УДК 539.1.074

# Сцинтилляционный волоконно-оптический детектор с наносекундным временным разрешением

С помощью электронного и рентгеновского излучений субнаносекундной длительности измерено временное разрешение волоконнооптического детектора. Показано, что использование оптических фильтров и преобразователя мод в виде вставки в разрыве кабеля приводит к улучшению временного разрешения волоконно-оптического детектора. Для кабелей длиной 5 и 10 м со вставкой из двойного фиолетового оптического стекла ПС13 временное разрешение волоконно-оптического детектора составило  $\tau_{0.5} = 1,16$  и 1,64 нс соответственно.

А. В. Родигин, Т. В. Лойко, С. Л. Эльяш

## Введение

Для контроля работы импульсных генераторов электронного и рентгеновского излучений требуется мониторирование дозовых и амплитудно-временных характеристик излучения [1]. С этой целью в [2] предложен волоконно-оптический детектор (ВОД), включающий в себя сцинтиллятор СПС-Б18, пластмассовый оптический кабель и фотоприемник. ВОД обладает рядом преимуществ по сравнению с другими детекторами: малочувствителен к электромагнитным наводкам, имеет небольшие габариты, не требует высоковольтного питания и защиты входов регистратора от аварийных перенапряжений. Целью данной работы является измерение временного разрешения ВОД и исследование возможности его улучшения.

Временная калибровка ВОД проводилась с помощью рентгеновского и электронного излучений ускорителя СПИН-2 [3]. Ускоритель СПИН-2, нагруженный на электронную трубку ИМАЗ-150Э, генерирует на выходе трубки электронный пучок субнаносекундной длительности с током ~2 кА, максимальной энергией ~600 кэВ. Осциллограмма тока электронного пучка приведена на рис. 1. Она зарегистрирована на осциллографе LeCroy Wavemaster-8500A с полосой 5 ГГц при помощи коллектора, вмонтированного в коаксиальный разъем СР-75-166Ф коаксиального кабеля длиной 8 м. Зарегистрирована длительность тока  $\tau_{0.5} = 0,26$  нс. Преобразование электронного излучения в рентгеновское происходило во внешней мишени, изготовленной из танталовой фольги толщиной 20 мкм. Прошедшие фольгу электроны поглощались в миллиметровом слое алюминия. Доза в плоскости окна трубки составила 20–25 Р/импульс. Длительность рентгеновского излучения, зарегистрированная полупроводниковым детектором СППД-29к и осциллографом LeCroy, составила  $\tau_{0.5} = 0,29$  нс [4]. Субнаносекундная длительность ионизирующего излучения позволяет использовать ускоритель для временной калибровки трактов регистрации. При временном разрешении тракта регистрации более наносекунды сигнал на выходе будет практически соответствовать импульсной характеристике тракта.

В проведенных экспериментах излучение ускорителя СПИН-2 вызывало свечение сцинтиллятора СПС-Б18 (размеры 5×5×20 м<sup>3</sup>, спектральная область максимальной 90 % интенсивности

люминесценции – от 380 до 390 нм,  $\tau_{0.5} = 0,15$  нс). СПС-Б18 был выбран как самый «быстрый»

из большой серии ранее выпускаемых сцинтилляционных пластмасс [5]. Свет с наименьшей грани сцинтиллятора поступал на отполированный торец оптического кабеля HFBR-RUS, имеющего диаметр сердцевины 1 мм и длину 5 м. Другой конец кабеля подключался к кремниевому pinфотодиоду ФД-271 с входным окном диаметром ~0,7 мм. Для усиления токового импульса с фотодиода использовался специально разработанный усилитель на GaAs-полевых транзисторах (время нарастания переходной характеристики фотоприемника ~0,7 нс). Сигнал с усилителя подавался на регистрирующий осциллограф LeCroy Wavemaster-8500A с полосой пропускания 5 ГГц. Импульс, зарегистрированный BOД, имел длительность  $\tau_{0,5}$  = 2,2 нс.

Рентгеновское излучение, свечение сцинтиллятора, а также импульсная характеристика фотоприемника имеют субнаносекундную длительность, поэтому уширение импульса связано исключительно с прохождением сигнала по оптическому кабелю. Уширение может происходить за счет модовой (геометрической) и хроматической дисперсий. Модовая дисперсия зависит от угла входа фотонов в кабель, хроматическая – от ширины спектра регистрируемого свечения.

Затухание в пластмассовом оптическом кабеле зависит от длины волны света: имеются окна прозрачности в диапазонах 450–600 и 650–660 нм. Чувствительность кремниевого фотодиода также зависит от длины волны све-



Рис. 1. Осциллограмма тока электронного пучка ускорителя СПИН-2 (т<sub>0.5</sub> = 0,26 нс)

та: она растет в несколько раз с увеличением длины волны от 300 до 800 нм, затем спадает. В итоге тракт регистрации имеет неоднородную зависимость чувствительности от длины волны света с максимумом в красном свете.

