

УДК 621.039.531

## Влияние температуры облучения на радиационное расширение кварца

БЫКОВ В. Н., ДЕНИСОВ А. В., ДУБРОВСКИЙ В. Б., КОРЕНЕВСКИЙ В. В., КРИВОГОНЕВА Г. К., МУЗАЛЕВСКИЙ Л. П.

Радиационное расширение кварца (увеличение размеров и объема монокристаллов, рост периода кристаллической решетки, уменьшение плотности) изучали многие исследователи в широком диапазоне флюенсов нейтронов [1—4]. Однако облучение проводили при относительно низкой температуре ( $\sim 30\text{--}100^\circ\text{C}$ ). В связи с этим была исследована зависимость радиационного расширения кварца от температуры облучения.

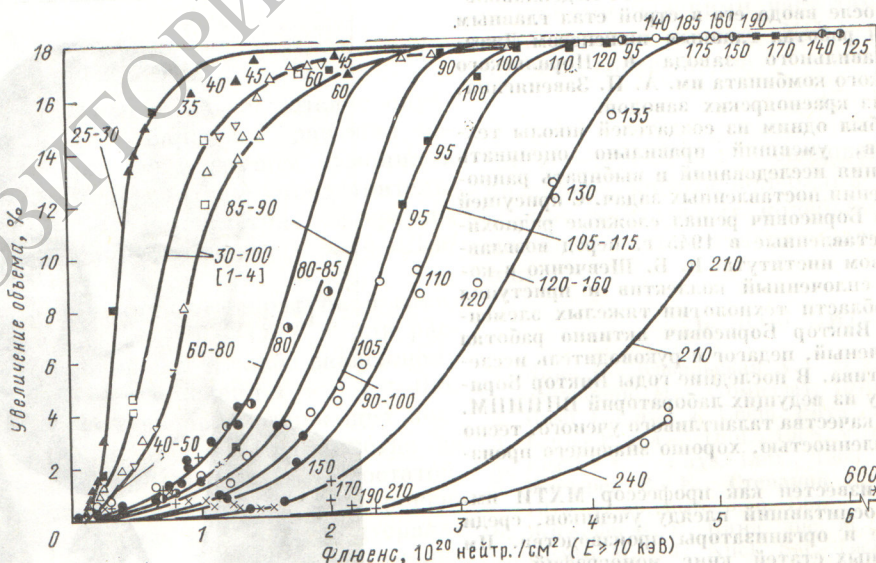
Дробленные до крупности 5—10 мм кристаллы природного кварца и образцы в виде параллелепипедов размерами  $20 \times 10 \times 8$  мм синтетического кварца помещали в металлические негерметичные ампулы и облучали при  $30\text{--}600^\circ\text{C}$  в вертикальных каналах различных реакторов (реактора Первой в мире АЭС, БР-5, БР-10 и СМ-2) в течение  $100\text{--}200$  сут до флюенсов повреждающих нейтронов  $0,1 \cdot 10^{20} \div 7 \cdot 10^{20}$  нейтр./см<sup>2</sup> в зависимости от расположения образцов, расстояния от центра активной зоны, характеристик канала и реактора, продолжительности облучения.

В качестве повреждающих рассматривались, как это принято [1—4], нейтроны энергией более 10 кэВ, в соответствии с расчетом смещений [5]. Повреждающая способность этих нейтронов была приблизительно одинакова во всех используемых каналах. Флюенсу  $1 \cdot 10^{20}$  нейтр./см<sup>2</sup> соответствовало смещение 8—10% всех атомов. За эффективную температуру облучения принимали среднюю (средневзвешенную по времени воздействия) температуру, так как вследствие переменного режима работы реакторов (коэф-

фициент неравномерности составлял 0,5—0,85) температура образцов в процессе облучения не оставалась постоянной.

