

Изменения структуры поликристаллического оксида иттрия при облучении ионами ксенона

А. Е. Соловьёва

Проведено рентгеновское исследование структуры оксида иттрия после облучения ионами ксенона с энергиями 140 и 300 кэВ. Обнаружено, что облучение ионами ксенона приводит к изменению химического состава оксида иттрия и увеличению отражательной интенсивности рентгеновских линий основной структуры оксида. Рентгеновским методом определена концентрация ионов ксенона, растворенная по глубине образца, в зависимости от энергии облучения. Обнаружено, что концентрация ионов ксенона влияет на изменение интенсивности рентгеновских отражений и уменьшение параметров элементарной ячейки оксида иттрия в зависимости от энергии облучения. Показана структурная модель растворения ионов ксенона в решетке оксида иттрия, которая объясняет образование ионной связи ксенона с атомами иттрия, кислорода и анионными вакансиями. Ионная связь атомов оксида иттрия с ионами ксенона возникает при торможении их по глубине образца оксида иттрия и приводит к образованию твердого раствора внедрения на основе оксида иттрия. Приведена математическая модель, которая объясняет увеличение отражательной рентгеновской интенсивности линий оксида иттрия.

Ключевые слова: оксид, иттрий, облучение, ксенон, структура, рентгеновское излучение, твердый раствор, энергия иона, концентрация дозы.

Введение

В работах [1–5] приводятся результаты исследований влияния облучения ионами ксенона с энергиями 140 и 300 кэВ оксидных соединений различного состава (в том числе и оксида иттрия Y_2O_3) в которых обнаружено аномальное увеличение интенсивности рентгеновских отражений от плоскостей элементарной ячейки и изменение химического состава оксидов на больших глубинах образцов. Обнаружено аномальное увеличение интенсивности рентгеновских отражений от плоскостей элементарных ячеек и в металлических соединениях на основе Ti облученных различными энергиями ионами ксенона [6].

Такие изменения свойств объясняли упругим столкновением ионов ксенона с поверхностью образцов и влиянием упругой волны, которая распространяется в образцах по глубине и приводит к

упорядочению и разупорядочению дефектов в элементарной ячейке оксидов металлов и изменению химического состава оксидов. Однако подобное объяснение изменения свойств, протекающих в материалах при облучении ионами ксенона, не может быть полным и правильным в последовательности изменения свойств материалов. Данные работы [7] показывают изменение химического состава Al_2O_3 после облучения ионами ксенона с энергией 90 МэВ.

Для получения материалов с заданными свойствами на основе оксидных тугоплавких соединений (Al_2O_3 , Se_2O_3 , Y_2O_3 , In_2O_3) и тугоплавких металлов (тантал, молибден и др.) необходимо исследовать: структуру материала, механизмы изменения структуры, последовательность появления новых фаз, которые могут возникать от различных факторов влияния на них.

Данная работа посвящена изучению и нахождению правильного решения в изменении структурных свойств образцов Y_2O_3 , облученных ионами ксенона энергиями 140, 300 кэВ с дозой (флюенсом) 5×10^{16} см⁻². Поставленная задача является актуальной, не утратила новизны в науке исследования структур кристаллов и результаты её решения могут использоваться для получения материалов с заданными свойствами и иметь практическую ценность в приборостроении для различных областей науки и техники.

Соловьёва Александра Емельяновна, консультант по структурным исследованиям, профессор, д.ф.-м.н. Сухумский физико-технический институт. Республика Абхазия, 384914, г. Сухум, Синоп, Кодорское шоссе, 665. Тел. +7(940) 935-16-71. E-mail: aesolovyeva39@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2017 г.

Материалы и методы исследования

Поликристаллические образцы оксида иттрия готовили из порошка Y_2O_3 для люминофоров (99,990), при этом прессовали в таблетки диаметром 20 мм и высотой 3–4 мм, без связки, при давлении 0,40–0,50 ГПа и температуре 25 °С. Образцы отжигали при 1800 °С в вакууме (5 часов выдержки) и затем подвергали окислению их при 1400 °С на воздухе до постоянного веса.

