

УДК 535.33

## ИЗМЕРЕНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС ПФ-4 С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ДЕТЕКТОРОВ

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

*С помощью быстродействующих полупроводниковых детекторов типа СППД 11-04 проведены измерения с временным разрешением мягкого рентгеновского излучения под углами  $45^\circ$  и  $90^\circ$  к оси системы в атмосфере аргона. Исследована зависимость рентгеновского выхода в зависимости от напряжения конденсаторной батареи плазменного фокуса в диапазоне от 8 до 14 кВ и давления аргона от 0.5 до 4 Торр. В результате обобщения полученных результатов дана возможная интерпретация природы наблюдаемого излучения.*

В последнее время в связи с бурным развитием исследований в области нанотехнологий задача создания эффективных источников рентгеновского и ультрафиолетового излучений является особенно актуальной.

Исследования по созданию таких источников в настоящее время ведутся по нескольким направлениям: рентгеновские лазеры, синхротронное излучение, капиллярные разряды, вакуумные низкоиндуктивные разряды.

Высокоэффективный источник мягкого рентгеновского (МРИ) и ультрафиолетового излучений может быть построен также на основе электроразрядной установки типа плазменного фокуса (ПФ). Основными достоинствами такого источника являются высокий КПД преобразования электрической энергии в излучение ( $> 10\%$ ), возможность работы в частотном режиме без смены электродов, широкий диапазон длин волн в рентгеновском диапазоне от 1 до 20 Å и в УФ диапазоне (100–150 Å). Важным свойством

рентгеновских импульсов, генерируемых в ПФ, является также короткая их длительность порядка нескольких нс. В табл. 1 приведены длины волн и энергии квантов излучательных переходов для различных газов, применяемых для заполнения разрядной камеры ПФ [1]. В работе [2] на примере установки ПФ-4 показана возможность применения установок данного типа для рентгенолитографии, что описано в работах [3, 4]. Также рассмотрена возможность использования таких источников для изучения методом рентгеновской дифрактометрии [5] упорядоченной микроструктуры биологических объектов, в частности, структуры белка, мембран, ДНК молекул, новых полимерных систем и полиморфизма в диапазоне размеров как от 0.1 до 1.0 нм, так и более 1.0 нм. Параметры МРИ позволяют проводить анализ образцов в реальном масштабе времени.

Т а б л и ц а 1

*Длины волн и энергии наиболее интенсивных линий*

Элемент	Заряд ядра	Длина волны (нм)	энергия (кэВ)
N VI	7	2.8787	0.43
N VII	7	2.4781	0.5003
Ne IX	10	1.3447	0.922
Ne X	10	1.2134	1.0218
Ar XVIII	18	0.3733	3.3213
Ar XVII	18	0.3948,	3.1325
		0.3968	
Kr XXXV	36	0.0987	12.5618
Kr XXXVI	36	0.093325	13.2853
Xe LIV	54	0.0415	29.876

В данной работе описана методика исследования МРИ плазменного фокуса с помощью быстродействующих полупроводниковых детекторов типа СППД 11-04. Исследованы временные и спектральные характеристики излучения при заполнении разрядной камеры аргоном в зависимости от рабочего напряжения и давление рабочего газа.

1. *Экспериментальная установка.* Эксперименты проводились на установке плазменный фокус мейзеровского типа с энергетикой около 3.5 кДж [6]. Схема установки

приведена на рис. 1. Для лучшего сжатия пинча в центральной части анода использовалась вставка из вольфрама с коническим отверстием с диаметром основания 3.5 и глубиной 10 мм. Использование вольфрамовой вставки позволило значительно уменьшить эрозию материала анода и снизить вклад в рентгеновское излучение, вызванный свечением металлической плазмы анода.

