Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 5, с. 394 – 401 © 2016 г. 10 марта

Радиационный нагрев тонких Al фольг интенсивным EUV-излучением

Е. В. Грабовский[+], *П. В. Сасоров*[*], *А. П. Шевелько*[×1)], *В. В. Александров*[+], *С. Н. Андреев*[×], *М. М. Баско*[*], *А. В. Браницкий*[+], *А. Н. Грицук*[+], *Г. С. Волков*[+], *Я. Н. Лаухин*[+], *К. Н. Митрофанов*[+], $\boxed{\text{В. Г. Новиков}}$[*], *Г. М. Олейник*[+], *А. А. Самохин*[+], *В. П. Смирнов*[+], *И. Ю. Толстихина*[×], *И. Н. Фролов*[+], *О. Ф. Якушев*[×]

[+]*Государственный научный центр РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, 142190 Троицк, Россия*

[*]*Институт прикладной математики им. Келдыша РАН, 127047 Москва, Россия*

[×]*Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 24 декабря 2015 г.
После переработки 19 января 2016 г.

Зарегистрирован эффект индуцированной прозрачности тонких Al фольг при их радиационном нагреве мощным вакуумным ультрафиолетовым (EVU) излучением. В качестве греющего и просвечивающего Al фольгу излучения (пиковая освещенность на фольге ~ 0.55 ТВт/см^2) использовалось излучение плазмы Z-пинчей, возникающих при сжатии вольфрамовых лайнеров на установке Ангара-5-1. Проведено исследование фотопоглощения в образующейся плазме алюминия при температурах $\sim 10-30$ эВ и плотностях в интервале $\sim 1-20$ мг/см^3 в диапазоне длин волн $\sim 5-24$ нм. В экспериментальном спектре идентифицированы линии поглощения ионов $Al^{4+\dots7+}$. Исследования дополнены радиационными газодинамическими расчетами прогрева и разлета фольги с учетом процессов переноса излучения.

DOI: 10.7868/S0370274X1605012X

Введение. Лучистый теплообмен [1] играет важную роль в плотной плазме с большой концентрацией энергии, включая плазму в инерционном термоядерном синтезе, плазму мощных Z-пинчей, астрофизическую плазму. Перенос излучения и эффекты поглощения в такой плазме являются предметом многочисленных исследований. Проводятся экспериментальные и теоретические исследования коэффициентов поглощения в тонких фольгах, нагреваемых рентгеновским излучением лазерной плазмы (см., например, [2–5]) и плазмы мощных Z-пинчей [6, 7]. При этом большинство экспериментов выполнено по регистрации K-спектров поглощения в фольгах легких элементов. Для многих приложений необходимо знать свойства лучистого теплообмена в плазме с температурой 10–100 эВ при участии квантов с энергией 50–400 эВ (или с длинами волн 3–25 нм). Указанный диапазон соответствует диапазонам вакуумного ультрафиолетового (EUV) и мягкого рентгеновского излучений. В этом случае в моделях поглощения необходимо учитывать огромное количество связно-связанных и связно-свободных переходов. Поэтому экспериментальные исследования в данной области спектра электромагнитного излучения и сопоставление их результатов с теоретическими моделями имеют особенное значение.

Для нагрева образца и измерения поглощения EUV-излучения на Z-пинчах использовались наиболее мощные установки в мире: Saturn (8 МА) [6] и Z-Machine (20 МА) [7]. В [6] излучение вольфрамового пинча (~ 500 кДж, ~ 20 нс) ослаблялось, образуя чернотельный источник с температурой 20 эВ. Последний нагревал и просвечивал образец из $FeO_{0.41}$, обеспечивая плотность 10^{-4} г/см^3 и температуру 20 эВ. Спектр поглощения был измерен в области 13.8–19.1 нм. В [7] образец из Fe/Mg, покрытый пластиковой пленкой, устанавливался на торце пинча (1.5 МДж, ~ 9 нс), который нагревал область размером 0.5 мм до 156 эВ. Спектр поглощения при плотности $7 \cdot 10^{21}$ г/см^3 был измерен в области длин волн 0.7–1.6 нм.