До и после облучения образцы оксида иттрия исследовали рентгеновскими методами. Определение фазового состава, измерение параметров элементарной ячейки, смещение линий проводили на установке ДРОН–0,5 в излучении линии K_α из медной мишени. Фазовый состав оксида иттрия определяли в диапазоне углов 10–70 по Θ . Параметры решетки определяли методом построения профилей линий по точкам. Каждый профиль линий измерялся три раза. Точность определения параметров элементарной ячейки 5×10^{-5} нм. Рентгеновская плотность оксида иттрия равна 5,019 кг/м³. Образцы до облучения и после закреплялись в держателе с фиксированным положением, что позволяло после всех операций исследовать те же положения поверхности образцов.

Толщину исследованного слоя определяли по зависимости, построенную от каждого отражения для оксида иттрия с учетом поглощения и рассеяния по глубине (рис. 1). Расчет проводили по методу суммарного ослабления рентгеновских лучей (толщина слоя ослабления рентгеновских лучей для некоторых элементов) [8, 9]. Такой подход позволяет исследовать свойства оксида по глубине.

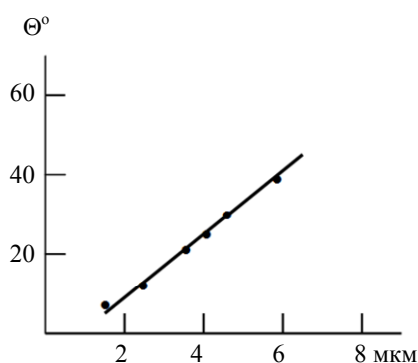


Рис. 1. Зависимость угла отражения Θ по глубине образца оксида иттрия.

Облучение образцов ионами ксенона проводили при комнатной температуре в системе с криогенным кожухом, находившимся при температуре жидкого азота. Величина дозы облучения (флюенс) – 5×10^{16} см⁻² при энергиях ионов 140 и 300 кэВ.

После облучения образцов оксида иттрия остаточные макронапряжения определяли методом гармонического анализа, при этом модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона использовали из данных, приведенных в работе [10].

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе облучения твердых тел тяжелыми ионами, такими как ксенон, важно учитывать плотность, объемную упругость твердых тел, дозу облучения и энергию ионов.

При облучении поверхности образцов оксида иттрия ионами ксенона с энергиями 140 и 300 кэВ следует учитывать, что каждый ион (в зависимости от его энергии) подвергается как упругому, так и неупругому столкновению. Упругое столкновение образует упругую волну, которая распространяется по глубине материала. Такая волна, если и образует изменения в структуре, то после её исчезновения структура должна восстановиться до исходного состояния. На практике такое явление наблюдали при возникновении шнура проводимости в оксиде индия при наложении напряжения. При малых напряжениях возникает упругая волна, при больших возникает неупругая волна, приводящая к пробою и разрушению [11].

Неупругое столкновение тяжёлых ионов (в зависимости от их энергии) с поверхностью образцов приводит к возникновению взрыва. При взрыве повышаются температура, давление на поверхности образца и, в конечном итоге, образуется ударная волна, которая распространяется в виде поперечной и продольной волн в глубину материала, затягивая ионы ксенона по инерции в каналы структуры. В зависимости от энергии облучения образцов оксида иттрия ионы ксенона тормозятся и, возможно, теряют часть валентных электронов при столкновении, причем концентрируются в разных количествах на различных глубинах, вызывая изменение химического состава оксида и его основных структурных свойств (фазовый состав, изменение параметров решетки, образование дефектов разного типа). Такие изменения материала остаются постоянными и уже не могут исчезать после облучения. Для правильного решения поставленной задачи необходимо учитывать дозу ионного потока, энергию иона, плотность и модуль объёмной упругости материала, что требуется для определения напряжений в решётке кристалла. Эти напряжения изменяются по глубине в зависимости от концентрации тормозящихся ионов.

При исследовании образцов оксида иттрия, облученных ионами ксенона с начальными энер-

гиями 140 и 300 кэВ, обнаружено, что основная объемно-центрированная кубическая (ОЦК) структура оксида иттрия сохраняется. Изменяется только фазовый состав оксида. На рентгенограммах появляются слабые линии, характерные для моноклинных модификаций оксида иттрия, а также слабые линии чистого иттрия гексагональной модификации. Уменьшаются параметры элементарной ячейки ОЦК-решетки оксида иттрия по глубине (см. рис. 2). Зафиксировано существенное уменьшение сжатия объема элементарной ячейки ОЦК-решетки оксида иттрия по глубине образца (рис. 3), при этом оказалось, что изменяются макронапряжения оксида иттрия по глубине (рис. 4). Одновременно увеличивается интенсивность рентгеновских линий по глубине образца (рис. 5).

