

PHYSICAL SCIENCES
ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 538.9
МРНТИ 29.19.41

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-97-108>

^{1*}ШИНЫКУЛОВА Н.Н., ¹ШАМБУЛОВ Н.Б., ¹ТАТЕНОВ А.М., ²ЕРТУРК С.,
³ШИНЫКУЛОВА Г.Н., ³МӘЖИТ Ж., ⁴АШИКБАЕВА А.Б.

¹Казахский национальный женский педагогический университет,
050000, г. Алматы, Казахстан

²Университет Нийде Омер Халисдемир, Турция

³Алматинский технологический университет,
050061, г. Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050000, г. Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ
НА МОНОКРИСТАЛЛЫ ФЕРРИТА-ШПИНЕЛЯ

Аннотация

Механизмы перераспределения ионов металла и образования дефектов в феррит-шпинели при облучении сложны и зависят от целого ряда факторов. Поэтому компьютерное моделирование и экспериментальные исследования важны для понимания поведения физических свойств этих материалов под воздействием радиации. Разработка новых материалов, способных противостоять радиационному повреждению, имеет большое значение для целого ряда приложений, включая физику твердого тела, ядерную физику, космические исследования и применение в медицине. В данной работе проведено исследование влияния гамма-облучения на монокристаллы феррита $\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Ранее было проведено исследование с использованием мессбауэровской спектроскопии, которое позволило определить изменение содержания ионов металлов в подрешетках ферритов-шпинелей. Эти изменения влияют на магнитную кристаллографическую анизотропию материала [1]. В научной литературе можно найти данные, которые указывают на то, что гамма-облучение приводит к изменению магнитной восприимчивости материалов и к изменению кривой намагничивания [2, 3]. Эти изменения физических свойств могут быть объяснены перераспределением ионов металлов в октаэдрических и тетраэдрических подрешетках, так как ионы металлов в подрешетках имеют расщепление атомных уровней.

Ключевые слова: феррит-шпинель, моделирование, облучение, кристаллическая решетка.

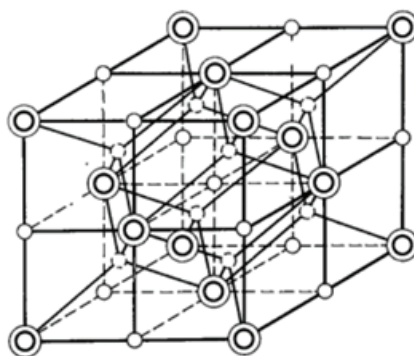
Введение

Перераспределение ионов металла в феррит-шпинельных подрешетках – это сложный процесс, который включает несколько механизмов, таких как образование дефектов, миграция и кластеризация. Образование дефектов в кристаллической решетке, таких как вакансии, интерстиции и дислокации, может обеспечить места для миграции ионов металла. Эти дефекты могут действовать как ловушки для ионов металла, что приводит к образованию радиационно-индуцированных фаз.

Миграция ионов металла происходит, когда смещенные ионы металла перемещаются через кристаллическую решетку, чтобы занять другие участки. Эта миграция зависит от концентрации дефектов и энергии ионизирующего излучения. Ионы металла также могут объединяться в кластеры, образуя наноразмерные осадки, которые могут влиять на свойства материала. Феррит-шпинель – это класс материалов, состоящих из двух взаимопроникающих кристаллических решеток: решетки шпинели и решетки феррита. Решетка шпинели состоит из катионов, расположенных в кубической плотной структуре, а решетка феррита состоит из комбинации катионов железа и анионов кислорода. При облучении ионы металла в феррите-шпинели могут перераспределяться между двумя подрешетками [4–6].

Во время облучения высокоэнергетические частицы, такие как нейтроны, могут проникать в материал и смещать атомы с их мест в решетке. Эти вытесненные атомы могут мигрировать через решетку и в итоге приходят в состояние покоя на новом месте решетки. Этот процесс известен как индуцированная облучением диффузия [7].

В феррите-шпинели ионы металла, такие как железо, могут быть вытеснены из своих первоначальных мест решетки в подрешетку феррита и мигрировать в подрешетку шпинели. Аналогично ионы металла в подрешетке шпинели могут мигрировать в подрешетку феррита. Перераспределение ионов металла может влиять на свойства материала, такие как электропроводность, магнитные свойства и механическая прочность.



○ - Октаэдрические междоузлия; ○ - Тетраэдрические междоузлия;
⊙ - Анионы кислорода

Рисунок 1 – Элементарная ячейка ГЦК-решетки шпинели с показанным окружением тетраэдрических и октаэдрических междоузлий

Степень перераспределения ионов металла в феррите-шпинели при облучении зависит от нескольких факторов, включая энергию и флюенс облучающих частиц, состав материала и температуру, при которой происходит облучение. Понимание механизмов перераспределения ионов металла в феррите-шпинели важно для разработки материалов, способных противостоять радиационному повреждению в ядерных реакторах и других высокорadiационных средах.

Перераспределение ионов металла в феррите-шпинели может иметь важные последствия для свойств материала. Например, миграция ионов железа из подрешетки феррита в подрешетку шпинели может привести к образованию магнитных наночастиц, которые могут найти применение в магнитных накопителях данных и биомедицинской визуализации. Миграция ионов других металлов, таких как хром или никель, также может повлиять на коррозионную стойкость материала [8].

