

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.9.08

ДВУХКАДРОВАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА
НА ОСНОВЕ X-ПИНЧЕЙ

© 2013 г. А. П. Артёмов, А. В. Федюнин, С. А. Чайковский, А. С. Жигалин,
В. И. Орешкин, Н. А. Ратахин, А. Г. Русских

*Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 17.02.2012 г.

Описана работа двухкадровой системы импульсного зондирования в мягком рентгеновском диапазоне спектра на основе X-пинчей и двух компактных сильноточных импульсных генераторов. Система позволяет получать два теневых рентгеновских снимка с микронным пространственным разрешением при длительности экспозиции 2–3 нс и с задержкой, варьируемой в широких пределах. С помощью двухкадровой системы проведена теневая съемка электрического взрыва одиночных алюминиевых проводников. Диапазон спектра зондирующего источника составлял $h\nu > 0.8$ кэВ. Разброс по времени между импульсами излучения не более ± 18 нс.

DOI: 10.7868/S0032816213010023

ВВЕДЕНИЕ

Одним из типов нагрузки сильноточных импульсных генераторов тока является X-пинч, представляющий собой две или более тонкие проволоочки, скрещенные между собой в форме буквы “X” [1]. При пропускании по X-пинчу импульса тока с амплитудой I_m и временем нарастания τ , для которого выполняется условие $I_m/\tau > 1$ кА/нс [2], в области перекрестия проволоочек образуется источник мягкого рентгеновского излучения (м.р.и.) размером порядка 1 мкм и длительностью импульса < 1 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 быстроразвивающихся физических процессов, таких как взрыв проводников или фольг [2–8]. Для доступных и недорогих микропроводников диаметром 10–20 мкм амплитуда импульса тока должна составлять не менее 150–300 кА при времени его нарастания не более 100–200 нс. В недавнем прошлом такие параметры импульса тока обеспечивали лишь громоздкие стационарные генераторы весом от 300 кг до нескольких тонн [2–5]. В последние годы проявляется большой интерес к малогабаритным генераторам, позволяющим создавать мобильные диагностические системы для радиографии на основе X-пинчей в мягком рентгеновском диапазоне спектра [9–12].

В Институте сильноточной электроники СО РАН разработаны малогабаритные импульсные ге-

нераторы с амплитудой импульса тока 200–300 кА и временем его нарастания 150–200 нс [13]. Особенностью конструкции данных генераторов является использование компактных низкоиндуктивных конденсаторно-коммутаторных сборок [14], что позволило обеспечить габариты генератора примерно $50 \times 50 \times 50$ см. На этих генераторах в экспериментах с X-пинчами продемонстрирован источник мягкого рентгеновского излучения размером порядка 1–10 мкм при длительности импульса 2–3 нс в спектральном диапазоне энергий квантов $h\nu = 1–4$ кэВ [15]. Получены теневые изображения стационарных и короткоживущих объектов [6–8].

Задачей данной работы было создание двухкадровой системы импульсного зондирования с варьируемой задержкой между кадрами на основе двух малогабаритных генераторов. В принципе, многокадровые системы зондирования могут быть созданы на одном импульсном генераторе при установке нескольких X-пинчей последовательно или параллельно. Однако в этом случае задержка между кадрами не может превышать, грубо говоря, длительности импульса тока. Кроме того, чтобы добиться задержки между вспышками рентгеновского излучения, необходимо устанавливать X-пинчи разной погонной массы. Но для заданной формы импульса тока имеется оптимальное значение погонной массы с точки зрения качества источника излучения. Превышение массы над оптимальной величиной приводит к увеличению размера источника излучения. Также увеличивается число “выстрелов”, в которых излучение вовсе отсутствует. При погонной массе

