



**КАРАНСКИЙ ВИТАЛИЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ**

**МОДИФИКАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ Mn-Zn ФЕРРИТОВ В  
СЛАБОУКИСЛИТЕЛЬНОЙ 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/см<sup>2</sup>, 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/см<sup>2</sup> 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.



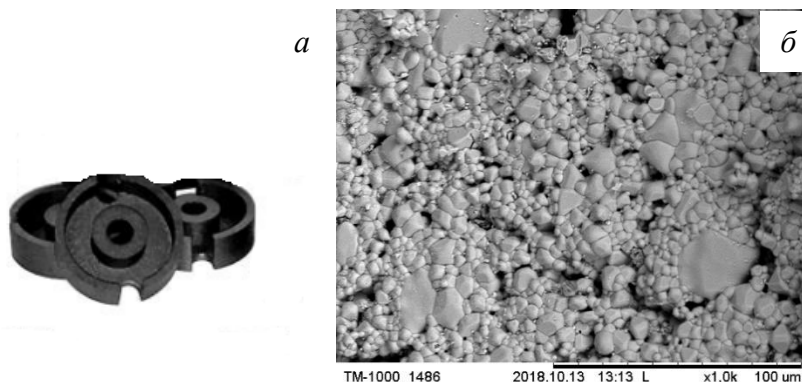
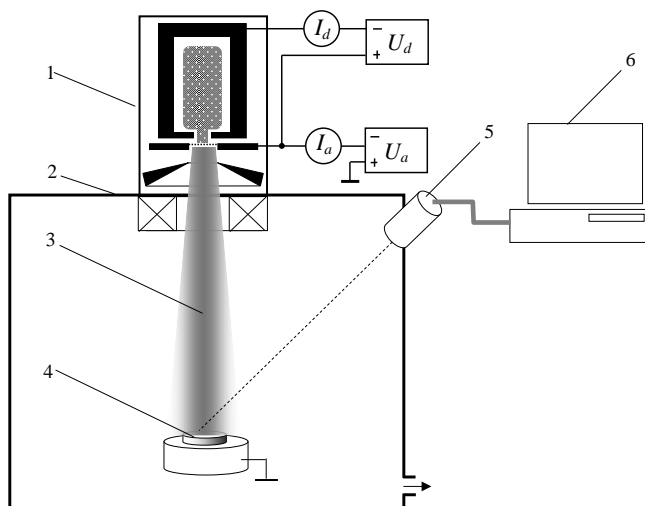


Рисунок 1 – Внешний вид исследуемых образцов (а) и микроструктура поверхности Mn-Zn феррита (б)

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/см<sup>2</sup>. 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/см<sup>2</sup>, 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 ( $r, \varphi$ ), 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.

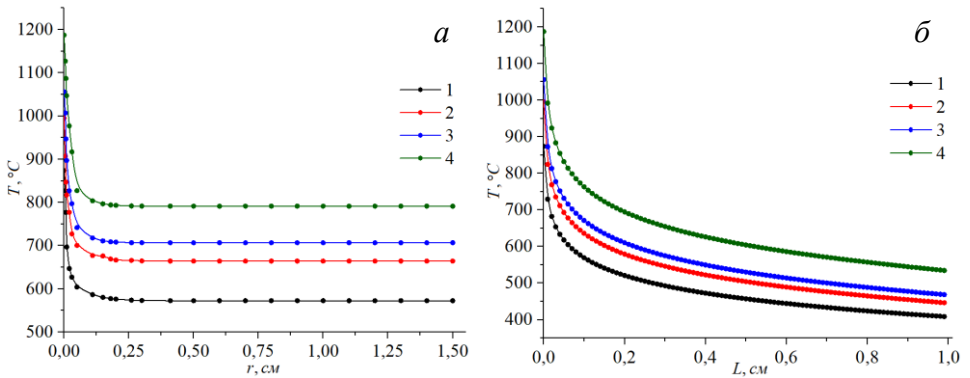


Рисунок 3 – Распределение температуры по поверхности (а) и в объеме (б) Mn-Zn феррита в зависимости от температуры электронно-лучевой обработки:

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<sup>-1</sup>, а в объеме – от 430...650 °С·см<sup>-1</sup>. 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 <sup>-2</sup>	$T$ , °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.

