

12

Измерение характеристик сцинтилляторов при импульсном рентгеновском возбуждении

© П.А. Родный, С.Б. Михрин, А.Н. Мишин

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 26 февраля 2000 г.

Разработана установка для измерения основных характеристик сцинтилляторов: постоянные спада, световой выход спектра излучения. Установка состоит из трех основных частей: малогабаритный источник коротких рентгеновских импульсов, криостат и схема регистрации. Источник имеет следующие предельные параметры: длительность импульсов ~ 0.5 ns, частота следования 100 kHz, напряжение на рентгеновской трубке 30 kV, амплитуда тока 0.5 A. Схема регистрации позволяет проводить измерения в спектральном диапазоне 200–800 nm и временном интервале от 0.5 ns до 50 μ s с разрешением не хуже 0.1 ns.

Измерение основных характеристик сцинтилляторов (постоянные спада, световой выход, спектр излучения) проводится обычно при возбуждении гамма-квантами или частицами (электроны, протоны, нейтроны и т.д.) [1]. В последнее время применяют также импульсное рентгеновское излучение для исследования люминесцентных и сцинтилляционных характеристик широкозонных кристаллов [2]. Преимущества возбуждения исследуемых кристаллов рентгеновскими импульсами очевидны. По сравнению с гамма-квантами и тяжелыми (α , n) частицами — это высокая равномерность и стабильность возбуждения объема образца, соответственно излучающего световые импульсы со стабильными характеристиками. По сравнению с электронным возбуждением — это отсутствие заряда поверхности образца и возможность безвакуумного расположения исследуемого объекта. При поиске новых сцинтилляционных материалов исследователи часто имеют дело с несовершенными образцами малых размеров, и в этом случае мощные рентгеновские импульсы оказываются незаменимыми. Эксперименты, использующие импульсное рентгеновское излучение, отличаются простотой и на-

дежностью, что особенно удобно при исследовании большого числа объектов [1,2].

В настоящее время сцинтилляторы используются в физике высоких энергий, в позитронной эмиссионной томографии, компьютерной рентгеновской томографии и в других устройствах с высокой скоростью счета событий. Такие устройства должны содержать "быстрые" сцинтилляторы с наносекундными и субнаносекундными временами высвечивания. Число таких сцинтилляторов ограничено (BaF_2 , ZnO:Ga), поэтому проводится активный поиск новых материалов, обладающих кратковременными сцинтилляциями. Отсюда вытекает потребность в коротких (субнаносекундных) возбуждающих импульсах.

Выпускаемые промышленностью импульсные источники с двухэлектродными рентгеновскими трубками (РТ) [3] обладают рядом недостатков: нестабильность параметров рентгеновских импульсов, малая частота следования, высокое ($\sim 10^6 \text{ V}$) анодное напряжение. Сравнительно недавно началось использование трехэлектродных (управляемых) РТ, позволяющих получать стабильные по амплитуде импульсы длительностью $\geq 10 \text{ ns}$ [4].

Один из путей получения коротких рентгеновских импульсов — использование РТ с фотокатодом, возбуждаемым лазером [5]. Такой источник позволяет получать импульсы длительностью $\sim 100 \text{ ps}$ при анодном напряжении 30 kV . Существенным недостатком источника является очень низкое амплитудное значение анодного тока РТ ($\leq 50 \mu\text{A}$). В результате энергия рентгеновского излучения, поглощаемого образцом за импульс, лишь немногим превышает энергию отдельного гамма-кванта от источника ^{60}Co .

В настоящей работе описан источник с трехэлектродной РТ (30 kV , 0.5 A), позволяющий получать субнаносекундные рентгеновские импульсы с частотой следования до 100 kHz . Основными элементами источника являются трехэлектродная рентгеновская трубка РТИ2-0.05 и модулятор (блоки 2, 3, рис. 1). Модулятор, представляющий собой оптоэлектронную GaAs пару светодиод–тиристор, вырабатывает управляющий импульс амплитудой до 290 V и длительностью $\sim 0.5 \text{ ns}$ (ширина на полувысоте) на нагрузке 50Ω [6]. Запуск модулятора в нашем случае осуществляется от генератора Г5-56 (1), работающего в режиме: 10 V , 100 ns , 100 kHz , а питание подается от блока (6). Важным элементом схемы является коаксиальное соединение малогабаритного полупроводникового модулятора с сеточно-катодным узлом РТ в едином блоке, что

