

ФИЗИКА

МРНТИ 29.19.41

Н.Б.Шамбулов^{1,3}, Е.Б.Тасболат¹, А.С.Кусаинов^{2,3}, А.Г.Алибаева²

¹Казахский государственный женский педагогический университет,
г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
г. Алматы, Казахстан

³Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа,
КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

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*

Аннотация. Проведено исследование влияния гамма-облучения на первую константу K_1 магнитной кристаллографической анизотропии $\text{Co}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита-шпинели. На основе феноменологической модели проведен численный расчет и определены параметры модели влияния облучения на свойства феррита. При исследовании первой константы магнитной кристаллографической анизотропии образцов, подвергшихся гамма-излучению в дозах от 10^6 до 10^8 рад, обнаружено аномальное поведение K_1 . Для объяснения такого аномального поведения первой константы магнитной кристаллографической анизотропии была построена математическая модель, описывающая результат облучения и процесс накопления радиационных точечных дефектов. Численный расчет при дозах более 10^9 рад показывает стабилизацию изменений K_1 , что совпадает с результатами уже известных работ. Настоящая работа закладывает теоретические и методологические основы для моделирования комплексных решеточных теорий, в том числе в комплексных параллельных квантовых алгоритмах.

*Исследования проводились в рамках проекта №3824/ГФ4 "Интерпретация и моделирование естественного параллелизма квантовых вычислений на современном аппаратном и программном обеспечении" финансируемого МОН РК в Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа, КазНУ им. аль-Фараби.

Ключевые слова: анизотропия, ферриты, октаэдрические вакансии, доза облучения, первично выбитые атомы.

• • •

Түйіндеме. Мақалада $\text{Co}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррит-шпинелинің магниттік кристаллографиялық анизотропиясының бірінші тұрақтысына гамма-сәулеленің әсері зерттелген. Феноменологиялық модельдің негізін десандық септеулер жүргізілген және феррит қасиеттерін еөсерететін модельдің негізгі параметрлері анықталған. Зерттеліп отырған феррит монокристалдары балқытылған қоспадан өсіру тәсілімен алынған. 10^6 -нен 10^8 -і рад сәулелену нәтижесін демагниттік кристаллографиялық анизотропияның бірінші тұрақтысының аномаль өзгерісі бақыланған. K_1 -магниттік кристаллографиялық анизотропияның бірінші тұрақтысының аномаль өзгерісін түсіндіру үшін, радиациялық нүктелік ақау түзілуінің феноменологиялық моделі негізінде түсіндіретін радиация әсерінің процестерінің математикалық моделі құрылған. Сандық септеу кезінде 10^9 рад дозадан соң K_1 -дің тұрақталуы жарияланған нәтижелермен сәйкес келеді. Бұл жұмыс кешенді тор теориясының моделінің теориялық және методологиялық негізін қалауға мүмкіндік тудырады.

Түйінді сөздер: анизотропия, ферриты, октаэдрлық бос орындар, сәулелену дозасы, бастапқы сынған атомдар.

• • •

Abstract. We have studied the effect of the gamma radiation on the first magnetic crystallographic anisotropy constant K_1 of the $\text{Co}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite. Based on the phenomenological model, a numerical simulation is performed and the effect of gamma irradiation on the properties of ferrite is determined. Anomalous behavior of K_1 was observed in the studies of the first constant of magnetic crystallographic anisotropy for the samples irradiated with gamma rays for doses ranged from 10^6 to 10^8 rad. To explain such an anomalous behavior of the first constant of magnetic crystallographic anisotropy, a mathematical model describing the result of irradiation and the process of accumulation of radiation point defects was introduced. Numerical simulation at doses higher than 10^9 rad exhibits the stabilization of the changes in K_1 which is supported by the results of the existing publications. This work lays the theoretical and methodological foundation for modeling of the complex lattice theories, including the complex parallel quantum algorithms.

Key words: anisotropy, ferrites, octahedral vacancies, irradiation dose, primary knocked out atoms.

