

Исследования мегаамперного многопроволочного X-пинча

С. С. Ананьев, Ю. Л. Бакшаев, П. И. Блинов, В. А. Брызгунов, С. А. Данько, А. И. Жужунашвили, А. А. Зеленин, Е. Д. Казаков, Ю. Г. Калинин, А. С. Кингсеп, В. Д. Королев, В. И. Мижирицкий, С. А. Пикуз⁺, В. М. Романова⁺, В. П. Смирнов, С. И. Ткаченко⁺, Г. И. Устроев, А. С. Черненко, Т. А. Шелковенко⁺, В. А. Шагин

Российский научный центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

⁺Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 марта 2008 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований динамики многопроволочного X-пинча, проведенных при токах через нагрузку до 2.3 МА. Изучалась плазма, полученная в экспериментах с многопроволочными X-пинчами; варьировались материалы, диаметр и количество проволочек. При таких токах мощность мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов от 1 до 2 кэВ возросла до 120 ГВт при размере горячей точки менее 20 мкм, что соответствует яркости источника $\sim 10^{15}$ Вт/см²·ср. Зарегистрирована энергия более 10 Дж в линиях неоноподобного молибдена в диапазоне (2.5–3 кэВ). В экспериментах с X-пинчами из вольфрама и молибдена зарегистрировано жесткое рентгеновское излучение в диапазоне энергий квантов ≥ 800 кэВ.

PACS: 52.58.Lq, 52.59.Px, 52.70.La

X-пинч представляет собой нагрузку для высоко-точных генераторов из двух и более перекрещенных проволочек [1, 2]. Сингулярность такой конфигурации определяет его уникальные свойства, а именно, в широком диапазоне начальных параметров (количество и материал проволочек, их диаметр, угол скрещивания, зазор диода, ток разряда, скорость его нарастания) в области перекрестия образуется горячая плазма, излучающая в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн. Структура излучающей плазмы может быть весьма сложной, но ее экстремальные параметры достигаются в особых плазменных образованиях, называемых горячими точками (ГТ) [1, 3]. Многочисленные предшествующие эксперименты показали, что ГТ должна обладать следующими параметрами:

- размер изображения в диапазоне энергий фотонов порядка нескольких килоэлектронвольт – меньше 10 мкм;
- время существования, измеряемое по длительности излучения в этом же диапазоне энергий фотонов, – меньше 100 пс;
- электронная плотность плазмы больше 10^{22} см⁻³;
- электронная температура плазмы больше 0.5 кэВ;
- спектр излучения в течение первых 10 пс близок к спектру черного тела.

Таким образом, ГТ X-пинча является уникальным точечным источником мягкого импульсного рентгеновского излучения (до 10 кэВ) с рекордной яркостью, что позволяет использовать его для радиологии короткоживущих объектов [1]. Для этих целей наилучшим является такой X-пинч, в котором образуется преимущественно одна ГТ с минимальными размерами и максимальной яркостью при минимальной длительности импульса излучения.

Эксперименты также показали, что в случае образования ГТ временная эволюция плазменного объекта идет по устойчивому сценарию: перетяжка – ГТ – разрыв в перетяжке, вследствие чего X-пинч является также источником жесткого рентгеновского излучения [4] с энергией до сотен килоэлектронвольт, выходящего из относительно небольшой области (от 0.1 до 1 мм). Генерация этого излучения связана с взаимодействием электронного пучка, возникающего при обрыве перетяжки, с плазмой, веществом проволочек и электродами. Таким образом, X-пинч является перспективным точечным источником излучения в широком энергетическом интервале.

К настоящему времени основные исследования X-пинчей выполнены на установках с токами до 500 кА, хотя в некоторых из них [4, 5] значение тока достигало 1.2 МА; при этом установки с большими токами имели и большой выход рентгеновского излучения. Достаточно простые теоретические оценки, основанные на анализе беннетовского равновесия [3, 6], предсказывают быстрое увеличение выхода излучения с ростом тока, поэтому исследова-

ния X-пинчей при токах мегаамперного диапазона представляют несомненный интерес. В представляемой работе изложены результаты экспериментальных исследований динамики многопроволочного X-пинча, проведенных на сильноточном генераторе С-300 [7] при токах через нагрузку до 2.3 МА (время нарастания 150 нс).

