

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО. ЛАЗЕРНАЯ ПЛАЗМА

PACS 42.55.Lt; 52.50.Jm; 52.38.Ph; 52.70.La

Экспериментальные исследования спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения в нагретых Al и Ge на лазерной установке «Искра-5»**С.В.Бондаренко, Р.В.Гаранин, Н.В.Жидков, А.В.Пинегин, Н.А.Суслов**

Представлены результаты экспериментального исследования спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов 1.1–1.6 кэВ для образцов Al и Ge, объемно нагретых мягким рентгеновским излучением. Описаны две методики экспериментов: с использованием одного канала установки и нагревом образцов рентгеновским излучением от плоской «прогорающей» мишени, а также с использованием четырех каналов и нагревом излучением от двух цилиндрических мишеней с внутренним вводом лазерного излучения. Коэффициенты поглощения рентгеновского излучения исследуются методом спектроскопии поглощения просвечивающего рентгеновского излучения от точечного источника. Представлены результаты исследования спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения на переходах $1s-2p$ в атоме Al и переходах $2p-3d$ в атоме Ge.

Ключевые слова: спектральные пробеги рентгеновского излучения, рентгеновское просвечивание, спектроскопия поглощения, лазерная плазма.

1. Введение

Исследование спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения (РИ) в нагретых материалах является одной из широко изучаемых теоретически и экспериментально задач физики плазмы. Определение коэффициентов поглощения РИ мишенями различных типов имеет большое значение для их последующего применения. Для теоретического моделирования коэффициентов поглощения необходимо знание детальной структуры атомов, населенностей уровней и форм спектральных линий с учетом многочастичных взаимодействий в плазме. Это приводит к тому, что в существующих расчетно-теоретических моделях нужно применять ряд приближений, которые требуют экспериментальной проверки, поэтому в ряде стран экспериментальные исследования коэффициентов поглощения РИ в нагретом веществе проводятся с использованием для нагрева различных источников мягкого РИ на основе лазерной плазмы [1–5] или z-пинча [6]. Исследования проводятся как для переходов на К-оболочку, которые в последнее время становятся больше средством измерения температуры нагретого материала, чем предметом изучения, так и для переходов на L-оболочку [7, 8] и даже на M-оболочку [9] в сравнительно широком диапазоне температур материалов – от нескольких десятков электронвольт до ~160 эВ [6].

В настоящей работе описаны методики экспериментов и приводятся результаты исследований спектральных коэффициентов поглощения РИ в диапазоне энергий $h\nu \sim 1.1-1.6$ кэВ для образцов Al и Ge, нагретых мягким

РИ. Эксперименты выполнены на иодной лазерной установке «Искра-5» [10].

Исследование спектральных коэффициентов поглощения проводилось методом спектроскопии поглощения с использованием точечного источника просвечивающего РИ, что обеспечивало возможность сравнения спектров РИ, прошедшего сквозь слой исследуемого материала и мимо него, в одном эксперименте и в одинаковых условиях [11]. Просвечивание слоя вещества происходило с определенной задержкой относительно момента его нагрева, что позволяло выбирать состояние нагретого слоя.

Описаны эксперименты с использованием как одного, так и пяти каналов установки. Представлены также методика и результаты экспериментов по определению плотности нагретого слоя Al.

2. Конструкция образцов со слоем исследуемого вещества

Образцы для исследования коэффициентов поглощения РИ представляли собой тонкий слой материала толщиной $t \sim 0.1$ мкм, заключенный между двумя пленками из СН-пластика толщиной по ~ 1 мкм. СН-пленки сдерживали разлет нагретого слоя вещества и обеспечивали большие его плотности ρ и наименьшие градиенты плотности по толщине слоя. Слой исследуемого вещества занимал только половину апертуры такого «сэндвича» из СН-пленок и заключенного между ними слоя, другая ее половина состояла только из двух слоев СН-пленки. Просвечивающее РИ, прошедшее через часть апертуры «сэндвича» без слоя вещества, испытывало лишь слабое поглощение, тогда как излучение, прошедшее через часть апертуры со слоем вещества, поглощалось сильнее. Использование точечного источника просвечивающего РИ позволяет при регистрации различить спектры излучения, прошедшего через разные части «сэндвича» и сравнить их для определения спектральных коэффициентов поглощения.

Толщины слоев измерялись интерферометрическим способом на «свидетелях», изготавливаемых одновременно

С.В.Бондаренко, Р.В.Гаранин, Н.В.Жидков, А.В.Пинегин, Н.А.Суслов. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Институт лазерно-физических исследований, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: suslov@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 13 сентября 2011 г., после доработки – 26 октября 2011 г.

