

Исследование наноструктурных сцинтилляционных материалов с использованием источника синхротронного излучения

12, декабрь 2012

DOI: **10.7463/1212.0507344**

Литвак Ю. Н., Макеев М. О., Михалев П. А., Панфилов Ю. В.,

Потловский К. Г.

УДК. 539.1.074

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

pamikhalev@bmstu.ru

Введение

Сцинтилляторы – это материалы, в которых при поглощении ими частиц или квантов ионизирующего излучения (нейтронов, протонов, электронов, рентгеновских и гамма – квантов) возникают световые вспышки, называемые сцинтилляциями [1]. Благодаря способности преобразовывать таким образом энергию ионизирующего излучения в световые сигналы сцинтилляторы широко применяются всюду, где требуется детектирование элементарных частиц или жестких электромагнитных излучений: в космических гамма – телескопах, ускорителях элементарных частиц, приборах для мониторинга радиационной обстановки внутри и в окрестностях атомных электростанций, радиационных дозиметрах, рентгеноспектральных анализаторах химического состава материалов и т.д.

Технические характеристики существующих образцов сцинтилляционных материалов пока весьма далеки от показателей, которые в принципе могут быть достигнуты. Например, абсолютная энергетическая чувствительность сцинтилляторов, измеряемая как отношение энергии светового сигнала к поглощенной энергии ионизирующего излучения, даже у лучших сцинтилляционных материалов (иодида цезия, бромида лантана и др.) не превышает 25 %. В то же время у полупроводниковых излучателей света, возбуждаемых электрически, коэффициент полезного действия приближается уже к 80 % за счет применения наноструктурных систем квантовых ям и квантовых точек.

Быстродействие (т.е. временной интервал между поглощением гамма-кванта и окончанием световой вспышки) у самых быстрых сцинтилляторов (например, органических) приближается к одной наносекунде. В то же время длительности вспышек упомянутых выше полупроводниковых наноизлучателей на практике достигают единиц пикосекунд. Для сцинтилляционных детекторов достижение столь высокого быстродействия актуально по нескольким причинам: малая длительность вспышки при ее фиксированной интегральной энергии обеспечивает повышение соотношения «сигнал/шум», позволяя, тем самым, повысить чувствительность системы. Во-вторых, существует целый ряд процессов, которые сопровождаются выходом высокоэнергетических частиц и длительностью много меньше 1 наносекунды, регистрация и анализ которых принципиально невозможны при использовании традиционных сцинтилляционных детекторов с достаточно продолжительным временем высвечивания.

Под временем высвечивания сцинтилляционного материала следует понимать промежуток времени, за который интенсивность излучения детектора от бесконечно короткой вспышки снижается в 2,71 раз (рисунок 1).

Для устранения вышеупомянутых недостатков существующих сцинтилляционных детекторов в МГТУ им. Н.Э. Баумана ведется разработка технологии получения наноструктурных сцинтилляционных детекторов, которые, согласно теоретическим расчетам, по временным характеристикам должны существенно превосходить существующие традиционные сцинтилляционные материалы [2–4]. Традиционно измерение временных характеристик детекторов ионизирующих излучений (в первую очередь время высвечивания) проводят при их возбуждении пучком характеристического излучения рентгеновской трубки. Крутизна фронтов, а именно, постоянная времени заднего фронта импульса рентгеновского излучения, как правило, составляет от 5 до 8 нс. Это позволяет с минимальными погрешностями измерять времена высвечивания детекторов порядка 40 нс. Однако, для сцинтилляторов, время высвечивания которых составляет 1 нс и менее, такой источник непригоден, поскольку относительно медленно изменяющийся импульс возбуждающего рентгеновского излучения создает условия для суммирования излучения различных центров сцинтилляции детектора. Это, в свою очередь, приведет к формированию сигнала на выходе фотоприемника, соответствующего огибающей функции интенсивности входного воздействия (рисунок 2).

