильность при колебаниях температуры (за исключением области низких полей, см. рис. 9b). Из положения пиков импеданса видно, что циркулярная анизотропия в этом случае значительно меньше по сравнению с анизотропией, реализованной после отжига в проводах со стеклянной оболочкой. Причиной стабилизации температуры является полная релаксация внутренних напряжений, что было достигнуто путем снятия стекла и отжига микропроводов. Чувствительность импеданса к магнитному полю увеличивается, достигая 193 %/Э.

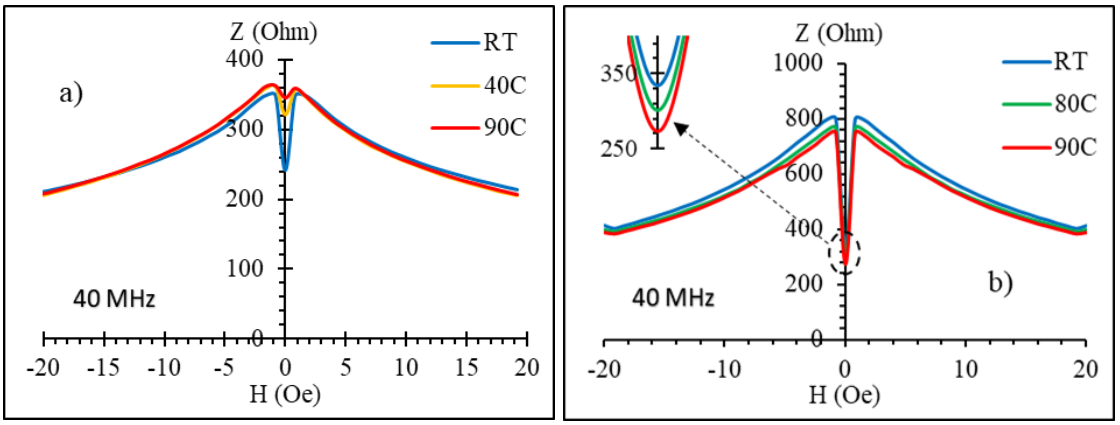

Рисунок 9 – Полевые зависимости импеданса микропроводов без стеклянной оболочки для различных температур: (a) до отжига и (b) после токового отжига с $I_{an} = 25$ мА. Частота измерения- 40 МГц.

Полученные результаты по чувствительности МИ в зависимости от температуры представлены на рис. 10 для проводов в стеклянной оболочке и без оболочки после токового отжига. В диапазоне температур 25 - 90°C изменение чувствительности проводов со стеклянной оболочкой после отжига не превышает 0,1 %/Э°C. Отжиг после удаления стекла привел к значительному увеличению чувствительности и лучшей температурной стабильности около 0,04% /Э°C.

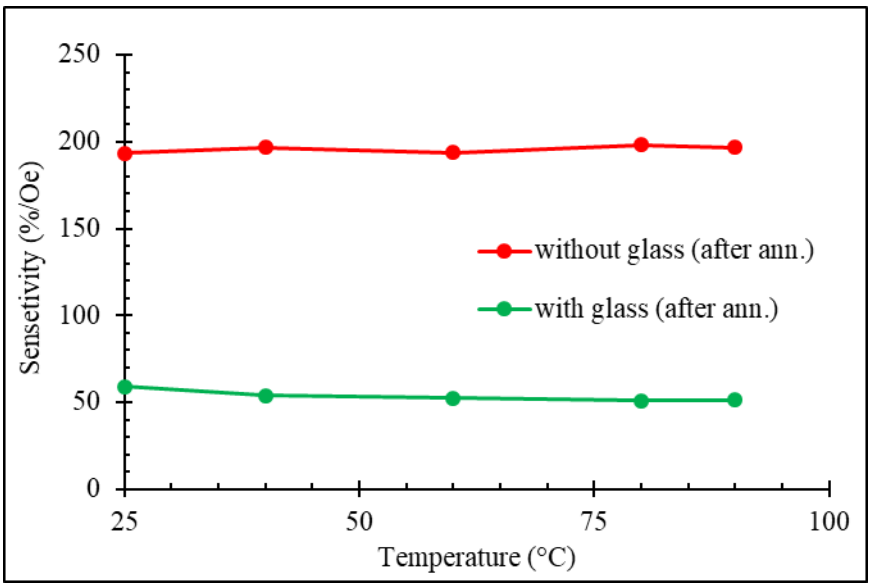

Рисунок 10 - Чувствительность МИ (по отношению к осевому магнитному полю) как функция температуры в исходных и обработанных (путем снятия стекла и токового отжига) аморфных микропроводах состава $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}Mo_{1.69}B_{11.51}Si_{14.59}$.

