

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ КОМПАКТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАДИОГРАФА НА ОСНОВЕ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

А.С. Жигалин<sup>1)</sup>, А.Г. Русских<sup>2)</sup>, А.П. Артемов<sup>3)</sup>, А.В. Федюнин<sup>4)</sup>, В.И. Орешкин<sup>5)</sup>  
<sup>1-5)</sup> ИСЭ СО РАН, пр. Академический 2/3, Томск, Россия

<sup>1)</sup>zhigalin@ovpe2.hcei.tsc.ru, <sup>2)</sup>russ@ovpe2.hcei.tsc.ru, <sup>3)</sup>aap545@gmail.com,  
<sup>4)</sup>fed@ovpe2.hcei.tsc.ru, <sup>5)</sup>oreshkin@ovpe.hcei.tsc.ru

В работе приводятся результаты экспериментов по созданию плазменного источника излучения с малыми пространственными размерами для импульсной радиографии в мягком рентгеновском диапазоне спектра. Излучающая горячая плазма создавалась при сжатии плазменной струи импульсом тока с амплитудой до  $I_m = 250$  кА и временем нарастания  $T_{\text{фр}} = 200$  нс. Плазменная струя формировалась с помощью импульсного вакуумного дугового разряда плазменной пушки. Для питания вакуумной дуги, формирующей плазменную струю, использовали конденсатор ИК-50-0.25 (разработка ИСЭ СО РАН). Максимум тока дуги составил 35 кА, время нарастания тока 300 нс. Эксперименты проводились с плазменными струями из олова, магния и висмута. Диаметр катода вакуумной дуги составлял 4 мм. При межэлектродном зазоре сильноточного генератора 1.5 мм посередине зазора формировался единичный источник излучения – точечный z-пинч (PZ-пинч). Для струи из олова диаметр излучающей области составлял  $11.5 \pm 3$  мкм, а ее высота  $24 \pm 5$  мкм. Длительность импульса излучения на полувысоте составляла  $2.2 \pm 0.2$  нс. Разработанный метод позволяет проводить радиографические исследования микрообъектов (в том числе, биологических) с пространственным разрешением 10 - 20 мкм и временным разрешением 2 - 3 нс.

### Введение

Проведение физического эксперимента напрямую связано с использованием различного вида диагностик. Одним из важнейших видов диагностики является рентгеновская радиография. Разработки и методы радиографии, описанные в работах [1-6], основаны на использовании источника излучения типа X-пинч. Данный тип нагрузок сильноточных импульсных генераторов тока, представляет собой две или более тонкие проволоочки, скрещенные между собой в форме буквы "X". При пропускании по X-пинчу импульса тока в области перекрестия проволоочек образуется источник мягкого рентгеновского излучения размером несколько мкм и длительностью импульса 1 – 2 нс. Благодаря таким свойствам источник излучения на основе X-пинча может использоваться для рентгеновского зондирования с микронным пространственным и наносекундным временным разрешением. Такая диагностика успешно применяется для исследования быстротекающих процессов, таких как взрыв микропроводников и тонких металлических фольг вакууме.

В ИСЭ СО РАН разработаны компактные сильноточные генераторы с амплитудой импульса тока 200 – 300 кА и временем нарастания 150 – 200 нс [7]. На базе данных генераторов тока было создано несколько модификаций рентгеновских радиографов отличающихся конструкцией излучающей нагрузки. Нагрузками могут быть как традиционные X-пинчи так и PZ-пинчи. Небольшие габариты и вес рентгеновского радиографа существенно расширяет сферу его применения. Возможность транспортировать небольшой генератор и использовать его совместно с другими устройствами открывает возможность проведения целого ряда новых экспериментов по исследованию быстротекающих процессов.

Несмотря на очевидные сильные стороны рентгеновского радиографа, основанного на использовании X-пинча, у него существуют и некоторые недостатки, связанные с трудоемкостью установки нагрузки из микропроводников и необ-

ходимостью перед каждым "выстрелом" вскрывать вакуумную камеру сильноточного генератора. В связи с этим, нами был разработан источник рентгеновского излучения, который может быть использован многократно, без вскрытия вакуумной камеры сильноточного генератора. В разработанном источнике импульсного рентгеновского излучения использован принцип Z-пинча: излучающая горячая плазма создается при сжатии плазменной струи силой Лоренца, возникающей при протекании тока. Для формирования струи использовалась плазменная пушка на основе вакуумного дугового разряда (ВДР), инициируемого пробоем по поверхности диэлектрика в вакууме.

