

УДК 621.315.612  
EDN: JYONAZ

PACS: 52.59.-f, 77.84.-s



## Структура и состав поверхности Mn-Zn ферритов после лазерной и электронно-лучевой её модификации

В. В. Каранский, С. В. Смирнов

*Представлены сравнительные результаты изменения структуры и состава Mn-Zn ферритов после модификации их поверхности сконцентрированным излучением лазера на CO<sub>2</sub> в воздушной атмосфере и потоком низкоэнергетических электронов с энергией 10 кэВ при давлении 5–20 Па. В обоих вариантах воздействия модификация заключалась в оплавлении поверхности феррита на глубину 50–100 мкм с последующей вторичной рекристаллизацией расплавленного слоя. Установлено, что при электронно-лучевой обработке потери цинка и степень деферритизации поверхностного слоя выше, чем при лазерной обработке.*

*Ключевые слова:* лазерная и электронно-лучевая модификация, MnZn-феррит, рентгенофазовый анализ.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-2-67-71

### Введение

Лазерная и электронная размерная обработка нашла широкое применение в производстве ферритовых изделий [1, 2], но в последнее время большое внимание уделяется исследованию возможности применения этих видов обработки и для улучшения качества материала, и поверхности изделий [3]. Лазерная и электронная модификация поверхности ферритовых изделий позволяет не только уменьшить её шероховатость, но и придать изделию новые полезные свойства [4, 5].

Физика взаимодействия лазерного излучения и низкоэнергетических электронов с

ферритом заключается в их локальном воздействии на поверхность, с последующим быстрым разогревом приповерхностного слоя до высоких температур. После прекращения воздействия слой охлаждается за счет явления теплопроводности и теплоотдачи с поверхности твердого тела. В процессе нагрева и охлаждения феррита в нем происходят различные фазовые превращения, такие как плавление, испарение, деферритизация, вторичная перекристаллизация и др. Варьируя значение плотности мощности лазерного излучения и электронного пучка и длительности их воздействия, можно осуществлять нагрев до температур плавления тонкого слоя заданной толщины, при этом объемные свойства ферритового материала практически не изменяются [6–8].

Целью настоящей работы является исследование структуры и поверхности Mn-Zn ферритов после лазерного и электронного воздействия.

### Эксперимент

В качестве объекта исследования использовались промышленные образцы изде-

**Каранский Виталий Владиславович**, доцент, к.т.н.

E-mail: karanskii\_vitali@mail.ru

**Смирнов Серафим Всеволодович**, профессор, д.т.н.

E-mail: serafim.smirnov@mail.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 26.02.2024

После доработки 11.03.2024

Принята к публикации 14.03.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

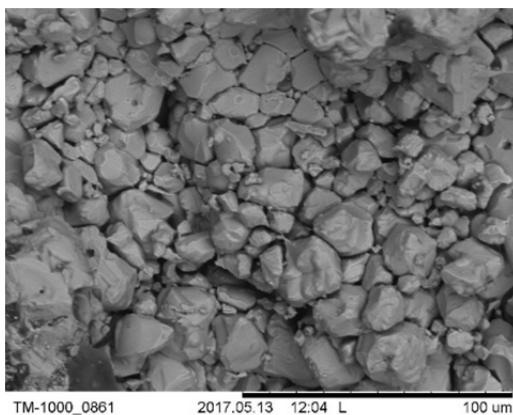
лий из феррита марки M2000HM1. Лазерная обработка исследуемых образцов осуществлялась с помощью установки CERTON 3020 ULTRA с лазером на CO<sub>2</sub> с длиной волны 10,6 мкм и мощностью до 25 Вт при диаметре фокального пятна 50 мкм и скоростью сканирования до 100 мм/с.

Для электронно-лучевой обработки использовался плазменный электронный источник кафедры физики ТУСУР [9], позволяющий формировать электронный пучок диаметром порядка 1 мм и с плотностью мощности до 10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>. В качестве источника электронов использовалась плазма тлеющего разряда в системе с полым катодом. Специальная конструкция ускоряющего промежутка электронного источника позволяла получить непрерывный электронный пучок с током до 200 мА при давлениях в источнике и вакуумной камере 5–20 Па. Как при лазерном, так и электронном воздействии обработка сводилась к оплавлению тонкого слоя ферритового изделия на толщину 50–100 мкм. При электронно-лучевом воздействии градиент

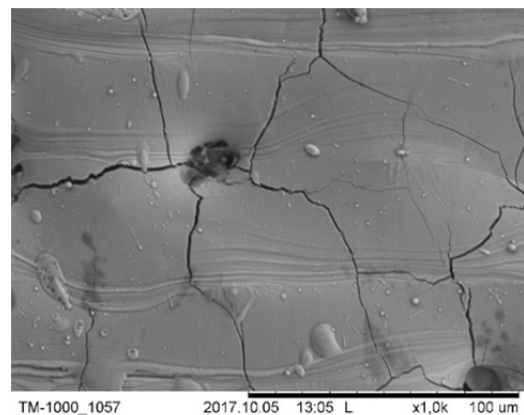
температур вглубь образца изменяется в диапазоне от 430 до 650 °С·см<sup>-1</sup>, а по поверхности от 200 до 265 °С·см<sup>-1</sup>.

