

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ В Z-ПИНЧ ВЗРЫВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

### POSSIBILITY TO MEASURE AMPLITUDE-TO-TIME PARAMETERS OF SOFT X-RAY RADIATION PULSE BY SEMICONDUCTOR DETECTORS IN Z-PINCH EXPLOSIVE EXPERIMENTS

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

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

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

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

Представлены результаты разработки многоканальной системы полупроводниковых детекторов для регистрации амплитудно-временных параметров импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ), генерируемого при токовой имплозии цилиндрических многопроволочных лайнеров, запитываемых от взрывных формирователей токовых импульсов. Основным элементом детекторов являются кремниевые фотодиоды серии ФДУК-УВ, обладающие широким спектральным диапазоном, высокой чувствительностью, а также линейностью спектральных характеристик в широком интервале интенсивности излучения. Экспериментальная отработка полупроводниковых детекторов проведена в модельных экспериментах на лабораторной установке.

Приведены результаты испытания многоканальной системы регистрации с полупроводниковыми детекторами в эксперименте по запитке многопроволочной лайнерной системы от формирователя импульса тока на основе спирального взрывомагнитного генератора диаметром 200 мм (ВМГ-200) с взрывным размыкателем тока (ВРТ). Продемонстрирована возможность регистрации амплитудно-временных параметров импульсов МРИ в условиях сопровождающих работу установки сильных электромагнитных помех в широком диапазоне частот. Зарегистрированы импульсы МРИ длительностью на полувысоте 10 нс.

The development results of the multi-channel system of semiconductor detectors for the recording of amplitude-to-time parameters of soft x-ray radiation pulses (SXR) are presented. SXR is generated at the current implosion of cylindrical multi-wire arrays powered by explosive current pulse formers. Silicon photodiodes are the main elements of the detectors. They have a wide spectral range, high sensitivity, linearity of spectral characteristics in a wide range of the radiation intensity. The experimental adjustment of the semiconductor detectors were carried out in the model experiments on the laboratory facility.

The testing results of the multi-channel recording system with the semiconductor detectors are provided. In the experiment, a multi-wire array was powered by the current pulse former based on the helical magneto-cumulative generator with a diameter of 200 mm (MCG-200) with an explosive opening switch (EOS). The possibility of amplitude-to-time parameters of SXR pulses recording in the conditions of strong electromagnetic disturbance in the wide frequency range is illustrated. The SXR pulses with the full width at half maximum of 10 ns are recorded.

#### Введение

В НПЦФ на протяжении ряда лет проводятся исследования генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения (МРИ) при схлопыва-

нии 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 разрушаемым 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  $\sim 65$  эВ [1,2].

В связи с высокой стоимостью взрывных экспериментов и однократным характером работы испытываемых изделий, для разработки устройств следующего поколения, обеспечивающих более высокие амплитуды тока в лайнерных нагрузках и, соответственно, более высокие мощности генерируемого МРИ, необходимы исходные данные, обладающие высокой достоверностью. Для получения таких данных требуются дополнительные эксперименты, направленные на оптимизацию режимов генерации МРИ и подтверждение достигнутых параметров устройств. С целью снижения затрат поиск режимов работы устройств, обеспечивающих эффективную генерацию МРИ, целесообразно проводить с использованием хорошо зарекомендовавшего себя во многих экспериментах формирователя тока на основе ВМГ-200 [1]. Такой формирователь способен обеспечить в лайнерных нагрузках достаточно большую амплитуду тока, недостижимую на имеющихся стационарных электрофизических установках. Важной частью экспериментов является отработка методик регистрации МРИ в условиях сопровождающих работу установки сильных электромагнитных помех. В работе приведены результаты испытания многоканальной системы регистрации амплитудно-временных параметров импульсов МРИ с помощью полупроводниковых детекторов в эксперименте по запитке многопроволочной лайнерной системы от формирователя импульса тока на основе спирального взрывомагнитного генератора диаметром 200 мм (ВМГ-200) с взрывным размыкателем тока.

### Многоканальная система полупроводниковых детекторов

Главным элементом полупроводникового детектора является кремниевый фотодиод ФДУК-8УВС с активной областью (чувствительным элементом) площадью  $8 \text{ мм}^2$  (рис. 1).