Целью настоящей работы является проведение экспериментов по исследованию радиационного нагрева тонких Al фольг EUV-излучением от плазмы мощного Z-пинча на основе многопроволочных W сборок (установка Ангара-5-1) с фиксацией излучения, ослабленного его прохождением сквозь нагретую фольгу. Новым элементом в этих экспериментах

1)e-mail: apshev51@gmail.com

является то, что фольги располагались параллельно оси пинча на расстоянии от нее ~ 11 мм, заметно большем диаметра пинча (1–1.5 мм), и перпендикулярно падающему от пинча излучению, занимая по высоте часть зазора анод–катод. При таком расположении удается достигнуть пиковой освещенности фольги вплоть до 0.55 ТВт/см^2 в спектральной области с длинами волн 3–25 нм. При этом излучение равномерно распределено по достаточно большой площади, 6×8 мм^2, и отсутствуют осложняющие эксперимент потоки плазмы от пинча на фольгу. Кроме того, прогрев, просвечивание и все измерения проводились в одном пуске установки (в том числе и регистрация спектров пинча и прошедшего сквозь фольгу излучения). При этом надо иметь в виду, что фольга находится во внешнем магнитном поле ~ 0.6 МГс, вызванном протеканием электрического тока по пинчу. Достигнутые потоки излучения на фольгу достаточны для уверенного наблюдения сильного просветления фольги в диапазоне $\lambda = (8-25$ нм) в результате ее нагрева до температур $\sim 10-30$ эВ. Такая постановка эксперимента, а также отсутствие пластиковых пленок, покрывающих образец, требуют измерения разлета образца в процессе излучения.

Результаты экспериментов, включающие изучение пространственной структуры поглощения, динамики разлета и спектроскопические исследования эффектов просветления нагреваемой фольги, сравниваются с теоретическими расчетами с помощью двумерного радиационно-гидродинамического кода RALEF-2D [8, 9].

Проведены идентификация и расчет резонансных линий ионов Al с различной степенью ионизации, наблюдаемых в спектре поглощения горячей плазмой фольги.

Описание эксперимента. Для создания плазмы мощных Z-пинчей использовалась установка Ангара-5-1 с током до 4 МА [10]. Схема экспериментов показана на рис. 1. Интенсивное EUV-излучение, образующееся при имплозии многопроволочных W сборок, использовалось для нагрева и просвета тонких Al фольг. Толщина фольг составляла 0.75 мкм (поверхностная плотность 202.5 мкг/см^2). Использовалось два типа Al фольг: так называемая горячая, нагреваемая фольга, которая устанавливалась на растоянии $R = 11$ мм от оси пинча, и “холодная” Al фольга, которая устанавливалась на значительном расстоянии от источника. “Холодная” фольга служила в качестве контрольного канала, регистрирующего излучение Z-пинча, прошедшее через обычный Al EUV-фильтр.

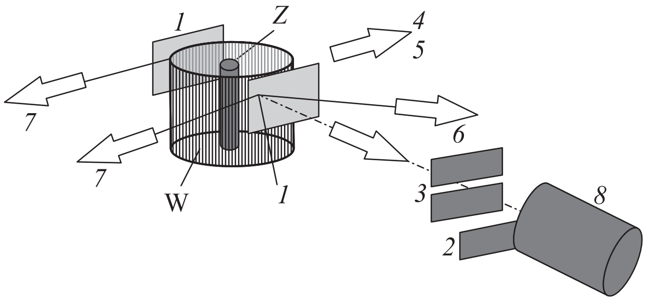

Рис. 1. Схема экспериментов по исследованию радиационного нагрева тонких Al фольг: Z – источник излучения (Z-пинч); W – многопроволочная вольфрамовая сборка; *1* – горячая фольга; *2* – холодная фольга; *3* – пространственная щель спектрографа GIS. Стрелками отмечены направления наблюдения: *4* – вакуумные рентгеновские диоды; *5* – калориметр; *6* – камеры-обскуры с регистратором СХР-6; *7* – лазерное теневое зондирование; *8* – спектрограф скользящего падения GIS-1

Собственное излучение Z-пинча анализировалось с помощью трех вакуумных рентгеновских диодов (ВРД) с временным разрешением 1 нс. Полная энергия излучения регистрировалась с помощью калориметра [11]. Пространственная структура излучения, прошедшего через горячую и холодную фольгу, а также собственное излучение горячей фольги, исследовались с помощью трех камер-обскур с фильтрами лавсан 2 мкм, Al 0.75 мкм и без фильтра. Запись двумерных изображений проводилась на регистраторе СХР-6 (10 кадров, время экспозиции кадров ~ 2 нс, $\lambda < 60$ нм). Пространственное разрешение составляло величину $\sim 200-400$ мкм для излучения в диапазоне длин волн 4–12 нм.

Динамика разлета горячей фольги в различные моменты времени исследовалась с помощью лазерного теневого зондирования импульсом длительностью 0.6 нс на длине волны 532 нм. Две одинаковые фольги располагались на одинаковом расстоянии 11 мм от оси пинча. Фольги были чуть изогнуты для наблюдения тенеграммы только средней части лицевой и тыльной поверхности без влияния краевых эффектов. Выбранные направления зондирования – вдоль лицевой, обращенной к источнику, и вдоль тыльной поверхности фольги – позволили определить скорость разлета фольги в направлении, перпендикулярном этим поверхностям.

