УДК 539.1.074 : 537.531

Сцинтилляционный детектор импульсного мягкого рентгеновского излучения

Ю. Я. Нефедов, П. Л. Усенко

Представлены результаты разработки и исследований характеристик детектора импульсного мягкого рентгеновского излучения, состоящего из сильноточного фотоэлектронного умножителя и тонкого пластмассового сиинтиллятора на основе полистирола. Исследования выполнены при регистрации импульсного квазимонохроматического рентгеновского излучения с энергией квантов 0,84 кэВ. Получена зависимость световыхода сцинтиллятора от плотности потока энергии излучения и сделана оценка средней эффективной толщины его поверхностного несцинтиллирующего («мертвого») слоя, влияющего на спектральную чувствительность детекторов подобного типа.

Специфика исследований импульсного мягкого рентгеновского излучения (РИ), несущего важную информацию о процессах в высокотемпературной плазме, связана с их однократным характером, малой длительностью, высокими плотностями потоков энергии мягкого РИ, наличием фона сопутствующих излучений различного состава и жесткости. Детекторы мягкого РИ размещаются в вакууме и работают в условиях влияния интенсивных электромагнитных помех. Отмеченные особенности определяют актуальность развития спектрально-селективных методов рентгеновской диагностики и токовых детекторов мягкого РИ с высоким временным разрешением [1, 2].

Для мониторирования кинетики и выхода энергии импульсного мягкого РИ в диапазоне энергии квантов 0,1–1,0 кэВ нами разработан сцинтилляционный детектор (СД) с быстрым временным откликом. Чувствительным элементом детектора служит пластмассовый сцинтиллятор (ПС) на основе полистирола толщиной 100 мкм. В качестве люминесцирующих добавок использовались паратерфенил ($C_{18}H_{14}$, массовая доля 2 %) и РОРОР ($C_{24}H_{16}N_2O_2$, массовая доля 0,06 %). Аналогами такого сцинтиллятора являются зарубежные пластмассовые сцинтилляторы UPS 923A [3] и MEL-150C [4]. Сцинтилляторы на основе полистирола имеют высокое временное разрешение и долговременную стабильность характеристик, негигроскопичны и могут размещаться внутри вакуумируемых систем без защитных оболочек.

Детектор устроен по схеме: поглощающий фильтр + ПС + волоконный световод + фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Фильтром служила свободновисящая алюминиевая фольга толщиной 5,7 мкм, исключающая влияние видимого и ультрафиолетового излучения и являющаяся эффективным отражателем люминесценции ПС.

Сцинтиллятор изготавливался методом термической полимеризации стирола (подвергнутого двойной вакуумной перегонке) в атмосфере азота с последующим отжигом. Полосы ПС требуемой

[©] Приборы и техника эксперимента. 2016. № 1. С. 113–117.

толщины формовались методом экструзии его расплава через щелевую фильеру без использования формирующих валиков и последующей полировки поверхности. Механическая обработка сводилась к вырезанию из экструдированных полос образцов ПС нужного диаметра (10 мм). Высокая визуальная прозрачность ПС свидетельствовала о хорошем качестве его поверхности вследствие преимущественной ориентации макромолекул полимера в направлении экструдирования [5, 6].

Люминесценция ПС сильноточным фотоэлектронным умножителем СНФТЗ [2] преобразовывалась в электрический сигнал. Оптическая связь между ПС и ФЭУ осуществлялась гибким стекловолоконным световодом Ø5 мм и длиной 250 мм с высоким светопропусканием на длинах волн спектра люминесценции ПС (420 нм) [7].

Временное разрешение СД составляло $\tau_{0,5} = 5$ нс, что подтверждалось результатами тестирования токового отклика детектора с использованием импульсной электронной трубки (ускоряющее напряжение 200 кВ) с длительностью выходного импульса на полувысоте амплитуды 2,0–2,5 нс [8]. В случае необходимости возможно повышение временного разрешения СД посредством использования «быстрых» ПС СПС-Б16 или СПС-Б18 ($\tau_{0,5} = 0,2$ нс) [9] и сильноточного ФЭУ СНФ1 ($\tau_{0,5} = 0,8-0,9$ нс) [2].

Исследования характеристик детектора выполнялись на линии неона (Ne K_{α}) с энергией квантов 0,84 кэВ и плотностью потока $10^{16}-10^{17}$ квантов/(см²·с) импульсного газоразрядного источника квазимонохроматического мягкого РИ на основе плазменного фокуса [10]. Монитором РИ служил полупроводниковый кремниевый детектор СППД11-03 ($\tau_{0,5} = 11$ нс) [2] с чувствительностью χ (0,84 кэВ) = (2,1 ± 0,2)·10⁻¹⁷ Кл·см²/квант (здесь и далее погрешности приводятся при доверительной вероятности 0,95).

Сцинтиллятор устанавливался в среде неона (давление 4 Торр) на расстоянии 50 мм от оси излучающего объема газоразрядного источника. Световод обеспечивал гальваническую развязку ФЭУ от силового контура экспериментальной установки. Удаление ПС от оси и телесный угол регистрации были идентичны таковым для монитора, что давало возможность сравнения их показаний.