Люминесценция СПС-Б18 имеет достаточно узкий спектральный диапазон от 380 до 390 нм и не способна вызвать заметную хроматическую дисперсию светового сигнала в кабеле. Модовая дисперсия в пластмассовом оптическом кабеле, имеющем числовую апертуру 0,5 и длину 5 м, может дать уширение импульса только около 0,5 нс. Так как уширение импульса в ВОД оказалось более значительным, было сделано предположение, что в спектре свечения сцинтиллятора присутствует, наряду с коротковолновым излучением (фиолетовым), более длинноволновое (красное), хорошо пропускаемое трактом, которое и вызывает уширение сигнала вследствие хроматической дисперсии. Для проверки этого предположения между сцинтиллятором и торцом оптического кабеля был установлен голубой стеклянный фильтр с целью ослабления длинноволновой составляющей излучения. Импульс укоротился с  $\tau_{0,5} = 2,20$  до 1,74 нс. Наиболее вероятный источник длинноволнового свечения – черенковское излучение, имеющее в отличие от сцинтилляционного широкий спектр.

Расширение динамического диапазона измерений в дальнейших опытах было достигнуто на том же ускорителе, но с электронным излучением, вызывающим более сильное свечение сцинтиллятора. Необходимая интенсивность облучения сцинтиллятора задавалась изменением диаметра алюминиевых диафрагм на окне трубки от 1 до 5 мм и расстояния от сцинтиллятора до окна трубки от 2 до 8 см. Флюенс электронов в пучке варьировался в диапазоне  $10^{10}-10^{11}$  эл/см<sup>2</sup>. Для исключения возникновения свечения в оптическом кабеле облучаемая часть кабеля экранировалась медной трубкой с толщиной стенки 1 мм.

#### ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Используя электронное излучение, был повторен эксперимент со стеклянным голубым фильтром. Измеренная длительность свечения составила  $\tau_{0,5} = 2,1$  нс, что оказалось больше, чем при рентгеновском облучении  $\tau_{0,5} = 1,74$  нс. Это можно объяснить повышением вклада длинноволнового черенковского излучения в свечение пластмассы. Пороговая энергия черенковского излучения в веществе определяется показателем преломления *n*, и для электронов при *n* = 1,5 она составляет ~170 кэВ [6]. В спектре же первичного электронного пучка доля электронов с энергией, превышающей 170 кэВ, больше, чем в спектре вторичных электронов, возникающих от рентгеновского излучения.

Для фильтрации черенковского излучения были использованы серийно выпускаемые цветные оптические стекла, изготовленные по ГОСТ 9411-91 «Стекло цветное оптическое». Были выбраны светофильтры, хорошо пропускающие фиолетовое свечение люминесценции сцинтиллятора СПС-Б18:

- ПС11 - с диапазонами 250-480 нм и 650-2700 нм, толщиной 3,5 мм;

- ПС13 - с диапазонами 340-440 нм и 700-2700 нм, толщиной 2,0 мм.

Стекло ПС13 пропускает свет в более узком спектральном диапазоне, чем стекло ПС11, поэтому ожидалось, что хроматическая дисперсия с ним будет меньше. Осциллограммы зарегистрированных импульсов с данными светофильтрами приведены на рис. 2.



Рис. 2. Импульс электронного излучения СПИН-2, зарегистрированный детектором ВОД: а – с фильтром ПС11 ( $\tau_{0,5}$ = 1,56 нс), б – с фильтром ПС13 ( $\tau_{0,5}$ = 1,74 нс)

На фронте импульсов наблюдается небольшой «горб», который связан с недостаточной фильтрацией длинноволнового (красного) излучения. Скорость света в среде зависит от длины волны, красный свет распространяется быстрее фиолетового, что и вызывает хроматическую дисперсию. Поэтому красный свет регистрируется в начале сигнала в виде «горба». Длительность импульса со стеклом ПС11 ( $\tau_{0,5} = 1,56$  нс) вопреки ожиданиям оказалась короче, чем со стеклом ПС13 ( $\tau_{0,5} = 1,74$  нс). Этот факт можно объяснить тем, что толщины стекол отличаются: у ПС11 – 3,5 мм, а у ПС13 – 2,0 мм. Дополнительная толщина стекла работает как преобразователь мод, убирающий «медленные» моды верхнего порядка. Отсутствие медленных мод приводит к укорочению регистрируемого сигнала.

Для подтверждения роли дополнительной вставки в улучшении временного разрешения ВОД были проведены эксперименты со вставкой из оргстекла толщиной 2 мм, которая

#### СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР...

помещалась вместе с фильтром ПС13 в разрыв на конце кабеля. Зарегистрированная осциллограмма приведена на рис. 3,а. На ней четко видно разделение по времени из-за хроматической дисперсии прихода черенковского (длинноволнового) и сцинтилляционного (коротковолнового) светового импульса. Длительность сцинтилляционного импульса ( $\tau_{0,5}$  = 1,21 нс) получилась существенно короче импульса на рис. 2,6, где вставка из оргстекла не применялась.