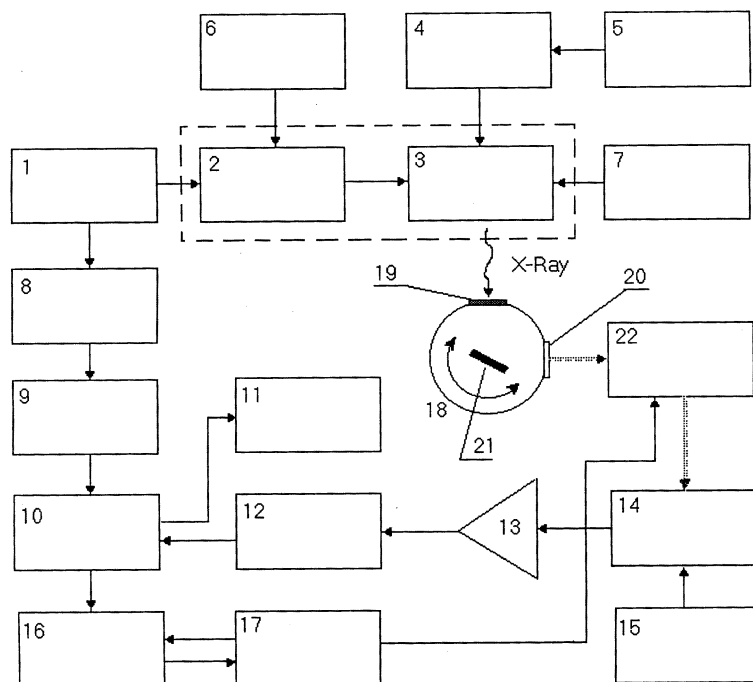


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения характеристик сцинтилляторов при импульсном рентгеновском возбуждении: 1 — генератор импульсов, 2 — модулятор, 3 — источник рентгеновский импульсный, 4 — высоковольтный источник, 5 — блок управления, 6 — источник питания модулятора, 7 — источник напряжения смещения, 8 — разделительный трансформатор, 9 — схема временной привязки канала СТАРТ, 10 — времяамплитудный преобразователь, 11 — частотомер, 12 — схема временной привязки канала СТОП, 13 — усилитель, 14 — фотоэлектронный умножитель, 15 — источник питания фотоэлектрического умножителя, 16 — аналого-цифровой преобразователь, 17 — IBM PC, 18 — криостат, 19 — бериллиевое окно криостата, 20 — кварцевое окно криостата, 21 — образец, 22 — монохроматор.

обеспечивает возможность субнаносекундной коммутации [6]. Питание РТ осуществляется от источника высокого напряжения (4) (до 30 kV), управляемого блоком (5). На сетку РТ от источника (7) подается

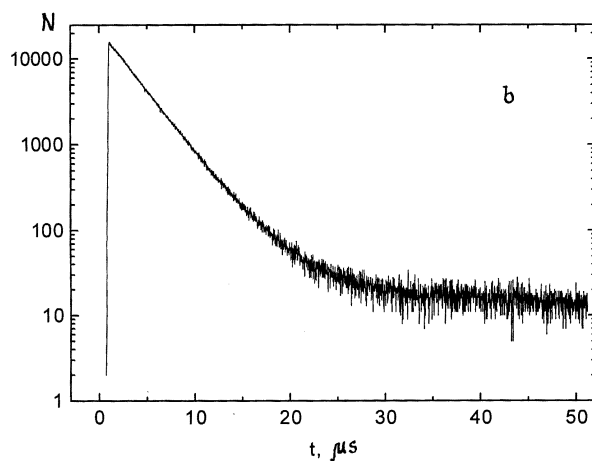
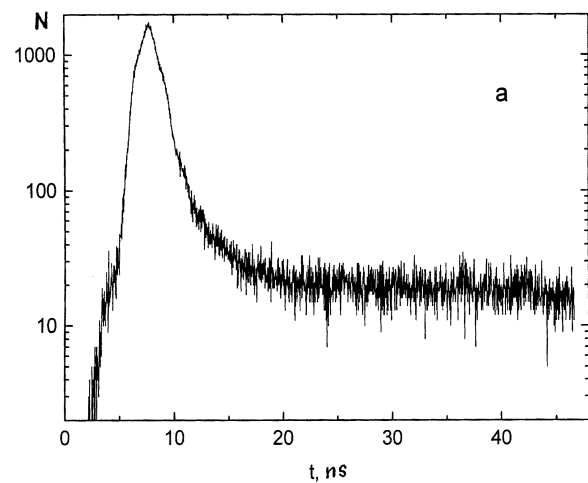


Рис. 2. Кинетика люминесценции BaF_2 (a) и $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Pr}$ (b) при импульсном рентгеновском возбуждении. N — число импульсов.