но с рабочими слоями. Погрешность измерений толщины при цифровой обработке интерферограмм составляет ~ 0.01 мкм.

Для проверки правильности и согласованности результатов измерений (использование корректной характеристической кривой рентгеновской фотопленки для перевода оптических плотностей почернения в интенсивности потоков РИ, учет вклада фонового излучения, однородные распределения состояния нагретого слоя, его плотности, температуры и ионизационного состояния по поверхности и глубине исследуемого слоя) были изготовлены также образцы с тремя зонами, содержащие в крайних зонах слои Al с различными толщинами (0.1 и 0.05 мкм), при этом центральная, опорная, зона состояла только из двойного СН-слоя. В идеальных условиях коэффициенты поглощения, определенные для таких слоев, будучи приведенными к одной толщине, должны совпадать.

Спектральные коэффициенты поглощения РИ в алюминии неплохо описываются теоретически. Более сложными для численного моделирования являются ионы с большими зарядами Z и, как следствие, с более сложной структурой энергетических уровней и огромным количеством переходов – переходы на L-оболочку. В связи с этим экспериментальные исследования коэффициентов поглощения РИ проводятся в таких материалах, как Fe, Ni, Ge и Nb [12–15]. Наиболее подходящим для наших условий материалом является Ge, поэтому для исследования коэффициентов поглощения РИ наряду с образцами со слоем Al были изготовлены образцы со слоем Ge.

Для определения плотности нагретого слоя был приготовлен другой образец. Согласно результатам численного моделирования с использованием одномерной газодинамической программы СНДП [16] толщина Al-слоя в момент зондирования увеличивается в ~ 135 раз, что при начальной его толщине 0.1 мкм дает 13.5 мкм. Такая толщина крайне мала для точного ее измерения. В то же время результаты моделирования показывают, что в условиях наших экспериментов и более толстые слои нагреваются до таких же температур, как и тонкие. Поэтому толщина Al-слоя для эксперимента по измерению его плотности в нагретом состоянии была увеличена до ~ 0.2 мкм, размер в направлении зондирования составлял 100–150 мкм. Слой алюминия был также запечатан между СН-обкладками толщиной по ~ 1 мкм.

3. Постановка экспериментов с использованием одного канала установки

Схема экспериментов с использованием одного канала установки показана на рис.1 [17]. Лазерное излучение (ЛИ) одного из каналов, преобразованное по частоте во вторую гармонику, применяется для облучения мишени-конвертера. Рентгеновское излучение, возникающее на конвертере, нагревает образец со слоем исследуемого вещества. Оставшееся после преобразования ЛИ на основной частоте используется для создания источника РИ, просвечивающего исследуемый образец. Конвертер представлял собой тонкий, «прогорающий», слой золота (~ 0.1 мкм), нанесенный на пластиковую СН-пленку толщиной 0.5–1 мкм.

Схема рентгеновской просветки была организована так, что пучок зондирующего РИ распространялся соосно с «силовым» ЛИ. Это позволило расположить мишень-конвертер максимально близко к исследуемому образцу для

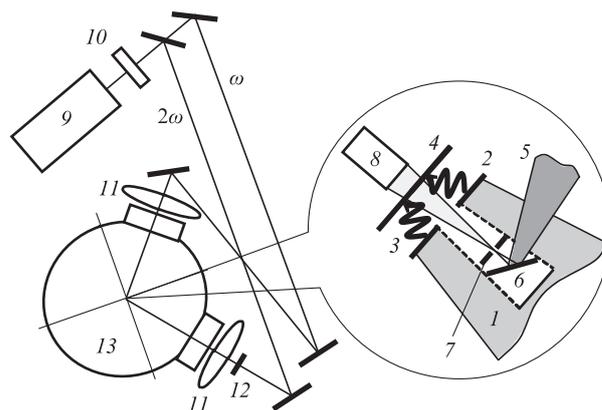


Рис.1. Схема экспериментов по исследованию коэффициентов поглощения РИ с использованием одного канала установки:

1 – лазерный пучок на частоте 2ω ; 2 – конвертер; 3 – поток греющего РИ; 4 – слой исследуемого вещества; 5 – лазерный пучок на частоте ω ; 6 – мишень для генерации импульса рентгеновской просветки; 7 – точечная диафрагма; 8 – спектрограф; 9 – оконечный усилитель ЛИ; 10 – кристалл-преобразователь; 11 – фокусирующие линзы; 12 – непрозрачный экран; 13 – вакуумная камера.

