

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ

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

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

Проведена экспериментальная отработка многоканального полупроводникового детектора для регистрации амплитудно-временных параметров мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ) динамических Z-пинчей в модельных и взрывных экспериментах [1, 2]. Основным элементом полупроводникового детектора являются фотодиоды серии ФДУК-УВ, обладающие широким спектральным диапазоном и высокой чувствительностью. Испытания детектора проводились на лабораторной установке с энерговыходом излучения Z-пинча ~ 70 кДж при длительности импульса излучения на полувысоте ~ 20 нс. В докладе представлена конструкция полупроводникового детектора, проведен анализ полученных осциллограмм импульса МРИ цилиндрической многопроволочной лайнерной системы.

Ключевые слова: полупроводниковый детектор, мягкое рентгеновское излучение, Z-пинч, вакуумный рентгеновский диод, сцинтилляционный детектор.

Введение

В связи с повышением интереса к использованию излучения в ультрафиолетовом, вакуумном ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра, в последнее время выполнено значительное количество работ по разработке и исследованию свойств твердотельных детекторов различного типа. Основными требованиями, предъявляемыми к детекторам, являются радиационная стойкость, высокая спектральная чувствительность, однородность чувствительности по активной площади детектора, низкие темновые токи, а также линейность в широком интервале интенсивности излучения. Для практических исследований важна совокупность всех перечисленных параметров. В настоящее время среди твердотельных детекторов наиболее широкое применение нашли кремниевые фотодиоды, которые применяются для детектирования ионизирующего излучения, частиц с высокой энергией.

В настоящем докладе полупроводниковые детекторы (ППД) используются для регистрации импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ) в лабораторных экспериментах с Z-пинчами [8]. Фотодиоды серии ФДУК-УВ обладают высокой чувствительностью, широким динамическим и спектральным диапазоном, а также линейностью в широком интервале интенсивности излучения. В докладе показана рациональная конструкция детектора на основе этих фотодиодов. Представлены экспериментальные данные по амплитудно-временным параметрам импульса МРИ в Z-пинч экспериментах с цилиндрической лайнерной системой из вольфрамовых микроволпроводников.

Описание фотодиода

В работе использовался кремниевый фотодиод ФДУК-8УВС с активной областью (чувствительным элементом) площадью 8 мм^2 , изготовленный в ФТИ им. А. Ф. Иоффе г. Санкт-Петербург (рис. 1).



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

Следует отметить, что данный тип диодов, существенно отличается от *p-i-n* кремниевых диодов с толщиной мертвого слоя 300 нм и более, таких как Siemens ВРХ65, Motorola MRD510, Hamamatsu S4753, СППД-11-04 НИИИТ/Москва, широко используемых для измерения амплитудно-временных параметров импульсов рентгеновского излучения в более коротковолновом диапазоне [3]. Работа данного фотодиода основана на явлении внутреннего фотоэффекта. На образование электрон-дырочной пары в данном диоде расходуется постоянная энергия $\approx 3,7 \text{ эВ}$. В области спектра $\geq 50 \text{ эВ}$ практически

все рентгеновские фотоны участвуют в формировании импульса фототока в цепи регистрации, поэтому диод данного типа и называется абсолютно-калиброванным. Технические характеристики фотодиода представлены в таблице.

Таблица 1

Технические характеристики фотодиода ФДУК-8УВС

Характеристика	Значение	Единица измерения
Габаритные размеры корпуса	$\varnothing 12,5 \times 14,2$	мм
Размер активной области	$\varnothing 3,2$	мм
Площадь активной области	8	мм ²
Толщина базы	350	мкм
Ёмкость (при обратном смещении 100 В)	≤ 40	пФ
Темновой ток (при обратном смещении 100 В)	≤ 100	нА
Фронт нарастания (620 нм, при обратном смещении 50 В)	8	нс

Важной особенностью диода является малая толщина «мертвого слоя» (≈ 10 нм). Данная характеристика определяет эффективность регистрации излучения в области вакуумного ультрафиолета. Мертвый слой детектора не содержит традиционного слоя диоксида кремния и обеспечивает низкий уровень темнового тока. Благодаря такой структуре мертвого слоя, фотодиоды серии ФДУК-УВ обладают повышенной радиационной стойкостью в мягком рентгеновском диапазоне спектра. Кроме того они обладают высокой спектральной чувствительностью, которая к тому же является достаточно однородной, порядка 0,25 А/Вт в области энергий 40–10 000 эВ [4]. Спектральная характеристика детектора показана на рис. 2. В области небольших энергий наблюдаемые особенности спектральной характеристики обусловлены ненулевой толщиной «мертвого слоя». Спад чувствительности в области высоких энергий, связан с возрастанием проникающей способности излучения.