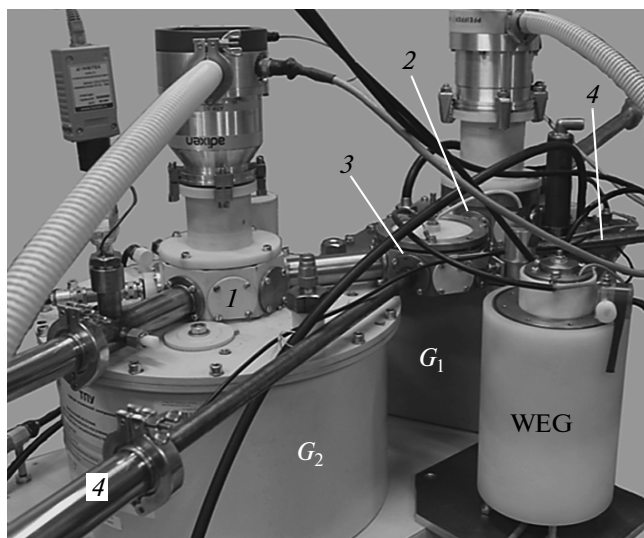


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки. G_1, G_2 – сильноточные генераторы; WEG – генератор; 1, 2 – вакуумные камеры соответственно генераторов G_1, G_2 ; 3 – вакуумная камера взрывающегося проводника; 4 – диагностические тракты, в которых устанавливалась фотопленка.

меньше оптимальной формируется несколько вспышек излучения [15]. Поэтому варьировать массу X-пинчей можно только в очень ограниченном диапазоне, что приводит к еще более существенному ограничению интервала времени между кадрами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (см. рис. 1) состояла из двух сильноточных генераторов и генератора WEG [6] с меньшим уровнем тока, который предназначался для создания исследуемого объекта. В узле нагрузки каждого из сильноточных генераторов устанавливались X-пинчи, формирующие зондирующие импульсы излучения. Первый сильноточный генератор G_1 был создан в 2006 г. [13]. Второй сильноточный генератор G_2 был аналогичен тому, который использовался в экспериментах [16]. Оба генератора при работе на низкоиндуктивную нагрузку обеспечивают амплитуду импульса тока до 300 кА при времени нарастания 180 нс. Конструктивно генераторы представляют собой низкоиндуктивные конденсаторные батареи из четырех конденсаторов емкостью 250 нФ, соединенных параллельно и снабженных отдельным маршевым коммутатором. Каждый из сильноточных генераторов имел блок низковольтного запуска, триггерный сигнал с которого поступал на блок высоковольтного запуска. Блок высоковольтного запуска формировал сигнал амплитудой 40 кВ с фронтом 15 нс, поступающий на маршевые коммутаторы генератора. Блок низковольтного за-

пуска может коммутироваться вручную или с помощью запускающего сигнала от внешнего генератора синхронизации, в качестве которого использовался стандартный шестиканальный генератор задержек ГИ-1.

Генератор ГИ-1 формирует до шести импульсов с задержкой от 100 нс до 2 мс с минимальным шагом 100 нс (по цифровому табло). Тестовые эксперименты показали, что при синхронизации генераторов G_1, G_2 и WEG от генератора задержек ГИ-1 разброс импульсов тока составляет не менее ± 100 нс. Такой разброс приемлем для двухкадровой съемки микросекундных и более медленных процессов.

Для реализации режимов двухкадрового зондирования с меньшим разбросом по времени между кадрами была разработана иная система запуска. Для синхронизации всех генераторов экспериментальной установки они запускались от одного стартового устройства, генерирующего импульсы амплитудой до 16 кВ с фронтом 15 нс. Стартовое устройство имело два выхода: один на запуск WEG, другой на блок промежуточного запуска. С блока промежуточного запуска импульс синхронизации поступал на блоки высоковольтного запуска сильноточных генераторов G_1 и G_2 . Изменением длины кабельной линии от стартового устройства до генератора WEG варьировалась задержка между срабатываниями генератора WEG и сильноточными генераторами. Требуемая задержка между импульсами тока генераторов G_1 и G_2 обеспечивалась разной длиной кабелей, идущих от блока промежуточного запуска к блокам высоковольтного запуска генераторов. Экспериментально продемонстрировано, что при использовании данной схемы синхронизации разброс от выстрела к выстрелу по времени между вспышками излучения двух X-пинчей, запитываемых от двух отдельных сильноточных генераторов, составил не более ± 18 нс.

Исследуемый объект, которым являлся электрически взрываемый тонкий алюминиевый проводник, устанавливался в отдельной вакуумной камере (3, рис. 1) в диэлектрической рамке (см. рис. 2). В диэлектрическую рамку были введены два электрических контакта, к которым крепился взрываемый проводник. Для взрыва проводника использовался генератор WEG (рис. 1). Излучение обеих X-пинчей проходило через камеру с взрываемым проводником и далее выводилось на детектор.