обеспечения наибольшего потока греющего РИ. Чтобы избежать ослабления зондирующего РИ веществом конвертера и фонового излучения от него, в центре конвертера выполнено отверстие диаметром 400 мкм. Для исключения попадания ЛИ на образец, центральная область силового пучка была закрыта экраном. Оценки показали, что при определенном расстоянии между исследуемым образцом и конвертером на поверхности образца можно создать достаточно протяженную зону со сравнительно однородной освещенностью РИ.

Для формирования точечного источника просвечивающего РИ использовалась дополнительная плоская мишень с довольно большим пятном облучения в сочетании с диафрагмой с маленьким отверстием диаметром 100–150 мкм, при этом спектральное разрешение было достаточным для разрешения полос поглощения, соответствующих ионам с различной кратностью ионизации. Мишень источника просвечивающего РИ была изготовлена из диспрозия, в спектре которого в представляющем интерес спектральном диапазоне ($h\nu \sim 1.5$ кэВ) присутствует довольно гладкая яркая полоса излучения. Для анализа спектра просвечивающего РИ, прошедшего сквозь исследуемый образец, использовался спектрограф с плоским кристаллом КАР. Для определения энергетической шкалы на спектрограммах в спектрографе перед фотопленкой устанавливалась узкая полоска фольги из подходящего материала, в данном случае из алюминия, что позволяло на спектрограммах по известной энергии скачка фотопоглощения в материале фольги определить энергии зарегистрированных спектральных компонент, в том числе линий поглощения. Спектры РИ регистрировались на рентгеновскую фотопленку УФ-4.

Выбор толщин слоя исследуемого материала и СН-слоев, а также оптимального момента просвечивания проводился на основе расчетно-теоретического моделирования с использованием программы СНДП. На первом этапе рассчитывались характеристики греющего мягкого РИ в области источника излучения и на исследуемом образце. Затем рассчитывалась динамика нагрева образца и определялись профили плотности и температуры в различные моменты времени.

Коэффициент пропускания τ определялся по формуле

$$\tau(h\nu) = \frac{I_{\text{layer}}(h\nu) - I_b(h\nu)}{I_{\text{ref}}(h\nu) - I_b^*(h\nu)}, \quad (1)$$

где I_{layer} и I_{ref} – интенсивности РИ на спектрограмме, отвечающие излучению, прошедшему сквозь слой исследуемого вещества и мимо него; I_b и I_b^* – соответствующие им интенсивности фона на пленке вне изображения спектрограммы в окрестности данного спектрального диапазона. Для перевода оптических плотностей почернения в интенсивности РИ использовалась характеристическая кривая рентгеновской фотопленки УФ-4, полученная на K_{α} -линии излучения Al с энергией квантов $h\nu \approx 1.49$ кэВ, близкой к энергии квантов в исследуемой области.

4. Постановка экспериментов с использованием пяти каналов установки

Для нагрева Al-образца до температур свыше ~ 25 эВ исследования коэффициентов поглощения РИ проводились на многоканальной камере установки «Искра-5» с использованием пяти каналов: четырех для формирования греющего РИ и пятого для формирования зондирующего РИ. Принципиальная схема экспериментов приведена на рис.2.

В экспериментах на многоканальной камере для получения греющего мягкого РИ применялась двойная мишень-иллюминатор, качественно подобная мишеням, описанным в работах [14, 15]. Такая мишень состоит из расположенных вдоль одной оси двух цилиндрических мишеней-иллюминаторов и находящегося между ними центрального, диагностического, бокса. Два идентичных, симметрично расположенных иллюминатора обеспечивают равномерный нагрев образца по всей его поверхности. Образец со слоем исследуемого вещества размещался либо на боковой поверхности диагностического бокса, либо внутри него (в этом случае осуществлялся более равномерный по глубине двухсторонний нагрев образца).

Диаметры иллюминаторов и диагностического бокса были одинаковыми и составляли 1 мм, длина иллюминаторов изменялась в диапазоне 1–1.2 мм, а длина диагностического бокса – в диапазоне 1–1.6 мм. Лазерное излучение вводилось в иллюминаторы через отверстия либо на их торцах (в каждое отверстие по два пучка ЛИ), либо на их

боковых стенках (по одному пучку в каждое из четырех отверстий).

Корпуса иллюминаторов и диагностического бокса были изготовлены из СН-пластика. Для достижения высокой эффективности преобразования ЛИ в мягкое РИ внутренние поверхности иллюминаторов и диагностического отсека покрывались слоем золота. Диагностический отсек отделялся от иллюминаторов тонкой СН-пленкой со слоем золота.

