

УДК 535.33

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ПФ-4 ТИПА ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

С. П. Елисеев, В. Я. Никулин, П. В. Силин

*На установке с энергетикой от 1.5 до 5 кДж при работе с аргоном проведены измерения мягкого рентгеновского излучения с использованием рентгеновских камер-обскур и датчиков СППД 11-04. С помощью 4-кадровой камеры-обскуры с размерами отверстий около 250 мкм в диапазоне энергий выше 1.2, 1.5, 1.8 и 2.5 кэВ проведена интегральная регистрация рентгеновского излучения. Одновременно измерен рентгеновский выход с временным разрешением с помощью полупроводникового датчика в диапазоне энергий  $> 1.8$  кэВ. В ходе работы были исследованы характеристики излучения при следующих параметрах эксперимента: напряжение конденсаторной батареи 8–14 кВ и давление аргона от 1.2 до 3 Торр. С помощью камеры-обскуры с размером отверстия около 20 мкм оценен размер горячих точек на уровне менее 13–25 мкм.*

На данный момент весьма актуальны эксперименты по созданию компактного интенсивного источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ). С этой целью в работе [1] в качестве компактного источника ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения использовали плазменный фокус. В частности, была рассмотрена возможность использования узкополосного излучения с линейчатым и непрерывным спектром плазменного фокуса в таких областях как рентгеновская литография, микроскопия, контактная микроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

В ряде работ на плазменном фокусе были проведены исследования с различными газами. Так в работе [2] исследовались характеристики рентгеновского излучения при



впрыскивании аргона через отверстие в аноде. В работе [3] измерялся рентгеновский выход плазменного фокуса с зарядкой конденсаторов до напряжения 14 кВ, в качестве рабочего газа был выбран неон.

В данной работе мягкое рентгеновское излучение, генерируемое в плазменном фокусе, работающем с аргоном, измерялось с помощью полупроводниковых детекторов и четырех камер-обскур, закрытых бериллиевыми фильтрами различной толщины. Регистрация во всех диагностиках осуществлялась за один выстрел. Было проведено сравнение интегральных фотографий и рентгеновских сигналов с временным разрешением. С помощью камеры-обскуры с размерами отверстия около 20 мкм осуществлена оценка размеров горячих точек.

1. *Экспериментальная установка.* В экспериментах использовался плазменный фокус мейзеровского типа с коаксиальной цилиндрической системой электродов. Подробное описание экспериментальной установки дано в работах [4, 5]. На рис. 1 приведена блок-схема экспериментальной установки вместе с различными диагностиками.



Рис. 1. Блок-схема установки плазменный фокус с диагностическим комплексом.

Для регистрации мягкого рентгеновского излучения на плазменном фокусе одновременно применялись такие диагностические комплексы, как четырехкадровая рентгеновская камера-обскура (т.е. камера-обскура с четырьмя отверстиями) с регистрацией излучения на фотопленку RAR 2494 и полупроводниковый детектор СППД 11-04 с разрешением около 1.5 нс, закрытый 50 мкм бериллиевым фильтром. Съёмка проводилась под углом 90°



к вертикальной оси. Сигнал с полупроводникового детектора регистрировался осциллографом типа TDS-3054B с полосой пропускания 500 МГц. Синхронизация по времени осуществлялась с помощью магнитного зонда, регистрирующего производную полного тока, протекающего в камере плазменного фокуса.

## 2. Экспериментальные результаты.

2.1. МРИ плазменного фокуса в зависимости от напряжения конденсаторов. Разрешение камеры-обскуры около 250 мкм. Эксперименты проводились при фиксированном давлении аргона 1.9 Торр, данное давление было выбрано по причине соответствия максимальному выходу рентгеновского излучения [5]. Напряжение конденсаторной батареи изменялось в диапазоне от 8 до 14 кВ, что соответствовало полной энергии заряда установки  $E$  от 1.5 до 5 кДж.