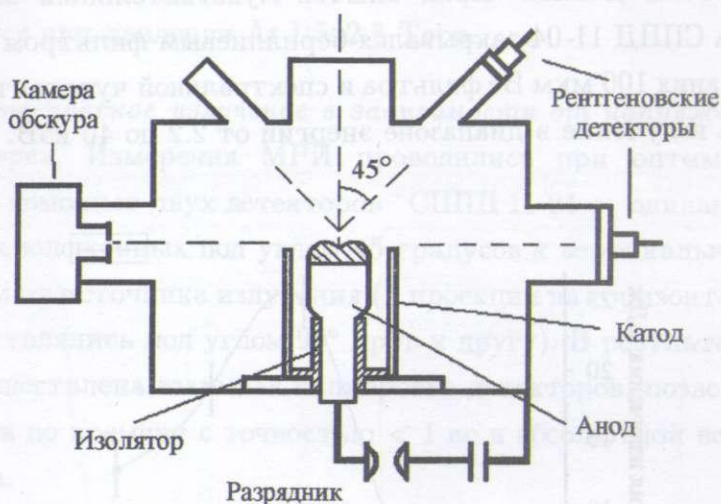


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Эксперименты проводились при напряжениях зарядки конденсаторной батареи от 8 до 14 кВ. Максимальный ток при этом не превышал 400 кА. Давление рабочего газа, в качестве которого использовался аргон, менялось в диапазоне от 0.6 до 3.1 Торр. Для регистрации рентгеновского излучения применялись быстродействующие полупроводниковые детекторы типа СППД 11-04, чувствительные в диапазоне 0.4–40 кэВ и обеспечивающие временное разрешение порядка 1.5 нс [7]. Регистрация сигнала с детекторов осуществлялась осциллографами типа TDS-220 с полосой пропускания 200 МГц и TDS-3054В с полосой пропускания 500 МГц. Детекторы располагались на расстоянии 24 см от источника излучения под углом 90 градусов к оси системы, либо под углом 45° на расстоянии 28 см.

С помощью магнитного зонда измерялась производная тока, протекающего через разрядный контур. При сжатии плазмы на оси разряда возникают плазменные неустойчивости, вызывающие падение разрядного тока. Данное падение тока формирует импульс особенности на производной тока с амплитудой сигнала зонда около 10–20 В и длительностью около 50 нс. Особенность на производной тока изображена на рис. 3 и 5 канала 1 в масштабе 50 В и 10 нс на 1 клетку, поэтому минимум особенности

слабо выражен. Во всех проведенных экспериментах момент появления рентгеновского сигнала с экспериментальной точностью ( $\pm 10$  нс) соответствовал моменту минимума особенности на производной тока.

## 2. Экспериментальные результаты.

### 2.1 Мягкое рентгеновское излучение ПФ в зависимости от давления рабочего газа (Ar) в камере ПФ.

В данной серии опытов чувствительный элемент (диаметром 2.5 мм) детектора СППД 11-04 закрывался бериллиевым фильтром толщиной 100 мкм. С учетом пропускания 100 мкм Be фильтра и спектральной чувствительности детектора регистрировалось излучение в диапазоне энергий от 2.2 до 40 кэВ.

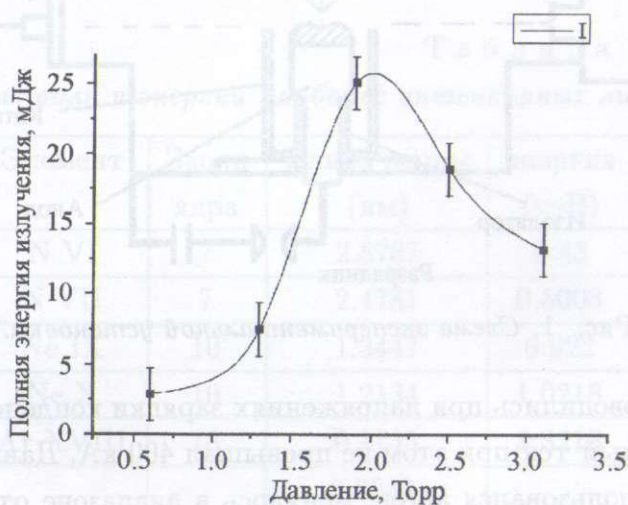


Рис. 2. Зависимость энергии импульса мягкого рентгеновского излучения от величины давления  $P$  рабочего газа (Ar) в камере ПФ, 100 мкм Be фильтр, напряжение зарядки батарей 12 кВ.