Образование горячей точки в перекрестии требует оптимизации параметров нагрузки для условий конкретной установки. Так, на основе большого объема данных, полученных на установках с различными параметрами, экспериментально установлено, что для формирования ГТ в X-пинче необходимым условием является высокая скорость нарастания тока – $dI/dt > 1$ кА/нс в нагрузке [5], однако “качество” X-пинча зависит от большего количества начальных параметров. Например, для получения горячей точки с экстремальными параметрами необходимо обеспечить некоторое соотношение между током и погонной массой X-пинча $m_l \sim I^2$ (в [5] в качестве базового использовалось значение $m_l = 3$ мг/см для $I = 1$ МА).

Для того чтобы момент максимального сжатия наступал вблизи максимума тока, при больших токах необходимо использовать более тяжелые (на единицу длины) нагрузки. В то же время невозможно использовать слишком толстые проволочки (у них переход в плазменное состояние занимает большее время, чем время достижения максимума тока); поэтому естественное требование для генераторов с характерным временем нарастания тока ~ 100 нс – при больших токах применять многопроволочные X-пинчи; правда, при этом возникают технические сложности формирования компактного перекрестия всех проволочек¹⁾.

Нами на сильноточном генераторе С-300 проведены эксперименты по исследованию динамики плазменных образований, сформированных при использовании многопроволочных X-пинчевых нагрузок. Использовались X-пинчи длиной 10–12 мм с разным количеством ($N = 2–20$) скрещенных под углом 60° проволочек различного диаметра ($d = 55–300$ мкм) из вольфрама, молибдена, нихрома и нержавеющей стали. Это обеспечило широкий диапазон исследуемых погонных масс ($m_l = 3.6–40$ мг/см) и отношения погонной массы к величине максимума тока $m_l/I^2 = (1.6–15.5)$ мг/см · МА². В данной работе мы представляем результаты исследований динамики многопроволочных X-пинчей из молибдено-

вых ($m_l/I^2 = 1.6–3.7$ мг/см · МА²) и вольфрамовых ($m_l/I^2 = 1.6–4.6$ мг/см · МА²) проволочек, при взрыве которых генерация горячих точек выражена наиболее ярко.

Непосредственные измерения уникальных характеристик такого источника излучения, как ГТ X-пинча, чрезвычайно трудны и требуют средств диагностики с очень высокими параметрами. Однако накопленные ранее знания о динамике сжимающегося плазменного образования в X-пинче дают основания делать заключение о динамике ГТ при использовании комплекса диагностик, каждая из которых в отдельности недостаточно прецизионна. Кроме того, картина временной эволюции излучающего объекта “ГТ – разрыв перетяжки” сопровождается изменением во времени характера рентгеновского излучения от мягкого теплового до жесткого тормозного; регистрация такой временной трансформации спектра может служить еще одним доказательством наличия горячих точек.

Для определения количества и размеров ГТ использовалась трехканальная камера-обскура с отверстиями диаметром 50 мкм, закрытыми различными фильтрами, которая строила изображения в масштабе 1:1. Так как разрешение камеры-обскуры ограничено 50 мкм, более точно размеры излучающих объектов определялись по ширине полутени краев обскурограмм, а также по ширине полутени рентгеновских изображений щели [3]. В качестве детектора в обоих случаях обычно использовались две расположенные одна за другой фотопленки, перед которыми устанавливались различные фильтры. Ближе к объекту располагалась пленка “Микрат”, обладающая низкой чувствительностью к рентгеновскому излучению, но высоким пространственным разрешением; она также служила дополнительным фильтром для излучения, регистрируемого расположенной за ней рентгеновской фотопленкой Kodak СХ. Кроме этого, количество ГТ и их размер определялись также по полутени рентгеновских спектров, зарегистрированных на кристаллическом спектрографе с выпуклым кристаллом слюды со щелью параллельной направлению дисперсии спектрографа. Во всех измерениях использовалась входная щель 10×0.23 мм, закрытая бериллием (100 мкм) и майларом (7 мкм). При этом регистрировались одномерные (вдоль оси X-пинча) изображения излучающей плазмы в каждой спектральной линии в масштабе 1:2.

