

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА РЕГИСТРАЦИИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧЕЙ

*В. С. Покровский, П. Б. Репин, А. Г. Репьев, М. Ш. Ибрагимов,  
Д. С. Покровский, Н. Г. Данченко, М. Д. Барышников*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Сцинтилляционный метод регистрации импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ) находит применение в проводимых лабораторных и взрывных экспериментах с Z-пинчами [1, 2]. Создаваемая на его основе многоканальная сцинтилляционная методика принципиально отличается от остальных методик измерения параметров мягкого рентгеновского излучения Z-пинчей [3, 4] и позволяет получать новую информацию о процессах имплозии лайнерной плазмы. В основе метода лежит принцип конверсии рентгеновских квантов в излучение оптического диапазона спектра. Использование новейших пластиковых сцинтилляторов обеспечивает высокую чувствительность методики.

## Описание сцинтилляционной методики

На рис. 1 представлена схема одного канала регистрации разрабатываемой сцинтилляционной методики (СМ). Исследуемый импульс МРИ Z-пинча воздействует на сцинтилляционный датчик (СД), установленный на фланце диагностического канала вакуумной камеры, и ослабляется фильтром МРИ. Фильтр отсекает излучения плазмы в оптическом, УФ-диапазонах, и пропускает узкий участок спектра рентгеновского излучения. Отфильтрованное излучение преобразуется сцинтиллятором датчика в сигнал оптического излучения. Импульс свечения сцинтиллятора выводится из камеры и передается по световоду на фотоприемник. Электрический отклик фотоприемника регистрируется осциллографом. Пуск осциллографа осуществляется сигналом от блока синхронизации.

Данный подход к построению СМ обусловлен применением датчиков в экспериментах с взрывомагнитными генераторами [1], что позволяет минимизировать потери: в ходе эксперимента уничтожается СД и часть световода, при этом основное оборудование остается в целостности.

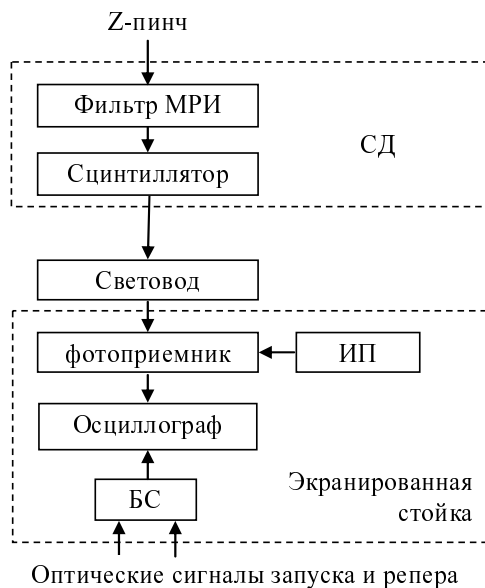


Рис. 1. Схема регистрации импульса МРИ Z-пинча при помощи одного канала сцинтилляционной методики: СД – сцинтилляционный датчик, ИП – источник питания, БС – блок синхронизации

Основным элементом разрабатываемой методики является сцинтилляционный датчик (рис. 2). В рабочем положении корпус 1 датчика закреплён на фланце 2 вакуумной камеры при помощи гайки М8 3, шайбы 4 и уплотнительного кольца 5. Световод 6 Ø800 мкм и втулки 7, 8 оптического разъёма вклеены в корпус герметично. Сцинтиллятор 9 Ø3 мм толщиной 200 мкм удерживается у торца световода с помощью резьбы М6 прижима 10. Фильтр МРИ зажат между кольцевыми оправками 11 и 12 тремя короткими винтами М2 с потайными головками. Сами оправки удерживаются на крышке 13 при помощи трёх длинных винтов М2 с цилиндрическими головками. В процессе сборки корпуса датчика на втулку 7, по очереди, надевают пружину, кольцо и стопорную шайбу – части промышленно выпускаемого ST-коннектора. Полученная в результате деталь (рис. 3) с помощью ST-адаптера может подключаться к любому световоду, оконцованному ST-кон-

