

РЕГИСТРАЦИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ВЗРЫВОМАГНИТНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

SOFT X-RAY RADIATION RECORDING BY MULTI-CHANNEL SCINTILLATION DETECTOR IN THE EXPERIMENT WITH MAGNETO-CUMULATIVE GENERATOR

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

*V. S. Pokrovskiy, P. B. Repin, A. G. Rep'ev, M. Sh. Ibragimov,
D. S. Pokrovskiy, N. G. Danchenko, M. D. Baryshnikov*

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

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Проведены испытания многоканального сцинтилляционного детектора регистрации мягкого рентгеновского излучения (МРИ) при схлопывании двухкаскадного цилиндрического многопроволочного лайнера, разгоняемого током быстроходного спирального взрывомагнитного генератора с взрывным размыкателем тока.

Амплитуда тока в лайнерной системе составила 4,2 МА при времени нарастания импульса 400 нс (по уровню 0,1...0,9). Зарегистрированное время имплозии лайнера 800 нс, полная энергия МРИ 56 кДж. Длительность импульсов МРИ, зарегистрированных сцинтилляционными датчиками, фильтрованными алюминием, серебром и медью, составила 15 нс, 18 нс и 13 нс, соответственно.

The testing of the multi-channel scintillation detector of soft x-ray radiation (SXR) recording was carried out at the implosion of a two-stage cylindrical multi-wire array that was accelerated by the current of a high-speed helical magneto-cumulative generator with an explosive opening switch.

The current amplitude in the array system was 4.2 MA at the pulse rise time of 400 ns (at the level 0.1...0.9). The recorded time of the array implosion was 800 ns, the total energy of SXR was 56 kJ. The length of SXR pulses recorded by the scintillation detectors, filtered by aluminum, silver and copper was 15 ns, 18 ns and 13 ns, respectively.

Ключевые слова: сцинтилляционный детектор, мягкое рентгеновское излучение, Z-пинч, взрывомагнитный генератор.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ на протяжении ряда лет проводится исследование генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения (МРИ) при схлопывании цилиндрических лайнерных систем, запитываемых от взрывных источников тока. В ходе работ продемонстрирована работоспособность и перспективность используемой физической схемы разрабатываемых устройств. Показано, что формирователь тока на основе быстроходного спирального взрывомагнитного генератора диаметром 200 мм (ВМГ-200) и взрывного размыкателя тока (ВРТ) с ребристой преградой и разру-

шаемым проводником диаметром 200 мм, обеспечивает запитку многопроволочного цилиндрического лайнера током до 5,3 МА и генерацию импульса МРИ с энергией, достигающей 180 кДж, при длительности импульса на полувысоте 20 нс и температуре термически равновесной плазмы пинча ~65 эВ [1]. В экспериментах с дисковыми взрывомагнитными генераторами с зарядами взрывчатых веществ (ВВ) диаметром 240 мм (ДВМГ240) реализован рекордный для России ток запитки лайнера ~13 МА и генерация импульсов МРИ с энергией до 500 кДж и длительностью ~70 нс [2].

Для разработки устройств, обеспечивающих более высокие амплитуды тока в лайнерных нагрузках и, соответственно, более высокие мощности генерируемого МРИ, необходимы дополнительные эксперименты, направленные на оптимизацию режимов генерации МРИ. В этом случае целесообразно проводить эксперименты с использованием формирователя тока на основе ВМГ-200 [1]. Важной частью экспериментов является обработка диагностик регистрации МРИ. Одна из основных – регистрация мягкого рентгеновского излучения с помощью многоканального сцинтилляционного детектора (СД). В работе приведены результаты испытания сцинтилляционного детектора при запитке многопроволочной лайнерной системы от формирователя импульса тока на основе ВМГ-200 с взрывным размыкателем.

