

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ X-ПИНЧЕЙ

© 2020 г. Т. А. Шелковенко^{а, *}, И. Н. Тиликин^а, Е. А. Болховитинов^а, А. А. Кологривов^а,
А. Р. Мингалеев^а, В. М. Романова^а, В. Б. Зорин^а, А. А. Рупасов^а, С. А. Пикуз^{а, **}

^а Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*e-mail: tchel55@mail.ru

**e-mail: pikuz@mail.ru

Поступила в редакцию 05.07.2019 г.

После доработки 22.08.2019 г.

Принята к публикации 22.08.2019 г.

Приведены результаты экспериментального исследования гибридных X-пинчей (ГХП) как источников вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ) в диапазоне длин волн $\lambda < 2000 \text{ \AA}$. Для питания X-пинчей использовался малогабаритный низковольтный генератор КИНГ (45 кВ, 200 кА, 190 нс). Динамика образования излучающей плазмы ГХП из различных материалов изучалась с помощью камер-обскур с приемниками излучения на основе микроканальных пластин с временным разрешением 5 нс и с пространственным разрешением 150 мкм. Временная структура и энергетические характеристики излучения исследовались с использованием алмазных датчиков с фотопроводимостью (ФПД). Спектральный состав УФ-излучения исследовался при помощи спектрографа на основе пропускающей дифракционной решетки. Показано, что КПД преобразования запасенной в конденсаторах энергии в ВУФ-излучение может достигать до 5%, тогда как доля мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с энергиями квантов выше 800 эВ не превышает 3%. При этом яркость источника достигает $2 \times 10^9 \text{ Вт/см}^2$.

Ключевые слова: X-пинч, УФ-излучение, Источник УФ-излучения, УФ-спектроскопия плазмы

DOI: 10.31857/S0367292120010163

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультрафиолетовое излучение так называемого “ближнего спектра” (3800–2000 Å) хорошо исследовано и широко применяется в различных областях человеческой деятельности: от исследования влияния его на человека до диссоциации молекул и обеззараживания в медицине, химии, биологии, сельском хозяйстве и т.д. Основным природным источником данного излучения является Солнце. При этом в мире производится и применяется великое множество искусственных УФ-источников этого диапазона, включая плазменные, полупроводниковые, ускорительные [1]. Работа в ближнем УФ-спектре не представляет трудностей, так как многие материалы для него прозрачны и могут быть использованы в качестве оптических элементов. Переход в более коротковолновую область ($\lambda < 2000 \text{ \AA}$) драматически меняет ситуацию, так как в этом диапазоне все вещества, в том числе атмосфера, становятся сильно поглощающими (отсюда название вакуумный ультрафиолет – ВУФ). Но именно это свойство ВУФ-излучения представляет значительный интерес для некоторых применений, например, для микро-

нанотехнологий в микроэлектронике, физике тонких пленок, химии и биологии [2]. Весьма перспективным может быть использование вакуумного ультрафиолета в физике высокотемпературной плазмы для диагностики малоплотных областей плазменных объектов ($< 10^{16} \text{ см}^3$) – там, где рентгеновские и лазерные методики малопродуктивны. В силу вышесказанного создание мощных источников ВУФ-излучения представляет актуальную задачу.

Генерация коротковолнового ультрафиолета напрямую связана с созданием плазменных источников с достаточно высокой температурой ($T_e \geq 50\text{--}100 \text{ эВ}$) и высокой эффективностью преобразования энергии “от розетки”. Помимо этого, чтобы обеспечить необходимую яркость источника, излучающая плазма должна быть достаточно компактной. Всем этим требованиям удовлетворяет X-пинч (см. обзоры [3, 4]). До сих пор X-пинч рассматривался в основном как источник мягкого (МРИ, $2 \text{ \AA} < \lambda < 20 \text{ \AA}$) и жесткого (ЖРИ, $\lambda < 2 \text{ \AA}$) рентгеновского излучения, в этом качестве он нашел широкое практическое приме-

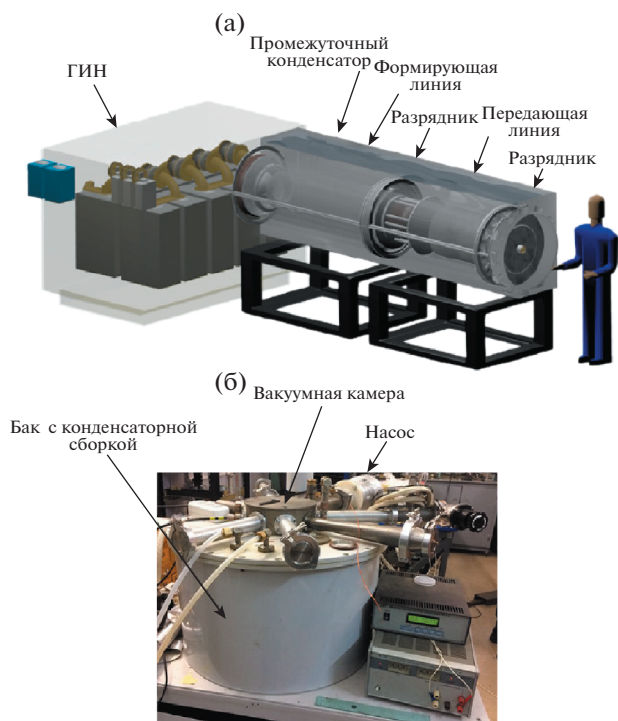


Рис. 1. а) — Схема стандартного высоковольтного генератора с промежуточными обстрелителями импульса; б) — фотография низковольтного генератора КИНГ (рядом для масштаба показана линейка длиной 30 см).

нение [5]. В настоящей работе X-пинч обсуждается как источник ВУФ-излучения.

Чтобы выбрать подходящий токовый генератор для этой цели, желательно, в частности, знать насколько такой параметр, как величина производной тока, существенен для генерации ВУФ-излучения. Дело в том, что, как известно, для работы X-пинча в качестве источника МРИ в генераторе тока строго необходимо выполнение критерия $dI/dt \geq 1$ кА/нс [3, 4]. Это условие легко достигается в высоковольтных сильноточных установках, собранных по схеме генератор Маркса—промежуточный накопитель—формирующая линия—нагрузка (на рис. 1а представлена блок-схема стандартного сильноточного импульсного генератора). Подобные генераторы являются весьма габаритными устройствами и могут использоваться только в стационарных лабораторных условиях. Примером такой установки, используемой для создания пинчей различной конфигурации в Физическом институте РАН, является генератор БИН (Быстрый Импульсный Накопитель). Результаты выполненных ранее исследований ВУФ-излучения X-пинча на высоковольтном генераторе БИН опубликованы в [6, 7].