На снимках со сканирующего электронного микроскопа HITACHI TM-1000 представлены микроструктура поверхности феррита: рисунок 1а – структура поверхности феррита до обработки; рисунок 1б – структура поверхности после лазерной обработки; рисунок 1в – структура поверхности после электронно-лучевой обработки. Как следует из снимков, при лазерной и электронной обработке происходит оплавление и выравнивание поверхности феррита, но ввиду быстрого охлаждения в том и другом случае наблюдается растрескивание оплавленного слоя при затвердевании.

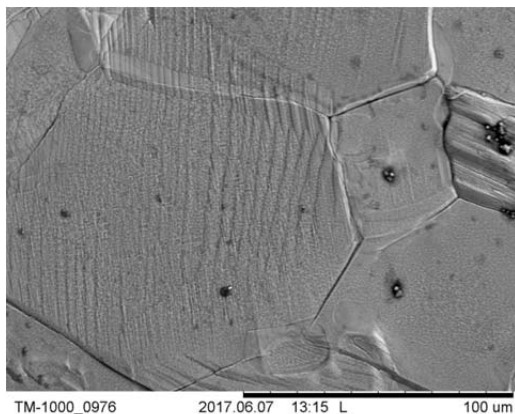
Элементный состав приповерхностного слоя феррита до и после модификации проводился с помощью приставки энерго-дисперсионного анализа Quantax 50 фирмы Bruker. В таблице 1 представлено распределение химических элементов Mn-Zn феррита, модифицированного лазерным излучением, а в таблице 2 после электронно-лучевого воздействия.



а)



б)



в)

**Рис. 1. Микроструктуры поверхности Mn-Zn ферритов: а) – исходный образец; б) – после лазерной обработки; в) – после электронно-лучевой обработки**

Таблица 1

*Распределение химических элементов в Mn-Zn феррите до и после лазерного воздействия*

Элемент	Содержание в Mn-Zn феррите, ат. %		
	Исходный образец	При толщине слоя 50 мкм	При толщине слоя 100 мкм
Fe	53,21	55,18	58,18
Mn	15,39	17,12	17,99
Zn	6,33	4,86	2,18
O	25,07	22,84	21,65