Помимо перераспределения ионов металлов, облучение может также вызывать дефекты в кристаллической решетке, такие как вакансии, которые могут влиять на механические свойства материала. Например, наличие дефектов может увеличить твердость материала и уменьшить его пластичность. Образование дефектов также является ключевым фактором в эволюции микроструктуры и формировании радиационно-индуцированных фаз в феррите-шпинели при облучении.

Цель исследования:

Исследования наличия дефектов в феррите-шпинели при гамма-облучении, так как перераспределение ионов металла может влиять на свойства материала, такие как электропроводность, магнитные свойства и механическая прочность.

Материалы и методы

Октаэдрические вакансии в кристаллах могут быть заполнены ионами как из октаэдрических, так и из тетраэдрических междоузлий. Чем выше температура кристалла, тем интенсивнее становится этот процесс. Аналогичное явление происходит и с тетраэдрическими вакансиями. При высоких температурах облучения ионы из октаэдрических позиций могут перемещаться в тетраэдрические позиции, увеличивая концентрацию вакансий. То же самое происходит и в тетраэдрической подрешетке феррита. Для описания всех этих процессов необходимо более 20 кинетических уравнений. Аналитическое решение такой системы уравнений невозможно, поэтому предпочтительным является численный метод решения с использованием компьютерных программ. Для этой цели мы выбрали программное обеспечение Fortran и Origin.

Фортран хорошо известен своей эффективностью в численных расчетах и способностью выполнять крупномасштабные научные и инженерные расчеты. Он предлагает такие функции, как обработка массивов, подпрограммы и функции, что делает его пригодным для научных и инженерных приложений.

Программное обеспечение Origin, с другой стороны, является мощным инструментом для анализа данных и построения графиков. Он широко используется в исследованиях и образовании различных научных дисциплин, включая физику. Его гибкость и возможности делают его ценным для ученых, преподавателей и студентов.

Мы разработали программу на Фортране под названием Sys_Adams_1 для решения системы нелинейных уравнений. Программа использует программное обеспечение Fortran и Origin для достижения точных и эффективных результатов.

Для решения системы нелинейных уравнений, использовались два метода:

а) Адамса-Мултона – метод хорд с пользовательским якобианом;

Метод Адамса-Мултона (также известный как метод хорд) является численным методом решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Он является явным методом, который использует информацию о предыдущих шагах для вычисления текущего значения. Для использования метода Адамса-Мултона с пользовательским якобианом необходимо иметь явное выражение для якобиана системы. Якобиан представляет собой матрицу, состоящую из частных производных системы уравнений. Обычно якобиан вычисляется аналитически для конкретной системы уравнений;

б) гира-метод хорд с пользовательским якобианом разделенной разностей интегрированием назад.

Главным преимуществом гира-метода хорд с пользовательским якобианом и разделенными разностями интегрирования назад является его способность решать системы ОДУ с более высокой точностью и стабильностью. Пользовательский якобиан позволяет учесть особенности системы и улучшить точность решения. Разделенные разности интегрирования назад учитывают производные на нескольких шагах, что также способствует повышению точности.

Основные положения

Феррит-шпинель – класс керамических материалов, привлекла значительное внимание благодаря своему уникальному сочетанию электропроводности, магнитных свойств и механической прочности. Однако наличие дефектов в этих материалах может существенно повлиять на их эксплуатационные характеристики. Гамма-облучение, распространенный метод создания дефектов в материалах, широко изучалось, чтобы понять его влияние на ферритовую шпинель [6, 9–10].

Феррит шпинели $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ имеет общую формулу $(\text{M}_\delta\text{Fe}_{1-\delta})[\text{M}_{1-\delta}\text{Fe}_{1+\delta}]\text{O}_4$, где δ представляет степень инверсии. Кристаллический феррит кобальта CoFe_2O_4 со структурной формулой $(\text{Co}^{2+}_{1-\delta}\text{Fe}^{3+})[\text{Co}^{2+}\text{Fe}^{3+}_{2-\delta}]$ имеет обратную структуру шпинели при комнатной температуре. Феррит кобальта обладает умеренной намагниченностью насыщения, хорошими электрическими свойствами, высокой магнитокристаллической анизотропией, хорошими механическими свойствами и химической стабильностью, что делает его перспективным магнитным материалом [5,6].

При γ -облучении ферритов $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ первая константа анизотропии K_1 демонстрирует немонокотное изменение. Вначале она снижается при определенных дозах облучения, а затем заметно возрастает по мере увеличения дозы. Добавление цинка в состав феррита усложняет дозовую зависимость K_1 , но характерное минимальное значение все же существует. Предыдущие исследования с использованием мессбауэровской спектроскопии показали, что ионы кобальта перераспределяются по подрешеткам под действием γ -облучения, однако в этих исследованиях доза облучения не превышала 10^8 рад. Однако другие исследования марганец-цинковых ферритов показали, что при больших дозах γ -облучения (до $5 \cdot 10^8$ рад) магниторезистивные эффекты стабилизируются [11]. Это свидетельствует о том, что с ростом дозы γ -облучения радиационно-чувствительные магнитные характеристики ферритов достигают минимума, а затем выходят на плато. Этот эффект можно объяснить строением кристаллической решетки феррита-шпинели, состоящей из двух подрешеток со специфическими междоузлиями, благоприятными для заполнения ионами металлов [12, 13].