На рисунке 2 приведена зависимость интенсивности рентгеновского излучения от величины давления аргона в камере ПФ при фиксированном напряжении на конденсаторах 12 кВ (3.6 кДж). В проведенных экспериментах максимальная амплитуда МРИ, при хорошей повторяемости, наблюдалась при давлении рабочего газа 1.9 Торр. Длительность рентгеновского сигнала, имеющего колоколообразную форму, составляла 5 нс. С увеличением давления от 0.6 до 1.9 Торр амплитуда рентгеновского излучения монотонно увеличивалась. При дальнейшем увеличении давления, помимо начала уменьшения амплитуды импульса МРИ, увеличивалась его длительность. Параллельно с этим импульс МРИ приобретал сначала двухпиковую структуру (при 2.5 Торр второй пик меньше

первого), а потом и многопиковую (при 3.1 Торр), длительность импульса достигала 50 – 70 нс.

Максимальный по амплитуде импульс МРИ при данной конфигурации камеры имеет место при давлении аргона около 2 Торр. По результатам работы [8] (рис. 4 [8]) максимальный выход излучения линий К-серии аргона на установке, близкой по параметрам к нашей, наблюдался при давлении Ar 1.5–2.5 Торр.

*2.2 Мягкое рентгеновское излучение в зависимости от напряжения зарядки конденсаторной батареи.* Измерения МРИ проводились при оптимальном давлении (1.9 Торр) аргона с помощью двух детекторов СППД 11-04 с одинаковыми фильтрами (15 мкм Be), расположенных под углом 45 градусов к вертикальной оси системы и на расстоянии 28 см от источника излучения (в проекции на горизонтальную плоскость наблюдения осуществлялись под углом 90° друг к другу). В результате данных экспериментов была осуществлена взаимная калибровка детекторов, позволившая получить совпадение сигналов по времени с точностью < 1 нс и абсолютной величине < 10% от амплитуды сигнала.

Импульс рентгеновского излучения появлялся при напряжении > 8.5 кВ. При напряжении 9 кВ (рис. 3(а)) сигнал состоял из одного – двух отдельно расположенных пиков с амплитудой до 25 В. С увеличением напряжения до 10 кВ амплитуда импульса возрастала, и в случае, если он состоял из двух пиков, расстояние между ними составляло от 5 до 20 нс (рис. 3(б)). Положительные импульсы на осциллограммах рентгеновских сигналов можно объяснить: 1) электромагнитными наводками во время обрыва тока и 2) заряженными частицами, которые могут формировать импульс положительной полярности.

При 11 кВ рентгеновский сигнал существенно уширялся (рис. 3(с)), в основном первый пик (до 20 нс), за счет своего заднего фронта, приобретая двух- или многогорбую структуру. Второй пик, если он имел место, еще не сливался с первым. На рис. 3(д) видно, что при напряжении 12 кВ не наблюдалось роста амплитуды сигнала, имеющего ту же многогорбую форму. Тем не менее второй пик уже полностью поглощался уширенной частью первого, общая длительность сигнала составляла 20–30 нс. С увеличением напряжения до 13 кВ форма сигнала существенно не изменялась, лишь уширяясь до 40 нс (рис. 3(е)). Во всех случаях пик первого импульса ясно различим.