Т а б л и ц а 1

Энергии кванта излучения, соответствующие пропусканию бериллиевых фильтров на уровне  $e^{-1}$

Фильтры	15 мкм Be	30 мкм Be	50 мкм Be	150 мкм Be
$E_e$ , кэВ	1.2	1.5	1.8	2.5

Фотографирование разряда осуществлялось с помощью рентгеновской камеры-обскуры с четырьмя отверстиями: 250, 260, 250, 270 мкм, закрытыми соответственно 15, 30, 50, 150 мкм бериллиевыми фильтрами. Кривые пропускания данных фильтров изображены на рис. 2. В табл. 1 представлены энергии квантов излучения, соответствующего ослаблению начальной интенсивности излучения фильтром в  $e$  раз.

Было зарегистрировано, что во всех экспериментах рентгеновское излучение возникало в момент максимума первой особенности на производной тока. Мягкое рентгеновское излучение в диапазоне до 1.5 кэВ появляется при напряжении конденсаторной батареи более 8 кВ ( $E = 1.6$  кДж). При напряжении 9 кВ ( $E \sim 1.95$  кДж) зарегистрированы горячие точки с энергией квантов до 2.5 кэВ (рис. 3 (а)). При дальнейшем увеличении напряжения появляется излучение с энергией квантов  $\geq 2.5$  кэВ и рост выхода мягкого рентгеновского излучения. В большинстве выстрелов формируются 1–2 наиболее интенсивные горячие точки, расположенные друг над другом на расстоянии около 1 мм. Максимальная интенсивность в большинстве случаев соответствует нижней точке, которая, по всей видимости, и ответственна за основной импульс более жесткого рентгеновского излучения. Вокруг горячих точек имеется плазма, светящаяся в диапазоне энергий 1.2–1.5 кэВ, интенсивность ее свечения значительно увеличивается с



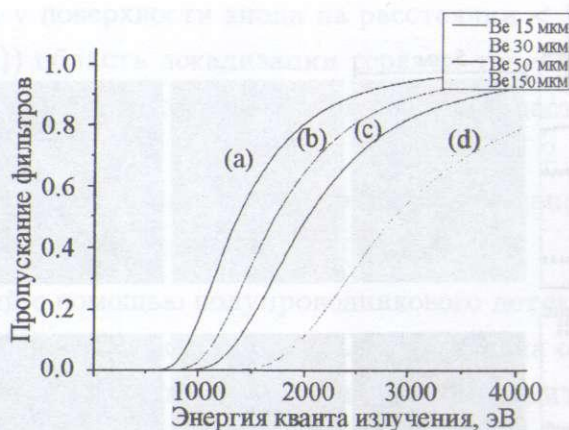


Рис. 2. Кривые пропускания рентгеновского излучения для бериллиевых фильтров различной толщины: (a) – 15 мкм, (b) – 30 мкм, (c) – 50 мкм, (d) – 150 мкм.

ростом напряжения. Поверхность анода начинает излучать ( $E > 2.5$  кэВ) при напряжении  $\geq 11$  кВ, интенсивность этого излучения в диапазоне напряжений от 11 до 14 кВ меняется незначительно. Область свечения  $\sim 1$  см, что совпадает с размерами вольфрамово-медной вставки анода [5].

Быстродействующий полупроводниковый детектор с 50 мкм Be фильтром ( $E > 1.8$  кэВ) начинал регистрировать сигнал при напряжении  $\geq 10$  кВ. Данный сигнал, в большинстве случаев, состоял из одного основного импульса. Второй импульс, если он имел место, был слабо выражен на уровне фона. Длительность каждого импульса составляла около 3–4 нс по полувысоте. В экспериментах, проведенных с помощью СППД-детекторов за 15 мкм фильтрами при напряжении 14 кВ [5], было показано, что рентгеновский сигнал при разряде в аргоне состоит из двух импульсов различной жесткости. Первый импульс длительностью около 10 нс регистрируется и за 50 мкм фильтром. Второй, создаваемый квантами меньшей энергии, имеет чуть большую амплитуду и длительность около 40–50 нс, но практически полностью поглощается 50 мкм Be фильтром.

**2.2. МРИ плазменного фокуса в зависимости от давления аргона. Разрешение камеры-обскуры около 250 мкм.** Все эксперименты проводились при одном рабочем напряжении 12 кВ (суммарная энергетика 3.6 кДж). Исследовалась пространственная зависимость параметров мягкого рентгеновского излучения от давления аргона. Применялась камера-обскуры, описанная выше.