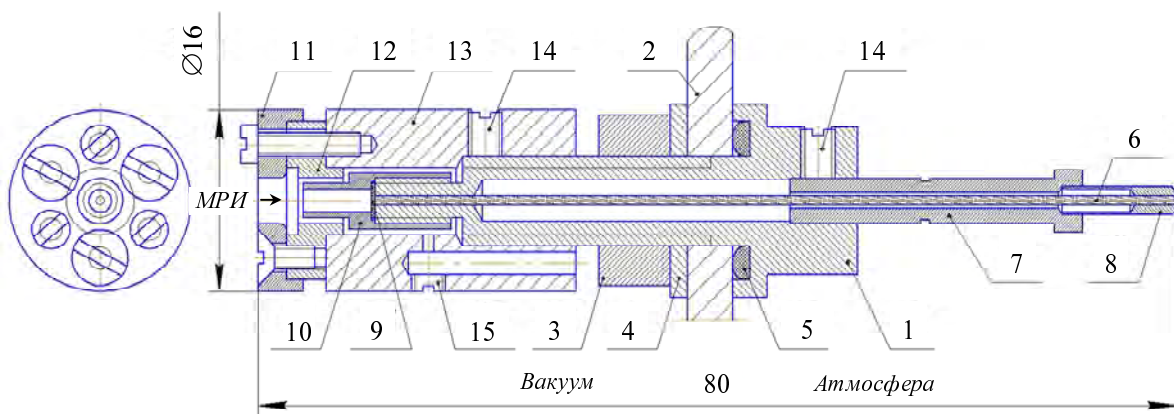


Рис. 2. Конструкция сцинтиляционного датчика: 1 – корпус датчика; 2 – фланец вакуумной камеры; 3 – гайка; 4 – шайба; 5 – уплотнительное кольцо; 6 – кварцевый световод; 7 – втулка-державка ST-коннектора; 8 – втулка  $\varnothing 2,5$  мм, центрирующая световод; 9 – сцинтиллятор; 10 – прижим; 11 – внешняя оправка фильтра; 12 – внутренняя оправка фильтра; 13 – крышка; 14 – длинные шпильки; 15 – технологическое отверстие; МРИ – направление падения регистрируемого излучения на датчик



Рис. 3. Фото корпуса сцинтиляционного датчика

нектором. Её можно использовать для вывода оптического излучения из вакуумной камеры, например, в качестве элемента системы синхронизации, или части методики диагностики свечения лайнерной плазмы в оптическом диапазоне. Для регистрации импульсов МРИ подготовленная основа датчика (рис. 3) оснащается фильтром рентгеновского излучения и сцинтиллятором. После установки корпуса датчика в отверстие  $\varnothing 8$  мм на фланце вакуумной камеры устанавливается сцинтиллятор 9, удерживаемый прижимом 10 (рис. 2). Затем навинчивается крышка 13 в сборе с фильтром МРИ, фиксируемая длинной шпилькой М3 14. Аналогичной шпилькой М3 усилено крепление втулки 7 оптического разъёма. Технологическое отверстие 15 в крышке заглушено короткой шпилькой М3.

Применение свободновисящих фильтров в конструкции датчика позволяет оперативно варьировать материал и толщину фильтра, меняя блоки оправок 11, 12. При этом реализуется возможность регулировки спектральной чувствительности каждого канала методики, а также возможность выбора регистрируемого датчиком спектрального диапазона (рис. 4). Вариация длины диагностического канала и размера диафрагмы, вырезающей видимую датчиками часть пинча, обеспечивают дополнительную свободу при настройке уровня падающего на датчики излучения.

Установлено, что в составе датчика предпочтительнее использовать фильтры МРИ, состоящие из

нескольких слоев. Внешний слой такого фильтра может нагреваться и даже превращаться в плазму под действием поглощенной энергии МРИ. При этом испарившееся вещество внешнего слоя продолжает выполнять функцию фильтра во время импульса МРИ, а остальные слои остаются достаточно холодными, чтобы сохранять оптическую плотность фильтра. Кроме того, при изготовлении фильтра, состоящего из нескольких слоёв, мелкомасштабные неоднородности материала фильтра нивелируются.

В проведенных испытаниях датчика использовались фильтры, представляющие собой наборы фольг из следующих металлов: Al 5 слоев по 0,6 мкм (датчик № 1), Ag 4 слоя по 0,3 мкм (датчик № 2), Si два слоя по 0,5 мкм (датчик № 3). Данный выбор материалов в Z-пинч экспериментах обусловлен необходимостью регистрировать излучение в нескольких спектральных диапазонах (рис. 4) и связан с настройкой чувствительности методики из условия нахождения на линейном участке характеристической кривой используемого ФЭУ [5].