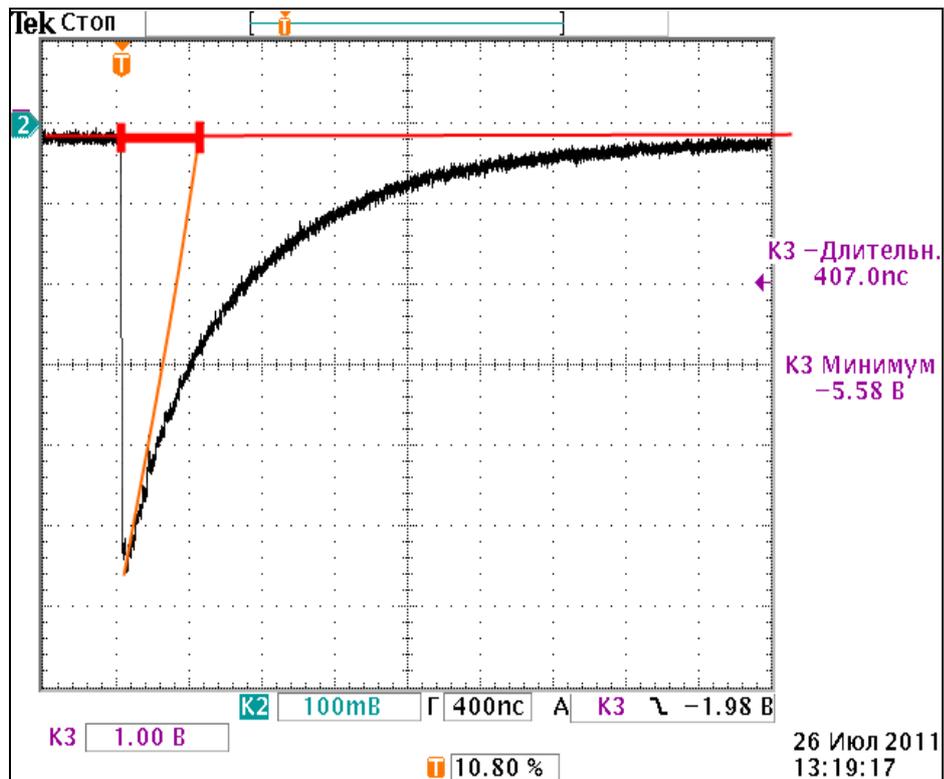


Рисунок 1 – Графический способ определения времени высвечивания

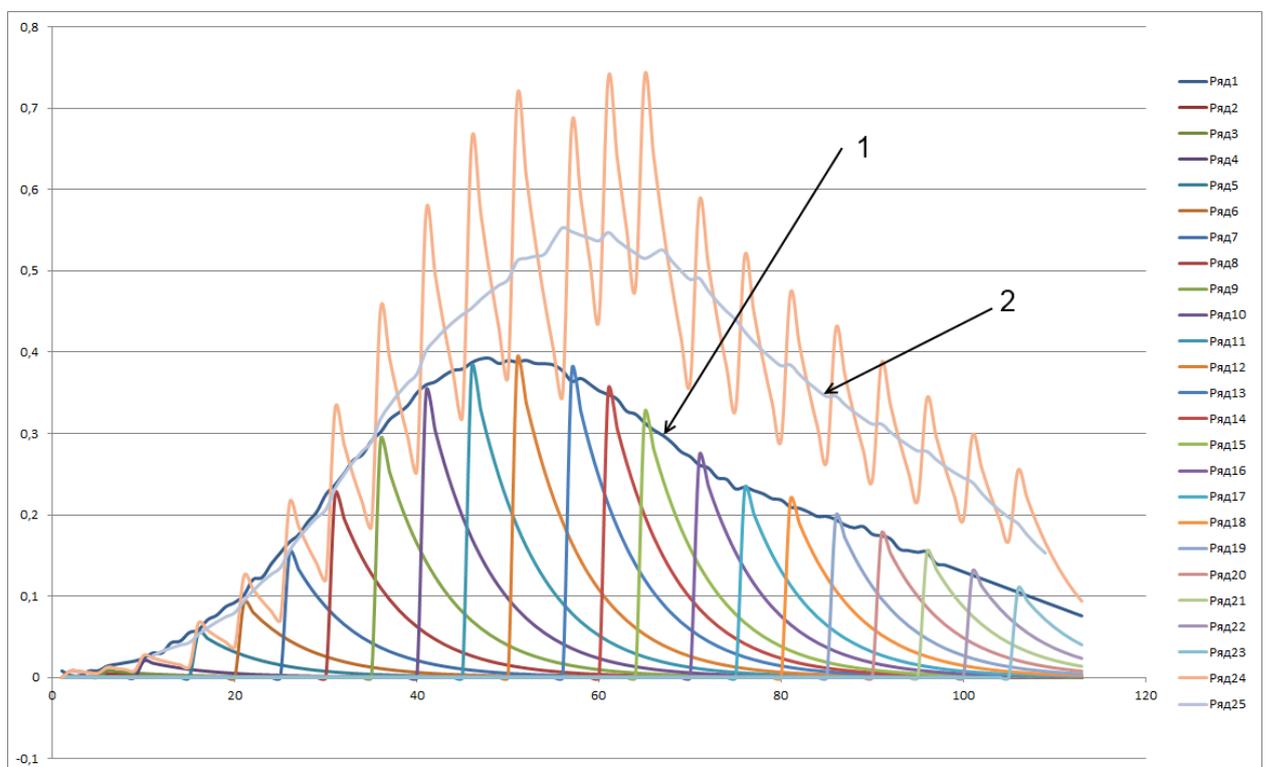


Рисунок 2 – Формирование сигнала сцинтилляционного детектора с малым временем высвечивания в случае медленно изменяющегося возбуждающего воздействия:
 1 – сигнал возбуждающего воздействия; 2 – сигнал сцинтилляционного детектора

Для решения данной проблемы необходимо обеспечить генерацию быстро изменяющегося во времени возбуждающего ионизирующего излучения (рисунок 3). Теоретически таким источником может являться природный радиоизотопный источник β -излучения с известным периодом генерации частиц высокой энергии. Однако, при генерации источником отдельных частиц, ввиду малой мощности потока ионизирующего излучения, не обеспечивается достаточной интенсивности сцинтилляции детектора для проведения измерений с требуемым соотношением сигнал-шум.

В качестве альтернативного источника ионизирующих излучений в данной работе предложено использование источника синхротронного излучения для измерения временных характеристик с субнаносекундным разрешением (рисунок 4).

