

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПРОВОЛОЧНЫХ X-ПИНЧЕЙ НА КОМПАКТНОМ СИЛЬНОТОЧНОМ ГЕНЕРАТОРЕ КИНГ

*И. Н. Тиликин**, *Т. А. Шелковенко*, *А. Р. Мингалеев*, *А. А. Мингалеев*,
А. Е. Тер-Оганесян, *С. А. Пикуз*

*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 13 марта апреля 2024 г.,
после переработки 17 мая 2024 г.
Принята к публикации 17 мая 2024 г.

Представлены экспериментальные исследования 4-проволочных X-пинчей на модернизированном генераторе КИНГ, состоящем из четырех низкоиндуктивных конденсаторов, с максимумом тока 160–250 кА, временем нарастания тока 150–300 нс при зарядном напряжении 45 кВ. Продемонстрирована возможность использования генератора в качестве источника мягкого рентгеновского излучения при использовании стандартных X-пинчей проволочек из Al, Cu или Mo диаметром 25 мкм. Показано, что модернизация привела к увеличению индуктивности, но не к ухудшению параметров X-пинча. Это привело к возможности применения данного генератора для питания стандартных X-пинчей и их использования в качестве источников излучения для точечной проекционной радиологии с пространственным разрешением порядка 13–23 мкм.

DOI: 10.31857/S0044451024110166

1. ВВЕДЕНИЕ

X-пинчи различных конфигураций являются прекрасными источниками как рентгеновского [1–6], так и УФ-излучения [7, 8]. Подобные источники излучения являются одними из самых мощных малых источников мягкого (энергия квантов менее 5 кэВ) рентгеновского излучения с потоком 10^{15} – 10^{16} Вт/см² [9, 10]. Горячая точка, образующаяся при взрыве X-пинча, имеет микронный размер и пикосекундную длительность [11–13]. Мягкое рентгеновское излучение (МРИ) из горячей точки позволяет использовать его для исследования большого числа физических [1, 5, 6, 10] и биологических [5, 14] объектов. Помимо этого, X-пинч может быть использован в качестве интенсивного источника жесткого рентгеновского излучения [15, 16]. Большая часть этого излучения генерируется пучками ускоренных электронов, образующихся в процессе и сразу после взрыва горячей точки, взаимодействующими с плотной плазмой рядом с ней. Это излучение имеет энергию более 5 кэВ (часто до многих десятков кэВ) и

размер источника 40–200 мкм. Многочисленные эксперименты показывают, что для корректной работы стандартных X-пинчей необходимо обеспечить ток порядка 50–100 кА и время нарастания около 50 нс [17, 18]. При токе свыше 200 кА широко исследовались гибридные X-пинчи [19], представляющие собой короткую проволочку (длиной около 2 мм), помещенную между тугоплавкими коническими электродами, изготавливаемые из W с небольшой примесью Cu. При использовании подобной нагрузки наблюдается образование горячих точек [12]. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на процесс образования горячих точек, является скорость нарастания тока. Как показало множество экспериментов, образование горячих точек возможно, только если скорость нарастания тока превышает значение 1 кА/нс [11]. В последнее время набирают популярность малогабаритные генераторы тока, построенные с использованием конденсаторов малой индуктивности, разряжающимися непосредственно через нагрузку, а не по традиционной схеме Маркса с использованием формирующей линии [12, 20, 21]. В данной схеме напряжение, обеспечиваемое генератором, намного меньше по сравнению с генератором Маркса, что

* E-mail: ivan.tilikin@gmail.com

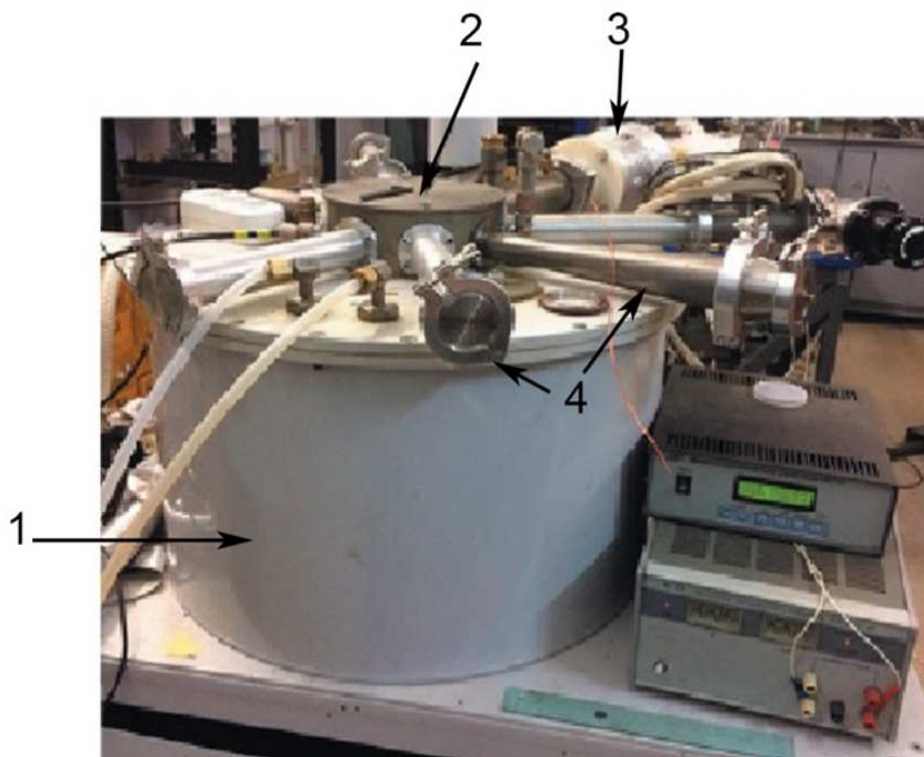


Рис. 1. Фотография внешнего вида генератора КИНГ: 1 — бак с конденсаторно-коммутаторными сборками, 2 — вакуумная камера, 3 — вакуумный насос, 4 — диагностические каналы

