

Изменения структуры поликристаллического ниобия при облучении его ионами ксенона различных энергий

А. Е. Соловьёва

Исследование изменения структуры поликристаллического ниобия, после облучения ионами ксенона с энергиями 80, 140, 300 кэВ проводили рентгеновскими методами в излучении Си ($K\alpha$). Обнаружено, что кубическая ОЦК-структура ниобия сохраняется, дополнительные сверхструктурные рентгеновские линии, нехарактерные для структуры ниобия, отсутствуют. Облучение ионами ксенона приводит к изменению химического состава ниобия, уменьшению параметров элементарной ячейки, увеличению отражательной интенсивности рентгеновских линий основной структуры ниобия, увеличению макронапряжений в решетке ниобия. Рентгеновским методом определена концентрация ионов ксенона, растворенных по глубине образца, в зависимости от энергии облучения. Приведена структурная модель растворения ионов ксенона в решетке ниобия, которая объясняет образование металлической связи ксенона с атомами ниобия. Связь между атомами ниобия и ксенона возникает при торможении ионов по глубине образца, что приводит к образованию твердого раствора замещения на основе ниобия и дефектов, возникающих при смещении атомов ниобия в тетраэдрические пустоты. Определены изменения радиуса ксенона в твердом растворе замещения на основе ниобия в зависимости от энергии ионов облучения. Приведена математическая модель, которая объясняет увеличение отражательной рентгеновской интенсивности линий твердого раствора замещения на основе ниобия с различными концентрациями ксенона. Обнаружен переход рентгеновского α -излучения в γ -излучение.

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

Введение

В настоящее время в различных областях науки и техники быстро расширяется применение ниобия (Nb). Это обусловлено сочетанием таких его свойств, как тугоплавкость, малое сечение захвата тепловых нейтронов, способность образовывать жаропрочные, сверхпроводящие и др. сплавы, коррозионная стойкость, геттерные свойства, низкая работа выхода электронов, хорошая обрабатываемость давлением на холоде, легкая свариваемость и т. п. Сегодня основные области применения ниобия: ракетостроение, авиационная и

космическая техника, радиотехника, электроника, химическое аппаратостроение, атомная энергетика. Одновременно продолжают исследования по модификации свойств ниобия под воздействием различных физических и химических факторов в интересах расширения границ его применения.

Среди изучаемых физических методов воздействия важную роль играют лазерные и ионные облучения образцов поликристаллического ниобия. Если лазерный пучок воздействует на вещество в основном посредством сильного локального нагрева, то пучок тяжелых ионов может оказывать не только значительное термическое действие, но и механическое действие. Действительно, посредством столкновений ионов и ядер отдачи с ядрами облучаемого вещества, т. е. Nb, пучок ускоренных ионов воздействует непосредственно на кристаллическую решетку Nb и, что особенно важно, может изменять его химический состав по заранее заданной программе.

В этом плане наиболее перспективным методом выглядит облучение ниобия тяжелыми ионами, например, такими как ионы ксенона (Xe^+).

Соловьёва Александра Емельяновна, консультант по структурным исследованиям, профессор, д.ф.-м.н. Государственное НПО «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 22 февраля 2018 г.

Применительно к данному направлению исследований в научной литературе существует относительно немногочисленная информация. Так, в работах [1–3] приводятся результаты проникновения ионов ксенона на глубину тугоплавких металлов (V, Mo, U) при облучении ионами ксенона больших энергий. Авторы работы [2] для исследования влияния облучения ионами ксенона с энергией 124 МэВ поликристаллических образцов ванадия (с последующими отжигами образцов при температурах 450–925 К) использовали рентгеновское излучение Co и наблюдали упрочнение поликристаллического ванадия.

Облучение ионами ксенона монокристалла молибдена приводит на глубине 0,7 мкм к существенному сжатию решетки [3]. Авторы данных работ не анализировали изменения интенсивности рентгеновских отражений в облученных образцах, а исследовали только смещение рентгеновских линий.

В работе [4], посвященной исследованию структурных свойств металлических соединений на основе Ti, после облучения ионами ксенона разных энергий было обнаружено аномальное увеличение интенсивности рентгеновских отражений от плоскостей элементарных ячеек. Аномальное увеличение интенсивности рентгеновских отражений от плоскостей элементарных ячеек в оксидных соединениях, облученных ионами ксенона, обнаружено также в работах [5–10].