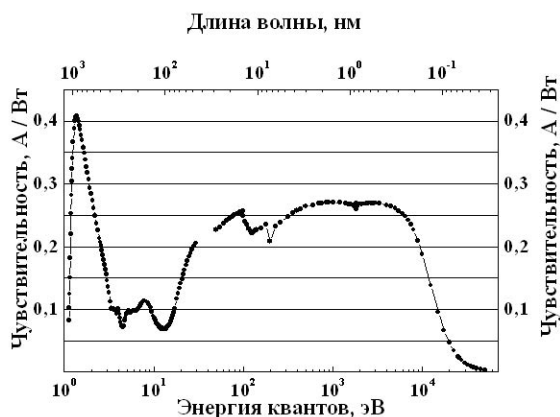


Рис. 2. Типовая спектральная характеристика фотодиодов ФДУК УВ

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 и однородность чувствительности в широком спектральном диапазоне [5, 6]. Отметим, что данный фотодиод обладает достаточно высокой чувствительностью 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.

Схема включения фотодиода

На рис. 3 изображена электрическая схема включения фотодиода в его основном режиме работы – с внешним обратным напряжением смещения. Напряжение питания фотодиода $U_{пит} = -47$ В, зарядное сопротивление конденсатора $R_3 = 100$ кОм, сопротивление нагрузки осциллографа $R_{н осц} = 75$ Ом. Для того чтобы рабочее напряжение на конденсаторе поддерживалось в процессе измерения, произведение $R_{н осц} \cdot C$ электрической цепи должно быть много больше длительности регистрируемого импульса ($R_{н осц} \cdot C \gg \tau_i$). Поскольку речь идет об импульсах длительностью нескольких десятков наносекунд, – оптимальное значение ёмкости зарядного конденсатора $C = 100$ нФ.

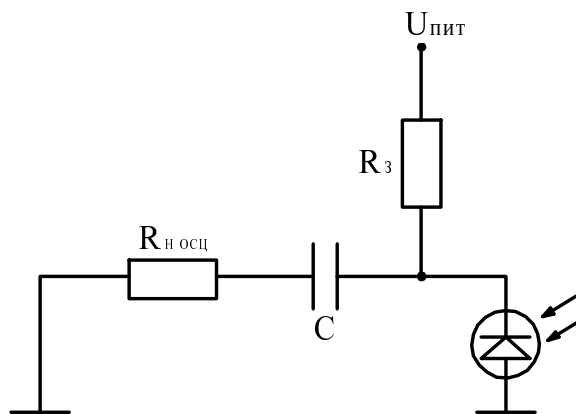


Рис. 3. Электрическая схема включения фотодиода: $R_{н осц}$ – нагрузочное сопротивление осциллографа, R_3 – зарядное сопротивление, C – конденсатор

Проверка фотодиода на линейность

Необходимо определить диапазон линейности отклика фотодиода практическим путем. На рис. 4 показана схема проведения такого эксперимента.