В четвертой главе рассмотрено поведение магнитного импеданса вблизи температуры Кюри (теория и эксперимент). Приведено исследование температуры Кюри с помощью термообработки, а также рассмотрены основные аспекты разработки температурных сенсорных элементов.

Сильное изменение импеданса можно ожидать вблизи температуры Кюри T_c, где уменьшаются как намагниченность, так и эффективная анизотропия. Изменение намагниченности с температурой описывается функцией Ланжевена:

$$\frac{M(T)}{M_0} = cothx - \frac{1}{x}, \quad x = \frac{3T_c}{T}\frac{M(T)}{M_0} \qquad (8)$$

Здесь M_0 - намагниченность при нулевой температуре. Вблизи T_c анизотропия уменьшается как $\widetilde{K} \propto M^n, n = 2-3$. Вследствие уменьшения M и H_K частота ферромагнитного резонанса $f_{res} = \gamma\sqrt{H_K(H_K + 4\pi M)}/2\pi$ уменьшается вблизи T_c, и область дисперсии магнитной восприимчивости $\hat{\chi}$ смещается в более низкие частоты. На низких частотах для $H_{ex} = 0$ ($\alpha = \theta$) восприимчивость $\chi \approx M/H_K$ увеличивается с приближением температуры к T_c для n > 2. Поэтому температурная зависимость МИ может сильно отличаться на низких ($f \ll f_{res}$) и высоких ($f \sim f_{res}$) частотах.

При приближении к T_c намагниченность насыщения $M(T)$ ведет себя как $(1 - T/T_c)^{\kappa}$. Уравнение (8) дает критический показатель степени $\kappa = 0.5$, тогда как его значение в аморфных сплавах составляет от 0,36 до 0,45. Мы также предполагаем, что $\widetilde{K} \propto M^3$ и $H_K \propto M^2$, поэтому начальная проницаемость $\mu_1(H_{ex} = 0, \omega = 0)$ увеличивается при приближении к T_c как $\mu_1 \propto M^{-1}$. Для низких частот μ_1 имеет максимум ниже T_c. С увеличением частоты в направлении f_{res} (которая уменьшается с ростом температуры как $M^{3/2}$), величина μ_1 показывает непрерывное уменьшение вблизи T_c, как показано на рис. 11 для случая осевой анизотропии.

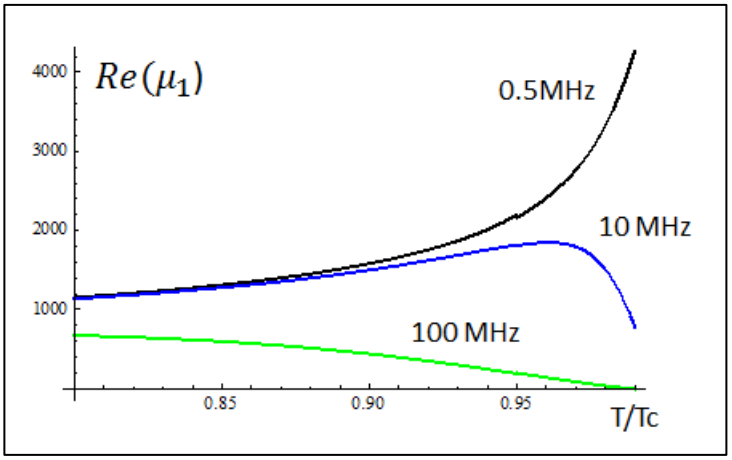

Рисунок 11 - Температурная зависимость действительной части параметра проницаемости μ_1. Параметры, используемые для расчета: $M_0 = 250$ Gs, $H_K(0) = 5$ Oe, $\kappa = 0.42$, $\tau = 0.2$, $\gamma = 2 \cdot 10^7 rad/s \cdot Oe$. Угол анизотропии α = 10° считается

независимым от температуры. Для этих параметров частота ферромагнитного резонанса для температур, значительно ниже T_c, составляет около 400 МГц..

