

# ИСТОЧНИК СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ X-ПИНЧА И МАЛОГАБАРИТНОГО НИЗКОИНДУКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА ТОКА

*Г. А. Месяц<sup>а</sup>, Т. А. Шелковенко<sup>а</sup>, Г. В. Иваненков<sup>а</sup>, А. В. Агафонов<sup>а</sup>, С. Ю. Савинов<sup>а</sup>, С. А. Пикуз<sup>а\*</sup>, И. Н. Тиликин<sup>б</sup>, С. И. Ткаченко<sup>б</sup>, С. А. Чайковский<sup>с</sup>, Н. А. Ратахин<sup>с</sup>, В. Ф. Федушак<sup>с</sup>, В. И. Орешкин<sup>с</sup>, А. В. Федюнин<sup>с</sup>, А. Г. Русских<sup>с</sup>, Н. А. Лабеецкая<sup>с</sup>, А. П. Артемов<sup>с</sup>, Д. А. Хаммер<sup>д\*\*</sup>, Д. Б. Синарс<sup>е\*\*\*</sup>*

<sup>а</sup> *Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук  
119991, Москва, Россия*

<sup>б</sup> *Московский физико-технический институт  
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

<sup>с</sup> *Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук  
634055, Томск, Россия*

<sup>д</sup> *Корнельский университет, Итака, Нью Йорк 14853, США*

<sup>е</sup> *Национальная лаборатория Сандия, Альбукерки, Нью Мексико 87185, США*

Поступила в редакцию 25 февраля 2010 г.

Впервые реализован режим образования горячей точки микронных размеров в плазме X-пинча при его питании от генератора тока на основе низкоиндуктивных конденсаторов и быстрых коммутаторов тока. Найдены конфигурации X-пинчей, эффективно используемые в качестве точечного источника мягкого рентгеновского излучения с таким генератором тока. Создан прототип малогабаритного источника излучения для высокоразрешающей точечной проекционной рентгенографии. Исследованы основные параметры X-пинча как источника излучения и проведено их сравнение с параметрами X-пинчей на высоковольтных установках с формирующими линиями. Анализ данных о работе X-пинчей на генераторах с разными параметрами позволил найти простые соотношения, позволяющие осуществлять выбор оптимальных начальных параметров X-пинча.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

X-пинч, впервые предложенный и реализованный в Физическом институте им. П. Н. Лебедева [1], в настоящее время является одним из самых ярких ( $10^{15}$ – $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> · ср [2, 3]) лабораторных источников излучения в мягком рентгеновском диапазоне (1–10 кэВ). Уникальные параметры источника (микронные размеры и пикосекундная длительность вспышки излучения [4, 5]) делают его незаменимым для использования в проекционной рентге-

нографии различных физических [6] и биологических [7] объектов. Применение рентгенографии в исследованиях быстрых Z-пинчей на основе взрывающихся проволочек [8, 9] позволило получить настолько важные экспериментальные данные [10, 11], что потребовалось радикальное изменение взглядов на процессы, в них происходящие. Это относится как к начальной фазе взрыва проволочек, где было обнаружено, что вещество находится в многофазном состоянии [12, 13], так и к фазе формирования перетяжки и образования горячих точек [14, 15]. Горячей точкой мы называем плазменное образование с тем-

\*E-mail: pikuz@mail.ru

\*\*D. A. Hammer, D. B. Sinars

пературой выше 500 эВ, плотностью порядка плотности твердого тела и размером не более 10 мкм, со спектром излучения близким к спектру черного тела [2, 16, 17].

В то же время успехи практического использования X-пинча в биологических исследованиях значительно скромнее. Связано это с тем, что до настоящего времени генераторы X-пинчей представляли собой сложные и громоздкие экспериментальные установки. Это определялось необходимостью обеспечения тока через нагрузку более 50 кА со скоростью нарастания не менее 1 кА/нс, причем последний параметр оказался критическим [18]. К настоящему времени ни в одном эксперименте, где скорость нарастания тока была меньше этой величины, независимо от амплитуды тока, не удалось достигнуть формирования горячей точки и получить яркий источник излучения.

В реальных установках высокая скорость нарастания тока, особенно через такую нагрузку как X-пинч, обладающую достаточно высокой индуктивностью, обеспечивалась использованием высоковольтных схем обострения импульсов с генератором Маркса, промежуточной емкостью и одинарной формирующей линией [19]. В таких схемах требуемые параметры импульсов тока достигаются ценой снижения эффективности устройства в целом из-за неизбежных потерь энергии в каждом узле генератора тока. Применение высоковольтных генераторов для питания X-пинча достаточно легко обеспечивало требуемую скорость нарастания тока. Однако при обрыве перетяжки, который происходит всегда после распада горячей точки, в диоде формируется поток электронов с энергиями в сотни килоэлектронвольт, которые при торможении генерируют жесткое рентгеновское излучение [2, 20]. При одинаковых скоростях обрыва тока перетяжки, которые не должны существенно зависеть от установки, так как определяются процессами в горячей точке [15], всплеск напряжения будет тем больше, чем выше индуктивность цепи, которая у высоковольтных систем достаточно велика.