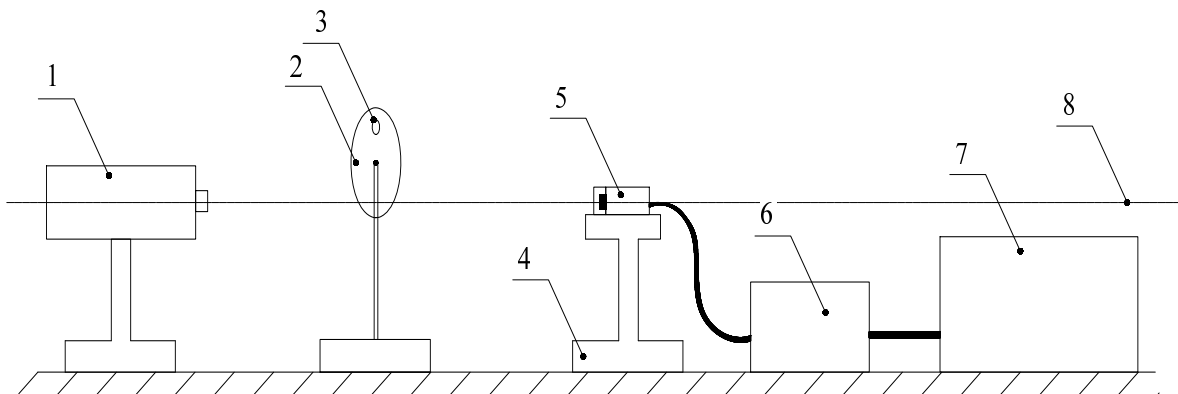


Рис. 4. Схема эксперимента для определения диапазона линейности фотодиода: 1 – лазер LCS-DTL-317, 2 – вращающийся диск, 3 – отверстие, 4 – подставка для фотодиода, 5 – фотодиод ФДУК-8УВС, 6 – блок питания, 7 – осциллограф TDS 3054, 8 – оптическая ось

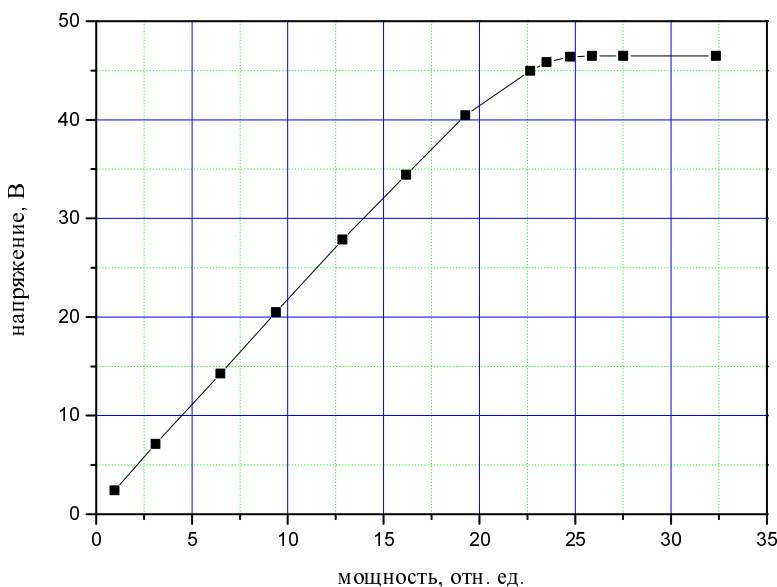


Рис. 5. Кривая зависимости снимаемой с фотодиода амплитуды импульса напряжения от относительной мощности оптического излучения падающего на фотодиод

В качестве источника оптического излучения использовался лазер LCS-DTL-317 *1* с максимальной генерируемой мощностью $W = 50$ мкВт и длиной волны $\lambda = 532$ нм. Данный тип лазера излучает только непрерывный пучок света, поэтому для того чтобы падающее на фотодиод оптическое излучение имело импульсный характер, использовался вращающийся диск *2* с отверстием *3* диаметром 5 мм. Фотодиод *5* находился на подставке *4*. Напряжение смещения составляет -47 В и обеспечивается блоком питания *6*, *8* – оптическая ось схемы эксперимента. Площадь падающего на фотодиод пучка немного превышала площадь активной области фотодиода. Меняя мощность выходного излучения на лазере, удалось получить зависимость амплитуды импульса

напряжения, снимаемого с фотодиода от относительной мощности оптического излучения, падающего на активную область фотодиода, рис. 5.

На графике видно, что фотодиод работает в линейном режиме вплоть до напряжения питания.