Максимальный по интенсивности выход мягкого рентгеновского излучения соответствовал давлению около 2 Торр (рис. 4(b)). Область свечения состояла из 1–2 горячих



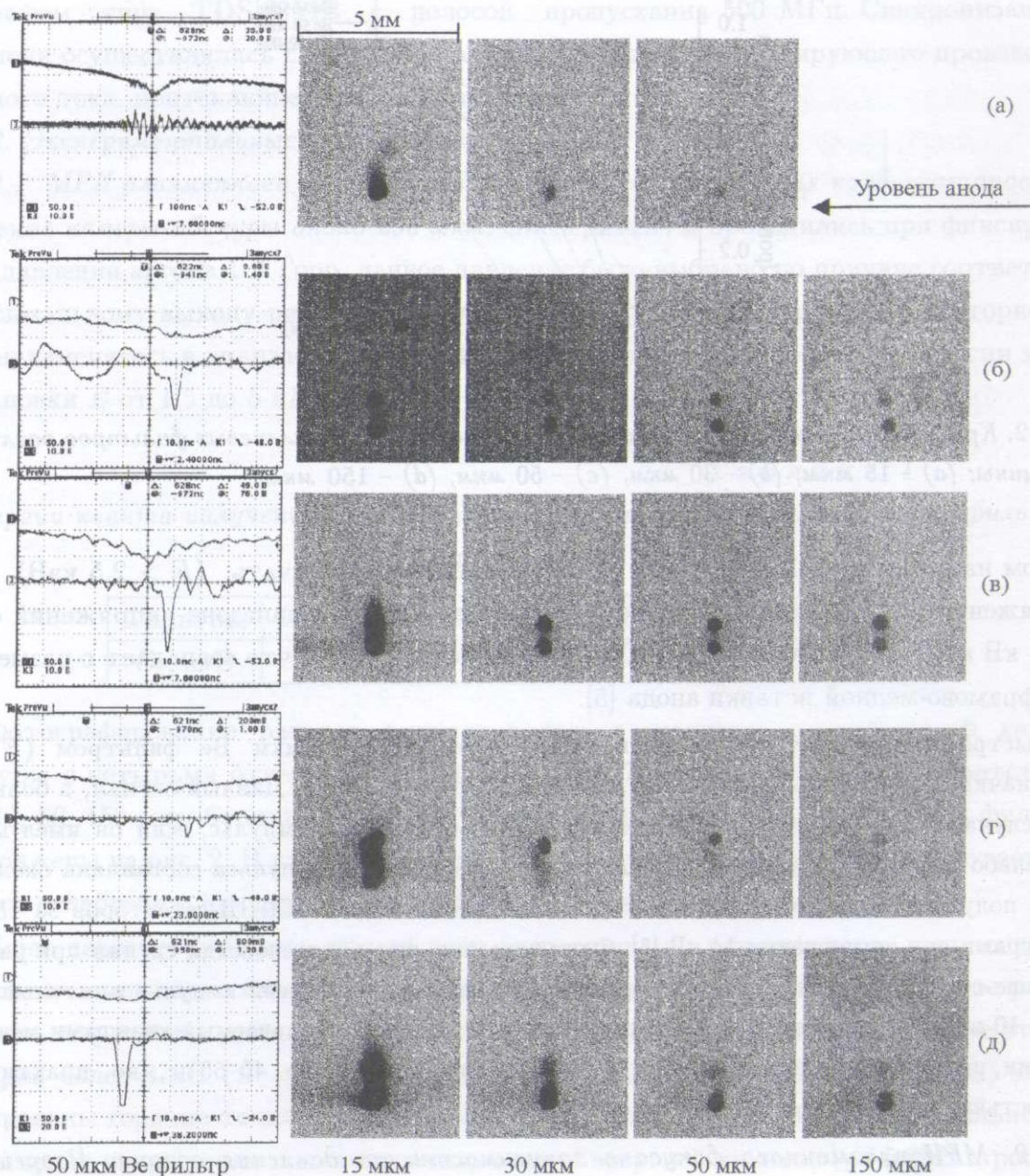


Рис. 3. Слева: осциллограмма производной тока в районе особенности и сигнала с датчика СППД 11-0.4, закрытого 50 мкм Ве фильтром. На фотографии – рентгеновские снимки, сделанные с помощью камеры с 250 мкм отверстием с 15, 30, 50 и 150 мкм Ве фильтрами. Давление аргона 1.9 Торра, напряжение конденсаторной батареи (а) – 9 кВ, (б) – 10 кВ, (в) – 11 кВ, (г) – 12 кВ, (д) – 14 кВ.