может не только влиять на эффективность формирования горячих точек, но и ограничить генерацию жесткого рентгеновского излучения. Низкое напряжение генератора ограничивает индуктивность используемых конфигураций X-пинчей, что на практике означает очень близкое расстояние между путями обратного тока, снижающее доступ к диагностике. Одним из генераторов, построенных по схеме с использованием конденсаторно-коммутаторныхборок, был генератор МИНИ, имеющий максимум тока 250 кА, время нарастания тока не превышающее 220 нс, а напряжение на выходе 40 кВ [12]. Генератор прекрасно работал с X-пинчами в качестве нагрузки. Однако конструкция генератора приводила к выходу из строя конденсаторов. По аналогичной схеме в Томском институте сильноточной электроники (ИСЭ СО РАН) был разработан генератор КИНГ [22, 23], имеющий максимум тока 200 кА и время нарастания тока около 200 нс при напряжении 45 кВ. Генератор КИНГ проектировался для работы со стандартными X-пинчами как более надежная модификация генератора МИНИ [12]. Оба генератора имеют практически одинаковое устройство, но генератор КИНГ, не обладая такими выдающимися выходными параметрами и размером, является более

надежной и достаточно компактной установкой, используемой для исследовательских целей, в том числе для работы с нагрузкой в виде различных конфигураций X-пинчей [24, 25]. Основной целью данных экспериментов является также изучение возможности применения данного низковольтного генератора питания стандартных X-пинчей и их использования в качестве источника МРИ для проекционной рентгенографии различных объектов с высоким пространственным и временным разрешением.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Основной конструктивной особенностью генератора КИНГ является использование конденсаторов марки НСЕIсар 50–0.25 М, совмещенных с разрядниками, подключенными низкоиндуктивным подводом к нагрузке. Небольшие размеры вакуумной камеры позволяют быстро откачивать ее до рабочего давления ниже, чем $5 \cdot 10^{-4}$ Торр. При этом диаметр самой установки составляет всего 60 см. В дополнение к этому необходимо подключение генератора к вакуумной системе, системе накачки воздуха и к блоку питания. Внешний вид генератора представлен на рис. 1.

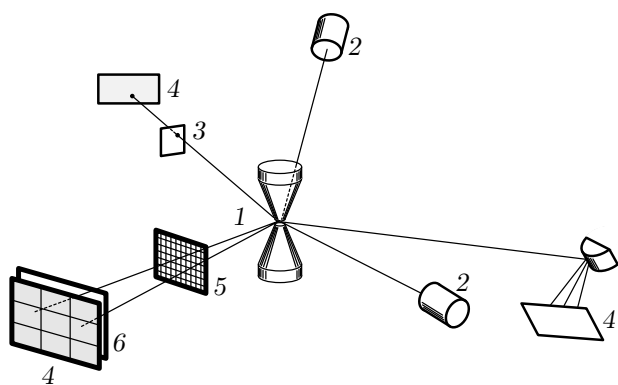


Рис. 2. Схема используемых методов диагностики: 1 — нагрузка генератора, 2 — алмазные фотодетекторы, 3 — камера-обскура, 4 — изобразительная пластина или фотопленка, 5 — тест-объект, 6 — фильтры, 7 — кристалл CsAP-спектрографа

Генератор КИНГ разрабатывался для питания X-пинчей и их использования в качестве источника мягкого рентгеновского излучения. Генератор имеет 8 диагностических каналов 4 (рис. 1). Все диагностические каналы сделаны таким образом, чтобы отводить излучение от источника для его использования. В сторону каждого канала сделано отверстие 8 мм (описано ниже). Подобная геометрия выходной части усложняет работу по диагностике источника излучения. Многочисленные эксперименты по диагностике источника излучения X-пинча показали, что в большинстве выстрелов образуется горячая точка или несколько ярких точек [12, 13]. Также на генераторе проводились серии экспериментов по исследованию УФ-излучения с поверхности взрывающихся фольг [7, 8, 25]. Данные эксперименты показали существенные недостатки в выходной части генератора, усложняющие работу по исследованию плазменного объекта. В связи с этим возникла необходимость модернизации выходной части генератора КИНГ. Генератор КИНГ оснащен широким спектром различных диагностических устройств. В каждом выстреле контролируется зарядное напряжение. Ток, протекающий через нагрузку, контролируется с помощью пояса Роговского. Помимо измерения электрических сигналов, использовались различные способы диагностики параметров источника излучения. Схема расположения диагностических устройств представлена на рис. 2.