Чтобы определить какой участок взрываемого проводника при проецировании на детектор виден на изображении, на одну из внешних сторон диэлектрической рамки крепился тест-объект, причем так, чтобы он не замыкал цепь генератора WEG, не контактировал с исследуемым взрываемым проводником и соответственно не взрывался

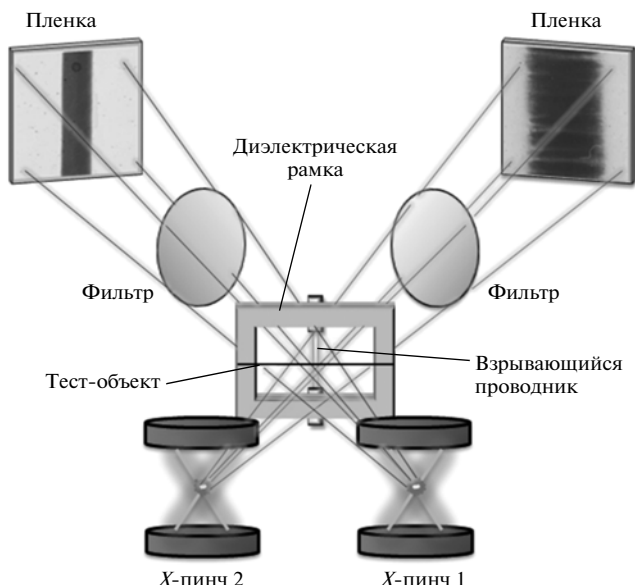


Рис. 2. Проекционная схема двухкадрового зондирования.

во время эксперимента. Тест-объект представлял собой алюминиевую проволочку $\varnothing 35$ или $100 \mu\text{м}$ и устанавливался в направлении, перпендикулярном оси взрывающегося проводника (см. рис. 2). Камеры генераторов с Х-пинчами были расположены под углом друг относительно друга для того, чтобы излучение одного из Х-пинчей не создавало паразитной засветки на детекторе, фиксирующем излучение другого Х-пинча.

Измерения тока на генераторах WEG, G_1 и G_2 проводились при помощи магнитных зондов и поясов Роговского. Для определения момента пробоя взрывающегося проводника использовался делитель напряжения генератора WEG. Импульсы рентгеновского излучения Х-пинчей регистрировались с помощью вакуумных рентгеновских диодов (по одному на каждый генератор), находящихся за фильтрами из алюминиевой фольги толщиной $8 \mu\text{м}$. Такой детектор чувствителен к квантам с энергией $h\nu > 0.8 \text{ кэВ}$. Сигналы датчиков регистрировались осциллографом TDS-3054C (Tektronix, Inc., Oregon, USA) с рабочей полосой 500 МГц .

Для получения снимков взрывающегося проводника в диапазоне энергий квантов излучения $h\nu > 0.8 \text{ кэВ}$ использовалась пленка “Микрат-500”, находящаяся за фильтром из алюминизированного кимфойла толщиной $4 \mu\text{м}$. Расстояние от Х-пинчей до взрывающегося проводника составляло 20 см , от взрывающегося проводника до фотопленки – 100 см , т.е. коэффициент увеличения проекционной схемы был равен 6. Угол между направлениями зондирующих лучей составлял 135° .