В каждый иллюминатор вводились два пучка ЛИ на частоте второй гармоники с энергией по 200–250 Дж при длительности лазерных импульсов $\tau_{0,5} \sim 0.6$ нс. В диагностическом боксе для пропускания зондирующего РИ вырезались либо круглые, либо квадратные отверстия. Как и раньше, слой исследуемого вещества с обеих сторон запечатывался между обкладками из СН-пластика толщиной по ~ 1 мкм. Слой вещества занимал половину апертуры отверстия для просвечивающего излучения.

Для анализа спектра просвечивающего РИ, прошедшего сквозь образец, использовался спектрограф с плоским кристаллом КАР ($2d = 26.63$ Å), при этом спектральное разрешение в зависимости от размера источника, задаваемого точечной диафрагмой, составляло 2–2.5 эВ. В нескольких опытах с образцом со слоем Al использовался также спектрограф с кристаллом РЕТ ($2d = 8.742$ Å). Для обеспечения необходимой обзорности кристалл РЕТ был изогнут по цилиндру с радиусом кривизны ~ 80 мм. Спектральное разрешение такого спектрографа достигало ~ 0.5 эВ.

Для защиты фотопленки от фонового излучения между мишенями и спектрографом устанавливался защитный экран с отверстием для наблюдения за исследуемым образцом.

5. Постановка экспериментов по определению плотности нагретого образца

Кроме экспериментов по измерению коэффициентов поглощения РИ были проведены также эксперименты по определению плотности нагретого слоя Al путем измерения его толщины, как и в работе [18].

Схема экспериментов по определению толщины нагретого слоя Al показана на рис.3, во многом она подобна схеме измерения коэффициентов поглощения РИ. Для получения пространственного разрешения перед входным окном спектрографа устанавливалась щель шириной 20 мкм, при этом при увеличении $M = 3$ пространствен-

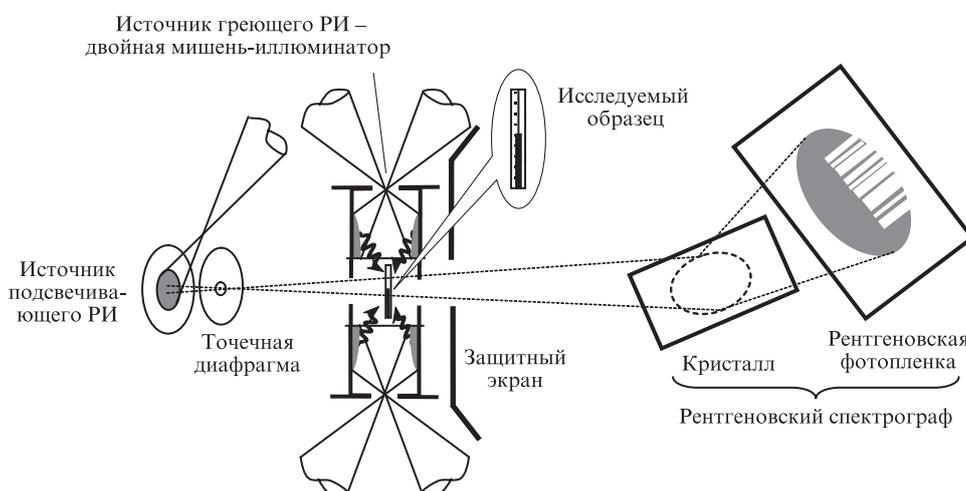


Рис.2. Принципиальная схема экспериментов по исследованию пробегов РИ на лазерной установке «Искра-5».

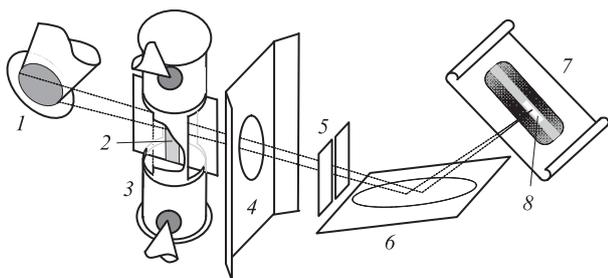


Рис.3. Схема эксперимента по определению толщины нагретого образца:

1 – источник подсвечивающего РИ; 2 – узкая полоска слоя исследуемого материала; 3 – мишень-иллюминатор; 4 – защитный экран; 5 – щель спектрографа для формирования пространственного разрешения; 6 – кристалл КАР; 7 – рентгеновская фотопленка; 8 – тепловое изображение исследуемого слоя в линии поглощения.

ное разрешение $\Delta r = 27$ мкм, что сравнимо с ожидаемой толщиной нагретого слоя Al, поэтому она может быть определена еще довольно точно. Точечная диафрагма, применявшаяся ранее для достижения высокого спектрального разрешения, в этих опытах из-за необходимости получения достаточной плотности почернения спектрограмм не использовалась. Спектральное разрешение при этом определялось полным видимым размером источника РИ и составляло ~ 15 эВ.