Облучение феррита приводит к выталкиванию ионов металлов из их позиций в структуре феррита. Это приводит к изменению физических свойств материала, таких как магнитная анизотропия. Также радиационное воздействие может привести к перераспределению ионов по структуре феррита, что приводит к упорядочению материала и снижению свободной энергии. В результате конкуренции этих эффектов возникает экстремум на кривой зависимости структурно-чувствительного свойства феррита от дозы облучения. Исследования показывают, что изменение этого свойства феррита при облучении зависит от перераспределения ионов в его структуре, а не от упорядочения или разупорядочения. Для более детального изучения этого эффекта была разработана модель перераспределения ионов в кобальт-медном феррите. Ранее такая модель была использована для изучения концентрационных максимумов дефектов в меди, облученной электронами [11, 12].

Обзор литературы

Неель [14] разработал теоретические модели НМА, в которых основное внимание уделялось анизотропной природе обменных взаимодействий между парами ионов. Ему удалось объяснить спонтанную намагниченность феррошпинелей, у которых намагниченность подрешеток не компенсирована и полная намагниченность отлична от нуля. Подрешетка должна обладать периодичностью и эквивалентностью всех узлов, хотя заполняющие их ионы могут быть неэквивалентны по типу. Вблизи области температур T_c существует только ближнее спиновое упорядочение за счет обменных сил между соседними спинами. Такие факторы, как ионный радиус и заряд, влияют на распределение ионов в решетке. Смит и Уэйн [15] подчеркнули важность учета непрямых обменных взаимодействий через ионы кислорода в одной плоскости. В ферритах также встречаются дефекты, вызванные тепловым движением ионов и отклонениями от стехиометрии. Расчеты Йосиды [16] показывают, что спин-орбитальное взаимодействие, а не парное взаимодействие, является основным механизмом, ответственным за кристаллическую анизотропию. Шпинели с ионами Co^{2+} в октаэдрических позициях обычно изучаются из-за вклада ионов Co^{2+} в анизотропию. Выбор систем для исследования полей ионизирующего излучения определяется величиной НМД, вызываемой ионами. Крупичка [17] рассмотрел прямые обменные взаимодействия между соседними ионами Co^{2+} , где предпочтительное направление определяется ориентацией локальной тригональной оси. В работе Гассем М. Альзуби [4] успешно синтезированы наночастицы из совместно легированного медного феррита,

определение размеров с помощью гидротермального метода. При сравнении с чистым Cu феррит, добавление Co увеличивало постоянную решетки и уменьшало плотность. Отметил, что коэрцитивная сила и остаточная намагниченность увеличивались с уменьшением температуры.

Результаты и обсуждения

Численные расчеты проводились при различных температурах в диапазоне от 273 К до 333 К, предполагая, что экспериментальные образцы в [1] были облучены при комнатной температуре. Облучение осуществлялось источником Co_{75} с энергией 1,25 МэВ и интенсивностью дозы 420 рад/с. Расчеты проводились для образца объемом 1 см³.

Одним из важных параметров в расчетах является энергия связи, под которой понимается энергия, необходимая для связывания ионов определенного типа в октаэдрической и тетраэдрической подрешетках. К сожалению, экспериментальных результатов для этих энергий связи нет. Поэтому для расчетов в качестве энергий связи мы использовали сумму энергий миграции и стабилизации. Энергия миграции (E_m) была принята равной 1,05 эВ, а энергия стабилизации получена из [17].

Численные эксперименты были проведены с использованием различных энергий связи, включая 1,676 эВ; 1,656 эВ; 1,695 эВ; 1,134 эВ; 1,368 эВ и 1,828 эВ.

С кристаллографической точки зрения считается нормальным, когда ионы одного типа располагаются в кристаллографически эквивалентных позициях. При этом на элементарную ячейку приходится 8 ионов X , расположенных в позициях А, и 16 ионов Y в позициях В. Существуют также смешанные структуры, являющиеся переходными между нормальной и инвертированной шпинельной структурой.

Переход между нормальной и обращенной структурами шпинели можно узнать по формуле [8].

$$\underbrace{(x_{\delta}y_{1-\delta})}_A \underbrace{(x_{1-\delta}y_{1+\delta})}_B O_4 \quad (1)$$

В этой формуле δ обозначает долю ионов X в позициях А. Для структуры нормального типа $\delta = 1$, а для структурного обращенного типа $\delta = 0$.