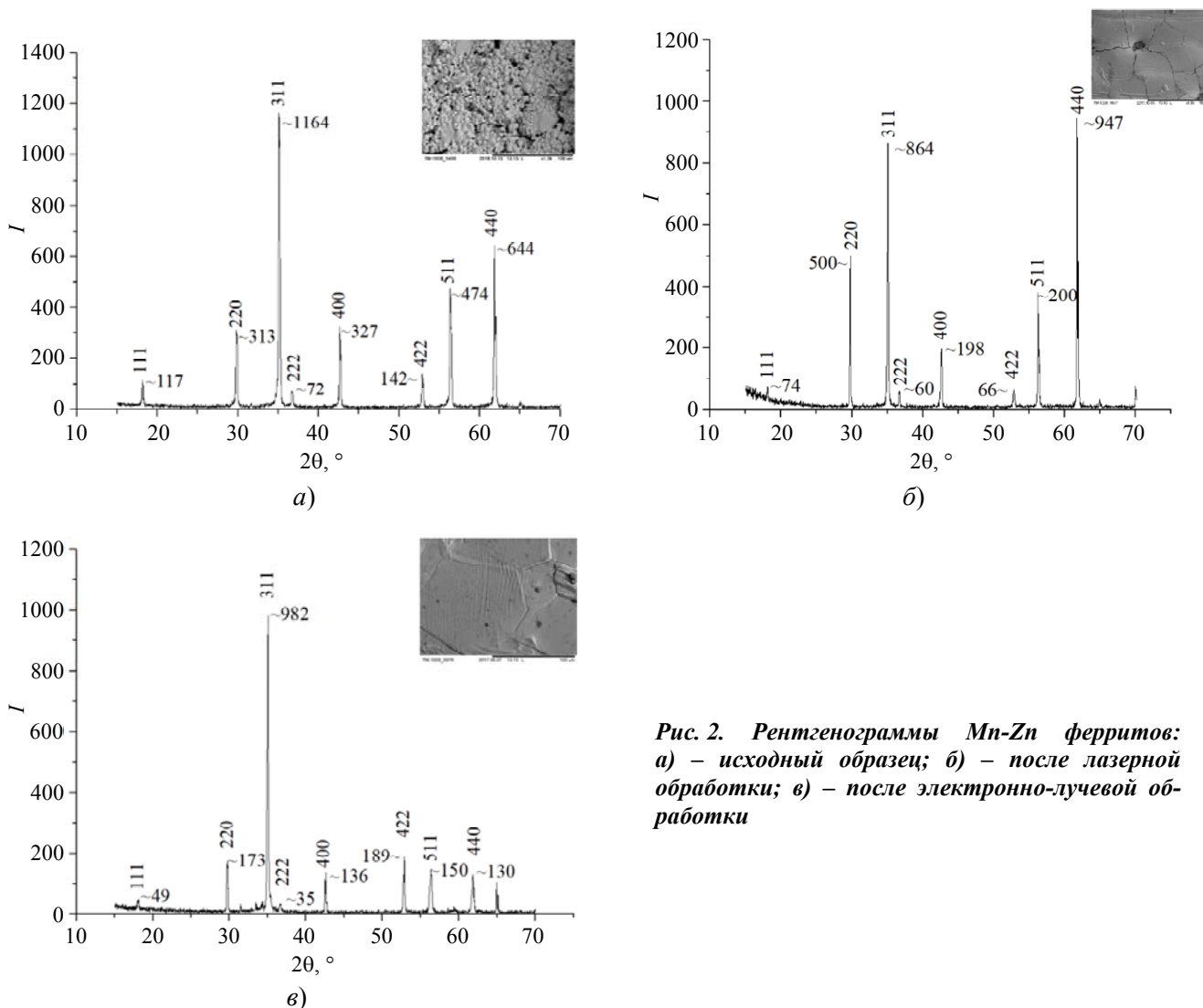
Таблица 2

*Распределение химических элементов в Mn-Zn феррите до и после электронно-лучевого воздействия*

Элемент	Содержание в Mn-Zn феррите, ат. %		
	Исходный образец	При толщине слоя 50 мкм	При толщине слоя 100 мкм
Fe	53,21	64,03	65,12
Mn	15,39	19,85	19,98
Zn	6,33	0,00	0,00
O	25,07	16,12	14,90

На рисунке 2 приведены рентгенограммы Mn-Zn ферритов до и после модификации лазерным излучением и электронным пучком.

Рентгенограммы снимались с помощью дифрактометра Дифрей 401.



**Рис. 2. Рентгенограммы Mn-Zn ферритов: а) – исходный образец; б) – после лазерной обработки; в) – после электронно-лучевой обработки**

Таблица 3

## Данные рентгенофазного анализа Mn-Zn ферритов до и после лазерной и электронной обработки

Образец	Кристаллическая структура	Постоянная решетки, Å	Область когерентного рассеяния, нм
Исходный	кубическая	8,4734	79
После лазерной обработки	кубическая	8,4902	113
После электронной обработки	кубическая	8,4819	171

В таблице 3 представлены данные рентгенофазного анализа исследуемых Mn-Zn ферритов, модифицированных лазерным излучением.

## Обсуждение результатов

Таким образом, лазерная и электронная обработка поверхности ферритовых изделий позволяет значительно уменьшить шероховатость их поверхности. Но, из приведенных результатов (таблиц 1 и 2) следует, что лазерная и электронная обработка феррита приводит к потере цинка и кислорода. Причем потери выше при электронной обработке, чем при лазерной, что связано с более длительным процессом плавления и затвердевания в условиях среднего вакуума. При лазерной обработке, осуществляемой в воздушной среде, процессы восстановления железа и испарения цинка существенно замедляются. Из сравнительного анализа рентгенограмм (рис. 2а и 2б) следует, что при модификации поверхности Mn-Zn ферритов лазерным излучением его фазовый состав сохраняется, но при вторичной рекристаллизации расплава наблюдается текстурирование в направлении.

Области когерентного рассеяния с после лазерной обработки увеличивается с 79 до 113, в то время как при электронной обработке их средний размер достигает 171 нм, что обусловлено процессами вторичной собирательной рекристаллизацией. Увеличение постоянной кристаллической решетки от мощности лазерной обработки связано, как с уменьшением концентрации цинка и кислорода в приповерхностном слое с последующим замещением атомами Mn, так и с наличием остаточных термоупругих напряжений. Следует отметить, что большие потери кислорода в приповерхностном слое, могут быть связаны не только с химическими процессами, так как

существуют и другие нетепловые механизмы образования свободного кислорода. Измерения, проведенные на кольцевых образцах Mn-Zn ферритов марки M2000HM1 показали, что при электронно-лучевой обработке наблюдается снижение суммарной магнитной проницаемости на 30 %, в то время как при лазерной обработке на 10 %. Электропроводность приповерхностного слоя как при электронном, так и при лазерном воздействии увеличивается не менее чем в 200 раз.