В последнее время появились существенно более простые малогабаритные генераторы (рис. 1б),

работающие на низкоиндуктивных конденсаторах при сравнительно небольших напряжениях [8, 9]. В них также возможно выполнение критерия $dI/dt \geq 1$ кА/нс, однако для этого требуется тщательный подбор параметров нагрузки, практически на пределе возможностей установки. Поэтому определение важности данного критерия для генерации ВУФ-излучения в X-пинче было одной из задач представленных ниже экспериментов.

Комбинация низковольтных установок [9] с нагрузками в виде гибридных X-пинчей [10, 11] представляется наиболее предпочтительной среди остальных пинчевых устройств с точки зрения создания источника УФ-излучения. В этом случае практически не происходит генерации рентгеновских квантов с энергией выше 6 кэВ [11, 12]. Жесткая компонента рентгеновского излучения является нежелательной для ряда приложений (например, литографии), тогда как в стандартных X-пинчах, даже при использовании низковольтных генераторов, ее доля достаточно высока [9, 13]. Присутствие интенсивной компоненты жесткого излучения может снизить эффективность преобразования энергии генератора в УФ-излучение.

В настоящей работе приведены эксперименты по генерации ВУФ-излучения, выполненные на низковольтном генераторе КИНГ (Компактный Импульсный Наносекундный Генератор), разработанном в Институте сильноточной электроники СО РАН. Гибридные X-пинчи, служившие нагрузкой генератора, представляли собой тонкую проволочку длиной 1–3 мм и толщиной 20–25 микрон, расположенную между тугоплавкими коническими электродами из сплава вольфрама с медью [10]. В результате проведенных экспериментов получена оценка размера излучающей области пинча в ВУФ-диапазоне, исследована динамика и излучательные характеристики разрядной плазмы — пространственное распределение излучения, излученная энергия и мощность источника в диапазоне энергией фотонов выше 10 эВ.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка КИНГ представляет собой импульсный генератор тока на основе четырех малоиндуктивных импульсных конденсаторов НСЕІсар 50–0.25 М, совмещенных с управляемыми разрядниками и соединенных в параллель. С целью уменьшения индуктивности генератора вакуумная камера с нагрузкой располагается непосредственно над корпусом с конденсаторами. Внешний диаметр корпуса равен 60 см (рис. 1б). Основным преимуществом генератора КИНГ перед другими малогабаритными генераторами близкой конструкции [8, 9] является использование усовершенствованных конденсаторов с боль-

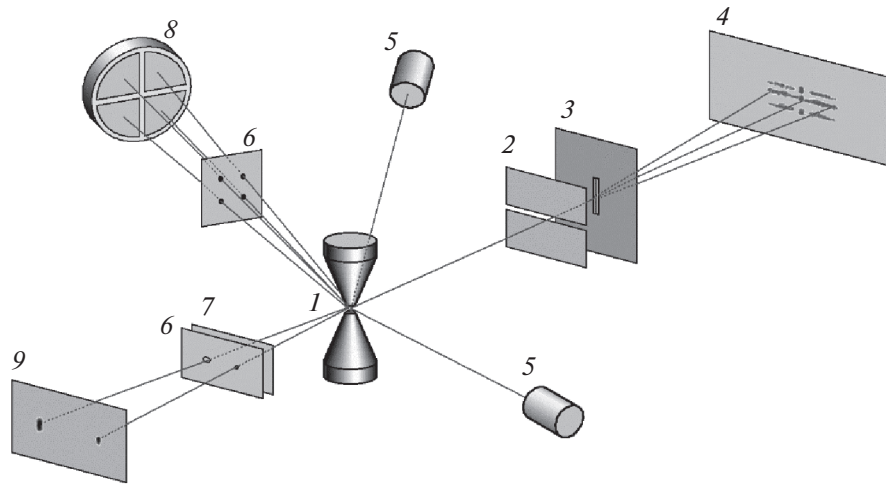


Рис. 2. Схема расположения диагностик относительно X-пинча: 1 – GXП; 2 – щель пропускающей решетки; 3 – пропускающая дифракционная решетка; 4, 9 – запоминающие пластины; 5 – алмазные детекторы с фотопроводимостью; 6 – камеры обскуры; 7 – фильтры; 8 – микроканальная пластина.

шим сроком службы. Важной особенностью данной установки является также возможность ее запуска низковольтным TTL сигналом в заданный момент времени. Регулировка времени запуска осуществляется посредством многоканального генератора задержанных импульсов (ГЗИ), встроенного в блок управления. Использование ГЗИ для запуска генератора позволяет синхронизовать с ним любые другие устройства – как для диагностики, так и для создания исследуемых плазменных объектов. Для контроля работы генератора в цепи разрядного тока установлен интегрирующий пояс Роговского и петля для измерения производной тока по времени [14]. В GXП использовались проволоки из Mo диаметром 20 мкм и из Al, Cu, Ag, Ti диаметром 25 мкм.

Диагностический комплекс и его расположение относительно X-пинча показаны на рис. 2. Пространственная структура излучающей области в мягком рентгеновском (МРИ) и УФ-диапазонах интегрально во времени исследовалась с помощью камер-обскур с отверстиями диаметром 200 мкм – либо открытыми, либо закрытыми фильтрами.

Для получения изображений с временным разрешением использовался 4-х каналный электронно-оптический преобразователь на основе микроканальной пластины (МКП) [15]. Он позволял регистрировать излучение в диапазоне энергий от УФ (с энергией фотонов >10 эВ) до МРИ с энергией >1 кэВ. В экспериментах использовалась МКП, поле которой разделено на 4 сектора, каждый из которых управляется независимо (один из них в данных экспериментах не использовался, поскольку имел значительно меньшую чувствительность). Изображения X-пинча

проецировались на МКП с помощью трех открытых камер-обскур с диаметрами отверстий 100 микрон, что позволяло получать 3 кадра в разные моменты времени. Экспозиция кадра равнялась 5 нс, время от начала одного кадра до начала следующего – 10 нс. Дифракционная энергия отсечки обскур в данной геометрии составляла ~ 40 эВ, увеличение – 1.25.

