

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 сцинтиллятора 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 мониторинга 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, исключаяющая 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

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 $\varnothing 5$ 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 (NeK_{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 $\chi(0,84 \text{ кэВ}) = (2,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-17}$ 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 Al-фильтра толщиной 9 мкм.

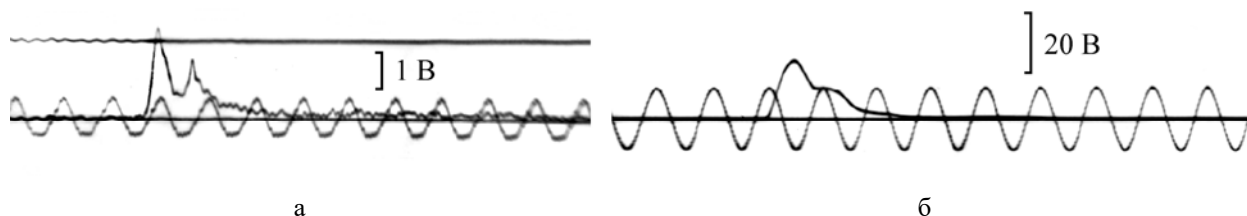


Рис. 1. Осциллограммы импульсов со сцинтилляционного детектора (а) и монитора (б).
Метки времени 25 МГц

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 несцинтилирующим или так называемым «мертвым» слоем на поверхности ПС, который не вносит вклада в результирующий сигнал [11]. Чувствительность СД для квантов линии NeK_{α} , полученная сравнением его показаний с монитором, составила $\chi(0,84 \text{ кэВ}) = (5,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-18} \text{ Кл} \cdot \text{см}^2/\text{квант}$.

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 $t_d \leq 0,5\text{--}15 \text{ мкм}$ [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 $h\nu \leq 1,0 \text{ кэВ}$, соответствующей средним длинам их свободного пробега в ПС $\leq 10 \text{ мкм}$.

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 NeK_{α} . Сцинтиллятор толщиной $t_1 = 100 \text{ мкм}$ являлся детектором полного поглощения для излучения NeK_{α} , а в ПС толщиной $t_2 = 1,0 \text{ мкм}$ поглощение составляло 30 % (оценки выполнены при линейном коэффициенте поглощения $\mu(0,84 \text{ кэВ}) \approx 3,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$, 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 $t_2 = 1,0 \pm 0,05 \text{ мкм}$ 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 формированием 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 NeK_{α} $(0,2-1,0) \cdot 10^{17}$ 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 ($Q_{СД}$) и монитора ($Q_{М}$) определялись интегрированием осциллограмм регистрируемых импульсов. Полученные средние значения отношений зарядов ($Q_{СД}/Q_{М}$) в сериях из 6–7 измерений составили: $0,98 \pm 0,05$ для $t_2 \approx 1,0$ мкм и $4,89 \pm 0,16$ 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:

$$\frac{(Q_{СД}/Q_{М})_{1,0}}{(Q_{СД}/Q_{М})_{100}} = G \frac{\{1 - \exp[-\mu(0,84 \text{ кэВ})(t_2 - t_d)]\}}{\{1 - \exp[-\mu(0,84 \text{ кэВ})(t_1 - t_d)]\}} \approx G \{1 - \exp[-\mu(0,84 \text{ кэВ})(t_2 - t_d)]\}, \quad (1)$$

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 $(Q_{СД}/Q_{М})_{1,0}/(Q_{СД}/Q_{М})_{100} \approx 0,98/4,89 \approx 0,20$, 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