Данные вышеприведенных работ указывают на сходный механизм изменения свойств металлов, так и оксидных соединений после облучения тяжелыми ионами ксенона. Но даже представленная немногочисленная информация о воздействии тяжелых ионов ксенона при облучении тугоплавких металлов указывает на новизну и актуальность получения этим методом радиационных композиций металлов в интересах расширения возможностей их использования в технике приборостроения.

Важно отметить, что нами не обнаружена в литературе информация об изменении структурных свойств поликристаллического ниобия при облучении его ионами ксенона. Поэтому целью данной работы являлось изучение механизма изменения структурных свойств поликристаллических образцов ниобия, облученных ионами ксенона с энергиями 80, 140 и 300 кэВ, причем с интегралом по времени от плотности потока частиц (флюенсом) на уровне $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Материалы и методы исследования

Из брусков поликристаллического ниобия марки МВ (99,8) вырезали образцы объемом $0,01 \text{ м}^3$.

Образцы шлифовали, полировали и отжигали в вакууме для снятия остаточных напряжений. До и после облучения образцы ниобия исследовали рентгеновскими методами в излучении Cu ($K\alpha$), а именно, определяли фазовый состав, проводили измерение параметров решетки, фиксировали смещение рентгеновских линий, Фазовый состав ниобия определяли в диапазоне углов 10–70 градусов 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. Параметр элементарной ячейки исходного ниобия $a = 0,33195$ нм, радиус катиона ниобия $r_{\text{Nb}} = 0,14375$ нм, рассчитанный по ближайшему расстоянию между атомами ниобия. Данная величина атомного радиуса ниобия совпадает с данными работы [11].

Рентгеновская плотность, определенная для данной марки ниобия, равна $8,63 \text{ кг/м}^3$. 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 ниобия с учетом поглощения и рассеяния по глубине. Пример такой зависимости представлен на рис. 1. Расчет проводили по методу суммарного ослабления рентгеновских лучей (т. е. с учетом толщины слоя ослабления рентгеновских лучей для некоторых элементов) [12, 13]. Такой подход позволяет исследовать свойства ниобия по глубине образца. Естественно, при расчете глубины проникновения рентгеновских лучей в исследуемый материал необходимо учитывать длину волны, коэффициенты поглощения, рассеяния, характерные для данного материала. При исследовании материала глубина проникновения d рентгеновских лучей и наклон прямой (рис. 1) будет меняться в зависимости от использования длины волны рентгеновского излучения.

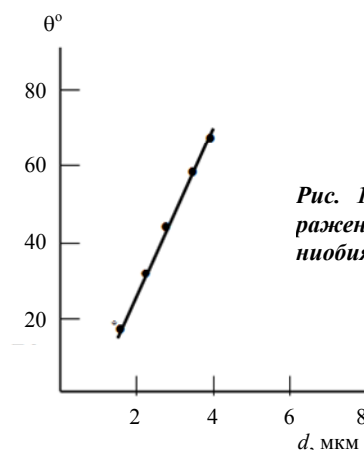


Рис. 1. Зависимость угла отражения θ по глубине d образца ниобия.

Облучение образцов ниобия проводили при комнатной температуре в системе с криогенным кожухом, находящихся при температуре жидкого азота. Как уже было сказано, флюенс каждого пучка ионов составлял величину $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, но энергии ионов равнялись 80, 140 и 300 кэВ.

Макронапряжения в образцах ниобия после облучения определяли методом гармонического анализа. Модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона использовали из данных, приведенных в работе [14].

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе облучения твердых тел тяжелыми ионами, такими как ксенон, важно учитывать плотность, объемную упругость твердых тел, дозу (флюенс) облучения и энергию ионов. При облучении поверхности образцов ниобия ионами ксенона с энергиями 80, 140, 300 кэВ каждый ион, в зависимости от его энергии, испытывает или упругое, или неупругое столкновение.

Упругое столкновение образует упругую волну, которая распространяется по глубине материала. Упругая волна, если и образует изменения в структуре, то после её исчезновения структура должна восстановиться до исходного состояния [15].

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 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 Nb, ионы ксенона тормозятся и, возможно, теряют часть валентных электронов при столкновении, далее они концентрируются в разных количествах на различных глубинах. Механизм такого торможения ионов ксенона связан с электронами как ксенона, так и электронами ниобия. При потере валентных электронов ксенона при неупругом столкновении атомный радиус ксенона должен уменьшаться.