Введение. Элементарная ячейка кристаллической решетки феррита-шпинели состоит из двух подрешеток. А-подрешетка содержит 64 тетраэдрических междоузлия, из которых 8 наиболее термодинамически выгодны для заполнения ионами металлов, В-подрешетка – 32 октаэдрических междоузлия, из которых 16 термодинамически выгодны для заполнения ионами металлов,

Облучение феррита приводит к выбиванию ионов металлов из октаэдрических и тетраэдрических позиций, занятых ими при предварительной термообработке. Вследствие появления освобожденных ионами октаэдрических и тетраэдрических позиций должны измениться физические свойства привязанных к такому эффекту, например, первой константы магнитной кристаллографической анизотропии.

Другим следствием радиационного воздействия должно быть доупорядочение феррита, связанного с заполнением октаэдрических и тетраэдрических пустот соответствующими ионами металлов путем их перераспределения, приводящего к понижению свободной энергии кристалла.

Конкуренция вышеуказанных эффектов приводит к появлению экстремума на кривой, показывающей зависимость структурно-чувствительного свойства феррита от времени (дозы) облучения.

Методы исследования. Если исходить из того, что ион, "сидящий" на термодинамически выгодной позиции, и имеет минимум свободной энергии, и его труднее выбить из занятой позиции, то концентрация октаэдрической и тетраэдрической позиций, освобождаемых при облучении, должна в начале облучения возрасти, а затем уменьшаться с увеличением дозы облучения.

Об этом свидетельствуют экспериментальные закономерности, установленные при облучении кобальт-медь-цинковых ферритов [1,2]. В [1] было показано, что при γ -облучении монокристаллов ферритов $[Co_{0,75}Cu_{0,25}]_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ первая константа анизотропии K_1 меняется немонотонно: при определенных дозах облучения она уменьшается, а затем по мере повышения

дозы заметно увеличивается (рис. 1). Повышение концентрации цинка в составе феррита усложняет дозовую зависимость K_1 , но характерный минимум сохраняется.

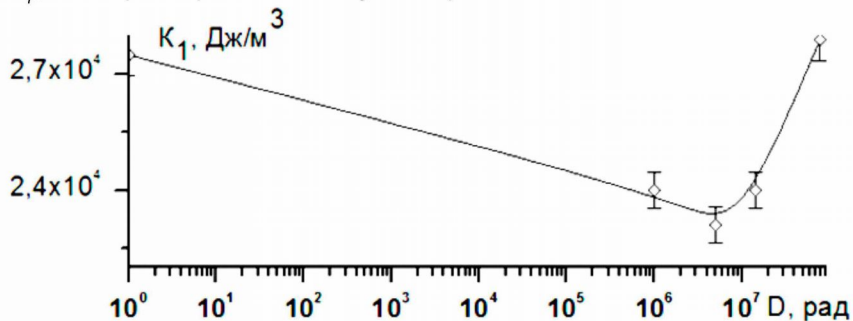


Рис. 1. Зависимость первой константы магнитной кристаллографической анизотропии от дозы гамма-облучения: Δ - среднеквадратичное отклонение для экспериментального значения K_1

В работе [2] с использованием мессбауэровской спектроскопии было установлено перераспределение ионов по подрешеткам при γ -облучении. Следует отметить, что в работах [1,2] доза облучения не превышала 10^8 рад. Известны также экспериментальные работы, в которых исследуется влияние больших доз γ -облучения (до $5 \cdot 10^9$ рад) на магниторезистивные эффекты марганец-цинковых ферритов [3]. В них показана стабилизация магниторезистивного эффекта, начиная с доз γ -облучения $5 \cdot 10^8$ рад.

Результаты исследования. Как можно видеть, прослеживается определенная модель влияния γ -облучения на свойства ферритов. Чтобы глубже понять механизм поведения ферритов при облучении нами предлагается феноменологическая модель перераспределения ионов по подрешеткам кобальт-медь-цинкового феррита. Ранее подобная модель была использована для выяснения природы концентрационных максимумов неравновесных точечных дефектов в меди, облученных электронами, а также в феррит-шпинелях $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$, облученных гамма-излучением [4,5].