Чувствительным элементом датчика является сцинтиллятор 9 (рис. 2). Для проводимых экспериментов выбран пластиковый пленочный сцинтиллятор EJ-208 производства Eljen Technology. Основная часть спектра свечения сцинтиллятора находится в диапазоне длин волн 400...530 нм с максимумом 434 нм, соответствующим высокому коэффициенту пропускания кварцевых световодов (~80 %) и распо-

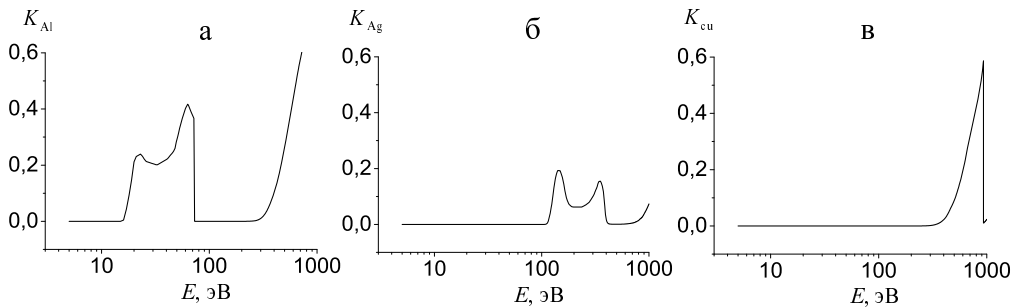


Рис. 4. Спектральный коэффициент пропускания фильтров МРИ: а – Al толщина 0,6 мкм, б – Ag–0,3 мкм, в – Cu–0,5 мкм [6].

ложенным вблизи максимума спектральной чувствительности применяемого ФЭУ [5]. Длительность свечения EJ-208 на полувысоте импульса составляет 4,2 нс при времени нарастания импульса 1 нс [7]. Используемый сцинтиллятор не ограничивает быстродействие разрабатываемой методики при характерной длительности регистрируемых сигналов МРИ на полувысоте ~20 нс [1]. Временное разрешение разрабатываемой методики при использовании ССДИ8М составляет ~5 нс, при использовании полупроводниковых фотоприемников на основе ФД-256 или HFBR2416 ~3 нс.

Заготовка сцинтиллятора 9 (рис. 2) представляет собой полированную пластмассовую плёнку размером 150x150 мм толщиной 200 мкм. Изготовление сцинтиллятора осуществляется специально разработанным пробойником с остро заточенной режущей кромкой. Разработанная технология вырезания и установки сцинтиллятора под прижим 10 обеспечивает неприкосновенность рабочей поверхности сцинтиллятора и гарантирует его высокую чувствительность в диапазоне МРИ. Сборка датчика завершается установкой корпуса 1 (рис. 1) в одно из отверстий Ø8 мм на фланце вакуумной камеры 2 (рис. 2). После про-

верки на герметичность полученного соединения на корпус датчика навинчивается крышка 13 с фильтром МРИ.

В экспериментах [1], как правило, применяется многоканальный сцинтилляционный детектор, состоящий из нескольких СД (рис. 5). Модульный принцип повышает эксплуатационные характеристики разрабатываемой методики. Увеличение числа каналов регистрации позволяет получить больший объём информации о параметрах пинча и проводить дублирование наиболее ответственных измерений. К достоинствам конструкции СД относится не только возможность простой установки, замены и оперативной инспекции фильтров и сцинтилляторов, но и более удобное присоединение датчиков к вакуумной камере, а также возможность подключения к датчику любого световода, оконцованного универсальным ST-коннектором. При этом с помощью выбора диаметра и марки световода, в ряде случаев, можно дополнительно регулировать чувствительность каналов методики.

В проводимых испытаниях использовались специальные световоды SC400/440 фирмы Fujikura, покрытые защитной светонепроницаемой оболочкой.

