

РЕГИСТРАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ

Е. А. Бычкова, С. В. Галанова, А. В. Филиппов, М. Э. Громова, П. Б. Ретин, М. П. Монахов, О. М. Таценко

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

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ на протяжении ряда лет реализуется программа создания источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ) на основе схлопывающихся Z-пинчей, запитываемых от взрывомagnetных генераторов и формирующих систем на основе взрывных и электровзрывных размыкателей тока [1, 2]. В таких системах плотная высокотемпературная плазма, излучающая в рентгеновском, ультрафиолетовом и видимом диапазонах, образуется на оси электрически взрывааемых многопроволочных цилиндрических лайнеров.

Одной из важнейших задач в рамках исследования источников мягкого рентгеновского излучения на основе Z-пинчей является разработка и совершенствование диагностических методик, используемых в экспериментах на лабораторных и взрывных установках для регистрации параметров генерируемого мягкого рентгеновского излучения и параметров плазмы пинча. Существует достаточно большой набор методик, детекторы которых работают на разных физических принципах, что повышает достоверность проводимых измерений. Так, например, для регистрации спектрально-временных параметров МРИ используются сцинтилляционные детекторы (СД), для регистрации интегрального по пространству свечения плазмы пинча в оптическом диапазоне используются фотодетекторы HFBR [3, 4]. Для регистрации пространственно-временной картины свечения плаз-

мы пинча в рентгеновском и оптическом диапазонах развиваются методики на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) с передачей изображения на вход приборов с помощью оптоволоконных линий.

Настоящая работа посвящена разработке и обоснованию методов и средств регистрации динамики схлопывания лайнерной плазмы в рентгеновском спектре излучения, адаптированных к условиям взрывных экспериментов с повышенным уровнем электромагнитных наводок, а также их конкретной реализации на лабораторной установке.

В связи с тем, что в процессе имплозии многопроволочного лайнера образуется излучение как рентгеновского, так и видимого и ультрафиолетового диапазонов, встает задача фильтрации входящего сигнала. В качестве фильтрующих элементов, как правило, выступают металлические фольги или слои напыленного непосредственно на сцинтиллятор металла. Схема реализации методики регистрации динамики имплозии лайнерной плазмы в рентгеновском диапазоне заключается в построении с помощью камеры-обскуры либо щелевой диафрагмы, ориентированной вдоль оси пинча, изображения приосевой области плазмы на тонком пластмассовом сцинтилляторе, защищенном от видимого и УФ-излучения фильтром из молибдена (рис. 1) [5]. Конвертированное сцинтиллятором в оптический диапазон спектра изображение пинча выводится за пределы вакуумной камеры через оптоволоконную

