

УДК 548.162:539.16.04

Л. П. ОСИПОВА, Ю. А. ИВАШКИН

**ВЛИЯНИЕ АМОРФИЗАЦИИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА
КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КВАРЦА, ОБЛУЧЕННОГО
БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ**

При облучении α -кварца в реакторе в образцах возникают различные дефекты, которые изменяют структуру и свойства кристалла [1—5]. Однако до настоящего времени не существует единой модели, которая объясняла бы радиационные изменения всех свойств кварца. В ряде случаев влияние облучения быстрыми нейтронами на отдельные свойства кристаллов удовлетворительно интерпретируются с помощью простых моделей. Так, например, радиационное изменение плотности и удельного вращения плоскости поляризации кварца можно объяснить с помощью двухфазной модели, согласно которой изменение данного свойства обусловлено уменьшением кристаллической фазы за счет увеличения доли аморфной фазы в облученных образцах.

В работах [2—6] проводилось сравнение изменения структурно-чувствительных свойств кварца при его нагревании и при облучении нейтронами. В [5—6] показано, что радиационное и температурное смещение частоты всех линий спектра комбинационного рассеяния кварца аналогично. В работах [2—4] обнаружено, что при воздействии потока быстрых нейтронов $\sim 6 \cdot 10^{19}$ н/см² структурные изменения в α -кварце [3—5] качественно аналогичны изменениям при температурном α — β -переходе. Отмеченная аналогия оказалась весьма полезной, так как дала возможность перевести дозы облучения в эффективную температуру [5, 6] и позволила сравнить радиационное и температурное изменение различных свойств кварца в единой шкале температур [3—9].

В настоящей работе проведен анализ радиационного изменения упругих свойств кварца, облученного в реакторе, в рамках модели, учитывающей эффективное нагревание кристаллической матрицы, уменьшение кристаллического остатка и увеличение доли аморфной фазы и влияние отрицательных напряжений.

Сравнение радиационного и температурного изменения упругих свойств кварца проведено нами на основе литературных данных [2, 7, 10, 11]. Ранее подобный анализ не проводился, а лишь отмечалось [10], что радиационные и температурные изменения упругих постоянных α -кварца резко отличаются друг от друга.

На рис. 1 приведены графики зависимости упругих модулей от дозы облучения быстрыми нейтронами [2] и от температуры [7]. Перевод дозы облучения в эффективную температуру проведен по кривой из [6].

Для сравнения результатов работ [2] и [7] по известным формулам [2] упругие постоянные были пересчитаны в упругие модули. Сравнение проведено в области доз до $5 \cdot 10^{19}$ н/см², так как при больших дозах температурная аналогия не исследована [6].

Из рис. 1 видно, что упругие модули S_{33} и S_{44} изменяются при нагревании и при облучении кварца быстрыми нейтронами аналогично. Модули S_{11} , S_{13} и S_{14} при облучении уменьшаются, а при нагревании

увеличиваются. Модуль S_{12} изменяется с ростом дозы облучения не-монотонно, а при нагревании S_{12} непрерывно увеличивается. Таким образом, объяснить радиационное изменение всех упругих модулей кварца в рамках модели температурной аналогии радиационного воздействия [5, 6] оказалось невозможным.

Температурная аналогия учитывает эффективное нагревание кристаллической матрицы. Вместе с тем на упругие свойства кварца при облучении быстрыми нейтронами оказывает влияние появление аморфных областей и как следствие — отрицательные напряжения.

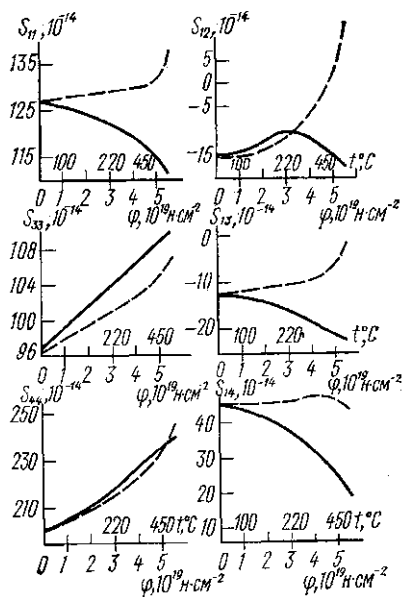


Рис. 1. Зависимость упругих модулей S_{ij} от дозы облучения быстрыми нейтронами [2] (сплошные кривые) и от температуры [7] (пунктирные кривые)