Для регистрации длительности и интенсивности рентгеновского излучения с энергией фотонов от 10 эВ до 10 кэВ использовались калиброванные алмазные фотодетекторы 2 (PCD) [26] (рис. 2). Регистрация электрических сигналов проводилась на ос-

циллографы марки Tektronix с полосой пропускания 1 ГГц. Временное разрешение фотодетекторов с подводными кабелями составляет при использовании данных осциллографов около 1 нс. Для визуализации источников излучения использовалась камера-обскура 3 с отверстием от 30 мкм до 200 мкм (рис. 2). Для определения размера источника излучения использовалась схема проекционной рентгенографии для изображения металлических сеток в виде тест-объектов 5 (рис. 2). Для регистрации рентгеновского и УФ-излучения используются изобразительные пластины марки Fuji BAS TR или рентгеновские фотопленки марки Kodak DR-50. Для регистрации излученной энергии в различных спектральных диапазонах использовался фильтр из Be толщиной 7 мкм, пропускающий фотоны с энергией более 700 эВ, из майлара толщиной 8 мкм, пропускающий фотоны с энергией выше 1 кэВ, и фильтр из Ti толщиной 12.5 мкм, пропускающей излучение от 2.5 до 5 кэВ, наиболее характерный участок спектра для мягкого рентгеновского излучения из горячей точки X-пинча. Для определения параметров плазмы источника излучения на генераторе КИНГ установлен спектрограф 7 с выпуклым кристаллом CsAP (рис. 2) с периодом кристаллической решетки 26.6 Å. Радиусом кривизны кристалла составляет 350 мм. На рис. 3 приведена схема получения спектра. Для регистрации спектра используются изобразительные пластины или рентгеновская фотопленка. Конструкция спектрографа позволяет изменять в широких пределах угол падения излучения на поверхность кристалла, который подбирается согласно формуле Брэгга-Вульфа: $2d \sin \theta = m\lambda$, где θ — угол отражения, d — межплоскостное расстояние кристалла, λ — длина волны излучения, m — порядок отражения. На входном отверстии спектрографа устанавливается тонкий алюминизированный фильтр (толщина Al < 1 мкм), отсекающий фоновую засветку, но несильно уменьшающий интенсивность излучения.

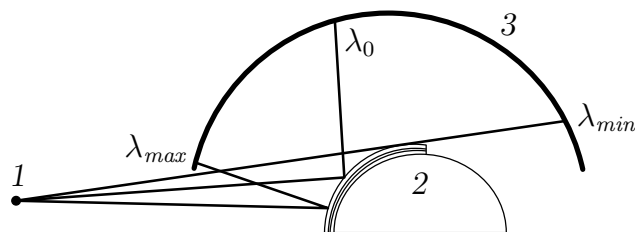


Рис. 3. Схема выпуклого спектрографа, установленного на генераторе КИНГ: 1 — источник излучения, 2 — выпуклый кристалл CsAP, 3 — изобразительная пластина для регистрации спектра

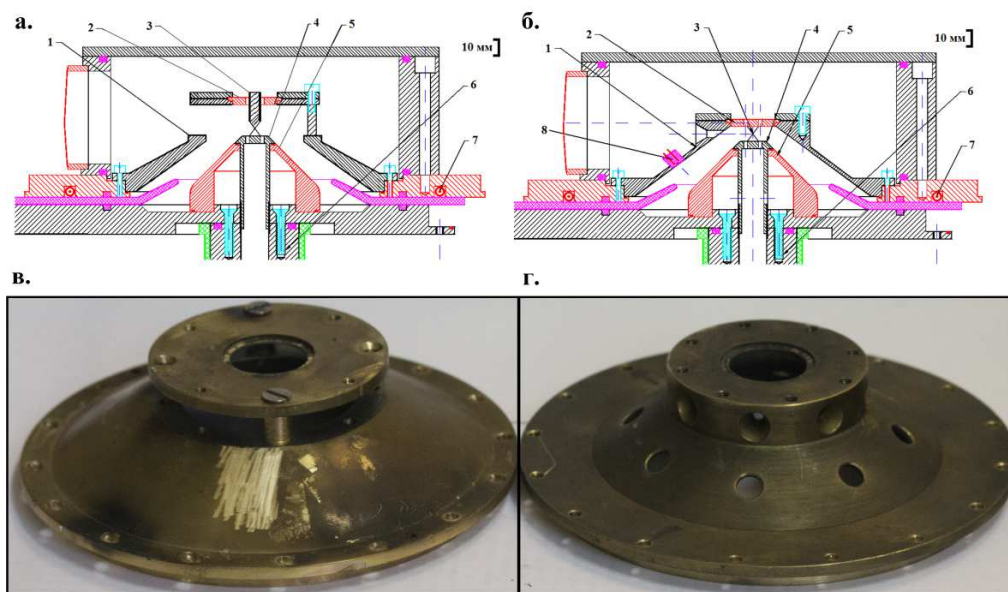


Рис. 4. *а, б* — Схемы выходной части генератора КИНГ. *в, г* — Фотографии обратного токопровода: исходной (*б, г*) и модернизированной (*а, в*). 1 — обратный токопровод, 2 — сменная часть обратного токопровода, 3 — нагрузка, 4 — сменная часть высоковольтного электрода, 5 — высоковольтный электрод, 6 — стакан для сбора грузов для натяжения стандартного X-пинча, 7 — пояс Роговского, 8 — дифференциальный датчик тока («петля»)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Как уже было сказано ранее, выходная часть генератора КИНГ имела несколько отверстий для вывода излучения диаметром 8 мм и максимальная длина нагрузки была ограничена 8 мм, что не позволяло использовать нагрузки большей длины или исследовать источники излучения больших размеров (см. рис. 3*б, г*). В частности, это ограничивало возможности по исследованию взрыва фольги на подобном генераторе. Для большего удобства использования диагностических устройств конструкция выходной части генератора была модернизирована. На рис. 4 приведены схемы выходной части генератора и фотографии обратного токопровода.

