

КАРАНСКИЙ ВИТАЛИЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

**МОДИФИКАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ Mn-Zn ФЕРРИТОВ В
СЛАБООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННОГО
ИСТОЧНИКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**

Специальность 1.3.5 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: **Смирнов Серафим Всеволодович,**
доктор технических наук, профессор, ТУСУР

Официальные оппоненты: **Гынгазов Сергей Анатольевич,**
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», НИ ТПУ

Костишин Владимир Григорьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой Технологии материалов электроники, член-корреспондент Академии инженерных наук РФ, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», НГТУ

Защита состоится «15» декабря 2021 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.03, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на официальном сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/x1jyk16r>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор



Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Марганец-цинковые ферриты (Mn-Zn ферриты) находят применение не только в электро- и радиотехнике, но и во многих других областях науки и техники. Диапазон их применения постоянно расширяется. Особое внимание ферритам уделяется в медицине и экологии, в частности как устройствам, обеспечивающим защиту от электромагнитного излучения приемо-передающей и диагностической аппаратуры. Из множества защитных материалов Mn-Zn ферриты-шпинели по совокупности электрических, магнитных и эксплуатационных свойств наиболее полно удовлетворяют предъявляемым требованиям к радиопоглощающим материалам, не менее важным является и экономический аспект их применения. Кроме того, керамическая технология производства ферритовых изделий позволяет получать защитные устройства практически любой формы и размеров.

Для повышения эффективности устройств ферритовым материалам необходимо придавать новые свойства путем создания градиентных или текстурированных структур, например, «немагнитный проводник-феррит».

Ферритовые изделия с градиентной структурой могут быть получены при обработке их поверхности с помощью низкоэнергетического электронного пучка, генерируемого источником электронов с плазменным катодом в слабоокислительной среде. Технологии и методики воздействия электронных пучков на поверхность Mn-Zn ферритов мало изучены. В связи с этим разработка методики модификации поверхности Mn-Zn ферритов с целью улучшения их свойств является актуальной.

Цель работы

Разработка методики модификации изделий из Mn-Zn ферритов с помощью плазменного источника электронов для создания высокопоглощающих ВЧ и СВЧ энергию элементов.

Для достижения заданной цели поставлены следующие **задачи**:

- 1) исследование тепловых процессов воздействия низкоэнергетических электронов на поверхность изделий из Mn-Zn ферритов;

2) выбор и теоретическое обоснование режимов работы плазменного источника электронов с целью модификации поверхности изделий из Mn-Zn ферритов;

3) исследование структуры и электрофизических характеристик изделий из Mn-Zn ферритов;

4) создание градиентных СВЧ поглощающих структур.

Научная новизна

1. Предложена методика модификации поверхности изделий из марганец-цинковых ферритов в слабоокислительной среде низкоэнергетическими электронами с энергиями до 7 кэВ.

2. Установлено, что электронно-лучевое воздействие носит тепловой характер и характеризуется следующими процессами: вторичная собирательная рекристаллизация, изменение катионного распределение в кристаллической решетке и потерей цинка в тонком слое.

3. Установлено, что все процессы протекают в тонком слое толщиной 150 мкм и приводят к увеличению электропроводности в 200–300 раз за счет восстановления железа с Fe^{3+} до Fe^{2+} .

4. Показано, что создание градиентной структуры «немагнитный проводник – феррит» позволяет управлять процессами поглощения и отражения электромагнитного излучения.

Научные положения, выносимые на защиту

1. При обработке изделий из Mn-Zn ферритов электронами с энергией 4 – 7 кэВ и плотностью мощности 113 – 198 Вт/см², в приповерхностном слое толщиной 50 – 100 мкм наблюдается уплотнение структуры, связанное с ростом зерен и уменьшением пористости, обусловленное процессами вторичной собирательной перекристаллизацией.

2. При электронной обработке пучками ферритовых изделий в слабоокислительной среде наблюдается увеличение электропроводности приповерхностного слоя не менее чем в 200 раз, связанное как с изменением валентности ионов железа с III до II, так и с увеличением концентрации кислородных вакансий и частичной потерей цинка.

3. При электронной обработке пучками с энергией 4 – 7 кэВ и плотностью мощности 113 – 198 Вт/см² в изделиях из Mn-Zn ферритов

создается градиентная структура, характеризующаяся нелинейным переходом от материала с высокой магнитной проницаемостью и высоким удельным сопротивлением к материалу с низкой магнитной проницаемостью и высокой электропроводностью, что обеспечивает получение высокоэффективных поглощающих ВЧ и СВЧ энергии элементы.

4. Путем сравнения методов обработки ферритовых изделий низкоэнергетическими электронами и лазерным ИК-излучением с длиной волны 10,6 мкм, показано, что оба метода носят преимущественно тепловой характер, а физико-химические процессы, протекающие в изделиях, идентичны.