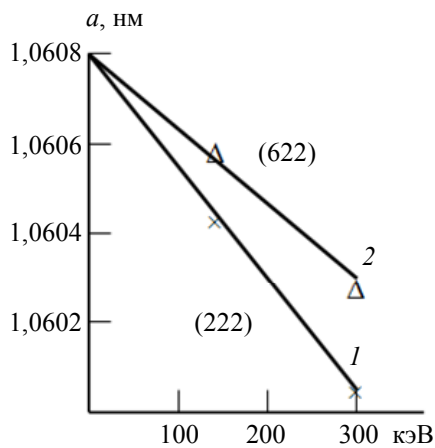


Рис. 2. Зависимость от энергии ионов ксенона параметра решетки a оксида иттрия по глубине образца: 1 – плоскость (222) на глубине 2,5 мкм; 2 – плоскость (622) на глубине 4,5 мкм.

Все изменения структуры и свойств материала оказались связанными с энергией облучения ионами ксенона. Зависимость изменения параметров ячейки оксида иттрия, рассчитанных от разных плоскостей, после облучения ионами ксенона приведена (рис. 2). Уменьшение параметра элементарной ячейки, рассчитанное для плоскости (222) на глубине 2,5 мкм, является значительным по сравнению с уменьшением параметра ячейки, рассчитанным для плоскости (622) на глубине 4,5 мкм, и этот фактор заметно зависит от энергии облучающих ионов ксенона. Вероятность такого изменения параметров решетки оксида иттрия равна $P = 0,68$. Уменьшается и объемное сжатие элементарной ячейки ОЦК-решетки оксида иттрия по глубине образца, причем это уменьшение также зависит от энергии иона ксенона (рис. 3).

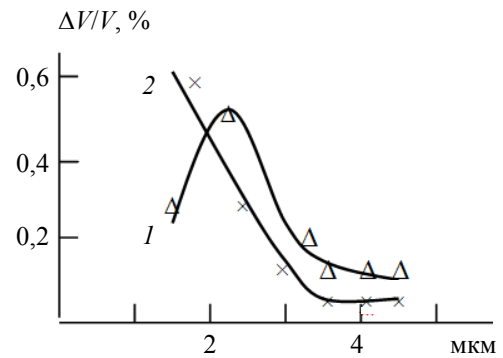


Рис. 3. Зависимость объема элементарной ячейки оксида иттрия по глубине образца от энергии облучения: 1 – 140 кэВ; 2 – 300 кэВ.

Данные рис. 2 и рис. 3 четко указывают на изменение химического состава оксида по глубине, которое связано с растворением ионов ксенона, возникающего при торможении ионов на различных глубинах в образцах. Это, естественно, оказывает существенное влияние на структурные свойства оксида иттрия. Установлено, что максимальная глубина проникновения ионов ксенона в оксид иттрия составляет 5 мкм.

Зависимость макронапряжений σ в оксиде иттрия меняется волнообразно с затухающей амплитудой колебаний по глубине образца (см. рис. 4). Наблюдаются характерные сдвиговые колебания в зависимости от энергии ионов ксенона.

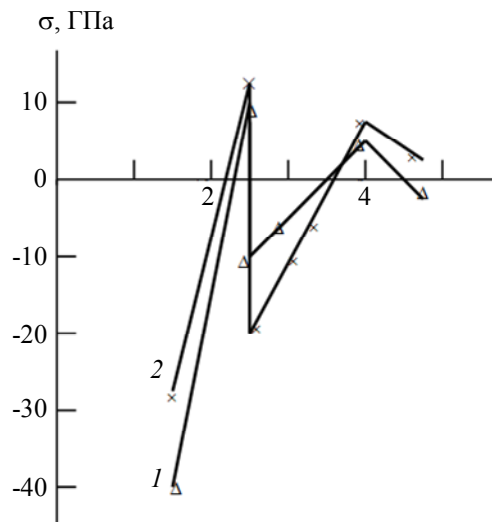


Рис. 4. Зависимость изменения макронапряжений σ в решетке оксида иттрия по глубине образца от энергии облучения: 1 – 140 кэВ; 2 – 300 кэВ.