Размеры излучающих объектов, полученные различными способами, хорошо коррелируют между собой. В большинстве выстрелов было зафиксировано несколько излучающих областей, их размер варь-

¹⁾ Авторы не исключают возможности использования в качестве нагрузок для мегаамперных токов микросекундной длительности классических X-пинчей из проволочек относительно большой толщины, измеряемой сотнями микрон.

ируется в диапазоне 20–500 мкм. Пространственное разрешение по объекту в наших условиях порядка 15 мкм, следовательно, размер минимального объекта, зарегистрированного нами, не превосходит 20 мкм.

Особенностью представляемых экспериментов является исследование рентгеновского излучения в широком спектральном диапазоне – от сотен электронвольт до сотен килоэлектронвольт. Регистрация мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергии от сотен электронвольт до нескольких килоэлектронвольт производилась двумя полупроводниковыми калиброванными диодами AXUV-5 и вакуумными диодами с катодом из никеля и набором различных фильтров. Благодаря тому, что чувствительности диодов и пропускание фильтров хорошо известны, эти датчики позволяли с высокой точностью определять мощность рентгеновского излучения. Прежде всего, это относится к диодам AXUV-5, чувствительность которых, по данным фирмы-изготовителя IRD-inc, практически постоянна вплоть до 6 кэВ и равна 0.28 А/Вт. Паспортные характеристики этих диодов и их стабильность после длительной эксплуатации были проверены и подтверждены калибровками на синхротроне BESSY [8]. Из-за чрезмерной интенсивности излучения его приходилось ослаблять фильтрами для работы в области линейной характеристики диодов; это автоматически приводило к спектральной селективности. Абсолютные значения чувствительности применяемых детекторов мягкого рентгеновского излучения с соответствующими фильтрами приведены на рис.1 (для энергий выше 6 кэВ чувствительность AXUV-5 взята равной 0.28 А/Вт).

Жесткое рентгеновское излучение в области $E \geq 200$ кэВ измерялось сцинтилляционными детекторами с быстрыми пластмассовыми сцинтилляторами СПСБ18 размером $\varnothing 50 \times 50$ мм и фотоумножителями типа 1828-01 фирмы Hamamatsu; детекторы были абсолютно прокалиброваны на энергии 1.25 МэВ. Временное разрешение этих детекторов составляло (3–4) нс; они размещались в плоскости, перпендикулярной оси нагрузки и снабжались свинцовыми фильтрами различной толщины от 5 до 70 мм. От рассеянного жесткого рентгеновского излучения детекторы экранировались свинцовой защитой толщиной не менее 12 см.

На рис.2–4 приведены временные зависимости производной тока и сигналов с детекторов мягкого и жесткого рентгеновского излучения, полученные в экспериментах с молибденовыми и вольфрамовыми X-пинчами. В представленных режимах за время протекания тока наблюдается несколько импульсов

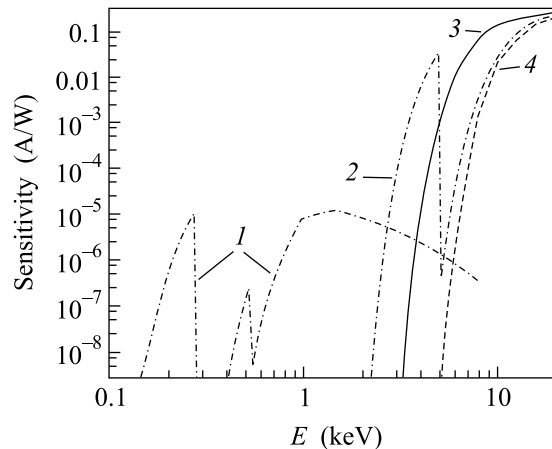


Рис.1. Спектральная чувствительность детекторов мягкого рентгеновского излучения. Цифрами обозначены линии, соответствующие следующим диодам: 1 – вакуумный диод с Ni катодом и майларовым фильтром толщиной $h = 5$ мкм ($E = 200\text{--}270$ эВ + 1–3 кэВ); 2 – AXUV-5 с Ti ($h = 44$ мкм) и Al ($h = 8$ мкм) фильтрами ($E = 4.5\text{--}5$ кэВ + > 10 кэВ); 3 – AXUV-5 с Al ($h = 109$ мкм) фильтром ($E > 10.5$ кэВ); 4 – AXUV-5 с Al ($h = 381$ мкм) фильтром ($E > 10$ кэВ)