Достоверность научных результатов

Степень достоверности научных результатов, подтверждается: применением современных методов научных исследований; большим объемом экспериментальных данных, полученных с помощью современного аналитического оборудования; хорошим согласованием расчетных и экспериментальных данных; верификацией экспериментальных данных на основе сравнения с результатами, полученных с применением общепринятых методов.

Практическая значимость

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается использованием их при выполнении следующего научного проекта:

научный проект «Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки», выполняемый коллективом научной лаборатории «Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на факультете электронной техники ТУСУРа при чтении курса лекций и проведении лабораторных работ по дисциплине «Физика конденсированного состояния» для подготовки бакалавров по направлениям 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» и 28.03.01 «Нанотехнологии и

микросистемная техника». Также материалы диссертации используются при прохождении студентами производственных практик: практика по получению профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности и преддипломная практика.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении», Томск, НИ Томский политехнический университет, 9–11 ноября 2015 г.; Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016», Томск, ТУСУР, 25–27 мая 2016 г.; XIII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, ТУСУР, 29 ноября – 01 декабря 2017 г.; Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа «Научная сессия ТУСУР–2017», Томск, ТУСУР, 10–12 мая 2017 г.; VII-ая Международная конференция «Фотоника и информационная оптика», Москва, НИЯУ МИФИ, 24–26 января 2018 г.; Двадцать четвертая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ–24», Томск, Ассоциация студентов-физиков и молодых учёных России – НИ ТГУ – НИ ТПУ – ТГПУ – Томский научный центр СО РАН – Институт электрофизики УрО РАН – ТУСУР, 31 марта – 7 апреля 2018 г.; VII-ая Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», Москва, НИЯУ МИФИ, 16-21 апреля 2018 г.; Международная научная студенческая конференция «МНСК–2018», Новосибирск, НГУ, 22–27 апреля 2018 г.; XV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, НИ ТПУ – НИ ТГУ – ТГАСУ – ТУСУР – Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, 24–27 апреля 2018 г.; Всероссийская научно-практическая конференция «Прикладные исследования в области физике», Иркутск, ИРНИТУ, 4 декабря 2019 г.; XIV Всероссийская научная конференция молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 30 ноября – 04 декабря 2020 г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в журнале индексируемом WoS (Q2), 11 статей в сборниках Всероссийских и международных конференций, 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Личный вклад автора диссертационной работы состоит в определении цели и направлений научных исследований, в подготовке экспериментального оборудования, в проведении и участии в экспериментах, в обработке и анализе полученных данных. Формулировка основных положений и выводов проводилась совместно с научным руководителем д-ром техн. наук, профессором С.В. Смирновым. В проведении ряда экспериментов активное участие принимал д-р техн. наук А.С. Климов. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список использованных источников, включая список публикаций по теме диссертации, приложения. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 31 таблицу. Список использованных источников включает 134 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе описаны методы модификации материалов и изделий с использованием концентрированных энергетических пучков. Рассмотрены структуры и свойства ферритовых изделий.

Вторая глава посвящена методам и технике проведения исследований. Представлено экспериментальное и диагностическое оборудование, а также методы исследования и анализа свойств и измерения параметров ферритовых изделий.

В качестве объекта исследования были выбраны поликристаллические Mn-Zn ферриты марки НМ2000, имеющие химический состав $Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_3$. Образцы изготовлены в виде ферритовых чашечек Р и применяются в качестве: высокочастотных термостабильных индуктивностей для резонансных цепей; широкополосных сигнальных трансформаторов с высоким значением одновитковой индуктивности. Исследуемые в работе Mn-Zn ферриты имеют следующий типоразмер $R \times 18 \times 11$. На рисунке 1 представлен внешний вид исследуемых образцов (а) и фотография микроструктуры поверхности Mn-Zn феррита (б).

Исходная микроструктура поверхности Mn-Zn феррита с размером зерна 2–8 мкм. Поверхность характеризуется достаточно большой концентрацией поверхностных дефектов: межзеренные границы и поры. Данная морфология поверхности оказывает отрицательное влияние на электрофизические и технологические параметры и характеристики Mn-Zn ферритов.