В ходе экспериментов изучали увеличение размеров образцов-параллелепипедов по главным осям, уменьшение плотности и рост периода решеток. Размеры кристаллов определяли микрометром, плотность — методом поплавка [6], периоды решеток — по дифрактограммам, записанным на дифрактометрах ДРОН-1 и ДРОН-2. Погрешность измерений этих величин составляла соответственно  $0,01$  мм;  $0,005$  г/см<sup>3</sup> и  $0,001\text{--}0,003 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$  м).

Обнаружено, что с повышением температуры облучения радиационное расширение кварца монотонно снижается, хотя вид изотермических кривых зависимости увеличения объема от флюенса нейтронов (их S-образный характер) с ростом температуры не изменяется (см. рисунк). Наиболее интенсивное увеличение объема наблюдается при температуре облучения  $25\text{--}30^\circ\text{C}$ . Повышение ее до  $40\text{--}50$ ,  $60\text{--}80$ ,  $85\text{--}90$  и  $90\text{--}100^\circ\text{C}$  при одинаковом флюенсе снижает радиационное расширение соответственно в 3—5, 15—30, 60—80 раз. Таким образом, при увеличении температуры облучения на  $30\text{--}40^\circ\text{C}$  объемное расширение снижается в 10 раз. Результаты, полученные при  $40\text{--}50^\circ\text{C}$ , согласуются с опубликованными [1—4]. Повышенные температуры облучения до  $105\text{--}115$ ,  $120\text{--}160$ ,  $240$  и  $600^\circ\text{C}$  приводит к дальнейшему уменьшению радиационного расширения кварца (соответственно в 1—2, 3—4,



Зависимость радиационного объемного расширения кварца от повреждающего флюенса нейтронов и средней температуры облучения в реакторе (x, ●, +, ▲, ■ — в реакторе Первой в мире АЭС; ○ — в БР-10; ● — в БР-5; \* — в СМ-2; ▽, □, △ — данные работ [1, 2, 4] соответственно). Цифры у точек и кривых — температура облучения.

20—40 и 600—1000 раз по сравнению с наблюдаемым при 90—100 °С). Однако по мере роста температуры эффективность ее влияния монотонно снижается.

Наибольшее влияние температуры наблюдается на первом этапе (увеличение объема до 0,5—1%), когда скорость прироста объема невелика. При увеличении температуры облучения с 25—30 до 40—50, 60—80, 90—100, 120—160, 240—600 °С скорость изменения объема снижается, а продолжительность самого этапа возрастает соответственно в 2—3, 4—5, 8—9, 12—16, 25—30 и 60—80 раз. Снижение скорости радиационного расширения на втором этапе, характеризующемся быстрым увеличением объема, менее значительно, а стадия насыщения, вызванная аморфизацией (третий этап), наступает при увеличении объема на 17—18% независимо от температуры облучения.

Установлено, что степень анизотропии радиационного расширения аналогична наблюдаемой ранее [1, 2, 4] и не зависит от температуры облучения. Как и в работе [4], не обнаружено существенного расхождения между увеличением объема решетки и объемным расширением, вычисленным по изменению размеров и плотности, и между изменением образцов природного и синтетического (с более совершенной структурой) кварца. Наконец, соотношение между значением объемного расширения и степенью нарушения периодичности решетки, согласно данным рентгеновской дифрактометрии, совпадает с наблюдаемой ранее [4] и не зависит от температуры облучения. Это свидетельствует о том, что тип возникающих дефектов и характер вызываемых повреждений с ростом температуры существенно не меняются.

Выявленное значительное влияние температуры облучения на радиационное расширение кварца объясняется, по-видимому, отжигом точечных дефектов при облучении, поскольку другие процессы, определяющие радиационное расширение материала, не должны существенно зависеть от температуры облучения [7]. Причем наиболее сильное влияние температуры проявляется на первом этапе, когда преимущественно образуются точечные дефекты [1, 4]. Меньшее влияние температуры на втором этапе можно объяснить снижением роли точечных дефектов в быстро развивающемся процессе радиационного расширения. Это снижение вызвано увеличением вклада более устойчивых (как доказывает послерадиационный отжиг сильно поврежденных образцов [2, 4]) нарушений, связанных с сильными искажениями и переориентацией кремнийкислородных тетраэдров, накоплением атомов в каналах, образованием аморфных зон [1—4].