Интегральные по времени ЭУФ-спектры собственного излучения Z-пинча, а также спектры излучения, прошедшего через горячую и холодную фольгу, регистрировались с помощью внероуландовского спектрографа скользящего падения GIS-1

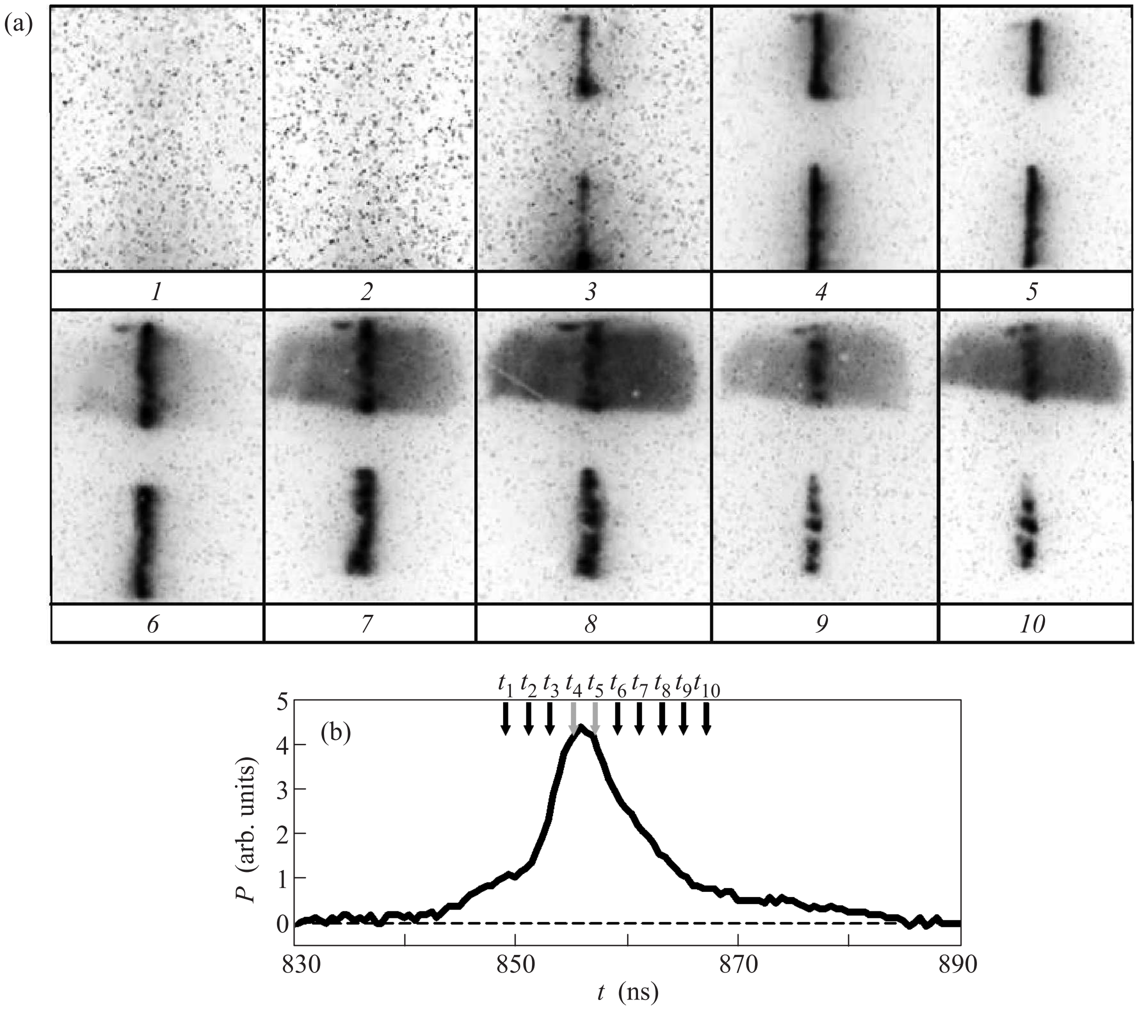

Рис. 2. (a) – Изображения пинча сквозь "горячую" Al фольгу (верхняя часть каждого кадра) и через "холодную" фольгу (нижняя часть). Разрыв между изображениями вызван деталью крепления фольги. (b) – Временная зависимость мощности излучения пинча. Стрелками показаны расположения кадров изображения

[12]. В спектрографе использовалась сферическая дифракционная решетка 600 штр./мм с радиусом кривизны $r = 1$ м с покрытием W/Re. Падающий угол скольжения составлял величину 4°. Спектры регистрировались на фотопленку УФ-4. Спектрограф размещался на расстоянии $X \sim 1.54$ м от оси разряда и регистрировал спектры в диапазоне длин волн $\lambda = (2-30)$ нм с максимальным разрешением $\lambda/\delta\lambda \sim 100$. Установленная перед спектрографом пространственная щель позволяла регистрировать все три спектра на одной фотопленке одновременно.