Для измерения энергии, излучаемой в разных энергетических интервалах применялись два калиброванных алмазных детектора с фотопроводимостью (ФПД) – как открытые, так и экранированные тонкой сеткой или закрытые различными фильтрами: полипропиленовым толщиной 4 мкм, лавсановым толщиной 2 мкм, а также бериллиевой (Be) фольгой толщиной 10 микрон. Детектор с полипропиленовым фильтром регистрировал излучение (по уровню выше 10%) в диапазоне от 175 до 280 эВ (в углеродном окне полипропилена) и выше 650 эВ; детектор с фильтром из лавсана (Mylar) – от 200 до 280 эВ (углеродное окно), от 450 до 550 эВ (кислородное окно) и выше 650 эВ; детектор с Be фильтром – выше 800 эВ; сетка пропускала излучение с энергией выше 10 эВ. Пропускание фильтров, использованных в экспериментах, показано на рис. 3. Жесткое рентгеновское излучение в настоящей работе не диагностировалось, поскольку все предыдущие эксперименты с гибридными X-пинчами, проводимые на разных установках, показали практически полное отсутствие излучения электронного пучка с энергией квантов выше 5 кэВ [16].

Попытка регистрировать излучение детектором без фильтра (то есть в диапазоне энергий выше 10 эВ) натолкнулась на неожиданную проблему – пробой поверхности кристалла датчика под

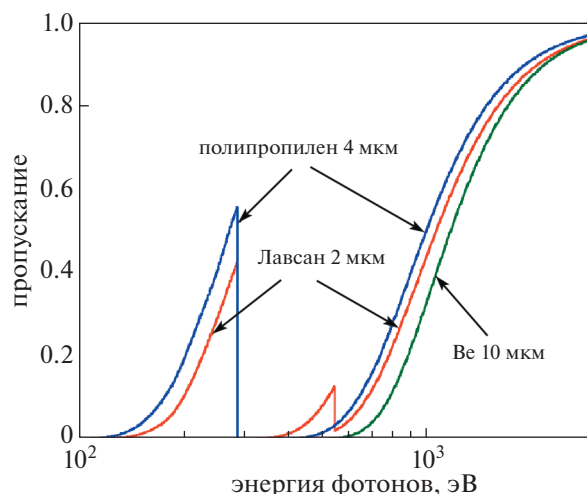


Рис. 3. Пропускание фильтров ФПД.

воздействием этого излучения. Превышение определенного порога мощности приводит к образованию на поверхности кристалла плазмы, шунтирующей электроды, и ток в цепи регистрации сигнала резко возрастает, что выглядит, как насыщение детектора. Проблему удалось решить простым способом, а именно помещением перед детектором экрана из тонкой никелевой сетки с периодом 12.7 мкм и пропусканием 36%. При этом в 50% выстрелов пробой поверхности кристалла все же происходил, но позднее, примерно на 250–300-й нс после начала тока, что соответствовало уже распаду пинча, и эта часть сигнала не принималась во внимание. Сигналы с калиброванных алмазных детекторов использовались для расчета излученной энергии в УФ-диапазоне, поскольку они обладают постоянной чувствительностью в широком — от 10 до 4000 эВ — энергетическом интервале [17]. Для фотонов с более высокой энергией чувствительность ФПД падает примерно до 30% от максимальной (при 10000 эВ).

Для исследования спектрального состава излучения гибридных и стандартных X-пинчей в ВУФ-диапазоне применялся спектрограф на основе золотой пропускающей дифракционной решетки (ПДР) с аспектным отношением 1/4. Пространственное разрешение спектрографа в направлении перпендикулярном дисперсии обеспечивалось щелью шириной 100 мкм, установленной перед решеткой. Подробное описание спектрографа приведено в [6, 7].

Регистрация пространственно-разрешенных спектральных изображений и изображений с камер обскур производилась на люминесцентные запоминающие пластины Fuji TR. Пластины TR-типа не имеют защитного слоя, что расширяет диапазон их чувствительности вплоть до мягкого ультрафиолетового излучения [18, 19]. К сожалению,

чувствительность запоминающих пластин линейно падает с уменьшением энергии излучения, поэтому лучше всего их использовать в тех ситуациях, когда уровень жесткого излучения минимален. По сравнению с регистрацией на обычные рентгеновские фотопленки преимущество запоминающих пластин заключается в значительном упрощении процедуры получения и анализа изображений. Пластины могут быть использованы многократно — в сканере предусмотрена процедура удаления старого изображения [6]. При этом они практически не чувствительны к рассеянному дневному свету и поэтому не требуют специальной защиты. Динамический диапазон пластин при использовании стандартного Durr HD-CR35 NDT сканера достигал в наших экспериментах нескольких тысяч и ограничивался уровнем шумов. Более того, его можно расширить еще на 1–3 порядка применением многократного сканирования. Каждое последующее сканирование уменьшает уровень записи сигнала на пластине, при этом сохраняется линейность отклика, а изображение не искажается [20]. Дополнительным преимуществом (по сравнению с пленкой) регистрации на запоминающие пластины TR типа является отсутствие у кривой чувствительности явно выраженного характерного провала, связанного с поглощением излучения на углеродном К-крае, который сильно искажает форму регистрируемого на фотопленку спектра. Недостатком данного способа регистрации изображений является более низкое, чем у фотопленки, пространственное разрешение (~50 микрон), однако это не является особенно важным при исследовании УФ-излучения X-пинчей.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Угловое распределение УФ-излучения

Область X-пинча, излучающая в УФ-диапазоне, имеет достаточно большой размер, а ее излучение не обязательно является изотропным. Поскольку до сих пор возможная анизотропия излучения не исследовалась, в настоящей работе были проведены специальные эксперименты по измерению углового распределения УФ-излучения в азимутальном направлении. При этом использовались два ФПД (с сетками), которые размещались под разными углами к проволочке ГХП в экваториальной плоскости (рис. 2). В полярном направлении такие измерения были невозможны из-за конструкции вакуумной камеры. На рис. 4а представлены характерные сигналы двух ФПД. При неоднократном изменении направлений измерения для всех исследуемых проволочек сигналы оставались практически идентичными — вплоть до максимума тока ГХП. После этого часто происходил пробой диэлектрика, даже сквозь сетку (например, сигналы ФПД на рис. 4), и даль-