Таким образом, во всех высоковольтных установках наряду с мягким рентгеновским излучением, которое используется в проекционной рентгенографии, присутствует жесткое фоновое излучение, создающее определенные технические проблемы. Особенно серьезными эти проблемы становятся при регистрации изображений электронным способом с использованием приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), чувствительность которых к жесткому излучению весьма высока.

Альтернативой генераторам с обострением импульса могут служить генераторы с низкоиндуктивными конденсаторами. Однако до последнего времени практически все попытки использования конденсаторов для питания X-пинчей были неудачными (см. обзор [18]), так как все они имели скорость нарастания тока меньше 1 кА/нс. Единственным исключением являются эксперименты на установке PIAF [21], в которых была достигнута эта пороговая величина и наблюдались горячие плазменные образования, параметры которых, однако, подробно не исследовались.

Развитие техники малоиндуктивных конденсаторов и высоковольтных искровых коммутаторов с малым разбросом времени срабатывания [22] позволяет в настоящее время создавать малогабаритные генераторы с большим выходным током (на уровне нескольких сотен килоампер) при высокой скорости его нарастания. Такие генераторы являются перспективными источниками тока для X-пинчей, на их основе могут быть созданы системы для высокоразрешающей проекционной рентгенографии в мягком рентгеновском диапазоне для различных практических приложений. В частности, в Институте сильноточной электроники СО РАН был разработан генератор тока (выходной ток более 300 кА на короткозамкнутую нагрузку с временем нарастания около 200 нс) [23], на котором была продемонстрирована возможность применения подобных устройств как источника тока для X-пинча.

В настоящей работе представлены результаты первых исследований работы X-пинча с малогабаритным генератором тока в качестве источника мягкого рентгеновского излучения (установка МИНИ — малогабаритный импульсно-накопительный источник). Целью этой работы было измерение энергетических пространственно-временных характеристик источника, а также оценка его пригодности для проекционной рентгенографии.

Кроме того, в данной работе выполнен сравнительный анализ данных, полученных в экспериментах с X-пинчами на других установках с различными параметрами разряда, с целью установления некоторых параметров масштабирования. Иными словами, сделана попытка найти соотношения, связывающие параметры установок (ток и скорость его нарастания) с необходимыми для нормальной работы X-пинчей параметрами нагрузки (материал и линейная масса). До сих пор во всех экспериментах оптимальные параметры нагрузки X-пинча подбирались, как правило, эмпирически на основе опыта предыдущих исследований.

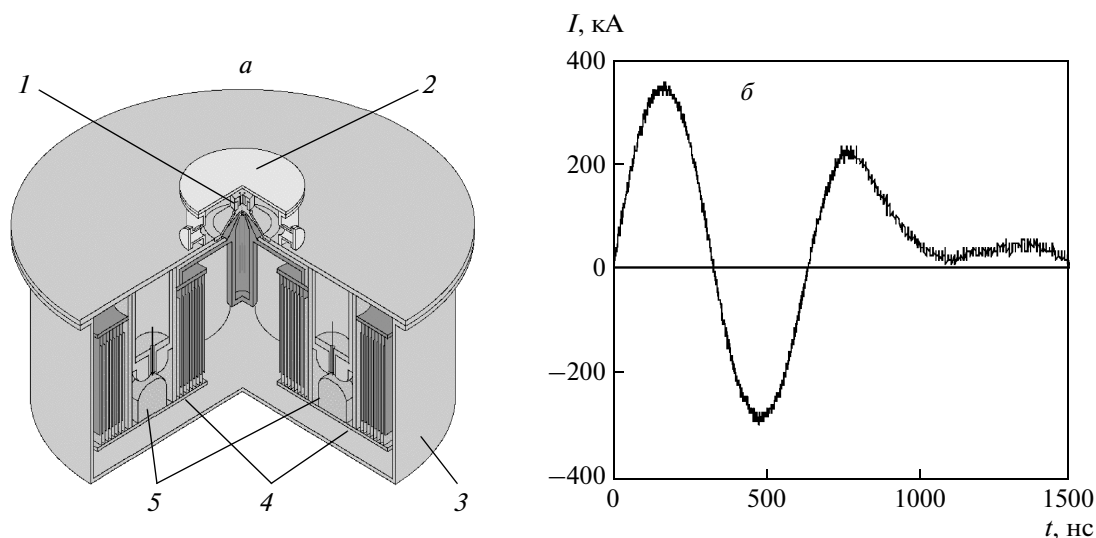


Рис. 1. а) Схема генератора установки МИНИ: 1 — X-пинч; 2 — вакуумная камера; 3 — корпус; 4 — коаксиальные конденсаторы, 5 — газовые разрядники. б) Ток установки МИНИ на короткозамкнутую нагрузку

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Малогабаритный импульсно-накопительный источник тока