Предварительная калибровка дифракционной решетки показала, что для длин волн $\lambda = (8-10)$ нм отражение во II и III порядках по интенсивности не превышает 10 % от I порядка. Фотопленка УФ-4 была абсолютно калибрована (соответствующие данные приведены в работе [13]).

Результаты экспериментов. Временной профиль мощности исследовался с помощью фильтрованных ВРД-детекторов [14]. Полная энергия излучения (~ 100 кДж) определялась также по показаниям термопарного калориметра [11]. Размер источника ($\varnothing\, 1.5 \times 16$ мм^2), центральной горячей и плотной части пинча, определялся с помощью камер обскур. Анализ этих данных показал, что излучение пинча состоит из двух компонент. Первая более мягкая и продолжительная компонента имеет продолжительность на полувысоте порядка 20–30 нс. Это излучение плавно начинается за 5–10 нс до возникновения резкого пика более жесткого излучения с продолжительностью на полувысоте 5–7 нс. Два пика излучения наложены друг на друга и имеют сопоставимые полные энергии излучения. При этом плотность энергии на передней стороне горячей фольги достигала величин 10 кДж/см^2, а плотность потока излучения – 0.55 ТВт/см^2.

Пространственная структура излучения, прошедшего через горячую и холодную фольгу, а также собственное излучение горячей фольги исследовались с помощью камер-обскур. На обскурограммах наблюдается изображение центральной плотной части самого пинча. Наличие изображения пинча в спектральном диапазоне 7–14 нм указывает на то, что излучение в данном направлении действительно есть излучение плазмы Z-пинча, прошедшее через горячую фольгу. Анализ этих изображений показал, что основной вклад в регистрируемое GIS-1-излучение вносит излучение пинча, ослабленное из-за его прохождения сквозь фольгу.

Пространственно-временная структура интенсивности излучения, прошедшего через фольги, представлена на рис. 2. На нем приведены 10 кадров, полученных с помощью камеры-обскуры и рентгеновского регистратора СХР6 с экспозицией 2 нс. Часть изображения пинча в каждом кадре перекрыта исследуемой фольгой ("горячая" фольга, расположенная на расстоянии 1.1 см от пинча), а другая часть – такой же фольгой, но расположенной на расстоянии 15 см от пинча ("холодная" фольга). Регистратор СХР-6 имеет золотой фотокатод и защитную пленку из 1 мкм полипропилена. В интересующей нас спектральной области он обладает двумя диапазонами чувствительности: 4–12 и 0.1–3 нм. Через холодную фольгу проходит только второй диапазон. Из рис. 2 видно, что изображение центральной, наиболее горячей части пинча появляется на 3-м кадре, а начиная с 6-го и до 10-го кадра на верхней части пинча видна более холодная периферийная плазма. Это связано с тем, что с пятого-шестого кадров горячая фольга увеличивает свою прозрачность и изображение уже формируется также и за счет диапазона 4–12 нм. Наличие изображения периферийной плазмы, наблюдаемого сквозь фольгу, указывает, что в области чувствительности СХР-6 интенсивность собственного излучения фольги невелика.

Динамика разлета лицевой (обращенной к пинчу) и тыльной поверхностей горячей фольги в различные моменты времени исследовалась с помощью лазерного теневого зондирования, осуществляемого вдоль лучей, параллельных поверхностям фольги. Наши предварительные оценки показали, что наблюдаемый довольно резкий край "тени" разлетающейся плазмы фольги сформирован эффектами рефракции и поглощения в подкритической плазме, приводящими к выходу луча света за апертуру объектива, а не его отражением на критической поверхности. Измеренные скорости движения границ изображений составляют 90–100 км/с на лицевой поверхности и 40–60 км/с на тыльной.

Интегральные по времени спектры собственного излучения плазмы Z-пинча и этого же излучения, прошедшего через горячую и холодную фольгу, исследовались с помощью спектрографа GIS-1. Фольга размером 6×8 мм^2, нагреваемая излучением пинча, устанавливалась на расстоянии $R = 11$ мм от оси источника излучения, холодная фольга – непосредственно перед фотопленкой. Геометрия эксперимента и пространственное разрешение спектрографа позволили регистрировать исследуемые спектры одновременно на одну фотопленку (см. рис. 1). Плотность почернения на фотопленке переводилась в шкалу интенсивности с учетом характеристической кривой фотопленки УФ-4 [13]. Шкала длин волн строилась на основе дисперсионной кривой спектрографа GIS-1.