Такое поведение проницаемости в зависимости от температуры приводит к различным температурным характеристикам импеданса для низких и высоких частот. Учитывая возможное использование температурно-зависимого МИ, интерес представляет магнитная конфигурация с максимальным значением μ_1, то есть направление легкой анизотропии берется близко к оси. На рисунке 12 сравниваются зависимости импеданса от поля для различных температур на двух частотах. Для рассматриваемой магнитной конфигурации резонансная частота f_{res} = 400 МГц при температурах $T \ll T_c$. Частота 10 МГц используется для демонстрации увеличения импеданса с температурой до температуры близкой к T_c, где он резко падает (рис. 12а). С увеличением частоты импеданс непрерывно уменьшается с температурой (рис. 12б). Такое поведение импеданса аморфных микропроводов вблизи T_c было подтверждено в наших экспериментах.

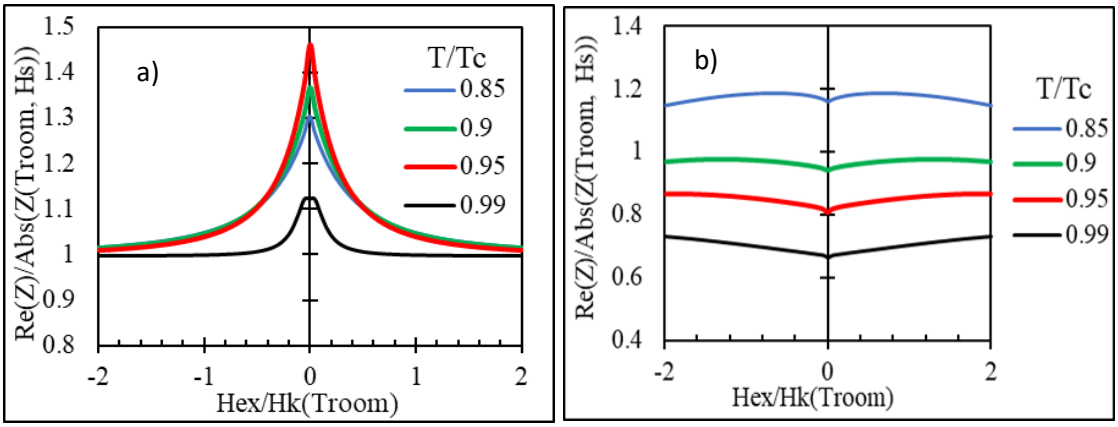

Рисунок 12 - Реальная часть импеданса для частот 10 МГц (а) и 300 МГц (б). Магнитные параметры такие же, как для рис. 11. Проводимость составляет 10^{16} s^{-1}, радиус проволоки $a = 8.5$ мкм. Импеданс нормируется на его значение при комнатной температуре и сильном магнитном поле.

Для исследования температурного поведения импеданса вблизи температуры Кюри был выбран сплав состава $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$, имеющий T_c = 61,5 ℃. Общий диаметр проволоки составляет 27,3 мкм, а диаметр металлического сердечника - 17,7 мкм. Микропровода имеют положительную магнитострикцию и

осевую магнитную анизотропию в исходном состоянии. Чтобы избежать возможного вклада релаксации внутренних напряжений в температурные зависимости анизотропии и импеданса, предварительно был проведен температурный отжиг. Поэтому в этом случае считаем, что изменение магнитных параметров вблизи фазового перехода в парамагнитное состояние является основным источником влияния температуры на магнитный гистерезис и импеданс.

На рисунке 13 показаны кривые гистерезиса для разных температур. Видно, что они имеют идеальную прямоугольную форму даже для температур, достаточно близких к T_c, то есть осевая анизотропия существует для любой температуры $T < T_C$.

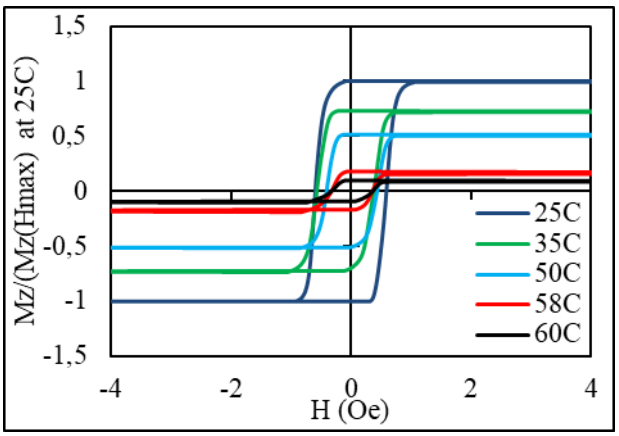

Рисунок 13 - Петли намагничивания микропроводов в стеклянной оболочке состава $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ при различных температурах, в том числе вблизи T_c = 61,5 °C, полученных индуктивным методом. Петли нормализуются по значению насыщения при комнатной температуре.