### Экспериментальная установка и схема эксперимента

Источник импульсного рентгеновского излучения PZ - пинч был создан на основе малогабаритного генератора XPG, аналогичного тому, который использовался в [8], состоящего из 4-х конденсаторно - коммутаторных сборок емкостью 250 нФ каждая (разработка ИСЭ СО РАН). Конденсаторы соединены параллельно и, таким образом, общая емкость конденсаторной батареи составляет 1 мкФ. Импульс тока имел амплитуду до 250 кА с фронтом 200 нс при зарядном напряжении 43 кВ. Этот импульс использовался для сжатия плазменной струи, поступающей в межэлектродный промежуток «А-В» через отверстие в заземленном электроде (рис. 1). Для питания вакуумной дуги, формирующей струю плазмы, использовался конденсатор ИК-50-0.25 (разработка ИСЭ СО РАН). Максимум тока дуги составил 35 кА, время нарастания тока 300 нс. Напряжение зарядки 43 кВ. Синхронизация сильноточного генератора XPG и плазменной пушки осуществлялась с помощью внешнего генератора запускающих импульсов ГЗИ-6 (разработка ИСЭ СО РАН).

При зажигании дугового разряда в зазор сильноточного генератора инжектировалась плазмен-

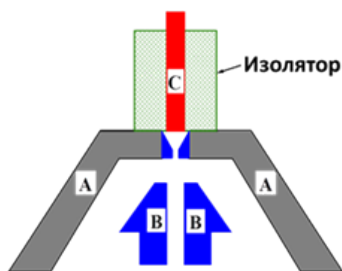


Рис. 1 Принципиальная схема инъекции плазменной струи дугового разряда. С - высоковольтный электрод дугового разряда; В - высоковольтный электрод сильноточного генератора (катод); А – заземленный электрод, являющийся анодом как для дугового разряда, так и для сильноточного генератора XPG

ная струя с массой, достаточной для того, чтобы сжатие произошло вблизи максимума тока генератора. Работа такого устройства проиллюстрирована на рисунке 1. ВДР загорается между высоковольтным электродом «С», который является катодом, и электродом «А». При возникновении в цепи ВДР тока, на поверхности катода возникают катодные пятна, испаряющее и ионизирующее материал катода [9]. Плазменная струя, проходя через отверстие в аноде «А» (0.5 - 1 мм), попадает в межэлектродный зазор сильноточного генератора «А-В» (1.5 мм). После того, как в межэлектродном зазоре сильноточного генератора «А-В» создается плазменный столб с необходимой для эффективного сжатия погонной массой, на электрод «В» подается импульс напряжения сильноточного генератора XPG. Ток, протекающий по изначально ионизованным парам металла, создает силу Лоренца, которая сжимает образующийся столб плазмы, а развитие плазменной неустойчивости типа «перетяжка» обеспечивает образование горячей точки [10], являющейся источником мягкого рентгеновского излучения.

Для того чтобы на длине пинча развивалась только одна такая перетяжка, высота межэлектродного зазора «А-В» должна быть минимальной. Минимальная высота межэлектродного зазора «А-В» определяется минимальным расстоянием, на котором плазма, образуемая на электродах, не успевает закоротить межэлектродный промежуток за время, необходимое для сжатия такого пинча. Кроме того, желательно, чтобы плазма в зазоре состояла только из паров катода ВДР. Для того чтобы в зазор «А-В» поступало минимальное количество вещества испаренного с высоковольтного электрода «В» и земляного электрода «А», в данные электроды были впрессованы молибденовые вставки.

Диаметр катода плазменной пушки «С» составлял 4 мм. Использовались катоды из олова, магния и висмута. В качестве изолятора использовалась высокотемпературная керамика устойчивая к ударным нагрузкам.

### Диагностика

Регистрация тока сильноточного генератора осуществлялась с помощью пояса Роговского. Полупроводниковый алмазный детектор (PCD), расположенный за фильтром из 8 мкм алюминия,

использовался для регистрации временных характеристик излучения пинча. Алюминиевый фильтр использовался для отсека ультрафиолетового излучения.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы импульса тока и сигнала PCD, полученные в эксперименте с оловянным PZ-пинчем.