Кристаллографические данные кубических шпинелей в составе $\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

$$\begin{array}{ll} \delta = 0,0 & (\text{Co}_{0.0}\text{Cu}_{0.0}\text{Fe}_1)(\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Fe}_1)\text{O}_4 \\ \delta = 0,2 & (\text{Co}_{0.175}\text{Cu}_{0.05}\text{Fe}_{0.8})(\text{Co}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Fe}_{1.2})\text{O}_4 \\ \delta = 0,4 & (\text{Co}_{0.3}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{0.6})(\text{Co}_{0.45}\text{Cu}_{0.15}\text{Fe}_{1.4})\text{O}_4 \end{array}$$

Численный расчет и графические результаты $\delta = 0$; $\delta = 0,2$; $\delta = 0,4$

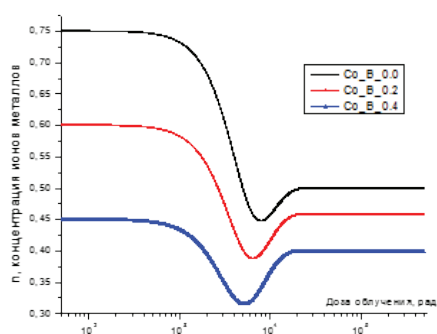


Рисунок 2 – Зависимость концентрации ионов Co В подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

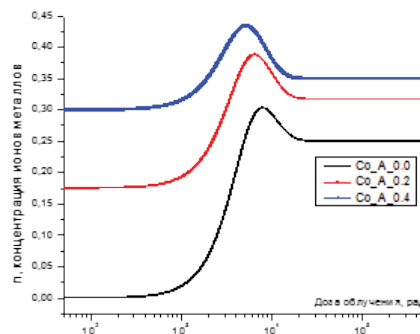


Рисунок 3 – Зависимость концентрации ионов Co А подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

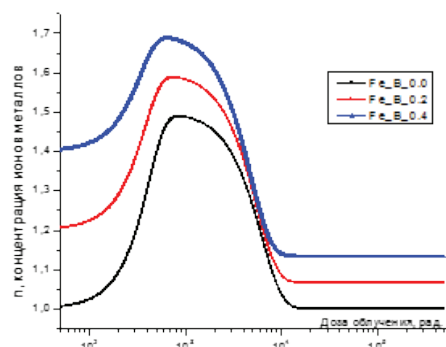


Рисунок 4 – Зависимость концентрации ионов Fe В подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

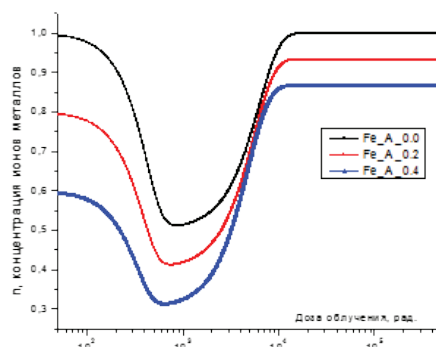


Рисунок 5 – Зависимость концентрации ионов Fe А подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

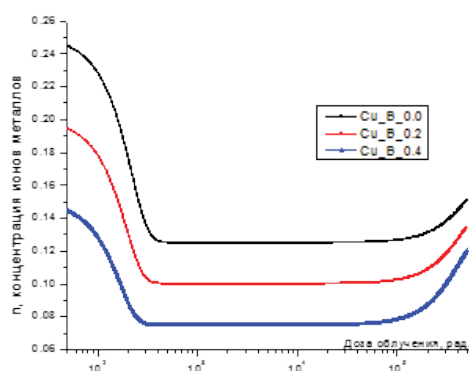


Рисунок 6 – Зависимость концентрации ионов Cu В подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

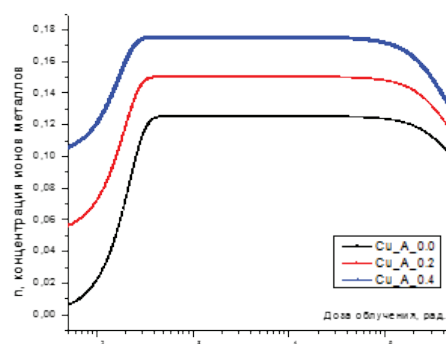


Рисунок 7 – Зависимость концентрации ионов Cu А подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

На рисунках показана зависимость доли ионов на одну молекулу от температуры и дозы облучения.

Зависимость концентрации ионов Co в подрешетке от дозы облучения при температуре 273К может быть описана с помощью уравнения:

$$N(\text{Co})/N(\text{Co})_0 = \exp(-\alpha\phi), \quad (2)$$

где $N(\text{Co})$ – концентрация ионов Co после облучения, $N(\text{Co})_0$ – начальная концентрация ионов Co, α – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа облучения, ϕ – доза облучения.

Эта зависимость имеет экспоненциальный характер, то есть концентрация ионов Co в подрешетке будет убывать с увеличением дозы облучения.

Экспериментальное определение зависимости может быть выполнено путем измерения начальной концентрации ионов Co в образце, а затем измерения концентрации после облучения при разных дозах. По полученным данным можно определить коэффициент пропорциональности α для данного типа облучения.

На рисунках 2–7 показаны зависимости концентрации ионов кобальта, железа, меди в А и В подрешетках феррита в зависимости от дозы и температуры облучения. Из этого рисунка видно, что концентрация кобальта с октаэдрической подрешеткой феррита с увеличением дозы облучения проходит через хорошо выраженный минимум, а затем переходит на «плато», т.е. δ четко коррелирует с зависимостью K_1 от дозы облучения, экспериментально установленной в работе [1–3, 11].