Кубическую ГЦК-структуру ксенона получили при температуре $-112 \text{ }^\circ\text{C}$, параметр решётки здесь равен $a = 0,347 \text{ нм}$ [16]. Если рассчитать атомный радиус ксенона для такой решетки, то получаем значение атомного радиуса ксенона, равное $0,1239 \text{ нм}$. При охлаждении атомов ксенона происходит сжатие атомов, приводящее к образованию дальнего порядка и возникновению кристаллической решетки, причем количество валентных электронов атома ксенона не должны меняться. В такой решетке величина атомного радиуса ксенона уменьшается.

Уменьшение атомного радиуса и изменение валентных электронов ксенона при сжатии атомов ксенона и нагреве в среде кислорода наблюдали в работе [17]. Кристаллизация атомов ксенона происходит как при охлаждении (решетка сжимается), так и при давлении в среде кислорода и нагреве. При этом ксенон вступает в реакцию с кислородом, т. е. образуется кристаллическая решетка химических соединений. Такие соединения распадаются при уменьшении давления. Следовательно, ионный радиус ксенона может меняться в интервале $0,244\text{--}0,1239 \text{ нм}$ в зависимости от условий взаимодействия с различными веществами [11, 16–18].

Неупругое столкновение ионов ксенона с поверхностью образцов ниобия должно приводить к изменению параметров решетки, химического состава ниобия, образованию дефектов в решетке разного типа. Такие изменения материала должны оставаться постоянными и не исчезать после облучения. Для правильного решения поставленной задачи необходимо учитывать флюенс ионного пучка, энергию иона, плотность и модуль объемной упругости материала для определения напряжений в решетке кристалла, которые изменяются по глубине образца в зависимости от концентрации тормозных ионов.

При исследовании образцов ниобия после облучения энергиями ксенона 80, 140 и 300 кэВ обнаружено, что основная кубическая ОЦК-структура ниобия сохраняется, появление новых рентгеновских линий, отличных от ниобия, не наблюдали при всех указанных энергиях облучения образцов. Уменьшаются параметры элементарной ячейки кубической ОЦК-решетки ниобия по глубине образца в зависимости от энергии облучения (см. рис. 2). На глубине образца ниобия $1,75 \text{ мкм}$,

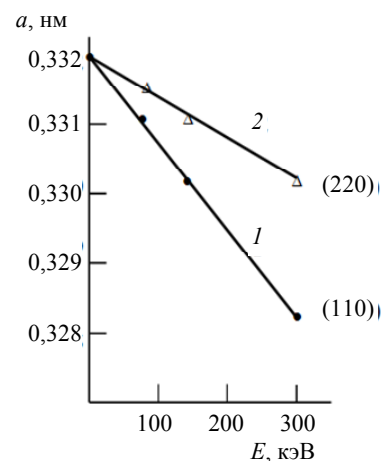


Рис. 2. Зависимость параметра a решетки ниобия от энергии иона E для разных плоскостей решетки: 1 — плоскость (110), 2 — плоскость (220).

что соответствует отражений от плоскости (110), параметр элементарной ячейки уменьшается зна-

чительно по сравнению с уменьшением параметра элементарной ячейки на глубине 2,75, что соответствует отражений от плоскости (220).

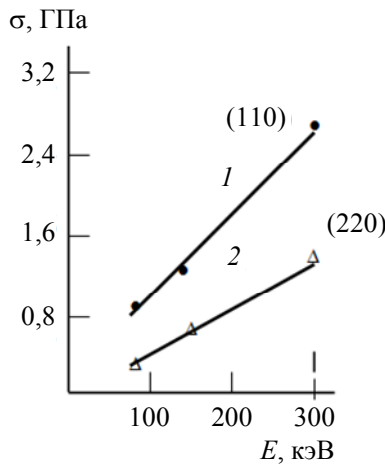


Рис. 3. Зависимость изменения макронапряжений σ в решётки ниобия от энергии облучения E для разных плоскостей: 1 – плоскость (110), 2 – плоскость (220).

Данные результаты указывают на изменение химического состава ниобия по глубине, связанного с растворением ксенона в решетке ниобия и образованием твердого раствора. Изменяются также макронапряжения ниобия по глубине образца в зависимости от энергии облучения (см. рис. 3). Видно, что макронапряжения в решетке ниобия увеличиваются с ростом энергии облучения образцов ионами ксенона.