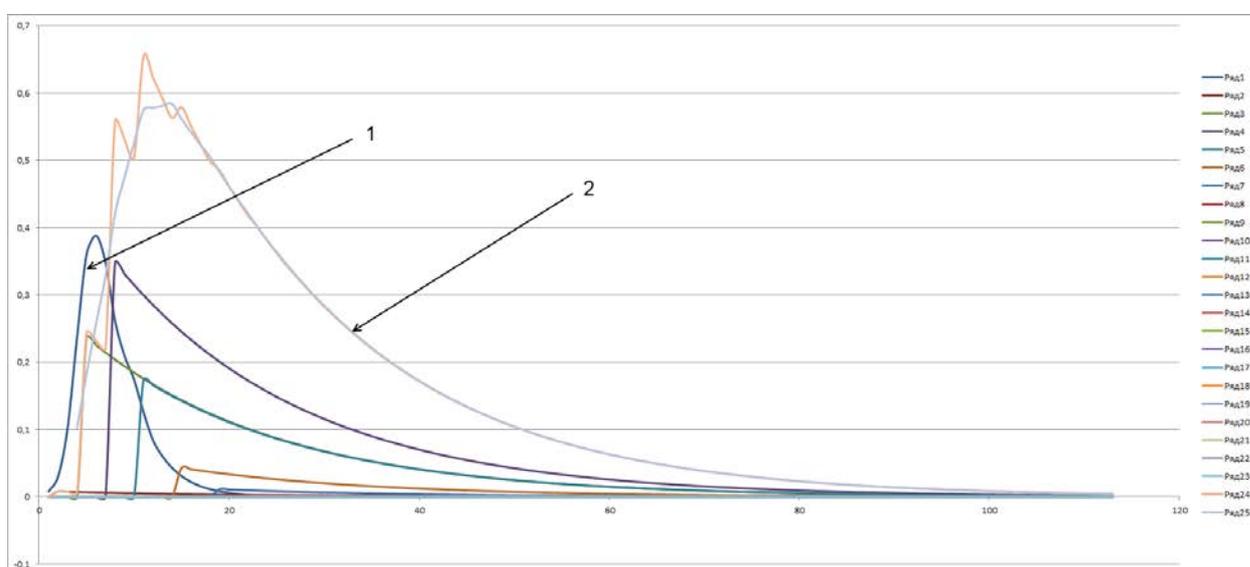


Рисунок 3 – Иллюстрация сигнала сцинтилляционного детектора в случае быстро изменяющегося возбуждающего воздействия:

1 – сигнал возбуждающего воздействия; 2 – сигнал сцинтилляционного детектора



Рисунок 4 – Общая схема построения источника синхротронного излучения [5]

Обоснование возможности использования источника синхротронного излучения для исследований временных характеристик детекторов высокоэнергетических пучков

Ускорение электронов в большом накопительном кольце синхротрона обеспечивается созданием в одной из его секций электромагнитной волны, обеспечивающей разгон электронов (рисунок 5). Электромагнитная волна возбуждается мощным электромагнитным излучателем СВЧ диапазона. Поскольку напряженность электрического поля в фиксированной точке будет осциллировать, электроны в накопительном кольце будут распределены не равномерно, а в виде сгустков – банчей. При этом частота колебаний электромагнитного излучателя должна быть синхронизирована со временем пролета банчами накопительного кольца. Поскольку это время определяется скоростью, т.е. кинетической энергией, то изменением частоты излучателя можно варьировать энергию электронов банча.

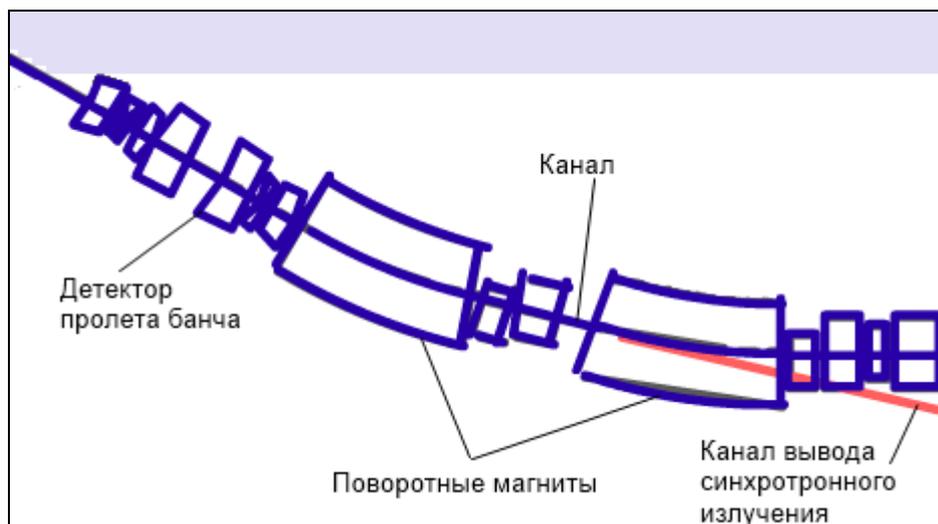


Рисунок 5 – Схема получения синхротронного излучения [6]

При измерении временных характеристик сцинтилляционных материалов наиболее приемлемым является режим работы накопителя, при котором циркулирует только один сгусток электронов, ведь такой режим обеспечивает максимальный временной промежуток между вспышками синхротронного излучения (минимальную скважность импульса СИ). При работе в однопучковом режиме при энергии электрона 2,5 ГэВ частота следования вспышек синхротронного излучения в окне канала большого кольца-накопителя «Сибирь-2» курчатовского источника синхротронного излучения составляет 2,4 ГГц, что соответствует длительности временного промежутка между вспышками 400 нс.