На рисунке 14 показаны результаты зависимости импеданса от магнитного поля при различных температурах. Видно, что влияние температуры на МИ сильно отличается на более низких частотах (рис. 14а) и более высоких частотах (рис. 14б). На более низких частотах (10 МГц, что значительно ниже частоты ферромагнитного резонанса), импеданс увеличивается с ростом температуры. Его значение резко падает только при T= 61 °C, то есть почти при T_c. Можно полагать, что это поведение связано с увеличением начальной проницаемости вблизи T_c, как обсуждалось выше (ср. с рисунками 11 и 12а). Для более высоких частот импеданс непрерывно уменьшается с ростом температуры, следуя поведению проницаемости (ср. с рисунками 11 и 12b).

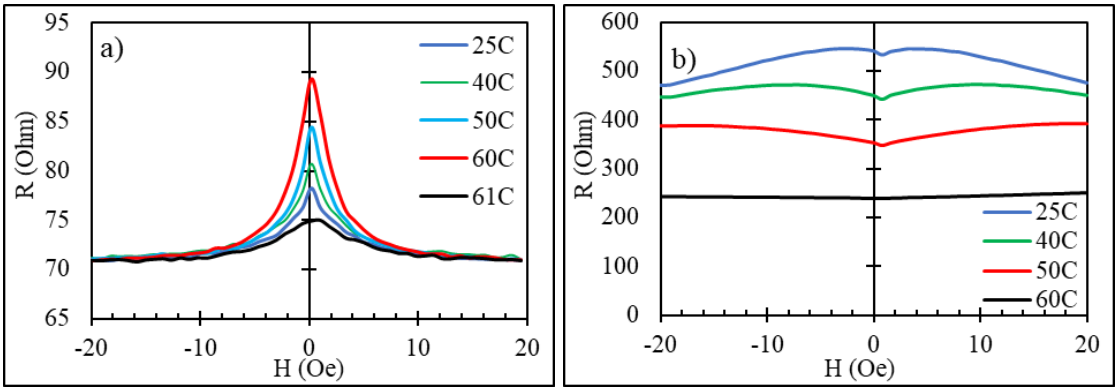

Рисунок 14 - Реальная часть импеданса аморфных микропроводов со стеклянной оболочкой состава $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ с T_C = 61,5 ℃ при разных температурах. (a)- 10 МГц, (b)- 300 МГц.

Далее исследовалась возможность изменения температуру Кюри с помощью отжига для двух сплавов. На рисунках 15 и 16 показано влияние условий отжига (T_{an} and t_{an}) на T_C, которое существенно различается для двух образцов. Для образца состава $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ существует немонотонная зависимость T_c от t_{an} для температур отжига ниже 475°C и выше 200°C. Это указывает на вклад различных процессов. Начальное снижение T_c может быть связано с усилением антиферромагнитной связи Cr-Fe и Cr-Co из-за изменений в композиционном ближнем порядке [17]. Минимум в T_c = 53,5 °C достигается при T_{an} = 350 ℃ и t_{an} = 10 мин.

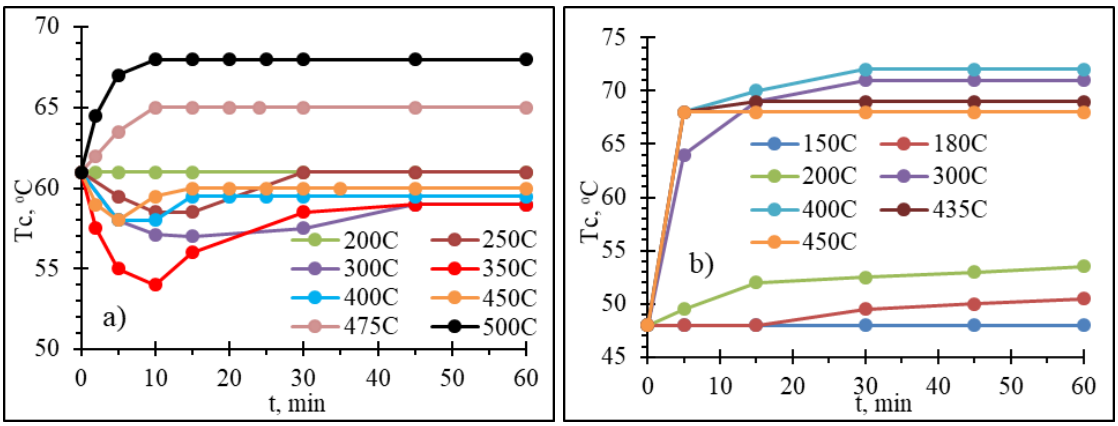

Рисунок 15 - Температура Кюри от времени отжига при разных температурах отжига. a) $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ (T_c = 61,5 ℃) и b) $Fe_5Co_{27.4}B_{12.26}Si_{12.26}Ni_{43.08}$ (T_c = 48 ℃).