Регистрация излучения с помощью сцинтилляционного детектора

Подробное описание многоканального сцинтилляционной детектора, а также конструкции датчика опубликованы в работах [3,4]. Каждый детектор состоит из одного или нескольких датчиков. Количество каналов регистрации излучения совпадает с числом применяемых датчиков. Представленная модификация регистрации импульса излучения Z-пинча с помощью сцинтилляционного датчика в настоящее время включает до десяти измерительных каналов. Каждый канал состоит из двух частей: уничтожаемой (во взрывных экспериментах) вакуумной части, находящейся внутри лайнерной камеры и отвечающей за преобразование регистрируемого импульса рентгеновского излучения в излучение оптического диапазона и вывод его за пределы вакуумной камеры; и многократно используемой оптической части, расположенной на достаточно большом расстоянии от взрывающейся сборки и отвечающей за транспортировку и регистрацию оптического сигнала.

На рис. 1 представлена схема одного канала регистрации. Исследуемый импульс МРИ проходит по диагностическому каналу вакуумной камеры, ослабляется фильтром и 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 электрическим сигналом от блока синхронизации. Реперный сигнал, записываемый осциллографом, используется при шивке осциллограмм.

В ходе эксперимента уничтожается СД и часть световода, при этом основное оборудование остается в целостности.

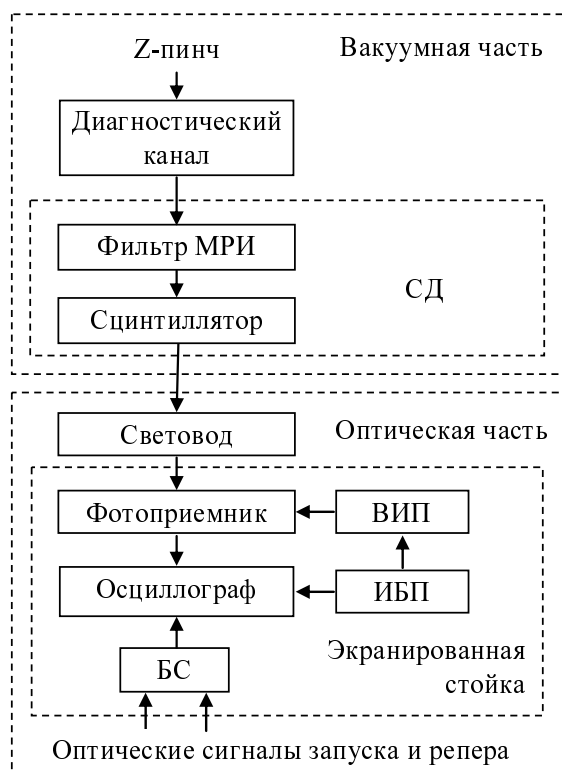


Рис. 1. Схема регистрации импульса МРИ Z-пинча: СД – сцинтилляционный датчик, ИП – источник питания, БС – блок синхронизации

Основным элементом диагностики является сцинтилляционный датчик (рис. 2). Корпус датчика 1, с помощью ST-адаптера, может подключаться к любому световоду, оконцованному ST-коннектором. Его можно использовать для вывода оптического излучения из вакуумной камеры, например, в качестве элемента системы синхронизации, или части диагностики свечения лайнерной плазмы в оптическом диапазоне. Для регистрации импульсов МРИ, подготовленный корпус датчика 1 оснащается фильтром рентгеновского излучения и сцинтиллятором. После установки корпуса датчика в отверстие на фланец вакуумной камеры на корпус 1 устанавливается сцинтиллятор, удерживаемый прижимом 2. Затем навинчивается крышка 3 в сборе с блоком фильтров 4.