При движении внутри кольца накопителя электроны банча рассредоточены вдоль траектории их движения в соответствии с распределением Гаусса. Соответственно, интенсивность вспышки синхротронного излучения так же изменяется во времени по гауссовой кривой. Протяженность банча при энергии электрона 2,5 ГэВ составляет 4,4 см, что соответствует длительности вспышки 0,147 нс и времени нарастания и спада интенсивности вспышки синхротронного излучения 0,074 нс. При проведении исследований с временным разрешением 0,5 нс можно принять, что форма возбуждающего импульса ионизирующего излучения представляет собой дельта-функцию.

При использовании в качестве генератора возбуждающих сигналов источника синхротронного излучения функцию синхросигнала может выполнять сигнал детектора пролета банча (рисунок 6).

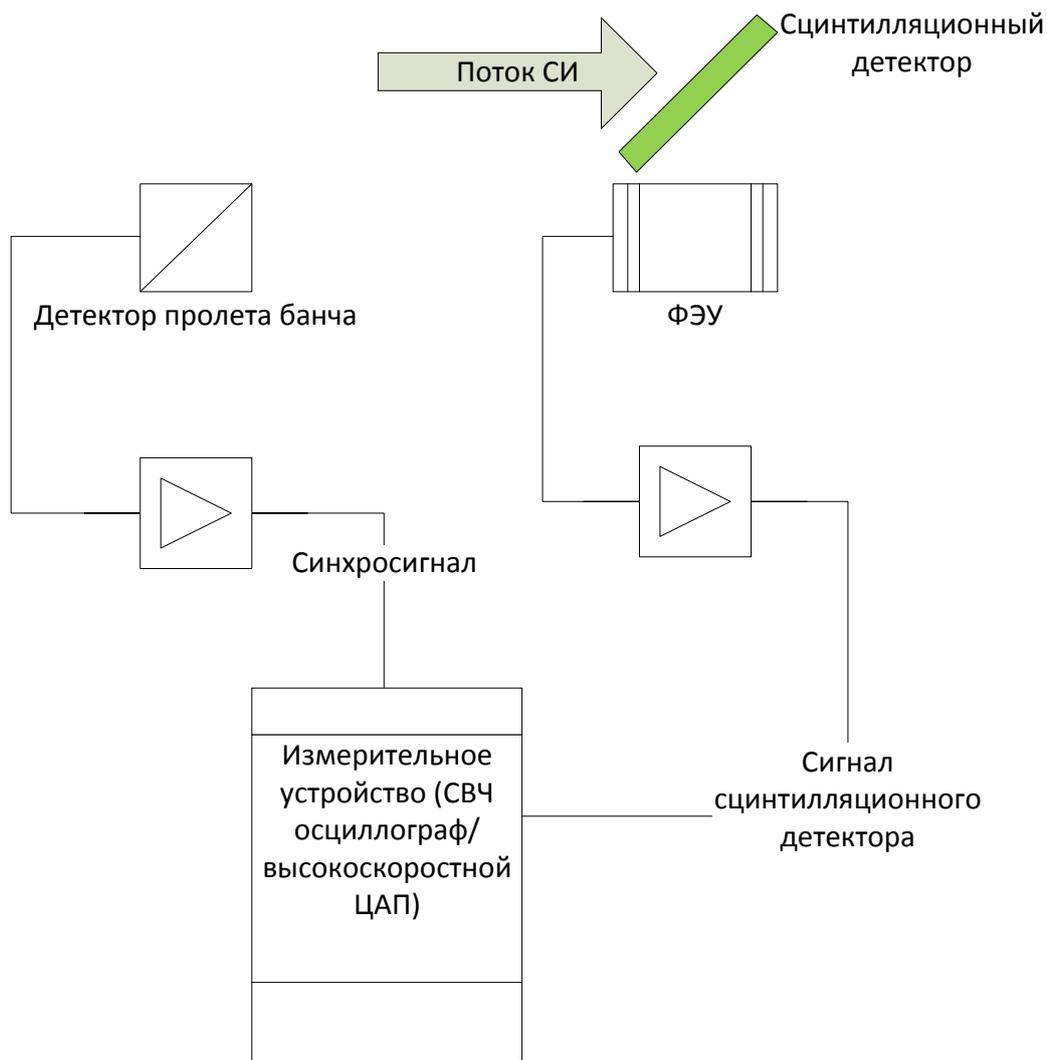


Рисунок 6 – Схема измерения временных характеристик сигнала сцинтилляционного детектора