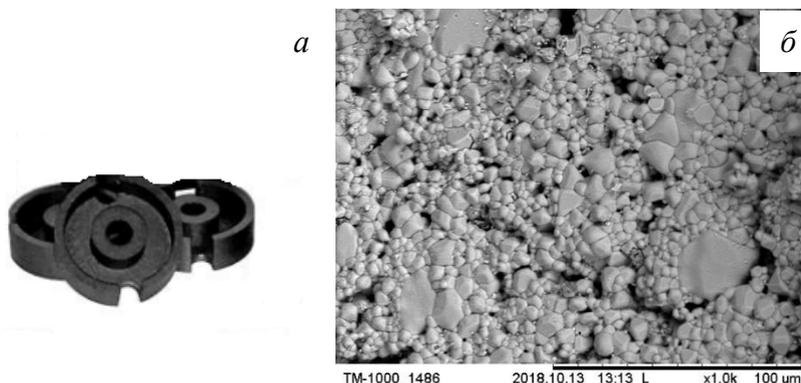
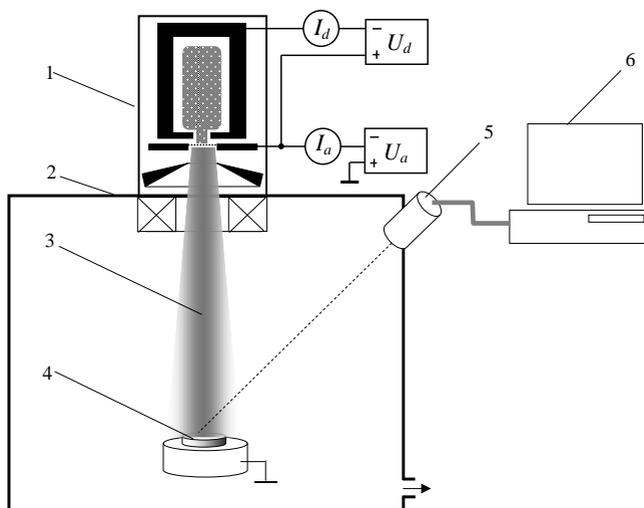


Рисунок 1 – Внешний вид исследуемых образцов (а) и микроструктура поверхности Mn-Zn феррита (б)

Для обработки поверхности образцов использована электронно-лучевая установка, схема которой представлена на рисунке 2. Для генерации электронного пучка применяется форвакуумный плазменный электронный источник 1, позволяющий формировать электронный пучок диаметром менее 1 мм и с плотностью мощности до 10^5 Вт/см². В качестве источника электронов использовалась плазма тлеющего разряда с полым катодом. Специальная конструкция ускоряющего промежутка электронного источника позволяла формировать непрерывный электронный пучок с током до 200 мА при давлениях в источнике и вакуумной камере 5–20 Па. Основная особенность используемого источника заключается в возможности непосредственной обработки низкопроводящих материалов, таких как керамика, стекло, полимеры. Ионизация газовой среды вакуумной камеры 2 электронами пучка 3 приводит к образованию плотной пучковой плазмы, которая служит нейтрализатором отрицательного заряда приносимого электронами пучка на облучаемую поверхность 4. Снижение зарядки поверхности позволяет эффективно осуществлять ее нагрев.



- 1 – плазменный источник электронов; 2 – вакуумная камера;
 3 – электронный пучок; 4 – облучаемый образец; 5 – пирометр;
 6 – компьютер.

Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки по электронно-лучевому облучению ферритов

Фокусировка пучка магнитным полем, создаваемым короткофокусной катушкой, позволяет изменять плотность мощности пучка в зоне обработки мишеней от 100 до 1000 Вт/см², чего оказалось достаточно для нагрева поверхности феррита до 1350 °С. При обработке диаметр электронного пучка устанавливался на несколько миллиметров больше диаметра облучаемой ферритовой мишени, что позволяло более равномерно осуществлять электронно-лучевое воздействие на всю площадь феррита. Расстояние от электронного источника до образца составляло 25 см. Контроль температуры поверхности образца осуществлялся с помощью оптического пирометра RaytekMarathon 5, данные с которого отображались на компьютере 6.

В третьей главе рассмотрены физико-химические процессы и структура Mn-Zn ферритов при электронно-лучевом и лазерном воздействии.

Для анализа тепловых процессов при нагреве поверхности Mn-Zn феррита низкоэнергетическим потоком электронов воспользуемся уравнением теплопроводности (уравнение Фурье-Кирхгофа). Так как исследуемые образцы имеют цилиндрическую форму, то при решении уравнения воспользуемся цилиндрическими координатами (r, φ), примем, что параметры материала не зависят от угла и температуры, тогда уравнение можно записать в следующем виде

$$\frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + P_s(r, y, t, T),$$

где $P_s(r, y, t, T)$ – мощность внутренних источников тепловыделения.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования температурного поля по поверхности (а) и в объеме (б) Mn-Zn феррита.

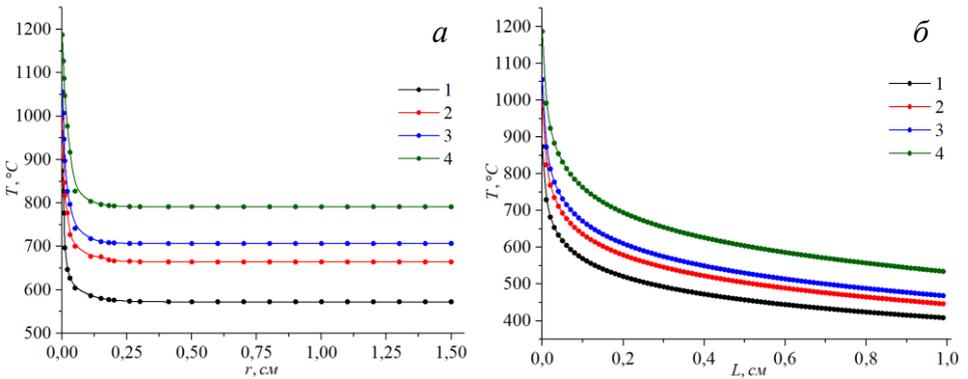


Рисунок 3 – Распределение температуры по поверхности (а) и в объеме (б) Mn-Zn феррита в зависимости от температуры электронно-лучевой обработки:

1 – 900 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °С; 4 – 1200 °С

Градиент температур при электронно-лучевой обработке по поверхности варьируется в диапазоне от 200...265 °С·см⁻¹, а в объеме – от 430...650 °С·см⁻¹. Причем, с увеличением температуры обработки градиент температур увеличивается и по поверхности, и в объеме.

Обработка поверхности Mn-Zn ферритов осуществлялась пучком низкоэнергетических электронов с энергией от 4 до 7 кэВ. В таблице 1

представлены экспериментальные данные по электронно-лучевой обработке (ток эмиссии I_e , ускоряющее напряжение U , удельная мощность P_s и температура поверхности T).

Таблица 1 – Режимы электронно-лучевой обработки

Режим	I_e , мА	U , кВ	P_s , Вт·см ⁻²	T , °С
1	200	4	113	900
2	200	5	140	1000
3	200	6	170	1100
4	200	7	198	1200

Для уменьшения термических напряжений в феррите процесс обработки производился по оптимизированному режиму: малая скорость нагрева, а затем при достижении заданной температуры на поверхности – выдержка в течение 10 минут. Типичные временные зависимости температуры на поверхности (а) и удельной мощности (б) представлены на рисунке 4.

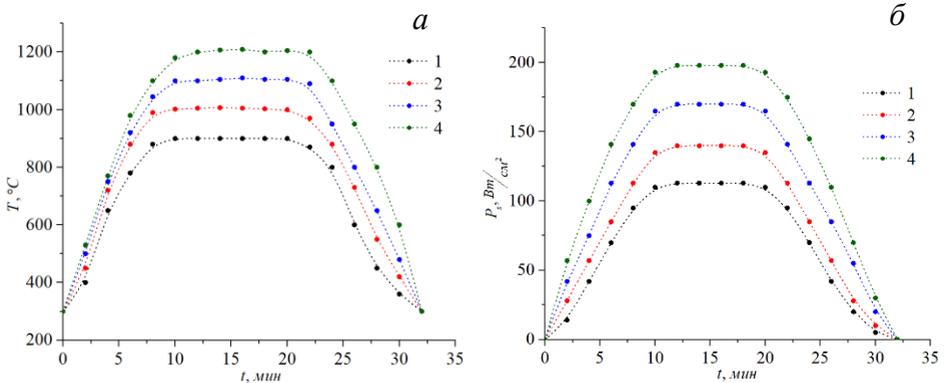


Рисунок 4 – Зависимость температуры на поверхности (а) и удельной мощности (б) от времени при электронно-лучевой обработке:

1 – 900 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °С; 4 – 1200 °С

На рисунке 5 представлены микрофотографии поверхности Mn-Zn ферритов после электронно-лучевого воздействия.

Как следует из микрофотографий, с увеличением температуры обработки уменьшается концентрация поверхностных дефектов и увеличивается размер зерна от 2–8 мкм до 80–120 мкм.