Для более высоких времен отжига значение T_c начинает увеличиваться из-за сближения 3d-атомов и достигает равновесного значения, которое все еще ниже, чем у исходного закаленного сплава. При высоких температурах отжига (выше 450°C) значение T_c монотонно возрастает с возрастанием t_{ann} и достигает равновесия примерно через 10 минут. Эти температуры близки к началу кристаллизации, и увеличение T_c может быть связано с появлением кристаллических фаз с высокой точкой Кюри. Наибольшие значения T_c = 68°C получены при температуре отжига 500°C.

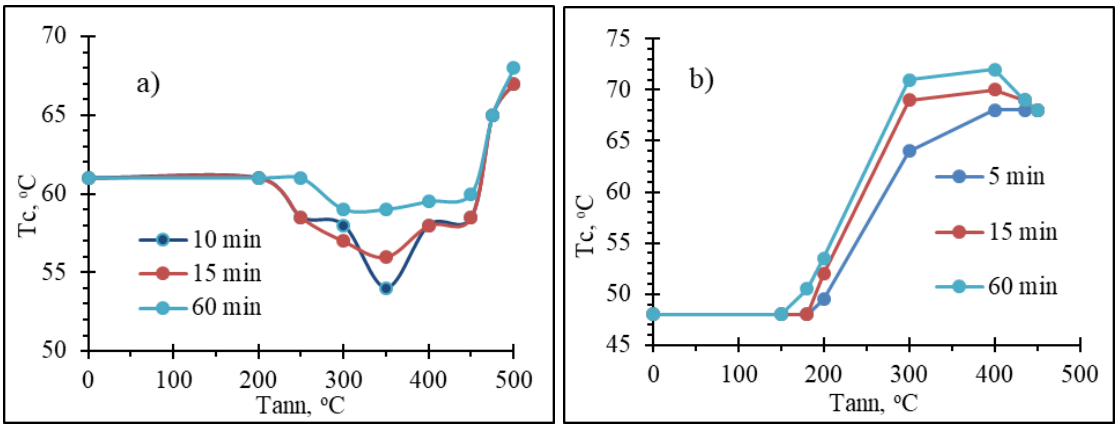

Рисунок 16 - Температура Кюри от температуры отжига при разных временах отжига. a) $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ (T_c = 61,5 ℃) и b) $Fe_5Co_{27.4}B_{12.26}Si_{12.26}Ni_{43.08}$ (T_c = 48 ℃).

Как показано на рисунках 15б и 16б, влияние отжига на температуру Кюри образца состава $Fe_5Co_{27.4}B_{12.26}Si_{12.26}Ni_{43.08}$ более характерно для механизма изменения композиционного ближнего порядка атомов Fe и Co, способствующих ферромагнитному взаимодействию: T_c увеличивается с увеличением времени отжига и достигает равновесных (для данных температур отжига) значений через 10 - 30 мин. Увеличение T_c связано с более низкими значениями точки Кюри в исходном состоянии по сравнению с соответствующим равновесным значением при некотором T_{an}. Равновесное значение T_c увеличивается с увеличением T_{an}, достигая максимума 72°C при T_{an} = 400°C (по сравнению с 48°C в исходном состоянии), а затем демонстрирует тенденцию к снижению. Это связано с эффектом разупорядочения, происходящим при более высоких температурах отжига. Понижение T_c не является выраженным, поскольку оно скрыто за возможным образованием кристаллических

фаз с более высоким T_c, когда температуры отжига приближаются к началу кристаллизации.

Для использования данных проводов в качестве сенсора температуры было исследовано влияние температуры на процессы перемагничивания группы из 5 микропроводов с номинальными составами $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ и $Fe_{4.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_8Mo_{0.08}$, но разными температурами Кюри, полученными в результате отжига. Провода подбирались так, что температурная область работы датчика составляет 48 - 77 °C.