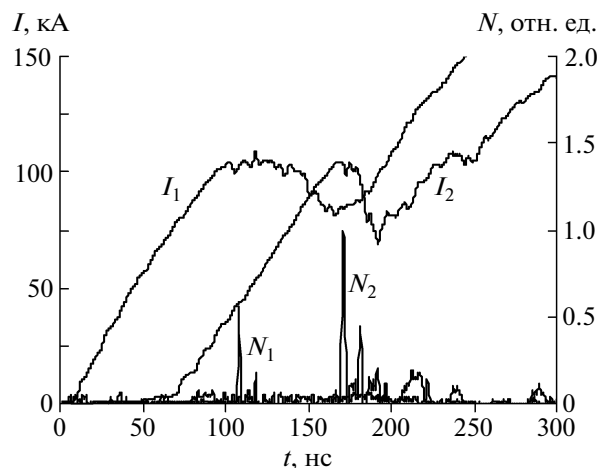


Рис. 3. Характерные осциллограммы импульсов тока I и мощности рентгеновского излучения N в диапазоне энергий квантов $h\nu > 0.8 \text{ кэВ}$.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Первый этап эксперимента имел целью обеспечение максимально близких характеристик импульсов излучения, генерируемых Х-пинчами на двух сильноточных генераторах. Важным требованием также являлось отсутствие повторных импульсов излучения и хорошая воспроизводимость импульсов от выстрела к выстрелу. Известно (см., например, [15]), что для конкретного сильноточного генератора можно подобрать оптимальную с точки зрения качества источника излучения погонную массу Х-пинча. При погонной массе, меньшей оптимальной, формируется несколько последовательных импульсов излучения из-за повторных сжатий вещества Х-пинча. Увеличение массы приводит к ухудшению повторяемости импульсов излучения от выстрела к выстрелу. Используемые генераторы, хотя и обладают схожими параметрами, в силу конструктивных особенностей обеспечивают различающиеся импульсы тока в нагрузке при одинаковом зарядном напряжении.

Поэтому на данном этапе экспериментов варьировались, как зарядные напряжения генераторов, так и диаметр (погонная масса) проводников Х-пинча. В итоге для каждого генератора были подобраны зарядное напряжение и диаметр проводников, при которых обеспечивались как однократность вспышки излучения каждого из Х-пинчей, так и удовлетворительная воспроизводимость импульса излучения двух Х-пинчей на обоих генераторах от выстрела к выстрелу. Кроме того, обеспечивалась и примерно одинаковая степень почернения фотопленок, регистрирующих излучение каждого из Х-пинчей. На рис. 3 приведены осциллограммы тока и импульсов излучения Х-пинчей двух синхронизованных сильно-

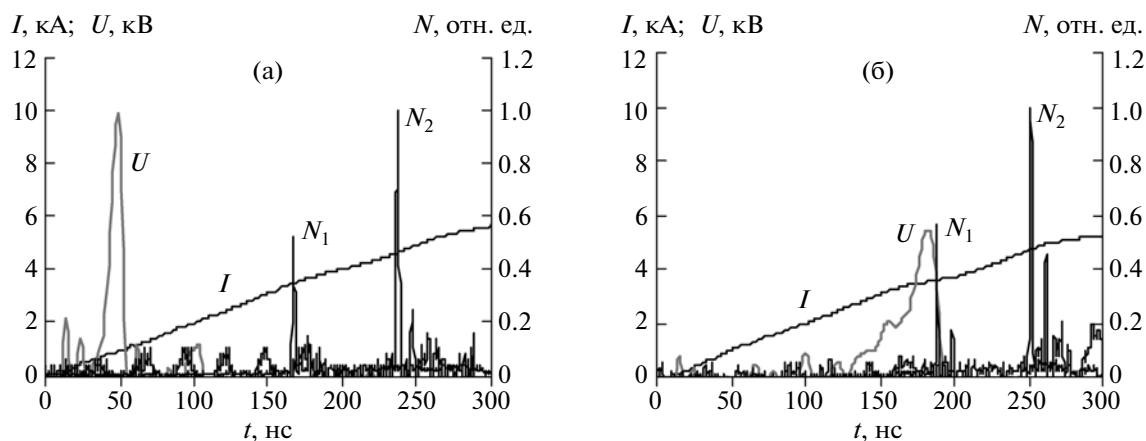


Рис. 4. Характерные осциллограммы импульсов тока I и активной составляющей напряжения U на взрываемом проводнике, а также импульсов N_1 и N_2 рентгеновского излучения X-пинчей: **а** — взрыв алюминиевого проводника $\varnothing 35$ мкм, **б** — $\varnothing 100$ мкм.

точных генераторов. Использовались X-пинчи из четырех вольфрамовых проволочек $\varnothing 13$ мкм. Как уже отмечалось выше, разброс между импульсами излучения от выстрела к выстрелу не превышал ± 18 нс. Длительность импульсов излучения на полувысоте составила 2–3 нс — на пределе временного разрешения системы регистрации. Наблюдаемые на осциллограммах мощности излучения повторные импульсы следуют через одинаковые интервалы времени. Учитывая, что длительность фронта импульса излучения X-пинча может составлять доли наносекунды (см., например, [17]), повторные импульсы объясняются отражениями сигнала в системе регистрации, обусловленными паразитными индуктивностями ослабителей напряжения и согласующих терминаторов.