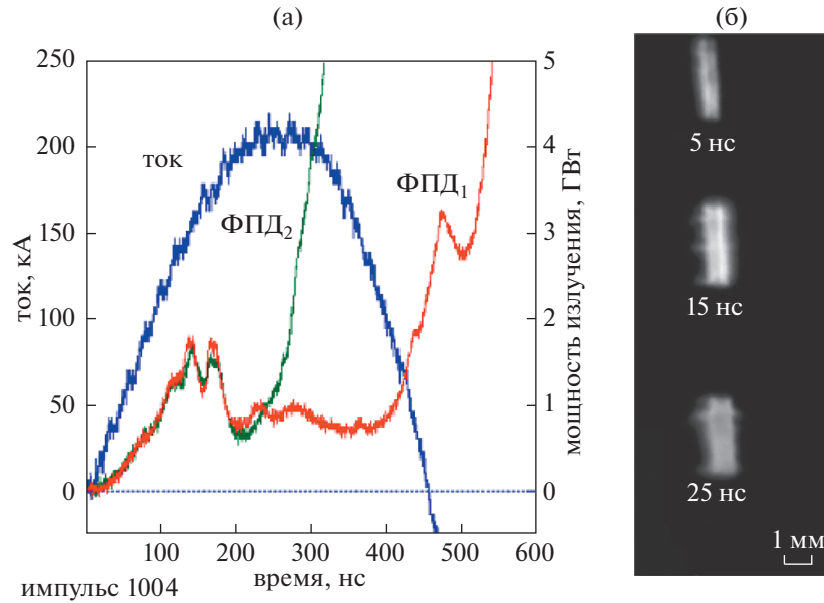


Рис. 4. а) — Ток ГХП и мощность УФ-излучения в экспериментах с медной проволокой. Регистрация двумя одинаковыми ФПД (с сетками), расположенными под углом 180° друг к другу. Мощность излучения рассчитана в предположении изотропного углового распределения; б) — изображения излучающей области ГХП с Cu проволокой, зарегистрированные МКП с камерами-обскурами диаметром 100 мкм в ранние моменты времени относительно тока.

нейшее сравнение оказывалось невозможным. Во всяком случае, в течение первых ~ 250 – 300 нс УФ-излучение ГХП можно считать изотропным по азимуту.

Размер излучающей области и динамика ГХП

Начальная стадия ГХП представляет собой взрыв и расширение короткой проволоки с образованием ядра и короны, типичных для любого быстрого взрыва тонких проводников [11, 14–16]. На сильноточных установках дальнейшее пинчевание плазмы приводит к образованию т.н. ярких областей, или “ярких точек” (см. ниже). На рис. 5 и 6 представлены последовательные во времени изображения взрыва ГХП с медной (Cu) и молибденовой (Mo) проволоками. Первые кадры рис. 5а и 6б соответствуют моменту излучения яркой точки. Согласно сигналам ФПД, яркая точка в ГХП с Cu и Mo проволоками образовалась на 107-й и 105-й наносекундах соответственно. Более поздние кадры, зарегистрированные в процессе распада ГХП, демонстрируют, что после взрыва яркой точки происходит образование минидиода с дальнейшим расширением плазмы [11]. Стадии распада для всех использованных проволочек различаются только яркостью УФ-излучения и варьированием размера источника в пределах 1–3 мм. На рис. 5б приведены УФ-изображения поздней стадии взрыва ГХП с медной проволокой. Для выявления наиболее ярких областей они были обработаны в программе Adobe

Photoshop (рис. 5в). Из этих изображений следует, что размер яркой области равен 1–1.5 мм. Это хорошо соответствует размеру излучающей области ГХП на изображении, полученном с помощью камеры-обскуры без разрешения во времени (рис. 7в), которое, тем самым, позволяет увидеть

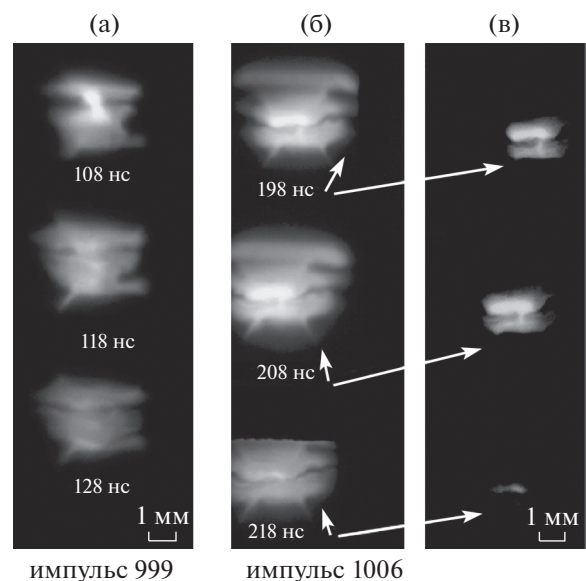


Рис. 5. а, б) — Изображения излучающей области ГХП с медной проволокой, зарегистрированные МКП с камерами-обскурами диаметром 100 мкм без фильтра в разные моменты времени; в) изображения 5б, обработанные в программе Adobe Photoshop.

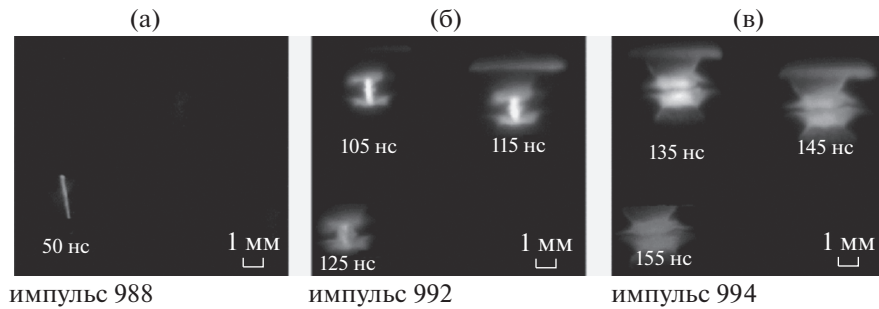


Рис. 6. Изображения излучающей области ГХП с молибденовой провололочкой, зарегистрированные МКП с камерами-обскурами диаметром 100 мкм в разные моменты времени.

лишь долгоживущие, а также наиболее ярко излучающие области ГХП.

Результаты наших предыдущих экспериментов [11] показали, что на начальной стадии, до заполнения мини-диода приэлектродной плазмой, расширение провололочек из различных материалов в ГХП протекает в полном соответствии с разделением металлов на группы по их термоэлектрическим свойствам [21]. Например, проволоочки из Al, Cu и Ag, относящиеся к первой группе металлов, расширяются намного быстрее, чем проволоочки из Mo и Ti, входящих во вторую группу. Из сравнения рис. 4б и 6а (ГХП с Cu и Mo провололочками) видно, что в случае молибдена УФ-излучение регистрируется почти на 50 нс позже, а сама проволоочка расширена значительно меньше, чем в случае меди. Известно, что в высоковольтных сильноточных генераторах пробой по поверхности провололочек из любых материалов происходит в первые 5–15 нс [21]. Следовательно, можно предположить, что раз в момент получения изображения пробой Mo проволоочки уже заведомо произошел, она должна излучать, однако при использовании напряжения на МКП чувствительности МКП не хватает, чтобы зарегистрировать УФ-излучение столь мало расширенного объекта. Максимальное расширение Mo проволоочки достигает около 0.3 мм примерно за 50 нс, что дает среднюю скорость расширения $\sim 5\text{--}6$ мкм/нс. При этом медная проволоочка расширяется почти до 1 мм за ~ 30 нс, среднюю скорость ее расширения можно оценить как $\sim 15\text{--}20$ мкм/нс.