Тракты регистрации сигналов с обоих детекторов выполнялись из высокочастотного коаксиального кабеля РК75-9-13 длиной 100 м. Для исключения взаимодействия с ФЭУ жесткого РИ, сопровождающего разряды плазменного фокуса (тормозное излучение с энергией квантов 100–400 кэВ [8]), использовалась свинцовая защита толщиной 12 мм. Влияние жесткого РИ на световод устранялось его обертыванием свинцовой фольгой суммарной толщиной 5 мм.

Характерные осциллограммы импульсов с детекторов, полученные на широкополосных аналоговых осциллографических регистраторах СРГ6 (для СППД11-03) и С9-4А (для СД) представлены на рис. 1. Более высокое временное разрешение СД позволяло наблюдать «тонкую» временную структуру импульсов мягкого РИ. Жесткое РИ разрядов не оказывало влияния на регистрируемые импульсы, что подтверждалось отсутствием сигналов с детектора при использовании перед ПС поглощающего Аl-фильтра толщиной 9 мкм.



Рис. 1. Осциллограммы импульсов со сцинтилляционного детектора (а) и монитора (б). Метки времени 25 МГц

Существенное увеличение информативности измерений параметров полей импульсного мягкого РИ достигается при известной абсолютной спектральной чувствительности детекторов. Чувствительность используемого нами СД в значительной степени определяется ослаблением мягкого РИ входным окном детектора: Al-фильтром и несцинтиллирующим или так называемым «мертвым» слоем на поверхности ПС, который не вносит вклада в результирующий сигнал [11]. Чувствительность СД для квантов линии Ne K_{α} , полученная сравнением его показаний с монитором, составила $\chi(0,84 \text{ кэB}) = (5,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-18} \text{ Кл} \cdot \text{см}^2/\text{квант.}$

При отсутствии возможности использования специализированных градуировочных систем (см., например, [2, 10]) чувствительность СД мягкого РИ определяется расчетным путем [12–14]. Повышение точности расчетных оценок связано с необходимостью учета толщины «мертвого» слоя ПС.

Природа формирования и эффективная толщина такого слоя (t_d) сравнительно слабо изучены и зависят от технологии изготовления ПС, обеднения его поверхности люминесцирующими добавками, старения полимерной основы и др. (поскольку характеристики «мертвого» слоя могут изменяться по мере удаления от поверхности в глубь объема ПС, используется его некая эффективная толщина). Имеющиеся разрозненные данные относительно толщин «мертвых» слоев ПС различного типа показывают, что $t_d \le 0.5-15$ мкм [4, 11, 15, 16]. Неопределенность в толщинах «мертвых» слоев и отсутствие данных о технологии изготовления ПС могут привести к расхождениям в расчетных оценках чувствительности СД к мягкому РИ, особенно в области энергий квантов $hv \le 1.0$ кэВ, соответствующей средним длинам их свободного пробега в ПС ≤ 10 мкм.

В этой связи авторы попытались экспериментально определить толщину «мертвого» слоя изготовленного ПС. Аналогично подходу из работы [17] исследования выполнялись путем сравнения сигналов с разнотолщинных сцинтилляторов (1,0 мкм и 100 мкм), которые попеременно облучались на линии Ne K_{α} . Сцинтиллятор толщиной $t_1 = 100$ мкм являлся детектором полного поглощения для излучения Ne K_{α} , а в ПС толщиной $t_2 = 1,0$ мкм поглощение составляло 30 % (оценки выполнены при линейном коэффициенте поглощения μ (0,84 кэВ) $\approx 3,5 \cdot 10^3$ см⁻¹, полученным по сечениям взаимодействия РИ с веществом из библиотеки оптических констант EPDL 97 [18] с учетом массовых долей компонентов ПС). Предполагалась идентичность толщин «мертвых» слоев этих ПС и количества однородно распределенных в них люминесцирующих добавок.

Тонкопленочный ПС с толщиной $t_2 = 1,0 \pm 0,05$ мкм изготавливался осаждением его раствора на стеклянную подложку толщиной 1,6 мм. Это обеспечивало равномерную толщину ПС, приводило к разгрузке напряжений и предотвращало растрескивание его поверхности. Общим для ПС обеих толщин являлось отсутствие механической обработки поверхности. Поскольку полистирол является кристаллизующимся термопластом, в котором со временем происходит дополнительное уплотнение структуры, сцинтилляторы выдерживались в течение одного года после изготовления для стабилизации их свойств.