В экспериментах с новой выходной частью использовалось от 2 до 4 стержней обратного токопровода. Использование подобной схемы позволило изменять длину нагрузки в широком диапазоне (до 20 мм) и исследовать излучение с поверхности больших пространственных объектов [27, 28]. Новая конструкция выходной части генератора открывает больше возможностей для исследования X-пинчей различных конфигураций на генераторе КИНГ. Были проведены серии экспериментов с различными проволочками в гибридном и стандартном 4-проволочном X-пинче. В таблице приведена сводная информация о наличии мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов более 1 кэВ при исполь-

зовании различных проволочек в нагрузке. Видно, что излучение регистрировалось во многих выстрелах. Однако было замечено, что в разных выстрелах наблюдается ток различной формы, при этом оказывается различная скорость нарастания тока. Как показали эксперименты, гибридные X-пинчи работают гораздо лучше, чем стандартные проволочные X-пинчи, в широком диапазоне тока и скорости нарастания тока. Однако ранее было известно, что стандартные X-пинчи более требовательны к параметрам тока. Генератор КИНГ после модернизации позволяет исследовать влияние параметров тока на процесс взрыва стандартных X-пинчей.

На рис. 5 приведены характерные формы сигналов, которые регистрировались на генераторе КИНГ после модернизации выходной части при взрыве стандартных 4-проволочных X-пинчей с проволочками из Cu толщиной 25 мкм. При этом приведены результаты тех выстрелов, при которых регистрировалось мягкое рентгеновское излучения за фильтром из Be толщиной 7 мкм ($E_{\gamma} > 700$ эВ) и майлара толщиной 8 мкм ($E_{\gamma} > 1$ кэВ). Видно, что максимум тока составляет от 160 до 230 кА. При этом время нарастания тока до максимума изменяется в пределах от 150 до 300 нс, что соответствует средней скорости нарастания тока до максимума от 0.7 до 1.2 кА/нс. Можно отметить характерные особенности формы тока, из которых следует, что иногда конденсаторы срабатывают не совсем синхрон-