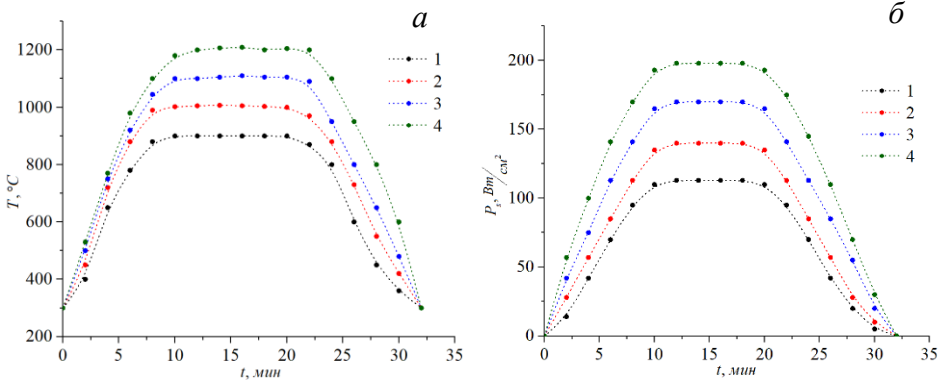


Рисунок 4 – Зависимость температуры на поверхности (а) и удельной мощности (б) от времени при электронно-лучевой обработке:

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.

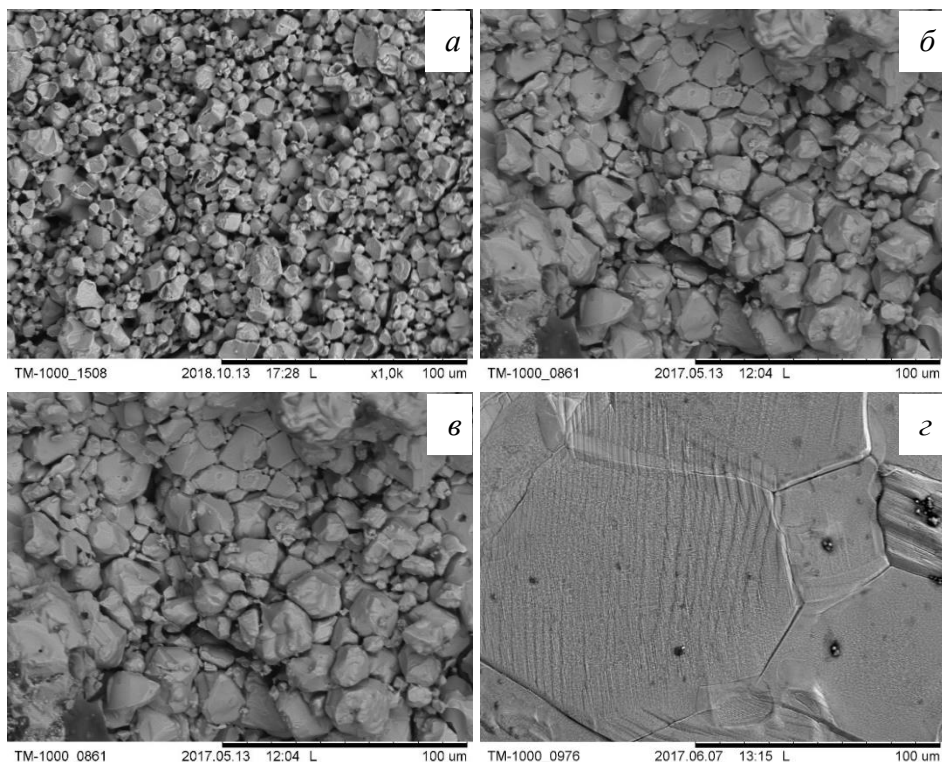


Рисунок 5 – Микроструктура поверхности Mn-Zn феррита до и после электронно-лучевого воздействия: *а* – 900 °С; *б* – 1000 °С; *в* – 1100 °С; *г* – 1200 °С

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. %				
	$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
<b>Fe</b>	53,21	56,75	58,13	64,03	65,12
<b>Mn</b>	15,39	16,12	17,27	19,85	19,98
<b>Zn</b>	6,33	4,53	3,14	0,00	0,00
<b>O</b>	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, $\text{\AA}$	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.

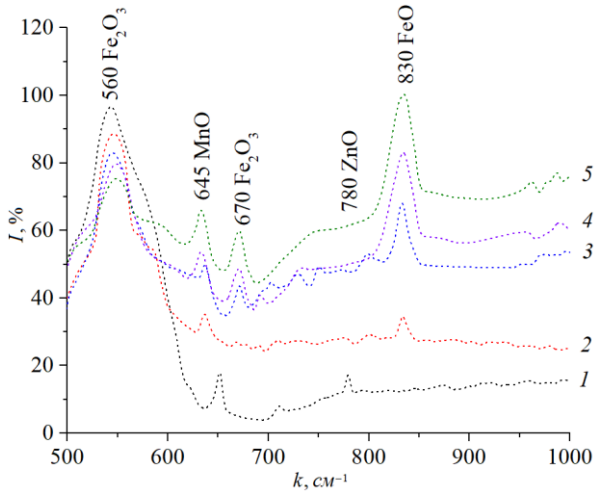


Рисунок 6 – ИК-спектры отражения Mn-Zn ферритов до обработки – 1; после электронно-лучевой обработки при температуре поверхности: 2 – 900 °C; 3 – 1000 °C; 4 – 1100 °C; 5 – 1200 °C

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  $560\text{ см}^{-1}$  при электронной обработке при температуре  $1200\text{ °C}$  свидетельствует о деферритизации приповерхностного слоя материала и возможном увеличении в нем  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , а также свидетельствует об уменьшении концентрации цинка ( $780\text{ см}^{-1}$ ) 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).