Спектральный состав черенковского излучения находится в широком диапазоне, захватывая коротковолновую область, совпадающую с люминесценцией СПС-Б18. Несмотря на то, что при помощи светофильтров длинноволновое черенковское излучение было нами в значительной мере отфильтровано, остался вклад коротковолнового черенковского излучения в регистрируемый сигнал. Этот вклад необходимо оценить. Известно, что лучшим радиатором для черенковских детекторов является оргстекло [6]. В условиях опыта рис. 3,а сцинтиллятор СПС-Б18 был заменен оргстеклом таких же размеров. Осциллограмма черенковского свечения оргстекла приведена на рис. 3,б. Видно, что первым приходит импульс красного диапазона, соответствующего длинноволновому окну прозрачности кабеля, вторым – черенковский импульс фиолетового диапазона. Черенковский импульс красного диапазона имеет длительность  $\tau_{0,5} = 0,787$  нс, что подтверждает высокое временное разрешение фотоприемника ВОД, позволившего передать субнаносскундный импульс. С привязкой к амплитуде первых пиков, имеющих одинаковое происхождение, сравнение амплитуд вторых пиков рис. 3,а и б показывает, что вклад черенковского излучения в регистрируемый сигнал составляет около 10 % (без учета влияния небольшого различия в коэффициентах преломления материалов сцинтиллятора и радиатора).



Рис. 3. Импульс электронного излучения СПИН-2, зарегистрированный ВОД с фильтром ПС13 и преобразователем мод на оргстекле: а – со сцинтиллятора СПС-Б18 ( $\tau_{0,5} = 1,21$  нс), б – с черенковского радиатора ( $\tau_{0,5} = 0,787$  нс)

Полностью отфильтровать красное излучение удалось с помощью использования двух фильтров из стекла ПС13 общей толщиной 4 мм. Из-за значительной толщины стекла дополнительной вставки для фильтрации верхних мод не потребовалось. Длительность импульса, зарегистрированная ВОД со сцинтиллятором СПС-Б18, при этом составила  $\tau_{0.5} = 1,16$  нс (рис. 4).

Для данной геометрии полученная длительность является разрешающим временем ВОД. Отметим, что повышение быстродействия тракта было достигнуто за счет потери его чувствительности. Полученное временное разрешение ВОД достаточно для регистрации излучения длительностью в несколько наносекунд, характерного для малогабаритных импульсных ускорителей. В результате проведенных измерений показано, что улучшение временного разрешения достигается за счет использования оптических фильтров, ограничивающих спектральную область регистрируемого свечения, и дополнительной вставки в разрыве кабеля, ограничивающей моды верхнего порядка.

На основе проведенных исследований разработана конструкция и изготовлен макет ВОД с кабелем длиной 10 м, предназначенного для мониторирования рентгеновского импульса ускорителя АРСА [1]. Измерена импульсная характеристика ВОД при воздействии электронного излучения ускорителя СПИН-2, которая составила  $\tau_{0,5} = 1,64$  нс (рис. 5,а). При помощи ВОД зарегистрирован импульс рентгеновского излучения ускорителя АРСА (рис. 5,б).



Рис. 4. Импульс электронного излучения СПИН-2, зарегистрированный ВОД с СПС-Б18, с двумя фильтрами ПС13 ( $\tau_{0.5}$  = 1,16 нс)



Рис. 5. Импульс, зарегистрированный ВОД с оптическим кабелем длиной 10 м: а – от электронного излучения ускорителя СПИН-2 (2 нс на клетку), б – от рентгеновского излучения ускорителя АРСА (5 нс на клетку)

#### Список литературы

1. Эльяш С. Л., Калиновская Н. И., Донской Е. Н. и др. Малогабаритный импульсный ускоритель для стерилизации // Атомная энергия. 1995. Т. 79, № 46. С. 462–464.

2. Родигин А. В., Эльяш С. Л., Пикарь В. А. Волоконно-оптический монитор-дозиметр импульсного ионизирующего излучения // ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на р-э аппаратуру. 2010. Вып. 4. С. 8–9.

3. Лойко Т. В., Недойкаш Ю. М., Павловская Н. Г. и др. Источник импульсов электронного и рентгеновского излучений субнаносекундной длительности // ПТЭ. 2000. № 4. С. 86–88.

## СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР...

4. Эльяш С. Л., Родигин А. В., Лойко Т. В. и др. CdTe детекторы для регистрации импульсов рентгеновского излучения с субнаносекундным разрешением // ПТЭ. 2011. № 4. С. 86–88.

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

6. Джелли Дж. Черенковское излучение. М.: ИЛ, 1960. С. 334.

# Scintillation Fiber-Optic Detector with Nanosecond Time Resolution

A. V. Rodigin, T. V. Loiko, S. L. Elyash

With the aid of electron and X-ray radiation of sub-nanosecond duration there was measured time resolution of a fiber-optic detector consisting of scintillator SPS-B18, plastic optical cable HFBR-RUS 5 m long, pin-photodiode-based photo-receiver and amplifier. The influence of various factors to the value of dispersion is studied. It is demonstrated that the use of optical filters and mode converter in the form of an insert in the cable breaking leads to dispersion decrease. With the insert of dual violet optical glass PS13 the time resolution of the fiber-optic detector constituted  $\tau_{0.5} = 1.16$  ns what is two times shorter than the time resolution measured with no limitation of cable dispersion.