точек, расположенных у поверхности анода на расстоянии  $< 1$  мм. При давлении аргона  $< 2$  Торр (рис. 4(а)) область локализации горячих точек вытянута вдоль оси  $Z$  на расстояние до 7 мм. Наиболее интенсивное излучение осуществляется из вертикальной области  $< 3$  мм ( $E$  до 2.5 кэВ и выше). При давлении  $> 2$  Торр (рис. 4(г)) область формирования горячих точек сжимается в вертикальном направлении ( $< 3$  мм) и увеличивается в горизонтальном ( $\sim 1$  мм).

Сигнал, полученный с помощью полупроводникового детектора, состоял из нескольких импульсов. Длительность каждого импульса составляла около 4 нс. В зависимости от давления изменялась амплитуда сигнала и его продолжительность. При давлении  $\leq 2$  Торр полное время излучения составляло около 5–15 нс, при увеличении давления до 2.5–3 Торр оно увеличивалось до 30–50 нс.

*2.3. Измерение формы и размеров областей излучения с помощью 50 мкм камеры-обскуры при различных напряжениях.* Эксперимент проводился при фиксированном давлении аргона 2 Торра. При этом с помощью камеры-обскуры с отверстием диаметра 48 мкм, закрытого 50 мкм Be фильтром, были получены рентгеновские фотографии разряда, а с помощью детектора СППД 11-04 – рентгеновский сигнал того же диапазона энергий с временным разрешением.

При данном пространственном разрешении наблюдается более детальная картина излучения. На рис. 5(а), соответствующем напряжению 10 кВ, рентгеновский сигнал состоит из одного импульса, на фотографии видна одна горячая точка, вытянутая по диагонали. При увеличении напряжения до 12 кВ (рис. 5(б)) количество и интенсивность горячих точек увеличились. Длительность импульсов около 3–4 нс по полувысоте и расстояние между наиболее интенсивными 6 нс. На рис. 5(в) приведен случай, соответствующий разряду при 13 кВ. Здесь также наблюдается два импульса, но на фотографии они пространственно накладываются друг на друга, излучение имеет скорее пинч-образную форму. По времени импульсы с длительностью 3–4 нс разнесены на 8 нс. Параметры разряда (рис. 5(г)) соответствуют напряжению конденсаторов 14 кВ. В данном случае видно, что амплитуда рентгеновского сигнала больше, чем в предыдущих случаях. Сигнал СППД содержит один большой пик. Кроме горячей точки, видна пинч-образная структура высотой около 1 мм.

На фотографии рис. 6 зафиксировано излучение в 10 разрядах при приблизительно равных условиях: давление аргона около 2 Торр, напряжение конденсаторных батарей около 12 кВ. Горячие точки занимают область шириной 0.6 и высотой до 3 мм. Нижние точки находятся у поверхности анода.