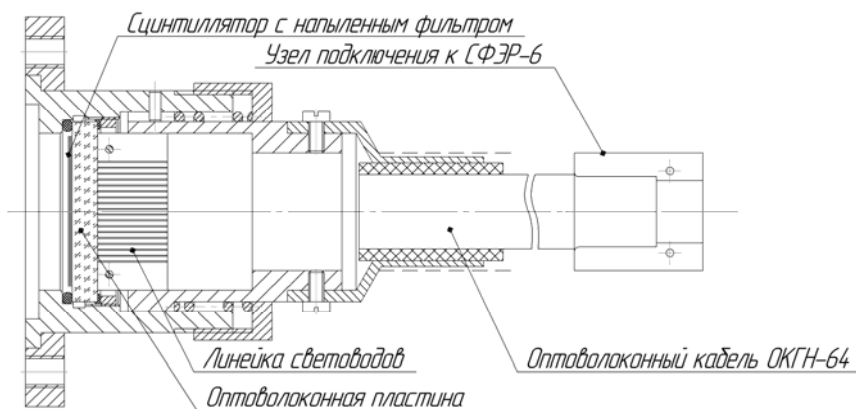


Рис. 1. Схема узла передачи изображения с помощью оптоволоконного кабеля

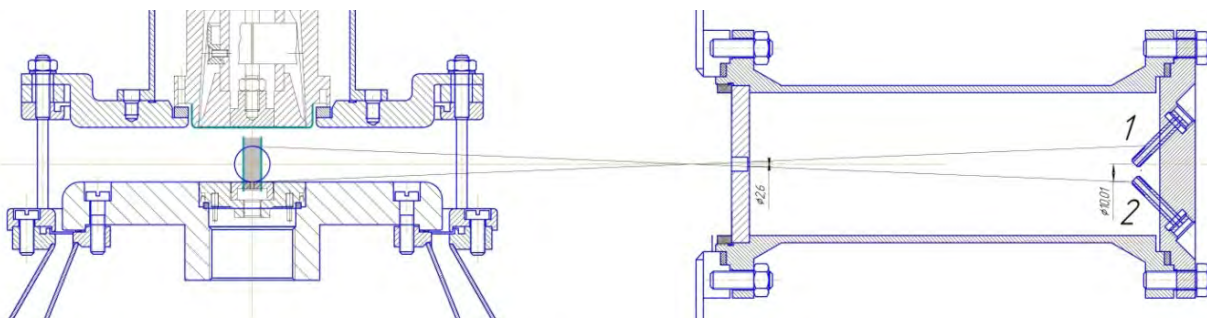


Рис. 2. Лайнерная камера с диагностическим каналом регистрации

пластину, вакуумно уплотняющую диагностический канал установки. Со стороны атмосферы к пластине пристыкован специальным образом оконцованный многожильный оптоволоконный кабель типа ОКГН. Выходящее из световодов излучение дискретных участков изображения лайнерной плазмы с помощью системы объективов передается на входную щель электронно-оптического преобразователя.

Применение металлических фильтров при регистрации МРИ в такой схеме имеет ряд недостатков:

- наличие микроотверстий-дефектов в тонких фольгах и слоях напыления металла толщиной 1–2 мкм;
- сложные окна прозрачности металлов для МРИ, приводящие к ослаблению регистрируемого сигнала;
- деградация материала сцинтиллятора при напылении фильтров.

Решением этих проблем стал отказ от использования металлических фильтров и переход на другой способ фильтрации, основанный на способности оптоволоконна отсекал часть излучения в оптическом и инфракрасном диапазонах спектра. При этом свечение сцинтиллятора, генерируемое под действием МРИ лайнера, проникает в световод и распространяется по нему до регистратора.

Помимо устранения описанных недостатков методики, внесенные изменения являются экономически целесообразными (отказ от оптических пластин, устранение операции по напылению металлических фильтров и сокращение времени подготовки тракта регистрации), и расширяют диапазон использования методики: от функции детектора интегрального по пространству свечения МРИ до регистрации пространственно-временной картины свечения плазмы пинча.

Регистрация интегрального по пространству свечения МРИ

Методика регистрации интегрального по пространству свечения МРИ проволочного лайнера отработана. Токовая запитка лайнера проводилась на лабораторной установке, обеспечивающей импульс амплитудой до 2 МА при полном времени нараста-

ния ~1,5 мкс. Энергия МРИ, генерируемого при схлопывании основной массы лайнера, составляет ~5 кДж, а длительность импульса на полувысоте ~50 нс. Лайнер имел следующие параметры: диаметр 60 мм, высота 31 мм, количество вольфрамовых проволочек 45, диаметр проволочек 10 мкм.

Выбранная редакция эксперимента представлена на рис. 2. Во фланце диагностического канала были смонтированы два световода. На торце световода № 1 закреплен сцинтиллятор для регистрации полезного сигнала интегрального по пространству излучения МРИ. Световод № 2, неоснащенный сцинтиллятором, предназначен для регистрации паразитного излучения, связанного с отсутствием металлического фильтра, и дальнейшего сравнения двух выходных сигналов. Регистрация сигналов с оптических волокон велась с помощью двух фотоприемников типа HFBR, подключенных к осциллографу. Спектральная восприимчивость фотоприемника представлена на рис. 3.

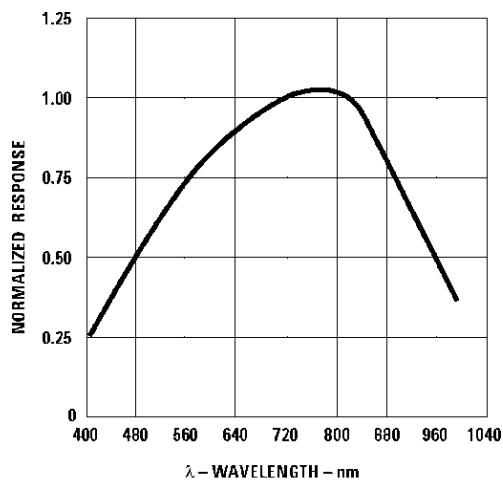


Рис. 3. Спектральная восприимчивость фотоприемника HFBR

Сцинтиллятор был выбран исходя из требований взрывного эксперимента и представлял собой пленочный сцинтиллятор EJ208 с временем высвечивания 1 нс, длиной волны максимума излучения 435 нм (рис. 4).