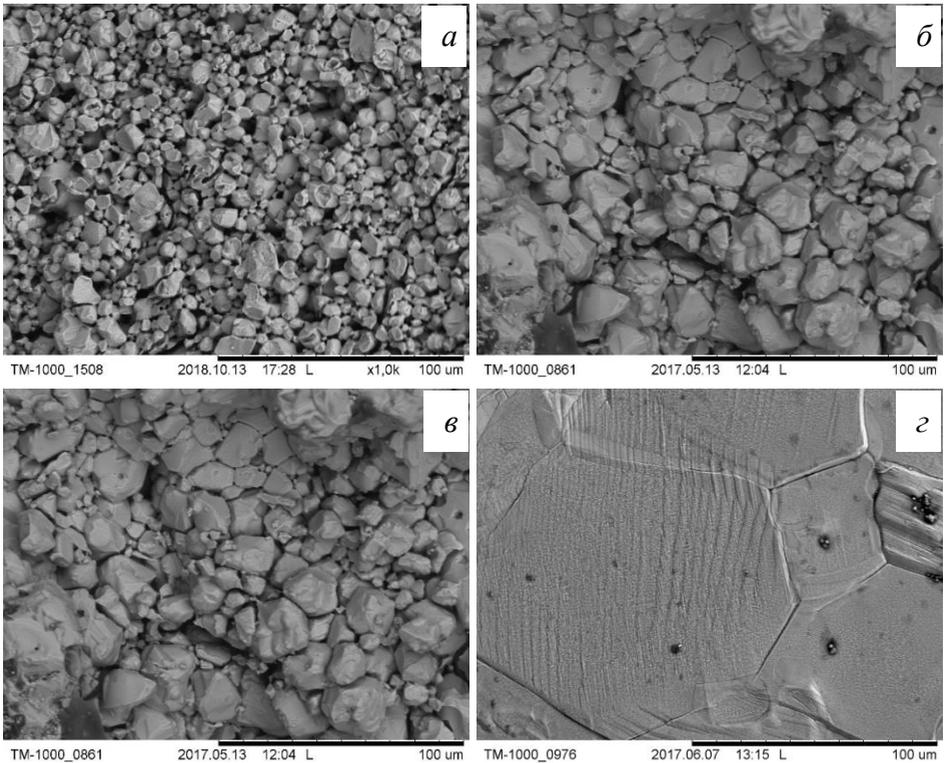


Рисунок 5 – Микроструктура поверхности Mn-Zn феррита до и после электронно-лучевого воздействия: *а* – 900 °С; *б* – 1000 °С; *в* – 1100 °С; *з* – 1200 °С

Увеличение размера зерна происходит за счет вторичной собирательной рекристаллизации в приповерхностном слое толщиной 100–150 мкм, которая характеризуется интенсивным ростом крупных кристаллов за счет более мелких. Увеличение размеров зерен приводит к уменьшению площади межзеренных границ, в результате чего наблюдается сглаживание рельефа обработанной поверхности и существенное уменьшение шероховатости. Так как взаимодействие низкоэнергетических электронов с ферритом носит преимущественно тепловой характер, то следует ожидать изменение химического состава приповерхностного слоя, связанного с процессами диффузии и испарения.

В таблице 2 представлено распределение химических элементов исходного образца Mn-Zn феррита и после электронно-лучевой обработки. В

результате электронно-лучевой обработки образца наблюдается уменьшение концентрации цинка в приповерхностном слое Mn-Zn феррита. Этот процесс обусловлен восстановлением цинка двухвалентным Fe^{2+} в атомы и последующего испарения. Одновременно происходит уменьшение концентрации кислорода как за счет разложения оксида цинка, так и за счет химической реакции $6Fe_2O_3 \xrightarrow{T} 4Fe_3O_4 + O_2 \uparrow$. Изменение химического состава феррита должно приводить и к изменению фазового состава.

Таблица 2 – Распределение химических элементов в Mn-Zn феррите до и после электронно-лучевого воздействия

Элемент	Содержание в Mn-Zn феррите, ат. %				
	$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fe	53,21	56,75	58,13	64,03	65,12
Mn	15,39	16,12	17,27	19,85	19,98
Zn	6,33	4,53	3,14	0,00	0,00
O	25,07	22,60	21,46	16,12	14,90

В таблице 3 представлены данные рентгенофазного анализа исследуемых Mn-Zn ферритов. Процесс рекристаллизации и увеличение размеров зерен приводит к увеличению областей когерентного рассеяния, размер которых увеличивается от 79 до 180 нм. Увеличение постоянной кристаллической решетки связано с тем, что радиус атома Zn больше, чем радиус атома Mn, следовательно, расстояние между атомами при замещении цинка марганцем увеличивается.

Таблица 3 – Данные рентгенофазного анализа Mn-Zn ферритов

Температура обработки, $^{\circ}\text{C}$	Кристаллическая структура	Постоянная решетки, Å	Область когерентного рассеяния, нм
25	кубическая	8,4734	79
900	кубическая	8,4806	148
1000	кубическая	8,4808	162
1100	кубическая	8,4819	171
1200	кубическая	8,4825	180

Исследование ИК-спектров отражения Mn-Zn ферритов показано на рисунке 6.

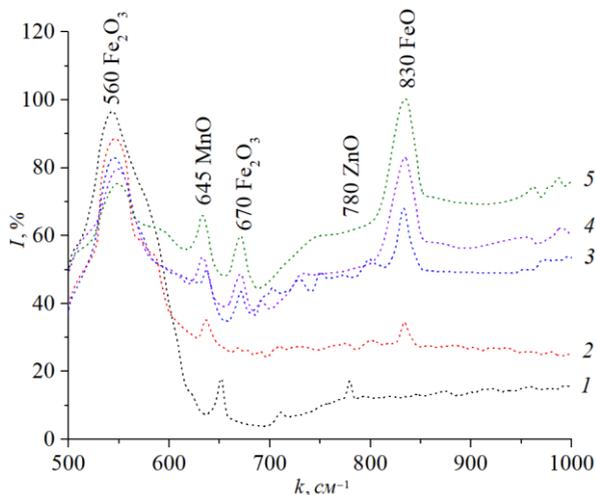


Рисунок 6 – ИК-спектры отражения Mn-Zn ферритов до обработки – 1; после электронно-лучевой обработки при температуре поверхности: 2 – 900 °С; 3 – 1000 °С; 4 – 1100 °С; 5 – 1200 °С

В ИК-спектрах феррита при потере цинка и кислорода может происходить расщепление и трансформация формы линий характеристических колебаний связи Fe-O. На основе ИК-спектров можно выдвинуть предположение о том, что размытие полосы при 560 см^{-1} при электронной обработке при температуре 1200 °С свидетельствует о деферритизации приповерхностного слоя материала и возможном увеличении в нем Fe_2O_3 , а также свидетельствует об уменьшении концентрации цинка (780 см^{-1}) и кислорода.