УФ-излучение ГХП в режимах с образованием яркой точки и без

Пинчевание вещества в ходе сильноточного взрыва приводит к возникновению интенсивно излучающих компактных областей — так называемых “ярких точек” (ЯТ), которые могут существенно различаться степенью сжатия плазмы (плотностью и температурой). Максимальные параметры сжатия достигаются в так называемых горячих точках (ГТ) — областях плазмы размером

порядка одного микрона и с электронной температурой около килоэлектронвольта [4]. Как отмечалось выше, для образования в X-пинче “горячей точки” — интенсивного источника мягкого рентгена — необходимо выполнение условия $dI/dT \geq 1$ кА/нс. Помимо “настоящей” ГТ в X-пинче могут образовываться яркие области большего размера ($10 \text{ мкм} < \Delta x < 50 \text{ мкм}$), также излучающие МРИ, однако значительно меньшей интенсивности, которые в работе [6] были определены как “недожатые” ГТ (нГТ). Возможно также появление локальных областей, в которых сжатие не достигает микронных размеров, однако температура плазмы при этом достаточно высокая. Такие “яркие точки” интегрально могут излучать значительное количество энергии в широком диапазоне спектра — от МРИ (по преимуществу в линиях) до УФ и видимого света. В работах [3, 4, 22] приведены условия необходимые для образования ГТ, нГТ и ярких точек в X-пинчах.

Генератор КИНГ, как правило, обеспечивал параметры разрядного тока, незначительно превышающие пороговое значение ≥ 1 кА/нс, поэтому можно было ожидать образование в ГХП излучающих областей всех типов. С точки зрения задач данной работы различие между ними не должно быть существенным, поскольку все они излучают в ультрафиолетовом диапазоне. До начала экспериментов четкого ответа на вопрос, какова зависимость УФ-излучения от наличия и характера яркой точки, не было. Можно было только предположить, что именно эти последние в основном ответственны за УФ-излучение, поэтому режимы работы ГХП мы разделили по критерию наличия или отсутствия яркой точки в течение импульса тока. Однако оказалось, что лишь у ГХП с Al провололочками яркие точки образуются в 100% выстрелов. В ГХП с провололочками из Cu и Ag это происходило лишь в $\sim 80\%$ и 70% выстрелов, в ГХП, соответственно, с провололочками из Ti и Mo в $\sim 30\%$ выстрелов. Отметим, что критерий ≥ 1 кА/нс выполнялся лишь в 50% ГХП для всех исследуемых материалов провололочек. При этом УФ-излучение регистрировалось во всех без ис-

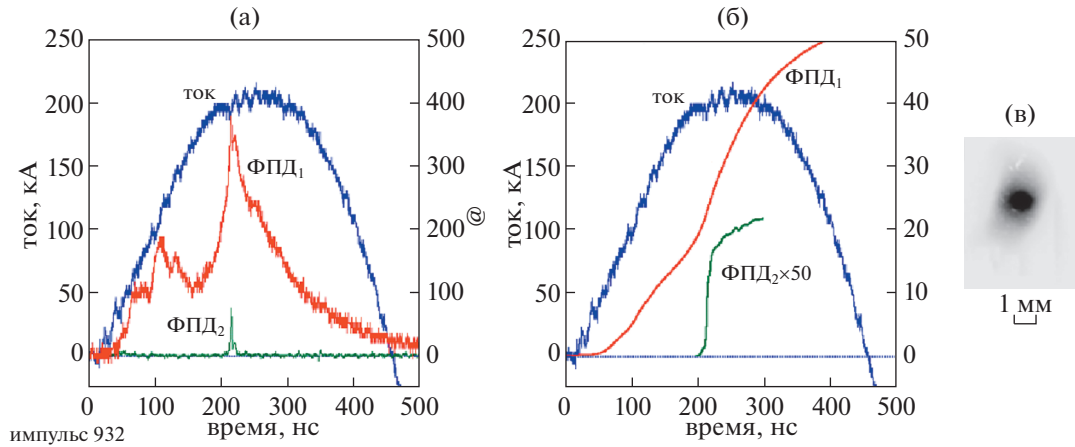


Рис. 7. а) – Ток ГХП и мощность УФ-излучения в эксперименте с Cu проволокой. Регистрация ФПД1 с сеткой и ФПД2 с Be фильтром; б) – рассчитанная энергия излучения для квантов >10 эВ (кривая ФПД1) и >800 эВ (кривая ФПД2); в) – изображение излучающей области данного ГХП, зарегистрированное на запоминающей пластине TR с помощью камеры-обскуры диаметром 200 микрон с дифракционной энергией отсечки 45 эВ. Условие $dI/dt \geq 1$ кА/нс в данном выстреле выполнялось.

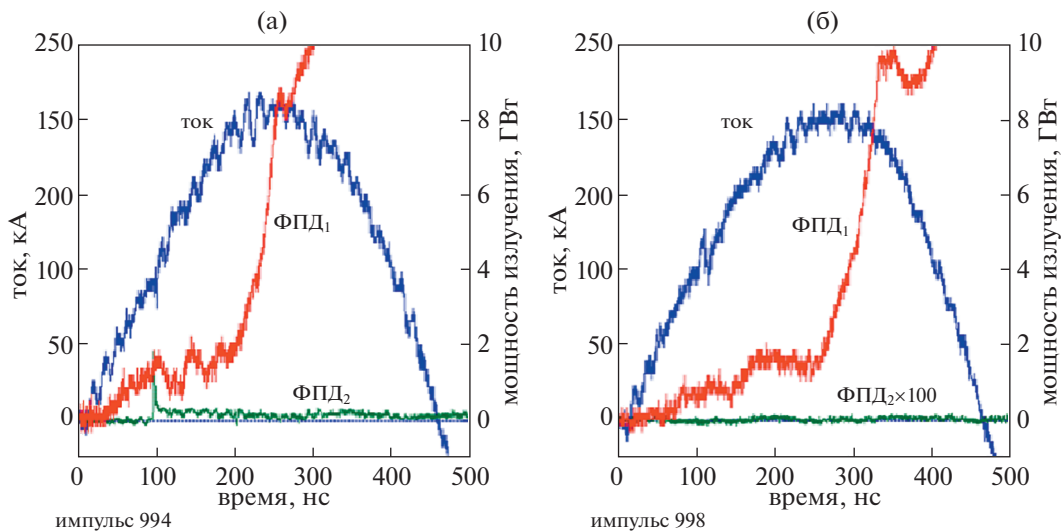


Рис. 8. Ток ГХП и мощность УФ-излучения, зарегистрированная ФПД1 с сеткой и ФПД2 с Be фильтром в ГХП с Mo проволокой при образовании (а) и без образования яркой точки (б).