Пусть \bar{k}_B и \bar{k}_A – средние скорости выбивания ионов металлов из термодинамически выгодных октаэдрических и тетраэдрических позиций соответственно, и образования в феррите октаэдрических и тетраэдрических вакансий с концентрациями C_V^B и C_V^A . Октаэдрические вакансии могут быть заняты ионами, находящимися в октаэдрических междоузлиях, а также ионами из тетраэдрических междоузлий. При этом чем выше температура кристалла, тем интенсивнее будет осуществляться данный процесс возврата. Такой же процесс будет происходить с тетраэдрическими вакансиями. При достаточно высоких температурах облучения ионы, сидящие в октаэдрических позициях, могут из-за флуктуаций покинуть эти позиции и перейти в тетраэдрические позиции. Это будет увеличивать C_V^B . Аналогичные процессы будут происходить в тетраэдрической подрешетке феррита, поэтому все эти процессы можно описать следующими уравнениями (1)

$$\begin{aligned}
 \frac{dC_V^A}{dt} &= Y(19) - C_V^A (\alpha_{Co}^B C_{Co}^B + \alpha_{Fe}^B C_{Fe}^B + \alpha_{Cu}^B C_{Cu}^B + \alpha_{Zn}^B C_{Zn}^B) \\
 \frac{dC_V^B}{dt} &= Y(20) - C_V^B (\alpha_{Co}^A C_{Co}^A + \alpha_{Fe}^A C_{Fe}^A + \alpha_{Cu}^A C_{Cu}^A + \alpha_{Zn}^A C_{Zn}^A) \\
 \frac{dC_{Co}^B}{dt} &= -\alpha_{Co}^B C_V^A (C_{Co}^B - C_{Co}^{BA}) + \alpha_{Co}^A C_V^B (C_{Co}^A - C_{Co}^{AB}) \\
 \frac{dC_{Co}^A}{dt} &= -\alpha_{Co}^A C_V^B (C_{Co}^A - C_{Co}^{AB}) + \alpha_{Co}^B C_V^A (C_{Co}^B - C_{Co}^{BA}) \\
 \frac{dC_{Co}^{BA}}{dt} &= \alpha_{Co}^B C_V^A (C_{Co}^B - C_{Co}^{BA}) \\
 \frac{dC_{Co}^{AB}}{dt} &= \alpha_{Co}^A C_V^B (C_{Co}^A - C_{Co}^{AB}) \\
 \frac{dC_{Fe}^B}{dt} &= -\alpha_{Fe}^B C_V^A (C_{Fe}^B - C_{Fe}^{BA}) + \alpha_{Fe}^A C_V^B (C_{Fe}^A - C_{Fe}^{AB}) \\
 \frac{dC_{Fe}^A}{dt} &= -\alpha_{Fe}^A C_V^B (C_{Fe}^A - C_{Fe}^{AB}) + \alpha_{Fe}^B C_V^A (C_{Fe}^B - C_{Fe}^{BA}) \\
 \frac{dC_{Fe}^{BA}}{dt} &= \alpha_{Fe}^B C_V^A (C_{Fe}^B - C_{Fe}^{BA})
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{Fe}^{AB}}{dt} &= \alpha_{Fe}^A C_V^B (C_{Fe}^A - C_{Fe}^{AB}) \\ \frac{dC_{Cu}^B}{dt} &= -\alpha_{Cu}^B C_V^A (C_{Cu}^B - C_{Cu}^{BA}) + \alpha_{Cu}^A C_V^B (C_{Cu}^A - C_{Cu}^{AB}) \\ \frac{dC_{Cu}^A}{dt} &= -\alpha_{Cu}^A C_V^B (C_{Cu}^A - C_{Cu}^{AB}) + \alpha_{Cu}^B C_V^A (C_{Cu}^B - C_{Cu}^{BA}) \\ \frac{dC_{Cu}^{BA}}{dt} &= \alpha_{Cu}^B C_V^A (C_{Cu}^B - C_{Cu}^{BA}) \\ \frac{dC_{Cu}^{AB}}{dt} &= \alpha_{Cu}^A C_V^B (C_{Cu}^A - C_{Cu}^{AB}) \\ \frac{dC_{Zn}^B}{dt} &= -\alpha_{Zn}^B C_V^A (C_{Zn}^B - C_{Zn}^{BA}) + \alpha_{Zn}^A C_V^B (C_{Zn}^A - C_{Zn}^{AB}) \\ \frac{dC_{Zn}^A}{dt} &= -\alpha_{Zn}^A C_V^B (C_{Zn}^A - C_{Zn}^{AB}) + \alpha_{Zn}^B C_V^A (C_{Zn}^B - C_{Zn}^{BA}) \\ \frac{dC_{Zn}^{BA}}{dt} &= \alpha_{Zn}^B C_V^A (C_{Zn}^B - C_{Zn}^{BA}) \\ \frac{dC_{Zn}^{AB}}{dt} &= \alpha_{Zn}^A C_V^B (C_{Zn}^A - C_{Zn}^{AB}) \\ \frac{dC_v^A}{dt} &= \bar{K}^A \\ \frac{dC_v^B}{dt} &= \bar{K}^B \end{aligned}$$