В генераторе тока установки МИНИ используются четыре конденсаторно-коммутаторные сборки емкостью 0.25 мкФ каждая, соединенные параллельно и помещенные в общий бак с трансформаторным маслом диаметром 45 см и высотой 33 см (рис. 1а). Энергозапас генератора составляет 1 кДж при зарядном напряжении 45 кВ. Благодаря использованию малоиндуктивных конденсаторов и быстрых разрядников, генератор обеспечивает выходной ток на короткозамкнутую нагрузку 340 кА при длительности первой четверти разрядного тока порядка 200 нс. Скорость нарастания тока превышает критическую величину 1 кА/нс, необходимую для нормальной работы X-пинча. Конструкция вакуумного диода, в котором устанавливалась нагрузка, обеспечивала минимальную индуктивность разрядной цепи. Диодный промежуток также выбирался минимальным, однако достаточным, чтобы не происходило его перекрытия холодной плазмой, образующейся на электродах под действием УФ-излучения при начальном взрыве проволочек X-пинча. Скорость расширения плазмы составляет  $(1-2) \cdot 10^6$  см/с [24] или 0.01–0.02 мм/нс, поэтому с учетом длительности фронта импульса 200 нс величина промежутка бы-

ла выбрана равной 8 мм. Ток генератора измерялся с помощью интегрирующего пояса Роговского. Характерная экспериментальная осциллограмма тока короткого замыкания представлена на рис. 1б.

### 2.2. Характеристики рентгеновского излучения

Временные характеристики мягкого рентгеновского излучения ( $0.5 \text{ кэВ} < E_\gamma < 10 \text{ кэВ}$ ) исследовались с помощью быстрых датчиков, установленных на фланцах вакуумной камеры, в качестве которых использовались алмазные детекторы с фотопроводимостью — ФПД (photoconductive detector, PCD) с временным разрешением примерно 0.2 нс [25]. Чувствительность ФПД является постоянной вплоть до энергии квантов излучения 8 кэВ, а затем экспоненциально убывает из-за уменьшения поглощения излучения в алмазе (толщина кристалла равнялась 0.5 мм). Для регистрации более жесткого излучения использовался кремниевый полупроводниковый диод — ППД (semiconductive diode, SCD) марки HXUV-5HS с временным разрешением около 0.5 нс фирмы IRD [26], чувствительный к излучению с энергией квантов вплоть до 50 кэВ.

В экспериментах одновременно регистрировались сигналы двух датчиков: один всегда был ФПД с фильтром из бериллиевой фольги толщиной 10 мкм (энергия отсечки  $E_\gamma = 0.8 \text{ кэВ}$ ), а в качестве второго датчика использовался либо аналогичный

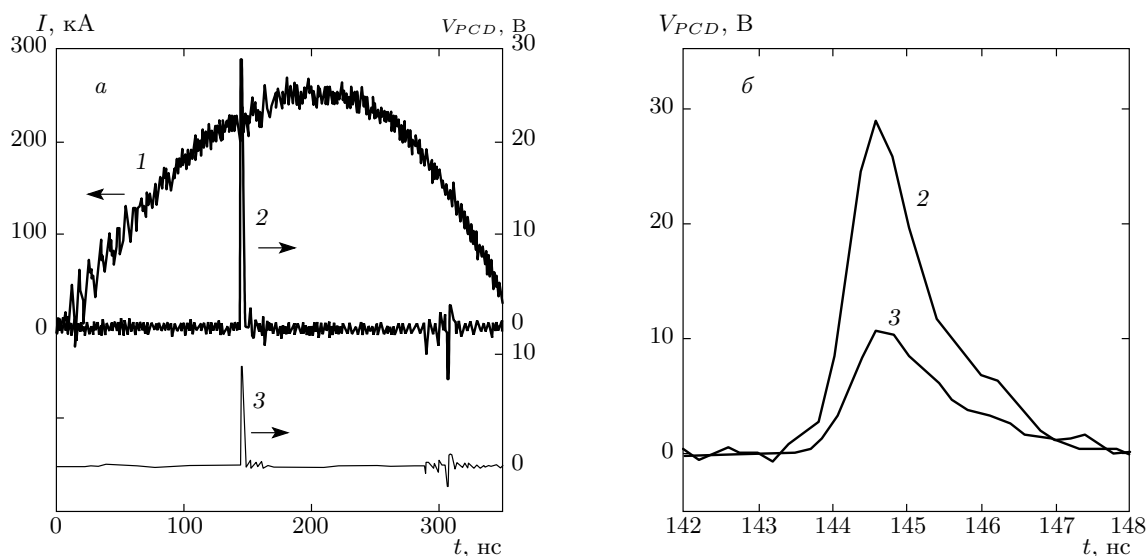


Рис. 2. а) Ток нагрузки и характерные сигналы ФПД для X-пинча из четырех молибденовых проволочек диаметром 25 мкм: 1 — осциллограмма тока; 2 — сигнал ФПД с фильтром из бериллия толщиной 10 мкм; 3 — сигнал ФПД с фильтром из титана толщиной 12.5 мкм. б) Сигналы ФПД, показанные в большем масштабе

ФПД с фильтром из титановой фольги толщиной 12.5 мкм (при этом регистрировалось в основном излучение, пропускаемое фильтром в области  $K$ -края поглощения титана,  $2.5 \text{ кэВ} < E_\gamma < 5 \text{ кэВ}$ ), либо кремниевый диод с фильтром из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм и пленки из лавсана толщиной 12 мкм (энергия отсечки  $E_\gamma = 5 \text{ кэВ}$ ). Для записи сигналов использовался осциллограф Tektronix TDS 3054 с полосой пропускания 500 МГц. Характерные сигналы ФПД с двумя энергиями отсечки относительно тока нагрузки представлены на рис. 2.

