

или

$$\Delta\eta = -\frac{2\Delta Y_m}{Y_{m2} - Y_{m1}} \frac{[(\eta - 1)X - \eta]^2}{X} \quad (5)$$

Минимальное значение второго множителя уравнения (5), т. е. наилучшее разрешение достигается при

$$X = \eta / (1 - \eta), \quad (6)$$

и поэтому при наилучшем разрешении шаг по оси η будет равен

$$\Delta\eta' = \frac{8\Delta Y_m}{Y_{m2} - Y_{m1}} \eta (1 - \eta). \quad (7)$$

Таким образом, установлено, что наилучшее разрешение при данной концентрации вещества достигается при вполне определенном значении X , пропорциональном отношению сечений деления и поэтому являющемся функцией энергии активирующих нейтронов. Поскольку строго моноэнергетических источников не существует, можно оценить и допустимую ширину спектра, продифференцировав уравнение (6),

$$\Delta X = \Delta\eta / (1 - \eta)^2. \quad (8)$$

Практически мы никогда не имеем дела с топливом реакторов, состав которого не был бы приблизительно известен, поэтому можно заранее найти отношение сечений деления и указать, для какой смеси какие источники могут быть использованы.

Три кривые на рисунке изображают отношение выхода второй группы к первой в зависимости от концентрации

^{235}U для смеси $^{235}\text{U} - ^{238}\text{U}$ при трех различных значениях энергии нейтронов. Для произвольно выбранной концентрации $\eta = 0,23$ наклон касательных дает значение $\partial Y' / \partial \eta'$, что по уравнению (4) должно привести к наилучшему разрешению для кривой 2. На этом же рисунке видно, что при малой концентрации ^{235}U градиент изменения относительного выхода особенно велик (более 70% приходится на интервал 0—20%). Именно на этом участке и может быть получено наилучшее разрешение. Пороговые вещества дают такую возможность выбора. Для некоторых сочетаний двух веществ (например, $^{235}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$) отношение сечений деления в широком диапазоне практически постоянно, и такая особая точка отсутствует, но при этом ширина спектра источника может быть очень большой.

В заключение надо отметить, что для активации твэлов наиболее приемлем диапазон энергии нейтронов 0,2—4,0 МэВ. Более низкая энергия из-за больших сечений деления может дать сведения о концентрации только во внешних слоях твэлов, а более высокая неприемлема, так как в результате реакций типа (n, nf) в малом диапазоне энергии быстро меняется отношение выходов групп, что может вызвать осложнения в расчетах.

Аналогичным способом определяются условия выбора оптимальной энергии и для многокомпонентной смеси.

Поступило в Редакцию 02.07.79

Окончательной редакции 29.10.79

УДК 539.1.074.3:548.55:546.33.15.683

Влияние гамма-излучения на собственное разрешение кристаллов иодистого натрия, активированных таллием

ВИНОГРАД Э. Л., ГУРЕВИЧ Н. Ю., ЦИРЛИН Ю. А.

В настоящее время сцинтилляционные спектрометры на основе кристаллов NaI(Tl) широко применяются в условиях воздействия переменных температурных и радиационных полей. Эксплуатация приборов в таких условиях приводит к изменению их спектральных характеристик. Так, известно, что облучение детекторов на основе кристаллов NaI(Tl) рентгеновским и γ -излучением уменьшает световой выход [1—3]. Это обусловлено ухудшением прозрачности кристаллов по отношению к свету собственной люминесценции [4—6]. Цель настоящей работы — выяснение влияния γ -излучения на собственное разрешение r детекторов на основе кристаллов NaI(Tl) после облучения их в интервале температуры 20—100°С и определение факторов, обуславливающих изменение r .

Исследования проводили на сцинтилляционных детекторах серийного производства размером 40 × 40 и 40 × 80 мм. Облучение образцов осуществляли радионуклидами ^{137}Cs при мощности дозы 1 Гр/ч. Температура образцов в процессе облучения поддерживалась постоянной с помощью ультрагермостата НВЕ. Собственное разрешение детекторов измеряли в соответствии с работой [7].