Согласно существующим представлениям [19–21] тонкие пленки полимеров, полученные формованием из растворов на подложку, обладают значительной структурной неоднородностью. Здесь можно выделить по крайней мере три слоя разной структуры: внешний поверхностный («воздушный») слой, срединный слой и нижний («зеркальный») слой, соприкасающийся с подложкой. «Воздушный» слой характеризуется повышенной плотностью упаковки структурных образований в результате более полно прошедших в нем релаксационных процессов (не исключено, что это приводит к обеднению такого слоя люминесцирующими добавками). Срединный слой представляет собой сравнительно изотропный полимер, а «зеркальный» слой обладает наименее устойчивой структурой из-за фиксирующего действия подложки, затрудняющего кристаллизацию. Очевидно, что самоподдерживающиеся ПС имеют два «воздушных» и один срединный слой.

Наличие «зеркального» слоя не влияет на сцинтилляционные свойства ПС (люминесценция органических сцинтилляторов не зависит от их агрегатного состояния). За ухудшение этих свойств преимущественно ответственен «воздушный» слой вследствие перераспределения концентрации люминесцирующих добавок и тушения сцинтилляций, происходящих при его насыщении кислородом атмосферы. Подложка защищает «зеркальный» слой от насыщения силами адгезии, а сам полистирол обладает незначительной проницаемостью для газов и водяных паров, т. е. обращенная к подложке поверхность ПС не окисляется [22, 23]. Таким образом, «мертвый» слой присутствует только на внешней поверхности ПС на подложке, в то время как в ПС толщиной 100 мкм, имеющем такой слой на обоих торцах, влияние на регистрируемый сигнал оказывает только «мертвый» слой на входной для мягкого РИ поверхности сцинтиллятора.

Попеременное облучение обоих ПС выполнялось в идентичной геометрии и неизменных условиях светосбора в СД при плотности потока в линии Ne K_{α} (0,2–1,0)·10¹⁷ квантов/(см²·с). При смене сцинтилляторов в СД не нарушался оптический контакт между световодом и фотокатодом ФЭУ. Относительный характер подобных измерений обеспечивал сравнительно высокую точность их результатов.

Заряды с детекторов для ПС разных толщин ($Q_{CД}$) и монитора (Q_{M}) определялись интегрированием осциллограмм регистрируемых импульсов. Полученные средние значения отношений зарядов ($Q_{CД}/Q_{M}$) в сериях из 6–7 измерений составили: 0,98 ± 0,05 для $t_{2} \approx 1,0$ мкм и 4,89 ± 0,16 для $t_{1} = 100$ мкм. Отсутствие сигналов СД при использовании стеклянной подложки без ПС указывало на ее незначимый вклад в люминесценцию ПС.

Средняя эффективная толщина «мертвого» слоя ПС определялась исходя из средних значений отношений зарядов, регистрируемых с ПС разных толщин:

$$\frac{\left(\mathcal{Q}_{\mathrm{C}\mathrm{I}}/\mathcal{Q}_{\mathrm{M}}\right)_{\mathrm{l},0}}{\left(\mathcal{Q}_{\mathrm{C}\mathrm{I}}/\mathcal{Q}_{\mathrm{M}}\right)_{\mathrm{l}00}} = G \frac{\left\{1 - \exp\left[-\mu(0,84\,\mathrm{\kappa})\mathrm{B}\right)\left(t_{2} - t_{\mathrm{d}}\right)\right]\right\}}{\left\{1 - \exp\left[-\mu(0,84\,\mathrm{\kappa})\mathrm{B}\right)\left(t_{1} - t_{\mathrm{d}}\right)\right]\right\}} \approx G\left\{1 - \exp\left[-\mu(0,84\,\mathrm{\kappa})\mathrm{B}\right)\left(t_{2} - t_{\mathrm{d}}\right)\right]\right\}, \qquad (1)$$

где *G* – коэффициент, учитывающий отличие условий светосбора из-за разного характера отражения люминесценции от поверхностей раздела свободновисящего ПС (*сцинтиллятор* – воздух) и ПС на подложке (*сцинтиллятор* – стекло и стекло – воздух), а также поглощения сцинтилляций в ПС и стекле.

Значение коэффициента G определялось исходя из данных и рекомендаций работ [24–28] по значениям коэффициентов пропускания и поглощения люминесценции в ПС, стекле и воздухе (с учетом многократных отражений в однородных плоскопараллельных пластинах), а также усредненных по спектру люминесценции ПС показателей преломления указанных материалов. Оценка показала, что он близок к единице ($G \approx 0,998$). Вариации в используемых справочных данных существенно не сказывались на результате такой оценки.

Значение средней эффективной толщины «мертвого» слоя ПС, полученное по соотношению (1) с использованием средних значений отношений зарядов с детекторов $(Q_{CZ}/Q_{M})_{1,0}/(Q_{CZ}/Q_{M})_{100} \approx 0.98/4.89 \approx 0.20$, составило $t_{d} \approx 0.4$ мкм, что по порядку величины согласуется с результатами приведенных выше оценок.