Из спектров излучения, прошедшего через холодную фольгу, видно, что фольга начинает пропускать излучение с длиной волны $\lambda > 17$ нм. Эта длина волны соответствует L-краю поглощения нейтрального Al. В более коротковолновой области ($\lambda \sim (5-17)$ нм) какого-либо излучения, прошедшего сквозь холодную фольгу, не зарегистрировано. Данное наблюдение качественно соответствует расчетному пропусканию холодной фольги толщиной 0.75 мкм: $\sim (12-32)$ % на длинноволновой стороне L-края и $<10^{-8}$ на длине волны $\lambda \sim 8$ нм [16].

Иной характер имеют спектры излучения, прошедшего через *горячую* фольгу: зарегистрировано излучение в более коротковолновой области от L-края нейтрального Al с длинами волн $\lambda \sim (6-17)$ нм (см. рис. 3 и 4). Наличие линий поглощения указывает на то, что это действительно спектр излучения плазмы Z-пинча, прошедшего через горячую фольгу, а не собственное излучение нагретой фольги. Аналогичный вывод сделан выше при анализе изображений с помощью камер-обскур. На рис. 4b приведено также экспериментально определенное пропускание горячей фольги. Явно видно просветление в области длин волн 6–17 нм – основной качественный результат данной работы. Отметим, что интенсивность прошедшего через горячую фольгу излучения, как и спектр падающего на фольгу излучения, линейно зависит от коэффициента отражения дифракционной решетки. Отношение же этих интенсивностей, равное пропусканию фольги, от коэффициента отражения решетки не зависит.

Наиболее высокая экспериментальная точность (± 25 %) определения величины пропускания горя-

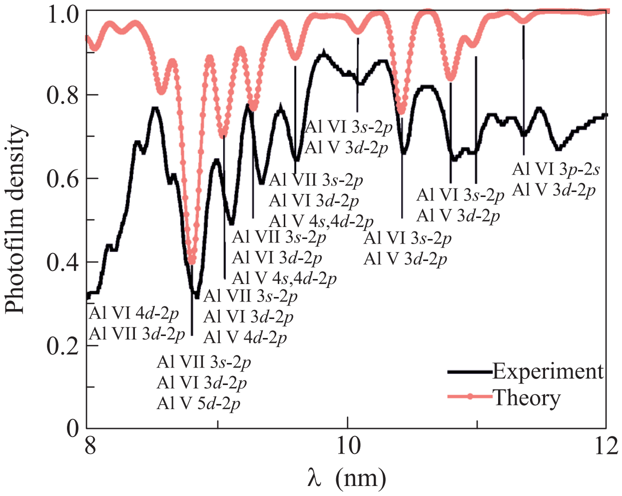

Рис. 3. (Цветной онлайн) Сравнение структуры спектра излучения плазмы Z-пинча (спектр поглощения), прошедшего через горячую фольгу (в единицах плотности почернения на фотопленке), и расчетного спектра (коэффициент поглощения в относительных единицах, нормировка на наиболее сильный переход $2p{-}3d$ в ионе Al^{5+}) для температуры $T_e = 22$ эВ

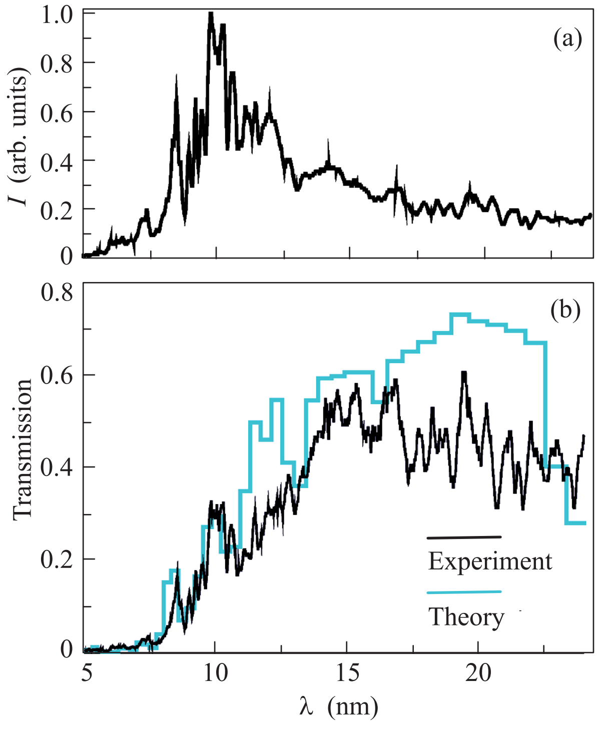

Рис. 4. (Цветной онлайн) (a) – Спектр пинча, прошедшего сквозь "горячую" фольгу. (b) – Сравнение расчетного и экспериментального пропускания горячей Al фольги в зависимости от длины волны

чей фольги достигнута в спектральном диапазоне $\lambda \sim (8{-}13)$ нм, соответствующем максимальной зарегистрированной интенсивности проходящего через фольгу излучения (рис. 4a). В длинноволновой области, $\lambda \geq 13$ нм, экспериментальная величина пропускания, по-видимому, занижена. Это может быть связано как с низкой регистрируемой интенсивностью прошедшего через фольгу излучения, так и с вкладом высших порядков отражения решетки в интенсивность падающего на фольгу излучения, на которую нормируется интенсивность прошедшего излучения.