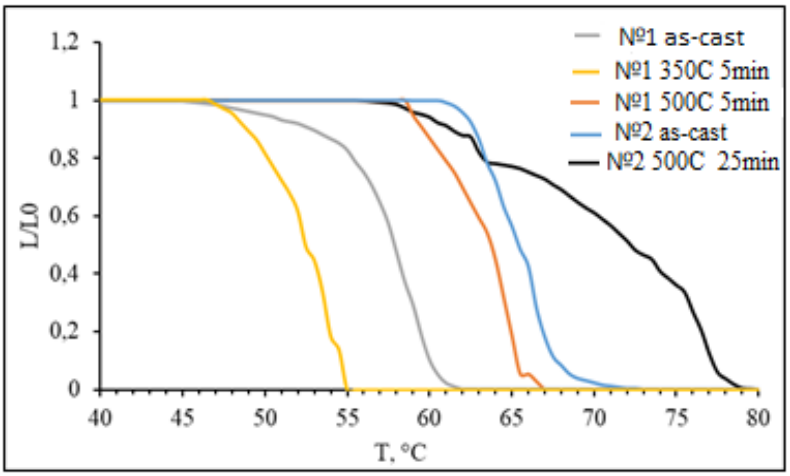

Рисунок 17 - Зависимость относительной магнитной индуктивности для аморфных микропроводов с разной температурой Кюри от температуры (№1 - $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ и №2 - $Fe_{4.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_8Mo_{0.08}$).

На рисунке 17 представлено изменение низкочастотной индуктивности проводов с различной температурой Кюри от температуры. Далее, для выбранной комбинации из пяти микропроводов с разными T_c было исследовано температурное изменение амплитуд высших гармоник сигнала электрического напряжения, возникающего при их перемагничивании. Как видно из рисунка 18, изменения амплитуды 13-й гармоники пяти выбранных проводов от температуры имеет почти линейный характер, что очень важно для сенсорных приложений.

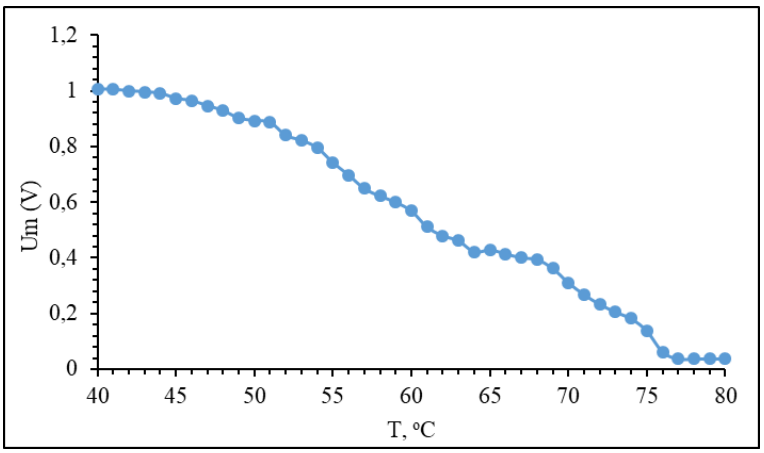

Рисунок 18 - Зависимость амплитуды 13- гармоники пяти микропроводов от температуры

Основные результаты и выводы

1. Предложен токовый отжиг (ТО) микропроводов с удаленным контролем температуры для модификации их магнитных параметров и улучшения температурной стабильности (получен патент на изобретение (заявка №2018146148/28(077138), положительное решение от 11.04.2019). Разработанная методика отжига позволяет устанавливать нужную температуру (по отношению к температуре Кюри и температуре начала кристаллизации).
2. С использованием токового отжига реализована температурно-стабильная циркулярная анизотропия в аморфных микропроводах состава $Co_{66.94}Fe_{3.83}Ni_{1.44}B_{11.51}Si_{14.59}Mo_{1.69}$ с высокой температурой Кюри. Это достигается за счет релаксации внутренних напряжений и замены магнитоупругой анизотропии наведенной анизотропией, сформированной упорядочением атомных пар при отжиге. При отжиге проводов после удаления стеклянной оболочки достигается высокая чувствительность изменения МИ- более 193 %/Э, что соответствует лучшим мировым значениям. При этом температурная стабильность – не менее 0,04% /Э°С.
3. Показано, что магнитоимпеданс в аморфных микропроводах претерпевает существенные изменения вблизи температуры Кюри, при этом поведение МИ вблизи T_c отличается для низких (меньше частоты резонанса) и высоких частот. Для микропроводов состава FeCoBSiCrMo с осевой магнитной

анизотропией получено монотонное уменьшение МИ при частотах более 100 МГц при подходе к T_c. Изменение импеданса с температурой в нулевом магнитном поле составляло более 3,5 %/°C. Поскольку температура Кюри таких сплавов достаточно низкая (порядка 40-80 °C), полученные результаты представляют интерес для разработки высокочувствительных миниатюрных температурных датчиков.