В опыте по определению плотности нагретого слоя Al энергия ЛИ, введенного в иллюминаторы, была равна ~ 700 Дж при времени задержки зондирующего излучения 0.75 нс.

5.1. Результаты экспериментов с использованием одного канала установки

В этом случае исследования пробегов РИ были проведены с Al-слоем. Энергия ЛИ на конвертере составляла ~ 170 Дж, толщина Al-слоя – 0.15 мкм, толщина одного из СН-слоев – 1.25 мкм, а другого – 0.6 мкм. Задержка между импульсами просвечивающего и греющего РИ была равна ~ 0.5 нс.

Зарегистрированная в опыте спектрограмма и результаты ее обработки представлены на рис.4, где достаточно ясно видны три линии поглощения. Спектральная «метка» на спектрограмме по К-скачку коэффициента поглощения алюминия позволяет определить энергии зарегистрированных линий поглощения. Согласно литературным данным эти линии соответствуют 1s–2p-переходам ионов Al с кратностью ионизации 4–6 [19].

Полагая, что ρt для нагретого Al такое же, как и для холодного Al, получаем, что средний по толщине коэффициент поглощения нагретого алюминия, например на линии иона Al^{5+} , равен 1.3×10^4 см²/г, что примерно в 30 раз больше, чем для холодного алюминия (4.03×10^2 см²/г [20]).

Согласно результатам расчетов в момент действия импульса рентгеновской просветки температура в образце достигала ~ 25 эВ, а средняя кратность ионизации была равна 4 и более, что согласуется с результатами проведенных экспериментов.

5.2. Результаты экспериментов с использованием нескольких каналов установки

В этом случае исследование спектральных коэффициентов поглощения РИ в алюминии было проведено с об-

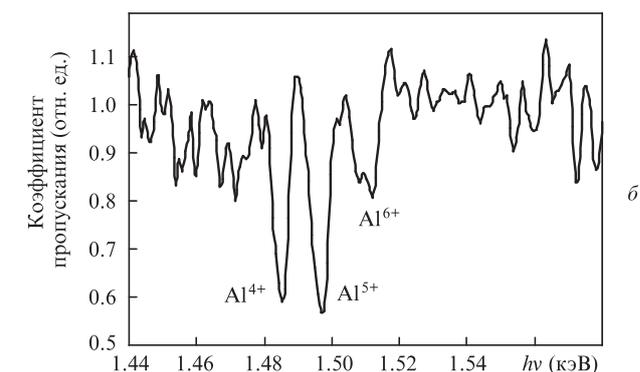
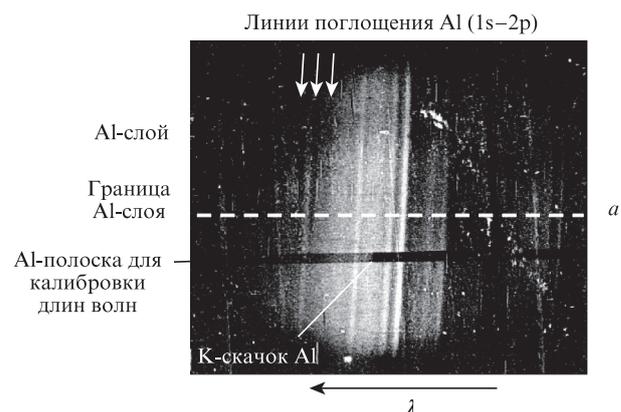


Рис.4. Результаты измерения поглощения РИ в нагретом алюминии: спектрограмма просвечивающего РИ от Ду-мишени (а) и коэффициент пропускания нагретого слоя Al (б).

разом, имеющим Al-слой толщиной 0.1 мкм, толщина СН-обкладок составляла по 1 мкм. Энергия ЛИ, введенного в иллюминаторы, равнялась ~ 700 Дж при длительности импульсов $\tau_{0.5} \sim 0.5$ нс. Образец был установлен на боковой поверхности диагностического бокса. Время задержки зондирующего излучения составило 0.75 нс. Спектрограф с плоским кристаллом КАР имеет спектральное разрешение 2.3 эВ. Зарегистрированная в опыте спектрограмма и результаты ее обработки представлены на рис.5.

На спектрограмме хорошо видны линии поглощения 1s–2p-переходов. Согласно расчетам средняя температура Al-слоя в этом опыте составляет 46 эВ при неоднородности нагрева образца $\sim 10\%$, а максимальная и минимальная плотности различаются примерно на 20%.