Заклучение

Исследование показало, что гамма-облучение вызывает перераспределение ионов металлов внутри подрешеток феррита-шпинели $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,20}\text{Fe}_2\text{O}_4$, что приводит к изменению их магнитных свойств. Эти результаты имеют значение для понимания того, как облучение влияет на свойства материалов, а также для разработки новых материалов с особыми характеристиками. Важно отметить, что перераспределение ионов металлов внутри подрешеток ферритной шпинели может оказывать существенное влияние на свойства и характеристики материала. Такая миграция ионов металлов между подрешетками может влиять на магнитные и коррозионные свойства материала, а также приводить к образованию радиационно-индуцированных фаз. Кроме того, наличие дефектов кристаллической решетки, вызванных облучением, может влиять на механические свойства материала.

Необходимы дальнейшие исследования для изучения влияния различных условий облучения и ионов металлов на перераспределение и образование дефектов в феррите-шпинели. Разработка инновационных методов анализа микроструктуры и свойств облученных материалов может дать ценную информацию об их поведении и помочь в создании радиационно стойких материалов. В целом изучение перераспределения ионов металлов в феррите шпинели под воздействием облучения является важнейшим направлением исследований, имеющим значение для различных областей техники.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Шамбулов Н.Б., Ерматов С.Е., Подкладнев В.М. Поведение первой константы магнитной кристаллографической анизотропии в монокристаллах ферритов системы Co-Cu-Zn, подвергнутых гамма-облучению от источника Co_{60} // Известия АН КазССР. Сер. физико-математическая. – Алматы, 1981. – № 4. – С. 67–70.
- 2 Шемяков Ф.Ф., Пашенко И.П., Литовченко Ф.С., Хоряков Ф.Ф. Радиационная стойкость магниторезистивного эффекта в марганец в цинковых ферритах : Труды 15-го международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – М., 2005. – С. 311–313.
- 3 Шамбулов Н.Б., Искаков Б.М. Магнитные свойства монокристаллов ферритов системы Co-Cu-Zn, подвергнутых облучению // Радиационная физика твердого тела. – Севастополь, 2010.
- 4 Gasse M. Alzoubi The Effect of Co-Doping on the Structural and Magnetic Properties of Single-Domain Crystalline Copper Ferrite Nanoparticles. *Magnetochemistry* 2022, 8(12), 164. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry8120164>.
- 5 Jianping Ai, Yaping Shuai, Min Hu, Lihong Cheng, Siling Luo, Wenkui Li, Zhiqin Chen, Liling Hu, Zehua Zhou. Microstructural evolution and catalytic properties of novel high-entropy spinel ferrites MFe_2O_4 (M= Mg, Co, Ni, Cu, Zn). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.119>
- 6 Manju Kurian, Smitha Thankachan. Structural diversity and applications of spinel ferrite core - Shell Nanostructures - A review. *Open Ceramics*, vol. 8. December 2021, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100179>
- 7 Goodtnoug J.B., Magnetism ed. Rado G.T., Suhl H., Acad. Pres, vol. III, New York – London, 1963.
- 8 Гераськин А.А. Синтез и свойства пленок $\text{Mg}(\text{Fe}_{0,8}\text{Ga}_{0,2})_2\text{O}_4-\delta$ на подложках Si с термостабильными межфазными границами : Дис... – Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, 2014.
- 9 Belekar R.M., Wani M.A., Athawale S.A., Kakde A.S. Minimum hysteresis loss and amplified magnetic properties of superparamagnetic Ni-Zn nano spinel ferrite // *Physics Open*, vol. 10, February 2022, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2022.100099>
- 10 Syed Ismail Ahmad. Nano cobalt ferrites: Doping, Structural, Low-temperature, and room temperature magnetic and dielectric properties – A comprehensive review. *Journal of Magnetism and magnetic materials*, vol. 562, 15 November 2022, 169840. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169840>.
- 11 Шамбулов Н.Б., Тасболат Е.Б., Кусаинов А.С., Алибаева А.Г. Влияние гамма-облучения на перераспределение ионов металлов А- и В-подрешетках в $\text{Co}_{0,6}\text{Cu}_{0,2}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита-шпинели. <http://www.vestnik.nauka.kz/wp-content/uploads/2017/12/2>.