постоянное отрицательное смещение (100–250) V, которое может также изменять длительность рентгеновского импульса в небольших пределах. Используемая схема позволяет получать короткие (0.5 ns) импульсы

анодного тока и соответственно рентгеновские импульсы, которые немного ($\sim 30\%$) расширены относительно токовых импульсов сетка-катод. Длительность последних на полувысоте составляет $0.6\text{--}1.0\text{ ns}$ в зависимости от величины напряжения смещения. Нестабильность плотности потока рентгеновских квантов на оси РТ составляет $\sim 1\%$ при нестабильности анодного тока 0.5% .

Источник, содержащий РТ и модулятор, выполнен в виде цилиндра длиной 15 cm и диаметром 10 cm (вместе со свинцовой защитой). Такая конструкция, подобно фотоэлектронному умножителю (ФЭУ), легко помещается на оптическую скамью экспериментальной установки и стыкуется с криостатом. Потребляемая мощность источника (исключая генератор Г5-56) составляет 50 W . При работе в режиме 0.5 A , 1 ns 100 kHz средний анодный ток трубки $\sim 25\text{ }\mu\text{A}$, т.е. существенно меньше максимально допустимого среднего тока $500\text{ }\mu\text{A}$. Рабочее напряжение РТ ($\leq 30\text{ kV}$) также меньше номинального (50 kV). Накопление информации при измерении кинетических кривых и спектров излучения сцинтилляторов длится единицы минут. Таким образом, диссипативные потери на аноде РТ в течение измерений не велики, и устройство не требует специального охлаждения.

Некоторые элементы малогабаритного рентгеновского источника практически не отличаются от таковых в известных 10-ns источниках. К ним относятся: источник высокого напряжения, блок управления, система изоляции высоковольтных (анодных) частей, конструкция радиационной защиты вне рабочего пучка. Описание таких элементов имеется в литературе [4,7]. Отметим, что при том же рабочем напряжении (30 kV) максимальное значение анодного тока (0.5 A) в случае термокатода (РТИ2-0.05) в 10^4 раз больше соответствующего тока при использовании фотокатода [5]. При номинальном режиме работы вольфрамовый анод РТИ2-0.05 излучает за импульс до 10^7 рентгеновских фотонов со средней энергией $\sim 17\text{ keV}$.

Испытуемый образец помещается в стальной криостат (18) с толщиной стенок в области рентгеновского пучка 2 cm (этого достаточно для полного поглощения падающего излучения). Для исключения попадания рентгеновских лучей на окно ФЭУ применено взаимно перпендикулярное расположение осей входного бериллиевого (19) (рентгеновский пучок) и выходного кварцевого (20) (световой поток) окон криостата. Конструкция криостата позволяет изменять угловое положение образца относительно этих осей для обеспечения оптимального светосбора

сцинтилляций. Температура образца может варьироваться в пределах 80–600 К при вакууме $3 \cdot 10^{-3}$ mm Hg, однако большинство измерений новых материалов обычно проводится при комнатной температуре без откачки криостата.

Образец (21), закрепленный на штоке криостата, находится на расстоянии 6 см от окна РТ. Оценки показывают, что образец площадью 1 cm^2 при толщине, соответствующей полному поглощению рентгеновского излучения, получает энергию $\sim 10^9$ eV за импульс. Таким образом, короткий рентгеновский импульс по воздействию на образец практически эквивалентен гамма-кванту с энергией $\sim 10^9$ eV. При энергетической эффективности $\sim 1\%$ сцинтиллятор будет излучать $\sim 3 \cdot 10^6$ оптических фотонов за импульс.

Блок регистрации (БР) свечения исследуемых кристаллов собран по широко используемой в физических экспериментах схеме СТАРТ-СТОП [8,9] в системе КАМАК. Использование схемы временной привязки (СВП) для канала СТОП (12) к определенной точке фронта одноэлектронного импульса ФЭУ позволяет избежать влияния разброса амплитуды импульсов ФЭУ на временное разрешение. Блок СВП-старт (9) работает от стандартного запускающего импульса, и требования к нему менее жесткие. Суммарная временная погрешность электронной части не превышает 100 ps.