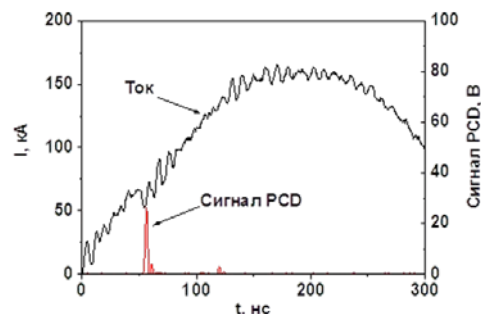


Рис. 2 Типичные осциллограммы импульсов тока и рентгеновского излучения, полученные в экспериментах с оловянным PZ-пинчем

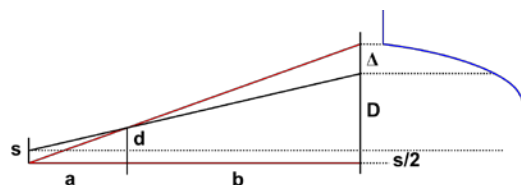


Рис. 3. Схема расчета размера источника по уширению края изображения проволоочки, где  $d$  – диаметр проволоочки,  $a$  – расстояние от источника до проволоочки,  $b$  – расстояние от проволоочки до пленки,  $D$  – идеальное изображение от точечного источника,  $m$  – коэффициент увеличения,  $\Delta$  – уширение края изображения,  $s$  – размер источника

Изображения тестового объекта регистрировались на пленку Микрат-ОРТО в спектральном диапазоне  $h\nu = 0.8-1.55$  кэВ. Данный спектральный диапазон обусловлен окном пропускания фильтра из алюминиевой фольги толщиной 8 мкм и чувствительностью фотопленки. В спектральной области  $h\nu > 2.7$  кэВ, где данный фильтр открывается по уровню 0.1, интенсивность источника излучения PZ-пинча значительно падает.

Размер точечного источника излучения оценивался по размерам области полутени изображения тестового объекта (рис. 3). В качестве тестового объекта использовалась вольфрамовая сетка из проводников диаметром 30 мкм. Как показано на рис. 3, размер области полутени зависит от размера источника и коэффициента увеличения. Коэффициент увеличения в данной схеме составлял  $\approx 11$ . Размер источника определялся по формуле:

$$s = \frac{2 \cdot \Delta \cdot a}{b}$$

### Результаты эксперимента

В таблице 1 приведены данные по разбросу момента генерации излучения  $t_{var}$  относительно начала протекания тока генератора XPG, а также амплитуды  $U_{pcd}$  и значения ширины импульса сигналов PCD измеренные на полувысоте  $t_{pcd}$ .

Таблица 1. Параметры импульса мягкого рентгеновского излучения для исследуемых материалов катодов

Материал	$t_{var}$ , нс	$U_{PCD}$ , В	$t_{pod}$ , нс
Олово	1.8	22±7.5	2.2±0.2
Магний	2.0	15±6.3	2.4±0.2
Висмут	3.7	10.5±9.2	2.3±0.2

Импульс излучения генерировался для всех материалов в первой половине фронта импульса тока. Длительность импульса излучения (ширина на полувысоте сигнала PCD) не зависит от материала катода вакуумной дуги (таблица 1). В тоже время из таблицы видно, что наименьшим разбросом момента генерации рентгеновского излучения относительно начала тока генератора XPG обладают PZ-пинчи на основе олова и магния. А наибольший выход излучения наблюдался для оловянного PZ-пинча.

В таблице 2 приведены результаты измерения размеров источника излучения для исследуемых материалов. Источник мягкого рентгеновского излучения представляет собой микроперетяжку цилиндрической формы, аналогичную тем, что наблюдаются в классических Z-пинчах, поэтому в качестве размеров источника указаны диаметр и высота. Высота – это размер вдоль оси PZ-пинча.

Таблица 2. Размеры источника мягкого рентгеновского излучения PZ-пинча для олова, магния и висмута

Материал	Диаметр, мкм	Высота, мкм
Олово	11.5±3	24±5
Магний	12±6	23±7
Висмут	11.7±2	23.3±3

Из таблицы видно, что размеры источника не зависят от материала катода вакуумной дуги. В тоже время как показано в таблице 1 от материала катода зависит интенсивность импульса излучения, а также стабильность воспроизведения параметров источника излучения от выстрела к выстрелу. С этой точки зрения наилучшим образом себя показали оловянные катоды. Наибольшее количество выстрелов для одного катода без переборки плазменной пушки было получено при работе с оловом. В тоже время катод из олова наиболее прост в изготовлении по сравнению с катодами из магния и висмута.