В ходе упомянутого выше эксперимента было отмечено, что при увеличении мощности оптического излучения лазера длительность импульса отклика фотодиода начинает увеличиваться, форма сигнала становится затянутой по времени. В связи с этим необходимо определить корректный режим работы фотодиода. А именно, понять какой по амплитуде сигнал напряжения можно снимать с фотодиода, чтобы при этом не искажалась форма сигнала, а также длительность импульса сигнала снимаемого с фотодиода не превышала длительность импульса ис-

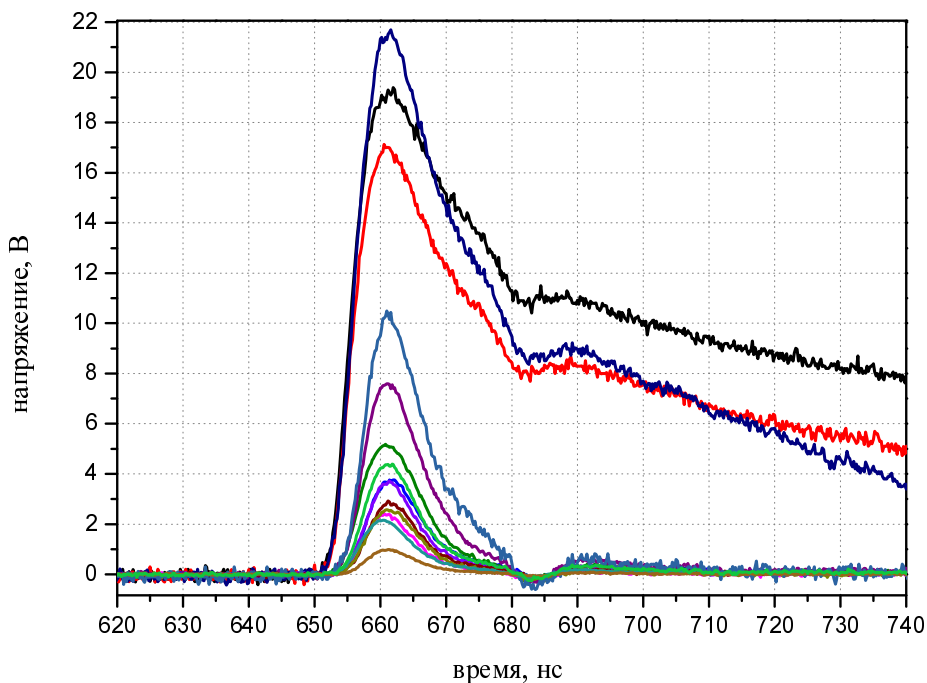


Рис. 6. Осциллограмма сигналов напряжения снимаемых с фотодиода ФДУК-8УВС

точника оптического излучения. Для этого необходим источник излучения, работающий в импульсном режиме. Такому требованию отвечает лазер LCS – DTL – 314 QT с максимальной энергией в импульсе 25 мкДж; длительностью импульса $\tau_i = 15$ нс при фронте нарастания 5–6 нс, длина волны излучения $\lambda = 532$ нм. Схема проведения эксперимента практически не отличалась, от той что изображена на рис. 4. Единственное изменение, это установка сменных нейтральных светофильтров на подставке вместо диска на ту же позицию. Данная опция требуется для возможности ослабления излучения, падающего на чувствительный элемент фотодиода. На рис. 6 приведена осциллограмма сигналов напряжения, снятых с фотодиода. Видно, что на отметке до 10 В длительность импульса сигналов не превышает 10–15 нс, а далее при увеличении падающего потока излучения на фотодиод, он начинает деградировать, форма сигнала и длительность импульса не сохраняются. Таким образом, мы определили рабочий диапазон линейности отклика сигнала снимаемого с фотодиода ФДУК-8УВС.

Конструкция полупроводникового детектора

Датчик на основе фотодиода ФДУК-8УВС собран на базе корпуса коаксиального разъема СР75-154ФВ. Анодный и катодный выводы фотодиода припаиваются к жиле и корпусу разъема соответственно. Особенностью конструкции датчика является защита чувствительного элемента от попадания на него оптического излучения и возможность использования датчика внутри вакуумируемого объема.

К достоинствам конструкции относится не только возможность простой установки и оперативной замены фильтров благодаря съемным оправкам, но и удобное присоединение датчиков к проходным вакуумным разъемам (рис. 7). В случае выхода из строя фотодиода мы легко можем заменить его, хотя данный факт является крайне редким. Проверять работоспособность фотодиода можно даже во время вакуумной откачки.