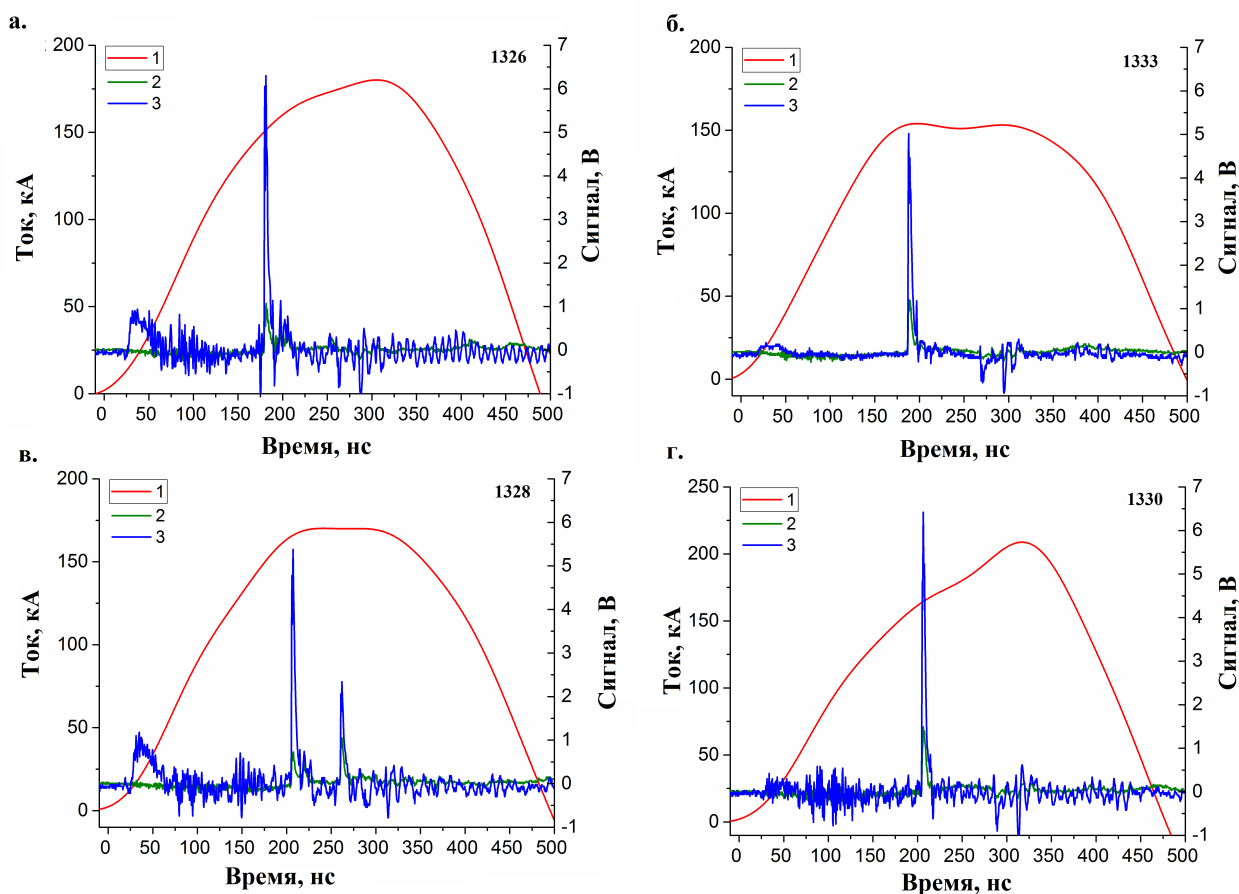


Рис. 5. Осциллограммы тока (1) и сигналы, зарегистрированные с помощью алмазных фотодетекторов за фильтром из майлара толщиной 8 мкм (2) и Ве-фильтром толщиной 7 мкм (3) при взрыве 4-проволочного X-пинча с проволочками из Cu толщиной 25 мкм. Приведены различные характерные формы сигналов (а, б, в, г), регистрируемые на генераторе КИНГ

Таблица. Процент выстрелов с наличием мягкого рентгеновского излучения с энергией более 1 кэВ при взрыве гибридных (ГХП) и стандартных 4-проволочных X-пинчей (СХП) на генераторе КИНГ

X-пинч	Материал	Количество выстрелов	Процент выстрелов
СХП	Mo	4	50 %
	Al	6	30 %
	Cu	8	50 %
ГХП	Mo	30	90 %
	Al	10	100 %
	Cu	8	100 %

но. При этом иногда это влечет увеличение максимума тока (рис. 5в), а иногда приводит к более быстрому нарастанию тока, а потом ток остается постоянным (рис. 5б, в). В некоторых выстрелах наблюдается стандартная форма тока близкая к синусоидальной, но при этом могут различаться максимумы тока при одинаковой длительности (рис. 5а, в).

Исследования показывают, что если скорость нарастания тока оказывается более 1 кА/нс к моменту сжатия плазмы, то происходит образование ярких или горячих точек. Отдельно в экспериментах было исследовано влияние параметров стержней обратного токопровода на процесс взрыва X-пинча. Количество стержней изменялось от 2 до 4 штук. Длина стержней изменялась от 1 до 4 см. Выполнено по 4 выстрела в каждой из конфигураций. При этом параметры тока, напряжения и времени нарастания тока оставались в пределах стандартных отклонений. Генерация МРИ происходила также примерно в 50 % случаев, как и в остальных экспериментах (см. таблицу). Таким образом, показано, что изменение этих параметров не оказывает существенного влияния на процесс образования источников МРИ при взрыве X-пинчей. Возникающие источники излучения от горячих или ярких точек были исследованы на возможность их использования. Одним из наиболее важных параметров является размер излучающей области. Наиболее простым и действен-

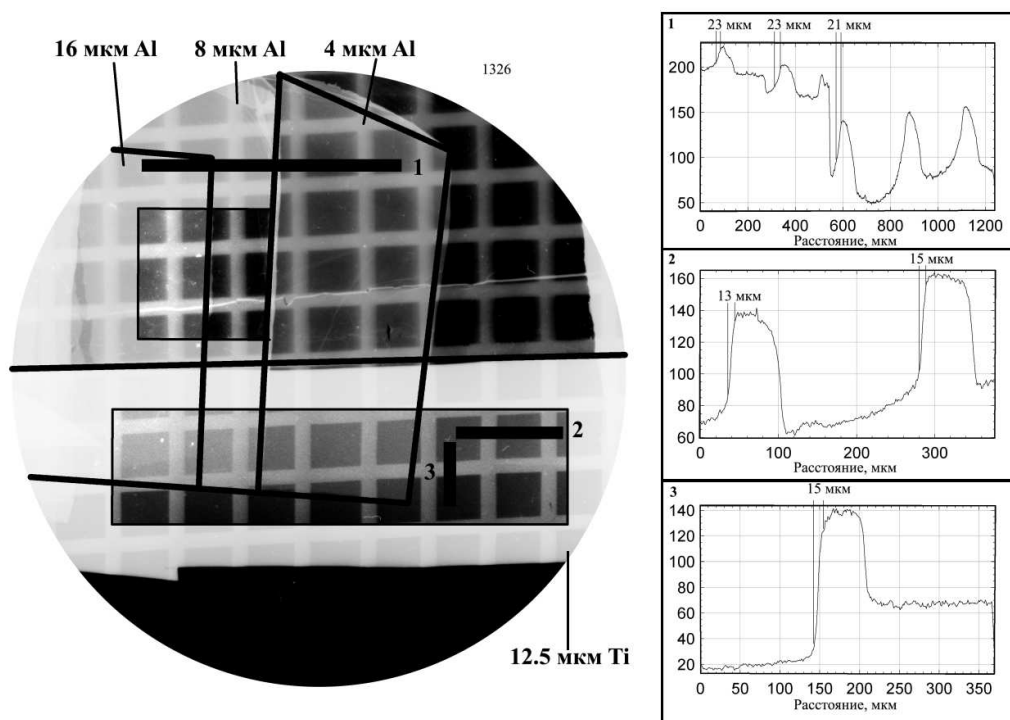


Рис. 6. Изображение медной сетки от излучения 4-проволочного X-пинча с проволочками из Cu толщиной 25 мкм, зарегистрированное за различными фильтрами, и прописи почернений за Ti-фильтром толщиной 12.5 мкм (1, 2) и за Al-фильтрами толщиной 4, 8 и 16 мкм (3). На выделенных фрагментах дополнительно изменен контраст для наглядности. Увеличение 1 : 10

ным способом определения размера излучающей области в диапазоне МРИ является определение размера по размытию края изображения в схеме проекционной рентгенографии. Для этого необходимо получить изображение тест-объекта. На рис. 6 приведено изображение медной сетки с шагом 100 мкм, полученное от излучения 4-проволочного X-пинча с проволочками из Cu толщиной 25 мкм. Изображение получено за различными фильтрами, что позволяет судить о пространственном разрешении в различных спектральных диапазонах.