мягкого рентгеновского излучения (1–5 кэВ), которые естественно соотнести с излучением ГТ (см., например, [1]). Максимальная мощность в области мягкого рентгеновского излучения (суммарно по диапазонам 250–300 эВ и 1–3 кэВ), зарегистрированная диодами с никелевым фотокатодом, составляла порядка 10^{11} Вт для молибденовых и $1.2 \cdot 10^{11}$ Вт для вольфрамовых нагрузок. Поскольку мощность излучения, зарегистрированная в диапазоне 1–3 кэВ, приблизительно на три порядка больше, чем в более жестком диапазоне (см. таблицу), можно сделать вывод, что основная мощность действительно излучается ГТ (см., например, [1]). Необходимо также отметить, что поскольку временное разрешение вакуумного диода ~ 1 нс, при наличии короткоживущей ГТ, время жизни которой может быть на порядок короче [2], реальная величина мощности может быть существенно выше указанной.

Обратимся к рентгеновским спектрам, они получены с использованием спектрографа с выпуклым кристаллом слюды и зарегистрированы на пленке Кодак СХ; отдельные линии получены в двух и более порядках отражения. В наших экспериментах зарегистрированы спектры высокоионизованных ионов молибдена и вольфрама; наиболее четкими из них получились спектры излучения неоподобных ионов Мо (пример одного из них представлен на рис.5). Сопоставление рассчитанного [9] и экспериментального спектров Ne-подобного MoXXXIII дает

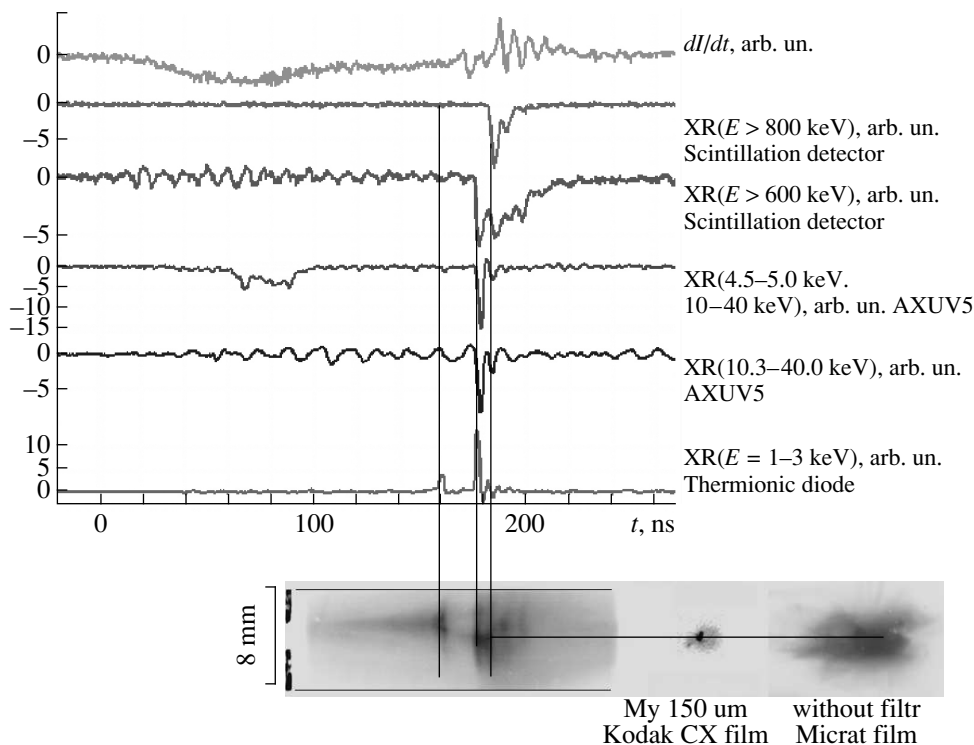


Рис.2. Временные зависимости тока и рентгеновского излучения Mo 16×100 мкм X-пинча. Внизу – хронограмма, синхронизованная с током, и обскурограмма в таком же масштабе. Временные зависимости интенсивности рентгеновского излучения получены датчиками AXUV-5 в диапазонах $E > 10.5$ кэВ и в составном диапазоне 4.5–5 кэВ + > 10 кэВ, а также вакуумным рентгеновским диодом (1–3 кэВ), сцинтилляционными детекторами (в диапазоне энергий квантов сотни килоэлектрон-вольт)