Задержка между временем поступления сигнала пролета банча и вспышкой сцинтилляционного излучения на выходе из канала будет определяться расстоянием между детектором пролета и точкой вывода излучения, а также длиной канала. Дополнительная десинхронизация может быть вызвана различными временами передачи сигналов по линиям связи. Однако при использовании линий передач равной длины и равного волнового сопротивления для передачи сигнала пролета банча и сигнала ФЭУ, а для усиления - широкодиапазонных усилителей со сходными частотными характеристиками, данным временем можно пренебречь.

В качестве альтернативы для приведенной выше схемы измерений можно использовать аналогичную схему без детектирования пролета банча. Ожидаемый вид осциллограммы такого сигнала приведен на рисунке 7.

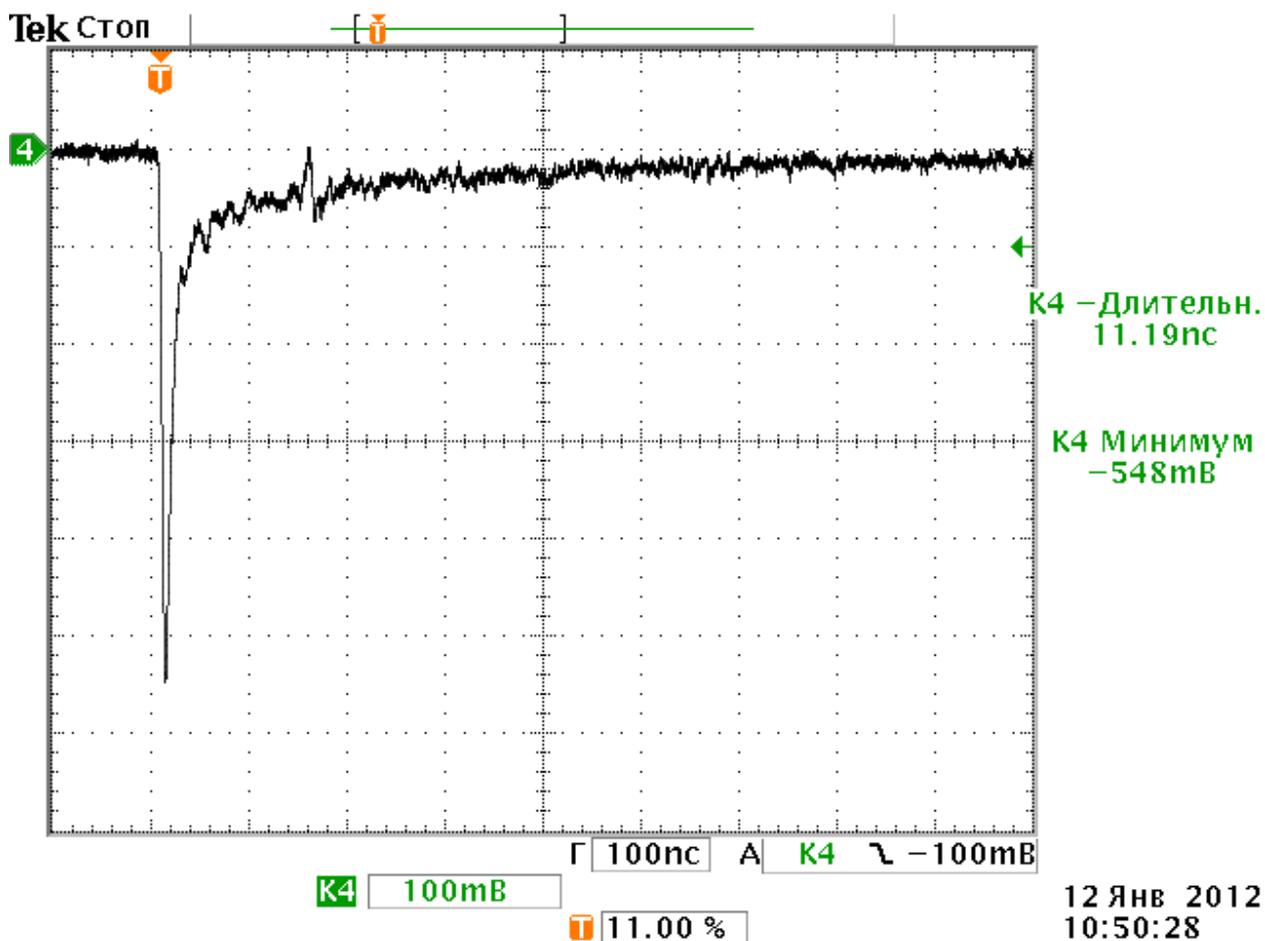


Рисунок 7 – Осциллограмма одиночной вспышки сцинтилляционного излучения при возбуждении синхротронным излучением