Здесь $C_{Co}^B, C_{Fe}^B, C_{Cu}^B, C_{Zn}^B$ – концентрация ионов в междоузлиях октаэдрической подрешетки;

$C_{Co}^A, C_{Fe}^A, C_{Cu}^A, C_{Zn}^A$ – концентрация ионов в междоузлиях тетраэдрической подрешетки;

$C_{Co}^{AB}, C_{Co}^{BA}, C_{Fe}^{AB}, C_{Fe}^{BA}, C_{Cu}^{AB}, C_{Cu}^{BA}, C_{Zn}^{AB}, C_{Zn}^{BA}$ – концентрация ионов, переходящих из октаэдрических позиций в тетраэдрические вакансии, и наоборот;

\bar{K}^A и \bar{K}^B – изменение концентрации вакансий в междоузлиях, образованных при облучении;

$Y(19)$ и $Y(20)$ – исходное значение концентрации вакансии в междоузлиях.

Коэффициенты α в уравнениях (1) определяются температурой облучения и частотой перескока ионов. Частота скачков ионов помимо температуры кристалла зависит от изменения энтропии при движении ионов, энергии миграции, числа возможных путей в решетке, по которым могут совершаться скачки ионов. Рассмотрим подробнее эти коэффициенты и параметры.

В образец феррита за время облучения t попадают $N=ISt$ бомбардирующих частиц (I – плотность потока частиц; S – облучаемая площадь). На длине свободного пробега λ_p из общего числа частиц, попавших в облучаемый объем, $N_p = \sigma_i n_i N \lambda_p$ – частиц испытывают столкновения с ионами подрешеток феррита и выбивают их из термодинамически выгодных позиций, если энергия бомбардирующих частиц выше пороговой (σ_i – сечение столкновения частицы с ионом i -сорта; n_i – число ионов i -сорта в единице объема). Следовательно, число первично выбитых атомов (ПВА) i -сорта в единице объема подрешетки феррита за время облучения t равно $N_{ПВАi} = \sigma_i n_i I t$.

Так как каждый ПВА создает в среднем τ смещений других ионов, то общее число смещенных ионов i -сорта в единице объема феррита $N_{\text{см}} = \sigma_i n_i I t (\tau + 1)$. Поэтому скорость образования вакансий ионов i -сорта, выраженная в атомных долях, определяется формулами $K_B = \sigma_B I (\tau + 1)$ и $K_A = \sigma_A I (\tau + 1)$.

В октаэдрических и тетраэдрических подрешетках феррита, например кобальт-медь-цинкового феррита, содержится различное число ионов кобальта, железа, меди и цинка. Поэтому для построения феноменологической модели образования октаэдрических и тетраэдрических вакансий в феррите нам необходимо для упрощения ограничиваться средней скоростью образования октаэдрических и тетраэдрических вакансий \bar{K}_B и \bar{K}_A вместо K_i . Это легко сделать, если известны концентрации ионов металлов в подрешетках феррита:

$$\bar{K}_B = \frac{I(\tau + 1)(\sigma_{Fe} n_{Fe}^B + \sigma_{Co} n_{Co}^B + \sigma_{Cu} n_{Cu}^B + \sigma_{Zn} n_{Zn}^B)}{n_{Fe}^B + n_{Co}^B + n_{Cu}^B + n_{Zn}^B}; \quad (2)$$

$$\bar{K}_A = \frac{I(\tau + 1)(\sigma_{Fe} n_{Fe}^A + \sigma_{Co} n_{Co}^A + \sigma_{Cu} n_{Cu}^A + \sigma_{Zn} n_{Zn}^A)}{n_{Fe}^A + n_{Co}^A + n_{Cu}^A + n_{Zn}^A}.$$