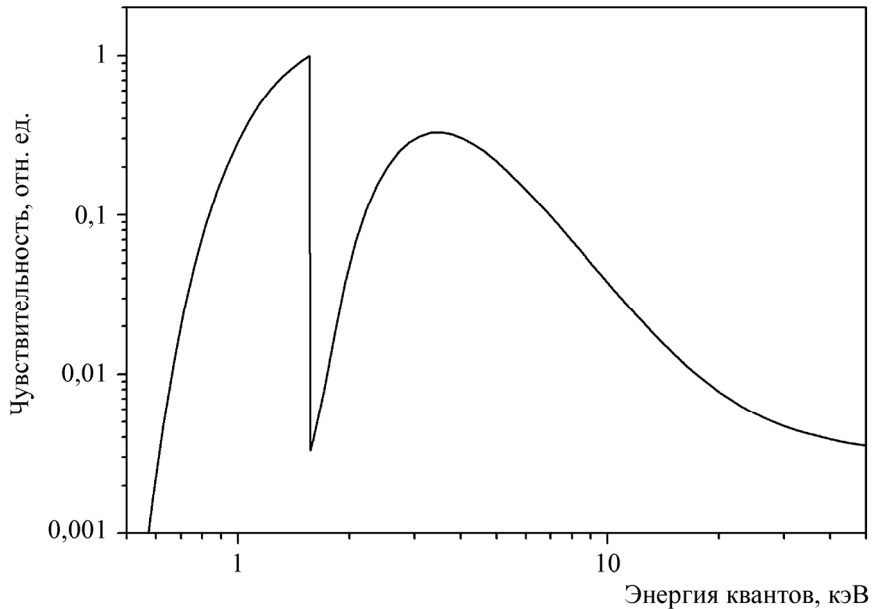


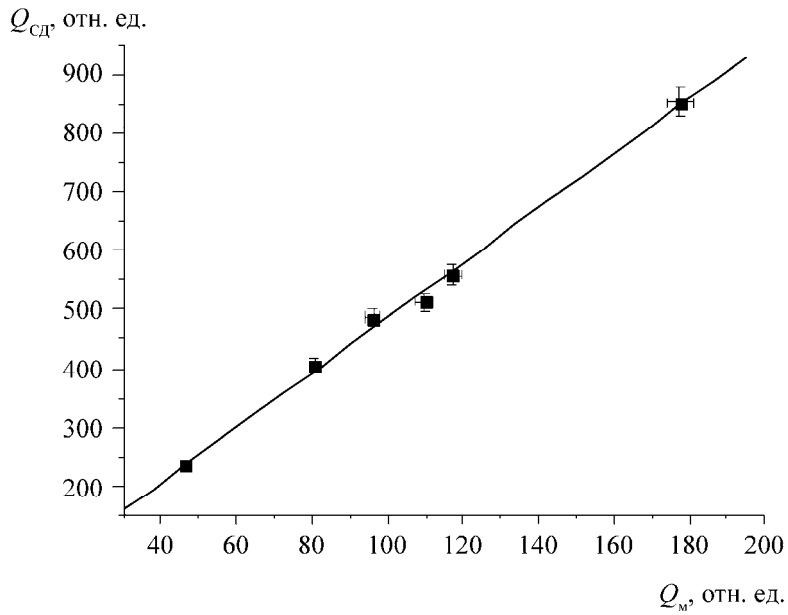
Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность пластмассового сцинтиллятора (100 мкм) с алюминиевым поглощающим фильтром (5,7 мкм) в зависимости от энергии квантов

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.

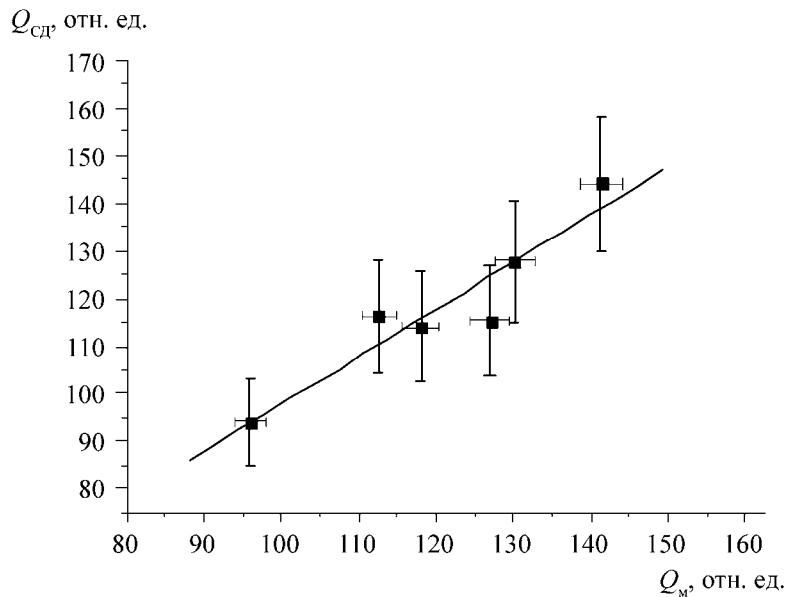
Поскольку при высоких плотностях ионизации не исключено снижение световыхода ПС из-за образования центров тушения сцинтилляций и влияния поверхностных эффектов [29], авторами проверялась зависимость световыхода от плотности потока энергии РИ (φ), поглощенной в ПС в диапазоне $\varphi = (0,6-6) \cdot 10^{15}$ кэВ/(см²·с). Отношения регистрируемых зарядов с детекторов аппроксимировались линейными функциями по методу наименьших квадратов. Полученные зависимости $Q_{сд} = f(Q_M)$ с коэффициентами корреляции $r_k \geq 0,94$, представленные на рис. 3, характеризуют линейность световыхода тонкопленочных ПС вплоть до $\varphi = 6 \cdot 10^{15}$ кэВ/(см²·с), что согласуется с данными из работы [11], где снижение световыхода ПС наблюдалось при значениях $\varphi \geq 10^{16}$ кэВ/(см²·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].



а



б

Рис. 3. Зависимости показаний сцинтилляционного детектора от показаний монитора при изменении плотности потока энергии в пределах $(0,6-6) \cdot 10^{15}$ кэВ/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$): а – сцинтиллятор толщиной 100 $\mu\text{м}$, б – сцинтиллятор толщиной 1,0 $\mu\text{м}$

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 ^{60}Co 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. С. 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 $E = 50\text{--}30000$ 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. PPS-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 quasi-monochromatic 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.