На прописях почернений пластин приведены размеры размытия края изображения, что эквивалентно пространственному разрешению. Видно, что разрешение составляет от 13 до 23 мкм (рис. 6, 1–3) в различных спектральных диапазонах и в различных направлениях: поперечном и продольном относительно катод-анодного направления. При этом наиболее маленький размер 12 мкм получается за Ti-фильтром, что соответствует энергии фотонов от 2.5 до 5 кэВ, а значит, в экспериментах наблюдается горячая точка. Данный размер наблюдается в поперечном относительно катод-анодного направления, что характерно для работы X-пинчей. Большой разницы в пространственном разрешении в поперечном и продольном направлениях зарегистрировано

не было, что отличает СХП от ГХП, где наблюдалась разница в 2.5–3 раза. На рис. 7 приведен увеличенный фрагмент осциллограммы при взрыве 4-проволочного X-пинча с проволочками из Cu толщиной 25 мкм. На рис. 5б приведен полный сигнал от того же выстрела.

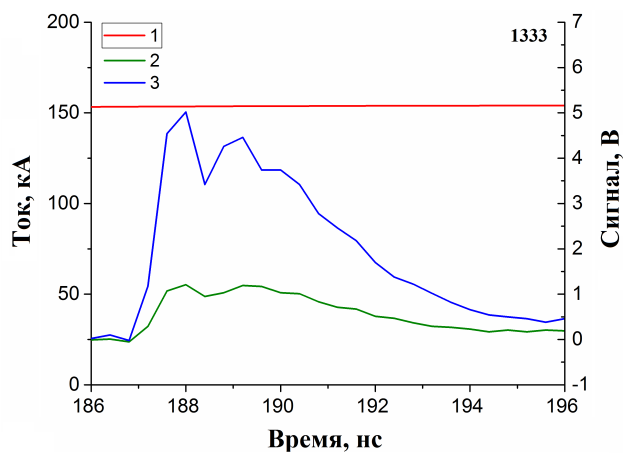


Рис. 7. Увеличенный фрагмент осциллограммы (полный фрагмента на рис. 5б) тока (1) и сигналы, зарегистрированные с помощью алмазных фотодетекторов за фильтром из майлара толщиной 8 мкм (2) и Be-фильтром толщиной 7 мкм (3) при взрыве 4-проволочного X-пинча с проволочкой из Cu толщиной 25 мкм

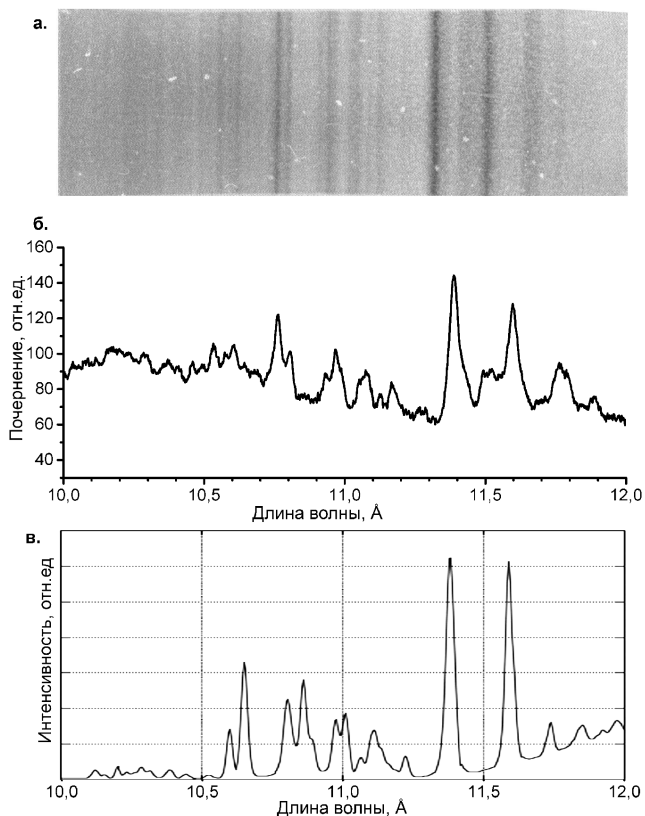


Рис. 8. *a* — Ne-подобный спектр излучения Cu, зарегистрированный с помощью выпуклого кристалла CsAP, при взрыве 4-проволочного X-пинча на генераторе КИНГ. *б* — Пропись спектра с восстановленными длинами волн и расчетный спектр излучения Cu-плазмы с электронной температурой плазмы 150 эВ и электронной плотностью $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

