

**РАДИОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРОТКОЖИВУЩИХ  
ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР**

<sup>1</sup>Русских А.Г., <sup>1</sup>Жигалин А.С., <sup>1</sup>Артёмов А.П., <sup>1</sup>Федюнин А.В., <sup>1</sup>Орешкин В.И.,  
<sup>2</sup>Чайковский С.А., <sup>3</sup>Валько Н.Г.

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,  
г. Томск, Россия, E-mail: russ@ovpe2.hcei.tsc.ru

<sup>2</sup>Институт электрофизики УО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия, E-mail: stas-chaikovsky@yandex.ru

<sup>3</sup>Гродненский государственный университет,  
г. Гродно, Беларусь, E-mail: n.valko@grsu.by

**Введение**

Понятие «короткоживущие плазменные структуры» объединяет собой целый ряд разнообразных физических процессов, таких как взрыв проводников, взрывное испарение вещества с поверхности электродов, инжекция плазменных струй и многое другое связанных с быстрым движением вещества. Для исследования структуры быстро изменяющихся во времени объектов, начиная с 1982 года в Физическом институте им. Лебедева (г. Москва) начали использовать вспышку рентгеновского излучения X-пинча [1], источник которого имеет малый размер и длительность свечения. Долгое время такой тип нагрузки был реализован на генераторах имеющих значительные габариты [2–5], которые не позволяли использовать их в различных лабораториях из-за их не транспортабельности. Начиная с 2008 г, в ИСЭ СО РАН начали развивать радиографическую диагностику на базе малогабаритных, но достаточно мощных генераторов XPG, нагрузкой которых также являлся X-пинч [6]. Такой тип генераторов имеет габариты 40x40x30 см<sup>3</sup> и допускает транспортировку, а следовательно существенно расширяет возможности экспериментаторов. Начиная с 2010 года, в рентгеновских радиографах, наряду с нагрузкой в виде X-пинча, в ИСЭ СО РАН начали использовать точечный рентгеновский источник на основе миниатюрной плазменной струи. Такой тип нагрузок получил название PointZ-pinch (PZ-пинч) [7]. PZ-пинч обеспечивает вспышку рентгеновского излучения по длительности аналогичную X-пинчу, размерами лишь незначительно превышающими размеры вспышки X-пинча, но имеющий явное преимущество: многократность использования без вскрытия вакуумной камеры.

**Малогабаритный рентгеновский радиограф на основе X-пинча**

X-пинч, представляет собой обычно 4 тонких проводника диаметром 10 – 30 мкм, скрещенных между собой в форме буквы “X” [2]. При пропускании по X-пинчу импульса тока с амплитудой  $I_m$  (150–300 кА) и временем нарастания  $t$ , для которого выполняется условие  $I_m/t > 1$  кА/нс [3], в области перекрестия проволочек образуется источник мягкого рентгеновского излучения размером в несколько микрон (в диапазоне энергии квантов 1-5 кэВ), а его длительность обычно не превышает 1 нс. Благодаря таким свойствам источник излучения на основе X-пинча может использоваться для рентгеновского зондирования с микронным пространственным и наносекундным временным разрешением. В Институте сильноточной электроники СО РАН разработаны малогабаритные импульсные генераторы с амплитудой импульса тока 200–300 кА и временем его нарастания 180–240 нс [8]. Особенностью конструкции данных генераторов является использование компактных низкоиндуктивных конденсаторно\_коммутаторных сборок [9]. На этих генераторах в экспериментах с X-пинчами продемонстрирован источник мягкого рентгеновского излучения размером порядка 3-10 мкм при длительности импульса не более 2 нс в спектральном диапазоне энергий квантов  $h\nu = 1 - 4$  кэВ [10].

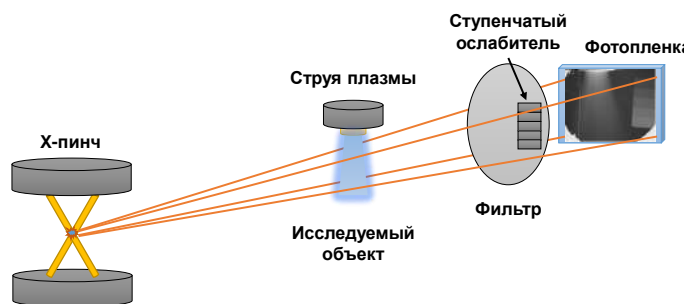


Рисунок 1 – Типичная схема регистрации изображения исследуемого объекта

Как показано на рисунке 1, теневое изображение исследуемого объекта регистрировалось на фотопленку (Микрат или РФ-3). Для того, чтобы получить не только качественное представление о структуре исследуемого объекта, но и количественно оценить плотность вещества, между исследуемым объектом и фотопленкой располагают фильтр с напыленным

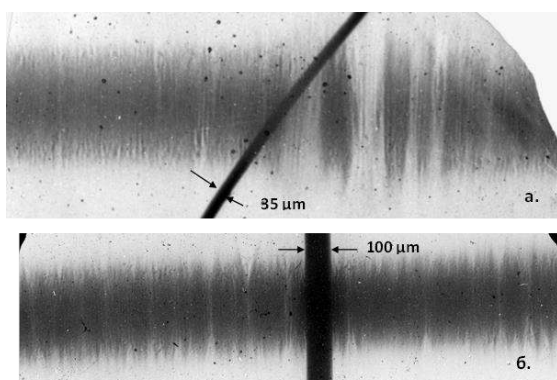


Рисунок 2 – Изображения взрывающегося алюминиевого проводника. а-начальный диаметр 35 мкм, б-начальный диаметр 50 мкм