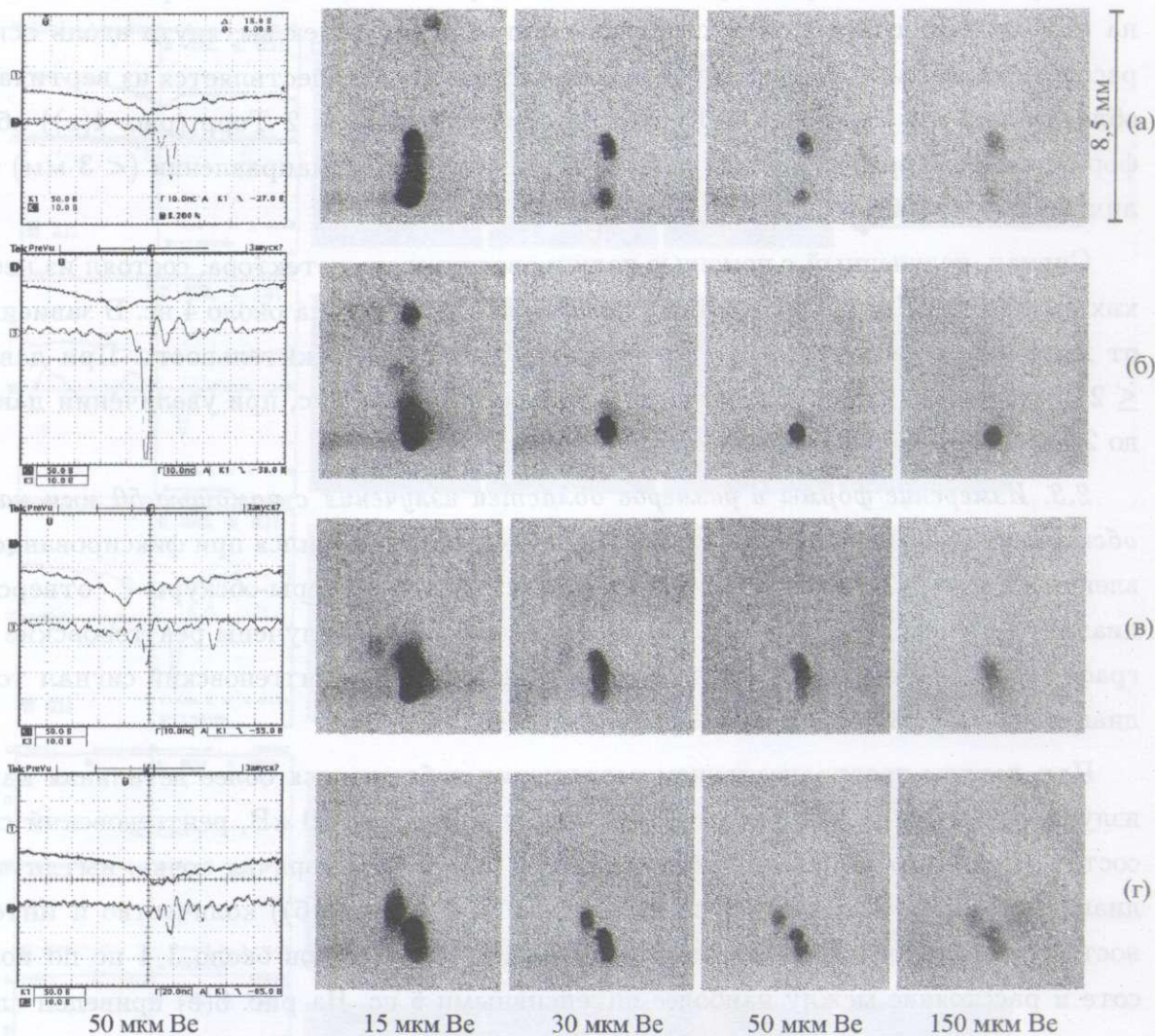


Рис. 4. Слева: осциллограмма производной тока в районе особенности и сигнала с датчика СППД 11-04, закрытого 50 мкм Ве фильтром. На фотографии – рентгеновские снимки, сделанные с помощью камеры с 250 мкм отверстием с 15, 30, 50 и 150 мкм Ве фильтрами. Напряжение батареи 12 кВ, давление аргона (а) – 0.6, (б) – 1.3, (в) – 1.9, (г) – 2.5 Торра.