Относительная спектральная чувствительность детектора на основе ПС толщиной 100 мкм, рассчитанная для толщины «мертвого» слоя (0,4 мкм) и поглощающего Al-фильтра (5,7 мкм) с использованием сечений из [18], представлена на рис. 2. Спектральный диапазон регистрации составляет примерно 0,7–18,0 кэВ при значительном спаде чувствительности вблизи *K*-скачка поглощения алюминия. В области $h\nu \leq 1,0$ кэВ чувствительность ограничена пропусканием мягкого



Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность пластмассового сцинтиллятора (100 мкм) с алюминиевым поглощающим фильтром (5,7 мкм) в зависимости от энергии квантов

РИ фильтром и «мертвым» слоем ПС. Очевидно, что уменьшение толщины поглощающего фильтра или выбор другого материала вместо алюминия (например, серебра) позволит обеспечить регистрацию в области более низких энергий квантов.

Поскольку при высоких плотностях ионизации не исключено снижение световыхода ПС изза образования центров тушения сцинтилляций и влияния поверхностных эффектов [29], авторами проверялась зависимость световыхода от плотности потока энергии РИ (ϕ), поглощенной в ПС в диапазоне $\phi = (0,6-6) \cdot 10^{15} \text{ кэB/(cm}^2 \cdot \text{с})$. Отношения регистрируемых зарядов с детекторов аппроксимировались линейными функциями по методу наименьших квадратов. Полученные зависимости $Q_{CД} = f(Q_M)$ с коэффициентами корреляции $r_{\kappa} \ge 0,94$, представленные на рис. 3, характеризуют линейность световыхода тонкопленочных ПС вплоть до $\phi = 6 \cdot 10^{15} \text{ кэB/(cm}^2 \cdot \text{с})$, что согласуется с данными из работы [11], где снижение световыхода ПС наблюдалось при значениях $\phi \ge 10^{16} \text{ кэB/(cm}^2 \cdot \text{с})$.

Знание толщины «мертвого» слоя ПС и поглощающего фильтра позволяет использовать расчетную спектральную чувствительность СД без внесения значимой погрешности в результаты измерений.

Полученные данные были использованы при определении спектральных чувствительностей каналов регистрации пространственно-временных характеристик высокотемпературного плазменного образования систем с магнитным обжатием, а также при рентгеноспектральных исследованиях параметров сильноточной лайнерной плазмы и электронно-циклотронного резонансного разряда [30–32].



Рис. 3. Зависимости показаний сцинтилляционного детектора от показаний монитора при изменении плотности потока энергии в пределах (0,6–6)·10¹⁵ кэВ/(см²·с): а – сцинтиллятор толщиной 100 мкм, б – сцинтиллятор толщиной 1,0 мкм

Список литературы

1. Веретенников А. И., Горбачев В. М., Предеин Б. А. Методы исследования импульсных излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. Средства диагностики однократного импульсного излучения / Под ред. А. И. Веретенникова. – М.: ИздАТ, 1999.

3. Артиков А. М., Булагов Ю. А., Ляблин М. В. и др. Свойства украинского пластмассового сцинтиллятора на основе полистирола UPS 923А: препринт № Д13-2005-111. – Дубна: ОИЯИ, 2005.

4. Clark D. The intrinsic scintillation efficiency of plastic scintillators for ⁶⁰Co gamma excitation // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1974. Vol. 117, N 1. P. 295–303.

5. Виноградова Н. В., Гальперина Р. С., Горин Ю. П. и др. Изготовление полистирольных пластических сцинтилляторов // ПТЭ. 1989. № 4. С. 56–58.

6. Раувендааль К. Экструзия полимеров. – С.-Пб.: ЦОП Профессия, 2010.

7. Криницина Л. Ф., Лебедев В. И., Минкович В. П. Некоторые свойства сцинтиллирующих волоконных световодов для датчиков излучений // Журн. прикл. спектроскопии. 1991. Т. 55. Вып. 2. С. 291–294.

8. Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов / Под ред. Н. Г. Макеева. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996.

9. Андреещев Е. А., Килин С. Ф., Ковырзина К. А. и др. Пластмассовый сцинтиллятор с малой длительностью импульса // ПТЭ. 1983. № 3. С. 52–54.

10. Нагорный В. И., Нефедов Ю. Я., Усенко П. Л. Источник импульсных потоков моноэнергетического мягкого рентгеновского излучения // ПТЭ. 1996. № 1. С. 137–141.

11. Калашников М. П., Ляпидевский В. К., Михайлов Ю. А. и др. Применение сцинтилляционных детекторов для рентгеновской диагностики лазерной плазмы: препринт № 26. – М.: ФИАН, 1984.

12. Аверкиев В. В., Ляпидевский В. К., Салахутдинов Г. Х. Применение сцинтилляционных кристаллов для регистрации рентгеновского излучения: препринт № 064. – М.: МИФИ, 1990.

13. Зяблин В. Л., Килин С. Ф., Куликова А. Ф. и др. О долговечности пластмассовых сцинтилляторов // ПТЭ. 1986. N 2. C. 73–76.

14. Pronko J. G., Guttman J. L., Burginyon G. A. et al. Absolute fluorescence yields of long and short term decay components of selected scintillators // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1993. Vol. A332. P. 121–128.

15. Hokin S. A., Stek P. C. Multichannel scintillator probe for energetic electron measurements // Rev. Sci. Instrum. 1988. Vol. 59, N 11. P. 2366–2369.