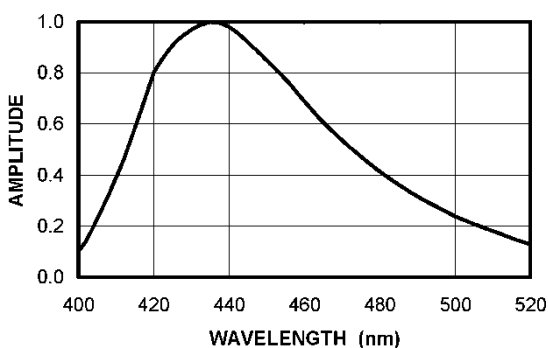


Рис. 4. Распределение свечения сцинтиллятора по диапазону длин волн

На рис. 5 представлены результаты измерения светимости сцинтиллятора со световода №1 и прохождения паразитного излучения со световода №2. Там же представлен график результирующего сигнала, полученного путем вычета данных 2-го графика из данных 1-го графика. Так как максимум амплитуды паразитного излучения в 15 раз меньше полезного сигнала, то вклад паразитного излучения в общую картину измерения рентгеновского импульса незначителен и им можно пренебречь.

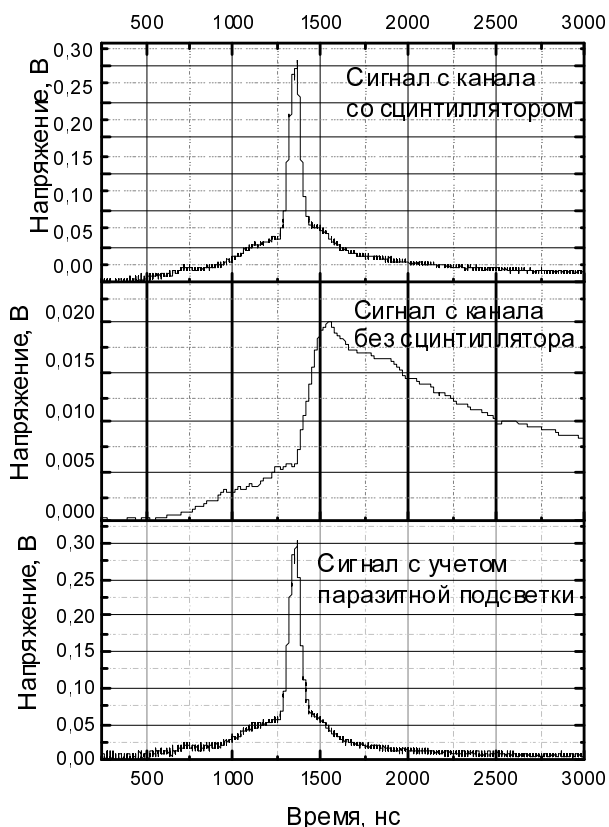


Рис. 5. Осциллограмма измерения светимости сцинтиллятора и прохождения паразитного излучения

Результат сравнительного анализа полученного сигнала с аналогичным сигналом интегрального по пространству свечения МРИ сцинтилляционного детектора (СД), конструкция которого оснащена точно таким же сцинтиллятором и оптически плотным металлическим фильтром из серебра, представлен на рис. 6. Сигналы совпадают по временному диапазону, форме импульса и его длительности. Отсутствие фильтра привело к отсутствию потерь отдельных спектральных диапазонов излучения и образованию ультрафиолетового пьедестала, то есть изменение амплитуды сигнала начинается с момента возникновения в камере ультрафиолетового излучения.