Примечательной особенностью X-пинча на установке МИНИ является отсутствие в большинстве экспериментов вторичных импульсов генерации рентгеновского излучения, по крайней мере в пределах временного разрешения датчиков. При этом длительность импульсов примерно соответствовала временному разрешению регистрирующей системы (рис. 2б). Это свидетельствует о том, что при сжатии перетяжки образуется одна или несколько горячих точек, расположенных очень близко, на расстоянии не более десятка микрон. В последнем случае существует более тонкая временная структура импульса рентгеновского излучения, как это наблюдалось, к примеру, на установке ХР [5, 27], однако, для ее регистрации необходимо использование рентгеновских хронографов с временным разрешением порядка единиц пикосекунд.

Пространственная структура излучающей области X-пинча исследовалась с помощью камеры-обскуры с диаметром отверстия 250 мкм. Сравнительно большой диаметр был выбран потому, что, как показывает наш предыдущий опыт, размер горячей точки, как правило, меньше размера отверстия любой реальной камеры-обскуры. Кроме того, при малом диаметре отверстия светосила камеры-обскуры для менее яркого излучения плазмы большего размера становится слишком малой, что не позволяет наблюдать полную картину излучения X-пинча.

Изображение X-пинча из четырех молибденовых проволочек показано на рис. 3а. Изображение имеет характерный для X-пинча вид, т. е. наблюдаются изображение горячей точки (точнее, изображение отверстия камеры-обскуры) в районе перекрестия проволочек и размытое изображение плазмы в тормозном излучении электронного пучка, возникающего с анодной стороны пинча при обрыве перетяжки после взрыва горячей точки. Видно, что изображение отверстия, во-первых, имеет резкий край, что свидетельствует о малом размере источника (не более 10–20 мкм), и, во-вторых, не имеет структуры, т. е. в пределах разрешения камеры-обскуры (в пределах резкости изображения края отверстия) этот источник единственный. Кроме того, по сравнению с X-пинчами, полученными на высоковольтных установках с формирующими линиями, жесткость и от-

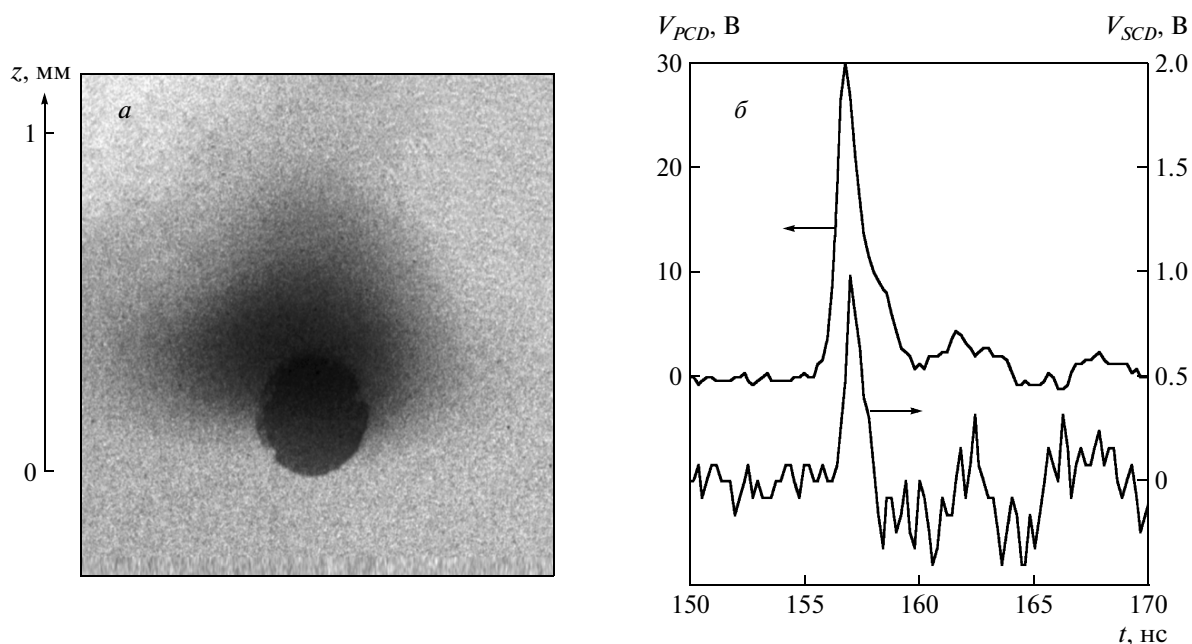


Рис. 3. а) Характерная обскурограмма X-пинча из четырех молибденовых проволочек диаметром 25 мкм. б) Осциллограммы сигналов с ФПД, регистрирующего мягкое излучение с энергиями фотонов более 0.8 кэВ, и с кремниевого ППД, регистрирующего жесткое излучение с энергиями более 5 кэВ