16. Adlam J. H., Burcham J. N. The variation of the conversion efficiency of an NE-102A plastic scintillator with X-ray energy in the range 1.8-4.5 keV // J. of Sci. Instrum. 1966. Vol. 43, N 2. P. 93–96.

17. Chappell J. H., Murray S. S. Relative efficiencies and physical characteristics for a selected group of X-ray phosphors // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1984. Vol. 221, N 1. P. 159–167.

18. Cullen D. E., Hubbel J. H., Kissel L. The evaluated photon data library 97' version // LLNL Report UCRL-50400. 1997. Vol. 6, N 5.

19. Смородин В. Е. О топологической структуре и физических свойствах пленок на энергетически неоднородных поверхностях // Поверхность. 1991. Вып. 12. С. 85–91.

20. Малинский Ю. М. О влиянии твердой поверхности на процессы релаксации и структурообразования в пристенных слоях полимеров // Успехи химии. 1970. Т. 39. Вып. 8. С. 1511–1535.

21. Полимерные пленочные материалы / Под ред. В. Е. Гуля. – М.: Химия, 1976.

22. Беннет Х. Е., Беннет Дж. М. Прецизионные измерения в оптике тонких пленок // Физика тонких пленок. – М.: Мир, 1970. Т. 4.

23. Суйковская Н. В. Химические методы получения тонких прозрачных пленок. – Л.: Химия, 1971.

24. Лебедева В. В. Экспериментальная оптика. – М.: Изд-во МГУ, 1994.

25. Стекло: справочник / Под ред. Н. М. Павлушкина – М.: Стройиздат, 1973.

26. Henke B. L., Gullikson E. M., Davis J. C. X-ray interaction: photoabsorption, scattering, transmission and reflection at E = 50-30000 eV // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993. Vol. 54, N 2. P. 181–342.

27. Rebourgeard P., Blumenfeld H., Bourdinand M. A simple method for measuring the performance of plastic scintillating materials // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1990. Vol. NS-36, N 1. P. 150–157.

28. Цирлин Ю. А. Светособирание в сцинтилляционных счетчиках. – М.: Атомиздат, 1975.

29. Pronko J. G., Chase L. F. Temporal characteristics and saturation effects of organic scintillators to low-energy X-rays // Nucl. Instrum. and Methods. 1979. Vol. 164, N 1. P. 79–92.

30. Volkov A., Usenko P., Garanin S. et al. Registration of plasma spatial-temporal parameters in explosive experiments MAGO // Proc. of 28th IEEE Int. Conf. PPPS-2001. Las Vegas, USA, 17–22 June 2001.

31. Селемир В. Д., Демидов В. А., Ивановский А. В. и др. Исследования генерации рентгеновского излучения при схлопывании лайнеров, формируемых из проволочных каркасов, запитываемых от взрывомагнитных генераторов // Тр. международ. семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии» // Под ред. Г. А. Швецова. – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2004.

32. Водопьянов А. В., Голубев С. В., Зорин В. Г. и др. Рентгеновское изображение плазмы импульсного ЭЦР-разряда, поддерживаемого миллиметровым излучением гиротрона: препринт № 568. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2001.

A Scintillation Detector of Pulsed Soft X-Rays

Yu. Ya. Nefedov, P. L. Usenko

A pulsed soft X-ray detector consisting of a high-current photomultiplier tube and a thin-film polystyrene-based plastic scintillator was developed. Its characteristics were investigated by detecting quasimonochromatic 0.84 keV X-ray pulses. The dependence of scintillator light output on the photon energy flux density was obtained. The average effective thickness of the surface non-scintillating («dead») layer affecting the spectral response of this detector type was estimated. УДК 621.3.038.624 + 621.039.566 + 539.1.04

Центр коллективного пользования РФЯЦ-ВНИИЭФ «Радиационные исследования и испытания»

- Н. В. Завьялов, С. В. Воронцов,
- А. А. Девяткин, В. С. Гордеев,
- Е. Ю. Тарасова, В. Н. Щеглов,
- А. В. Грунин, С. А. Лазарев,
- Е. Н. Донской, А. Н. Залялов,
- В. В. Гаганов, Ф. К. Киселёв,
- О.С. Кротова, К.М. Музюкин

Описана испытательная база Центра коллективного пользования радиационных исследований и испытаний РФЯЦ-ВНИИЭФ. Рассмотрена методология проведения испытаний по моделированию дозовых ионизационных и структурных повреждений электронной компонентной базы и приборов космической техники от протонного и электронного излучения космического пространства, а также вторичного излучения, вызванного взаимодействием частиц космического пространства с конструкцией космического аппарата и атмосферой Земли.