Интенсивность отражений рентгеновского излучения от плоскостей кристаллической решетки оксида иттрия (см. рис. 5) увеличивается значительно по сравнению с эталоном (т. е. необлученным образцом), причем этот факт также зависит от начальной энергии ионов ксенона.

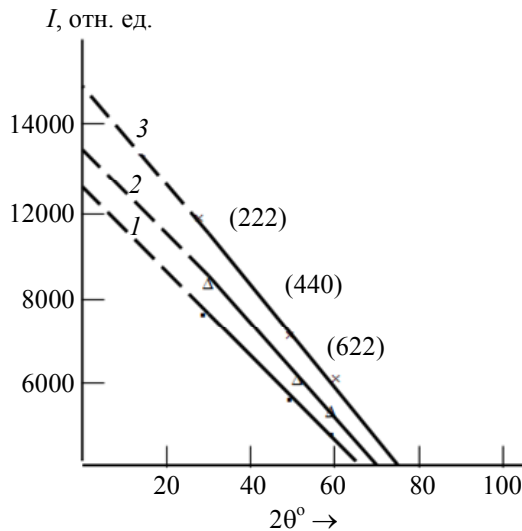


Рис. 5. Зависимость интенсивности отражения рентгеновского излучения от различных плоскостей решетки оксида иттрия по глубине образца: 1 – эталон (необлученный образец); 2 – энергия иона 140 кэВ; 3 – 300 кэВ.

Экстраполируя прямые в нулевой угол и сравнивая их с эталоном, а также зная начальный флюенс облучения, можно найти распределение дозы ионов ксенона в результате их торможения по глубине образца, причем в различных направлениях решетки. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Доза ионов ксенона по глубине образца оксида иттрия в зависимости от энергии облучения

	140 кэВ	300 кэВ
[hkl]	$c, 10^{16} \text{ см}^{-2}$	$c, 10^{16} \text{ см}^{-2}$
222	0,9	2,25
400	0,68	1,35
622	0,45	0,9
Σ	2,03	4,5
Упругое столкн.	-2,97	-0,5
P -вероятность	0,82	0,72

Согласно полученным данным, с большой вероятностью можно утверждать, что максимальная доза ионов ксенона остается в направлении отражения [222], минимальная в направлении [622]. Суммарная концентрация ионов ксенона существенно зависит от энергии облучения ионами ксенона.

Можно разделить облучение ионами ксенона на упругое и неупругое столкновение с поверхностью образцов оксида иттрия. При энергиях ионов ксенона 140 кэВ на упругое столкновение тратится доза, равная $2,97 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, а при 300 кэВ на упругое столкновение тратится доза, равная $0,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Вероятность P , просчитанная по экспериментальным данным, достаточно высокая, что позво-

ляет утверждать правильность полученных результатов по распределению ионов ксенона по глубине оксида иттрия.

Структурная модель

Для объяснения увеличения отражательной интенсивности от плоскостей оксида иттрия в зависимости от энергии облучающих ионов ксенона, рассмотрим структурную модель растворения ионов ксенона в решетке оксида иттрия, что показано на рис. 6.

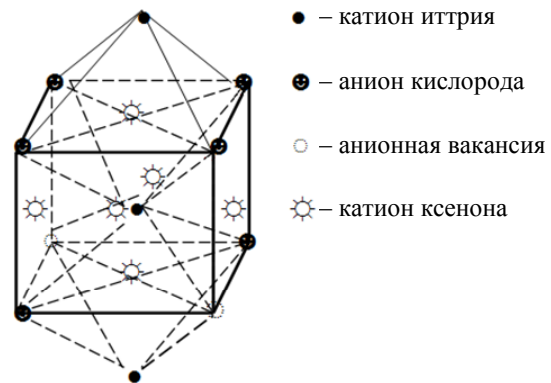


Рис. 6. Структурная модель растворения ионов ксенона в решетке оксида иттрия при ионном облучении с разными энергиями.