Полупроводниковый детектор является основным элементом в методики измерения амплитудно-временных параметров импульсов МРИ, и рассчитан на применение в модельных и взрывных экспериментах с источниками МРИ типа «Z-пинч» [1]. В экспериментах применяется трехканальный полупроводниковый детектор (рис. 7). Увеличение числа каналов регистрации позволяет получить больший объем информации.

Регистрация импульса МРИ полупроводниковыми детекторами

Отработка полупроводниковых датчиков МРИ проводилась на лабораторной установке, состоящей из 17 параллельно подключенных пятикаскадных генераторов Маркса. Выходное напряжение генераторов составляет 400 кВ, энергозапас – 40 кДж, ток разряда – 150 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

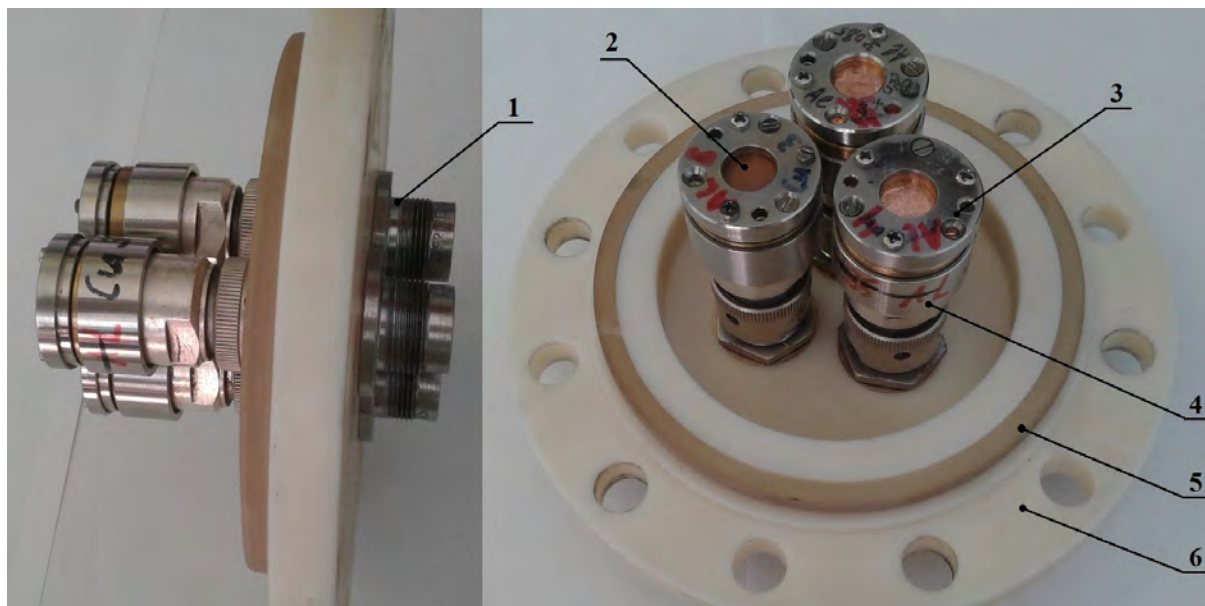


Рис. 7. Фото трехканального полупроводникового детектора: 1 – вакуумные разъемы СРГ–75–151ФВ, 2 – фильтры МРИ, 3 – оправки для фильтров; 4 – коаксиальный корпус полупроводникового детектора в разьеме СР75-154ФВ, 5 – уплотнительное кольцо, 6 – капролоновый фланец диагностического канала в вакуумной камере

обеспечивает ток ~ 2 МА при полном времени нарастания импульса 1,3 мкс [8].

На рис. 8 представлена схема регистрации разрабатываемой методики полупроводникового детектора.