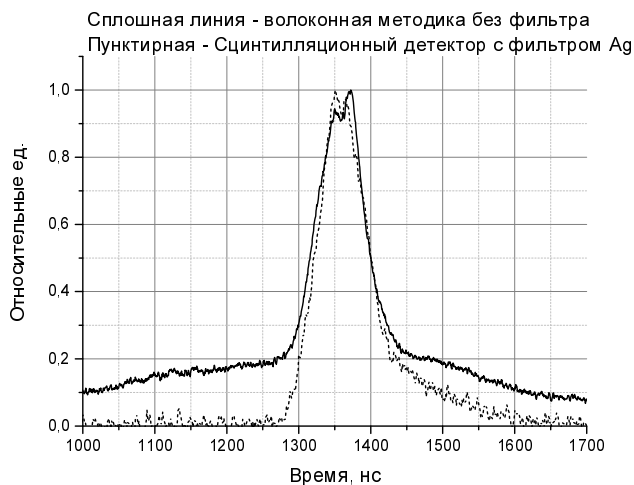


Рис. 6. Сравнение сигналов волоконной и сцинтилляционной методик

Регистрация пространственно-временной картины свечения МРИ лайнера

При обработке регистрации пространственно-временной картины свечения МРИ лайнера, во фланце диагностического канала были установлены две линейки световодов, ориентированных перпендикулярно оси пинча и охватывающих область изображения плазмы пинча ~6 мм. На рис. 7 представлен модифицированный диагностический узел, позволяющий монтировать данные линейки оптических волокон под некоторым углом к оси канала, обеспечивая одновременно регистрацию рентгеновского излучения и эффективное заглушение паразитного излучения пинча. Каждая линейка представляет собой металлическую пластину с пазами для вклейки по 18 оптических волокон (рис. 8). Также была произведена замена диафрагмы на камеру-обскуру диаметром 800 мкм. Камера-обскура строила изображение пинча с разрешением по радиусу и по оси Z на пластиковом сцинтилляторе, находящимся в непосредственном контакте с оптоволоконным линеек. Диаметр обскуры зависит от ее расположения относительно оси пинча и условий радиационной стойкости ее ма-

териала. Размер регистрируемого изображения составил 5 мм. Свечение сцинтиллятора, попадающее в световоды, передается на входную щель электронно-оптического преобразователя СФЭР-6 и разворачивается во времени.

Для обеспечения однозначности интерпретации результата эксперимента центральный световод каждой оптоволоконной линейки был заведен на фотодетектор HFBR.

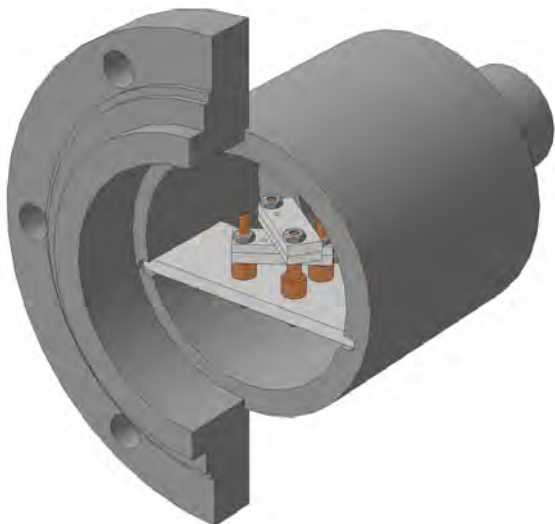


Рис. 7. Фрагмент диагностического узла

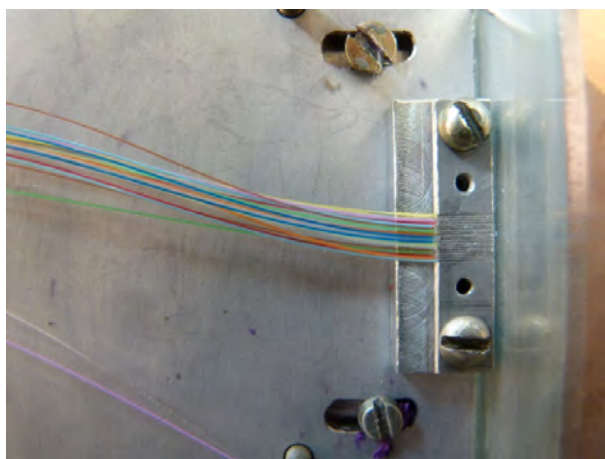


Рис. 8. Линейка световодов

На рис. 9 представлено изображение свечения световодов, задействованных в оптоволоконной системе, зарегистрированное с экрана СФЭР-6 ПЗС-матрицей. Полная длительность развертки СФЭР-6 составила 600 нс. В ходе обработки полученного изображения, результатом которого являются временные профили интенсивности свечения световодов в относительных единицах яркости, было установлено, что сигнал, соответствующий основному импульсу МРИ, содержат четыре световода из всей линейки. Характерный профиль интенсивности свечения, нормированный на единицу по амплитуде, представлен на рис. 10. Данный профиль хорошо согласуется с сигналом фотодетектора HFBR.