Применение свободновисящих фильтров в конструкции датчика позволяет варьировать материал и толщину фильтра, оперативно меняя блоки оправок. При этом реализуется возможность регулировки спектральной чувствительности каждого канала диагностики, а также возможность

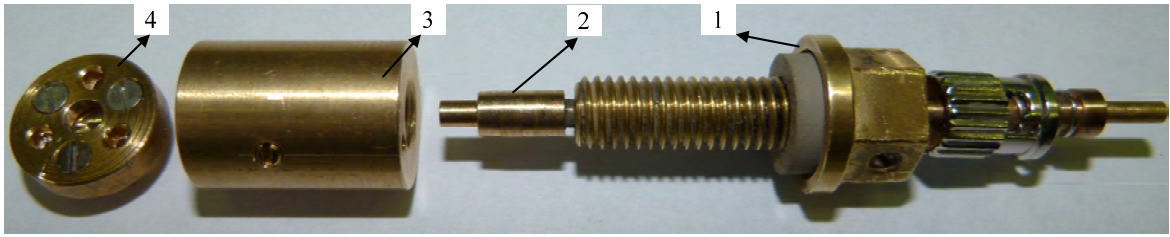


Рис. 2. Фото сцинтиляционного датчика: 1 – корпус датчика, 2 – прижим; 3 – крышка; 4 – фильтр в оправках

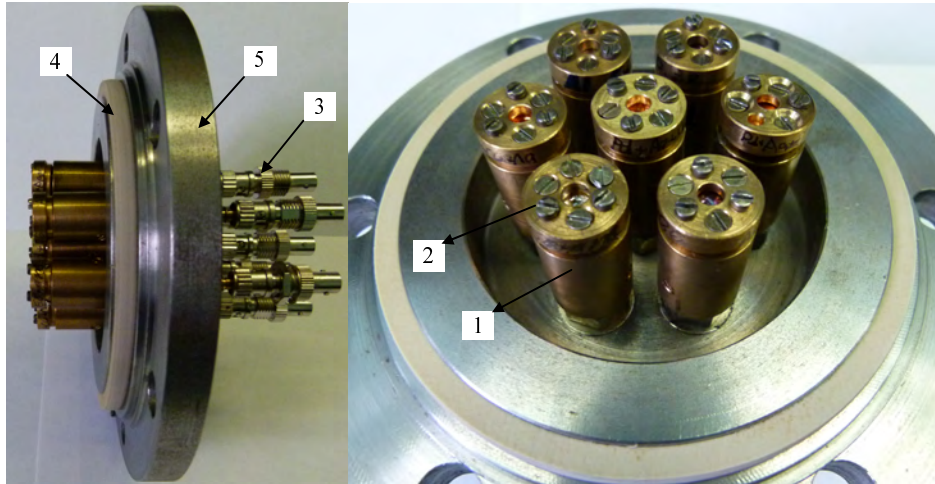


Рис. 3. Фото семиканального сцинтиляционного детектора: 1 – крышки, навинченные на корпуса; 2 – фильтры МРИ в оправках, установленные на крышки; 3 – ST-адаптеры; 4 – уплотнительное кольцо; 5 – фланец диагностического канала вакуумной камеры

выбора регистрируемого датчиком спектрального диапазона [5]. В проведенных испытаниях датчика используются фильтры, представляющие собой наборы фольг металлов алюминия, серебра и меди. Вариация длины диагностического канала и размера диафрагмы, вырезающей видимую датчиками часть пинча, обеспечивают дополнительную свободу при настройке уровня падающего на датчики излучения.

В экспериментах [1, 2], как правило, применяется многоканальный сцинтиляционный детектор (рис. 3). Модульный принцип повышает эксплуатационные характеристики разрабатываемой методики. Увеличение числа каналов регистрации позволяет получить большой объем информации о параметрах пинча и проводить дублирование наиболее ответственных измерений.

Постановка и результаты эксперимента

Формирователь тока представляет собой систему импульсной мощности [1,6], состоящую из быстроходного спирального взрывомагнитного генератора ВМГ-200 и подключенного к нему взрывного размыкателя тока.