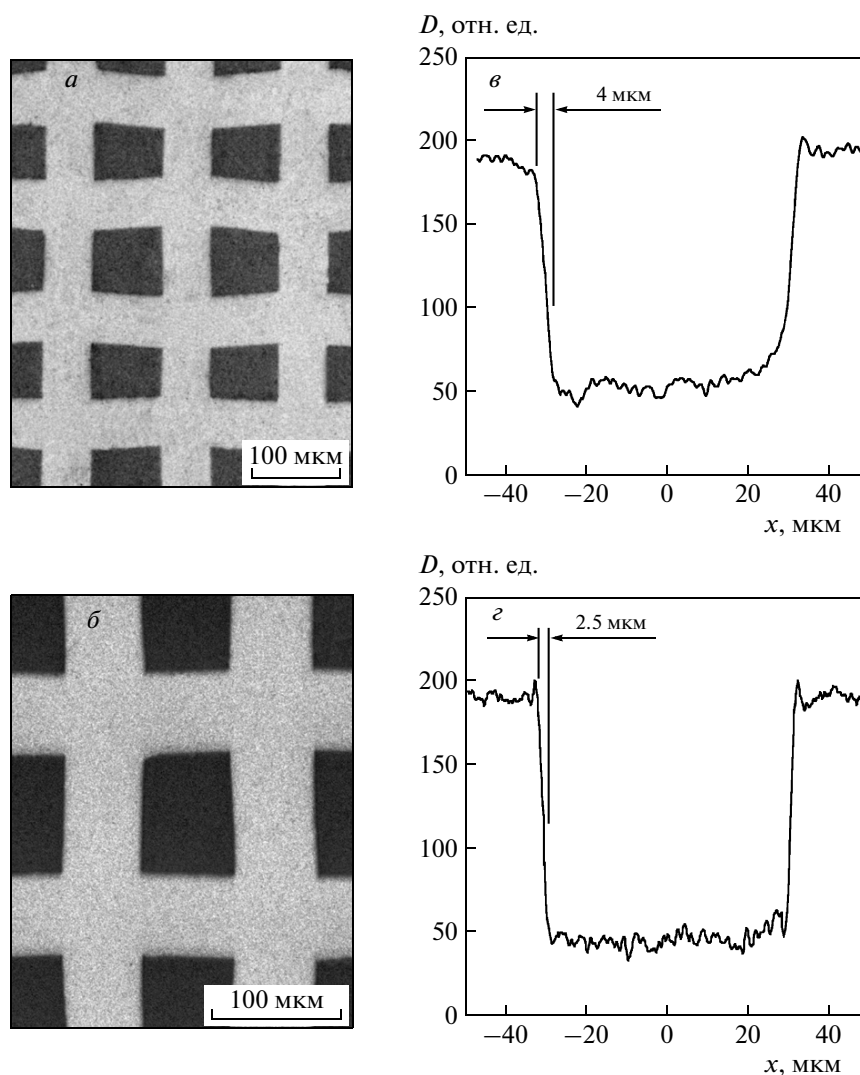
носительная интенсивность тормозного излучения электронного пучка в данном случае значительно ниже.

На рис. 3б приведены осциллограммы сигналов ФПД, регистрирующего мягкое излучение с энергиями фотонов более 0.8 кэВ, и кремниевого ППД, регистрирующего жесткое излучение с энергиями более 5 кэВ. Принимая во внимание тот факт, что чувствительность кремниевого ППД по крайней мере на два порядка выше чувствительности алмазного детектора [28], можно сделать вывод, что интенсивность жесткого излучения в наших экспериментах была очень низкой. Это исключительно важное обстоятельство для проекционной рентгенографии с использованием X-пинча как источника излучения. Жесткое излучение является фоновым и, как уже указывалось во Введении, может представлять серьезную проблему. Кроме того, оно ограничивает применение X-пинча как источника мягкого рентгеновского излучения, например, для рентгенолитографии [29].

Структура и размеры излучающей области X-пинча более детально исследованы при анализе изображений различных тест-объектов, полученных с большим увеличением [4, 30]. На рис. 4 приведены изображения сетки, сплетенной из стальных проволочек диаметром 60 мкм, полученные

в излучении вольфрамового (четыре проволочки диаметром 20 мкм) и молибденового (четыре проволочки диаметром 25 мкм) X-пинчей с увеличениями соответственно  $\times 10$  и  $\times 17$ . В экспериментах изображения, как правило, регистрировались на две фотоленки, расположенные одна за другой на расстоянии 30 см от источника излучения за фильтром из титановой фольги толщиной 12.5 мкм. Первая фотоленка была Микрат 200 и служила дополнительным фильтром для изображения на второй фотоленке DEF фирмы Kodak, обладающей большей чувствительностью к жесткому излучению. Размер источника можно оценить по ширине полутени изображения края проволочек. На рис. 4в,г приведены соответствующие денситограммы изображений.

Измеренные таким образом размеры излучающей области X-пинчей изменялись от 2.5 до 4 мкм в зависимости от энергетического диапазона излучения и материала проволочек X-пинчей. Следует отметить, что приведенные значения являются лишь оценкой размеров источников сверху, так как полученные величины были одного порядка с дифракционным пределом разрешения для данной геометрии эксперимента и энергии излучения. Более точные значения могут быть получены при детальном волновом анализе изображений специально подобран-



**Рис. 4.** а) Изображение сетки, полученное в излучении X-пинча из четырех вольфрамовых проволочек диаметром 20 мкм на первой пленке ( $2.5 \text{ кэВ} < E_\gamma < 5 \text{ кэВ}$ ). б) Изображение сетки, полученное в излучении X-пинча из четырех молибденовых проволочек диаметром 25 мкм на второй пленке ( $E_\gamma > 5 \text{ кэВ}$ ). в) и з) Денситограммы изображений соответственно а) и б). Координаты  $x$  лежат в плоскости изображаемого объекта

ных тест-объектов (например, полупрозрачных нитей [30] или щелевых масок [4]).