Скорость возврата ионов В-го или А-го сорта, выбитых из своих позиций, определяется коэффициентами α_{1B} или α_{1A} , которые зависят от температуры феррита и конфигурации выбитых ионов

$$\alpha_{1B} = z_A v_1^B, \quad (3)$$

где z_A – число мест вокруг октаэдрических вакансий, из которых могут вернуться ионы, выбитые из октаэдрических позиций.

Таким образом,

$v_1^i = v_0 \exp(-E_m^i / kT)$. Здесь $v_0 \approx 10^{13} \text{ c}^{-1}$, E_m^i – энергия миграции иона i -го сорта в решетке феррита. Следует иметь в виду, что $C_v^A = \sum_{i=1}^n C_i^A$, $C_v^B = \sum_{j=1}^m C_j^A$.

Коэффициент α_{2j} , определяющий скорость заполнения октаэдрических вакансий ионами, выбитыми из тетраэдрических позиций, по структуре аналогичен α_{1i} (см. (3)).

$$\alpha_{2j} = z_o^A v_2^j \quad (4)$$

Здесь z_o^A – число мест вокруг октаэдрических вакансий, из которых могут "прыгнуть" ионы, выбитые из тетраэдрических позиций. Тогда $v_2^j = v_0 \exp(-E_m^j / kT)$, где E_m^j – энергия миграции иона j -го сорта (преимущественно занимающие тетраэдрические позиции) в решетке феррита.

Коэффициент, лимитирующий скорость перехода ионов i -го сорта из октаэдрических позиций в тетраэдрические вакансии, определяется формулой:

$$\alpha_{3i}^A = z_o^A v_3^i, \quad (5)$$

где z_o^A – число путей, по которым ионы из октаэдрических позиций могут попасть в тетраэдрические вакансии.

Тогда $v_3^i = v_0 \exp(-(E_0^i + E_m^i)/kT)$. Здесь E_0^i – энергия связи ионов i -го сорта в октаэдрической подрешетке.

Коэффициенты в уравнении (2) определяются формулами, подобными (3)-(5):

$$\begin{aligned} \alpha_{Co}^B &= z_A \cdot v_0 \cdot \exp(-E_{Co}^B/kT); & \alpha_{Fe}^B &= z_A \cdot v_0 \cdot \exp(-E_{Fe}^B/kT); \\ \alpha_{Cu}^B &= z_A \cdot v_0 \cdot \exp(-E_{Cu}^B/kT); & \alpha_{Zn}^B &= z_A \cdot v_0 \cdot \exp(-E_{Zn}^B/kT); \\ \alpha_{Co}^A &= z_B \cdot v_0 \cdot \exp(-E_{Co}^A/kT); & \alpha_{Fe}^A &= z_B \cdot v_0 \cdot \exp(-E_{Fe}^A/kT); \\ \alpha_{Cu}^A &= z_B \cdot v_0 \cdot \exp(-E_{Cu}^A/kT); & \alpha_{Zn}^A &= z_B \cdot v_0 \cdot \exp(-E_{Zn}^A/kT); \end{aligned} \quad (6)$$

где z_B – число мест вокруг тетраэдрических вакансий, из которых могут вернуться ионы, выбитые из тетраэдрических позиций;

α_j^B – число мест вокруг тетраэдрических вакансий, из которых могут переместиться ионы, выбитые из октаэдрических позиций;

α_j^A – число путей, по которым ионы из тетраэдрической позиции могут попасть в октаэдрические вакансии;

E_j^A – энергия связи ионов j -го сорта в тетраэдрической подрешетке. Следует учесть, что в октаэдрических и тетраэдрических подрешетках может располагаться один и тот же набор ионов.

$$\text{Тогда } E_m^i = E_m^j, \text{ но } E_0^i \neq E_0^j.$$

В формулах, выражающих частоту скачков ионов, необходимо учитывать энтропийный множитель, показывающий изменение энтропии при движении ионов. Однако из-за большой сложности вычисления этого множителя его обычно приравнивают к единице.