Введение

Установки РФЯЦ-ВНИИЭФ широко применяются для тестирования режимов функционирования радиоэлектронной аппаратуры космической техники и работоспособности микросхем в условиях действия частиц космического пространства. Применение установок осуществляется в режиме Центра коллективного пользования «Радиационные исследования и испытания – ВНИИЭФ» (ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ»). Центр функционирует в интересах предприятий Роскосмоса, Министерства образования и науки и Министерства промышленности и торговли. Деятельность ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» осуществляется в соответствии с положением о ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ», а также «Регламентом взаимодействия при предоставлении услуг ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» в соответствии с годовым координационным планом работы.

Развитие специализированных установок РФЯЦ-ВНИИЭФ для исследований физики радиационных взаимодействий частиц и излучений космического пространства продолжается и в настоящее время.

Организационная структура и основные задачи

ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» функционирует на базе структурного подразделения РФЯЦ-ВНИИЭФ. Его руководитель несет персональную ответственность за результаты деятельности центра, целевое использование испытательного и измерительного оборудования.

В результате воздействия ионизирующих излучений естественных радиационных поясов Земли (протонного, электронного и генерируемого ими тормозного излучения) в применяемых в космической отрасли интегральных схемах возникают дозовые эффекты, приводящие к деградации характеристик – радиационному повреждению и изменению функциональных параметров материалов микросхем. В связи с этим определяются задачи ЦКП:

 проведение радиационных испытаний микросхем, приборов и аппаратуры космической техники по дозовым эффектам;

 – разработка, сопровождение и совершенствование методологии проведения испытаний (исследований), формирование предложений по совершенствованию методической и экспериментально-испытательной базы, в том числе методического, аппаратного и программного обеспечения, применяемого при обработке экспериментальной информации;

 метрологическое сопровождение испытаний, включая аттестацию измерительного и испытательного оборудования;

 – повышение эффективности использования приборов и научного оборудования ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ», участие в развитии новых методов исследований и интерпретации их результатов.

Методология

Основанием методологии испытаний ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» являются:

– детализация характеристик полей ионизирующего излучения космического пространства;

 – определение основных радиационных эффектов и контролируемых параметров электронной компонентной базы (ЭКБ) и аппаратуры;

 – эквивалентное воспроизведение дозовых ионизационных и структурных повреждений в радиационно-чувствительных элементах;

- перенос результатов на заданные характеристики излучения космического пространства;

- формирование заключения о стойкости.

В целях обеспечения моделирования эквивалентных радиационных нагрузок в чувствительных областях ЭКБ, приборах и радиоэлектронной аппаратуре проводятся расчеты ионизационного действия проникающей радиации на данные элементы и корпуса сложных технических систем по методикам:

– «Триада» – методика и программа решения методом Монте-Карло линейных задач совместного переноса гамма-излучения и электронов в цилиндрической геометрии (от 0,1 кэВ до 1 ГэВ) [1];

– С-007 – методика и программа решения методом Монте-Карло линейных задач совместного переноса нейтронов, гамма-излучения, электронов и позитронов в сложной трехмерной геометрии (от 1 кэВ до 100 МэВ) [2].

Схема проведения расчета показана на рис. 1.



Трехмерная модель

Конвертация трехмерного чертежа из САПР в формат СМК

Задание данных для расчета. Совместный перенос электронов, гамма-квантов и нейтронов



Экспериментально-испытательная база

Для моделирования воздействия ионизирующего излучения электронов, протонов и тормозного излучения космического пространства по дозовым эффектам в состав испытательного оборудования ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» входят:

1) Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-7-2 [3] (рис. 2), предназначенный для генерации электронного и тормозного излучения в течение длительного времени в широком диапазоне мощности экспозиционной дозы тормозного излучения: от 0,1 до 250 $P \cdot c^{-1}$ на площади 800 см² с неоднородностью не хуже 30 %. Энергия ускоряемых электронов – 6,5 МэВ.

Расстояние установки контрольно-измерительной аппаратуры (длина кабелей) – 25 м. Режим работы ускорителя – круглосуточный с перерывами на обслуживание.

2) Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-10-20 [4] (рис. 3), предназначенный для моделирования эффектов дозового воздействия ионизирующего излучения космического пространства. Характеристики ускорителя ЛУ-10-20: энергия ускоренных электронов (регулируемая) – 5–9 МэВ; длительность импульсов – 3,5 мкс; частота повторения импульсов – 10–1000 Гц; мощность экспозиционной дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени на площади



Рис. 2. Ускоритель ЛУ-7-2

Рис. 3. Ускоритель ЛУ-10-20

 \emptyset 0,2 м² с неоднородностью не хуже 30 % – до 500 Р·с⁻¹. Система развертки электронного пучка и транспортировочная линия позволяют проводить ускоренные испытания с площадью облучения до 1 м².

Расстояние установки контрольно-измерительной аппаратуры (длина кабелей) – 30 м. Режим работы ускорителя – круглосуточный с перерывами на обслуживание.

3) Установка рентгеновская статическая (УРС) предназначена для изучения дозовых эффектов при радиационных исследованиях и испытаниях. Дозовое поле формируется с помощью трех излучателей, независимо перемещаемых в пространстве. Силовая часть установки создана на базе серийных рентгеновских аппаратов РАП-300 и РУП-300. Энергия квантов рентгеновского излучения 5–120 кэВ, номинальный ток трубок 10–13 мА, угловая расходимость пучка каждого излучателя 40°, максимальная мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения 15 Р·с⁻¹.