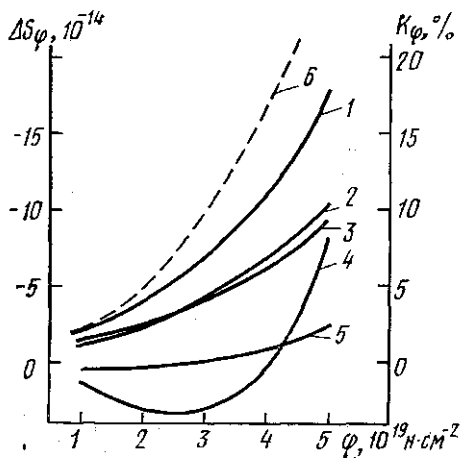


Рис. 2. Влияние дозы облучения на ΔS_{ij} — вклад в упругие модули, обусловленный влиянием отрицательных напряжений:

1 — ΔS_{11} ; ΔS_{44} ; 2 — ΔS_{14} ; 3 — ΔS_{13} ; 4 — ΔS_{12} ; 5 — ΔS_{33} . Зависимость процентного содержания аморфной фазы от дозы облучения (шкала справа) — 6

Влияние всех перечисленных факторов на упругие модули можно приближенно учесть, если зависимость упругих модулей от дозы облучения $S_{\phi}^{\text{обл}}$ представить в виде:

$$S_{\phi}^{\text{обл}} = K_{\phi} S_{\phi}^{\text{пл}} + (1 - K_{\phi}) S_{T_{\text{эф}}}^{\text{необл}} + \Delta S_{\phi}, \quad (1)$$

где ϕ — доза облучения быстрыми нейтронами, K_{ϕ} — доля аморфной фазы в облученных образцах [9], $S_{\phi}^{\text{пл}}$ — упругий модуль плавленого кварца, облученного быстрыми нейтронами [2]; $S_{T_{\text{эф}}}^{\text{необл}}$ — упругий модуль необлученного кристаллического кварца, нагретого до температуры, соответствующей данной дозе облучения; ΔS_{ϕ} — вклад в упругий модуль, обусловленный влиянием на кристаллическую матрицу отрицательных напряжений. В формуле (1) первое слагаемое учитывает появление в облученном кристалле аморфных областей, второе — уменьшение кристаллического остатка и его эффективное нагревание. С помощью (1) по известным значениям $S_{\phi}^{\text{обл}}$, K_{ϕ} , $S_{\phi}^{\text{пл}}$ и $S_{T_{\text{эф}}}^{\text{необл}}$ определим вклад ΔS_{ϕ} в интервале доз $(1-5) \cdot 10^{19}$ н/см², для которых

влияние отрицательных напряжений становится заметным. Соответствующие значения ΔS приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что вклад отрицательных напряжений во все упругие модули (кроме S_{12}) облученного кристаллического кварца — одного знака. Облученный кристалл становится более «жестким». Кривые зависимости ΔS_{ij} от дозы облучения для упругих модулей S_{11} , S_{13} , S_{14} , S_{33} и S_{44} однотипны и аналогичны кривой процентного содержания аморфной фазы в облученных образцах (см. рис. 2, кривая б). Поскольку тип кривых ΔS_{ij} и K_{ϕ} аналогичен, то можно предположить, что для каждого упругого модуля S_{ij} вклад ΔS_{ij} пропорционален содержанию аморфной фазы, т. е.

$$\Delta S_{ij} = A_{ij} K_{\phi}, \quad (2)$$

где A_{ij} — константа для данного модуля.