Мощность излучения X-пинчей в различных диапазонах энергий

Нагрузки	ДЕТЕКТОР		
	AXUV-5 (1)	AXUV-5 (2)	ВД(Ni)
Mo 12×70 мкм			23 ГВт $E_\gamma = 200-270$ эВ, 1–3 кэВ (майлар –5 мкм)
Mo 16×100 мкм	24 МВт $E_\gamma > 10$ кэВ (Al-8мкм +Ti-44 мкм)	13 МВт $E_\gamma > 10.3$ кэВ (Al-381 мкм)	100 ГВт $E_\gamma = 200-270$ эВ, 1–3 кэВ (майлар –5 мкм)
W 8×55 мкм	32 МВт $E_\gamma = 6.9 - 8.8$ кэВ; $E_\gamma > 11.5$ кэВ (Cu-16 мкм +Al-55 мкм)	> 96 МВт $E_\gamma > 6.9$ кэВ (Al-109 мкм)	120 ГВт $E_\gamma = 200-270$ эВ, 1–3 кэВ (майлар –5 мкм)
W 16×55 мкм	26 МВт $E_\gamma = 4.5-5 > 10$ кэВ (Al-8мкм+Ti-44 мкм)	18 МВт $E_\gamma > 10.3$ кэВ (Al-381 мкм)	120 ГВт $E_\gamma = 200-270$ эВ, 1–3 кэВ (майлар –5 мкм)

температуру электронов плазмы в ГТ молибденовых X-пинчей $T_e \sim 1000$ эВ и электронную плотность больше 10^{21} см $^{-3}$. Дополнительным подтверждением наличия “классической” ГТ могут служить особенности наблюдаемых рентгеновских спектров: в случае образования ГТ на них, кроме линий, должно наблюдаться непрерывное (чернотельное) излучение [2], что и наблюдается на указанном спектре.

Абсолютное значение энергии, излученной в узком спектральном диапазоне, оценивалось по почернению используемой фотопленки с учетом светосилы спектрографа и коэффициентов отражения от кристаллов. Грубое экспериментальное сравнение чувствительности пленок Кодак CX и Кодак DEF (чувствительность последней известна [10]) показало, что пленка CX в диапазоне энергий от 2.5 до 10 кэВ в