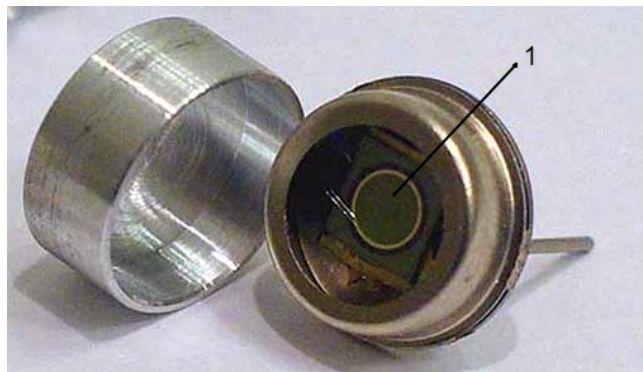


Рис. 1. Кремниевый фотодиод ФДУК-8УВС (с защитным колпаком для транспортировки и хранения). 1 – активная область фотодиода

Широкое использование данного типа диодов для измерений в области ВУФ и МРИ обусловлено сочетанием таких характеристик, как: малая толщина защитного (мертвого) слоя, малое время отклика, малые темновые токи, повышенная радиационная стойкость в мягком рентгеновском диапазоне спектра. Кроме того, они обладают высокой спектральной чувствительностью, которая к тому же является достаточно однородной, порядка  $0,25 \text{ А/Вт}$  в области энергий 40–10 000 эВ [3,4,5]. Спектральные и технические характеристики фотодиода, исследование его диапазона линейности, конструкция полупроводникового детектора подробно описаны в предыдущей работе [6].

Отметим, что данный фотодиод обладает достаточно высокой чувствительностью и в оптическом диапазоне спектра, что с одной стороны позволяет использовать для исследования его работы удобные источники света, но с другой стороны при регистрации в диапазоне МРИ, требуется защита от сопровождающего оптического излучения. Так, при исследовании работы фотодиода в оптическом диапазоне спектра установлено, что для его корректной работы, амплитуда сигнала, снимаемого с фотодиода ФДУК-8УВС не должна превышать 10–12 В, в противном случае он начинает деградировать, форма сигнала и длительность импульса не сохраняются, становятся затянутыми по времени. Фотодиод используется в его основном режиме работы – с внешним обратным напряжением смещения.

Объединение нескольких детекторов в многоканальную систему обеспечивает возможность регистрации спектрально-временных параметров МРИ. На рис. 2 представлена фотография трехканальной системы полупроводниковых детекторов. Датчики размещаются на диэлектрическом фланце, который используется для герметизации вакуумируемого объема. Диэлектрик используется

для гальванической развязки корпуса вакуумной камеры и датчиков. К достоинствам конструкции относятся: защита чувствительного элемента от попадания на него оптического излучения, удобное присоединение датчиков к проходным вакуумным разъемам, что дает возможность использования датчика внутри вакуумируемого объема и оперативной замены фотодиода.

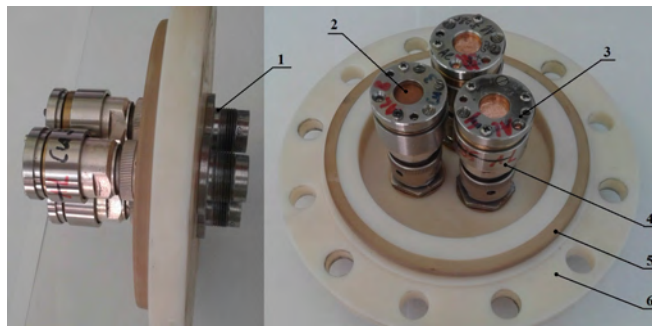


Рис. 2. Фото трехканальной системы полупроводниковых детекторов: 1 – вакуумные разъемы СРГ–75–151ФВ, 2 – фильтры МРИ, 3 – оправки для фильтров; 4 – коаксиальный корпус полупроводникового детектора в разьеме СР75-154ФВ, 5 – уплотнительное кольцо, 6 – капролоновый фланец диагностического канала вакуумной камеры