Для демонстрации возможностей двухкадровой системы импульсного зондирования был проведен эксперимент по проекционной съемке взрыва одиночного алюминиевого проводника. При этом варьировалась величина кабельной задержки между запуском генератора WEG, используемого для реализации электрического взрыва проводника, и сильноточными генераторами. Величина кабельной задержки между сильноточными генераторами не менялась. Амплитуда импульса тока генератора WEG составляла 6 кА при времени нарастания 400 нс [6] и зарядном напряжении $U_0 = 25$ кВ; длина взрываемого проводника была 13 мм, диаметр 35 или 100 мкм.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы импульса тока и активной составляющей напряжения на взрываемом проводнике, а также импульсов рентгеновского излучения X-пинчей. Осциллограмма импульса напряжения отчетливо демонстрирует рост сопротивления проводника вследствие джоулевого нагрева и последующий спад, обусловленный образованием плазменного слоя

низкой плотности, по которому начинает развиваться шунтирующий проволочку пробой [18].

В эксперименте были получены рентгеновские снимки разных стадий взрыва алюминиевого проводника, которые приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5а, 5б представлены кадры, сделанные непосредственно после резкого спада напряжения, а на рис. 5б, 6б — в более поздние моменты времени. Видно, что непосредственно после спада напряжения неоднородности вещества проволочки (страты) не регистрируются, они становятся видимыми лишь через некоторое время: ~ 120 нс для проводника $\varnothing 35$ мкм, ~ 50 нс для проводника $\varnothing 100$ мкм от момента спада напряжения на проводнике. На снимках отчетливо наблюдаются структуры размером 5–10 мкм, что характеризует пространственное разрешение методики.

Полученные снимки сканировались с разрешением 4000 dpi. Затем измерялась полуширина распределения плотности почернения изображения в направлении, перпендикулярном оси взрываемого проводника. Диаметр расширяющейся плазмы определялся по полученным значениям полуширины, деленным на коэффициент увеличения проекционной схемы. В случае, когда на изображении имелись отчетливо различимые страты, определялся максимальный диаметр плазмы.

Чувствительность методики по минимально разрешимому произведению плотности вещества ρ на размер d объекта вдоль направления распространения излучения $(\rho d)_{\min}$ оценить достаточно трудно. Основным препятствием является сложность спектров излучения электронов M - и N -оболочек высокозарядных ионов вольфрама, лежащих в спектральном диапазоне 0.5–5 кэВ. Тем не менее, такую оценку полезно провести. Положим, что минимальный регистрируемый уровень контраста составляет $\Delta D_{\min} = 0.05$ (D — плотность

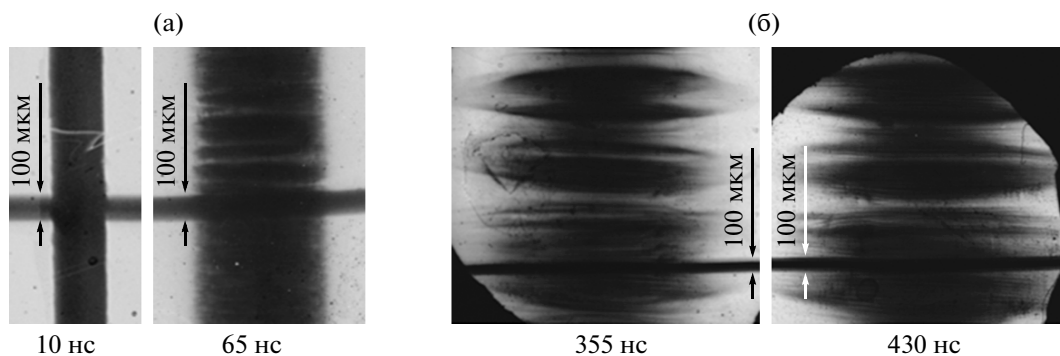


Рис. 5. Теневые рентгеновские снимки взрыва алюминиевой проволоочки $\varnothing 100$ мкм: **а** – выстрел № 128, **б** – выстрел № 121. Внизу указан момент времени всплеск рентгеновского излучения относительно момента спада напряжения на проволочке. Горизонтальная линия на снимках – изображение тест-объекта.