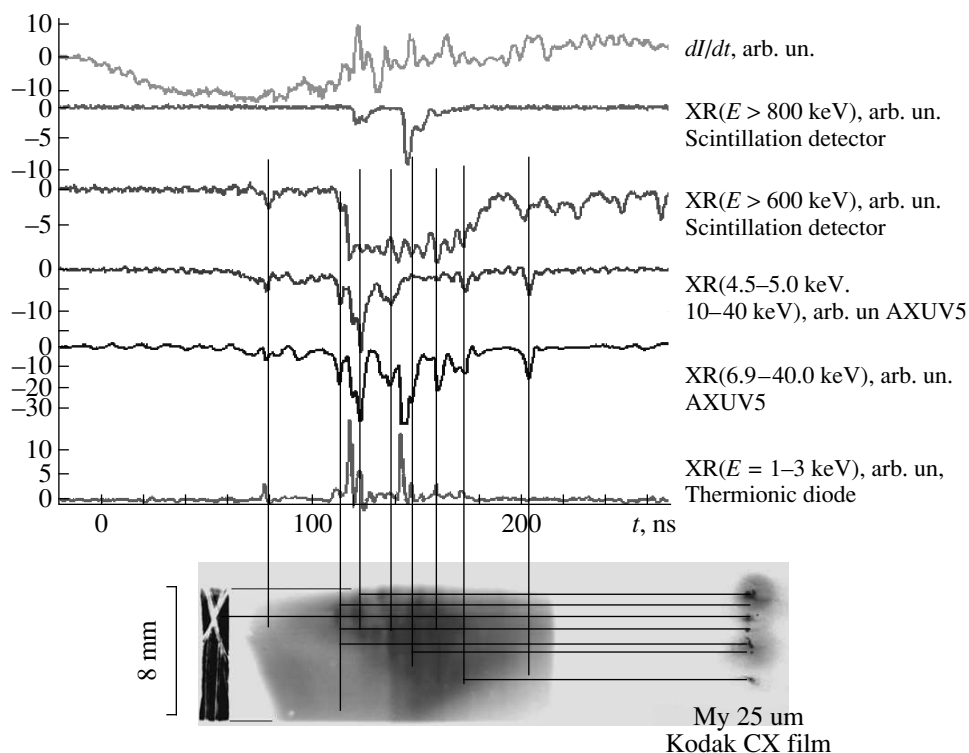


Рис. 3. То же, что и на рис. 2 для W 8 × 55 мкм X-пинча

несколько раз менее чувствительна, чем DEF. Используя табличную чувствительность последней, мы получали оценки снизу для энергии, излученной в отдельных спектральных интервалах. Можно утверждать, что значение энергии в диапазоне 2.5–3 кэВ для молибденового X-пинча, не меньше 10 Дж (см. рис. 5). В этом же эксперименте вакуумным диодом зарегистрирована мощность $2.3 \cdot 10^{10}$ Вт при длительности импульса 2 нс; это соответствует энергии ~ 50 Дж в диапазоне энергий 1–3 кэВ.

Как отмечалось выше, жесткое рентгеновское излучение в наших экспериментах регистрировалось сцинтилляционными детекторами, сигналы с которых приведены на рис. 2–4. Максимальная мощность γ -излучения (в области энергий $E \geq 800$ кэВ), полученная в экспериментах с X-пинчем, изготовленным из 16-ти 100 мкм молибденовых проволочек (рис. 2), составляет $P \sim 8 \cdot 10^5$ Вт.

Импульсы жесткого излучения возникают на несколько наносекунд позже импульсов мягкого (1–3 кэВ) излучения, причем у импульсов большей жесткости и задержка больше (см. рис. 2–4). Это можно объяснить в рамках сценария эволюции “перетяжка – горячая точка – минидиод” [1, 11]. По-видимому, жесткое излучение является тормозным излучением электронного пучка, который ускоряется в миниди-

оде. Рост эффективного сопротивления такого диода обуславливает рост ускоряющего напряжения, превосходящего напряжение генератора в несколько раз.

Для регистрации динамики плазменных объектов, излучающих в видимом диапазоне, применялся электронно-оптический хронограф, времяанализирующая щель которого устанавливалась вдоль оси X-пинча. На хронограммах (см. рис. 2–4) видно появление свечения сначала вблизи перетяжки, затем область свечения постепенно расширяется к электродам. В ней видны более яркие локальные излучающие образования, которые по времени коррелируют с импульсами мягкого рентгеновского излучения. Во всех экспериментах каждому рентгеновскому импульсу соответствует своя точка на хронограммах, однако некоторые точки появляются и в моменты времени, когда рентгеновское излучение не зарегистрировано (по-видимому, некоторые светящиеся области излучают только очень мягкое излучение, которое не регистрируется нашими датчиками). Кроме того, существует пространственная корреляция между расположением точек на хронограммах по оси X-пинча с расположением ГТ на обскуротграммах (см. рис. 2–4).

Возникновение расходящихся областей свечения естественно связывать с появлением плазмы на