Для количественного определения энерговыхода излучения X-пинчей использовались данные об абсолютной чувствительности алмазных фотодетекторов [25, 28]. В табл. 1 представлены результаты измерений выхода рентгеновского излучения (усредненные по всем выстрелам с одинаковыми током и нагрузкой) в двух спектральных диапазонах. Данные приведены для наиболее часто применяемых X-пинчей из молибденовых и вольфрамовых проволочек как для установки МИНИ, так и для двух других установок, XP [31] и COBRA [32] Корнельского

университета (Итака, США), на которых нами проводились эксперименты по оптимизации энерговыхода мягкого рентгеновского излучения в зависимости от линейной массы X-пинчей. В табл. 1 использовались данные измерений энерговыхода горячей точки X-пинчей с линейной массой, близкой к оптимальной для данной установки и определяемой материалом, диаметром используемых проволочек и их числом. При наличии нескольких вспышек излучения X-пинча в расчет принималась первая вспышка, которая, как было показано [3, 31], генерируется горячей точкой (в том смысле, как она определена во Введении). Все последующие вспышки (если они на-

**Таблица 1.** Усредненный выход рентгеновского излучения и эффективность генерации мягкого рентгеновского излучения в двух спектральных диапазонах для наиболее часто применяемых X-пинчей из молибдена и вольфрама, полученные на трех установках

Параметры генератора (амплитуда тока, длительность фронта, запасенная энергия)	Материал проволочек	Линейная масса $M$ , мкг/см	Энерговывод, мДж Эффективность	
			$E_\gamma > 0.8$ кэВ	$2.5 < E_\gamma < 5$ кэВ
МИНИ (300 кА, 200 нс, 1 кДж)	Mo	330	320 $3.2 \cdot 10^{-4}$	43 $0.43 \cdot 10^{-4}$
	W	280	160 $1.6 \cdot 10^{-4}$	20 $20 \cdot 10^{-6}$
XP (450 кА, 45 нс, 12 кДж)	Mo	230	290 $2.4 \cdot 10^{-5}$	52 $4.3 \cdot 10^{-6}$
	W	280	360 $3.0 \cdot 10^{-5}$	80 $6.6 \cdot 10^{-6}$
COBRA (1000 кА, 100 нс, 100 кДж)	Mo-W	1700	—	1000 $1.0 \cdot 10^{-7}$

блюдаются) связаны с источниками излучения большего размера или излучением электронного пучка и являются паразитными для проекционной рентгенографии.

Следует отметить, что для генератора COBRA приведено значение энерговывода X-пинча, оптимизированного не только по массе, но и по конфигурации X-пинча. В этих экспериментах исследовался энерговывод сложных многослойных X-пинчей с симметричной укладкой проволочек в перекрестии. В табл. 1 приведены данные для X-пинчей, состоящих из одной центральной проволочки из молибдена, шести проволочек из молибдена во внутренней оболочке и двенадцати проволочек из вольфрама во внешней оболочке (все проволочки имели диаметр 25 мкм) [32].

В табл. 1 также приведена эффективность генераторов для двух диапазонов излучения X-пинчей, которая определялась как отношение энергии, излученной горячей точкой, к энергозапасу генератора. Из табл. 1 видно, что эффективность генератора МИНИ в несколько раз выше эффективности генераторов XP и COBRA для более жесткого диапазона излучения ( $2.5 \text{ кэВ} < E_\gamma < 5 \text{ кэВ}$ ) и более чем на порядок выше эффективности генератора XP для диапазона энергии квантов выше 0.8 кэВ.

Сопоставление X-пинча с другими источниками

мягкого рентгеновского излучения, например с лазерной плазмой, выходит за рамки настоящей работы. Однако следует заметить, что весь комплекс параметров (длительность, размер, выходная энергия, яркость, эффективность) для других источников является практически недостижимым.

### 2.3. Параметры масштабирования для оптимизации X-пинчей

Несмотря на то что X-пинч исследуется уже достаточно продолжительное время на различных установках, параметры масштабирования начальных условий (ток, скорость нарастания тока, материал проволочек, количество проволочек, линейная масса нагрузки, конфигурация нагрузки), при которых X-пинч оптимален, до сих пор не известны и в каждом конкретном случае определяются экспериментально. Связано это, во-первых, с тем, что X-пинч представляет собой систему, которая принципиально работает при весьма широком выборе начальных условий. Во-вторых, процессы в X-пинче достаточно сложны, и пока не существует теоретической модели, которая их адекватно описывает на всех стадиях. В-третьих, систематические исследования удастся провести на одной конкретной установке, а установки очень сильно различаются.