С образцом алюминия были проведены также эксперименты при регистрации спектра с помощью спектрографа с кристаллом РЕТ, имеющего спектральное разрешение ~ 0.5 эВ. Образец с толщиной Al-слоя 0.11 мкм был установлен внутри диагностического бокса. Энергия ЛИ, введенного в иллюминаторы, составила ~ 900 Дж, время задержки зондирующего излучения равнялось 0.7 нс.

Зарегистрированная спектрограмма и результаты ее обработки представлены на рис.6. На спектрограмме хорошо видны линии поглощения 1s–2p-переходов с их подробной структурой. Для сравнения с результатами работы [21] измеренные коэффициенты пропускания пересчитаны для толщины слоя 0.05 мкм. Результаты этой работы часто используются для сравнения с результатами расчетно-теоретического моделирования.

Температура образца в [21] оценивается как 58 эВ, а плотность – как 0.02 г/см³, что близко к условиям наших экспериментов. Видно, что зарегистрированные на уста-

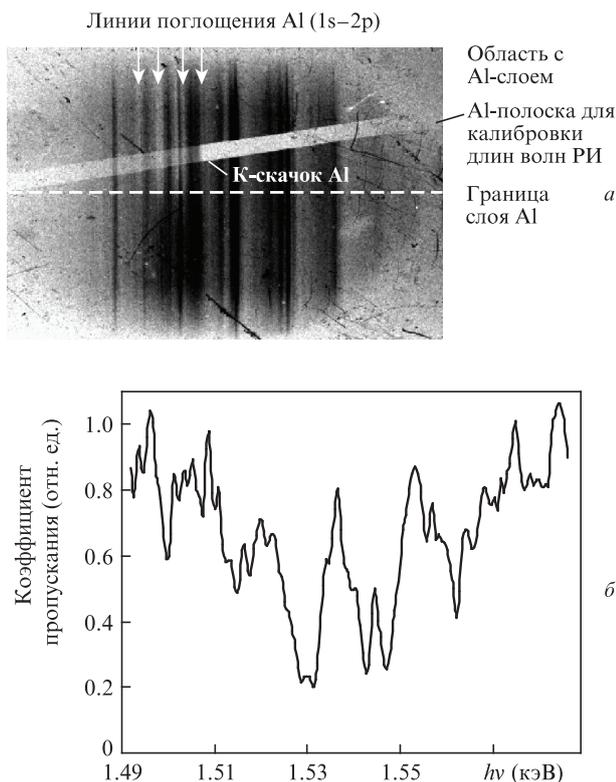


Рис.5. Результаты измерения поглощения РИ в образце с Al-слоем толщиной ~0.1 мкм, установленном на боковой поверхности: спектрограмма (а) и коэффициент пропускания нагретого образца Al (б).

новке «Искра-5» спектральные компоненты неплохо совпадают с представленными в работе [21]. Видно также, что в нашем эксперименте наиболее интенсивные линии поглощения лежат в более мягкой области спектра, следовательно температура образца была несколько меньше.

Результаты эксперимента с образцом алюминия, имеющим два слоя различной толщины, приведены на рис.7. Образец был установлен внутри диагностического бокса, толщины слоев составляли 0.05 и 0.1 мкм. Энергия ЛИ, введенного в иллюминаторы, равнялась ~600 Дж при времени задержки зондирующего излучения 0.6 нс. Спектрограф имел спектральное разрешение ~0.5 эВ.

На спектрограмме видны две зоны, отвечающие различным толщинам слоев алюминия, с линиями поглощения, соответствующими 1s-2p-переходам. Спектральные коэффициенты поглощения, полученные для различных толщин, для наглядности приведены к одной толщине (0.05 мкм); видно неплохое их согласие. Некоторое видимое различие коэффициентов, по нашему мнению, связано с шумом, обусловленным неоднородным отражением кристалла, а также недостаточной яркостью просвечивающего РИ в некоторых спектральных диапазонах. Из рис.7 видно также, что с уменьшением энергии ЛИ, введенного в иллюминаторы, линии поглощения сместились в более мягкую область, что указывает на снижение температуры исследуемых слоев.