- 12 Исаков Б.М., Шамбулов Н.Б. Зависимость концентрации неравновесных междоузельных атомов от электронного облучения меди с примесью золота : Труды 15-го международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – М., 2005. – С. 197–201.
- 13 Исаков Б.М., Сулейменова Ж.Л., Шамбулов Н.Б. О концентрационных максимумах неравновесных точечных дефектов в облученной меди с примесью золота // Физика металлов и металловедение. – М., 2007. – С. 588–593.
- 14 Неель Л. Нобелевские лекции по физике. Магнетизм и локальные молекулярные поля. Успехи физических наук. – 1972. – Т. 107. – Вып.2.
- 15 Смит Я., Вейн Х. Ферриты: физические свойства и практические применения. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962.
- 16 Иосида К. Функциональный анализ. Пер. с англ. – М.: Мир, 1967.
- 17 Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. – М., 1976. – Т. 1. – С. 103–104, 132–136.
- 18 Tatenov A.M., Shambulov N.B., Baitukayev U.B., Ospanova A.J., Shinykulova N.N. Interactive virtualisation in Java Script of electromagnetism when changing the dynamic, static parameters of ferromagnetics. Scopus Q1 PUBLISHER(S) University of Kerbala – KIJOMS, 2022.
- 19 Шиманский В.И. Основы физики твердого тела : Учеб.-метод. пособие / В.И. Шиманский, Е.П. Туромша, Н.Н. Кольчевский. – Минск : БГУ, 2021. – С. 12–21, 181–188.
- 20 Anil V., Raut. D.V. Kurmude. Effect of gamma irradiation on the structural and magnetic properties of Co–Zn spinel ferrite nanoparticles. Materials Research Bulletin. Vol. 63, March 2015, pp. 123–128 <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.11.051>.
- 21 Shameran Jamal Salih, Wali M. Mahmood. Review on magnetic spinel ferrite (MFe₂O₄) nanoparticles: From synthesis to application. Helion. Vol. 9, Issue 6, June 2023, e16601. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16601>

REFERENCES

- 1 Shambulov N.B., Ermatov S.E., Podkladnev V.M. (1981) Povedenie pervoj konstanty magnitnoj kristallograficheskoj anizotropii v monokristallah ferritov sistemy Co-Cu-Zn, podvergnutyh gamma-oblucheniju ot istochnika Co60. Izvestija AN KazSSR. Ser. fiziko-matematicheskaja, Almaty, no. 4, pp. 67–70.
- 2 Shemjakov F.F., Pashhenko I.P., Litovchenko F.S., Horjakov F.F. (2005) Radiacionnaja stojkost' magnitnoezistivnogo jeffekta v marganec v cinkovyh ferritah. Trudy 15-go mezhdunarodnogo soveshhanija "Radiacionnaja fizika tverdogo tela", Moscow, pp. 311–313.
- 3 Shambulov N.B., Isakov B.M. (2010) Magnitnye svojstva monokristallov ferritov sistemy Co-Cu-Zn, podvergnutyh oblucheniju. Radiacionnaja fizika tverdogo tela. Sevastopol'.
- 4 Gasseem M. (2022) Alzoubi The Effect of Co-Doping on the Structural and Magnetic Properties of Single-Domain Crystalline Copper Ferrite Nanoparticles. Magnetochemistry, 8(12), 164. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry8120164>.
- 5 Jianping Ai, Yaping Shuai, Min Hu, Lihong Cheng, Siling Luo, Wenkui Li, Zhiqin Chen, Liling Hu, Zehua Zhou (2023) Microstructural evolution and catalytic properties of novel high-entropy spinel ferrites MFe₂O₄ (M= Mg, Co, Ni, Cu, Zn). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint>.
- 6 Manju Kurian, Smitha Thankachan. Structural diversity and applications of spinel ferrite core - Shell Nanostructures - A review. Open Ceramics, vol. 8. December 2021, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100179>
- 7 Goodnoug J.B., Magnetism ed. Rado G.T., Suhl H. (1963) Acad. Pres, vol. III, New York – London.
- 8 Geras'kin A.A. Sintez i svojstva plenok Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})O₄–δ na podlozhkah Si s termostabil'nymi mezhfaznymi granicami. Dis... – Moskovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet radiotekhniki, jelektroniki i avtomatiki, 2014.
- 9 Belekar R.M., Wani M.A., Athawale S.A., Kakde A.S. Minimum hysteresis loss and amplified magnetic properties of superparamagnetic Ni–Zn nano spinel ferrite. Physics Open, vol. 10, February 2022, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2022.100099>
- 10 Syed Ismail Ahmad (2022) Nano cobalt ferrites: Doping, Structural, Low-temperature, and room temperature magnetic and dielectric properties – A comprehensive review. Journal of Magnetism and magnetic materials, vol. 562, 15 November, 169840. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169840>.