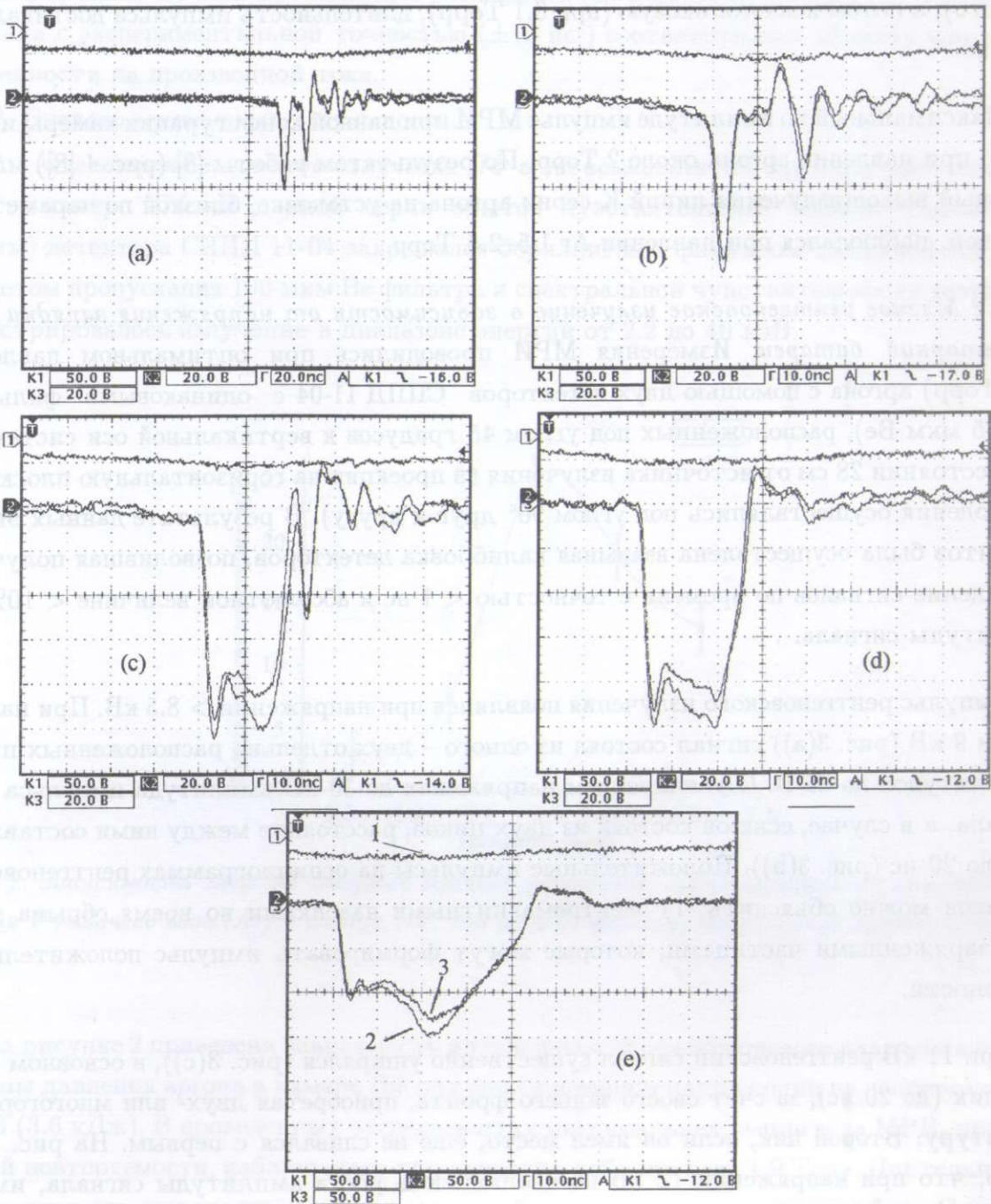


Рис. 3. 1 – производная тока, 2 и 3 – сигналы с рентгеновских датчиков СППД 11-04. Датчики располагались под углом  $45^\circ$  с вертикалью и  $90^\circ$  друг к другу. Оба датчика закрыты одинаковыми фильтрами (15 мкм Ве). Давление аргона во всех экспериментах равнялось 2.1 Торр. (a) – эксперимент при напряжении 9 кВ, (b) – 10 кВ, (c) – 11 кВ, (d) – 12 кВ и (e) – 13 кВ.

2.3 Рентгеновское излучение в двух энергетических диапазонах в зависимости от напряжения зарядки конденсаторной батареи. Использовались два взаимно калиброванных детектора СППД 11-04 с разными фильтрами 15 мкм Be и 50 мкм Be с границами пропускания излучения  $> 1.2$  и  $> 1.8$  кэВ, соответственно (энергия, соответствующая ослаблению фильтром излучения в  $e$  раз). На рис. 4 приведены графики пропускания бериллиевых фильтров толщиной 15 и 50 мкм в зависимости от энергии излучения. Напряжение на конденсаторной батарее менялось в диапазоне от 9 до 14 кВ с шагом 1 кВ.