В четвертой главе представлены результаты исследований электрофизических свойств Mn-Zn ферритов. На рисунке 7 представлена зависимость электропроводности ферритового изделия марки НМ2000 (а) и марок НМ700 и 1000НМ3 (б).

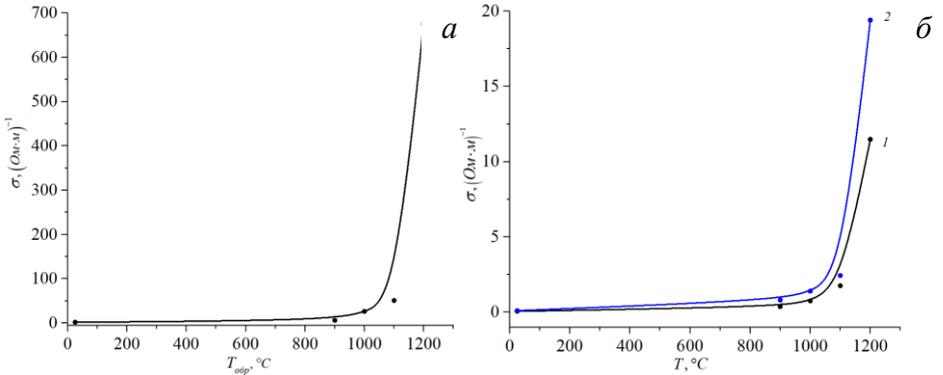


Рисунок 7 - Зависимость электропроводности от температуры обработки для марок NM2000 (а) и б: 1 – NM700; 2 – 1000NM3

Электронно-лучевая обработка поверхности Mn-Zn ферритов приводит к увеличению электропроводности приповерхностных слоев не менее, чем в 200. Это связано с восстановлением трехвалентных катионов железа до двухвалентных и частичной потери цинка.

Исследования температурной зависимости электропроводности в координатах $\ln\sigma=f(1/T)$ (а) и термо-ЭДС (б) показали, что Mn-Zn ферриты обладают полупроводниковыми свойствами *n*-типа проводимости (рисунок 8).

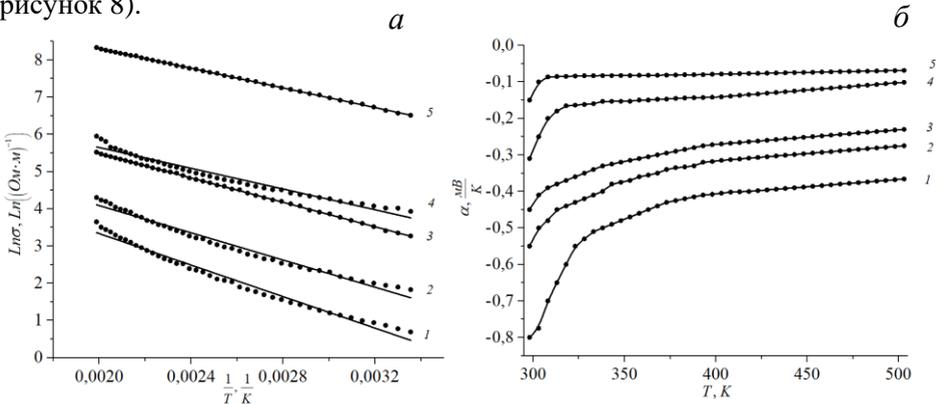


Рисунок 8 – Температурная зависимость электропроводности в координатах $\ln\sigma=f(1/T)$ (а) и термо-ЭДС (б): 1 – исходный; 2 – 900 $^{\circ}\text{C}$; 3 – 1000 $^{\circ}\text{C}$; 4 – 1100 $^{\circ}\text{C}$; 5 – 1200 $^{\circ}\text{C}$

На температурной зависимости электропроводности в координатах $\ln\sigma=f(1/T)$ отсутствуют изломы, что свидетельствует об едином механизме электропроводности в диапазоне от 298 К до 503 К. В таблице 4 приведены измерения магнитной проницаемости Mn-Zn ферритов.

Таблица 4 – Значения магнитной проницаемости в зависимости от температуры обработки Mn-Zn ферритов

Температура обработки, °С	25	900	1000	1100	1200
$f=1 \text{ кГц}$	2112	1970	1924	1051	572
$f=10 \text{ кГц}$	1978	1878	1809	947	503
$f=100 \text{ кГц}$	1820	1812	1725	851	424

Ухудшение магнитных свойств связано с испарением цинка с приповерхностного слоя Mn-Zn феррита.