### Заключение

Проведенные эксперименты по разработке плазменного источника мягкого рентгеновского

излучения на основе дугового разряда и малогабаритного высокопоточного генератора XPG, показали, что данная установка может успешно использоваться для импульсной радиографии.

Продемонстрировано, что при использовании в качестве нагрузки дугового разряда получен единственный источник мягкого рентгеновского излучения субмикронных размеров. Эксперименты показали, что размер источника практически не зависит от материала катода вакуумной дуги, при этом максимальную интенсивность излучения показали катоды из олова. Размер источника при использовании оловянного катода составил 11.5±3 мкм в диаметре и 24±5 мкм в высоту при длительности импульса излучения 2.2±0.2 нс.

Главным преимуществом PZ-пинча по сравнению с X-пинчем является отсутствие необходимости переборки узла нагрузки после каждого “выстрела”. Ресурс работы PZ-пинча без переборки составляет 50 выстрелов. Данный метод позволяет проводить радиографические исследования микрообъектов (в том числе, биологических) с пространственным разрешением 10-20 мкм и временным разрешением 2-3 нс. Относительно не большие размеры и вес высокопоточного генератора XPG позволяют транспортировать его к месту проведения экспериментов и состыковывать с другими установками.

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

### Список литературы

1. Pikuz S.A., Sinars D.B., Shelkovenko T.A., et al. // JETP Letters. 2002. V. 76. № 8. P. 490–494.
2. Sinars D.B., Shelkovenko T.A., Pikuz S.A. et al. // Phys. Plasmas 2000. V. 7. P. 429.
3. Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Sinars D.B., and Hammer D.A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. V. 33. № 2.
4. Shelkovenko T.A., Sinars D.B., Pikuz S.A., and Hammer D.A. // Physics of Plasmas. 2001. V. 8. № 4.
5. Shelkovenko T.A. and Pikuz S.A., Song B.M. et al. // Physics of Plasmas. 2005. V. 12. 033102.
6. Захаров С.М., Иваненков Г.В., Коломенский А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. С. 1060.
7. Ratahin N.A., Fedushchak V.F., Erfort A.A. et al. // Russ. Phys. J. 2007. V. 50. P. 193.
8. Месяц Г.А., Шелковенко Т.А., Иваненков Г.В. и др. // ЖЭТФ. 2010. № 138. С. 411.
9. Baksht R.B.; Kablambaev B.A.; Razdobarin G.T.; Ratakhin N.A. // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki 1979. V. 49. P. 1245–1247.
10. Koshelev K.N., Pereira N.R. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. № 10. P. 21–44.

## SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS OF COMPACT X-RAY RADIOGRAPH BASED ON VACUUM ARC DISCHARGE

A.S. Zhigalin<sup>1</sup>), A.G. Rousskikh<sup>2</sup>), A.P. Artyomov<sup>3</sup>), A.V. Fedunin<sup>4</sup>), V.I. Oreshkin<sup>5</sup>)

<sup>1-5</sup>) *Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademicheskoy ave., Tomsk, Russia,*

<sup>1</sup>) *zhigalin@ovpe2.hcei.tsc.ru,* <sup>2</sup>) *russ@ovpe2.hcei.tsc.ru,* <sup>3</sup>) *aap545@gmail.com,*

<sup>4</sup>) *fed@ovpe2.hcei.tsc.ru,* <sup>5</sup>) *oreshkin@ovpe.hcei.tsc.ru*

The paper presents the experimental investigation of a plasma radiation source with small spatial dimensions (a Point Z-pinch) for pulsed radiography in the soft X-ray spectral range. Radiating hot plasma is a result of a plasma jet implosion. To implode plasma jet we used a current pulse with amplitude  $I_m = 250$  kA and rise time  $T_r = 200$  ns. The arc current amplitude was 35 kA. The arc current rise time was 300 ns. The experiments have been performed with tin, magnesium and bismuth plasma jets. The vacuum arc cathode diameter was 4 mm. A single radiation source was formed into an high-current generator interelectrode gap of 1.5 mm. When a tin plasma jet was used, the diameter of the radiating region was  $11.5 \pm 3$   $\mu$ m, and its height was  $24 \pm 5$   $\mu$ m. The x-ray pulse FWHM was  $2.2 \pm 0.2$  ns. The developed method makes it possible to conduct radiographic studies of microobjects (including biological) with a spatial resolution of 10-20  $\mu$ m and a temporal resolution of 2 - 3 ns.