На рис. 1 показано изменение собственного разрешения кристаллов NaI(Tl) в зависимости от дозы γ -излучения при нормальной температуре. Из приведенных данных видно, что ухудшение r происходит монотонно с насыщением в области доз ≈ 1 Гр. Обнаружено существенное различие в относительном изменении собственного разрешения на разных образцах кристаллов, выращенных по одной технологии и имеющих одинаковые размеры.

Данные о влиянии температуры после облучения их дозой 1 Гр приведены на рис. 2. Характер зависимостей $\Delta r(D)$ и $\Delta r/r_0(T)$ (см. рис. 1, 2) совпадает с характером зависимостей окрашиваемости кристаллов NaI(Tl) , $\Delta t/\tau_0(D)$

и $\Delta t/\tau_0(T)$, приведенных в работе [5]. Этот факт свидетельствует в пользу того, что радиационные повреждения, обуславливающие ухудшение собственного разрешения образцов, связаны с уменьшением их прозрачности к свету собственной люминесценции.

Проведены параллельные измерения r и изменения прозрачности к свету с длиной волны $\lambda \approx 410$ нм по методу, описанному в публикации [8], для детекторов, изготовленных по одной технологии и облученных одной дозой γ -излучения (1 Гр). Результаты этих измерений свидетельствуют о том, что, несмотря на существенный разброс в значениях $\Delta r/r_0$, у всех исследованных кристаллов радиационное изменение прозрачности практически совпа-

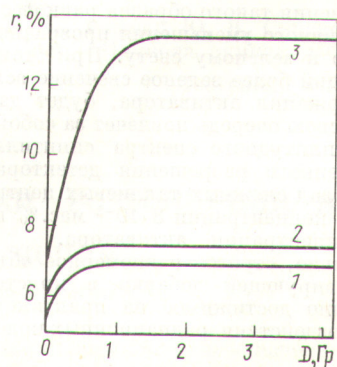


Рис. 1. Зависимость собственного разрешения детекторов размером 40 × 40 мм на основе кристаллов NaI(Tl) от дозы γ -облучения при мощности дозы 1 Гр и температуре 20°С: 1, 2, 3 — образцы, изготовленные по одной технологии

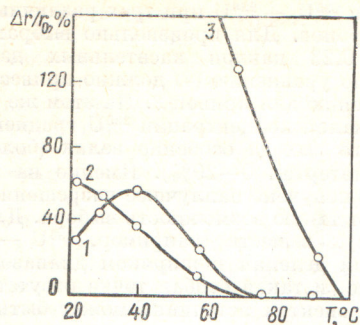


Рис. 2. Влияние температуры на радиационное изменение собственного разрешения детекторов на основе кристаллов NaI(Tl) размером 40×40 мм при дозе облучения 1 Гр: 1—3 — образцы, изготовленные по одной технологии; ○ — экспериментальные точки

дает. Можно предположить, что anomalно большая потеря собственного разрешения у некоторых облученных детекторов ($\Delta r/r_0 \approx 130\%$) вызвана созданием в них неоднородного распределения сцинтилляционной эффективности C под воздействием γ -излучения.

При измерении с помощью коллимированного источника распределения сцинтилляционной эффективности в детекторе с большим значением $\Delta r/r_0$ оказалось, что такой детектор содержит в себе участки A и B , незначительно отличающиеся по сцинтилляционной эффективности до облучения, но имеющие существенно различные значения C после облучения (рис. 3). Исследование этих участков показало, что их спектры люминесценции различны; в спектре свечения участка A больше зеленого света ($\lambda > 410$ нм), чем в спектре участка B . По данным работы [9], увеличение вклада зеленого свечения в общий спектр люминесценции вызвано повышенным содержанием активатора, который в этом случае, кроме основных центров свечения ($\lambda_{\text{макс}} = 410$ нм), образует сложные таллиевые центры ($\lambda_{\text{макс}} = 450, 470$ нм). Результаты химического анализа также подтверждают повышенное содержание таллия в участке A ($\rho_A = 2,1 \cdot 10^{-1}$ мас. % Тl, $\rho_B = 7 \cdot 10^{-2}$ мас. % Тl).