Моделирование зарегистрированных линий поглощения. Для описания линейчатой части спектра поглощения были проведены дополнительные расчеты, включающие исследования зарядового распределения ионов, определение длин волн и сил осцилляторов переходов ионов Al, а также моделирование спектров Al при различных температурах T_e, плотностях N_e электронов и с различным спектральным разрешением. Для этого использовались коды FLEXIBLE ATOMIC CODE [17], FLYCHK [18] и INDAHAUS.

Расчеты для $N_e = 2 \cdot 10^{20}\,\text{см}^{-3}$ и $T_e = (15{-}30)$ эВ показали, что вклад в спектр поглощения дают ионы Al с зарядами от 4+ до 7+. Наилучшее согласие структур экспериментального и теоретического спектров в спектральном диапазоне $\lambda = (5{-}14)$ нм наблюдается при расчетном спектре с $T_e = 22$ эВ (рис. 3). Линии поглощения отождествлены как переходы 3–2, 4–2, 5–2 в ионах Al^{4+}, Al^{5+}, Al^{6+}, Al^{7+} с относительными концентрациями ионов 10, 45, 41 и 4 % соответственно. Таким образом, радиационный нагрев Al фольги приводит к образованию плазмы с температурой $T_e \sim 20$ эВ и с наиболее представленными ионами Al^{5+} и Al^{6+}. Пропускание такой фольги существенно увеличивается в коротковолновом диапазоне от L-края поглощения. В случае горячей фольги экспериментально наблюдается эффект просветления, когда ее пропускание с коротковолновой стороны от L-края Al возрастает с 10^{-8} до 0.3–0.6.

Расчет расширения фольги, нагреваемой излучением. Расчет нагрева и разлета Al фольги под действием мягкого рентгеновского излучения пинча осуществлялся с помощью двумерного радиационно-гидродинамического кода RALEF2D [8, 9]. В этом коде решаются уравнения гидродинамики с теплопроводностью и спектральным переносом теплового излучения. В каждой пространственно-временной точке интенсивность излучения рассматривается как функция направлений в 3D физическом пространстве и энергии квантов. Нагрев-охлаждение вещества за счет излучения самосогласованы в коде со спектральным, угловым и пространственным переносом излучения. Транспорт излучения рассматривается в рамках стационарного уравнения переноса с планковской функцией источника и со спектральными пробегами излучения, задаваемыми таблицами, заранее построенными по коду THERMOS [19]. Этот код реализует квантово-статистическую модель горячего вещества, изложенную в [19], и обеспечивает код RALEF2D не только оптическими, но и термодинамическими параметрами. Код RALEF2D использовался ранее в расчете излучательных свойств пинчевой и лазерной плазмы (см., например, работу [15]).

В данном расчете холодная Al фольга с начальной толщиной 0.75 мкм облучалась потоком излучения, падающим по нормали к ее поверхности. Инициирующее излучение состояло из двух компонент, имеющих разные спектры и временные профили. Более холодная, продолжительная и плавно спадающая по времени компонента имеет спектр, соответствующий планковскому спектру с температурой 45 эВ. Профиль мощности на облучаемой стороне задается как $7t_{nc}/[1+(t_{nc}/12.5\,\text{нс})^3]$ МВт/см^2. Более быстрая и жесткая компонента импульса имеет спектр, соответствующий планковскому спектру с температурой 70 эВ, а временной профиль мощности задается выражением $0.38t_{nc}\exp(-t_{nc}/1.88\,\text{нс})$ ТВт/см^2. Второй, более жесткий импульс сдвинут по времени относительно более мягкого. Он начинается через 7 нс после начала первого. Полная энергия в импульсе равна 2.3 кДж/см^2 и распределена примерно поровну между обеими компонентами импульса. Пиковая мощность, падающая на фольгу, составляет 0.3 ТВт/см^2. Использованные планковские температуры близки к температурам чернотельного излучения, соответствующим мощности и размерам источника. Мы не утверждаем, что реальный спектр Z-пинча был чернотельным, но полагаем, что достигаем качественного соответствия его спектральных характеристик в моделировании имеющему место в эксперименте.