В этом случае частоту развертки осциллографа необходимо синхронизировать с частотой следования банчей (2,4 МГц), либо в случае использования цифрового осциллографа установить его в режим ожидания сигнала и обеспечить сохранение уровня напряжения входного сигнала в течение 1 мкс, что позволит обеспечить сохранение формы сигнала сцинтилляционного детектора в виде последовательности импульсов, задний фронт которых будет определяться временем высвечивания сцинтиллятора (рисунок 8).

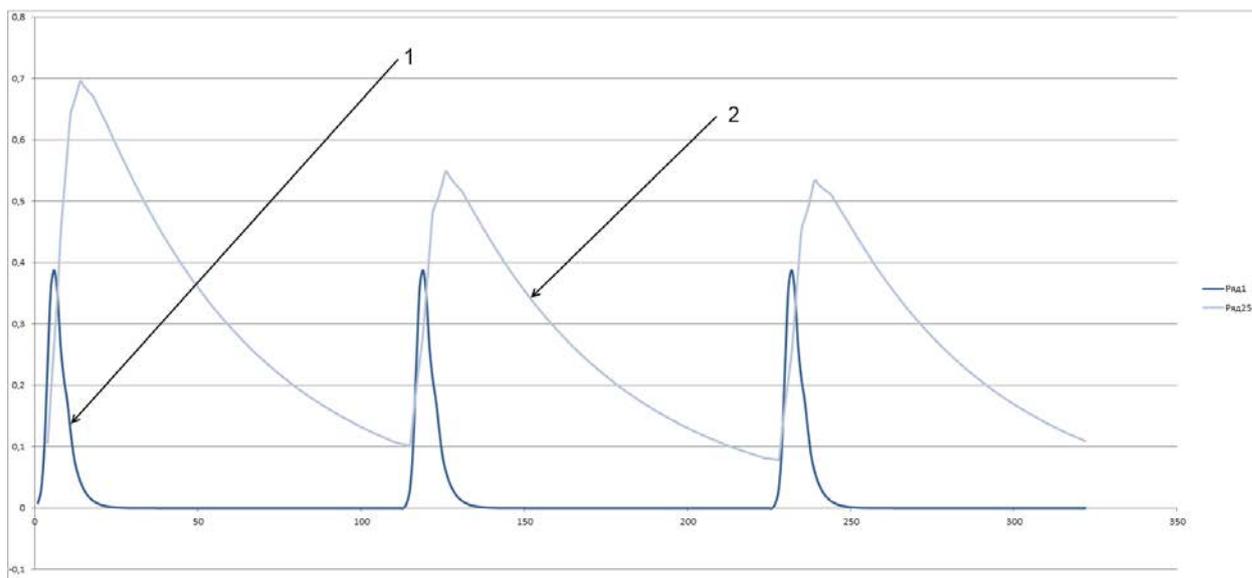


Рисунок 8 – Ожидаемый вид осциллограммы сигнала ФЭУ для серии вспышек синхротронного излучения:

1 – Вспышка синхротронного излучения; 2 – Излучение сцинтиллятора

Стоит также отметить, что при реализации обеих схем измерения ФЭУ должен использоваться в режиме счета фотонов, что, в свою очередь, может потребовать уменьшения мощности сцинтилляционного излучения путем установки светофильтров, либо за счет снижения мощности возбуждающего воздействия путем установки наборного фильтра-поглотителя из высокочистого алюминия на пути следования пучка синхротронного излучения.