При исследованиях коэффициентов поглощения РИ в германии образец представлял собой слой Ge толщиной 0.14 мкм, заключенный между слоями СН-пластика толщиной по 0.9 мкм. Образец был установлен внутри диаг-

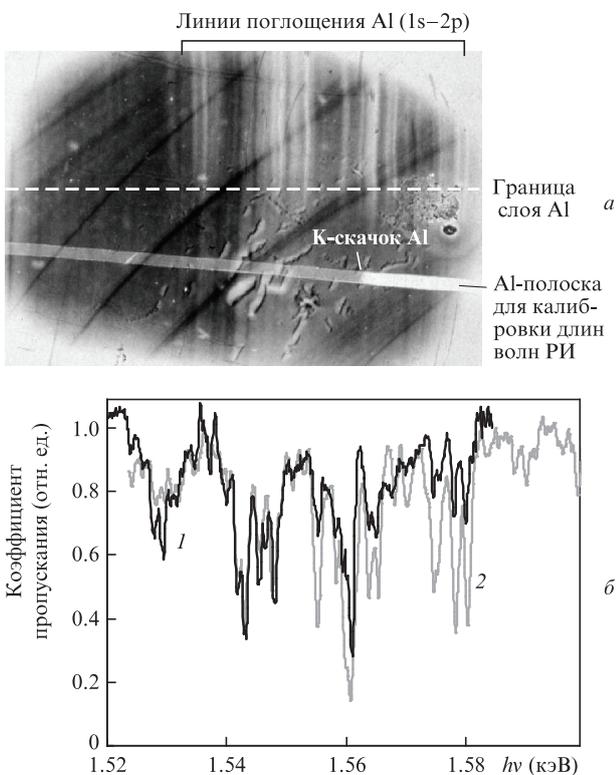


Рис.6. Результаты измерения поглощения РИ с высоким спектральным разрешением в опыте с Al-образцом, установленным внутри диагностического отсека: спектрограмма (а) и коэффициенты пропускания нагретого слоя Al, полученные в экспериментах на установке «Искра-5» (1) и установке Nova [21] с образцом, имеющим слой Al толщиной 0.05 мкм (2) (б). Кривая 1 пересчитана для толщины слоя 0.05 мкм.

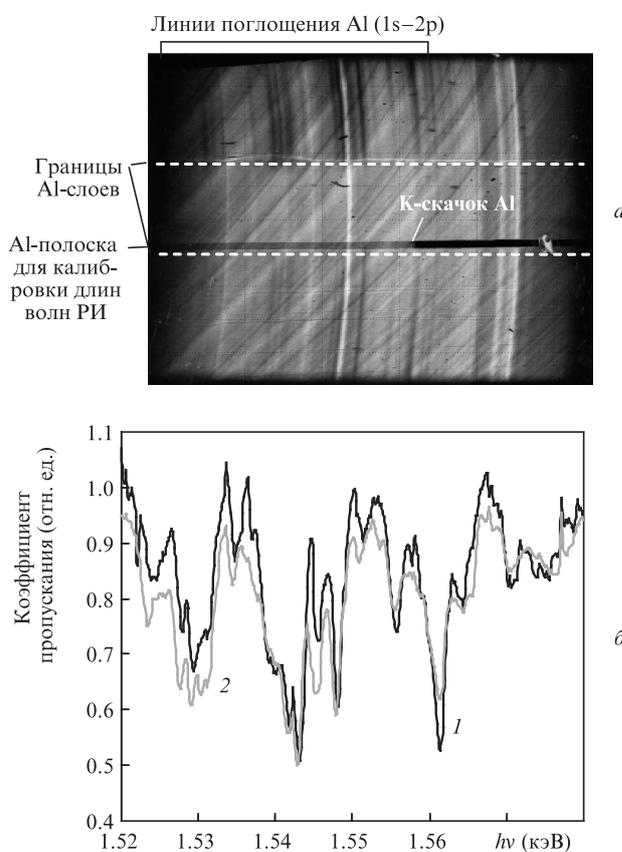


Рис.7. Результаты измерения поглощения РИ в образце с двумя Al-слоями: спектрограмма (а) и коэффициенты пропускания нагретых слоев Al толщиной 0.05 (1) и 0.1 мкм (2). Кривая 2 пересчитана для толщины слоя 0.05 мкм.