Максимальное напряжение 2,6 ГПа в решетке твердого раствора на основе ниобия достигается на глубине 1,75 мкм, а на глубине 2,75 мкм составляет 1,2 ГПа при облучении образцов ионами ксенона с энергией 300 кэВ.

Следует отметить увеличение интенсивности отражений рентгеновских линий от плоскостей решетки ниобия по глубине образца в зависимости от энергий облучения ионами ксенона, что продемонстрировано на рис. 4. Экстраполируя прямые зависимостей интенсивностей отражений от плоскостей решетки ниобия в нулевой угол, можно по относительной интенсивности с эталоном, зная дозу (флюенс) облучения, найти концентрацию ионов ксенона, образовавшихся в результате торможения их в направлениях решётки по глубине образца (см. табл. 1). Аналогичные расчеты мы ранее проводили в работе [18], но там определяли характеристики взаимодействия оксида иттрия с ионами ксенона при облучении.

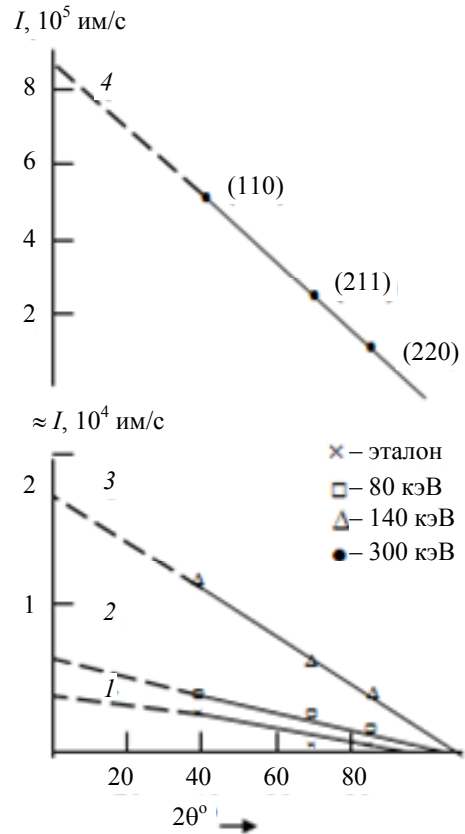


Рис. 4. Зависимость интенсивности отражения (в единицах импульс/с) от плоскостей решетки ниобия по глубине образца: 1 – эталон (необлученный образец), 2 – 80 кэВ, 3 – 140 кэВ, 4 – 300 кэВ.

Таблица 1

Зависимость концентрации с доз ионов ксенона, распределенных в ниобии по глубине образца, от энергии облучения

	80 кэВ	140 кэВ	300 кэВ
[hkl]-плоскость	c_s 10^{16} см^{-2}	c_s 10^{16} см^{-2}	c_s 10^{16} см^{-2}
110	0,75	1,75	2,97
211	0,25	1,125	1,25
220	0,15	0,45	0,78
Σ	1,15	3,375	5
	-3,85	-1,625	
P-вероятности	0,59	0,66	0,75
$r_{Xe, \text{HM}}$	0,14344	0,14175	0,14051

По суммарной дозе (флюенсу) облучения ниобия ионами ксенона можно разделить упругие и неупругие столкновения ионов ксенона с решеткой ниобия. Увеличение вероятностей, просчитанных по экспериментальным данным, указывает на правильность нахождения растворимой дозы ионов ксенона по глубине образца ниобия при облучении ионами ксенона разных энергий. При облучении образцов ниобия ионами ксенона с энер-

гией 80 кэВ на упругое столкновение тратится доза $3,85 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, а доза (флюенс) $1,15 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ проникает в глубину образца, т. е. здесь столкновения неупругие. Увеличение энергии ионов ксенона 140 кэВ при облучении образцов ниобия приводит к росту неупругого столкновения, а также к полному внедрению ионов ксенона по глубине образца ниобия при облучении 300 кэВ.

Зависимость изменения параметра элементарной ячейки ниобия от растворимой добавки ксенона на различной глубине приведены на рис. 5 и 6. Прямолинейная зависимость параметра элементарной ячейки ниобия от концентрации растворимой дозы ксенона по глубине образца указывает на образование твердого раствора замещения.