ключения выстрелах и, как показали измерения, интегральная излученная энергии при наличии яркой точки и без нее была примерно одинакова.

На рис. 8–10 приведены типичные осциллограммы, зарегистрированные в ГХП с образованием яркой точки (рис. 8а, 9а, 10а) и без ее образования (рис. 8б, 9б, 10б) в ГХП с Mo, Cu и Ag проволочками. В случае отсутствия яркой точки мягкое рентгеновское излучение не регистрируется: сигнал ФПД через Be фильтр близок к нулю. Из рис. 10 видно, что при практически одинаковой излученной энергии, зарегистрированной ФПД с сеткой, амплитуда сигнала при образова-

нии яркой точки выше, а длительность меньше, поэтому мощность УФ-излучения выше.

Данные исследования подтверждают, что исследованные ГХП разделяются на две группы в соответствии со свойствами материала проволочки. Динамика УФ-излучения аналогична у всех ГХП, относящихся к данной группе. Например, все проволочки первой группы начинают излучать в первые 5–10 нс после начала тока и быстро расширяются; при этом доля МРИ относительно всего зарегистрированного излучения больше, чем во второй группе.

В таблице 1 приведены значения энергии, излученной ГХП с проволочками из различных ма-

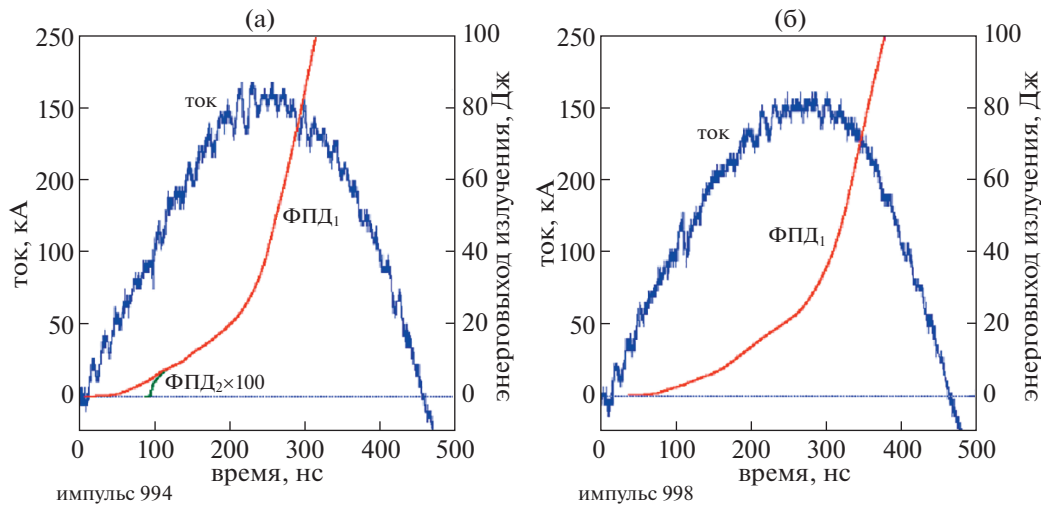


Рис. 9. Ток ГХП и энергия УФ-излучения, зарегистрированная ФПД1 с сеткой и ФПД2 с Ве фильтром в ГХП с Мо проволокой с образованием ($dI/dt \sim 1.1$ кА/нс) (а) и без образования яркой точки ($dI/dt \sim 0.9$ кА/нс) (б).

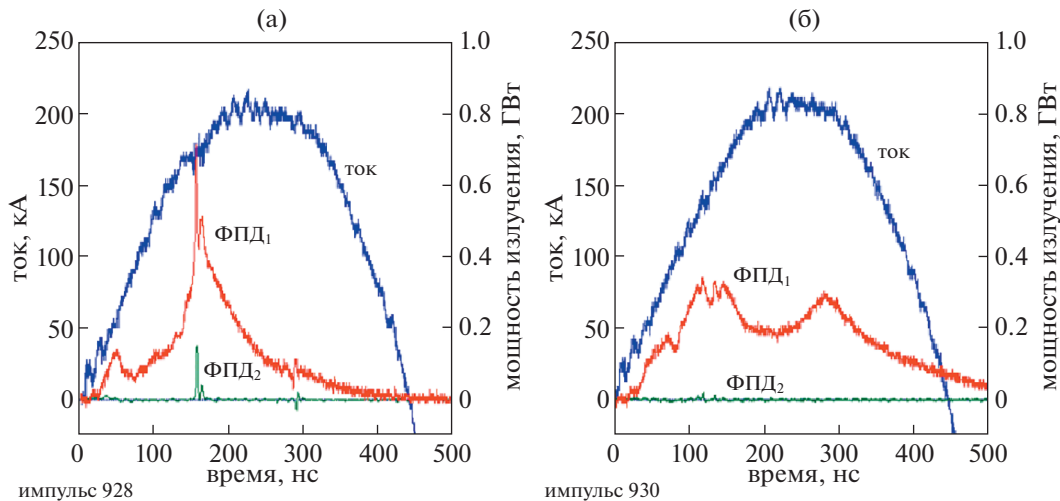


Рис. 10. Ток ГХП и мощность УФ-излучения, зарегистрированные ФПД1 с сеткой и ФПД 2 с Ве фильтром в ГХП с Ag проволокой при образовании ($dI/dt \sim 1.3$ кА/нс) (а) и без образования яркой точки ($dI/dt \sim 0.9$ кА/нс) (б).

териалов в УФ- и МР-диапазонах. Расчет производился путем численного интегрирования значений мощности излучения в приближении изотропного углового распределения. Поскольку позже 300 нс изотропность источника ВУФ-излучения нарушалась даже без пробоя ФПД, то в таблице указаны значения энергии в момент времени 250 нс при пробое ФПД и 300 нс – без пробоя. Сигналы МРИ интегрировались в пределах 3–4 длительностей импульса, что позволяло избежать интегрирования шумов, не имеющих отношения к рентгеновскому излучению. Примеры соответствующих кривых показаны на рис. 7б и 9. Из таблицы 1 следует, что образование яркой точки не приводит к увеличению излученной энер-

гии в УФ-области. При этом МР-излучение яркой точки составляет менее 5% от УФ-излучения ГХП и существенного вклада в интегральную излучаемую энергию не вносит.