Измерение коэффициента светособирания детекторов NaI(Tl) в диапазоне длин волн 350—650 нм до и после облучения показало, что генерируемые γ -излучением центры окраски уменьшают прозрачность кристалла по отношению к зеленому свету (450—470 нм) значительно больше, чем к синему (400—420 нм) (рис. 4).

Таким образом, если до облучения кристалл NaI(Tl) обладал достаточно хорошим собственным разрешением и равномерным распределением сцинтилляционной эффективности, но состоял при этом из участков с различным составом основных и сложных таллиевых центров свечения, то после облучения такого образца равновесие нарушается за счет селективного уменьшения прозрачности кристалла по отношению к зеленому свету. При этом участок кристалла, имеющий более зеленое свечение вследствие повышенного содержания активатора, будет давать меньший сигнал, что в свою очередь повлечет за собой существенное искажение амплитудного спектра сцинтилляций и ухудшение собственного разрешения детектора. По данным работы [9], вклад сложных таллиевых центров становится заметным при концентрации $8 \cdot 10^{-2}$ мас. % и растет с увеличением концентрации активатора.

Следовательно, строгое равномерное объемное распределение активирующей добавки в кристаллах NaI(Tl) (условие трудно достижимое на практике), работающее в условиях воздействия радиационных полей, не является

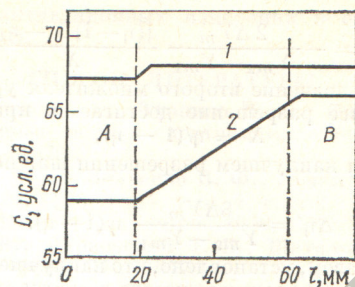


Рис. 3. Распределение сцинтилляционной эффективности по длине детектора NaI(Tl) размером 40×80 мм до (1) и после облучения (2) (облучение проводилось при комнатной температуре, доза 1 Гр)

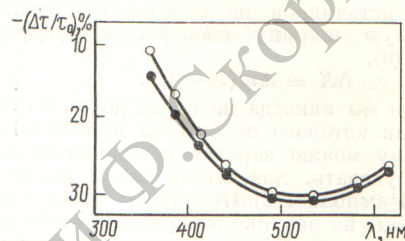


Рис. 4. Относительное уменьшение коэффициента светособирания для света различных длин волн, измеренное детекторами, облученными при комнатной температуре дозой 100 рад с различным радиационным изменением r : ○ — $\Delta r/r_0 \approx 10\%$; ● — $\Delta r/r_0 \approx 100\%$

обязательным, если концентрация таллия изменяется по объему образца в небольших пределах и не превышает значения $8 \cdot 10^{-2}$ мас. %. Ясно также, что кристаллы с пониженной средней концентрацией в меньшей степени снижают световой выход при воздействии γ -излучением.

Результаты проведенной работы позволяют сделать вывод о том, что повышение рабочей температуры кристаллов NaI(Tl) выше нормальной на $40-50^\circ$ значительно (в 2—3 раза) снижает ухудшение собственного разрешения детекторов при воздействии на них γ -излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарко Я. М., Чепелев В. В. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1965, т. 29, № 1, с. 78.
2. Батуричева З. Б., Гуревич Н. Ю., Цирлин Ю. А. «Оптика и спектроскопия», 1965, № 18, с. 129.
3. Гуревич Н. Ю. и др. В кн.: Монокристаллы и техника. Вып. 1, Харьков, изд. ВНИИмонокристаллов, 1970, с. 53.
4. Гуревич Н. Ю. В кн.: Тезисы докладов V Всесоюз. конф. по синтезу, производству и использованию сцинтилляторов. Харьков, изд. ВНИИмонокристаллов, 1968, с. 57.
5. Цирлин Ю. А. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 1, с. 69.
6. Ford R. e.a. «IEEE Trans. Nucl. Sci.», 1977, v. NS-24, N 1, p. 264.
7. Детекторы низионизирующих излучений, сцинтилляционные. Методы измерений сцинтилляционных характеристик. ГОСТ 17038-74. М., Изд-во стандартов, 1974.
8. Гуревич Н. Ю., Цирлин Ю. А., Берловский А. Я. «Бюл. изобрет.», 1969, № 30, с. 193.
9. Мустафина Р. Х., Панова А. Н. [3], с. 81.

Поступило в Редакцию 03.07.79