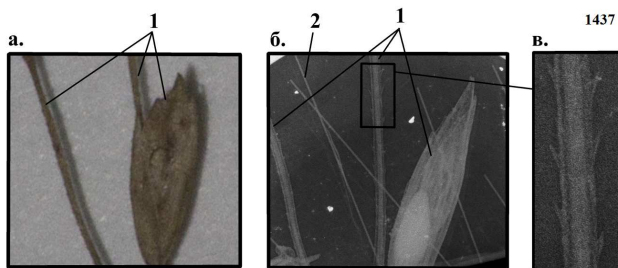


Рис. 9. Фотография (*a*), радиография (*б*) и увеличенный фрагмент радиографии (*в*) биологических тест-объектов: 1 — стебель и соцветие, 2 — углеродная нить толщиной 10 мкм. Радиография получена за фильтром из Ti толщиной 12.5 мкм при взрыве 4-проволочного X-пинча с проволочками из Cu толщиной 25 мкм

Видно, что общая длительность излучения при этом не превышает 4 нс, при этом видна структура этого излучения, состоящая из нескольких вспышек, каждая из которых не более 1 нс, что может говорить о многократном пинчевании. Временное раз-

решение регистрирующей аппаратуры не превышает 1 нс, что говорит о том, что в данном случае, возможно, имеют место более узкие пики рентгеновского излучения. На подобных компактных генераторах впервые зарегистрированы спектры излучения, позволяющие определить параметры плазмы. На рис. 8*a* приведен характерный спектр, зарегистрированный при взрыве 4-проволочного X-пинча с проволочками из Cu толщиной 25 мкм. Настройка угла спектрографа позволяет регистрировать Ne-подобный спектр Cu. На рис. 8*б* приведен график почернений пленки с проставленными длинами волн. Восстановление длин волн на спектре производится согласно первичной настройке, а далее точная привязка происходит по наиболее интенсивным линиям. В данном спектральном диапазоне спектр излучения Cu-плазмы можно рассчитать, используя программу PrismSPECT [29]. Спектры рассчитываются для различных значений плазменной температуры и электронной плотности при заданном размере источника, определяемым из рентгенограмм тест-объектов, как было показано выше. На рис. 8*в* приведен восстановленный спектр, наиболее подходящий под экспериментальный, который соответствует электронной температуре плазмы 150 эВ и электронной плотности $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, при взрыве стандартных X-пинчей наблюдается тепловое излучение от ярких точек плазмы.

Подобные источники МРИ прекрасно подходят для получения изображений различных биологических и плазменных объектов с высоким пространственным разрешением. А модернизированная конструкция выходной части генератора КИНГ облегчает работу по выводу излучения на исследуемый объект. В качестве примера получено изображение биологического объекта. На рис. 9 приведена фотография (рис. 9*a*) и радиография (рис. 9*б*) соцветия и стебелька. На рис. 9*в* приведен увеличенный фрагмент стебелька, на котором прекрасно видна внутренняя структура и мелкие детали биологического объекта, что говорит о высоком качестве источника излучения и возможности использования подобного источника излучения для точечной проекционной рентгенографии.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования гибридных X-пинчей на модифицированном генераторе КИНГ показали, что изменение выходной части генератора привело к увеличению индуктивности нагрузки, что, в свою очередь, привело к увеличению времени нарастания тока. Однако это практически не

сказалось на гибридных X-пинчах. Стандартные X-пинчи стали работать немного хуже, но при этом в большинстве выстрелов образуется источник мягкого рентгеновского излучения. Размер источника излучения составляет 13–23 мкм в спектральном диапазоне 2.5–5 кэВ. При этом длительность излучения не превышает 4 нс. Показано, что наиболее важным параметром оказывается скорость нарастания тока до момента образования яркой точки. При этом для образования ярких точек значение производной тока (dI/dt) выше 1 кА/нс не критичен. Яркие точки в X-пинчах наблюдались при $dI/dt > 0.8$ кА/нс. Проведены спектральные исследования параметров плазмы на подобных генераторах. Температура плазмы составляет 150 эВ, при этом электронная плотность равна $5 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Таким образом, генератор может быть использован как для использования в качестве источника для проекционной точечной рентгенографии, так и для исследования различных плазменных источников. При этом увеличенное поле зрения и возможность исследовать объекты размером до 4 см открывают перспективы по исследованию различных плазменных объектов, например фольг или взрывающихся проволок.

Финансирование. Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 19-79-30086).