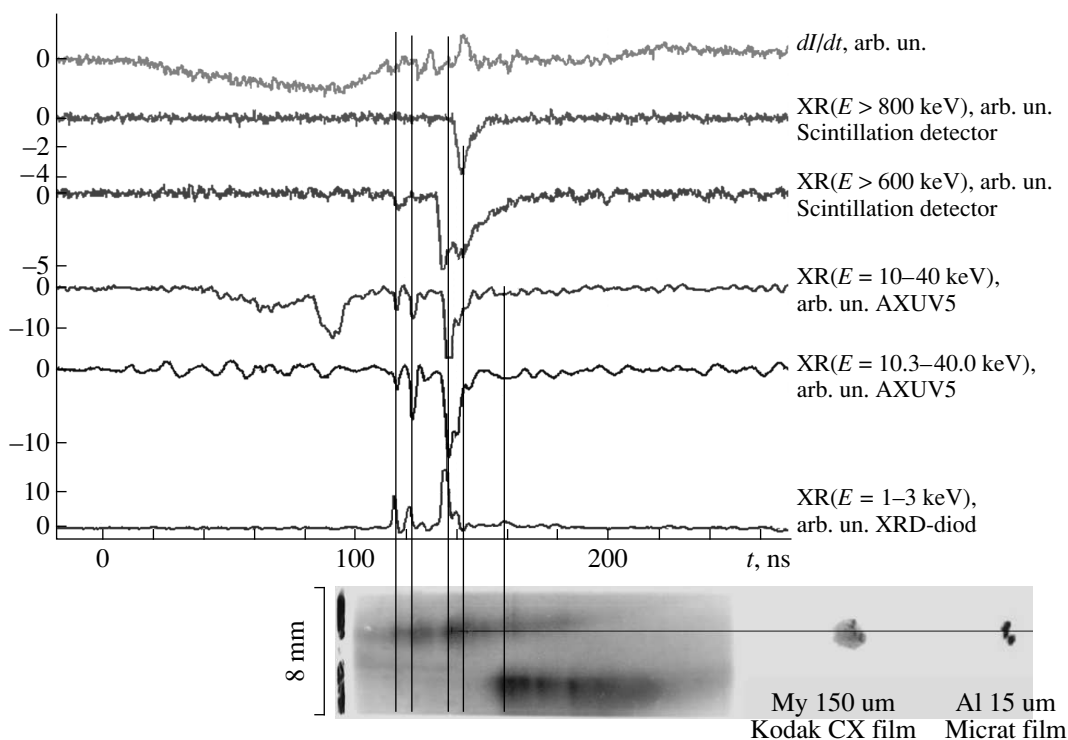


Рис.4. То же, что и на рис.2 для W 16 × 55 мкм X-пинча

оси X-пинча в результате схлопывания плазменных струй, исходящих из остовов провололок [1]. Действительно, в случае “недогруженности” X-пинча (при неоптимальном подборе линейной массы нагрузки в зависимости от величины тока) запасенной в генераторе энергии достаточно, чтобы, кроме образования ГТ в перекрестии, могла пинчеваться также эта осевая плазма. При увеличении линейной массы вольфрамового X-пинча, отнесенной к квадрату максимума тока, до величины $m_l/I^2 = 4.3 \text{ мг/см} \cdot \text{МА}^2$ согласование улучшается (ср. рис.3 и 4). Действительно, на хронограмме и на обскурোগрамме видно, что количество ГТ существенно уменьшилось; они образуются в более компактной области и за более короткий промежуток времени. Соответственно, на осциллограммах наблюдается меньшее количество импульсов мягкого рентгеновского излучения.

На хронограммах излучающие области, находящиеся ближе к аноду, статистически являются более яркими; это свидетельствует о возможном участии электронных пучков в генерации тормозного излучения при их взаимодействии с плазмой.

Таким образом, в серии экспериментов по исследованию динамики молибденовых и вольфрамовых

многопроволочных X-пинчей на установке С-300 получены следующие результаты:

- проведены экспериментальные исследования X-пинча при токах более 2 МА; они подтвердили применимость основных закономерностей его динамики, сформулированных при существенно меньших токах, и, тем самым, закладывают основу для создания источника излучения с уникальными свойствами на установках с токами мультимегаамперного диапазона;
- показано, что формируется плазменный объект с яркостью излучения в диапазоне энергий квантов 1–3 кэВ выше $10^{15} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{ср}$, при размере ГТ $\sim 20 \text{ мкм}$ и мощности излучения $\sim 120 \text{ ГВт}$, что в несколько раз превосходит полученные ранее значения;
- показано, что значение энергии, излученной молибденовым X-пинчем в диапазоне 2.5–3 кэВ, не меньше 10 Дж (максимальное значение выхода, полученное в предыдущих экспериментах, – 1–2 Дж в диапазоне энергий квантов $> 1.7 \text{ кэВ}$ [5]);