Рассмотрим принцип работы установки. Импульсы синхронизации с генератора (1) Г5-56 подаются на модулятор (2), короткий субнано-секундный импульс которого открывает РТ источника (3). На сетку РТ поступает также постоянное напряжение смещения от источника (7), которое задает амплитуду анодного тока. Высокое напряжение (до 30 kV) поступает на анод РТ от высоковольтного источника (4), управляемого блоком (5). Питание модулятора (2) осуществляется от стабилизированного источника 500 V (6). Импульс рентгеновского излучения через бериллиевое окно (19) криостата (18) проходит на исследуемый образец (21). Свечение образца через выходное кварцевое окно (20) криостата и монохроматор (22) попадает на ФЭУ (14), который питается от источника (15). Специальный малогабаритный монохроматор позволяет получать времяразрешенные спектры излучения в диапазоне 200–800 nm. Управление шаговым двигателем монохроматора осуществляется от компьютера (17).

В случае исследования образцов с малым световыходом монохроматор не используется, и свечение образца непосредственно попадает

на ФЭУ. Импульсы ФЭУ после усилителя (13) поступают на схему временной привязки СВП — стоп (12) и затем на времяамплитудный преобразователь (ВАП) (10). По другому каналу импульсы синхронизации через разделительный трансформатор (8) поступают на СВП — старт (9) и затем на ВАП (10). Амплитуда импульса на выходе ВАП измеряется 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем (16) и записывается в файл с данными в компьютере (17). Дальнейшая обработка экспериментальной информации проводится с помощью стандартных пакетов прикладных программ. Для контроля работы системы при настройке используется частотомер (11). Определение световыхода производилось путем сравнения величины выходного сигнала испытуемого образца и стандартного сцинтиллятора, например CsI:Ti.

Предлагаемая методика измерения кинетических параметров сцинтилляторов устойчиво работает при нагрузках (частота регистрации одноэлектронных импульсов ФЭУ), не превышающих 0.1 от частоты следования импульсов возбуждения. При больших нагрузках проявляются двухфотонные события и результаты измерений искажаются. Для иллюстрации возможностей описываемой установки приведем результаты измерения кинетики люминесценции известных сцинтилляторов BaF_2 и $Gd_2O_2S:Pr$ (рис. 2). Постоянная спада быстрой компоненты BaF_2 (рис. 2, *a*), определенная по нашим результатам, равна 0.88 ± 0.02 ns. Для медленной компоненты BaF_2 получено значение 850 ± 5 ns. Оба этих результата хорошо согласуются с литературными данными [10].

На рис. 2, *b* приведена кривая кинетики люминесценции $Gd_2O_2S:Pr$ (постоянная спада 3.05 ± 0.05 μs), которая (в отличие от BaF_2) проявляет одноэкспоненциальный спад в широком динамическом диапазоне.

Приведенные экспериментальные результаты демонстрируют возможность измерения кинетики люминесценции с помощью описанной установки в широком динамическом диапазоне и большом временном интервале (от 0.5 ns до 50 μs) с разрешением не хуже 0.1 ns.

Список литературы

- [1] Викторов Л.В., Скориков В.М., Жуков В.М., Шульгин Б.В. // Изв. АН СССР. Сер. Неорган. материалы. 1991. Т. 27. С. 1699–1718.
- [2] Родный П.А. // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., 1988. В. 39. С. 152–158.
- [3] Вавилов С.П. Импульсная рентгеновская техника. М.: Энергия, 1981. 283 с.

- [4] Герчиков Ф.Л. Управляемое импульсное рентгеновское излучение в приборостроении. М.: Энергоиздат, 1987. 114 с.
- [5] *Derenzo S.E., Moses W.W., Blankenspoor S.C. et al. // IEEE Trans. on Nuclear Science. 1994. V. 41. P. 629–631.*
- [6] Родный П.А., Намозов Б.Р., Рожков А.В., Рыжков А.Г. // Патент РФ № 2054739. 1996.
- [7] Гук В.Г., Лобанов А.А., Скачков Н.Н. // Электронная техника. Сер. Электровакuumные и газоразрядные приборы. 1991. В. 2 (133). С. 37–40.
- [8] *Moses W.W. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1993. V. A336. P. 253–258.*
- [9] Герчиков Ф.Л., Гудовских В.А., Данильченко Н.Т. и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 15. С. 911–916.
- [10] *Laval M., Moszynski M., Alemand R. et al. // Nucl. Instrum. Methods. 1983. V. 206. P. 169–175.*