

Введение. Изменение свойств кристаллов путем их радиационной обработки и создание на основе модифицированных кристаллов полупроводниковых приборов с улучшенными характеристиками рассмотрено в работе [1, 2]. Анализ литературы показывает, что в практически отсутствуют данные о протекании релаксационных процессов до перехода кристалла кремния в метастабильное состояние при гамма-облучении. Целью данной работы является изучение влияния γ -облучения кремния на ее внутреннее трение (Q^{-1}).

Методика эксперимента. В качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний марки КДБ-10 р-типа проводимости с исходным удельным сопротивлением $\rho=10\Omega\cdot\text{см}$, выращенный по методу Чохральского с содержанием примеси бора $N_B=1,2\cdot 10^{15}\text{см}^{-3}$, кислорода $N_O=5\cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$, и дислокаций $N_d\geq 1\cdot 10^3\text{см}^{-2}$. Образцы пластин кремния размерами 1,2x4,1x28,7 мм, вырезанные параллельно кристаллической плоскости (111) были подвергнуты последовательно механической и химической обработке. Облучение образцов дислокационного и бесдислокационного монокристаллического кремния проводили гамма-квантами ^{60}Co мощностью дозы 500 рад/с в интервале флюенсов $\Phi=1,4\cdot 10^{13}\text{см}^{-2}\div 1,4\cdot 10^{18}\text{см}^{-2}$ при температуре $\leq 30^\circ\text{C}$. Сразу после гамма-облучения кремния проводили измерение внутреннего трения ультразвуковым резонансным методом на ультразвуковой установке [3] (рис.1). В качестве резонансных частот были использованы частоты $f=90\text{кГц}$ и $f=149\text{кГц}$.

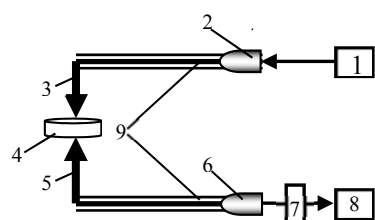


Рис.1. Схема ультразвуковой установки.

1 - генератор; 2 - пьезодатчик; 3 - звукопровод; 4 - кремний; 5 - звукопровод; 6 - пьезоприемник; 7 - АЦП, 8 - компьютер; 9 - демпфер.

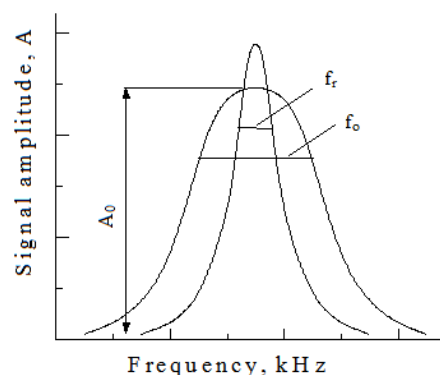


Рис. 2. Амплитудно-частотный спектр гамма-облученного и бесдислокационного кремния.

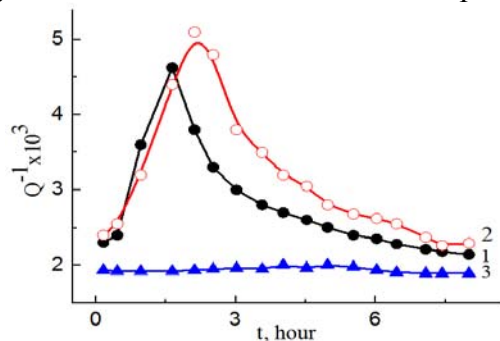


Рис.3. Зависимость Q^{-1} от времени измерения (t) в γ -облученном кремнии с $N_d\geq 10^3\text{см}^{-2}$, после облучения флюенсом: $\Phi=1,4\cdot 10^{17}\text{см}^{-2}$ (1), $\Phi=1,4\cdot 10^{18}\text{см}^{-2}$ (2), бесдислокационном кремнии (3).

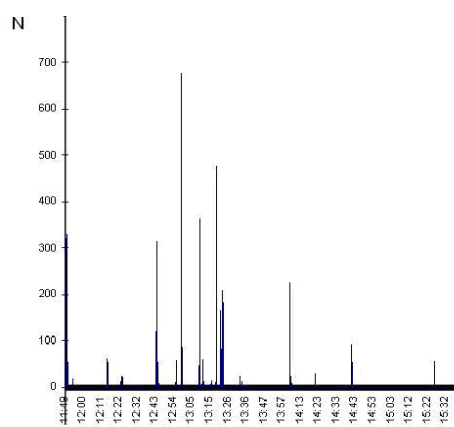


Рис. 4. АЭ спектр образования дислокаций в Si.

На рис. 2 представлен амплитудно-частотный спектр эталонного образца кремния полушириной $-f_r$, и уширенный амплитудно-частотный спектр кремния с плотностью дислокации $N_d>1\cdot 10^3\text{см}^{-2}$ с полушириной $-f_o$, где: f_r и f_o отсчитываются при амплитуде сигнала равной 0,707 от максимального значения амплитуды. При сопоставлении частотного спектра эталонного бесдислокационного кремния шириной $-f_r$ и дислокационного кремния с шириной $-f_o$ было выявлено, что полуширина резонансного спектра дислокационного кремния больше на $\geq 10\%$, чем полуширина резонансного спектра бесдислокационного кремния.