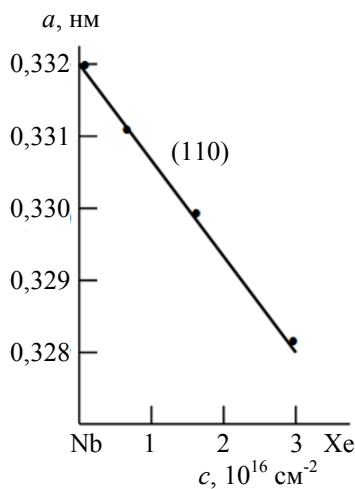


Рис. 5. Зависимость параметра a решётки в ниобии от растворимой дозы ксенона для плоскости (110) на глубине образца 1,75 мкм.

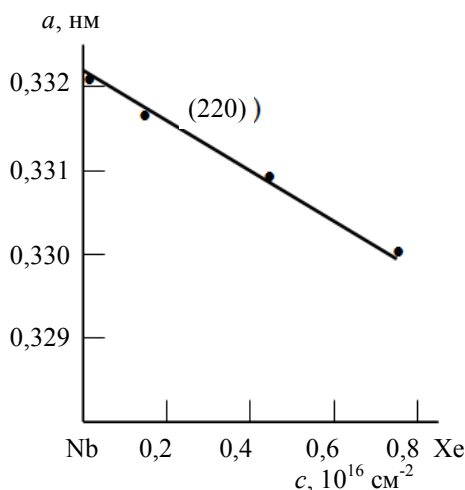


Рис. 6. Зависимость параметра решётки a в ниобии от растворимой дозы ксенона для плоскости (220) на глубине образца 2,75 мкм.

Наклоны прямолинейной зависимости параметра решетки ниобия с различными концентра-

циями ксенона по глубине образца разные, что указывает на изменение химического состава ниобия по глубине образца. Вероятность образования твердого раствора замещения на глубине образца 1,75 мкм, равна $P = 0,81$, что соответствует изменению химического состава ниобия в плоскости (110) от концентрации дозы ксенона, а на глубине 2,75 мкм, что соответствует изменению химического состава в плоскости (220), вероятность уже равна 0,78. Небольшое различие вероятностей образования твердого раствора замещения, образованного по глубине образца, связано с разной дозой ксенона в решетке ниобия и неодинаковым наклоном прямых зависимостей параметра решетки.

Согласно данным результатам, можно утверждать, что при облучении образцов ниобия ионами ксенона разными энергиями торможение ионов ксенона приводит к образованию твердого раствора замещения, так как структура ОЦК ниобия сохраняется, т. к. нет дополнительных рентгеновских отражений, но изменяются химический состав, параметры элементарных ячеек, макронапряжения. Образование твердого раствора замещения можно представить следующей моделью.

Структурная модель образования твердого раствора замещения на основе ниобия с растворимыми ионами ксенона, представленная на рис. 7, показывает механизм торможения ионов ксенона в плоскости (110) решетки ниобия. Центральный атом ниобия в плоскости (110) слабее связан с другими атомами ниобия. При торможении ион ксенона смещает центральный атом ниобия в решетке ниобия в тетраэдрические позиции (размеры этих позиций позволяют разместить атомы ниобия) и занимает его место. В результате возникает металлическая связь иона ксенона с атомами ниобия. Смещенные атомы ниобия в тетраэдрических позициях решетки являются дефектами типа Френкеля.

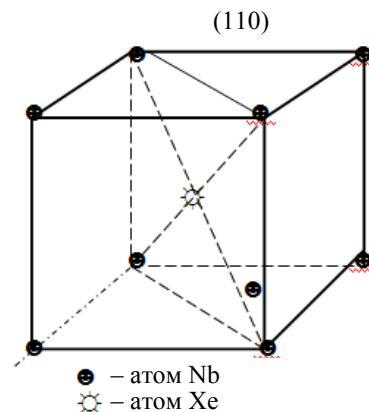
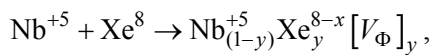


Рис. 7. Структурная модель образования твердого раствора замещения на основе ниобия при облучении ионами ксенона разных энергий.

По изменениям параметра решетки такой ячейки, образованной при облучении ионами ксенона с разными энергиями, можно рассчитать изменение радиусов ниобия и ксенона.