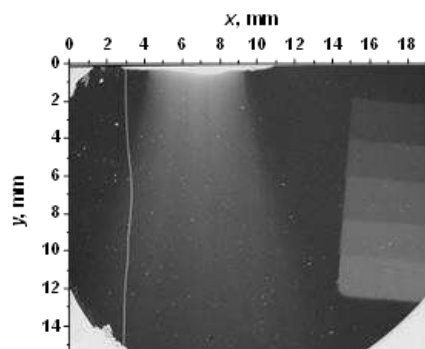


Рисунок 3 – Изображение висмутовой плазменной струи формирующейся в вакуумном дуговом разряде. Справа изображение ступенчатого ослабителя

ступенчатым ослабителем, состоящим из того же вещества, что и исследуемый объект. Если излучение радиографа, проходя через разные объекты, проходит через одинаковое количество вещества, приходящегося на единицу площади, то степень почернения фотопленки будет одинаковой. Таким образом, сравнивая плотность почернения фотопленки в области исследуемого объекта и в области ступенчатого ослабителя, при этом зная толщину ступенчатого ослабителя, можно оценить линейную плотность и погонную массу исследуемого объекта. Такая диагностика успешно применяется для исследования быстроразвивающихся физических процессов, таких как взрыв проводников, фольг или плазменных струй вакуумных дуговых разрядов [3-5, 11, 12]. Примеры таких изображений приведены на рисунках 2 и 3.

### Малогабаритный рентгеновский радиограф на основе PZ-пинча

При использовании миниатюрной струи плазмы вместо скрещенных проводников X-пинча, при величине межэлектродного зазора 1.3–1.5 мм также формируется единичный источник излучения. Размер излучающей области PZ-пинча в диапазоне энергий квантов от 1.5 до 3 кэВ составляет  $13 \pm 2$  мкм в диаметре и  $24 \pm 2$  мкм в высоту для плазменной струи из алюминия,  $7 \pm 2$  мкм в диаметре и  $17 \pm 2$  мкм в высоту для плазменной струи из олова. Длительность вспышки рентгеновского излучения составляет 2–3 нс. Полный за импульс выход излучения в спектральном диапазоне 1.56–1.9 кэВ достигает 50 мДж в полный телесный угол. С точки зрения импульсной радиографии, в мягком рентгеновском диапазоне спектра применение PZ-пинча хотя и уступает X-пинчу в пространственным разрешении, имеет два существенных преимущества. Первое: энергия квантов излучения PZ-пинча лежит в диапазоне до 3 кэВ, и плазма не излучает в более жесткой области спектра. Это способствует более высокой контрастности изображений. Второе: отсутствует как необходимость в разборке вакуумной камеры после каждого срабатывания, так и необходимость трудоемкой процедуры установки нагрузки из микропроводников.

Ресурс работы дугового разряда составляет около 50 срабатываний без переборки. После шлифовки торцевой части катода устройство снова готово к работе. Разработанный метод позволяет проводить радиографические исследования объектов толщиной 10–1000 мкм с пространственным разрешением 10–20 мкм при временном разрешении 2–3 нс.

Работа поддержана Российским научным фондом грант № 16-19-10142.

**Список литературы:**

1. Захаров С.М., Иваненков Г.В., Коломенский А.А. и др. // Письма в ЖТФ, 1982. – 8(9), 1060 с.
2. Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Douglass J.D. et al., // IEEE Trans. PlasmaSci., 2006. – V.34, P.2336.
3. Pikuz S.A., Sinars D.B., Shelkovenko T.A. et al. // Phys. Rev. Lett., 2002. – V.89, P.035003.
4. Alexandrov V.V., Frolov I.N., Fedulov M.V. et al. // IEEE Trans. PlasmaSci., 2002. – V.30, №2, P.559.
5. Douglass J.D., Hammer D.A. // Rev. Sci. Instrum., 2008. – V.79, P.033503.
6. Rousskikh A.G., Oreshkin V.I., Chaikovsky S.A. et al. // Phys. of Plasmas, 2008. – V.15, 102706.
7. Русских А.Г., Шишлов А.В., Жигалин А.С., и др., // ЖТФ, 2010. – том 80, вып. 11.
8. Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Эрфорт А.А. и др. // Изв. вузов. Физика, 2007. – № 50, с.87.
9. Жарова Н.В., Ратахин Н.А., Саушкин А.В. и др. // ПТЭ, 2006. – № 3, с.141.
10. Артёмов А.П., Лабецкая Н.А., Федюнин А.В. и др. // Краткие сообщения по физике. М.: ФИАН, 2010. – № 6. с. 31.
11. Rousskikh A.G., Oreshkin V.I., Chaikovsky S.A. et al. // Physics of Plasmas, 2008. – V.15, P.102706.
12. Oreshkin V.I., Rousskikh A.G., Chaikovsky S.A., Oreshkin E.V. // Physics of Plasmas, 2010. – V.17, P.072703.