Таблица 2. Параметры масштабирования для X-пинчей на различных установках

Материал	Установка	Конфигурация X-пинча*	Линейная масса $M$ , мкг/см	Время $t$ , нс	Ток $I$ , кА	$It/M$ , кА·нс·см/мкг	$X \cdot 10^5$
Молибден	БИН	Од. (4 × 20)	148	82	240	133	1.6
	ХР	Пар. (2 × 17.5)	56	36	240	150	2.3
	ХР	Од. (4 × 25)	231	65	460	130	1.7
	МИНИ	Од. (4 × 30)	333	180	250	135	1.9
Вольфрам	Дон [1]	Од. (4 × 8)	45	42	120	112	2.5
	БИН	Од. (4 × 13)	118	67	190	108	2.3
	ХР	Обр. (2 × 10)	35	58	70	120	2.8
	ХР	Пар. (2 × 17.5)	107	45	250	105	2.2
	ХР	Од. (4 × 20)	280	47	500	84	1.4
	СОВРА	Од. (19 × 25)	1860	100	1000	53	0.5
	МИНИ	Од. (4 × 20)	280	140	240	120	2.8

Примечание: \*Од. — одиночный X-пинч; Пар. — один из двух X-пинчей, установленных в параллель; Обр. — X-пинч в обратном токопроводе. В скобках приведены количество и диаметр проволочек в микрометрах.

До сих пор были доступны данные (причем далеко не полные) для установок с формирующими линиями. Расширение диапазона начальных параметров при использовании установок принципиально иного типа, в частности генератора МИНИ, позволяет получить дополнительную информацию по данной проблеме. Например, несмотря на то что генераторы МИНИ и ХР сильно различаются по всем параметрам (см. табл. 1), оптимальные параметры нагрузок и выход излучения оказались достаточно близкими, что было, вообще говоря, достаточно неожиданным. Такое совпадение означает, что для существования X-пинчей важными является не каждый параметр установки в отдельности, а какие-то их комбинации, которые, возможно, являются универсальными для всех установок. Ниже мы попытаемся найти такие комбинации параметров.

Одним из общепринятых параметров масштабирования, введенным при анализе сжатия многопроволочныхборок (см., например, работу [33]), является параметр

$$\Pi = \frac{I^2 t^2}{Mc^2 a_0^2}, \quad (1)$$

где в качестве  $I$  обычно берется  $I_0$  — максимальный ток через нагрузку,  $t$  — время МГД-сжатия,  $a_0$  — начальный радиус сборки и  $M$  — линейная масса

сборки. В экспериментах с проволочными сборками величина  $\Pi \approx \text{const}$ .

Если в качестве  $a_0$  взять начальный радиус шнура плазмы, а величины в знаменателе отнести к моменту вспышки рентгеновского излучения, то параметр  $\Pi$  представляет величину относительного сжатия пинча по радиусу. Действительно, этот критерий можно представить в виде

$$\Pi = (c_A t / a_0)^2,$$

где  $c_A = B / \sqrt{4\pi\rho}$  — альфвеновская скорость, характеризующая процесс сжатия плазмы,  $B = 2I / ca_0$  — магнитное поле,  $\rho$  — плотность вещества в пинче.

В случае X-пинча в качестве  $a_0$  можно взять средний радиус перекрестия, «заплатив» за это изменением масштаба значений параметра  $\Pi$ . Учитывая, что линейная масса  $M = 4\pi\rho a_0^2$ , исключим  $a_0$  и, отбрасывая константы, перепишем критерий (1) в виде

$$X = \frac{I^2 t^2 \rho}{M^2} \approx \text{const}. \quad (2)$$

Для X-пинча пока не определены критерии выбора значений величин, в особенности плотности  $\rho$ . Однако представляется интересным провести анализ экспериментов с X-пинчами на различных установках с точки зрения выполнения соотношения (2).



В табл. 2 приведены значения параметров  $I$ ,  $t$ ,  $M$  и  $X$  для X-пинчей различных конфигураций из вольфрамовых и молибденовых проволочек на установках, упомянутых выше, а также установки БИН Физического института им. П. Н. Лебедева [34]. При этом выбирались эксперименты, в которых момент генерации излучения (момент образования горячей точки) был близок к максимуму импульса тока. Видно, что, несмотря на очень большие различия в величинах, соотношения, определяемые формулой (2) для одного материала, различаются в большинстве случаев в пределах  $\pm 20\%$ , что, учитывая чрезвычайную сложность процессов в X-пинче, можно считать очень хорошим совпадением. «Выпадающие» значения для установки ХР для одиночных X-пинчей из вольфрама требуют проведения более подробного анализа. На установках с током более 1 МА пока проведено мало экспериментов, и требуется накопление большего числа экспериментальных данных. При сопоставлении X-пинчей из разных материалов следует учесть, что в формуле (2) величина плотности, вообще говоря, должна браться с учетом реального состояния вещества в перетяжке.