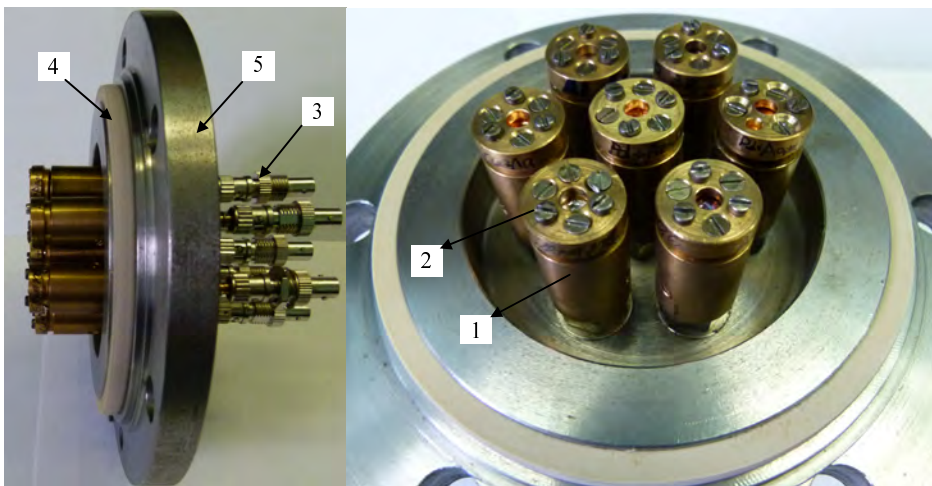


Рис. 5. Фото семиканального сцинтилляционного детектора: 1 – крышки, навинченные на корпуса СД; 2 – фильтры МРИ в оправках, установленные на крышки; 3 – ST-адаптеры; 4 – уплотнительное кольцо; 5 – фланец диагностического канала вакуумной камеры

Каждый световод подключался к расположенному в измерительной стойке фотоумножителю СНФТ-3 в составе детектора ССДИ8М [5]. Амплитуда выходного сигнала ФЭУ на нагрузку 75 Ом в линейном режиме может достигать 250 В при уровне шума от 0,1 В. Подключение световода к ФЭУ осуществлялось при помощи специально разработанного переходника, представляющего собой половину ST-адаптера. Переходник завинчивался в осевое отверстие детали, заменяющей штатную крышку ССДИ8М, и обеспечивал соосность ФЭУ и подключаемого световода.

Фотоумножители запитывались током от высоковольтного источника PS350 при штатном напряжении – 3800 В. Электронное оборудование размещалось в экранированном металлическом шкафу. Регистрация электрических сигналов осуществлялась цифровыми осциллографами с полосой пропускания 500 МГц. Для запуска осциллографов использовался приёмный оптический модуль. Сшивка осциллограмм осуществлялась при помощи реперного сигнала от блока синхронизации электрофизического комплекса.

### Экспериментальные результаты

Отработка разработанных для взрывных экспериментов сцинтилляционных датчиков МРИ проводилась на лабораторной установке, состоящей из 17 параллельно подключенных пятикаскадных генераторов Маркса. Выходное напряжение генераторов составляет 500 кВ, энергозапас – 40 кДж, емкость в «ударе» 0,32 мкФ, ток разряда – 1 50 кА. Генераторы снабжены кабельными выводами энергии, которые подсоединены к общему маслonaполненному коллектору и далее через разделительный изолятор и вакуумную передающую линию к нагрузке. При работе на лайнер установка обеспечивает ток ~2 МА при полном времени нарастания импульса ~1,1 мкс [8].

В экспериментах использовалась лайнерная система, состоящая из 45 вольфрамовых проволочек диаметром 10 мкм, равномерно распределенных по образующей цилиндра диаметром 60 мм с высотой 30 мм. Энергозапас всей установки при максимальном зарядном напряжении 100 кВ составляет 680 кДж, при напряжении 75 кВ – 382 кДж.

Проведена серия из пяти экспериментов, в которой осуществлялся контроль амплитудно-временных параметров импульса тока в подводящей линии нагрузочного узла поясами Роговского. На рисунке 6 приведена характерная осциллограмма импульса тока. Разработанные сцинтилляционные датчики использовались для регистрации формы импульса МРИ Z-пинча в различных спектральных диапазонах. Амплитуда сигналов, соответствовала линейному участку характеристической кривой используемого ФЭУ и, как правило, составляла несколько десятков вольт. На рис. 6 представлены характерные осциллограммы одного из разрядных им-

пульсов. Наибольший по амплитуде сигнал зарегистрирован датчиком, оснащенным фильтром из алюминия толщиной 3,0 мкм. Полуширина импульса МРИ за алюминиевым фильтром составляет 51 нс. Время нарастания импульса по уровню 0,1...0,9 составляет 54 нс. С датчика, фильтрованного серебром 1,2 мкм, зарегистрирован импульс с длительностью на полувысоте 62 нс, фронт – 47 нс. Минимальный по длительности сигнал зарегистрирован датчиком, фильтрованным медью: полуширина импульса составляет 34 нс, фронт – 28 нс. Регистрируемая величина длительностей сигналов за разными фильтрами свидетельствуют о динамике плазмообразования, имплозии и излучения лайнерной плазмы, характерных для формирования динамических Z-пинчей [9].