Атомный радиус ниобия в такой композиции остается равным $r_{\text{Nb}} = 0,14375$ нм, а радиус ксенона уменьшается в зависимости от энергии облучения (см. табл. 1). Уменьшение параметра решетки твердого раствора замещения связано с разницей атомных радиусов ниобия и ксенона, т. е. происходит сжатие решетки и рост макронапряжения. Эти различия могут возникать при торможении по глубине ионов ксенона в решетке ниобия в основном за счет потери валентных электронов.

Образованный твердый раствор на основе ниобия, с различными дозами растворения ксенона, содержит дефекты типа Френкеля и может иметь следующий химический состав:



где y – концентрация ионов ксенона в твердом растворе; $[\text{V}_\Phi]$ – смещенные атомы ниобия в тетраэдрические пустоты, т. е. дефекты типа Френкеля; x – изменение числа валентных электронов в атоме ксенона.

Интенсивность отражений от плоскостей кристаллической решетки ниобия увеличивается по сравнению с эталоном незначительно при облучении ионами ксенона 80 кэВ (см. рис. 4). Но при облучении образцов ниобия ионами ксенона энергиями 140 и 300 кэВ интенсивность отражений рентгеновских линий увеличивается на порядки.

Изменение макронапряжений в образцах ниобия после облучения ионами ксенона разными

энергиями и аномальное увеличение интенсивности отражений от плоскостей решетки ниобия по глубине указывают на сложный механизм воздействия облучения на структуру. Этот механизм можно объяснить с помощью относительной вероятности, анализируя изменения интегральной интенсивности отражений от плоскостей элементарной ячейки до и после облучения по глубине образца. Каждая плоскость решетки ниобия отражает постоянный поток фотонов (α_1 и α_2 частиц) от Си (K α)-излучения с длиной волны $\lambda = 0,1540$ нм. Такой поток частиц можно представить следующей зависимостью

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

где $N(x)$ – поток фотонов на глубине (x) образца, отраженный от каждой плоскости решетки ниобия; $I(x)$ – интенсивность потока; $\nu(x)$ – частота колебаний фотонов; h – постоянная Планка. Частоту колебаний фотонов по глубине образца можно определить по формуле

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

где c – скорость света, λ – длина волны излучения [19].

В табл. 2 представлены результаты теоретического анализа интенсивности отражений от плоскостей (110) решетки в зависимости от энергии облучения ионами ксенона. Расчеты показывают, что отраженный поток фотонов от плоскости количественно остается постоянным, однако меняются частота, длина волны, энергия фотона.

Таблица 2

Результаты анализа отражений от плоскости (110) в решетке ниобия на глубине 1,75 мкм в зависимости от энергии E облучения ионами ксенона

Параметры излучения	Эталон	$E = 80$ кэВ	$E = 140$ кэВ	$E = 300$ кэВ
ν – частота колебаний, 10^{17} Гц	19,46	41,04	225,1	8653,7
Поток фотонов, 10^{16} имп. с/Дж	87,3	87,3	87,3	87,3
λ – длина волны, 10^{-9} м	0,1541	0,0732	0,0133	0,00035
Энергия фотона, кэВ	8,05	16,95	93,6	3579,3

Все изменения в интенсивности рентгеновских отражений от плоскостей в решетке твердого раствора замещения на основе ниобия указывают на вынужденные упругие колебания, связанные с возбуждением валентных электронов ксенона в образцах, облученных при 80 кэВ и переходом их на валентные орбиты катионов ниобия. Такой переход, сопровождается излучением фотона с увеличенной частотой колебаний, уменьшением длины волны колебаний и ростом энергии. В образцах

ниобия, облученных ионами ксенона 140 и 300 кэВ, происходит рост макронапряжений (см. рис. 3), который приводит к сжатию решетки, и сближению d -орбит ниобия и ксенона. Атом ниобия имеет незаполненную $4d$ -орбиту, а ион ксенона заполненную $4d$ -орбиту. В такой решетке твердого раствора замещения на основе ниобия рентгеновское α -излучение вызывает вынужденные упругие колебания электронов ксенона на d -орбите и переходом их на незаполненную d -орбиту ниобия.

Такой переход электронов сопровождается излучением фотонов с резким увеличением частоты колебаний, уменьшением длины волны и интенсивным ростом энергии. Такие переходы электронов с орбит ксенона на орбиты ниобия свидетельствуют о целостности ядер ксенона и ниобия.