Наши исследования показали, что вещество в перекрестии на стадии формирования и первичного сжатия перетяжки находится в двухфазном паро-жидкостном состоянии [12–16, 31]. Плотность такого вещества в случае X-пинча для тугоплавких материалов примерно на порядок меньше исходной плотности проволочек и может в начальной фазе формирования перетяжки различаться даже для одного вещества на разных установках или при различных конфигурациях X-пинча [14, 31]. Поэтому мы вполне отдаем себе отчет в том, что соотношение (2) не имеет абсолютного характера, однако вполне может быть использовано при предварительном планировании различных экспериментов с X-пинчами.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые создан и исследован прототип малогабаритного источника для точечной проекционной рентгенографии:

- 1) создан простой малогабаритный сильноточный генератор с высокой скоростью нарастания тока, пригодный для питания X-пинчей;
- 2) найдены конфигурации X-пинчей, эффективно используемые в качестве точечного источника мягкого рентгеновского излучения;
- 3) исследованы основные параметры X-пинча как источника мягкого рентгеновского излучения;

4) предложены простые соотношения, позволяющие осуществлять выбор оптимальных начальных параметров X-пинча для различных типов генераторов тока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 09-08-00734-а, 08-02-00993, 09-02-00715), программы Президиума РАН «Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц, генерации электромагнитного излучения в системах большой мощности», Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Госконтракт № 02.740.11.0447), Программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 2.1.1/5470) и проекта NNSA DOE (DE-FC03-02NA00057).

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Захаров, Г. В. Иваненков, А. А. Коломенский и др., Письма в ЖТФ **8**, 1060 (1982).
2. С. С. Ананьев, Ю. Л. Бакшаев, П. И. Блинов и др., Письма в ЖЭТФ **87**, 426 (2008).
3. S. A. Pikuz, D. B. Sinars, T. A. Shelkovenko et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 035003 (2002).
4. B. M. Song, S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko et al., Appl. Opt. **44**, 2349 (2005).
5. С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. В. Синарс и др., Физика плазмы **32**, 1106 (2006).
6. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, A. R. Mingaleev et al., Rev. Sci. Instr. **70**, 667 (1999).
7. A. G. Taylor, M. C. Goffinet, S. A. Pikuz et al., in *The Biology of Seeds: Recent Research Advances*, CAB International, Wallingford, UK (2003), p. 433.
8. С. Ю. Гуськов, Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев и др., Письма в ЖЭТФ **67**, 531 (1998).
9. S. V. Lebedev, S. N. Bland, F. N. Beg et al., Rev. Sci. Instr. **72**, 671 (2001).
10. S. V. Lebedev, S. N. Bland, F. N. Beg et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 98 (2000).
11. Е. В. Грабовский, К. Н. Митрофанов, Г. М. Олейник и др., Физика плазмы **30**, 139 (2004).
12. С. А. Пикуз, Г. В. Иваненков, Т. А. Шелковенко и др., Письма в ЖЭТФ **69**, 349 (1999).
13. S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, J. B. Greenly et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 4313 (1999).

14. Т. А. Shelkovenko, D. B. Sinars, S. A. Pikuz et al., *Phys. Plasmas* **8**, 1305 (2001).
15. Г. В. Иваненков, С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, и др., *ЖЭТФ* **118**, 539 (2000).
16. S. B. Hansen, A. S. Shlyaptseva, S. A. Pikuz et al., *Phys. Rev. E* **70**, 026402 (2004).
17. J. P. Chittenden, A. Ciardi, C. A. Jennings et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 025003 (2007).
18. Т. А. Shelkovenko, S. A. Pikuz, J. D. Douglass et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34**, 2336 (2006).
19. Г. В. Месяц, *Импульсная энергетика и электроника*, Наука, Москва (2004).
20. Т. А. Shelkovenko, S. A. Pikuz, B. M. Song et al., *Phys. Plasmas* **12**, 033102 (2005).
21. L. E. Aranchuk, J. Larour, and A. S. Chuvatin, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33**, 990 (2005).
22. Н. В. Жарова, Н. А. Ратахин, А. В. Саушкин и др., *ПТЭ* № 3, 141 (2006).
23. Н. А. Ратахин, В. Ф. Федущак, А. А. Эрфорт и др., *Изв. Вузов, физика* **50**, 87 (2007).
24. С. М. Захаров, Г. В. Иваненков, А. А. Коломенский и др., *Физика плазмы* **13**, 206 (1987).
25. R. B. Spielman, L. E. Ruggles, R. E. Pepping et al., *Rev. Sci. Instr.* **68**, 782 (1997).
26. <http://www.ird-inc.com/>.
27. D. B. Sinars, S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko et al., *Rev. Sci. Instr.* **72**, 2948 (2001).
28. D. B. Sinars, S. A. Pikuz, J. D. Douglass et al., *Phys. Plasmas* **15**, 092703 (2008).
29. В. А. Бойко, С. М. Захаров, А. А. Коломенский и др., *Письма в ЖТФ* **8**, 129 (1982).
30. S. A. Pikuz, B. M. Song, T. A. Shelkovenko et al., *Proc. SPIE* **5196**, 25 (2005).
31. Т. А. Shelkovenko, S. A. Pikuz, D. B. Sinars et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30**, 567 (2002).
32. Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, Р. Д. МакБрайд и др., *Физика плазмы* **36**, 53 (2010).
33. D. D. Ryutov, M. S. Derzon, and M. K. Matzen, *Rev. Mod. Phys.* **72**, 167 (2000).
34. Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев, С. А. Пикуз и др., *Физика плазмы* **22**, 403 (1996).