ЛИТЕРАТУРА

1. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, A. R. Mingaleev, and D. A. Hammer, *Studies of Plasma Formation from Exploding Wires and Multiwire Arrays Using X-ray Backlighting*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 667 (1999).
2. S. V. Lebedev, F. N. Beg, S. N. Bland et al., *X-ray Backlighting of Wire Array Z-pinch Implosions Using X-pinch*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 671 (2001).
3. T. A. Shelkovenko, D. B. Sinars, S. A. Pikuz, and D. A. Hammer, *Radiographic and Spectroscopic Studies of X-pinch Plasma Implosion Dynamics and X-ray Burst Emission Characteristics*, Phys. Plasmas **8**, 1305 (2001).
4. T. Zhao, X. Zou, X. Wang et al., *X-Ray Backlighting of Developments of X-pinch and Wire-Array Z-pinch Using an X-pinch*, IEEE Trans. on Plasma Sci. **38**, 646 (2010).
5. X. Zhu, X. Zou, R. Zhang et al., *X-Ray Backlighting of the Initial Stage of Single- and Multiwire Z-Pinch*, IEEE Trans. on Plasma Sci. **40**, 3329 (2012).
6. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, and D. A. Hammer, *A Review of Projection Radiography of Plasma and Biological Objects in X-pinch Radiation*, Plasma Phys. Rep. **42**, 226 (2016).
7. S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, I. N. Tilikin et al., *Study of SXR/EUV Radiation of Exploded Foils and Wires with Spectral, Spatial and Temporal Resolution Simultaneously on KING Electric Discharge Facility*, Plasma Sources Sci. and Technol. **30**, 115012 (2021).
8. T. A. Shelkovenko, I. N. Tilikin, E. A. Bolkhovitinov et al., *A Study of the Ultraviolet Radiation of Hybrid X-pinch*, Plasma Phys. Rep. **46**, 10 (2020).
9. S. A. Pikuz, D. B. Sinars, T. A. Shelkovenko et al., *High Energy Density Z-pinch Plasma Conditions with Picosecond Time Resolution*, Phys. Rev. Lett. **89**, 035003 (2002).
10. S. V. Lebedev, F. N. Beg, S. N. Bland et al., *Effect of Core-Corona Plasma Structure on Seeding of Instabilities in Wire Array Z Pinches*, Phys. Rev. Lett. **85**, 98 (2000).
11. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, J. D. Douglass et al., *Multiwire X-pinch at 1-MA Current on the COBRA Pulsed-Power Generator*, IEEE Trans. on Plasma Sci. **34**, 2336 (2006).
12. G. A. Mesyats, T. A. Shelkovenko, G. V. Ivanenkov et al., *X-pinch Source of Subnanosecond Soft X-ray Pulses Based on Small-sized Low-inductance Current Generator*, J. of Exp. and Theor. Phys. **111**, 363 (2010).
13. S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, and D. A. Hammer *X-pinch. Part I*, Plasma Phys. Rep. **41**, 291 (2015).
14. T. Shelkovenko, S. Pikuz, and D. Hammer, *X-pinch as Broadband Sources of X-rays for Radiography*, J. of Biomedical Sci. and Engineering **8**, 747 (2015).
15. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, A. R. Mingaleev et al., *Accelerated Electrons and Hard X-ray Emission from X-pinch*, Plasma Phys. Rep. **34**, 754 (2008).
16. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, C. L. Hoyt et al., *A Source of Hard X-ray Radiation Based on Hybrid X-Pinch*, Phys. Plasmas **23**, 10 (2016).
17. С. М. Захаров, Г. В. Иваненков, А. А. Коломенский и др., *Проволочный X-пинч в сильноточном диоде*, Письма в ЖТФ **8**, 1060 (1982).
18. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, I. N. Tilikin et al., *X-pinch X-ray Emission on a Portable Low-current, Fast Rise-time Generator*, J. of Appl. Phys. **124**, 8 (2018).
19. T. A. Shelkovenko, I. N. Tilikin, G. V. Ivanenkov et al., *Dynamics of hybrid X-pinch*, Plasma Phys. Rep. **41**, 52 (2015).

20. A. V. Kharlov, B. M. Kovalchuk, V. B. Zorin, *Compact High Current Generator for X-Ray Radiography*, Rev. Sci. Instr. **77**, 123501 (2006).
21. A. P. Artyomov, A. V. Fedyunin, S. A. Chaikovsky et al., *A Double-frame Nanosecond Soft X-ray Backlighting System Based on X-pinches*, Instr. and Exp. Tech. **56**, 66 (2013).
22. A. P. Artyomov, M. G. Bykova, S. A. Chaikovsky et al., *A Small-scale X-pinch-based Nanosecond Soft X-ray Pulse Radiograph*, Russ. Phys. J **56**, 66 (2012).
23. S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, I. N. Tilikin et al., *Study of SXR/EUV Radiation of Exploded Foils and Wires with Spectral, Spatial and Temporal Resolution Simultaneously on KING Electric Discharge Facility*, Plasma Sources Sci. and Technol. **30**, 115012 (2021).
24. E. A. Bolkhovitinov, I. N. Tilikin, T. A. Shelkovenko et al., *Study of Hybrid X-pinch in the XUV and SXR Spectral Ranges*, J. of Phys.: Conf. Ser. **1094**, 012022 (2018).
25. E. A. Bolkhovitinov, I. N. Tilikin, T. A. Shelkovenko et al., *Study of VUV Radiation of Hybrid and Standard X-pinches on KING Electric Discharge Facility*, Plasma Sources Sci. and Technol. **29**, 025009 (2020).
26. D. B. Sinars, S. A. Pikuz, J. D. Douglass et al., *Bright Spots in 1 MA X-pinches as a Function of Wire Number and Material*, Phys. Plasmas **15**, 9 (2008).
27. I. N. Tilikin, T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz et al., *Exploding Foils with Artificial Structure as a Source of Ultraviolet Radiation*, J. of Appl. Phys. **134**, 3 (2023).
28. T. A. Shelkovenko, I. N. Tilikin, A. V. Oginov et al., *Methods of Controlled Formation of Instabilities During the Electrical Explosion of Thin Foils*, Matter and Radiation at Extremes **8**, 5 (2023).
29. <http://www.prism-cs.com/Software/PrismSpect/PrismSPECT.htm>