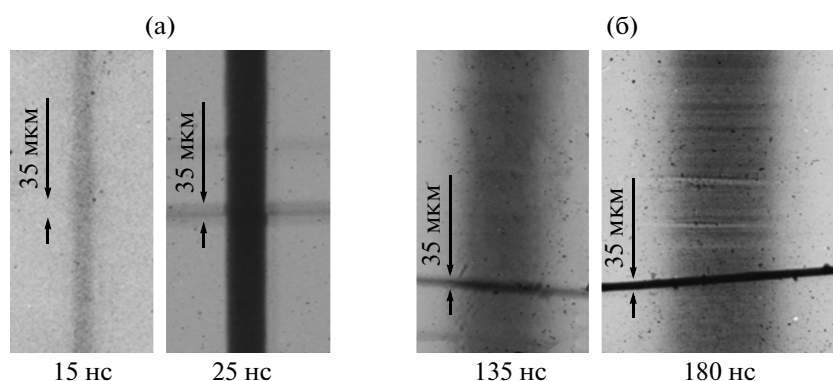


Рис. 6. Теневые рентгеновские снимки взрыва алюминиевой проволоочки $\varnothing 35$ мкм: **а** – выстрел № 131, **б** – выстрел № 132. Внизу указан момент времени всплеск рентгеновского излучения относительно момента спада напряжения на проволочке. Горизонтальная линия на снимках – изображение тест-объекта.

почернения фотопленки), коэффициент контрастности фотопленки $k = 1.5$, основной вклад в излучении X-пинча дают линии ионов вольфрама в области спектра 0.5–1.0 и 1.7–2.5 кэВ [19], средний в указанном спектральном интервале коэффициент ослабления излучения μ составляет ~ 1000 см²/г [20]. Используя выражение

$$(\rho d)_{\min} = \frac{\Delta D_{\min}}{0.43k\mu},$$

которое следует из определения плотности почернения и экспоненциального закона ослабления рентгеновского излучения в веществе, для алюминия получим $(\rho d)_{\min} = 8 \cdot 10^{-5}$ г/см².

Обратимся к рис. 6б, на котором представлен рентгеновский теневой снимок, сделанный в момент времени 180 нс после спада напряжения на взрываемом проводнике с исходным диаметром 35 мкм. Из рисунка видно, что диаметр плазмы составляет ~ 450 мкм. Полагая, что распределение плотности вещества равномерно по радиусу цилиндра, а полная масса остается неизменной, можно оценить плотность вещества, которая составляет примерно $1.6 \cdot 10^{-2}$ г/см³. Тогда для дан-

ного объекта произведение $\rho d \approx 8 \cdot 10^{-4}$ г/см² по диаметральной линии. Учитывая, что градиент плотности почернения на снимке около 0.5, экспериментальное значение ρd хорошо совпадает с оценкой по приведенной выше формуле. Это подтверждает корректность оценок минимального значения ρd , регистрируемого системой зондирования.

С помощью полученных снимков были построены зависимости $d(t)$ диаметра внешней границы расширяющейся плазмы взрывающегося проводника от времени (рис. 7). Из этого рисунка видно, что средняя скорость расширения границы вещества проводников после спада напряжения составляет $(2.5\text{--}3.5) \cdot 10^5$ см/с. Временные зависимости распределения плотности вещества по радиусу могут быть получены при использовании ступенчатых ослабителей из того же вещества, что и взрываемый проводник (см., например, [21]). Эту работу планируется провести в качестве следующего шага в развитии данной диагностической системы.