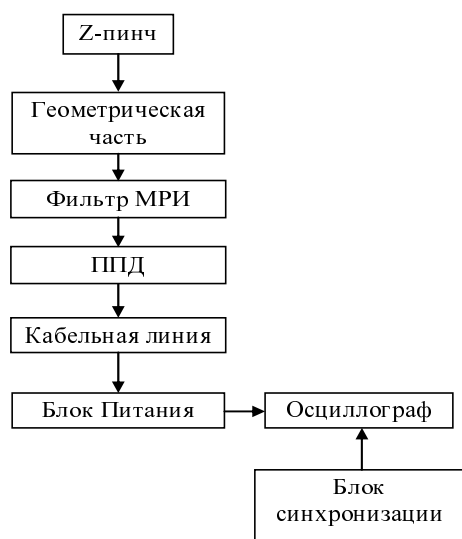


Рис. 8. Схема регистрации методики ППД.

Мощность используемого в настоящей работе источника мягкого рентгеновского излучения гораздо больше нескольких десятков ватт, которые способен корректно регистрировать детектор. Требуемый для регистрации уровень интенсивности излучения на детекторе можно обеспечить при помощи набора диафрагм, стальных или латунных сеток с известным

коэффициентом пропускания, длины диагностического канала и подбором 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. 9 показаны кривые пропускания алюминиевого, серебряного и медного фильтров в зависимости от энергии квантов.

В экспериментах использовалась лайнерная система, состоящая из 45 вольфрамовых проволочек диаметром 11 мкм, равномерно распределенных по образующей цилиндра диаметром 60 мм с высотой 31 мм [8].

Проведена серия из нескольких экспериментов, в которой осуществлялся контроль амплитудно-временных параметров импульса тока в подводящей линии нагрузочного узла индукционными датчиками. На рис. 10 приведена характерная осциллограмма импульса тока. Разработанные полупроводниковые детекторы использовались для регистрации формы импульса МРИ Z-пинча в различных спектральных диапазонах. Осциллограммы импульса МРИ, зарегистрированные полупроводниковыми датчиками также представлены на рис. 7. Наибольший по амплитуде сигнал напряжения, зарегистрирован датчиком, расположенным за алюминиевым фильтром толщиной 16 мкм (8 слоёв толщиной по 2 мкм), амплитуда составила 8,5 В, полуширина импульса МРИ – 104 нс, при времени нарастания по уровню 0,1...0,9 – 86 нс. С датчика, фильтрованного серебром толщиной 3 мкм (10 слоёв по 0,3 мкм), зарегистрирован импульс МРИ амплитудой 6,2 В

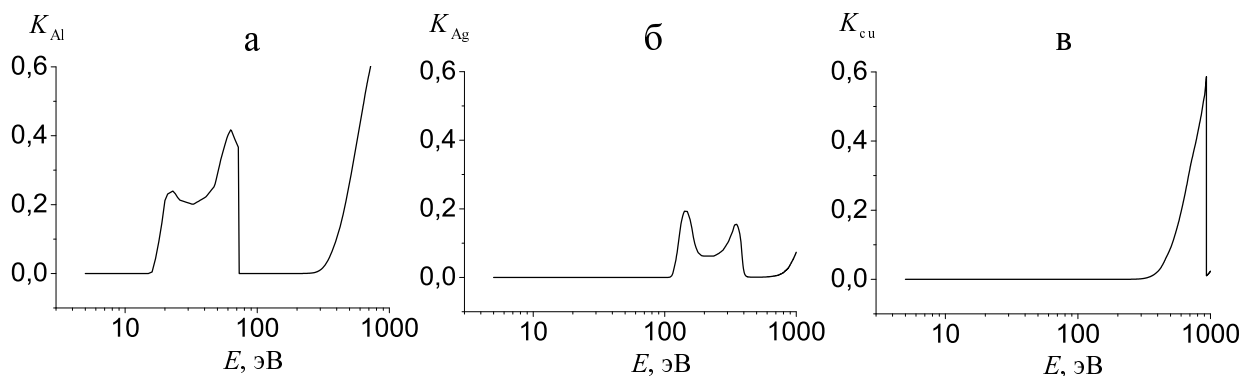


Рис. 9. Спектральный коэффициент пропускания фильтров МРИ: а – Al толщина 0,6 мкм, б – Ag – 0,3 мкм, в – Cu – 0,5 мкм [7]

с длительностью на полувысоте 103 нс, фронт – 92 нс. Минимальный по амплитуде сигнал 2,6 В, зарегистрирован датчиком, фильтрованным медью: длительность импульса составляет 111 нс, фронт – 89 нс. Регистрируемая величина длительностей сигналов за разными фильтрами свидетельствуют о динамике плазмообразования, имплозии и излучения лайнерной плазмы, характерных для формирования динамических Z-пинчей [9].