На осциллограмме 1, представленной на рис. 6, виден сигнал прекурсора – плазменного образования, формируемого на оси лайнерной системы задолго до основного импульса МРИ. Прекурсор формируется в результате имплозии вещества, испаряющегося с проволочек на начальной стадии абляции до начала движения основной массы лайнерной плазмы [9]. Момент времени максимального значения сигнала на осциллограмме прекурсора, полученной с датчика за алюминиевым фильтром, составляет 650 нс. Отсутствие соответствующих прекурсорам сигналов на осциллограммах с датчиков, фильтрованных серебром и медью (см. рис. 4), свидетельствует о малой температуре прекурсорной плазмы. Кинетическая энергия вещества прекурсора концентрируется в приосевой области, приводя к повышению температуры и излучения, в том числе и в рентгеновском диапазоне. Прекурсор является плазменным объектом с самой высокой плотностью энергии внутри лайнерной камеры и, соответственно, интенсивностью излучения в момент времени своего формирования. Импульсный характер рентгеновского излучения прекурсора свидетельствует о кратковременном повышении температуры приосевой плазмы, которая реализуется только на начальной стадии процесса и быстро спадает. Затем происходит имплозия основной массы лайнера, приводящая к образованию в приосевой области высокотемпературной плазмы, интенсивно излучающей в рентгеновском диапазоне. Время имплозии (интервал времени от начала тока до максимума основного импульса МРИ) в проводимых экспериментах составляет ~1160 нс (см. рис. 6). Максимум рентгеновского излучения наблюдается в момент характерного спада на осциллограмме токового импульса, обусловленного резким увеличением индуктивности нагрузки в момент процесса пинчевания (см. рис. 6, 7).

Приведенные выше рассуждения подтверждаются сигналами, полученными датчиками сцинтилляционной методики, с помощью фотодиодов HFBR2416 (рис. 7). Амплитуды сигналов составили 60...75 мВ. Начало импульса МРИ, зарегистрированное фотодиодами и определяемое по пересечению продолжения фронта сигнала с нулевой линией осциллограммы, составляет 1250 нс.

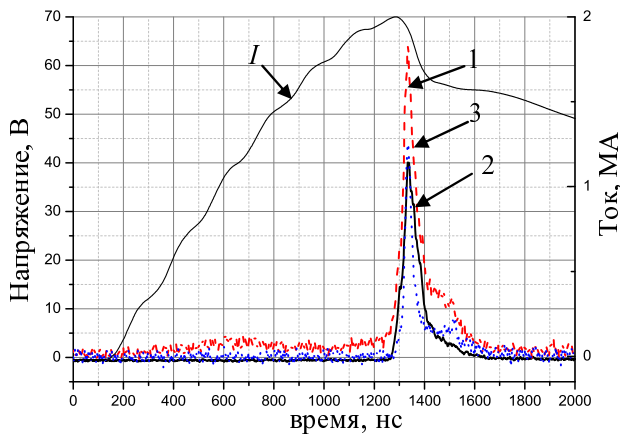


Рис. 6. Характерные осциллограммы импульса МРИ, полученные в эксперименте с предварительным взрывом: 1 – сигнал с датчика, фильтрованного Al 3,0 мкм; 2 – Ag 1,2 мкм; 3 – Cu 1 мкм; *I* – ток в лайнере (в качестве фотоприемников использовались ФЭУ СНФТ-3 в составе детектора ССДИ8М; сигналы МРИ приведены с учетом относительной чувствительности детекторов и собственного пролетного времени ФЭУ)

Время максимумов сигналов совпадает в пределах 10 нс с временем максимумов сигналов, полученных при помощи ФЭУ. Датчики за фильтром Al регистрируют начало прекурсора примерно на 450 нс, максимум прекурсора достигается на 650 нс. Полуширина импульса излучения прекурсора и длительность основного импульса МРИ Z-пинча на осциллограммах, зарегистрированных ФЭУ больше, чем на рис. 7. По всей видимости, это обусловлено лучшим временным разрешением фотоприемников на основе HFBR, чем ФЭУ. Зарегистрировать полезный сигнал с медного фильтра не удалось в связи с недостаточной чувствительностью датчика на основе HFBR.