**Обсуждение результатов.** При разряде в аргоне было обнаружено, что излучение плазменного фокуса в основном состоит из набора горячих точек, в которых достигаются максимальные параметры температуры и плотности плазмы. Наиболее интенсивная область свечения чаще всего находится на уровне анода в воронкообразной полости, реже она лежит на 1–2 мм выше анода. Зачастую данное излучение содержит высоко-



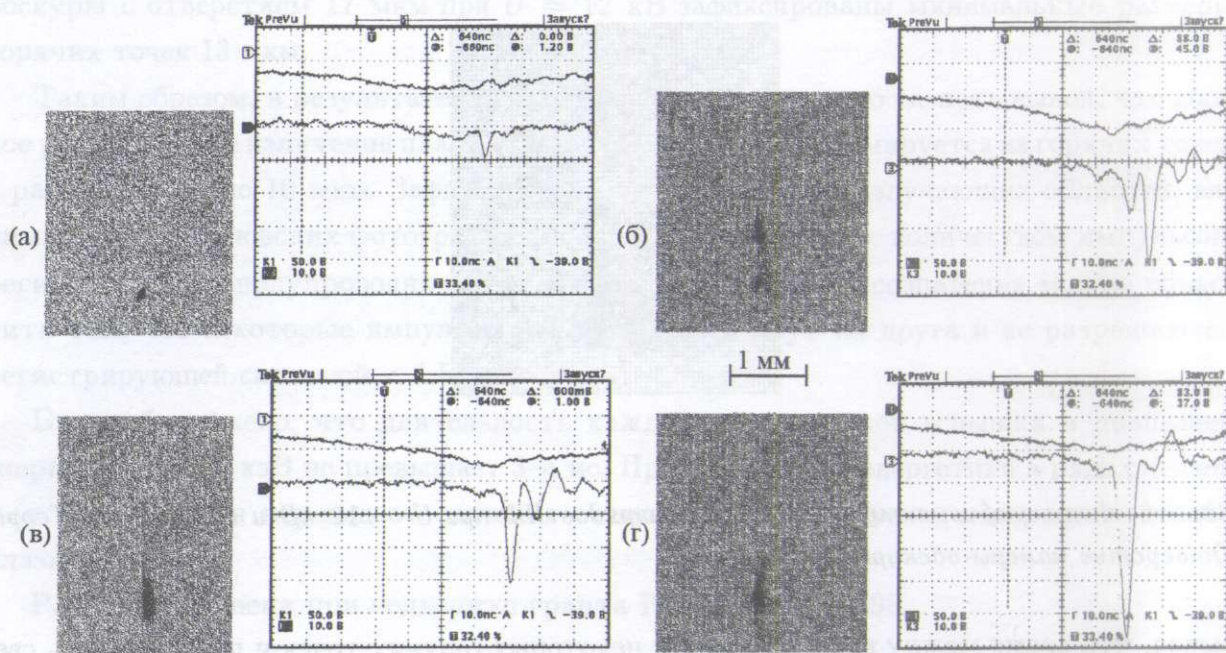


Рис. 5. Разряд в газе при давлении аргона 2 Торра. Напряжение конденсаторной батареи (а) – 10, (б) – 12, (в) – 13, (г) – 14 кВ. Отверстие камеры-обскуры 50 мкм.

энергетические кванты, которые соответствуют, в частности, ионам высокой кратности ионизации  $\text{Ar XVII}$  ( $3.944$  и  $3.966 \text{ \AA}$ , или  $3.144$  и  $3.126 \text{ кэВ}$ ) и  $\text{Ar XVI}$  ( $3.995 \text{ \AA}$  – энергия  $3.104 \text{ кэВ}$ ) [6].

Максимальная интенсивность излучения на рентгеновских фотографиях была зафиксирована при давлении аргона 2 Торра. При меньших давлениях область формирования горячих точек более вытянута вдоль вертикальной оси  $Z$ . Можно отметить, что при высоком давлении область формирования горячих точек в данном направлении сжимается, но происходит уширение в аксиальном направлении. В большинстве экспериментов максимальной яркостью обладает прианодная точка, которая, по всей видимости, и ответственна за основной импульс рентгеновского излучения с  $E > 2.8 \text{ кэВ}$ . По ряду осциллограмм, сделанных с помощью СППД-детекторов при давлении более 2.5 Торр, видно, что рентгеновский сигнал состоит из многих импульсов, занимающих временной интервал от 40 до 70 нс. При данных условиях амплитуда сигнала меньше, чем при меньших давлениях.