Можно полагать, что основной реакцией отжига, происходящего в процессе облучения, является рекомбинация

пар Френкеля, поскольку согласно полученным экспериментальным данным тип возникающих дефектов и «характер» вызванных ими повреждений решетки не изменяются по мере возрастания температуры облучения. Монотонная зависимость абсолютного значения и скорости радиационного расширения кварца от температуры в диапазоне 30—600 °С свидетельствует о процессе рекомбинации, характеризующемся широким и непрерывным спектром энергии активации. Однако очень сильное влияние температуры в диапазоне 30—100 °С и уменьшение этого влияния при более высокой температуре указывают на неравномерность распределения дефектов по энергиям активации, в частности, на уменьшение доли дефектов с повышенной энергией активации.

Таким образом, экспериментально установлено, что при увеличении температуры облучения в диапазоне 30—600 °С радиационное расширение и нарушение структуры кварца значительно и монотонно снижаются вследствие усиления рекомбинации пар Френкеля в процессе облучения. Наиболее значительное влияние температуры наблюдается на первом этапе (прирост объема менее 0,5—1%) и ниже 100 °С, когда увеличение температуры на 30—40 °С снижает расширение кварца в 10 раз. Вместе с тем характер изотермических кривых зависимости увеличения объема от флюенса, степень анизотропии радиационного расширения и тип возникающих дефектов с ростом температуры облучения не изменяются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wittels M.— Phil. Mag., 1957, v. 2, p. 1445.
2. Primak W.— Phys. Rev., 1958, v. 110, p. 1240.
3. Weissman S., Nakajima K.— J. Appl. Phys., 1963, v. 34, p. 611.
4. Кривоконова Г. К. и др. Неорг. материалы, 1974, т. 10, № 11, с. 1998.
5. Пергаменщик Б. К., Самотаев А. В. Расчет числа смещений в кварце при облучении в реакторе.— В кн.: Труды МИСИ им. В. В. Куйбышева, № 114. М., 1974, с. 102.
6. Щербак О. В., Карюкина В. Н. Микрооплавки для определения удельных весов жидкостей и минералов (в жидкости) на торсионных и аналитических весах. М., изд. ВИС, 1972.
7. Агранович В. М., Кирсанов В. В. Усп. физ. наук, 1976, т. 118, вып. 1. с. 1.

Поступило в Редакцию 30.06.80  
В окончательной редакции 13.04.81

УДК 539.166.3

## Временные характеристики обратнорассеянного рентгеновского импульса вблизи границы раздела двух сред

МОРГОВСКИЙ Л. Я., ГЕРЧИКОВ Ф. Л.

При экспериментальном исследовании характеристик нестационарного поля рентгеновского или  $\gamma$ -излучений вблизи границы раздела двух сред требуется проанализировать временные характеристики импульса обратного рассеяния. Имеющиеся сведения, обобщенные в работе [1], ограничиваются использованием точечного источника, изотропно излучающего в телесном угле  $4\pi$ ; получены эти сведения методом Монте-Карло.

Вместе с тем расширяющееся техническое применение рентгеновского излучения в системах управления и регулирования [2, 3] потребовало решения этой задачи для коллимированных источников с использованием более простых, оперативных методов, например, альбедного

приближения. В настоящей работе описан аналитический расчет временных характеристик рентгеновских импульсов обратного рассеяния для практически наиболее важного в технических приложениях случая использования коллимированного источника.

Импульсный рентгеновский излучатель (РИ) излучает в воздухе в направлении полубесконечного отражателя, находящегося от него на расстоянии  $H$ , энергию  $W_0$  (МэВ/ср) в  $\delta$ -импульсе (рис. 1). Излучение в пределах диаграммы направленности РИ, характеризуемого углом коллимации  $2\varphi_0$ , изотропно, линейные размеры РИ и детектора намного меньше  $H$ , линия РИ — детектор  $D$  (база  $b$ ) параллельна поверхности отражателя.