Нагрузкой формирователя является лайнерная камера. В эксперименте использовалась двухкаскадная лайнерная система, образованная двумя проволочными каркасами, выполненными из вольфрамовых проволочек диаметра 7,1 мкм, равномерно расположенных на цилиндрических образующих токоподводов внешнего (диаметром 60 мм) и внутреннего (диаметром 40 мм) каскадов. Количество проволочек внешнего лайнера – 240; внутреннего – 120; высота лайнера 15 мм. Схематический вид взрывомагнитного генератора с лайнерной камерой и диагностическими каналами, а также фото нагрузки изображены на рис. 4.

В эксперименте измерялся ток в различных сечениях формирователя, а также ток в лайнерной системе. Для регистрации параметров лайнерной плазмы использован большой набор диагностик, датчики которых размещались в радиальных и осевом диагностических каналах. Спектрально-временные измерения параметров мягкого рентгеновского излучения пинча были реализованы, в том числе, и с использованием сцинтиляционного детектора. Также СД позволяет регистрировать интегральное по пространству излучение,

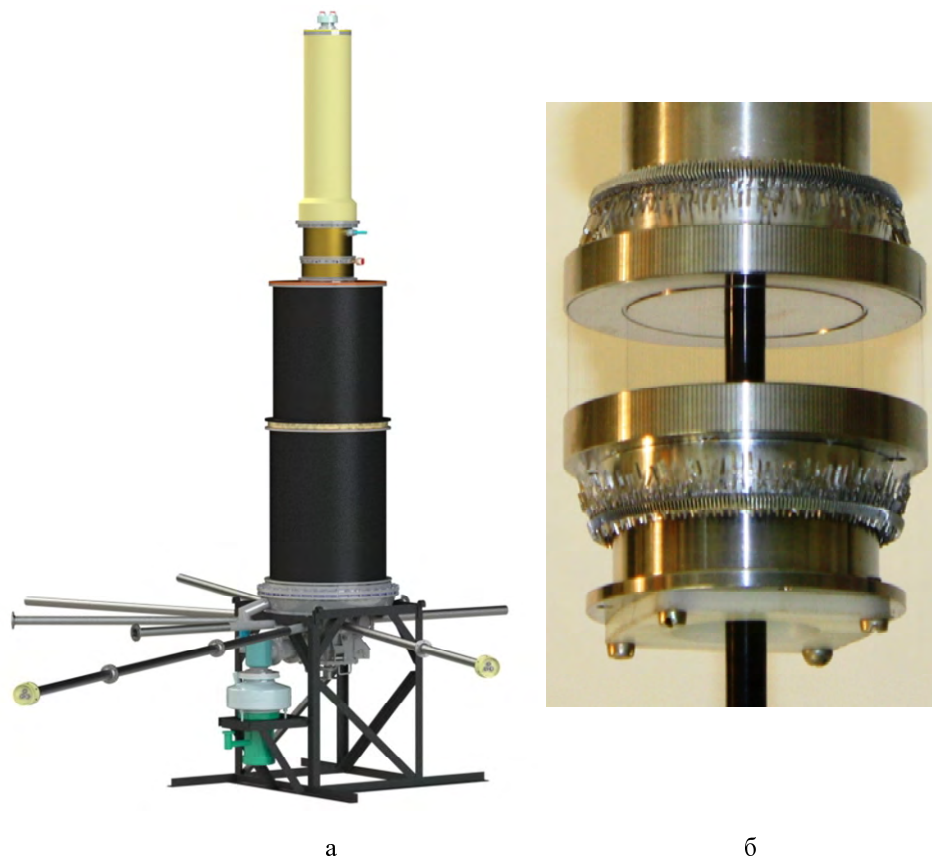


Рис. 4. Эскиз генератора – а) и фото лайнера на технологической оснастке – б).

причем как по всей области пинча, так и по отдельным его частям.