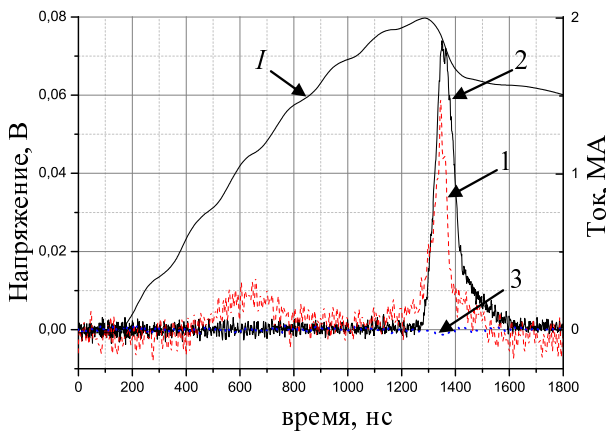


Рис. 7. Характерные осциллограммы импульса МРИ: 1 – сигнал с датчика, фильтрованного Al 1,7 мкм; 2 – Ag 0,9 мкм; 3 – Cu 1 мкм; *I* – ток в лайнере (в качестве фотоприемников использовались фотодиоды HFBR2416; сигналы МРИ приведены с учетом относительной чувствительности детекторов)

В экспериментах были задействованы и другие методики регистрации амплитудно-временных параметров импульса МРИ и свечения лайнерной плазмы. Сигналы с датчиков ВРД (вакуумных рентгеновских диодов) схожи по форме с сигналами, полученными с помощью методики СД. Максимумы амплитуд и начала сигналов, фильтрованных одинаковыми наборами фильтров, достигаются в один и тот же момент времени с точностью  $\pm 10$  нс, соответственно. Максимумы амплитуд и начала сигналов ППД (полупроводниковых детекторов), согласуются с теми же параметрами сигналов с СД и ВРД, однако спад сигналов сильно затянут, по-видимому, из-за насыщения заряда в диффузионном слое диодов. В опытах также регистрировалось свечение лайнерной плазмы в оптическом диапазоне спектра с помощью фотодиодов. На рис. 8 представлены осциллограммы импульса МРИ, полученные с датчиков ВРД, ППД и СД за алюминиевым фильтром, а также свечение лайнерной плазмы.

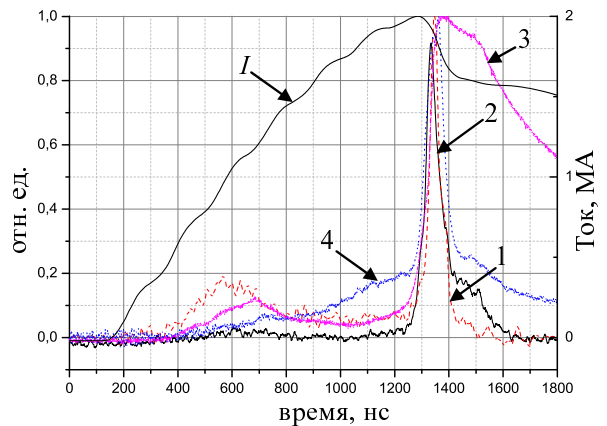


Рис. 8. Характерные осциллограммы импульса МРИ за алюминиевым фильтром: 1 – сигнал ВРД, 2 – сигнал СД, 3 – сигнал ППД, 4 – свечение лайнерной плазмы, *I* – ток в лайнере

Анализ данных оптических измерений дает время имплозии  $\sim 1$  мкс. При этом начало интенсивного оптического излучения плазмы регистрируется через 200 нс после начала тока. Данное свечение регистрируется из центральной области межэлектродного промежутка. Максимум интенсивности излучения лайнерной плазмы в оптическом диапазоне реализуется в том же временном интервале, что и максимумы сигналов рентгеновских детекторов (рис. 8). Интегральная по спектру энергия импульса МРИ, измеренная проволочными болометрами составила от 50 до 70 кДж.