Пятая глава посвящена созданию градиентных структур на основе ферритов для защиты от электромагнитного излучения. Исследования показали, что коэффициент отражения данных структур уменьшается (рисунок 9).

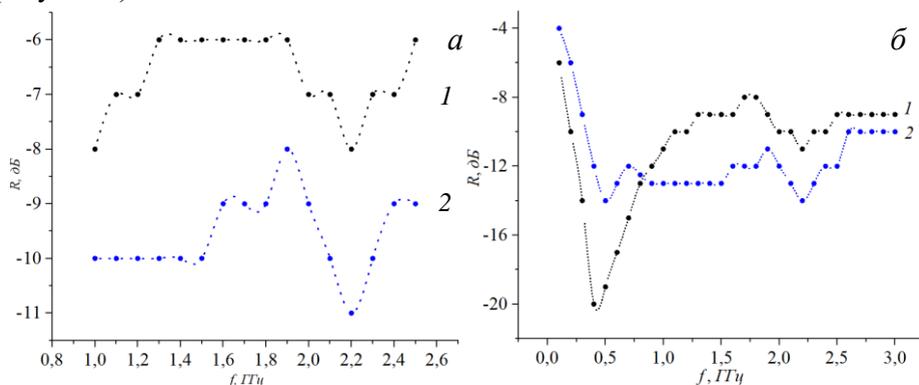


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента отражения от частоты для Mn-Zn феррита (а) и Ni-Zn (б): 1 – исходный образец; 2 - структура

Коэффициент отражения образца со сформированным поверхностным слоем с повышенной электропроводностью на 30–35% ниже, чем у исходного образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что обработка поверхности ферритовых изделий потоком низкоэнергетических электронов приводит к изменению микроструктуры и химического состава. В частности, с увеличением температуры обработки увеличивается средний размер зерна с 5 мкм до 120 мкм, обусловленный процессами вторичной собирательной рекристаллизацией.

2. Показано, что при обработке поверхности ферритовых изделий низкоэнергетическими электронами происходит увеличение электропроводности приповерхностных слоев не менее, чем в 200 раз, это связано с восстановлением Fe^{3+} до Fe^{2+} и частичной потерей цинка.

3. Сравнения методов обработки ферритовых изделий низкоэнергетическими электронами и лазерным ИК излучением с длиной волны 10,6 мкм показали, что оба метода носят преимущественно тепловой характер, а протекающие в изделиях при этом физико-химические процессы идентичны.

4. При электронной обработке в изделиях создается градиентная структура, характеризующая нелинейным переходом от материала с высокой магнитной проницаемостью и высоким удельным сопротивлением к материалу с низкой магнитной проницаемостью и высокой электропроводностью, обладающая пониженным коэффициентом отражения СВЧ излучения.

5. Разработанный метод модификации и полученные результаты найдут применение в технологии ферритовых изделий, для уплотнения и уменьшения шероховатости их поверхности.

6. Созданные градиентные структуры на ферритовых изделиях позволяют их использовать в качестве элементов высокопоглощающих ВЧ и СВЧ энергию, для безэховых камер и защитных устройств.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, входящие в перечень ВАК или индексируемые в базе данных WoS

1. Каранский, В. В. Изменение электрофизических параметров Mn–Zn ферритов при облучении электронным пучком в форвакуумной области давлений / В. В. Каранский, А. С. Климов // Прикладная физика. – 2017. – №6. – С. 72 – 77.

2. Каранский, В. В. Электромагнитные свойства Mn-Zn ферритов, модифицированных низкоэнергетическим электронным пучком / В. В. Каранский, С. В. Смирнов, А. С. Климов, Е. В. Саврук // Прикладная физика. – 2020. – № 2. – С. 71–77.

3. Каранский, В. В. Градиентные структуры Ni-Zn ферритов для устройств защиты от электромагнитного излучения // В. В. Каранский, С. В. Смирнов, А. С. Климов, Е. В. Саврук // Перспективные материалы. – 2021. – № 5. – С. 39–46.

4. Karansky, V. V. Structural transformations in Mn–Zn ferrite under low-energy electron beam treatment / V. V. Karansky, A. S. Klimov, S. V. Smirnov // Vacuum. – 2020. – V. 173. – PP. 109115–109116.

Доклады на Международных и Всероссийских конференциях

5. Каранский, В. В. Влияние электронной обработки на электропроводность приповерхностных слоев марганец-цинковых ферритов / В. В. Каранский, Е. О. Ипатова // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 105 – 107.

6. Каранский, В. В. Исследование электрических параметров марганец-цинковых ферритов / В. В. Каранский, Е. В. Саврук // Научная сессия ТУСУР–2017: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 ч. – Томск: В-Спектр, 2017 – Ч. 2. – С. 126 – 128.