Очевидно, что система уравнений (1) аналитически не решается. Наиболее приемлемым является численный метод решения с использованием современных компьютерных программ.

Нами была составлена фортрановская программа Sys_Adams_n для решения системы нелинейных уравнений, где использовались 2 метода:

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

б) Гира-метод хорд с пользовательским якобианом разделенной разности интегрированием назад.

Численный расчет производился при температурах 270-320 К, считая, что экспериментальные образцы в работе [1] облучались при комнатной температуре. Облучение производилось от источника Co^{60} с энергией 1,25 МэВ с интенсивностью дозы $I = 420$ рад/с. Расчет производился для образца объемом 1 см^3 . Эксперимент выполнялся при следующих значениях энергии связи: $E_{\text{Co}}^B = 1,676$ эВ; $E_{\text{Co}}^A = 1,656$ эВ; $E_{\text{Fe}}^B = 1,695$ эВ; $E_{\text{Fe}}^A = 1,134$ эВ; $E_{\text{Cu}}^B = 1,368$ эВ; $E_{\text{Cu}}^A = 1,828$ эВ.

Результаты исследования приведены на трехмерных рис. 2 и 3, где показаны зависимости концентраций ионов металлов (ось Z) в тетраэдрических или октаэдрических подрешетках от температуры (ось X) и дозы облучения (ось Y). При увеличении дозы облучения (см. рис. 2а) концентрация октаэдрических ионов Со уменьшается и проходит через хорошо выраженный минимум, а затем переходит на "плато", а концентрация тетраэдрических ионов Со, наоборот, проходит через максимум и переходит на "плато". Поведение концентрации ионов Fe несколько иное (рис. 3а,б). В этих кривых отсутствует как максимум, так и минимум функциональной зависимости от дозы облучения при переходе на "плато".

В $\text{Co}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррите константа магнитной анизотропии при комнатной температуре и выше, сильно зависит от концентрации ионов кобальта в октаэдрическом узле. Корреляция зависимости K_1 как с экспериментально установленной, так и с рассчитанной концентрацией ионов Со в октаэдрических узлах вскрывает связи этих параметров.

Таким образом, предлагаемая модель образования и отжига точечных дефектов в ферритах при облучении, стимулированного радиационными дефектами, позволяет получить закономерности, коррелирующие с экспериментальными результатами.