Спектрометрическое определение параметров плазмы ГХП

Спектральный состав УФ-излучения исследовался при помощи ПДР-спектрографа. Были изучены спектры излучения ГХП с Al, Ti, Cu, Mo и Ag проволоками диаметром 25 микрон. Полноценный анализ получаемой с помощью решетки спектральной информации потребовал восстановления истинной формы спектра, поскольку в

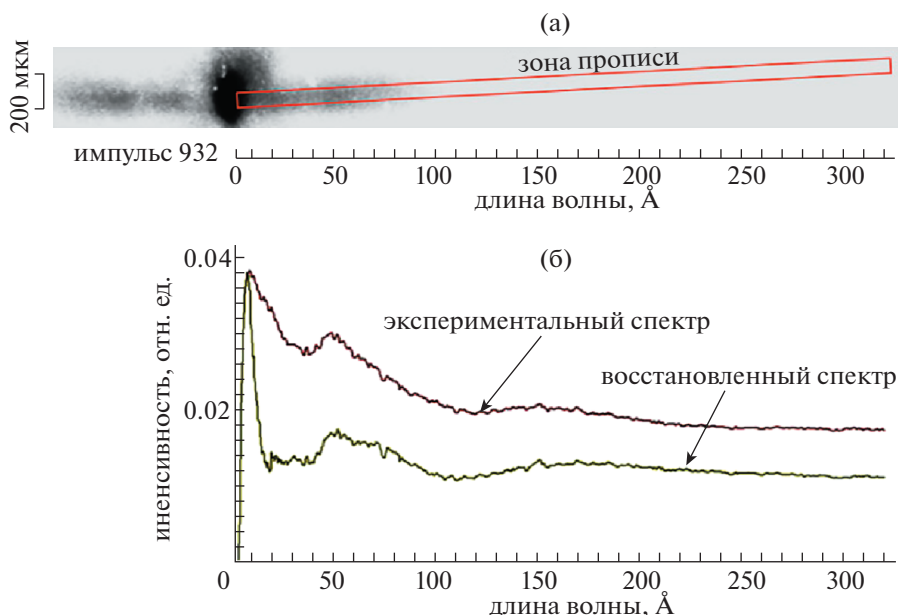


Рис. 11. а) – Спектральное изображение ГХП с медной проволочкой (регистрация на запоминающей пластине); б) – денситограмма исходного экспериментального спектра и восстановленный спектр.

регистрируемой спектрограмме различные порядки дифракции частично перекрываются. В случае непрерывного спектра определение реального спектрального распределения представляет собой нетривиальную задачу, аналитического решения которой не существует. Для реконструкции спектров был использован итерационный метод, основанный на применении алгоритма последовательной вычислительной коррекции вида дифракционной картины, регистрируемой с помощью ПДР. Описание процесса реконструкции спектров приведено в [23–25]. Пример зарегистрированного спектра и спектра после восстановления приведен на рис. 11б. Разрешение ис-

пользуемого спектрографа было не лучше 6 \AA , что недостаточно для различения отдельных спектральных линий в регистрируемом диапазоне длин волн. В результате на спектрограммах фиксируются усредненные пики, соответствующие различным группам K -, L и M -переходов ионов тех материалов, которые были использованы в качестве нагрузки. В восстановленном спектре ГХП с медной проволочкой наблюдаются два явных пика: первый от 50 до 80 \AA по полувысоте и второй от 140 до 200 \AA . Из приведенных спектрограмм следует, что размер источника излучения в диапазоне до $50\text{--}80 \text{ \AA}$ равен примерно 200 мкм .

Оценка интенсивности излучения ГХП

Из-за того, что чувствительность запоминающих пластин падает с уменьшением энергии излучения, корректное сравнение интенсивности излучения в разных диапазонах спектра невозможно. Для грубой оценки интенсивности УФ-излучения были использованы ФПД с тонкими фильтрами, кривые пропускания которых приведены на рис. 3. Сигналы ФПД с лавсановым и полипропиленовым фильтрами не показали значимого различия в длительности и амплитуде, поэтому можно считать, что доля излучения в кислородном окне лавсана пренебрежимо мала. На рис. 12а приведены стандартные сигналы ФПД с фильтрами из лавсана и бериллия (ГХП с молибденовой проволочкой). Видно, что энергия, зарегистрированная через лавсановый фильтр, выше энергии МРИ в 2.75 раза. Суммарное УФ-излучение ГХП с Мо проволочкой во

Таблица 1. Энергия выхода рентгеновского и УФ-излучения ГХП с проволочками из разных материалов

Материал проволочки / режим ГХП	$E > 800 \text{ эВ}$ (МРИ), Дж	$E > 10 \text{ эВ}$ (ВУФ), Дж
I группа металлов		
Al (с яркими точками)	0.35–0.45	12–18
Cu (с яркими точками)	0.3–0.6	25–35
Ag (без ярких точек)	0	20–35
Ag (с яркими точками)	0.35–0.6	25–40
II группа металлов		
Ti (без ярких точек)	0	15–20
Ti (с яркими точками)	0.15–0.3	15–25
Mo (без ярких точек)	0	15–20
Mo (с яркими точками)	0.02–0.15	15–25

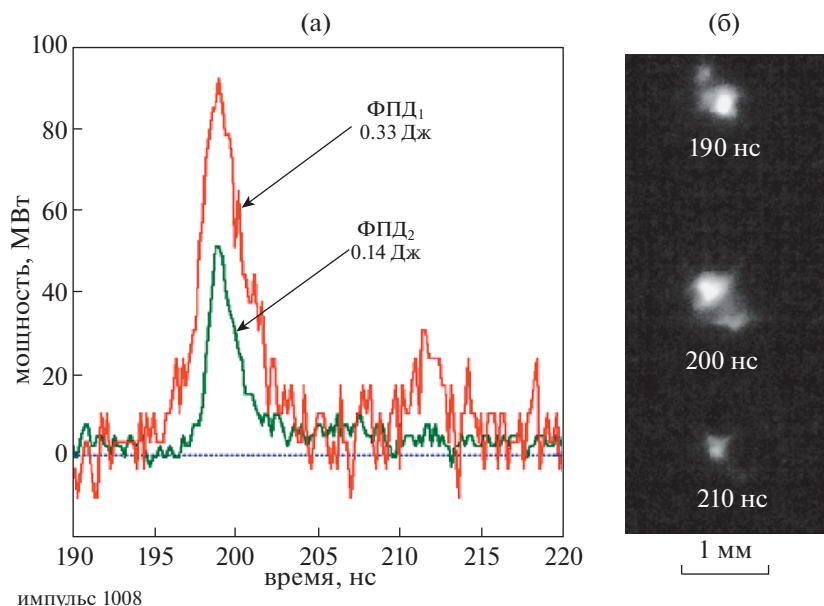


Рис. 12. а) — Мощность излучения, зарегистрированная ФПД1 с фильтром из лавсана толщиной 2 мкм и ФПД2 с фильтром из Ве толщиной 10 мкм; б) изображения излучающей области ГХП с молибденовой проволокой в разные моменты времени, зарегистрированные на МКП камерами-обскурами диаметром 100 мкм с фильтром из лавсана толщиной 2 мкм.