В эксперименте спиральный ВМГ сработал в штатном режиме. В лайнерной камере зарегистрирован импульс тока амплитудой 4,2 МА. Характерное время нарастания тока по уровню 0,1...0,9 составило ~ 400 нс. Интервал времени от начала импульса тока до пинчевания лайнера (время имплозии) равен 800 нс.

На рис. 5 представлены полученные осциллограммы со сцинтилляционных датчиков, фильтрованных различными металлами и регистрирующими излучение значительной части поверхности пинча.

Максимальное значение импульса МРИ достигается вблизи 284,956 мкс. Начало импульса рентгеновского излучения и положение максимумов сигналов за разными фильтрами расходятся по времени в пределах 5 нс. Наибольший по амплитуде сигнал зарегистрирован датчиком, оснащенным фильтром из алюминия толщиной 3,0 мкм. Сигнал вышел за верхнюю границу ранжирования. Тем не менее, данные о спектрально-временных параметрах источника излучения из полученной осциллограммы извлечь можно. Из-

меренная длительность МРИ на полувысоте импульса, составила 15 нс. Время нарастания импульса по уровню 0,1...0,9 – 8 нс. С датчика, фильтрованного серебром (1,2 мкм), зарегистрирован импульс с длительностью на полувысоте 18 нс, фронт нарастания – 14 нс. Полуширина импульса с датчика, фильтрованного медью (0,98 мкм), составила 13 нс, фронт нарастания – 7 нс.

Регистрируемая величина длительностей сигналов за разными фильтрами свидетельствуют о динамике плазмообразования, имплозии и излучения лайнерной плазмы, характерных для формирования динамических Z-пинчей [7].

Заключение

Таким образом, проведены испытания многоканального сцинтилляционного детектора регистрации мягкого рентгеновского излучения при схлопывании двухкаскадного цилиндрического многопроволочного лайнера, разгоняемого током быстроходного спирального взрывомагнитного генератора с взрывным размыкателем тока.