Результаты расчетов показывают, что под действием излучения фольга нагревается, ионизуется и быстро расширяется. Наружные слои фольги, обращенные к пинчу, быстро нагреваются до температур порядка 20–30 эВ. Нагрев вещества на другой стороне поддерживается не столько излучением пинча (хотя и им тоже), сколько за счет теплопроводности и переноса излучения в расширившейся фольге. На тыльной стороне фольги вещество заметно прогревается (до температур порядка 10 эВ) уже после достижения пиковой мощности греющего фольгу излучения. В момент пика мощности средний заряд ионов на тыльной стороне фольги составляет +3. Через примерно 3 нс, когда мощность греющего излучения падает примерно на 40 %, средний заряд ионов на тыльной стороне возрастает до +6.3 (при температуре плазмы около 19 эВ). Последнее говорит о том, что сразу после пика мощности на тыльной стороне фольги могут в достаточном количестве присутствовать ионы Al с зарядом $+4\ldots+7$. Это соответствует приведенному выше теоретическому анализу экспериментально зарегистрированных линий поглощения и косвенно указывает на адекватность рассматриваемого моделирования нагрева и разлета фольги.

Другие результаты расчета, которые можно непосредственно сравнить с экспериментом, можно описать следующим образом. Рассчитан интегральный по времени спектр излучения пинча, прошедшего сквозь фольгу. Интегральный по времени спектр падающего излучения известен из входных параметров задачи. Отношение этих двух спектров дает эффективную интегральную прозрачность фольги. Она показана на рис. 4. Так же как и в эксперименте, наблюдается очень сильное просветление Al фольги в диапазоне длин волн 5–24 нм. Вклад собственного излучения фольги в этой области спектра мал.

Величины экспериментального и теоретического пропускания находятся в хорошем согласии (± 25 %) в спектральной области, соответствующей максимальной зарегистрированной интенсивности спектра поглощения ($\lambda = (8-13)$ нм) (см. рис. 4). В длинноволновой области спектра ($\lambda \geq 13$ нм) величина теоретического пропускания превышает экспериментальное значение приблизительно в 1.5–2 раза.

По положению областей фольги с плотностью Al, в два раза меньшей максимума плотности в каждый момент времени, можно определить эффективную скорость расширения фольги. Она может быть выявлена по лазерным теневым изображениям, полученным вдоль лучей, почти параллельных поверхности фольги. Мы ожидаем, что такой подход способен качественно отражать сложный процесс формирования “тени” в эксперименте. Определенная таким образом по расчетам средняя эффективная скорость расширения фольги на временном интервале от пиковой мощности греющего излучения до времени через 20 нс после этого пика составляет около 80 км/с на лицевой стороне и около 70 км/с на тыльной. Указанные цифры находятся в качественном согласии с приведенными выше результатами по поперечному лазерному теневому зондированию фольги.

Выводы. В настоящей работе проведено измерение поглощения EUV-излучения в диапазоне длин волн 5–24 нм в плазме Al в новой геометрии эксперимента, позволившей создать образец с температурой до 25 эВ и плотностью 1–20 мг/см^3 на установке значительно меньшей мощности, чем в [6]. Вольфрамовый Z-пинч, создаваемый на установке Ангара-5-1, позволил достичь однородной освещенности на поверхности фольги 0.55 ТВт/см^2 без дополнительного воздействия на нее потоков плазмы от пинча. Это же излучение использовалось в качестве тестового для исследования зависимости ослабления интенсивности излучения от длины волны. Регистрация в одном пуске: 1) спектра излучения пинча, 2) спектра излучения пинча, прошедшего сквозь нагретую им Al плазму, 3) прошедшего сквозь холодную фольгу пинча, позволила уверенно выделить эффект индуцированной прозрачности тонких Al фольг при их радиационном нагреве мощным EVU-излучением. Показано, в частности, что пропускание в нагретой Al плазме в диапазоне длин волн 6–17 нм увеличивается на много порядков по отношению к холодному Al.

Лазерное зондирование лицевой и тыльной сторон нагреваемой фольги дало возможность сравнить зарегистрированный разлет фольги с расчетом. Проведенный расчет модельного спектра поглощения в однородной плазме Al позволил интерпретировать зарегистрированные линии поглощения. Проведено также численное моделирование нагрева и разлета Al фольги с самосогласованным спектральным переносом как собственного излучения фольги, так и греющего излучения. Рассчитанный интегральный по времени спектр пропускания с точностью порядка 30 % совпадает с экспериментальным. По-видимому, указанная точность никак не хуже точности воспроизведения в данном расчете зависящего от времени спектра излучения пинча. Этим подтверждается, в частности, использованная в расчетах теоретическая модель [19] спектральной зависимости коэффициента поглощения в такой плазме. Можно сказать, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с интерпретацией зарегистрированных линий поглощения и с численными расчетами нагрева и разлета Al фольги с самосогласованным переносом излучения.

Все это позволит использовать данную методику эксперимента для исследования поглощения в горячей плотной плазме, составленной из других элементов.

Работа выполнена при частичной поддержке Госкорпорации Росатом по контракту # Н.4Х.44.90.13.1108 и грантов РФФИ # 14-02-00438, 15-02-04411 и 15-01-06195.

1. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*, Физматлит, М. (2008).
2. J. M. Foster, D. J. Hoarty, C. C. Smith, P. A. Rosen, S. J. Davidson, S. J. Rose, T. S. Perry, and F. J. D. Serduke, Phys. Rev. Lett. **67**, 3255 (1991).
3. T. S. Perry, S. J. Davidson, F. J. D. Serduke, D. R. Bach, C. C. Smith, J. M. Foster, R. J. Doyas, R. A. Ward, C. A. Iglesias, F. J. Rogers, J. Abdallah, R. E. Stewart, J. D. Kilkenny, and R. W. Lee, Phys. Rev. Lett. **67**(27), 3784 (1991).
4. C. Chenais-Popovics, F. Gilleron, M. Fajardo, H. Merdji, T. Mißalla, J. C. Gauthier, P. Renaudin, S. Gary, J. Bruneau, F. Perrot, T. Blenski, W. Fölsner, and K. Eidmann, JQSRT **65**(1–3), 117 (2000).
5. С. В. Бондаренко, З. В. Гаранин, Н. В. Жидков, А. В. Пинегин, Н. А. Суслов, Квантовая электроника **42**(1), 51 (2012).
6. P. T. Springer, K. L. Wong, C. A. Iglesias, J. H. Hammer, J. L. Porter, A. Toor, W. H. Goldstein, B. G. Wilson, F. J. Rogers, C. Deeney, D. S. Dearborn, C. Bruns, J. Emig, and R. E. Stewart, JQSRT **58**(4–6), 927 (1997).
7. J. E. Baily, G. A. Rochau, C. A. Iglesias, J. Abdallah, Jr., J. J. MacFarlane, I. Golovkin, P. Wang, R. C. Mancini, P. W. Lake, T. C. Moore, M. Bump, O. Garcia, and S. Mazevet, Phys. Rev. Lett. **99**, 265002 (2007).
8. M. M. Basko, J. Maruhn, and A. Tauschwitz, J. Comput. Phys. **228**, 2175 (2009).
9. M. M. Basko, J. Maruhn, and A. Tauschwitz, *GSI Scientific Report 2009: GSI Report 2010-1*, Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH, Darmstadt, Germany (2010), p. 410.
10. З. А. Альбиков, Е. П. Велихов, А. И. Веретенников, В. А. Глухих, Е. В. Грабовский, Г. М. Грязнов, О. А. Гусев, Г. Н. Жемчужников, В. И. Зайцев, О. А. Золотовский, Ю. А. Истомин, О. В. Козлов, И. С. Крашенинников, С. С. Курочкин, Г. М. Латманизова, В. В. Матвеев, Г. В. Минеев, В. Н. Михайлов, С. Л. Недосеев, Г. М. Олейник, В. П. Певчев, А. С. Перлин, О. П. Печерский, В. Д. Письменный, Л. И. Рудаков, В. П. Смирнов, В. Я. Царфин, И. Р. Ямпольский, Атомная энергия **68**(1), 26 (1990).
11. В. В. Александров, Г. С. Волков, Е. В. Грабовский, А. Н. Грицук, Н. И. Лахтюшко, С. Ф. Медовщиков, Г. М. Олейник, Е. В. Светлов, Физика плазмы **40**, 160 (2014).
12. А. П. Шевелько, Д. Е. Блисс, Е. Д. Казаков, М. Г. Мазаракис, Д. С. МакГарн, Л. В. Найт, К. В. Струве, И. Ю. Толстихина, Т. Уикс, Физика плазмы **34**, 1021 (2008).
13. Е. Д. Казаков, А. П. Шевелько, Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез **37**(4), 71 (2014).
14. А. В. Браницкий, Г. М. Олейник, ПТЭ **3**, 58 (2000).

15. M. M. Basko, P. V. Sasorov, M. Murakami, V. G. Novikov, and A. S. Grushin, Plasma Phys. Control. Fusion **54**, 055003 (2012).
16. A. C. Thompson, I. Lindau, D. T. Attwood, Y. Liu, E. M. Gillikson, P. Pianetta, M. R. Howells, A. Robinson, K.-J. Kim, J. H. Scofield, J. Kirz, J. H. Underwood, J. B. Kortright, G. P. Williams, and H. Winick, *X-ray Data Booklet*, 3th ed., LBNL, Berkeley (2009); http://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html.
17. M. F. Gu, http://kipac-tree.stanford.edu/fac/.
18. H.-K. Chung, M. H. Chen, W. L. Morgan, Yu. Ralshenko, and R. W. Lee, High Energy Density Phys. **1**, 3 (2005).
19. A. F. Nikiforov, V. G. Novikov, and V. B. Uvarov, *Quantum-Statistical Models of Hot Dense Matter. Methods for Computation Opacity and Equation of State*, Birkhauser, Basel, Switzerland (2005).