Полученные результаты исследования вынужденных упругих колебаний электронов на *d*-орбитах ксенона и ниобия в образцах твердого раствора на основе ниобия, которые происходят под действием рентгеновского излучения, указывают на переход рентгеновского α -излучения в γ -излучение, т. е. в характерное γ -излучение, получаемое в ускорителях [19, 20].

Заключение

В работе проведено исследование изменения структуры поликристаллического ниобия после облучения ионами ксенона с энергиями 80, 140, 300 кэВ. Анализ изменений проводили рентгеновскими методами в излучении $Cu(K\alpha)$.

Обнаружено, что основная кубическая структура поликристаллического ниобия сохраняется при облучении ионами ксенона с энергиями 80, 140, 300 кэВ. Столкновение ионов ксенона с поверхностью образца ниобия приводит к торможению ионов ксенона в решетке ниобия по глубине образца с изменением флюенса потока. Приведена структурная модель растворения ионов ксенона в решетке ниобия. Ионы ксенона при торможении смещают центральный атом ниобия, из плоскостей в тетраэдрические пустоты, занимает его место, связывается металлической связью с атомами ниобия в данных плоскостях с образованием твердого раствора замещения. Такое замещение приводит к уменьшению параметра решетки, сближению атомов ниобия и ксенона и увеличению макронапряжений. Определено изменение размера радиуса ксенона в твердом растворе замещения на основе ниобия в зависимости от энергии облучения.

Приведена математическая модель, объясняющая увеличение интенсивности рентгеновских отражений от плоскостей решетки твердого раствора замещения на основе ниобия. Под воздействием рентгеновского облучения в такой решетке возникают вынужденные колебания, как валентных электронов, так и электронов *4d* оболочки ксенона и переходом их на незаполненные электронные орбиты ниобия. При таком переходе излучается фотон с меньшей длиной волны и увеличенной частотой, что и приводит к росту интен-

сивности отражений от плоскостей твердого раствора замещения на основе ниобия. Обнаружен переход рентгеновского α -излучения в γ -излучение, характерное для излучения, полученного в ускорителях электронов.

Полученные результаты являются актуальной, обладают новизной в области исследования структур кристаллов. Примененные методы могут использоваться в технологиях получения материалов с заданными свойствами, что имеет практическую значимость для приборостроения в различных областях науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стариков С. В. / VII Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка. 2012). С. 199.
2. Гальцев М. В., Гальцев В. П. // Вестник Полоцкого государственного университета, серия С. 2008. № 3. С. 106.
3. Yun D., Xu R., Mei Z., Mo K., Mohamed W., Ye B., Pellin M. J., Yasout A. M., Miao Y. // J. Nuclear Materials. 2016. Vol. 471. P. 272.
4. Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Неклюдов И. М., Соловьёва А. Е. // Радиационные материалы. 1990. Т. 7. С. 265.
5. Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Соловьёва А. Е. // Физика и химия обработки материалов. 1989. № 6. С. 25.
6. Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Соловьёва А. Е. // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 6. С. 5.
7. Диасамидзе Э. М., Марков В. Л., Соловьёва А. Е. // Физика и химия обработки материалов. 1992. № 1. С. 16.
8. Solovyova A. E. / Second International Conference "Nan materials: Applications. Properties" (Alushta. 2012). Vol. 2. No. 4. P. 04PITISE-11.
9. Solovyova A. E. // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High Technology Plasma Processes. 2016. Vol. 20. No. 2. P. 107.
10. 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.
11. Макаров Е. С. Изоморфизм атомов в кристаллах. – М.: Атом. издательство, 1973.
12. Миркин Л. И. Справочник по структурному анализу поликристаллов. – М.: Издательство ФМЛ, 1961.
13. Уманский Л. С. Рентгенография металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1960.
14. Маслов А. А., Оствальд П. В., Шагалов В. В., Маслова Е. С., Горенюк Ю. С. Химическая технология ниобия и тантала. – Томск: Политехнический университет. 2010.
15. Соловьёва А. Е. // Физика и техника полупроводников. 1992. Т. 26. № 3. С. 408.
16. Богдан Т. В. Кристаллические структуры простых веществ – неметаллов. – Баку: МГУ. Хим. Факультет, 2015.
17. 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.
18. Соловьёва А. Е. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 591.
19. Постников В. С. Физика и химия твердого состояния. – М.: Металлургия, 1978.
20. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел. – М.: Издательство Наука, 1967.