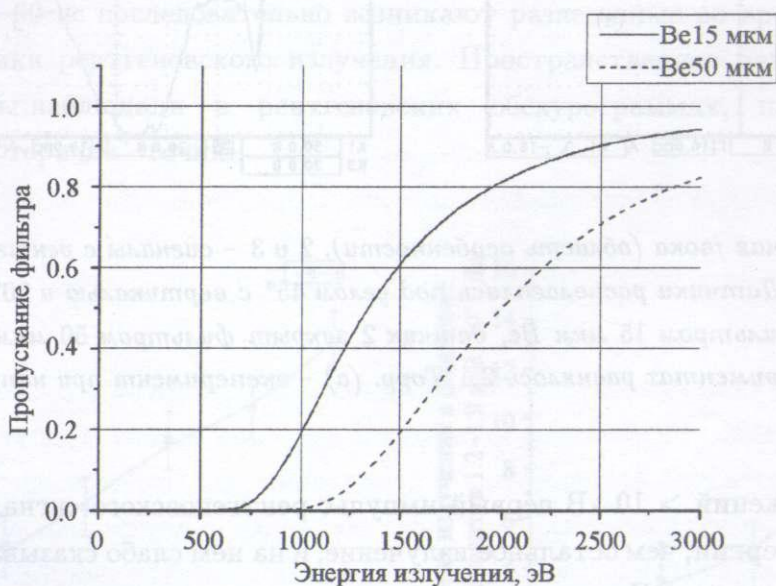


Рис. 4. Графики пропускания бериллиевых фильтров толщиной 15 и 50 мкм.

В диапазоне  $> 1.2$  кэВ импульс МРИ имел тесно слитую двугорбую структуру длительностью  $> 10$  нс. При увеличении зарядного напряжения батареи с 9 кВ (рис. 5(а), 3 канал) до 14 кВ, импульс МРИ изменялся, в первую очередь, за счет уширения заднего фронта, достигая при 14 кВ длительности  $\sim 60$  нс (рис. 5(д), 3 канал), при этом второй горб становился всё более явственным, удаленным от первого, и рост амплитуды импульса (до 70 В) в первую очередь сказывался на нем.

В диапазоне  $> 1.8$  кэВ импульс МРИ при 9 кВ обычно состоял из одного узкого ( $\sim 5$  нс) пика (рис. 5(а), канал 2). С ростом напряжения данный сигнал уширялся до 15 нс при 14 кВ, приобретая двугорбую (скрытую многогорбую) структуру (рис. 5(б), канал 2). Второй горб по амплитуде не превышал амплитуду первого. Первый

горб уже при напряжениях 10–11 кВ сравнился по амплитуде с первым импульсом за 15 мкм Ве фильтром ( $\sim 110$  В).

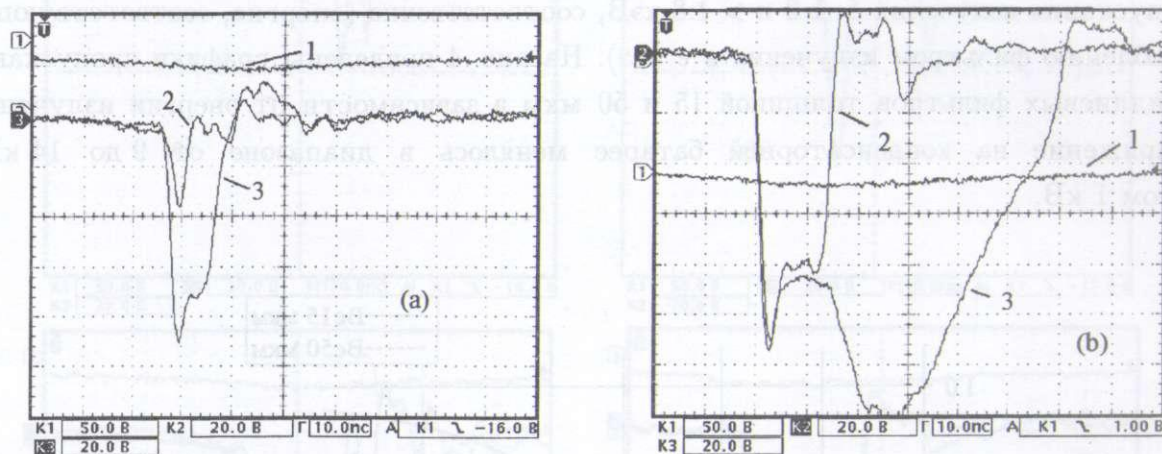


Рис. 5. 1 – производная тока (область особенности), 2 и 3 – сигналы с рентгеновских датчиков СППД 11-04. Датчики располагались под углом  $45^\circ$  с вертикалью и  $90^\circ$  друг к другу. Датчик 3 закрыт фильтром 15 мкм Ве, датчик 2 закрыт фильтром 50 мкм Ве. Давление аргона во всех экспериментах равнялось 2.1 Торр. (а) – эксперимент при напряжении 9 кВ, (б) – при 14 кВ.