На ряде соответствующих фотографий и осциллограмм с СППД количество горячих точек и импульсов рентгеновского излучения не совпадает. Из этого можно сделать



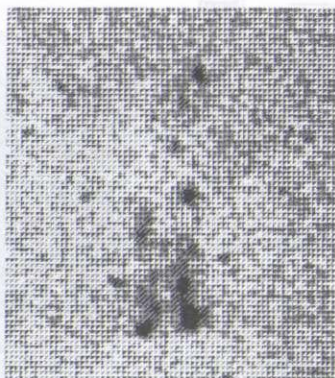


Рис. 6. Фотография, полученная за 10 разрядов ПФ при  $U = 12$  кВ и  $P$  аргона 2 Торра. Отверстие камеры-обскуры 50 мкм.

вывод, что время между возникновением некоторых горячих точек и длительность свечения меньше разрешаемого времени детектирующей системы (1.5 нс).

При оптимальном давлении 2 Торра и напряжении 12 кВ в диапазоне энергий более 1.8 кэВ мягкое рентгеновское излучение генерируется из отдельных горячих точек. Пространственная область излучения в десяти экспериментальных выстрелах менее 1 мм в горизонтальном и 3 мм в вертикальном направлении.

Несмотря на специально предпринятые меры, кроме горячих точек имеется излучение с поверхности анода, которое, скорее всего, вызвано торможением быстрых электронов на аноде ( $E_\nu > 2.5$  кэВ). Данное излучение возникает только при напряжении более 11 кВ. Область излучения около 1 см в диаметре.

По разности между наблюдаемыми размерами изображения светящегося объекта и размером точечного источника на фотографиях камеры-обскуры были измерены величины горячих точек. В эксперименте с 250 мкм камерой-обскурой при  $U = 8$  кВ для отверстия, закрытого 15 мкм Be фильтром, диаметр горячей точки составлял не более 130 мкм. Данный размер может соответствовать и нескольким светящимся объектам, находящимся на расстоянии менее размера изображения одного точечного источника. При напряжении  $U = 9$  кВ (рис. 3(а)) за 15 мкм фильтром размеры нижней горячей точки около 210 мкм, в аналогичных случаях при 11 и 14 кВ размеры 270 и 370 мкм соответственно. В экспериментах с 50 мкм диафрагмой при  $U = 12$  кВ размеры светящихся точек 60–95 мкм (рис. 5(б)), а при  $U = 14$  кВ – 110–125 мкм (рис. 5(г)), т.е. видно увеличение светящейся области при росте энергетики. С помощью камеры-



обскуры с отверстием 17 мкм при  $U = 12$  кВ зафиксированы минимальные размеры горячих точек 13 мкм.

Таким образом, в результате данных экспериментов можно сделать вывод, что мягкое рентгеновское излучение плазменного фокуса в аргоне формируется из горячих точек с размерами около 10 мкм. Зафиксировано, что количество излучающих областей, видимых на рентгеновских фотографиях, в основном совпадает с количеством импульсов, регистрируемых полупроводниковым детектором. Случаи несовпадения можно объяснить тем, что некоторые импульсы накладываются друг на друга и не разрешаются регистрирующей системой  $< 1.5$  нс.

Было обнаружено, что длительность каждой рентгеновской вспышки в диапазоне энергий более 1.8 кэВ не превышает 3–4 нс. При увеличении энергетике в ряде случаев был зафиксирован переход от свечения отдельных горячих точек к свечению столба плазмы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 06-02-17398.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. Lebert, A. Engel, K. Bergmann, et al., *Proc. 4th Int. Conf. on Dense Z-Pinches, Vancouver, Canada, 1997*, AIP CP **409**, 291 (1997).
- [2] J. M. Bayley, G. Decker, W. Kies, et al., *J. Appl. Phys.* **69**, 613 (1991).
- [3] M. Liu, X. Feng, S. V. Springham, and S. Lee, *IEEE Transactions on Plasma Science* **26**, 135 (1998).
- [4] A. V. Oginov, V. Ya. Nikulin, A. A. Tikhomirov, and S. P. Eliseev, *Czech. J. of Phys. Suppl. B* **56**, 315 (2006).
- [5] С. П. Елисеев, В. Я. Никулин, П. В. Силин, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **36**(1), 3 (2009).
- [6] K. Hirano, T. Yamamoto, S. Takada, et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, 89 (1988).

Поступила в редакцию 27 августа 2008 г.