Changes of a structure of the polycrystalline niobium at irradiation by xenon ions of different energies

A. E. Solovyeva

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

Received February 22, 2018

An investigation of the change in the structure of polycrystalline niobium after irradiation with ions of xenon with energies of 80, 140, 300 keV was studied by the X-ray method in the radiation of Cu K α . It was found that the cubic structure VCC of the niobium was conserved; additional super structural x-ray lines that are not characteristic of the structure of niobium are absent. Irradiation with of ions xenon leads to: a change in the chemical composition of the niobium; decrease of the parameters of unit cell; increase the reflective intensity of X-ray lines of the basic structure of niobium: increase macro strains in lattice. X-ray method was determined the concentration of the ions of the xenon, dissolved in the depth of the sample, in depending from the energy irradiation. A structural model for the dissolution of xenon ions in lattice of niobium was shown, which explains the formation of the metal bond of xenon with the atoms of niobium. The bond between the atoms of niobium and xenon arises when they are braked in the depth of the sample and leads to the formation of a solid solution of substitution based on niobium and the defects, which form at of displacement of the atoms of niobium in tetrahedral emptiness. The change of radius of ion xenon in a solid solution of substitution, based on niobium, was determined. A mathematical model is presented that explains the increase in the reflective x-ray intensity lines of the solid solution substitution based on niobium with various concentrations ions of xenon. The transition of x-ray α -radiation to γ -radiation was observed.

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

REFERENCES

1. S. V. Starikov, in *Proc. VII International Conference "Phase Transformations and Strength of Crystals"* (Chernogolovka, 2012). P. 199.
2. M. V. Galtsev and V. P. Galtsev, *Bulletin of the Polotsk State University, Series S*, No. 3, 106 (2008).
3. D. Yun, R. Xu, Z. Mei, K. Mo, W. Mohamed, B. Ye, M. J. Pellin, A. M. Yacout, Y. Miao, **471**, 272 (2016).
4. E. M. Diasamidze, V. L. Markov, I. M. Neklyudov, and A. E. Solovyova, *Radiats. Materialy* **7**, 265 (1990).
5. E. M. Diasamidze, V. L. Markov, and A. E. Solovyova, *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, No. 6, 25 (1989).
6. E. M. Diasamidze, V. L. Markov, and A. E. Solovyova, *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, No. 6, 5 (1991).
7. E. M. Diasamidze, V. L. Markov, and A. E. Solovyova, *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, No. 1, 16 (1992).
8. A. E. Solovyova, in *Proc. Second International Conference "Nan materials: Applications. Properties"* (Alushta, 2012). Vol. 2. No. 4. P. 04PITISE.
9. A. E. Solovyova, *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High Technology Plasma Processes* **20** (2), 107 (2016).
10. H. Zirour, M. Izerrouken, and A. Sar, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **365**, Part A. 269 (2015).
11. E. S. Makarov, *Isomorphism of Atoms in Crystals* (Atom, Moscow, 1973) [in Russian].
12. L. I. Mirkin, *Handbook of structural analysis of polycrystals* (FML, Moscow, 1961) [in Russian].
13. L. S. Umansky, *X-ray diffraction of metals and semiconductors* (Metallurgy, Moscow, 1960) [in Russian].
14. A. A. Maslov, R. V. Ostvald, V. V. Shagalov, et al., *Chemical technology of niobium and tantalum* (Tomsk: Polytechnic University. 2010) [in Russian].
15. A. E. Solovyova, *Semiconductors* **26**, 408 (1992).
16. T. V. Bogdan, *Crystalline structures of simple substances – nonmetals* (Moscow State University. Chem. Faculty, 2015) [in Russian].
17. A. Dewaele, N. Worth, C. J. Pickard, R. J. Needs, S. Pascarelli, O. Mathon, M. M. Retsuo Irifune, *Nature Chemistry* **8**, 784 (2016).
18. A. E. Solovyova, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (6), 591 (2017).
19. V. S. Postnikov, *Physics and Chemistry of Solid State* (Metallurgy, 1978) [in Russian].
20. Ch. Quillet, *Quantum theory of solid bodies* (Nauka, Moscow, 1967) [in Russian].