- 11 Shambulov N.B., Tasbolat E.B., Kusainov A.S., Alibaeva A.G. Vliyanie gamma-oblucheniya na pereraspredelenie ionov metallov A- i V-podreshetkah v $\text{So}_0,6\text{Su}_0,2\text{Zn}_0,2\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrita-shpineli. <http://www.vestnik.nauka.kz/wp-content/uploads/2017/12/2>.
- 12 Iskakov B.M., Shambulov N.B. (2005) Zavisimost' koncentracii neravnovesnyh mezhdouzel'nyh atomov ot jelektronnogo oblucheniya medi s primes'ju zolota. Trudy 15-go mezhdunarodnogo soveshhanija Radiacionnaja fizika tverdogo tela, Moscow, pp. 197–201.
- 13 Iskakov B.M., Sulejmenova Zh.L., Shambulov N.B. (2007) O koncentracionnyh maksimumah neravnovesnyh tochechnykh defektov v obluchennoj medi s primes'ju zolota. Fizika metallov i metallovedenie, Moscow, pp. 588–593.
- 14 Neel' L. (1972) Nobelevskie lektsii po fizike. Magnetizm i lokal'nye molekuljarnye polja. Uspehi fizicheskikh nauk, vol.107, rel. 2.
- 15 Smit Ja., Vejn X. (1962) Ferrity: fizicheskie svoystva i prakticheskie primenenija, Moscow, Izdatel'stvo inostrannoj literatury.
- 16 Iosida K. (1967) Funkcional'nyj analiz, Moscow.
- 17 Krupichka S. (1976) Fizika ferritov i rodstvennykh im magnitnykh okislov, Moscow, vol. 1, pp. 103–104, 132–136.
- 18 Tatenov A.M., Shambulov N.B., Baitukayev U.B., Ospanova A.J., Shinykulova N.N. (2022) Interactive virtualisation in JavaScript of electromagnetism when changing the dynamic, static parameters of ferromagnetics. Scopus Q1 PUBLISHER(S)University of Kerbala – KIJOMS.
- 19 Shimanskij V.I. (2021) Osnovy fiziki tverdogo tela, Minsk, BGU, pp. 12–21, 181–188.
- 20 Anil V., Raut. D.V. Kurmude (2015) Effect of gamma irradiation on the structural and magnetic properties of Co–Zn spinel ferrite nanoparticles. Materials Research Bulletin, vol. 63, March, pp. 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.11.051>.
- 21 Shameran Jamal Salih, Wali M. Mahmood (2023) Review on magnetic spinel ferrite (MFe_2O_4) nanoparticles: From synthesis to application. Helion, vol. 9, Issue 6, June. e16601. <https://doi.org/10.1016/j.helion.2023.e16601>.

**^{1*}ШИНЫКУЛОВА Н.Н., ¹ШАМБУЛОВ Н.Б., ¹ТАТЕНОВ А.М., ²ЕРТУРК С.,
³ШИНЫКУЛОВА Г.Н., ³МӘЖИТ Ж., ⁴АШИКБАЕВА А.Б.**

¹Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

²Нийде Омер Халисдемир университеті, Түркия

³Алматы технологиялық университеті, 050061, Алматы қ., Қазақстан

⁴әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ФЕРРИТ-ШПИНЕЛЬ МОНОКРИСТАЛДАРЫНА ГАММА-СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Андатпа

Сәулелену үрдісінен кейін феррит-шпинелінде металл иондарының қайта үлестірілу механизмдері мен ақаулардың пайда болуы күрделі, әрі бірқатар факторларға байланысты болады Сондықтан радиациялық сәулелену әсерінен осы материалдардың физикалық қасиеттерінің өзгерісін түсіну үшін компьютерлік модельдеу және эксперименттік зерттеулер жүргізу маңызды. Радиациялық сәулеленуге төтеп бере алатын жаңа материалдарды әзірлеу қатты дене физикасы, ядролық физика, ғарыштық зерттеулер және медицина, сонымен қатар басқа да салалар үшін үлкен маңызға ие. Бұл жұмыста гамма-сәулеленудің $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррит монокристалдарына әсері зерттелді. Бұрын мессбауэр спектроскопиясын колдана отырып зерттеу жүргізілген, бұл феррит-шпинельдерінің астыңғы қабаттарындағы металл иондарының өзгеруін анықтауға мүмкіндік берді. Бұл өзгерістер материалдың магниттік кристаллографиялық анизотропиясына әсер етеді [1]. Ғылыми әдебиеттерден гамма-сәулеленудің материалдардың магниттік сезімталдығының өзгеруіне және магниттелу қисығының өзгеруіне әкелетінін көрсететін деректерді табуға болады [2, 3]. Физикалық қасиеттердің бұл өзгерістерін октаэдрлік және тетраэдрлік ішкі торлардағы металл иондарының қайта бөлінуімен түсіндіруге болады, өйткені ішкі торлардағы металл иондарының атомдық деңгейлері бөлінеді.

Тірек сөздер: феррит-шпинель, модельдеу, сәулелену, кристалдық тор.

^{1*}SHINIKULOVA N.N., ¹SHAMBULOV N.B., ¹TATENOV A.M., ²ERTURK S.,
³SHINIKULOVA G.N., ³MAZHIT J., ⁴ASHIKBAYEVA A.B.

¹Kazakh National Women's Pedagogical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

²Nigde Omer Halisdemir University, Turkey.

³Almaty Technological University, 050061, Almaty, Kazakhstan

⁴Kazakh National University named after al-Farabi, 050000, Almaty, Kazakhstan.

STUDY OF THE INFLUENCE OF GAMMA IRRADIATION ON FERRITE-SPINEL MONOCRYSTALS

Abstract

The mechanisms of redistribution of metal ions and the formation of defects in ferrite spinel upon irradiation are complex and depend on a number of factors. Therefore, computer simulations and experimental studies are important for understanding the behavior of the physical properties of these materials under the influence of radiation. The development of new materials that can withstand radiation damage is of great importance for a range of applications, including solid state physics, nuclear physics, space research and medical applications. In this work, the effect of gamma irradiation on $\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite single crystals has been investigated. An earlier study using Mössbauer spectroscopy was carried out to determine the changes in the metal ion content in the sublattices of ferrite spinels. These changes affect the magnetic crystallographic anisotropy of the material [1]. Data can be found in the scientific literature that indicate that gamma irradiation leads to changes in the magnetic susceptibility of materials and to changes in the magnetization curve [2,3]. These changes in physical properties can be explained by redistribution of metal ions in octahedral and tetrahedral sublattices, since metal ions in sublattices have splitting of atomic levels.