Излучатели и генераторы напряжения размещены на двух стендах с габаритами 3×2,9×1 м³ и 2×1,6×1 м³. Время непрерывной работы – 24 ч. Расстояние установки контрольно-измерительной аппаратуры – 20 м.

4) Нейтронный генератор НГ-150М [5] (рис. 5) предназначен для моделирования структурных повреждений в ЭКБ от протонов и атмосферных нейтронов. Режим работы – статический с энергией нейтронов 14 МэВ. Плотность потока нейтронов $\varphi = 1 \cdot 10^9$ нейтр. см⁻²·c⁻¹. Установка является эталоном II разряда для воспроизведения единиц плотности потока и флюенса нейтронов. Расстояние установки контрольно-измерительной аппаратуры – 5 м.

5) Ядерный реактор БР-1М [6] (рис. 6) – реактор с металлической активной зоной из сплава высокообогащенного урана с молибденом. Средняя энергия спектра нейтронного излучения в центральном канале – 1,26 МэВ, на поверхности активной зоны (А3) – 1,29 МэВ. Доля нейтронов с энергией E > 0,1 МэВ в спектре утечки и в центральном канале составляет 95,5 %. Средняя энергия спектра γ -излучения в центральном канале – 1,10 МэВ, на поверхности – 1,25 МэВ.

В настоящее время кроме БР-1М [6] в ЦКП функционируют еще два ядерных реактора – БР-К1 и ВИР-2М [6]. Установки оснащены различными экспериментальными устройствами, позволяющими изменять соотношение нейтронной и гамма-составляющих проникающих излучений с целью расширения экспериментальных возможностей.



Рис. 4. Установка УРС



Рис. 5. Генератор НГ-150М



Рис. 6. Реактор БР-1М



6) Ядерный реактор БР-К1 [6] (рис. 7) представляет собой многоцелевую ядерно-физическую установку, предназначенную как для калибровки детекторов в опорных полях нейтронов (МОП-К2), пространственно совмещенных с аттестованным источником γ-излучения, так и для облучения ЭКБ и приборов космической техники. Для размещения исследуемых объектов на позиции облучения используется контейнер горизонтальной загрузки (КГЗ), закрепленный на стенде реактора. Стенд обеспечивает загрузку контейнера в АЗ реактора и его удаление на расстояние ~6 м от поверхности АЗ. Конфигурации КГЗ в двух практически значимых вариантах: пустой (КГЗ-П) и с п-γ-конвертором (КГЗ-НГК). Конвертор используется для трансформации нейтронного излучения реактора и представляет собой шестигранный «стакан» с диаметром полости облучения 308 и 360 мм.

7) Водный реактор ВИР-2М [6]. Планировка здания с установкой ВИР-2М показана на рис. 8, расположение экспериментальных каналов в корпусе реактора – на рис. 9.



Рис. 8. Планировка здания с реактором ВИР-2М

Рис. 9. Экспериментальные каналы реактора ВИР-2М: 1 – корпус активной зоны, 2 – стержень управления реактивностью, 3 – центральный экспериментальный канал (Ø142 мм), 4 – полусферический экспериментальный канал (Ø300 мм)

Облучение возможно в центральном канале (ЦК) диаметром 142 мм и полусферическом канале (ПСК) радиусом 300 мм, а также в любой точке нижнего зала размером 10×10×2,5 м в поле излучения ПСК. Средняя энергия нейтронов в экспериментальных каналах – 0,7 МэВ, γ-квантов – 1,5 МэВ. Возможна длительная работа на статической мощности.

Параметры полей излучения при работе установок БР-1М, БР-К1, ВИР-2М в статическом режиме представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики излучения при трехчасовом облучении в статическом режиме до флюенса нейтронов 10¹⁰ см⁻²

Установка	Размер зоны облучения, мм	Доза, мощность дозы ү-излучения	
		Р	$\mathbf{P} \cdot \mathbf{c}^{-1}$
БР-1М ЦК	Ø94×180	3,7	3,4.10-4
Поверхность АЗ	200×200	2,9	$2,7.10^{-4}$
БР-К1 КГЗ-П	Ø310×360	$1,5 \cdot 10^{-1}$	1,4.10-5
ВИР-2М ПСК	Ø300×300	$1,0.10^{1}$	9,3.10-4

Таблица 2

Характеристики излучения при 30-часовом облучении в статическом режиме до флюенса нейтронов 5·10¹³ см⁻²

Установка	Размер зоны облучения, мм	Доза, мощность дозы ү-излучения	
		Р	$P \cdot c^{-1}$
БР-1М ЦК	Ø94×180	$1,9.10^{4}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$
Поверхность АЗ	200×200	3,6·10 ³	3,3.10-2
БР-К1 КГЗ-П	Ø310×360	$7,4.10^{2}$	7,0.10-3
ВИР-2М ПСК	Ø300×300	$5,0.10^4$	4,6.10-1

Перед применением в опытах дозиметры гамма-излучения калибруются в поле гамма-излучения источника ⁶⁰Со. Передача единицы мощности экспозиционной дозы осуществляется от установки «Эталон 3» (рис. 10) из состава вторичного рабочего эталона экспозиционной дозы ВЭТ 8-12-91 в соответствии с поверочными схемами. Паспортное значение начальной активности источника, известное с погрешностью 10 % при доверительной вероятности 0,95, на 27.07.1989 г. составляет 432 Ки [7].