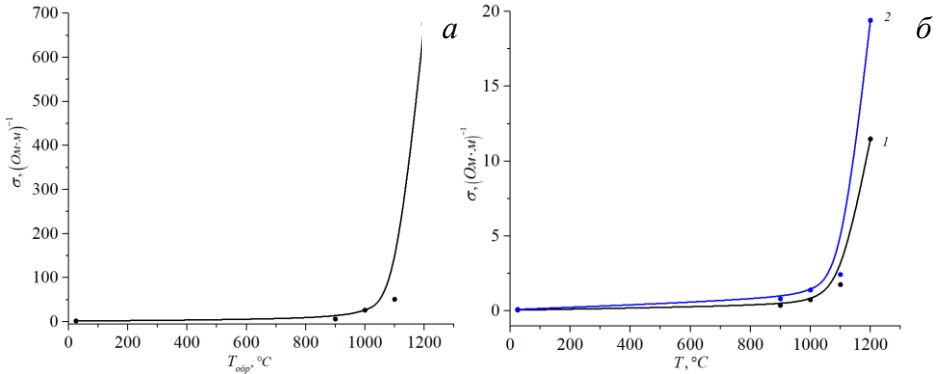


Рисунок 7 - Зависимость электропроводности от температуры обработки для марок NM2000 (а) и б: 1 – NM700; 2 – 1000NM3

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).

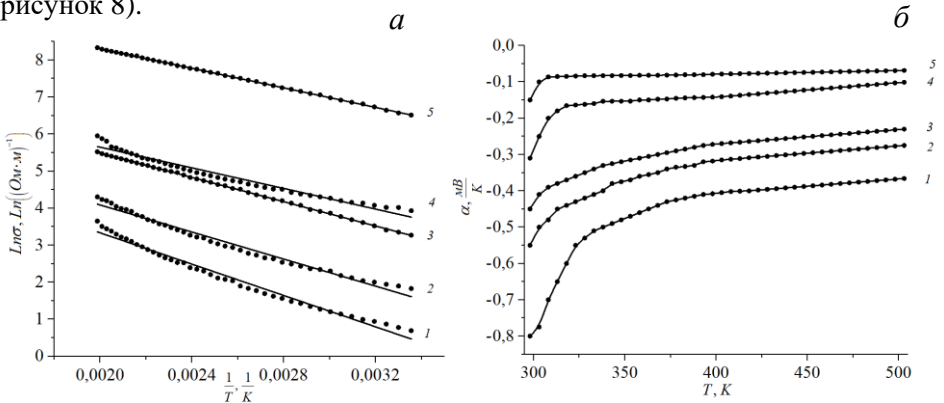


Рисунок 8 – Температурная зависимость электропроводности в координатах  $\ln\sigma=f(1/T)$  (а) и термо-ЭДС (б): 1 – исходный; 2 – 900  $^{\circ}\text{C}$ ; 3 – 1000  $^{\circ}\text{C}$ ; 4 – 1100  $^{\circ}\text{C}$ ; 5 – 1200  $^{\circ}\text{C}$



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).

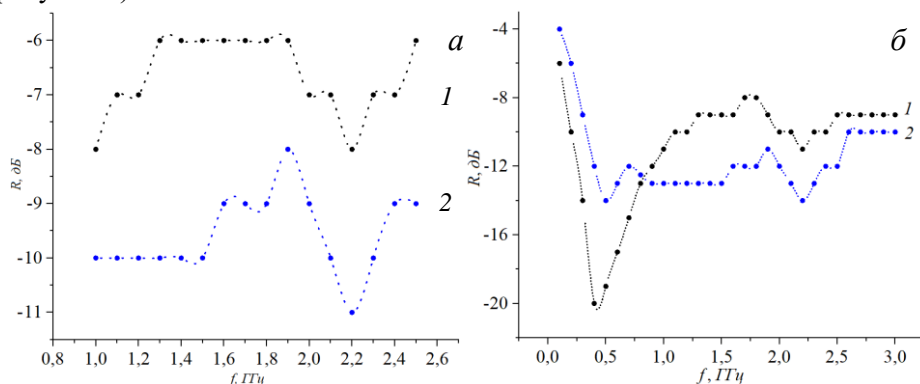


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента отражения от частоты для Mn-Zn феррита (а) и Ni-Zn (б): 1 – исходный образец; 2 - структура

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  $\text{Fe}^{3+}$  до  $\text{Fe}^{2+}$  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.