7. Каранский, В. В. Изменение структуры приповерхностного слоя Mn-Zn ферритов при облучении электронным пучком в форвакуумной области давлений / В. В. Каранский, А. С. Климов, В. К. Олицкий // Перспективы развития фундаментальных наук: Том 7. IT-технологии и электроника

Сборник научных трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 24–27 апреля 2018 г. – 2018. – С. 102 – 104.

8. Каранский, В. В. Влияние электронной и лазерной обработки на магнитную проницаемость Mn-Zn ферритов / В. В. Каранский, В. К. Олицкий // Современные проблемы физики и технологий. VII-я Международная молодежная научная школа-конференция, 16-21 апреля 2018 г.: тезисы докладов. Часть 1. М.: НИЯУ МИФИ. – 2018. – С. 111 – 112.

9. Каранский, В. В. Влияние лазерной обработки на электропроводность марганец-цинковых ферритов / В. В. Каранский, В. К. Олицкий // Сборник тезисов: материалы двадцать четвертой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-24, Томск): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т.Т.1 – Екатеринбург – Томск: издательство АСФ России. – 2018. – С. 79 – 80.

10. Каранский, В. В. Получение приповерхностных слоев Mn-Zn ферритов с повышенной электропроводностью при электронном и лазерном воздействии / В. В. Каранский, В. К. Олицкий // Материалы 56-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2018 Квантовая физика (Новосибирск, 22-27 апреля 2018 г.). – С. 12.

11. Каранский, В. В. Термо-ЭДС Mn-Zn ферритов при обработке электронным пучком / В. В. Каранский, Е. В. Саврук, Ю. С. Приходько // Материалы докладов Всероссийской научно-практической конференции «Прикладные исследования в области физике», 4.12.2019 г. – С. 193 – 197.

12. Миллер, Ю. А. Влияние электронно-лучевой обработки на структуру Mn-Zn ферритов марки НМ1000 / Ю. А. Миллер, В. В. Каранский // Сборник научных трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ – 2020). – 2020. – Ч. 3. – С. 236–239

13. Миллер, Ю. А. Структурно-фазовые превращения в Mn-Zn ферритах под действием электронно-лучевого и лазерного воздействия / Ю. А. Миллер, В. В. Каранский // Сборник научных трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ – 2020). – 2020. – Ч. 3. – С. 231–235.

14. Каранский, В. В. Влияние электронной обработки на электрофизические свойства марганец-цинковых ферритов / В. В. Каранский, Е. В. Саврук, С. В. Смирнов // Материалы и технологии новых поколений в

современном материаловедении: сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 156-160.

15. Каранский, В. В. Планаризация поверхности оптических модуляторов из Mn-Zn ферритов с помощью электронно-лучевой обработки / В. В. Каранский, С. В. Смирнов // VII международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, 24–26 января 2018 г.). М.: НИЯУ МИФИ – 2018. – С. 320 – 321.

свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и БД

16. Свидетельство 2018610403. Моделирование распределения температуры и плотности по глубине керамического компакта при его спекании электронным пучком в форвакууме : программа для ЭВМ / А. С. Климов, В. В. Каранский (RU); правообладатель ФГБОУ ВО ТУСУР № 2017661551 ; заявл. 13.11.2017 ; опубл. 10.01.2018. 4 кб.

17. Свидетельство 2018616987. Программа расчета температурного поля в керамическом компакте при его электронно-лучевой обработке в форвакууме : программа ЭВМ / А. С. Климов, В. В. Каранский, А. А. Зенин (RU); правообладатель ФГБОУ ВО ТУСУР № 2018614003 ; заявл. 20.04.2018 ; опубл. 09.06.2018. 7 кб.

18. Свидетельство 2019616939. Расчет температуры керамического образца от глубины проплавления : программа для ЭВМ / А. С. Климов, А. А. Зенин, И. Ю. Бакеев, В. В. Каранский (RU); правообладатель ФГБОУ ВО ТУСУР № 2019616014 ; заявл. 24.05.2019 ; опубл. 30.05.2019. 7 кб.

19. Свидетельство 2021660865. Моделирование одномерного распределения температуры по глубине ферритового цилиндра при его облучении электронным пучком в форвакууме : программа для ЭВМ / А. А. Зенин, А. С. Климов, В. В. Каранский, А. В. Долгова (RU); правообладатель ФГБОУ ВО ТУСУР № 2021660124 ; заявл. 30.06.2021 ; опубл. 02.07.2021. 29 кб.

20. Свидетельство 2021661448. Моделирование двумерного распределения температуры по глубине ферритового цилиндра при его облучении электронным пучком в форвакууме : программа для ЭВМ / А. А. Зенин, А. С. Климов, В. В. Каранский, А. В. Долгова (RU); правообладатель ФГБОУ ВО ТУСУР № 2021660105 ; заявл. 30.06.2021 ; опубл. 12.07.2021. 28 кб.