Значение внутреннего трения изгибных мод колебаний рассчитывали по формуле [4]:

$$Q^{-1} = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_o - f_r}{f_0}$$

где: f_o - полуширина частотного спектра кремния с дислокациями, f_r - полуширина частотного спектра эталонного кремния без дислокаций. f_o и f_r отсчитываются при амплитуде равной 0,707 от максимального значения амплитуды спектров любых мод колебаний (изгибных, радиальных, крутильных). Эксперименты показали, что при гамма-облучении кремния интегральным потоком гамма-квантов ^{60}Co флюенсом $\Phi=1,4\cdot 10^{17}\text{см}^{-2}\div 1,4\cdot 10^{18}\text{см}^{-2}$ в течении первых 1,5-2,0 часов после прекращения облучения образцов наблюдается постепенное увеличение Q^{-1} в интервале 0,3-2,0 часов с достижением максимального значения Q^{-1} через 2-2,5 часов. Затем значение Q^{-1} уменьшается и после 8-10 часов переходит в метастабильное состояние, а при повторном их гамма облучении увеличение Q^{-1} не наблюдается (рис. 3).

Из рис.3 видно, что в зависимости $Q^{-1}(t)$ процесс рассеяния энергии упругих колебаний (Q^{-1}) после гамма-облучения носит релаксационный характер и определяется временем миграции генерированных облучением точечных дефектов в дислокациях. Повышение флюенса облучения приводит к незначительному смещению максимума значения Q^{-1} в сторону увеличения по времени (рис.3, кривая 1, 2). Значение Q^{-1} в бесдислокационном кремнии имеет постоянную величину и с увеличением дозы облучения Q^{-1} не изменяется (рис. 2, кривая 3). Наблюдаемое изменение Q^{-1} после облучения, возможно связано с формированием дефектных комплексов в объеме кристалла с участием РД и дислокаций, т.е. при гамма-облучении кремния генерируются пары Френкеля - междоузельный атом и вакансия, которые мигрируя по кристаллу образуют различные комплексы с примесями, содержащимися в кристалле, или со структурными неоднородностями. Дислокации являются одним из наиболее энергетически выгодных состояний для захвата точечных РД. При дальнейшем увеличении дозы облучения флюенсом $> \Phi=1,4\cdot 10^{18}\text{см}^{-2}$ происходит увеличение плотности дислокаций, что приводит к упрочнению кремния, т.к. формируются микроструктуры с неупорядоченными и неравновесными границами. Для того чтобы лучше понять зависимость $Q^{-1}(t)$ в гамма облученном кремнии флюенсом $\Phi=1,4\cdot 10^{18}\text{см}^{-2}$, проводили дальнейшие исследования по регистрации сигнала акустической эмиссии (АЭ) пьезодетектором высокочувствительной АЭ системы [5] и были получены АЭ спектры образования дислокаций. АЭ сигналы возникают из-за возникновения движущих дислокаций и интенсивность АЭ сигналов вначале растет первые 1,5-2 часа, как в зависимости $Q^{-1}(t)$, и далее уменьшается как импульсы дискретных АЭ сигналов (рис. 4). АЭ сигналы возникают при отрыве дислокаций от точки закрепления, при перемещении или торможении дислокаций путем аннигиляции двух дислокаций противоположного знака. Изменение упругого поля дислокации порождает упругую волну АЭ, т.к. в событие, создающим один регистрируемый АЭ импульс, участвуют 10^4-10^5 дислокаций [4].

Заключение. При гамма облучении кремния с плотностью дислокации $N_d\geq 10^3\text{см}^{-2}$ наблюдаемое рассеяние энергии упругих колебаний сопровождается увеличением в 2,5 раза значения внутреннего трения в течении 1,5 - 2,5 часов с последующим уменьшением до исходных значений в течении 8-10 часов. Процесс релаксацией дислокаций определяется временем миграции генерированных облучением точечных дефектов в дислокациях. В кремнии с плотностью дислокации $N_d>1\cdot 10^3\text{см}^{-2}$ при γ -облучении флюенсом $\Phi=1,4\cdot 10^{18}\text{см}^{-2}$ возникают АЭ сигналы из-за возникновения движущих дислокаций и интенсивность АЭ сигналов вначале растет первые 1,5-2 часа, как в зависимости $Q^{-1}(t)$, и далее уменьшается как импульсы дискретных АЭ сигналов.

- [1] Agnello S. Gamma ray induced processes of point defect conversion in silica. Palermo, 2000, 151 с.;
- [2] Сауров М.А., Булярский С.В., Лакалин А.В. Исследование дефектообразования при облучении кремния γ -квантами // Микроэлектроника. 2020, Т. 49, №2, С.111-115;
- [3] Teutonico L.J., at al. Theory of the Thermal Breakaway of a Pinned Dislocation Line with Application to Damping phenomena. // J. Appl. Phys., 1964, V.35, pp. 220-237;
- [4] Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990, С.108-233;
- [5] Ашрапов У.Т., Садиков И.И., Махкамов Ш.М., Мирзаев Б.Б., Естифеева А.Г. Разработка акустико-эмиссионной системы для мониторинга состояния гидротехнического сооружения. // Узбекский физический журнал, 2021, №3, С. 255-265.