Рис. 10. Установка «Эталон-3»

Методическое оснащение

Установки ЛУ-7-2, ЛУ-10-20, УРС, БР-1М, ВИР-2М, БР-К1 аттестованы в качестве испытательного оборудования для проведения испытаний на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства. Аттестация проведена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.568-97 аттестационной комиссией.

В соответствии с действующими нормативными документами в области обеспечения единства измерений ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» оснащен методиками и средствами измерений характеристик полей ионизирующих излучений применяемых установок во всем диапазоне их возможных значений. Методическое обеспечение моделирующих установок и комплексов ЦКП включает в себя комплекты детекторов, измерительных кабельных линий, современной регистрирующей аппаратуры и программного обеспечения для проведения измерений характеристик излучений в широком диапазоне значений.

Для измерений радиационной реакции испытуемых объектов рабочие места оснащены измерительными средствами современного уровня. Предпочтение отдано программно-аппаратным комплексам на базе автоматизированных рабочих мест. Использование современного оборудования позволяет оптимизировать процесс испытаний ЭКБ, включая автоматизацию управления экспериментом, проводить эксперименты одновременно с большим количеством исследуемых образцов и изучать большое количество функциональных блоков в каждом образце.

В качестве примера приведены результаты испытаний нескольких микросхем:

– испытания интегральных микросхем по дозовым эффектам (рис. 11–13);

 моделирование атмосферных нейтронов с использованием нейтронного генератора (рис. 14, 15).



Рис. 11. Испытания микросборки с функцией реле



Рис. 12. Рост тока потребления ИМС







Рис. 14. Испытания ОЗУ



Рис. 15. Накопление ошибок в памяти ОЗУ в процессе облучения в зависимости от флюенса нейтронов

Заключение

ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» оснащен типовыми методиками проведения испытаний стойкости ЭКБ и радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений космического пространства, аттестованными установками; в центре работает квалифицированный персонал.

ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» обеспечивает моделирование воздействия протонного, электронного и генерируемого ими тормозного излучений по структурным и ионизационным эффектам от воздействия ионизирующих излучений космического пространства.

Проведение испытаний и исследований в ЦКП осуществляется на основании договора, заключенного от имени РФЯЦ-ВНИИЭФ.

ЦКП «РИИ – ВНИИЭФ» обеспечивает объективность, достоверность, точность и воспроизводимость результатов испытаний, соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2009.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» имеет лицензию Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.15.002.Л.000056.03.10 от 05.03.2012 на осуществление деятельности в области использования источников ионизирующего излучения.

Список литературы

1. Грунин А. В., Шмаров А. Е. Программирование монте-карловских задач с визуализацией процесса расчета // VII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006. С. 53–59.

2. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24. 3. Шориков И. В., Завьялов Н. В., Хохлов Ю. А. и др. Малогабаритный линейный ускоритель электронов для гаммаграфии крупногабаритных объектов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. Вып. 3. С. 142.

4. Завьялов Н. В., Тельнов А. В., Хохлов Ю. А. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физ. исследования. 1997. Вып. 2, 3 (29, 30).

5. Abramovich S. N., Nefedov Y. Y., Semenov V. I. et al. Benchmark experiments on measurement of neutron and gamma-ray leakage spectra and yields from three vanadium spheres // Fusion Engin. and Design. 2001. Vol. 58–59. P. 601–606.

6. 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. Вып. 1. С. 140.

7. Грунин А. В., Донской Е. Н., Залялов А. Н. и др. Экспериментальное и расчетное определение дозовых характеристик эталонного источника гамма-излучения // Атомная энергия. 2009. Т. 107. Вып. 5. С. 285–288.

RFNC-VNIIEF Multi-Access Center «Radiation Studies and Tests»

N. V. Zavyalov, S. V. Vorontsov, A. A. Devyatkin, V. S. Gordeev, E. Yu. Tarasova, V. N. Shcheglov, A. V. Grunin, S. A. Lazarev, E. N. Donskoy, A. N. Zalyalov, V. V. Gaganov, F. K. Kiselev, O. S. Krotova, K. M. Muzyukin

The paper contemplates a test base of the Multi-Access Center for Radiation Studies and Tests of RFNC-VNIIEF. Considered is a methodology for conducting tests on modeling of dose ionization and structural damages of electron component base and space technology devices by proton, electron space radiation, as well as by secondary radiation, caused by interaction between space particles and space craft structure as well as the Earth atmosphere.