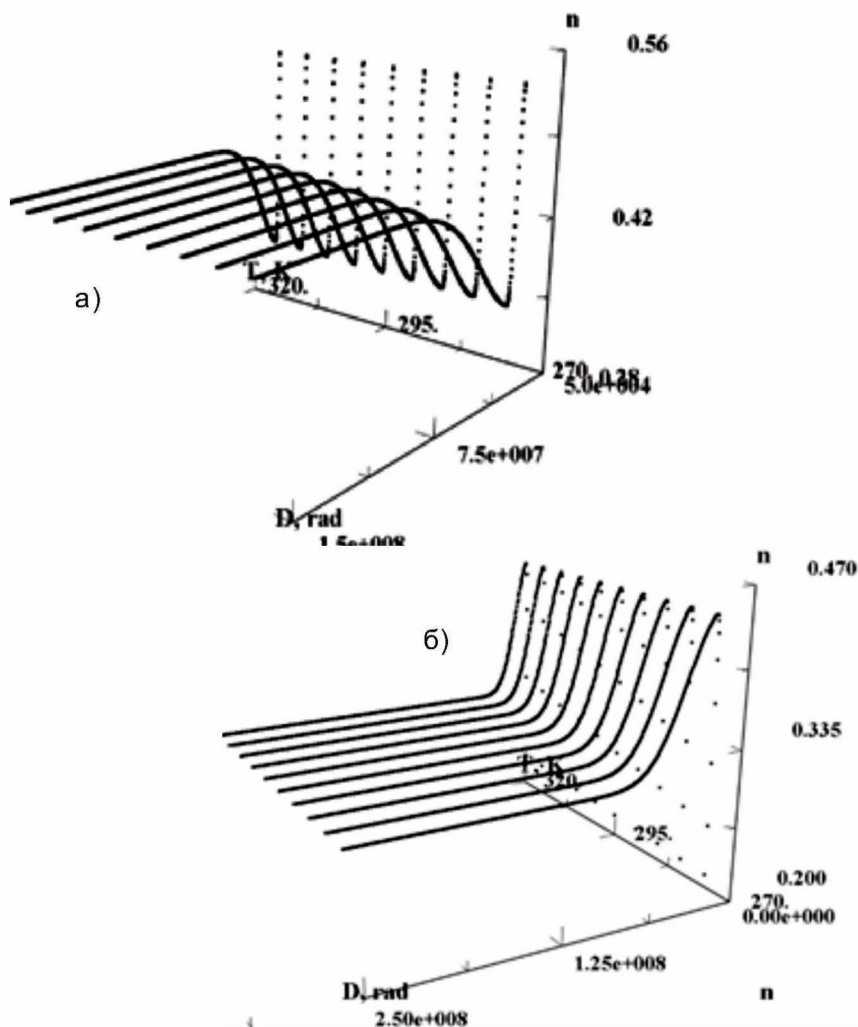


Рис. 2. Зависимости концентрации от температуры и дозы облучения для ионов кобальта (а) – октаэдрического узла и (б) – тетраэдрического узла на одну молекулу $\text{Co}_{0,60}\text{Cu}_{0,20}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита

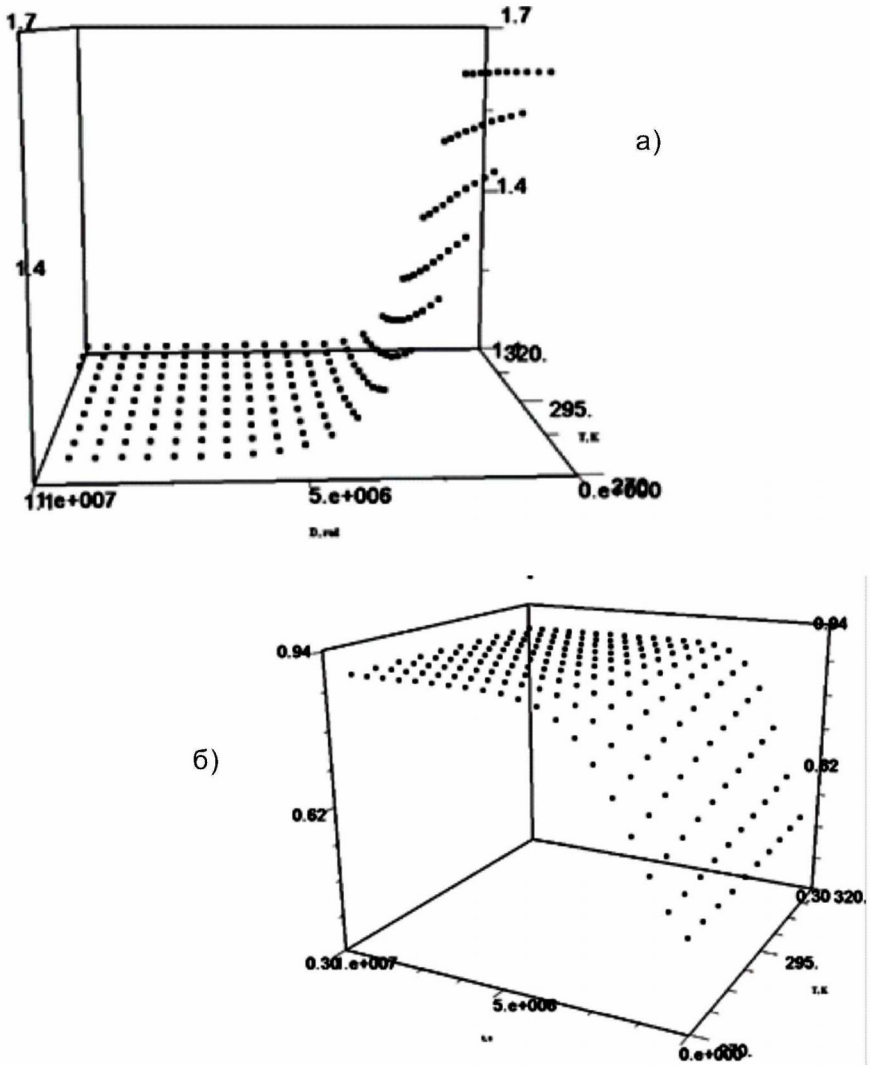


Рис. 3. Зависимости концентрации от температуры и дозы облучения для ионов железа (а) – октаэдрического узла и (б) – тетраэдрического узла на одну молекулу $\text{Co}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита

Выводы

Предложена модель образования и отжига точечных дефектов в ферритах при облучении, т. е. стимулированного радиационными дефектами. Составлены системы дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка для ее анализа.

Составлена Фортран-программа для расчета концентрации перераспределения ионов Co , Fe , Cu и Zn металлов по тетраэдрическим (А) и октаэдрическим (В) подрешеткам и выбрано аппаратное и программное обеспечение.

Обнаружены закономерности изменения концентрации октаэдрических ионов Co и хорошо выраженный минимум при увеличении дозы облучения с переходом на "плато".

Данные исследования являются теоретическими методологическими основами для моделирования комплексных решеточных моделей в параллельных квантовых алгоритмах, предлагаемых по теме № 3824/ГФ4 "Интерпретация и моделирование естественного параллелизма квантовых вычислений на современном аппаратном и программном обеспечении", финансируемой МОН РК в ННЛОТ.

Список литературы

1 Шамбулов Н.Б., Ерматов С.Е., Подкладнев В.М. Поведение первой константы магнитной кристаллографической анизотропии в монокристаллах ферритов системы $Co-Cu-Zn$, подвергнутых γ -облучению от источника Co^{60} // Изв. АН КазССР. Сер. Физико-математическая. – 1981. – № 4. – С. 67-70.

2 Искаков Б.М., Шамбулов Н.Б. Температурные зависимости подрешеточной намагниченности в многоподрешеточных ферритах-шпинелях // Тез. докл. 9-й Междунар. конф. по радиационной физике и химии неорганических материалов. – Томск, 1996. – С. 177-178.

3 Шемяков Ф.Ф., Пащенко И.П., Литовченко Ф.С., Хоряков Ф.Ф. Радиационная стойкость магниторезистивного эффекта в марганец-цинковых ферритах: Тр. 15 Междунар. совещ. //

Радиационная физика твердого тела. – М., 2005. – С. 311-313.

4 *Искаков Б.М., Шамбулов Н.Б.* Зависимость концентрации неравновесных междоузельных атомов от электронного облучения меди с примесью золота // Там же. – С. 197-201.

5 *Искаков Б.М., Сулейменова Ж.Л., Шамбулов Н.Б.* О концентрационных максимумах неравновесных точечных дефектов в облученной меди с примесью золота // Физика металлов и металлостроение, 2007. – С. 588-593.

6 *Шамбулов Н.Б.* Магнитные свойства монокристаллов ферритов системы *Co-Cu-Zn*, подвергнутых гамма-облучению: сб. тр. конф. // Радиационная физика твердого тела", г. Севастополь, 5-10 июля, 2010. – Севастополь, 2010. – 200 с.

7 *Круличка С.* Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. – М.: Наука, 1976. – Т. 1. – С. 132-136.

Шамбулов Н.Б., кандидат физико-математических наук, доцент,
e-mail: nauansh@rambler.ru

Тасболат Е.Б., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель,
e-mail: tasbolaterbolat7@gmail.com

Кусаинов А.С., кандидат технических наук, и.о.доцента PhD,
e-mail: arman.kussainov@gmail.com

Алибаева А.Г. преподаватель кафедры теоретической и ядерной физики,
e-mail: alibayeva.aidana@gmail.com