Требуемый для регистрации уровень интенсивности излучения на детекторе обеспечивается выбором расстояния от места установки детектора до источника излучения, а также при помощи набора диафрагм, стальных или латунных сеток с известным коэффициентом пропускания, и набора фильтров. В качестве фильтров применяются тонкие металлические пленки толщиной 0,2–6 мкм. Использовать рентгеновские фильтры с высокой оптической плотностью необходимо не только для того, чтобы ослабить мощность прошедшего излучения до приемлемого уровня, но и для того, чтобы выделить некий спектральный интервал энергии излучения. На рис. 3 показаны кривые пропускания алюминиевого, серебряного и медного фильтров в зависимости от энергии квантов.

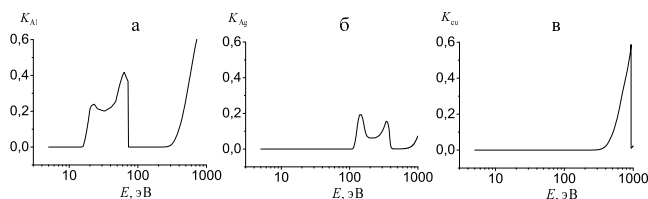


Рис. 3. Спектральный коэффициент пропускания фильтров МРИ [7]: а) Al толщина 0,6 мкм, б) Ag – 0,3 мкм, в) Cu – 0,5 мкм

Отработка полупроводниковых детекторов МРИ проводилась на лабораторной установке, которая при работе на лайнер обеспечивает ток  $\sim 2$  МА при полном времени нарастания импульса 1,3 мкс [8].

### Результаты испытания многоканальной системы полупроводниковых детекторов

Испытание многоканальной системы полупроводниковых детекторов проведено в рамках эксперимента по генерации МРИ при имплозии двухкаскадной лайнерной системы, образованной двумя проволочными каркасами, выполненными из вольфрамовых проволочек диаметра 6 мкм, равномерно расположенных на цилиндрических образующих диаметром 60 мм и 40 мм. Количество проволочек внешнего лайнера – 240; внутреннего – 120; высота лайнерной системы 15 мм. Запитка лайнерной системы производилась от формирователя тока на основе быстроходного спирального взрывамагнитного генератора ВМГ-200 и взрывного размыкателя тока [1,2]. Кроме полупроводниковых детекторов для регистрации генерируемого МРИ использовались вакуумные рентгеновские диоды (ВРД) [9] и сцинтилляционные детекторы (СД) [10], оснащенные тем же набором фильтров, что и полупроводниковые детекторы.

Система полупроводниковых детекторов размещается на патрубке диагностического канала длиной 2,5 м, что наряду с диафрагмированием обеспечивает требуемый уровень интенсивности излучения. Передача сигнала от детектора к осциллографу осуществляется радиочастотным кабелем РК-75-4-11, защищенным дополнительной оплеткой и кембриком. Осциллографы размещаются внутри каземата в экранированной стойке. Благодаря принятым мерам уровень электромагнитных помех на регистрируемых сигналах удалось снизить до минимума.

На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов тока в лайнерной камере и МРИ, зарегистрированных полупроводниковыми детекторами за разными фильтрами. К сожалению, два из трех полупроводниковых детектора (оснащенные алюминиевым и медным фильтрами) сработали в нештатном режиме из-за недостаточного ослабления мощности потока излучения, падающего на полупроводниковый детектор. Зарядовое насыщение этих датчиков привело к искажению формы и длительности регистрируемого импульса МРИ. Тем не менее, начала сигналов со всех детекторов ППД с высокой точностью совпадают друг с другом и с сигналами, зарегистрированными другими детекторами МРИ. Полупроводниковый детектор, ос-

нащенный серебряным фильтром, сработал корректно. Амплитуда сигнала составила около 12 В, полуширина импульса МРИ каждого из пиков 10 нс.