Неупругое столкновение ионов ксенона с поверхностью образца оксида иттрия приводит, как уже говорилось, к росту давления и температуры. Ионы ксенона распространяются в материале, имеющем высокую плотность $5,019 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ и модуль объемной упругости $\approx 80 \text{ ГПа}$. Ионы ксенона внедряются в октаэдрические пустоты в решетке оксида иттрия по плоскостям (110), (220), (111), (222). При большом давлении в решетке оксида иттрия возникает связь ионов ксенона с анионами кислорода и, возможно, с анионными вакансиями, которые являются элементами структуры оксида иттрия. Такая связь приводит к образованию соединения ксенона с кислородом, а также к образованию соединения XeO_2 с гранецентрированной кубической (ГЦК) структурой. Катионы иттрия остаются в связке с кислородом и анионными вакансиями. Следовательно, возникает анионная связь ксенона с катионами иттрия. В исходной ОЦК-решетке оксида иттрия присутствует ГЦК-структура соединения XeO_2 . Образуется твердый раствор внедрения на основе оксида иттрия с ОЦК-решеткой. Решетка такого раствора сжимается с увеличением содержания ионов ксенона в решетке оксида иттрия, что и приводит к уменьшению параметров решетки и изменению макропараметров по глубине в зависимости от

энергии облучения ионами ксенона. Такой твердый раствор внедрения на основе оксида иттрия устойчив и не распадается при комнатной температуре и исследовании образцов различными методами.

Аналогичные, но неустойчивые соединения ксенона с кислородом различных составов и с различной валентностью ксенона получили в работе [12] при давлении ≈ 83 ГПа и нагреве в среде кислорода. Авторы данной работы использовали компьютерное моделирование образования соединений ксенона с кислородом и обнаружили, что ксенон присутствует с различной валентностью в соединениях. Однако они не указывают, какие конкретно типы структуры образуются и каковы параметры их решёток, какое различие в кубических соединениях.

По приведенной рентгенограмме работы [12], представленной на рис. 7, нам удалось разделить и определить типы структур соединения состава (33 % Xe + 67 % O₂) и рассчитать параметры решёток этих структур, ионные радиусы ксенона и кислорода в них. Эти данные приведены в табл. 2.

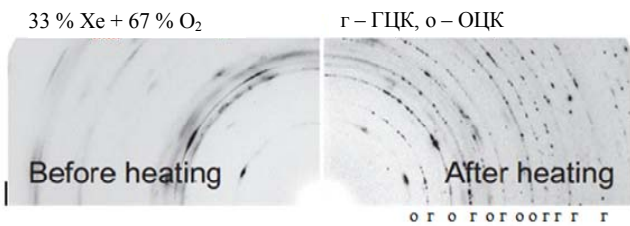


Рис. 7. Структура соединений ксенона с кислородом, полученная при высоких давлениях и нагреве в среде кислорода [12].

Таблица 2

Межплоскостные расстояния, параметры решёток, величины ионных радиусов ОЦК - и ГЦК-структур (соединение 33 % Xe + 67 % O₂) [12]

hkl	ОЦК	hkl	ГЦК
	<i>d</i> , нм		<i>d</i> , нм
110	0,2590	111	0,2628
200	0,1828	200	0,2304
211	0,1491	220	0,1628
220	0,1292	310	0,1458
310	0,1157	222	0,1370
		400	0,1152
		410	0,1117
<i>a</i> , нм	0,3656	<i>a</i> , нм	0,4607
<i>r</i> _{Xe} , нм	0,1828	<i>r</i> _{Xe} , нм	0,1633
<i>r</i> _O , нм	0,1376	<i>r</i> _O , нм	0,1340

Фазовый состав данного соединения состоит в основном из гранцентрированной кубической (ГЦК) структуры типа CaF₂ химического состава

Xe O₂ и (в небольшом количестве) ОЦК-структуры типа CsCl, возможно, химического состава Xe O.

Вероятней всего, (по данным табл. 2) можно предположить, что при увеличении температуры и давления возникает на первом этапе ОЦК-структура, которая переходит в ГЦК-структуру. В ГЦК-структуре ионы ксенона и кислорода находятся в сжатом состоянии, их размеры значительно уменьшаются, в данном соединении возникает ионная связь. Эти соединения распадаются при снижении давления.

Кубическую структуру ксенона получили при температуре -112 °С, параметр решётки, которой $a = 0,347$ нм [13].

Можно утверждать, что в решётке оксида иттрия растворяется такая же ГЦК-фаза химического состава XeO₂, которая возникает при торможении ионов ксенона в решётке оксида иттрия и приводит к изменению физических свойств.