Анализ совокупности данных со всех детекторов позволяет утверждать, что сцинтилляционная методика регистрирует амплитудно-временные параметры импульса МРИ Z-пинча в различных спектральных диапазонах. Для получения абсолютных значений мощности излучения необходима калиб-

ровка детектора. В тоже время, проведенные эксперименты показывают, что используемые элементы разрабатываемой сцинтилляционной методики: датчик, фильтры, сцинтилляторы, световод и фотоприемники даже при отсутствии калибровки, могут применяться в совместных с другими методиками измерениях. При использовании болометрических измерений в соответствующих спектральных диапазонах это позволит осуществить не только анализ параметров формы импульса МРИ, но и проводить измерение мощности импульса мягкого рентгеновского излучения Z-пинча.

### Заключение

Таким образом, предложена и отработана компактная конструкция сцинтилляционного датчика, позволяющая увеличить число каналов разрабатываемой многоканальной сцинтилляционной методики. В радиальном диагностическом канале вакуумной камеры электрофизической установки испытано одновременно семь таких сцинтилляционных датчиков. В составе методики использованы свободновисящие фильтры МРИ. В отличие от фильтров, напыляемых на поверхность сцинтиллятора, свободновисящие фильтры не влияют на характеристики датчика, универсальны, выдерживают длительное хранение и устойчивы к высоким дозам радиации. Сцинтилляционные датчики удобные в эксплуатации, простые и дешевые в изготовлении. Экспериментально продемонстрирована работоспособность сцинтилляционной методики, что позволяет регистрировать форму и амплитудно-временные параметры импульса МРИ Z-пинча.

### Литература

1. Селемир В. Д., Демидов В. А., Ермолович В. Ф. и др. Исследование генерации мягкого рентгеновского излучения в Z-пинчах с запиткой от

спиральных взрывомагнитных генераторов // *Физика плазмы* 33, 2007. № 5. С. 424–434.

2. Zhenghong Li, Rongkun Xu, Yanyun Chu, Jianlun Yang, Zeping Xu et al. // *Physics of Plasmas*, 2013. 20, 032702.

3. X. D. Ren, X. B. Huang, S. T. Zhou, S. Q. Zhang, J. K. Dan, J. Li, H. C. Cai, K. L. Wang, K. Ouyang, Q. Xu, S. C., Duan, G. H. Chen, M. Wang, S. P. Feng, L. B. Yang, W. P. Xie, and J. J. Deng // *AIP Conference Proceedings*, 2014. 1639, 142.

4. M. C. Jones, D. J. Ampleford, M. E. Cuneo, R. Hohlfelder, C. A. Jennings, D. W. Johnson, B. Jones, M. R. Lopez, J. MacArthur, J. A. Mills, T. Preston, G. A. Rochau, M. Savage, D. Spencer, D. B. Sinars, and J. L. Porter // *Review of Scientific Instruments*, 2014. 85, 083501.

5. Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова. Детекторы сцинтилляционные ССДИ8М. URL: [http // www.vniia.ru](http://www.vniia.ru).

6. Henke B. L. et al. Low-energy X-ray interaction coefficients: photoabsorption, scattering, and reflection // *Atomic data and nuclear data tables*, 1982. V. 27. P. 1–144.

7. Eljen technology. Scintillation products. URL: [http // www.eljentechnology.com](http://www.eljentechnology.com)

8. Ибрагимов М. Ш. Экспериментальное исследование влияния слаботоочного предимпульса тока на имплозию многопроволочных лайнеров // *Сб. докл. XVIII Нижегородской сессии молодых ученых (естественные и математические науки)*, Нижний Новгород: НИУ РАНХ и ГС, 2013. С. 32–35.

9. S. C. Bott, D. M. Haas, Y. Eshaq, U. Ueda, F. N. Beg, D. A. Hammer, B. Kusse, J. Greenly, T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, I. C. Blesener, R. D. McBride, J. D. Douglass, K. Bell, P. Knapp, J. P. Chittenden, S. V. Lebedev, S. N. Bland, G. N. Hall, F. A. Suzuki Vidal, A. Marocchino, A. Harvey-Thomson, M. G. Haines, J. B. A. Palmer, A. Esaulov, and D. J. Ampleford // *Physics of Plasmas*, 2009. 16, 072701.