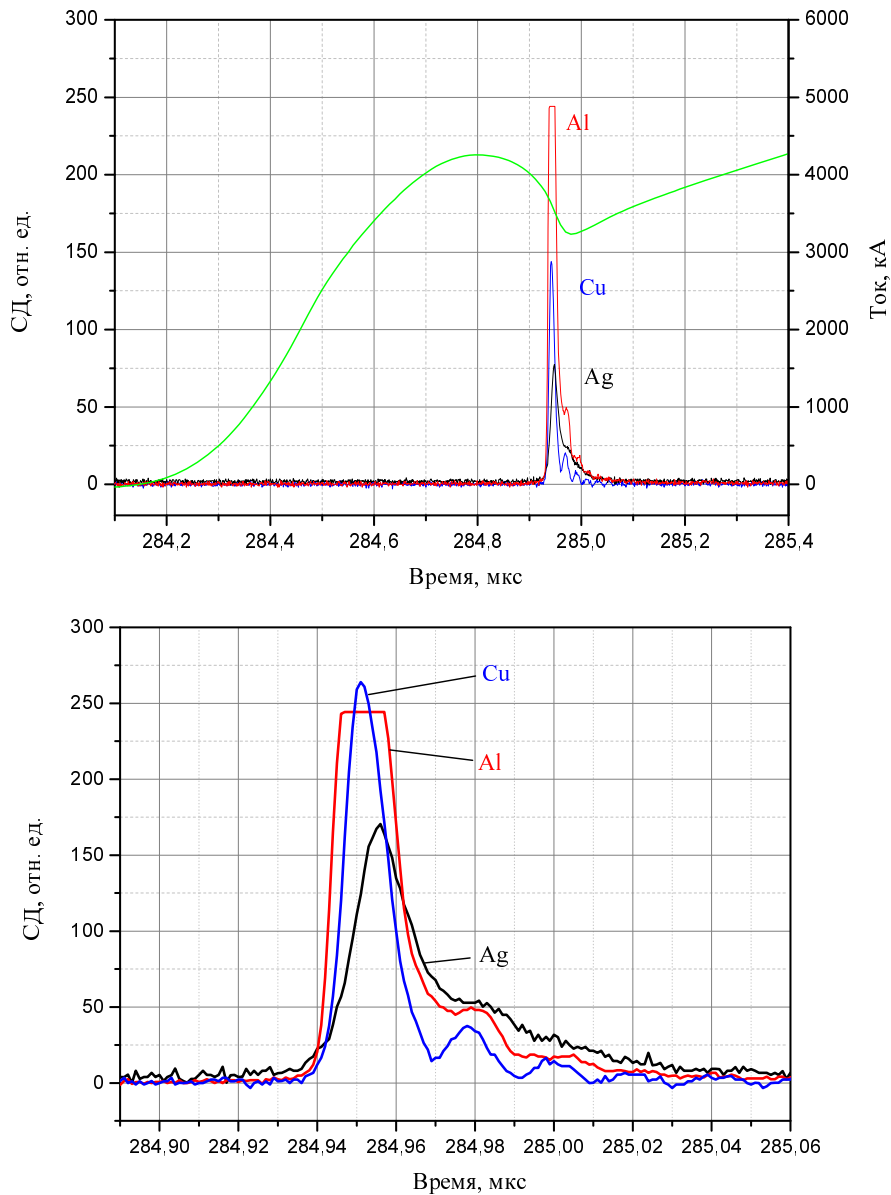


Рис. 5. Осциллограммы импульсов МРИ, полученных со сцинтилляционных датчиков, фильтрованных алюминием, серебром, и медью: а) совместно с током в лайнере, б) с учетом относительной чувствительности каждого из сцинтилляционных датчиков

Амплитуда тока в лайнерной системе составила 4,2 МА при времени нарастания импульса 400 нс (по уровню 0,1...0,9). Зарегистрированное время имплозии лайнера 800 нс, полная энергия МРИ 56 кДж. Длительность импульсов МРИ, зарегистрированных сцинтилляционными датчиками, фильтрованными алюминием, серебром и медью, составила 15 нс, 18 нс и 13 нс, соответственно.

Экспериментально продемонстрирована работоспособность сцинтилляционного детектора, что позволяет регистрировать спектрально-временные параметры импульса МРИ Z-пинча.

Список литературы

1. Selemir V. D., Demidov V. A., Ermolovich V. F. et al. Studying soft x-ray radiation generation in Z-pinchs powered from helical magneto-cumulative generators // *Physics of Plasma*, 2007. 33, № 5, P. 424–434.
2. Selemir V. D., Demidov V. A. and Repin P. B. Explosive Electrophysical Complex EMIR: Current State and Perspectives // *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2010. V. 38, N 8, P. 1754,

3. Покровский В. С., Репин П. Б., Репьев А. Г., Ибрагимов М. Ш., Покровский Д. С., Данченко Н. Г., Барышников М. Д. Результаты испытания многоканального сцинтилляционного датчика регистрации мягкого рентгеновского излучения Z-пинчей // Тезисы докладов XVI научно-технической конференции «Молодежь в науке». Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017. С. 72,

4. Покровский В. С., Репин П. Б., Репьев А. Г., Ибрагимов М. Ш. Патент на изобретение «Сцинтилляционный детектор для регистрации импульсов мягкого рентгеновского излучения», RU № 2643219 от 31.01.2018.

5. Репин П. Б., Репьев А. Г., Орлов А. П., Репин Б. Г., Покровский В. С. Методика расчета спектральных измерений в экспериментах с излучающим Z-пинчем // Труды международной кон-

ференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения»: сборник докладов. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017. С. 424,

6. Борискин А. С., Демидов В. А., Казаков С. А., Шаповалов Е. В. Система импульсной мощности // Патент РФ RU № 2 347 312 С1 по заявке на изобретение № 2007123921 с приоритетом от 25.06.2007. МПК НО2N 11/00. БИ. 2009. № 6.

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