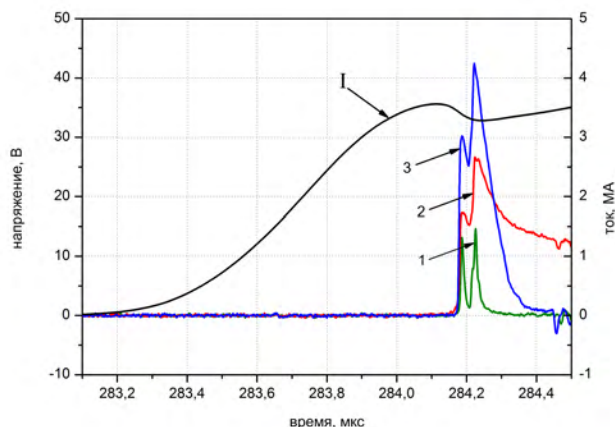


Рис. 4. Осциллограммы импульсов МРИ и тока в лайнере. I – ток в лайнере. 1 – сигнал с датчика, расположенного за серебряным фильтром, 2 – за алюминиевым; 3 – за медным

Сравнение нормированных сигналов, полученных с детекторов ППД и ВРД, представлено на рис. 5. Видно, что сигналы ВРД также имеют двух пиковый характер, что, по-видимому, связано с каскадированием лайнерной системы. Моменты начала сигналов, а также положение максимумов пиков на сигналах с детекторов ППД и ВРД, фильтрованных одинаковым образом, совпадают с точностью до 2 нс. Аналогичные совпадения наблюдаются при сравнении с сигналами сцинтилляционных датчиков.

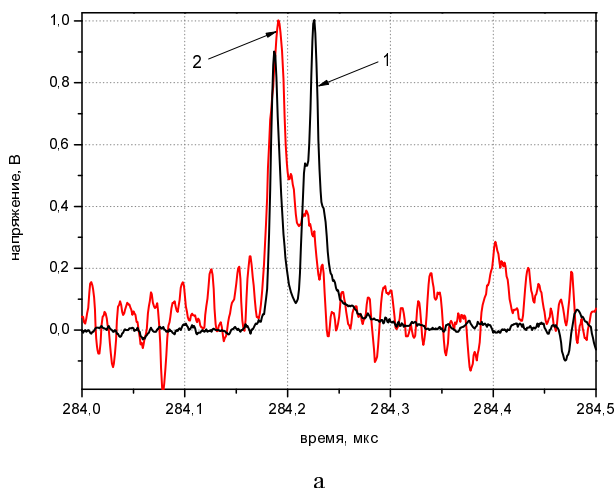
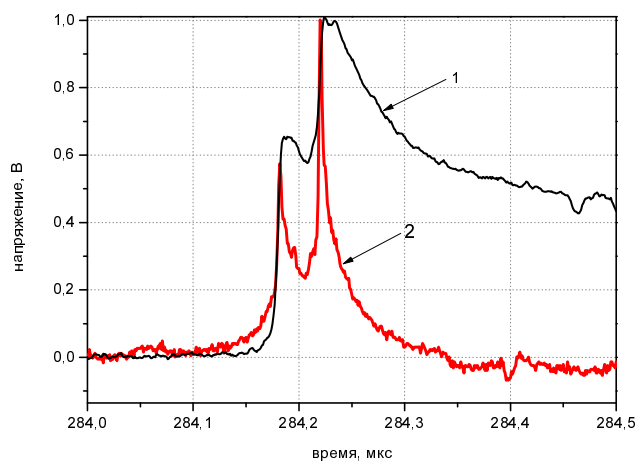
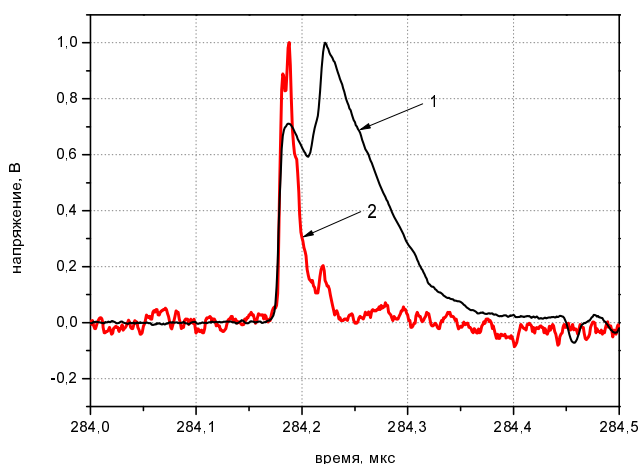