Имплозия лайнера приводит 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 данном эксперименте составляет ~1270 нс. Максимум рентгеновского излучения наблюдается в момент характерного спада на осциллограмме токового импульса, обусловленного резким увеличением индуктивности нагрузки в момент пинчевания (см. рис. 10, 11). Видно, что форма всех сигналов, зарегистрированных полупроводниковыми детекторами, имеет один выраженный пик. Начало импульса рентгеновского излучения и положение максимумов сигналов за разными фильтрами с достаточно высокой точностью совпадают друг с другом и расходятся по времени в пределах 4–6 нс.

В экспериментах были задействованы и другие методики регистрации амплитудно-временных параметров импульса МРИ лайнерной плазмы. Интегральная по спектру энергия импульса МРИ, измеренная проволочными болометрами в этом эксперименте составила от 50 до 60 кДж. Сигналы, полученные с датчиков ВРД (вакуумных рентгеновских диодов) и СД (сцинтилляционного детектора) схожи по форме с сигналами, полученными с помощью методики полупроводникового детектора (рис. 11). Имеющиеся небольшие отличия сигналов разных методик по положению начала и максимумов сигналов могут быть обусловлены различными зонами видимости детекторов и разными фильтрами.

Анализ совокупности данных со всех детекторов позволяет утверждать, что методика полупроводникового детектора регистрирует амплитудно-

временные параметры импульса МРИ Z-пинча в различных спектральных диапазонах. Для получения абсолютных значений мощности выходного излучения плазмы Z-пинча необходимо произвести расчет параметров МРИ, полученных полупроводниковыми детекторами с учетом спектральной характеристики используемых фотодиодов [3]. Также, необходимо учесть геометрическую часть постановки эксперимента, коэффициент пропускания рентгеновских фильтров в зависимости от энергии квантов. Кроме того, требуется значительно больший объем информации об энергетических и спектральных параметрах Z-пинча и динамики плазмообразования. Проведенные эксперименты показывают, что настоящая методика ППД может применяться совместно с другими методиками измерения параметров МРИ.

Заключение

Исследован рабочий диапазон линейности отклика фотодиода ФДУК–8УВС, при котором сохраняются форма и длительность импульса, а именно, напряжение, которое можно снимать с фотодиода, не должно превышать 10 В.

Предложена и отработана компактная и рациональная конструкция полупроводникового детектора, главным элементом которого является кремниевый фотодиод ФДУК–8УВС. Конструкция детектора позволяет увеличить число датчиков разрабатываемой методики ППД в диагностическом канале до трех штук, тем самым увеличивая объем снимаемой информации.

Экспериментально доказана работоспособность полупроводниковой методики, которая позволяет регистрировать амплитудно-временные параметры импульса МРИ Z-пинча. Неотъемлемой частью методики являются свободновисящие фильтры МРИ, позволяющие не только отсекают оптическое излучение, но и выделять определенный спектральный промежуток. Методика ППД успешно реализуется в экспериментах с взрывомагнитными генераторами ВМГ-200, ДВМГ-240.