В случае напряжений  $> 10$  кВ первый импульс рентгеновского сигнала состоит из квантов большой энергии, чем остальное излучение, и на нем слабо сказывается разница в используемых фильтрах. Последующая часть сигнала, длительность которой в 2–4 раза больше, практически полностью состоит из более мягкой компоненты и полностью поглощается 50 мкм Ве-фильтром.

Излучение с энергией квантов более 2.5 кэВ всегда опережает по времени излучение с меньшей энергией квантов. Амплитуда импульса МРИ значительно изменяется только при росте напряжения от 8 до 10 кВ, при дальнейшем же увеличении напряжения практически не меняется. Проведенные эксперименты с использованием Ве фильтра толщиной 115 мкм, показали, что при напряжениях, более 10 кВ амплитуды импульсов излучений, пропускаемых 115 и 50 мкм Ве фильтрами, отличаются в 2–5 раз. Данный факт говорит о том, что энергия квантов излучения не превышает 3.5 кэВ.

*Обсуждение результатов.* В результате экспериментов при фиксированном напряжении конденсаторной батареи и меняющемся давлении аргона было получено, что мак-



симальный по амплитуде импульс МРИ имел место при давлении аргона около 2 Торр. Мы объясняем данный факт тем, что при данных условиях достигается оптимальная согласованность разрядного контура с динамической плазменной нагрузкой, т.е. максимум тока совпадает с моментом максимального сжатия плазмы. Абсолютный выход мягкого рентгеновского излучения в  $4\pi$  при оптимальных условиях составил около 25 мДж.

Многопиковая структура сигнала в экспериментах с различным напряжением конденсаторной батареи, свидетельствует, если отбросить версию о пульсирующем во времени источнике МРИ, о том, что за время длительности рентгеновского импульса 5–60 нс последовательно возникают разнесенные во времени и в пространстве источники рентгеновского излучения. Пространственное разделение источников излучения мы наблюдали в рентгеновских обскурোগраммах, на которых видны отдельные “горячие” точки.

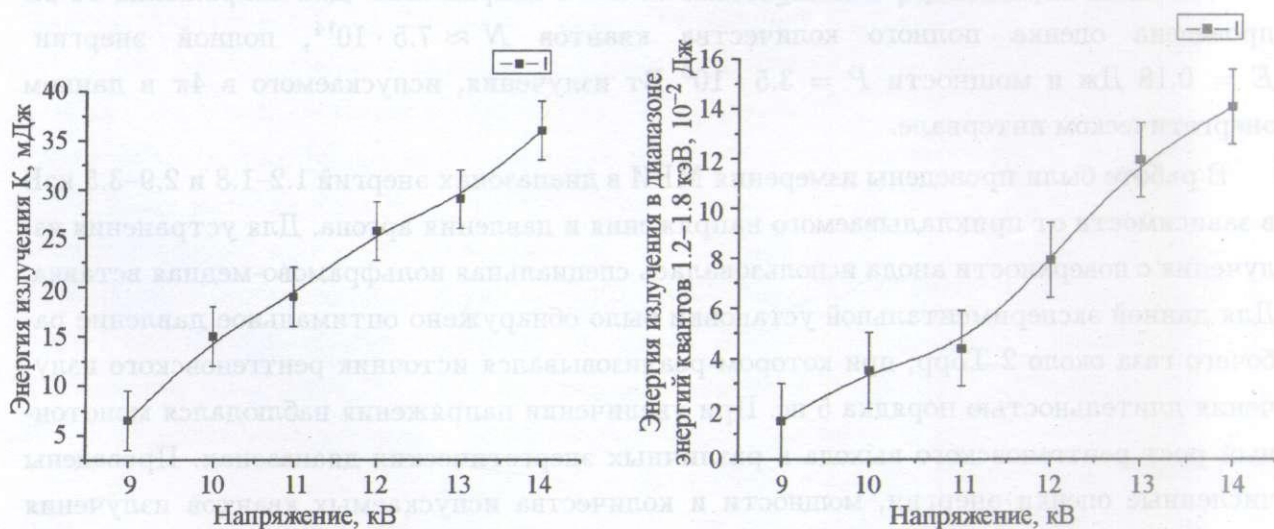


Рис. 6. Зависимость полной энергии мягкого рентгеновского излучения аргона в диапазоне энергии квантов от 2.95 до 3.5 кэВ, испускаемого плазменным фокусом, от напряжения конденсаторной батареи.