Выводы

В статье рассмотрены проблемы исследования временных характеристик наноструктурных сцинтилляционных детекторов нового поколения с субнаносекундным разрешением. Приведено обоснование целесообразности использования синхротронного источника для исследования временных характеристик сцинтилляторов. Указаны методологические аспекты проведения исследований временных характеристик сцинтилляционных детекторов.

Результаты получены в рамках выполнения поисковой научно-исследовательской работы по направлению «Новые материалы атомной техники, в том числе радиационно-стойких и сверхпроводящих материалов нового поколения» по проблеме «Разработка научных основ синтеза наноструктурных радиационно-стойких сцинтилляционных детекторов», выполняемой по гос. контракту №П833 от 24.05.2010, заключенному в

рамках мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук», мероприятия 1.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук», направления 1 – «Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий», федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Список литературы

1. Рабин Н.В. Электрон-фотонные калориметры. Основные свойства. Свойства материалов для калориметров (обзор) // Приборы и техника эксперимента. 1992. №1. С. 12-60.
2. Moses W.W. Scintillation requirements for medical imaging // Proceedings of the Fifth International Conference on Inorganic Scintillators and their Applications. Moscow State University. 2000. pp. 11-21.
3. Mueller A. Of markets, patents, recycling and networking at Phosphor Global Summit. 2008. Режим доступа: www.intertechpira.com/blog.asp?step=3&blogID=314 (дата обращения 8.10.2012).
4. Sergeev G.B. Nanochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2006. 262 p.
5. Принципиальная схема источника синхротронного излучения. Режим доступа: http://fr.academic.ru/pictures/frwiki/83/Schéma_de_principe_du_synchrotron.jpg (дата обращения 8.10.2012).
6. План экспериментального зала Курчатовского центра синхротронного излучения. Режим доступа: <http://www.kcsr.kiae.ru/stations.php> (дата обращения 8.10.2012).

Study of nanostructured scintillator materials with synchrotron radiation source

12, December 2012

DOI: [10.7463/1212.0507344](https://doi.org/10.7463/1212.0507344)

Litvak Y.N., Makeev M.O., Mihalev P.A., Panfilov Yu.V., Potlovskii K.G.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

pamikhalev@bmstu.ru

The authors consider aspects of studying time characteristics of scintillation detectors. They propose using synchrotron radiation to excite scintillation measurements to ensure the decay time of scintillation detectors with subnanosecond time resolution.

Publications with keywords: [scintillation](#), [decay time](#), [synchrotron radiation](#), [subnanosecond](#), [emission spectrum](#)

Publications with words: [scintillation](#), [decay time](#), [synchrotron radiation](#), [subnanosecond](#), [emission spectrum](#)

References

1. Rabin N.V. Elektron-fotonnye kalorimetry. Osnovnye svoistva. Svoistva materialov dlia kalorimetrov (obzor) [Electron-photon calorimeters. Main properties. Material properties for calorimeters (review)]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1992, no.1, pp. 12-60.
2. Moses W.W. Scintillation requirements for medical imaging. *Proceedings of the Fifth International Conference on Inorganic Scintillators and their Applications*. Moscow State University, 2000, pp. 11-21.
3. Mueller A. *Of markets, patents, recycling and networking at Phosphor Global Summit*. 2008. Available at: www.intertechpira.com/blog.asp?step=3&blogID=314 , accessed 8.10.2012.
4. Sergeev G.B. *Nanochemistry*. Amsterdam, Elsevier, 2006. 262 p.
5. *Printsipiial'naia skhema istochnika sinkhrotronnogo izlucheniia* [The schematic diagram of the synchrotron radiation source]. Available at: <http://fr.academic.ru/pictures/frwiki/83/Schéma de principe du synchrotron.jpg> , accessed 8.10.2012.

6. *Plan eksperimental'nogo zala Kurchatovskogo tsentra sinkhrotronnogo izlucheniia*
[Plan of the experimental hall of the Kurchatov center of synchrotron radiation]. Available at:
<http://www.kcsr.kiae.ru/stations.php> , accessed 8.10.2012.