Рис. 5. Осциллограммы импульса МРИ. 1 – сигналы с датчиков ППД, 2 – сигналы с датчиков ВРД, оснащенные серебряными (а), алюминиевыми (б) и медными (в) фильтрами соответственно



б



в

Рис. 5. Окончание

Таким образом, продемонстрирована возможность регистрации спектрально-временных параметров импульсов МРИ полупроводниковыми детекторами в экспериментах с запиткой многоволоочных лайнерных систем от взрывных формирователей импульсов тока. Временные параметры зарегистрированных импульсов МРИ соответствуют данным других методик.

Полученные результаты будут использованы в качестве исходных данных для расчета геометрии измерений разработанными детекторами.

Следующим шагом в развитии регистрации МРИ полупроводниковыми детекторами будет построение физико-математической модели детектора для получения абсолютных значений мощности регистрируемых потоков излучения

## Список литературы

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, № 5. С. 424–434.
2. Борискин А. С., Демидов В. А., Казаков С. А., Шаповалов Е. В. // Система импульсной мощности: Патент РФ RU № 2 347 312 C1 по заявке на изобретение №2007123921 с приоритетом от 25.06.2007 / МПК НО2N 11/00. – БИ. 2009. № 6.
3. Голубев А. В., Сорокин, А. А., Пивинский Е. Г. и др. // Измерение спектрально-временных характеристик кремниевых р-і-п фотодиодов в мягком рентгеновском диапазоне // ЖТФ, 1999. Т. 69. в. 5, С. 83–88.
4. Zabrodsky V. V., Aruev P. N., Sukhanov V. L. et al. // Stable silicon photodiodes for absolute intensity measurements in the VUV and soft x-ray regions E.M. Gullikson, R. Korde, L.R. Canfield and R.E. Vest. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 80 (1996) p.313-316; Silicon Precision Detectors for Near IR, Visible, UV, XUV and Soft X-Ray Spectral Range // The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, ISMTII-2009 June 29–July 2, 2009, Saint-Petersburg, Russia, PS06-21.
5. Artyomov A. P., Baksht E. h., Tarasenko V. F. et al. // Temporal Response of Silicon EUV and Soft X-ray Detectors. Instruments and Experimental Techniques, 2015. Vol. 58. N. 1. P. 102–106.
6. Покровский Д. С., Репин П. Б., Репьев А. Г., Ибрагимов М. Ш., Покровский В. С., Данченко Н. Г. // Исследование амплитудно-временных параметров импульса мягкого рентгеновского излучения z-пинча полупроводниковыми детекторами // Тезисы докладов XVI научно-технической конференции «Молодежь в науке». С. 73.
7. Henke V. L. et al. Low-energy X-ray interaction coefficients: photoabsorption, scattering, and reflection // Atomic data and nuclear data tables, V. 27, 1982. P. 1–144.
8. Ибрагимов М. Ш. Экспериментальное исследование влияния слаботокового предимпульса тока на имплозию многопроволочных лайнеров // Сб. докл. XVIII Нижегородской сессии молодых ученых (естественные и математические науки), Н. Новгород: НИУ РАНХ и ГС, 2013. С. 32–35.
9. Данченко Н. Г., Пылаев Н. А., Юсупов Р. Р. // Текущий статус разработки полихроматора мягкого рентгеновского излучения для экспериментов с взрывными источниками тока. // Молодежь в науке: сборник докладов XIV научно-технической конференции 2015. С. 147–153.
10. Покровский В. С., Репин П. Б., Репьев А. Г., Ибрагимов М. Ш., Покровский Д. С., Данченко Н. Г., Барышников М. Д. // «Многоканальная регистрация мягкого рентгеновского излучения в эксперименте с взрывомагнитным генератором с помощью сцинтилляционного датчика». // Сб. аннот. юбилейной XV Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школы. Москва, НИЦ «Курчатовский институт», 2017. С. 220,