Key words: ferrite spinel, modeling, irradiation, crystal lattice

Информация об авторах

Шиныкулова Нургуль Нурбековна (автор для корреспонденции)

Магистр физики, преподаватель, Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-4086-9785

E-mail: sh_nurgul82@mail.ru

Шамбулов Науан Байдильдаевич

Кандидат физико-математических наук, доцент, Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-3391-7862

E-mail: nauansh@mail.ru

Татенов Адамбек Максutowич

Кандидат физико-математических наук, доцент, Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-4767-5788

E-mail: tatenov.adambek@qyzpu.edu.kz

Ертурк Сефа

Prof. Dr. Nigde Omer Halisdemir University, Турция

ORCID ID: 0000-0003-4051-9096

E-mail: sefaerturk@gmail.com

Шиныкулова Гульнур Нурбековна

Магистр физики, лектор, Алматинский технологический университет, ул. Толе би, 100, 050061, г. Алматы

ORCID ID: 0000-0003-4719-9160

E-mail: gulnur.shynykulova@gmail.com

Ашиқбаева Асель Болатовна

Доцент, кафедра физики плазмы, нанотехнологий и компьютерной физики,
физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
ул. Аль-Фараби, 71, 050040, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0003-0706-2688
E-mail: 02assel@gmail.com

Мәжит Жәмілә Батыққызы

Магистр физики, лектор, Алматинский технологический университет, ул. Төле би, 100,
050061, г. Алматы
ORCID ID: 0000-0002-4635-9241
E-mail: Mazhit-Zhamilya79@mail.ru

Авторлар туралы мәліметтер

Шиныкулова Нургуль Нурбековна (корреспонденция авторы)

Физика магистрі, оқытушы, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
Гоголь көш., 114, 050000, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0002-4086-9785
E-mail: sh_nurgul82@mail.ru

Шамбулов Науан Байдильдаевич

Физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Қазақ ұлттық қыздар
педагогикалық университеті, Гоголь көш., 114, 050000, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-3391-7862
E-mail: nauansh@mail.ru

Татенов Адамбек Максұтович

Физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Қазақ ұлттық қыздар
педагогикалық университеті, Гоголь көш., 114, 050000, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-4767-5788
E-mail: tatenov.adambek@qyzpu.edu.kz

Ертурк Сефа

Prof. Dr. Nigde Omer Halisdemir University, Түркия
ORCID ID: 0000-0003-4051-9096
E-mail: sefaerturk@gmail.com

Шиныкулова Гүльнур Нурбековна

Физика магистрі, лектор, Алматы технологиялық университеті, Төле би көш., 100,
050061, Алматы қ.
ORCID ID: 0000-0003-4719-9160
E-mail: gulnur.shynykulova@gmail.com

Ашиқбаева Асель Болатовна

Доцент, Плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасы,
Физика-техникалық факультет, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
әл-Фараби даң., 71, 050040, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-0706-2688
E-mail: 02assel@gmail.com

Мәжит Жәмілә Батыққызы

Физика магистрі, лектор, Алматы технологиялық университеті,
Төле би көш., 100, 050061, Алматы қ.
ORCID ID: 0000-0002-4635-9241
E-mail: Mazhit-Zhamilya79@mail.ru

Information about authors**Shynykulova Nurgul Nurbekovna** (corresponding author)

Master of Physics, teacher, Kazakh National Women's Pedagogical University, 114, Gogol St., Almaty, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-4086-9785

E-mail: sh_nurgul82@mail.ru

Shambulov Nauan Baidildaevich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Women's Pedagogical University, 114, Gogol St., Almaty, 050000, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0003-3391-7862

E-mail: nauansh@mail.ru

Adambek Maksutovich Tatenov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Women's Pedagogical University, 114, Gogol St., 050000, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0003-4767-5788

E-mail: tatenov.adambek@qyzpu.edu.kz

Erturk Sefa

Prof. Dr Nigde Omer Halisdemir University, Turkey

ORCID ID: 0000-0003-4051-9096

E-mail: sefaerturk@gmail.com

Shynykulova Gulnur Nurbekovna

Master of Physics, Lecturer, Almaty Technological University, 100, Tolebi str., Almaty, 050061, Almaty city

ORCID ID: 0000-0003-4719-9160

E-mail: gulnur.shynykulova@gmail.com

Ashikbayeva Asel Bolatovna

Associate Professor, Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi St., Almaty, 050040, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0003-0706-2688

E-mail: 02assel@gmail.com

Mazhit Zhamila Batykyzyzy

Master of Physics, Lecturer, Almaty Technological University, 100, Tole bi str., Almaty, 050061, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0002-4635-9241

E-mail: Mazhit-Zhamilya79@mail.ru