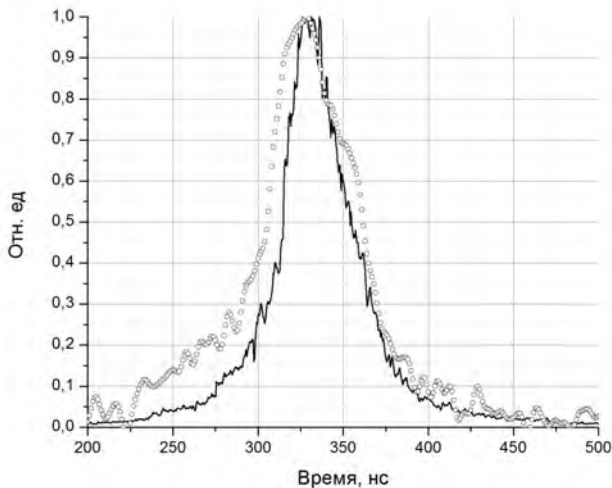


Рис. 10. Сигналы со СФЭР-6 (сплошная линия) и с HFBR (дискретная линия)

Согласно полученным результатам описанная методика регистрирует максимум свечения лайнерной плазмы в рентгеновском диапазоне приосевой области диаметром ~ 3 мм. Фактически это соответствует окончанию имплозии основной массы лайнера. При этом, учитывая имеющийся размер отверстия камеры-обскуры, регистрация производилась с недостаточной резкостью изображения. Чтобы детализировать зону видимости методики и иметь возможность построить график движения плазменной оболочки лайнера в дальнейших экспериментах масштаб регистрируемого изображения планируется

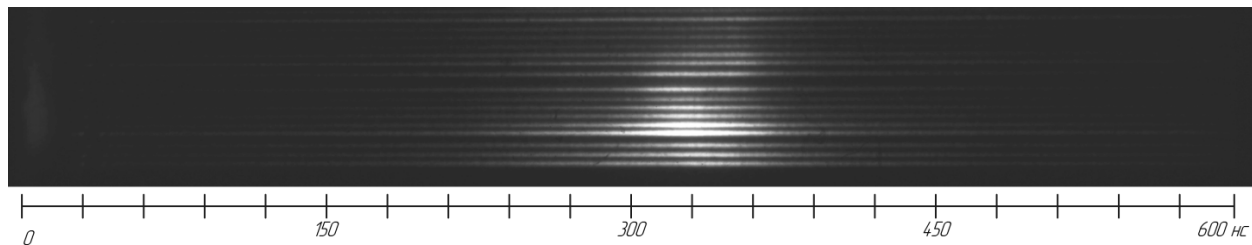


Рис. 9. Изображение сигнала с оптоволоконной линейки

увеличить в два-три раза за счет изменения геометрических размеров элементов диагностического канала. Размеры и положение камеры-обскуры будут изменены, исходя из условий требуемого пространственного разрешения и глубины резкости изображаемого пространства. Также все задействованные световоды будут объединены в одну линейку (рис. 11).

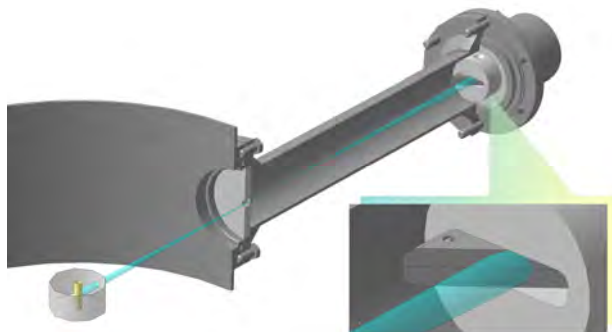


Рис. 11. Геометрия формирования изображения в предстоящем эксперименте

Заключение

В рамках работ по исследованию динамики токового схлопывания проволочного лайнера разработана и реализована методика регистрации мягкого рентгеновского излучения плазмы пинча на основе

электронно-оптического преобразователя. Передача изображения на вход прибора осуществлялась с помощью оптоволоконных линий без использования фильтров из металлической фольги. В работе решена проблема регистрации МРИ в системе смешанного излучения за счет способности оптоволокну отсекаать часть входящего излучения.

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, 2007. 33, 424–434.
2. Selemir V. D., Demidov V. A., Repin P. B. Explosive electrophysical complex EMIR: current state and perspectives // IEEE transactions on plasma science, vol. 38, № 8, august, 2010.
3. Avago Technologies Limited. AV02-0525EN June 15, 2007 (5988-3624EN 2001).
4. Данченко Н. Г., Репин П. Б., Репьев А. Г., Барышников М. Д., Сборник докладов XIV научно-технической конференции «Молодёжь в науке», РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2016.
5. Selemir V. D., Demidov V. A., Repin P. B. Explosive soft x-ray radiation source EMIR. Proceedings of the Thirteenth International Conference on Megagauss Magnetic Fields Generation and Related Topics Megagauss XIII, 2010. P. 118.