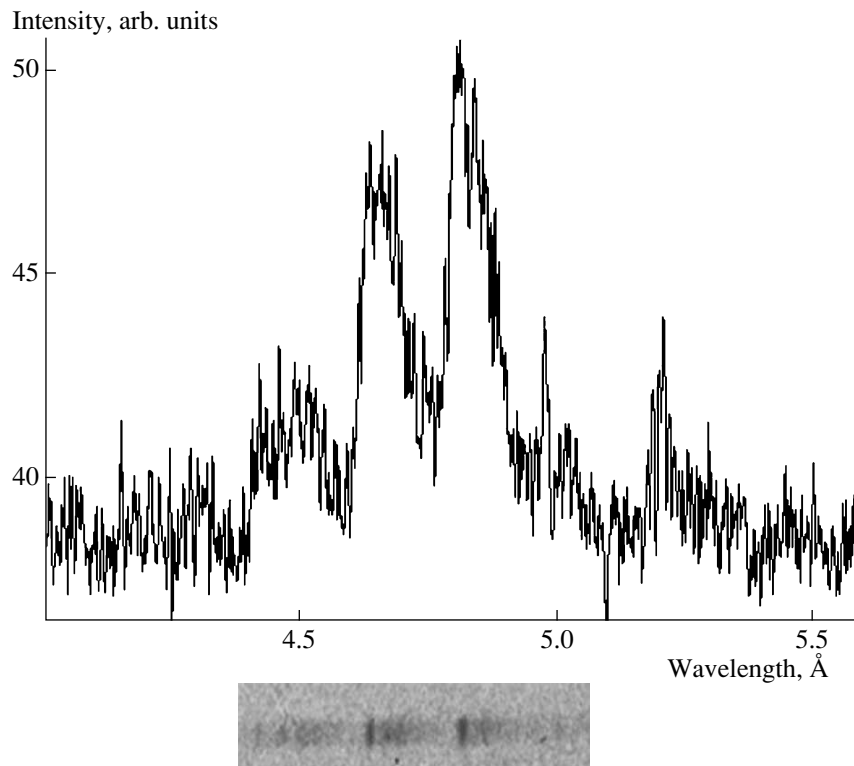


Рис. 5. Спектр и его денситограмма (в относительных единицах) в эксперименте с нагрузкой из Мо 16×100 мкм X-пинча

- зарегистрировано и исследовано жесткое рентгеновское излучение X-пинча в диапазоне энергий квантов выше 800 кэВ;
- обнаружен эффект кратковременного “зажигания” вдоль оси X-пинча ярких областей излучающих в оптическом диапазоне;
- показано, что качество вольфрамовых X-пинчей при величине параметра $m_l/I^2 = 4.3$ мг/см \cdot МА 2 выше, чем при 1.6 мг/см \cdot МА 2 .

Работа поддержана контрактом Лаборатории “Сандия” – РНЦ “Курчатовский институт” # 707492, а также грантами Российского фонда фундаментальных исследований # 08-02-01102, # 08-02-00993 и “Научная школа” НШ-1252.2008.2.

1. T. A. Shelkovenko, D. B. Sinars, S. A. Pikuz, and D. A. Hammer, *Phys. Plasmas* **8**, 1305 (2001).
2. С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. Б. Синарс, Д. А. Хаммер, *Физика плазмы* **32**, 1106 (2006).
3. K. N. Koshelev and N. R. Pereira, *J. Appl. Phys.* **69**, R21 (1991).
4. V. L. Kantsyrev, D. A. Fedin, A. S. Shlyaptseva et al., *Phys. Plasmas* **10**, 2519 (2003).
5. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, J. D. Douglass et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34**, 2336 (2006).
6. J. P. Chittenden, A. Ciardi, C. A. Jennings et al., *PRL* **98**, 025003 (2007).
7. A. S. Chernenko, Yu. M. Gorbunin, Yu. G. Kalinin et al., in *Proc. of the 11th Int. Conf. on High-Power Particle Beams*, Prague, 1996, p. 154.
8. С. И. Аневский, С. А. Данько, Ю. М. Золотаревский и др., *Диагностика высокотемпературной термоядерной плазмы с использованием эталонных приемников экстремального ультрафиолетового излучения*, тезисы докладов XVI-й конференции *Фотометрия и ее метрологическое обеспечение* 10–13 апреля 2007, г. Москва, стр. 115.
9. S. B. Hansen, A. S. Shlyaptseva, S. A. Pikuz et al., *Phys. Rev. E* **70**, 026402 (2004).
10. B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis, *At. Data Nucl. Data Tables* **54**, 181 (1993).
11. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, B. M. Song et al., *Phys. Plasmas* **12**, 033102 (2005).