4. Оптимизированы режимы температурного отжига для тонкой подстройки температуры Кюри для микропроводов составов $Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ и $Fe_5Co_{27.4}B_{12.26}Si_{12.26}Ni_{43.08}$ в интервале 53,5 – 68 °C и 48 – 72 °C, соответственно.
5. Разработана методика бесконтактного контроля температуры, которая основана на зависимости амплитуды высших гармоник от температуры в проводах с магнитной би-стабильностью ($Fe_{3.9}Co_{64.82}B_{10.2}Si_{12}Cr_9Mo_{0.08}$ и $Fe_{4.9}Co_{64.82}B_{10}.2Si_{12}Cr_8Mo_{0.08}$).
6. Разработан и собран стенд для проведения исследований влияния температуры на процессы намагничивания в аморфных ферромагнитных микропроводах внутри композитных материалов. Разработана конструкция сенсора температуры и программное обеспечение для работы сенсора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. L. Panina and K. Mohri, Magneto-impedance effect in amorphous wires, Appl. Phys. Lett. **65**, (1994) 1189-1191.
2. L Kraus, Z Frait, K.R Pirota, H Chiriac, Giant magnetoimpedance in glass-covered amorphous microwires, J. Magn. Magn. Mater. **254–255**, (2003) 399-403.
3. M.M. Salem, M.G. Nematov, A. Uddin, L.V. Panina, M.N. Churyukanova and A. T. Marchenko, CoFe-microwires with stress-dependent magnetostriction as embedded sensing elements, Journal of Physics: Conf. Series **903**, (2017) 012007.
4. K. Mandal, S. Puerta, M. Vazquez, A. Hernando, The frequency and stress dependence of giant magnetoimpedance in amorphous microwires, IEEE Trans. Magn. **36**, (2002) 3257-3259.
5. А. Джумъазода, Л.В. Панина, М.Г. Неъматов, А.Т. Морченко, Ф.С. Табаров, Влияние температуры на МИ в аморфных микропроводах после токового

отжига, Журнал теоретической физики. Журнал технической физики **89**, (2019) 1056-1060.

6. V. Zhukova, J.M. Blanco, M. Ipatov, A. Zhukov, C. García, J. Gonzalez, R. Varga, A. Torcunov, Development of thin microwires with low Curie temperature for temperature sensors applications, Sens. and Actuators B **126**, (2007) 318-323.
7. J. Torrejón, G.A. Badini Confalonieri, K.R. Pirota, M. Vázquez, Multifunctional Magnetoelastic Sensor Device Based in Multilayer Magnetic Microwires, Sensor Letters **5**, (2007) 153-156.
8. P. Sarkar, A. Basu Mallick, R.K. Roy, A.K. Panda, A. Mitra, Structural and Giant Magneto-impedance properties of Cr-incorporated Co–Fe–Si–B amorphous microwires, J. Magn. Magn. Mater. **324**, (2012) 1551–1556.
9. P. Sarkar, R.K. Roy, A. Mitra, A.K. Panda, M. Churyukanova, S. Kaloshkin, Effect of Nb and Cr incorporation on the structural and magnetic properties of rapidly quenched FeCoSiB microwires, J. Magn. Magn. Mater. **324**, (2012) 2543-25.
10. V.M. Garcia-Chocano, H. Garcia-Miquel, DC and AC linear magnetic field sensor based on glass-coated amorphous microwires with giant magnetoimpedance, J. Magn. Magn. Mater. **378**, (2015) 485-492.
11. N.A. Yudanov, S.A. Evstigneeva, L.V. Panina, A.T. Morchenko, A. Zhukov, X.H. Peng, Temperature dependence of the off-diagonal magnetoimpedance in sensor configuration utilizing Co-rich amorphous wires, Phys. Stat. Solidi A **213,** (2016) 372-376.
12. H. Chiriac, S. Corodeanu, M. Lostun, G. Stoian, G. Ababei, and T.-A. Óvári, Rapidly solidified amorphous nanowires, J. Appl. Phys. **109**, (2011) 063902-063902-4.
13. S.A. Baranov, V.S. Larin, and A.V. Torcunov, Technology, preparation and properties of the cast glass-coated magnetic microwires, Crystals **7**, (2017) 136.
14. P. Corte-León, V. Zhukova, M. Ipatov, J.M. Blanco, J. Gonzalez, A. Zhukov, Engineering of magnetic properties of Co-rich microwires by joule heating, Intermetallics **105**, (2019) 92-98.
15. H. Chiriac, T.A. Ovari, Gh. Pop, F. Barariu, Effect of glass removal on the magnetic behavior of FeSiB glass-covered wires, IEEE Trans. on Magn. **33**, (1997) 782.