всем интервале от 10 до 800 эВ составляет примерно 20 Дж, таким образом, средняя энергия излучения составляет 0.025 Дж на электрон-вольт. При разности энергий, зарегистрированных ФПД1 и ФПД2, равной 0.19 Дж, которую можно считать энергией, излученной в углеродном окне, находим, что средняя энергия в интервале энергий от 180 до 280 эВ составляет 0.0019 Дж на эВ, т.е. примерно в 13 раз меньше. Поэтому можно сделать вывод, что основное излучение ГХП лежит в интервале до 180 эВ. Напомним, что мы регистрируем только УФ-излучение с энергией выше 10 эВ.

Изображения излучающей области ГХП с помощью МКП также были получены через лавсановый фильтр (рис. 12б). Яркая точка в данном выстреле образовалась на 198-й нс после начала тока и попала на окончание первого кадра МКП. На втором и третьем кадрах идет разлет яркой точки, интенсивность ее излучения уменьшается. Средний размер источника излучения с энергией от 180 и до 280 эВ составляет примерно 200 мкм. Для сравнения, в X-пинчах любой конфигурации размер источника излучения в МРИ ($E > 800$ эВ) обычно ≤ 50 микрон [7].

4. ВЫВОДЫ

Гибридные X-пинчи на генераторе КИНГ являются мощным источником ВУФ-излучения. Эффективность ГХП в качестве источника УФ-излучения с энергией выше 10 эВ может достигать до

5%. Основная часть излучения ГХП лежит в интервале от 10 до 180 эВ. При этом на источник тока налагаются менее жесткие требования, чем для генерации МР излучения, а именно, ограничение снизу на скорость нарастания тока $dI/dt > 1$ кА/нс не обязательно. Размер источника ВУФ-излучения зависит от материала проволоки ГХП и изменяется во времени от 0.2 до 3 мм. Яркость источника ВУФ излучения достигает до 2×10^9 Вт/ср см².

Работа поддержана грантом РФФИ №17-02-00391 и контрактом с Корнельским университетом под основным соглашением DE-NA0003764 от NNSA DOE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рябцев А.Н.* Физическая энциклопедия/ Под ред. А.М. Прохорова, 1998. Т. 5. С. 221.
2. *Попов В.К.* // УФН. 1985. Т.147. С. 587.
3. *Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Хаммер Д.А.* // Физика плазмы. 2015. Т.41. С. 319.
4. *Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Хаммер Д.А.* // Физика плазмы. 2015. Т.41. С. 483.
5. *Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Хаммер Д.А.* // Физика плазмы. 2016. Т.42. С. 234.
6. *Romanova V.M., Tilikin I.N., Shelkovenko T.A., Mingaleev A.R., Bolkhovitinov E.A., Rupasov A.A., Ter-Oganesyan A.E., Pikuz S.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. V. 46. С. 3837.
7. *Bolkhovitinov E.A., Tilikin I.N., Shelkovenko T.A., Romanova V.M., Mingaleev A.R., Rupasov A.A., Pikuz S.A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1094. P. 012022.

8. *Oreshkin V.I., Ratakhin N.A., Rousskikh A.G., Artyomov A.P., Fedyunin A.V., Chaikovskiy S.A., Zhigalin A.S.* // Instruments and Experimental Techniques. 2013. V. 56. P. 66.
9. *Месяц Г.А., Шелковенко Т.А., Иваненков Г.В., Агафонов А.В., Савинов С.Ю., Пикуз С.А., Тиликин И.Н., Ткаченко С.И., Чайковский С.А., Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Орешкин В.И., Русских А.Г., Любецкая Н.А., Артемов А.П., Хаммер Д.А., Синарс Д.В.* // ЖЭТФ. Т. 138. С. 411. 2010.
10. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Cahill A.D., Knapp P.F., Hammer D.A., Sinars D.B., Tilikin I.N., Mishin S.N.* // Phys. Plasmas. 2010. V.17. С. 112707.
11. *Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Иваненков Г.В., Степниевски В., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Агафонов А.В., Хахилл А.Д., Хойт К.Л., Гордан П.А., Хаммер Д.А., Пикуз С.А.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 54.
12. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Hoyt C.L., Cahill A.D., Atoyán L., Hammer D.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Agafonov A.V.* // Physics Plasmas. 2016. V. 23. P.103303.
13. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Song B.M., Chandler K.M., Mitchell M.D., Hammer D. A., Ivanenkov G.V., Mingaleev A.R., Romanova V.M.* // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 033102.
14. *Тиликин И.Н.* Дис. ... канд. ф-м.н. ФИАН, 2014.
15. *Aleksandrov Yu.M., Koshevoi M.O., Murashova V.A., Nikitina T.F., Rupasov A.A., Sklizkov G.V., Shikanov A.S., Yakimenko M.N., Zakharenkov Yu.A., Eidmann K., Sivel R., Tsakiris G.* // Laser Part. Beams. 1988. V. 6. P. 561.
16. *Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Мишин С.Н., Мингалеев А.Р., Тиликин И.Н., Кнапп П.Ф., Хахилл А.Д., Хойт К.Л., Хаммер Д.А.* // Физика плазмы. 2012. V. 38. P. 395.
17. *Spielman R.B., Ruggles L.E., Pepping R.E., Breeze S.P., McGurn J. S., Struve K.W.* // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68. С. 782.
18. *Gales S.G., Bentley C.D.* // Rev. Sci. Instrum., 2004. V. 75. С. 4001.
19. *Haugh J., Lee J., Romano E., Schneider M.* // Proc. SPIE. 2013. V. 8850. P. 885007.
20. *Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Хаммер Д.А., Хойт К.Л.* // XLI Междунар. (Звенигородская) конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Тез. Доклад. 2014. С. 123.
21. *Романова В.М., Иваненков Г.В., Мингалеев А.Р., Тер-Оганесьян А.Е., Шелковенко Т.А., Пикуз С.А.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 671.
22. *Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Tilikin I.N., Mitchell M.D., Bland S.N., Hammer D.A.* // Matter and Radiation at Extremes. 2018. V. 3. P. 267.
23. *Kologrivov A.A., Rupasov A.A., Sklizkov G.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1094. P. 012023.
24. *Kologrivov A.A., Rupasov A.A.* // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 2019. V. A934. P. 33.
25. *Kologrivov A.A., Rupasov A.A., Sklizkov G.V.* // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 2019. V. A916. P. 313.