Рис. 7. Зависимости полной энергии излучения для квантов из энергетического интервала от 1.2 до 1.8 кэВ от прикладываемого напряжения.

В наших экспериментах наблюдались два типа источников. Первый по времени источник, а при низком напряжении и единственный, возникает из области пинчевания, испуская более “жесткое” излучение. Длительность рентгеновского импульса такого

источника около 5 нс по полувысоте. Его излучение, по-видимому, соответствует свечению  $K_{\alpha}$  и других линий аргона, лежащих в диапазоне 2.95–3.5 кэВ (3.6–4.2 Å) [8]. Для данного энергетического интервала (при напряжении 14 кВ) проведена оценка полного количества квантов  $N \approx 1.2 \cdot 10^{14}$ , полной энергии  $E = 36$  мДж и мощности  $P = 3.5 \cdot 10^6$  Вт излучения, испускаемого в  $4\pi$ . График зависимости полной энергии импульса МРИ от прикладываемого напряжения для этого энергетического интервала, приведен на рис. 6.

Другой тип источника испускает более мягкое рентгеновское излучение в диапазоне 1.2–1.8 кэВ (7–10 Å). Излучение идет из области плазмы, окружающей горячие точки (короны). Его интенсивность значительно увеличивается с ростом подаваемого напряжения. При увеличении напряжения конденсаторной батареи от 9 до 14 кВ длительность излучения в данном энергетическом диапазоне меняется от 5 до 40–60 нс.

На рис. 7 приведен график зависимости полной энергии рентгеновского импульса из области  $E \in [1.2; 1.8]$  кэВ от прикладываемого напряжения. Для напряжения 14 кВ проведена оценка полного количества квантов  $N \approx 7.5 \cdot 10^{14}$ , полной энергии  $E = 0.18$  Дж и мощности  $P = 3.5 \cdot 10^6$  Вт излучения, испускаемого в  $4\pi$  в данном энергетическом интервале.

В работе были проведены измерения МРИ в диапазонах энергий 1.2–1.8 и 2.9–3.5 кэВ в зависимости от прикладываемого напряжения и давления аргона. Для устранения излучения с поверхности анода использовалась специальная вольфрамово-медная вставка. Для данной экспериментальной установки было обнаружено оптимальное давление рабочего газа около 2 Торр, при котором реализовывался источник рентгеновского излучения длительностью порядка 5 нс. При увеличении напряжения наблюдался монотонный рост рентгеновского выхода в различных энергетических диапазонах. Проведены численные оценки энергии, мощности и количества испускаемых квантов излучения при давлении 2 Торра и напряжении 14 кВ. В результате данных экспериментов можно сделать вывод, что при определенных параметрах плазменного фокуса, он может быть использован в качестве наносекундного интенсивного спектрально перестраиваемого источника мягкого рентгеновского излучения для различных применений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 06-02-17398.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. Ya. Nikulin, V. M. Romanova, and M. Sholz, Proc. of SPIE **4460**, 55 (2002).

- [2] В. А. Веретенников, В. А. Грибков, А. В. Дубровский, А. И. Исаков и др., Прикладная физика, вып. 1, 35 (1997).
- [3] V. A. Gribkov, A. V. Dubrovsky, A. I. Isakov, O. N. Krohin, et. al., Physica Scripta **57**, 488 (1998).
- [4] В. А. Грибков, С. Денус, А. В. Дубровский, А. И. Исаков и др., Физика плазмы **11**(1), 117 (1985).
- [5] Н. В. Калачев, О. Н. Крохин, А. А. Лошманов, В. Я. Никулин и др., Тезисы II нац. конференции РСНЭ, 1999 (Москва, ИКРАН, 1999), р. 310.
- [6] S. P. Eliseev, V. Ya. Nikulin, A. V. Oginov, A. A. Tikhomirov, Probl. Atomic Science and Tech. **6**, 147 (2006).
- [7] <http://www.niiit.ru/catalog/det/sppd11.php>
- [8] M. Zakaullah, K. Alamgir, and M. Shafiq, Journ. of Fusion Energy **19**(2), 143 (2002).

Поступила в редакцию 11 июня 2008 г.