Волновое изменение макронапряжений в образцах оксида иттрия после облучения ионами ксенона разными энергиями и аномальное увеличение интенсивности отражений от плоскостей решётки оксида иттрия по глубине указывают на сложный механизм воздействия облучения на структуру оксида иттрия. Этот механизм можно объяснить с помощью относительной вероятности, анализируя изменения интегральной интенсивности отражений от плоскостей элементарной ячейки до и после облучения по глубине образца. Действительно, каждая плоскость решётки оксида иттрия отражает постоянный поток фотонов (α_1 и α_2 частиц) Cu K α -излучения с длиной волны $\lambda = 0,1540$ нм. Такой поток частиц можно представить следующей зависимостью:

$$N(x) = \frac{I(x)}{h\nu(x)}, \tag{1}$$

где $N(x)$ – поток фотонов на глубине x образца, отражённый от каждой плоскости решётки оксида иттрия; $I(x)$ – интенсивность потока; $\nu(x)$ – частота колебаний рентгеновского излучения; h – постоянная Планка. Частоту колебаний излучения можно определить по формуле:

$$\nu(x) = \frac{c}{\lambda}, \tag{2}$$

где c – скорость света; λ – длина волны излучения [14].

Проанализируем увеличение интенсивности отражений от плоскостей (222) решётки оксида иттрия в зависимости от энергии облучения ионами ксенона. Результаты представлены в табл. 3. Полученные расчеты показывают, что количе-

ственно отраженный поток фотонов от плоскости остается постоянным, меняются только частота, длина волны излучения и, соответственно, энергия фотона.

Таблица 3

Результаты анализа отражений от плоскости (222) в решётке оксида иттрия на глубине 2,5 мкм в зависимости от энергии облучения ионами ксенона

Параметры	эталон	140 кэВ	300 кэВ
ν – частота колебаний, 10^{17} Гц	19,46	22,38	27,15
Поток фотонов, 10^{17} имп./с	67	67	67
λ – длина волны, 10^{-9} м	0,154	0,134	0,111
Энергия фотона, кэВ	8,05	9,25	11,16

В отражениях от плоскостей решётки оксида иттрия по глубине меняется только величина потока фотонов (для направления отражений [440] величина потока уменьшается до 33×10^{17} фотон/с), а частота и длина волны имеют аналогичные значения, что указывает на целостность ядер атомов в решётке оксида иттрия. Все изменения в интенсивности отражений от плоскостей в решётке оксида иттрия указывают на вынужденные колебания, связанные с возбуждением валентных электронов ксенона и переходом их на электронные орбиты кислорода, на электронные орбиты иттрия. При таком переходе излучается фотон с большей частотой и меньшей длиной волны. Поток фотонов, отраженный от плоскости решётки эталона и отражённый от плоскости решётки облученных образцов, одинаковый, но интенсивность увеличена за счет увеличения энергии фотонов.

Заключение

Показано, что при облучении образцов оксида иттрия U_2O_3 ионами ксенона с энергиями 140 или 300 кэВ основная кубическая структура оксида иттрия сохраняется. Однако в смеси присутствуют фазы малых концентраций моноклинных модификаций и чистого иттрия. Столкновение ионов ксенона с поверхностью образца оксида иттрия приводит к торможению ионов ксенона в решётке ок-

оксида иттрия по глубине образца с изменением флюенса потока. Ионы ксенона внедряются в октаэдрические пустоты решётки, связываются с катионами иттрия, анионами кислорода, анионными вакансиями с образованием твердого раствора внедрения оксида иттрия. Приведена структурная модель растворения ионов ксенона в оксиде иттрия. Проведен расчет и сравнительный анализ литературных данных [12] образования соединения ксенона с кислородом кубических модификаций, причем обнаружено изменение ионных радиусов ксенона и кислорода. Представлена математическая модель, объясняющая увеличение интенсивности рентгеновских отражений от плоскостей решётки оксида иттрия с содержанием ионов ксенона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Соловьёва А. Е. // Физика и химия обработки материалов. 1989. № 6. С. 25.
2. Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Соловьёва А. Е. // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 6. С. 5.
3. Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Соловьёва А. Е. // Физика и химия обработки материалов. 1992. № 1. С. 16.
4. Solovyova A. E. / Second international conference "Nan materials: Applications. Properties" (Alushta. 2012). Vol. 2. No. 4. P. 04PITISE. 11.
5. Solovyova A. E. // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High Technology Plasma Processes. 2016. Vol. 20. No. 2. P. 107.
6. Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Неклюдов И. М., Соловьёва А. Е. // Радиационные материалы. 1990. Т. 7. С. 265.
7. Zirour H., Izerrouken M., Sari A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015. Vol. 365. Part A. P. 269.
8. Миркин Л. И. Справочник по структурному анализу поликристаллов. – М.: Издательство ФМЛ, 1961.
9. Уманский Л. С. Рентгенография металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1960.
10. Самсонов Г. В. Физико-химические свойства оксидов. – М.: Металлургия, 1978.
11. Соловьёва А. Е. // Физика и техника полупроводников. 1992. Т. 26. № 3. С. 408.
12. Dewaele A., Worth N., Pickard C. J., Needs R. J., Pasquarelli S., Mathon O., Retsuo irifune M. M. // Nature Chemistry. 2016. Vol. 8. P. 784.
13. Богдан Т. В. Кристаллические структуры простых веществ – неметаллов. – Баку: МГУ. Хим. Факультет, 2015.
14. Постников В. С. Физика и химия твердого состояния. – М.: Металлургия, 1978.