На рис. 3 приведены зависимости ΔS_{ij} от K_{ϕ} , полученные на основе рисунков 1 и 2. Из рис. 3 видно, что для всех упругих модулей

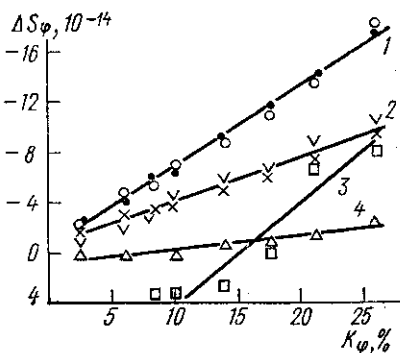


Рис. 3. Зависимость ΔS_{ij} от процентного содержания аморфной фазы: ● — ΔS_{11} , ○ — ΔS_{44} (1); × — ΔS_{13} , V — ΔS_{14} (2); □ — ΔS_{12} (3); △ — ΔS_{33} (4)

(кроме S_{12}) значения коэффициентов A_{ij} практически постоянны*, а величина ΔS_{ij} прямо пропорциональна содержанию аморфной фазы. Так как при образовании аморфных областей в облученных кристаллах кварца возникают отрицательные напряжения [1, 2, 5, 13, 14], то можно предположить, что вклад ΔS_{ij} в упругие модули в первую очередь обусловлен влиянием отрицательных напряжений.

Таким образом, зависимость упругих модулей α -кварца от дозы облучения быстрыми нейтронами может быть удовлетворительно объяснена уменьшением кристаллического остатка за счет увеличения аморфной фазы, эффективным нагреванием кристаллической матрицы и влиянием отрицательных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Захарова Е. К., Зубов В. Г., Осипова Л. П. Воздействие реакторного облучения на структуру и различные свойства кристаллического и плавленого кварца. Обзор. МГУ, 1971, Деп. в ВИНТИ, № 3465—71.
- Mauser G., Lecomte M. Effet des neutrons rapides sur le quartz cristallin et la silice vitreuse.— J. Phys. et Radium, 1960, 21, № 12, 846—855.
- Колонцова Е. В., Телегина И. В. Структурные изменения в кварце при α - β переходе и при облучении нейтронами.— Физ. тв. тела, 1966, 8, 3412.

* Отметим, что в интервале доз $(3-5) \cdot 10^{19}$ н/см² и для немонотонно изменяющегося модуля S_{12} зависимость ΔS_{12} от концентрации аморфной фазы удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией.

4. Жданов Г. С., Зубов В. Г., Коломцова Е. В., Осипова Л. П., Телегина И. В. Радиационные эффекты в α -кварце.—Кристаллография, 1963, 8, вып. 2, 207—212.
5. Зубов В. Г., Осипова Л. П. О закономерностях изменения спектра комбинационного рассеяния α -кварца при облучении быстрыми нейтронами.—ДАН СССР, 1964, 156, № 2, 300—301.
6. Зубов В. Г., Осипова Л. П. Изучение радиационного α — β перехода в кварце методом комбинационного рассеяния света.—Кристаллография, 1970, 15, вып. 5, 992—995.
7. Зубов В. Г. Об особенностях изменения свойств кварца вблизи α — β перехода и при облучении нейтронами. Докт. дис., МГУ, 1963.
8. Зубов В. Г., Захарова Е. К., Осипова Л. П., Кундикова Н. Д. Влияние температуры на интенсивность линий комбинационного рассеяния естественного кварца, облученного быстрыми нейтронами и необлученного.—Вестн. Моск. у-та. Физ., астрон., 1976, 17, № 4, 475—479.
9. Зубов В. Г., Осипова Л. П. О радиационном и температурном изменении ширины и интенсивности линий спектра комбинационного рассеяния α -кварца.—Кристаллография, 1977, 22, вып. 1, 110—114.
10. Жданов Г. С., Зубов В. Г., Иванов А. Т., Фирсова М. М. Воздействие быстрых нейтронов на упругие свойства кварца.—Кристаллография, 1958, 3, вып. 6, 720—725.
11. Зубов В. Г., Иванов А. Т. К вопросу об упругости кварца, облученного быстрыми нейтронами. Кристаллография, 1967, 12, вып. 2, 365—366.
12. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М., 1960, с. 178—179.
13. Зубов В. Г., Кадышев Е. А., Осипова Л. П., Штыркова А. П. Об оптической активности α -кварца, облученного быстрыми нейтронами.—Кристаллография, 1969, 14, вып. 4, 634—638.
14. Штыркова А. П. Внутренние напряжения и показатель преломления кварца, облученного быстрыми нейтронами.—Кристаллография, 1969, 14, вып. 4, 726—729.

Поступила в редакцию
08.12.78