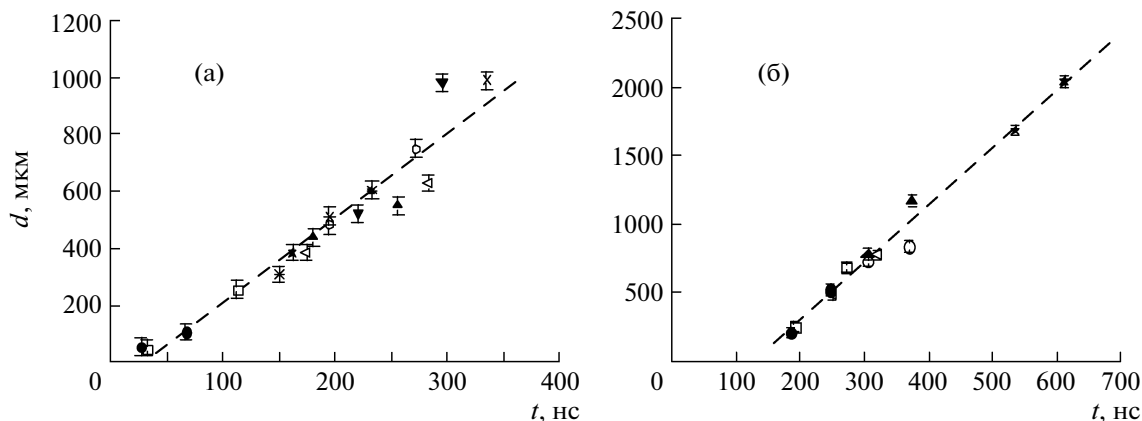


Рис. 7. Экспериментальные значения диаметра расширяющейся плазмы взрывающегося алюминиевого проводника в зависимости от времени, прямые — их линейная аппроксимация. Начальный диаметр проводника 35 мкм (а), 100 мкм (б). Время отложено от начала импульса тока по проводнику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые продемонстрирована работа двухкадровой системы импульсного зондирования в мягком рентгеновском диапазоне спектра (энергия квантов излучения 0.8–3 кэВ). Система рентгеновского зондирования состоит из двух высокоточных генераторов с амплитудой тока до 300 кА при времени нарастания 180 нс, нагрузкой которых являются X-пинчи. Система позволяет получать два теневых рентгеновских снимка с микронным пространственным разрешением при длительности экспозиции 2–3 нс. Задержка между импульсами зондирующего излучения может варьироваться в широких пределах, разброс по времени между импульсами излучения не более ± 18 нс. С помощью двухкадровой системы импульсного зондирования проведена теневая съемка электрического взрыва одиночных алюминиевых проводников.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 10-02-00938а, № 09-08-00734-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Захаров С.М., Иваненков Г.В., Коломенский А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. С. 1060.
- Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Douglass J.D. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34. P. 2336.
- Pikuz S.A., Sinars D.B., Shelkovenko T.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 035003.
- Alexandrov V.V., Frolov I.N., Fedulov M.V. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. № 2. P. 559.
- Douglass J.D., Hammer D.A. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 033503.
- Rousskikh A.G., Oreshkin V.I., Chaikovskiy S.A. et al. // Physics of Plasmas. 2008. V. 15. P. 102706.
- Oreshkin V.I., Rousskikh A.G., Chaikovskiy S.A., Oreshkin E.V. // Physics of Plasmas, 2010. V. 17. P. 072703.
- Kuznetsov V.V., Oreshkin V.I., Zhigalin A.S. et al. // Engineering Thermophysics. 2011. V. 20. P. 240.
- Ran Zhang, Tong Zhao, Xiaobin Zou et al. // Proc of Power Modulator and High Voltage Conference. USA, Atlanta, IEEE. 2010. V. 1. P. 90.
- Green J.S., Bland S.N., Collett M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 261501.
- Knapp P.F., Pikuz S.A., Shelkovenko T.A. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. P. 063501.
- Mariscal D., Bott S.C., Haas D.M. et al. // Book of abstracts. 8th International Conference on High Energy Density. Laboratory Astrophysics, Pasadena, 2010. P. PB21.
- Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Эрфорт А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 50. С. 87.
- Жарова Н.В., Ратахин Н.А., Саушкин А.В. и др. // ПТЭ. 2006. № 3. С. 141.
- Артёмов А.П., Лабеецкая Н.А., Федюнин А.В. и др. // Краткие сообщения по физике. М.: ФИАН, 2010. № 6. С. 31.
- Месяц Г.А., Шелковенко Т.А., Иваненков Г.В. и др. // ЖЭТФ. 2010. № 138. С. 411.
- Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Sinars D.B. et al. // J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2001. V. 71. P. 581.
- Русских А.Г., Бакуит Р.Б., Лабеецкий А.Ю. и др. // Физика плазмы. 2004. № 30. С. 122.
- Электронная база данных <http://spectr-w3.snz.ru/>
- Henke B.L., Elgin R.L. // Advances in X-Ray Anal. 1970. V. 13. P. 639.
- Sinars D.B., Shelkovenko T.A., Pikuz S.A. et al. // Physics of Plasmas. 2000. V. 7. P. 1555.