Modeling of the mechanism of changing the structure of polycrystalline yttrium oxide upon irradiation with xenon ions

A. E. Solovyeva

Sukhumi Physico-Technical Institute
665 Kodorskoe sh., Sinop, 384914, Sukhum, Abkhazia
E-mail: aesolovyeva39@gmail.com

Received September 29, 2017

The structure of yttrium oxide after irradiation with xenon ions with energies of 140 and 300 keV was study X-ray methods. It was found, that irradiation with xenon ions leads to a change in the chemical composition of yttrium oxide and to an increase in the reflective intensity of the x-ray lines of the basic structure of the oxide. X-ray method determined the concentration of xenon ions, dissolved in the depth of the sample, depending on the irradiation energy. It was found that the concentration of xenon ions influent on the change in the intensity of X-ray reflections and the decrease in the parameters of the unit cell of yttrium oxide as a function of the irradiation energy. A structural model for the dissolution of xenon ions in the yttrium oxide lattice is shown, which explains the formation of the ionic bond of xenon with yttrium, oxygen and anion vacancies. The ionic bond of atoms of the yttrium oxide with xenon ions arises when the xenon ions braked in depth of sample of the yttrium oxide and leads to the formation of a solid solution introduction of yttrium oxide. A mathematical model is presented that explains the increase in the reflective x-ray intensity of lines of the yttrium oxide.

Keywords: oxide, yttrium, irradiation, xenon, structure, X-ray radiation, solid solution, ion energy, dose concentration.

REFERENCES

1. E. M. Diassamidze, V. L. Markov, and A. E. Solovyova, Physics and chemistry of material processing. No. 6, 25 (1989).
2. E. M. Diasamidze, V. L. Markov, and A. E. Solovyova, Physics and chemistry of material processing. No. 6, 5 (1991).
3. E. M. Diasamidze, V. L. Markov, and A. E. Solovyova, Physics and chemistry of material processing. No. 1, 16 (1992).
4. A. E. Solovyova, in *Proceedings of the Second International onference "Nan materials: Applications. Properties"* (Alushta, 2012). Vol. 2. No. 4. P. 04PITISE. 11
5. A. E. Solovyova, High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High Technology Plasma Processes. **20** (2), 107 (2016).
6. E. M. Diasamidze, V. L. Markov, I. M. Neklyudov, and A. E. Solovyova, Radiatis. Materialy 7, 265 (1990).
7. H. Zirour, M. Izerrouken, and A. Sari, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. **365**, part A, 269 (2015).
8. L. I. Mirkin, *Handbook of Structural Analysis of Polycrystals* (FML, Moscow, 1961) [in Russian].
9. L. S. Umansky, *X-ray Diffraction of Metals and Semiconductors* (Metallurgy, Moscow, 1960) [in Russian].
10. G. V. Samsonov, Physico-Chemical Properties of Oxides (Metallurgy, Moscow, 1978) [in Russian].
11. A. E. Soloveva, Semiconductors **26** (3), 408 (1992).
12. A. Dewaele, N. Worth, C. J. Pickard, R. J. Needs, S. Pascarelli, O. Mathon, and M. M. Retsuo irifune, Nature Chemistry **8**, 784 (2016).
13. T. V. Bogdan, *The Crystalline Structures of Simple Substances – Non Metals* (MGU, Baku, 2015) [in Russian].
14. V. S. Postnikov, *Physics and Chemistry of Solid State* (Metallurgy, Moscow, 1978) [in Russian].