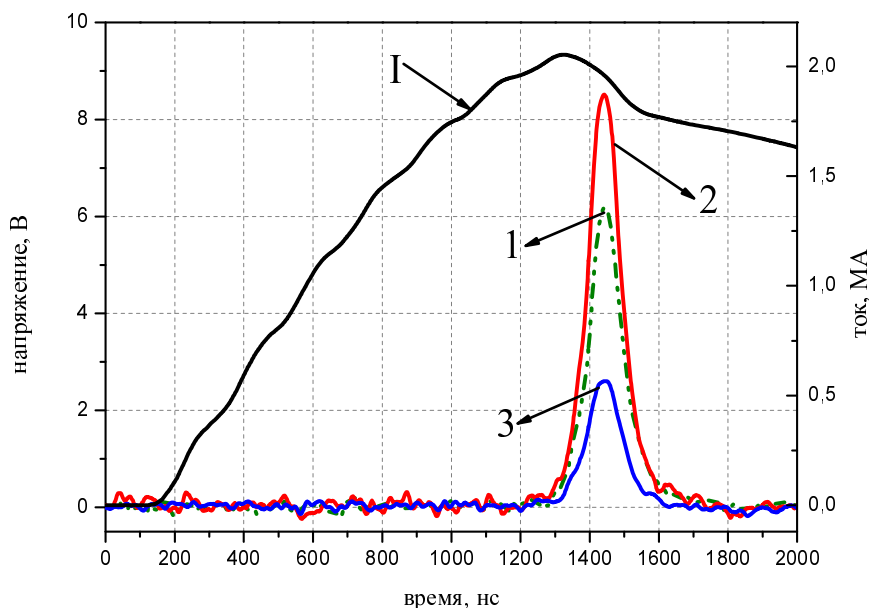


Рис. 10. Осциллограммы импульса МРИ и тока в лайнере : 1 – сигнал с датчика, расположенного за серебряным фильтром, 2 – за алюминиевым; 3 – за медным, I – ток в лайнере

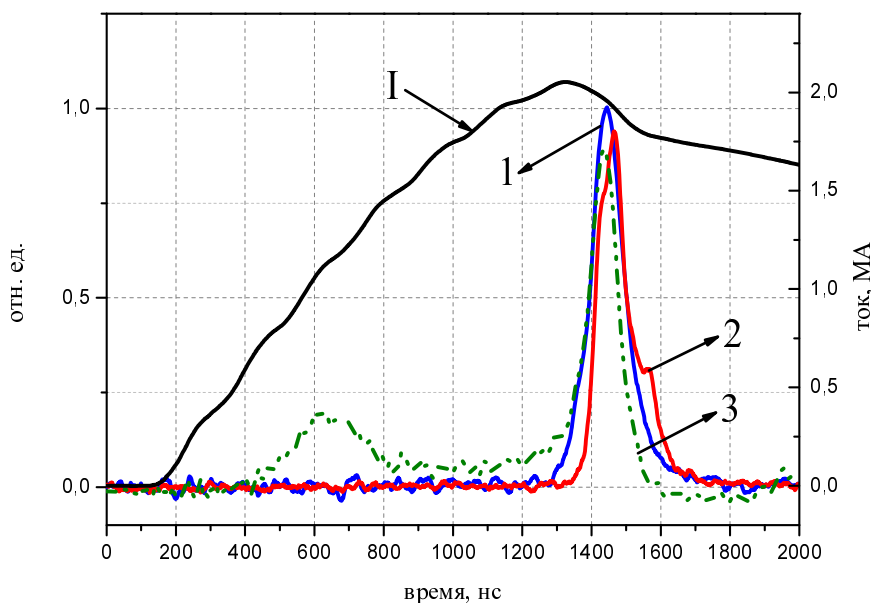


Рис. 11. Осциллограммы импульса МРИ и тока в лайнере: 1, 2 – сигналы с датчиков ППД и СД соответственно, расположенных за серебряными фильтрами, 3 – сигнал с ВРД за алюминиевым фильтром, I – ток в лайнере

Полупроводниковые датчики удобны в эксплуатации, достаточно просты и дешевы в изготовлении.

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 взрывамагнитных генераторов // Физика плазмы, 2007. № 5, 33. С. 424–434.

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

3. Голубев А. В., Сорокин А. А., Пивинский Е. Г. и др. // Измерение спектрально-временных характеристик кремниевых p-i-n 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, ismtii411.

5. Artyomov A. P., Baksht E. N., Tarasenko V. F. et al. // Temporal Response of Silicon EUV and Soft X-ray Detectors. Instruments and Experimental Technics, 2015. Vol. 58, No. 1, pp. 102–106.

6. Н.К. Миронов, А.В. Грунин, С.А. Лазарев и др. // Исследование динамики выхода тормозного излучения установки «ГАММА-4» // XVIII Харитоновские тематические научные чтения, 2016. С. 233–234.

7. B.L. Henke, 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 слаботочного предимпульса тока на имплозию многопроволочных лайнеров // Сборник докладов 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.