16. S. Corodeanu, T.A. Óvári, H. Chiriac, Effect of in situ glass removal on the magnetic switching in amorphous microwires, IEEE Trans. on Magn. **50**, (2014) 2007204.
17. T. Egami, Structure and magnetism of amorphous alloys, IEEE Trans. on Magn. **7**, (1981)

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **A. Dzhumazoda**, L.V. Panina, M. G. Nematov, A.M. Adam, A. Ukhasov, A.T. Morchenko, F.S. Tabarov, N.A. Yudanov, Controlling the Curie temperature in amorphous glass coated microwires by heat treatment, Journal of Alloys and Compounds **802** (2019) 36-40
2. **A. Dzhumazoda**, L.V. Panina, M.G. Nematov, S.A. El-Demrdash, A.A. Ukhasov, N.A. Yudanov, A.T. Morchenko, F. X. Qin, Temperature-stable magnetoimpedance (MI) of current-annealed Co-based amorphous microwires, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **474**, (2019) 374-380
3. **A. Dzhumazoda,** L. V. Panina, A. M. Adam, N. A. Yudanov, R. Awale, A. T. Morchenko, S. V. Podgornaya, Temperature Effects on the Magnetoimpedance in Glass-Coated Amorphous Wires, IEEE Transactions on Magnetics **53**, (2017), 2003205
4. L.V. Panina., **A. Dzhumazoda**., S.A. Evstigneeva., A.M. Adam., A.T. Morchenko., N.A. Yudanov., V.G. Kostishyn. Temperature effects on magnetization processes and magnetoimpedance in low magnetostrictive amorphous microwires. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials **459**, (2018) 147-153
5. **A. Dzhumazoda**; L. V. Panina; A. T. Morchenko; A. Adam; R. Awale; S. V. Podgornaya, Temperature effects on the magnetoimpedance in glass-coated amorphous wires, Magnetics Conference (INTERMAG), 2017 IEEE International, Electronic ISSN: 2150-4601
6. L.V. Panina, D. P. Makhnovskiy, **A. Dzhumazoda**, S.V. Podgornaya, V. G. Kostishyn, H.X. Peng and A. T. Marchenko, Tunable microwave electric polarization in magnetostrictive microwires, 8th Joint European Magnetic Symposia (JEMS2016) IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **903**, (2017) 012011

7. L.V. Panina, D.P. Makhnovskiy, **A. Dzhumazoda**, and S.V. Podgornaya, Tunable electric polarization of magnetic microwires for sensing applications// Springer Series in Materials Science. **252**, Springer International Publishing AG (2017) 131-150
8. A Uddin, S.A. Evstigneeva, **A. Dzhumazoda,** M.M. Salem, M.G. Nematov, AM Adam, LV Panina, AT Morchenko, Temperature Effects on the Magnetization and Magnetoimpedance in Ferromagnetic Glass-Covered microwires, Journal of Physics: Conference Series **917**, (2017) 082011
9. **А. Джумьазода**, Л.В. Панина, А.М. Адам, С.А. Эл-Дермдаш, А. Уддин, Неьматов М.Г., Морченко А.Т. «Влияние температуры на магнитоимпеданс проводов после токового отжига», курск, физика и технология наноматериалов и структур, Тип: статья в сборнике трудов конференции, (2017) 46-48
10. **А. Джумъазода,** Л.В. Панина, М.Г. Неъматов, А.Т. Морченко, Ф.С. Табаров, Влияние температуры на МИ в аморфных микропроводах после токового отжига, Журнал технической физики **89**, (2019) 1056-1060
11. **А. Джумъазода,** Р. Авал, С.В. Подгорная, Л.В. Панина, А.Т. Морченко, В.Г. Костишин, Управляемая дипольная поляризация ферромагнитных микропроводов на ГГц частотах для применений в беспроводных сенсорных устройствах, Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем, М.: ИППМ РАН, Часть IV, (2016) 215-222.

Патенты

Прибор для проведения токового отжига микропроводов с удаленным контролем температуры (заявка №2018146148/28(077138), приоритет 25.12.2018, положительное решение от 11.04.2019). Юданов Николай Анатольевич, Панина Лариса Владимировна, Костишин Владимир Григорьевич, Неъматов Махсудшо Гайратович, **Джумъазода Абдукарим**