## Заключение

1. Взаимодействие лазерного излучения длиной волны 10,6 мкм, а также низкоэнергетических электронов энергией до 10 кэВ с ферритами носит преимущественно тепловой характер.
2. Изменение элементного и фазового состава связано с частичной потерей цинка и кислорода.
3. Происходящие структурные изменения в ферритах связаны, в первую очередь, с вторичной собирательной перекристаллизацией.
4. Лазерная обработка оказывает более щадящее влияние на магнитные свойства изделия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Моргунов Р. Б., Королев Д. В., Валеев Р. А., Писковский В. П. / Труды ВИАМ. 2022. № 3 (100). С. 75–90.
2. Bauerle D. / 4 th. ed. Springer-Verlag. – Berlin Heidelberg, 2011. P. 12.
3. Karansky V. V., Klimov A. S., Smirnov S. V. / Vacuum. 2020. Vol. 173. P. 109115–109116.
4. Surzhikov A. P., Malyshev A. V., Lysenko E. N., Vlasov V. A., Sokolovskiy A. N. / Ceramics International. 2017. Vol. 43. Iss. 13. P. 9777–9782.
5. Костишин В. Г., Костюк В. Х., Шунко М. Н., Степович М. А. / Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 5. С. 681–684.

6. Каранский В. В., Смирнов С. В., Климов А. С., Саврук Е. В. / Прикладная физика. 2020. № 2. С. 71–77.

7. Шипко М. Н., Костишин В. Г., Степович М. А., Коровушкин В. В. / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 1. С. 89–93.

8. Каранский В. В., Смирнов С. В., Климов А. С., Саврук Е. В. / Перспективные материалы. 2021. № 5. С. 39–46.

9. Бурдовичин В. А., Бакеев И. Ю., Зенин А. А., Золотухин Д. Б., Казаков А. В., Климов А. С., Медовник А. В., Окс Е. М., Тюньков А. В. / Доклады ТУСУРа. 2016. Т. 19. № 2. С. 5–10.

PACS: 52.59.-f, 77.84.-s

## Structure and surface composition of Mn-Zn ferrites after laser and electron beam modification

*V. V. Karansky and S. V. Smirnov*

Federal State-Funded Institution of Higher Education –  
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 prospect Lenina, Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: karanskii\_vitali@mail.ru, serafim.smirnov@mail.ru

*Received 26.02.2024; revised 11.03.2024; accepted 14.03.2024*

***Comparative results of changes in the structure and composition of Mn-Zn ferrites after modification of their surface by concentrated CO<sub>2</sub> laser radiation in an air atmosphere and a flow of low-energy electrons with an energy of 10 keV at a pressure of 5–20 Pa are presented. In both cases, the modification consisted in melting the ferrite surface to a depth of 50–100 microns, followed by secondary recrystallization of the molten layer. It was found that during electron beam treatment, zinc losses and the degree of deferritization of the surface layer are higher than during laser treatment.***

*Keywords:* laser and electron beam modification, Mn-Zn ferrite, X-ray phase analysis.

### REFERENCES

1. Morgunov R. B., Korolev D. V., Valeev R. A. and Piskorskiy V. P., Trudy VIAM, № 3 (100), 75–90 (2022) [in Russian].
2. Bauerle D. 4 th. ed. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2011. P. 12.
3. Karansky V. V. Klimov A. S. and Smirnov S. V., Vacuum **173**, 109115–109116 (2020).
4. Surzhikov A. P., Malyshev A. V., Lysenko E. N., Vlasov V. A. and Sokolovskiy A. N., Ceramics International **43** (13), 9777–9782 (2017).
5. Kostishin V. G., Kostyuk V. H., Shipko M. N. and Stepovich M. A., Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya **76** (5), 681–684 (2012) [in Russian].
6. Karanskij V. V., Smirnov S. V., Klimov A. S. and Savruk E. V., Applied Physics, № 2, 71–77 (2020) [in Russian].
7. Shipko M. N., Kostishin V. G., Stepovich M. A. and Korovushkin V. V., Poverhnost. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya, № 1, 89–93 (2017) [in Russian].
8. Karanskij V. V., Smirnov S. V., Klimov A. S. and Savruk E. V., Perspektivnye materialy, № 5, 39–46 (2021) [in Russian].
9. Burdovicin V. A., Bakeev I. Yu., Zenin A. A., Zolotuhin D. B., Kazakov A. V., Klimov A. S., Medovnik A. V., Oks E. M. and Tyunkov A. V., Doklady TUSURa **19** (2), 5–10 (2016) [in Russian].