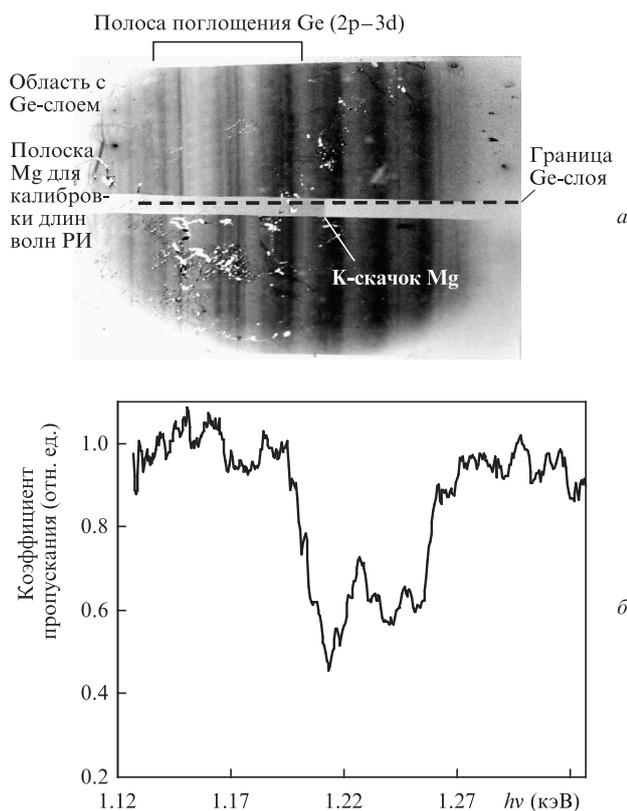


Рис.8. Результаты измерения поглощения РИ в образце со слоем Ge толщиной 0.14 мкм при двухстороннем нагреве: спектрограмма (а) и коэффициент пропускания нагретого образца Ge (б).

ностического отсека. Энергия ЛИ, введенного в иллиминаторы, составила ~ 900 Дж при времени задержки зондирующего излучения 0.6 нс. Спектральное разрешение равнялось ~ 2.5 эВ. Мишень для генерации просвечивающего РИ была изготовлена из неодима.

Результаты эксперимента с образцом германия приведены на рис.8. На спектрограмме видна полоса поглощения на 2р–3d-переходах. Сравнение энергий компонентов спектральных коэффициентов поглощения, зарегистрированных в эксперименте, с результатами расчетов [22] позволяет заключить, что в эксперименте температура нагретого слоя Ge составляла ~ 30 эВ.

5.3. Результаты экспериментов по определению толщины нагретого слоя алюминия

Зарегистрированная в опыте спектрограмма с теневой картинкой образца со слоем алюминия и результаты ее обработки показаны на рис.9. Заметим, что алюминий, нагретый до нескольких десятков электронвольт, поглощает зондирующее излучение лишь в области линий поглощения, при остальных энергиях он практически прозрачен, поэтому теневое изображение нагретого материала можно получить лишь в диапазоне энергий, соответствующих линиям поглощения. В эксперименте по определению толщины нагретого слоя Al из-за отсутствия точечной диафрагмы спектральное разрешение низкое, поэтому для наглядности на рис.9,а приведена спектрограмма с линиями поглощения, зарегистрированными с высоким спектральным разрешением в эксперименте по исследованию пробегов РИ. Из сравнения спектрограмм видно, что спектральное положение области, где наблюдается

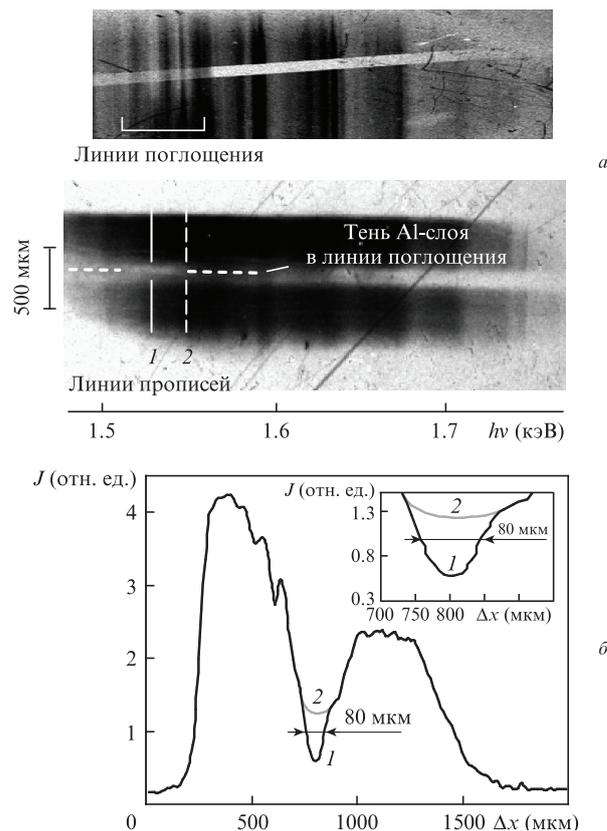


Рис.9. Спектрограмма с теневым изображением пленки со слоем алюминия (а) и прописи спектрограммы в области линии поглощения (1) и вне этой области (2) (б).

теневая картинка нагретого слоя алюминия, хорошо совпадает с положением линий поглощения на спектрограмме с высоким спектральным разрешением, что надежно свидетельствует о регистрации теневое изображение нагретого слоя Al в линиях поглощения.

Пропись спектрограммы с теневым изображением слоя Al вдоль линии поглощения приведена на рис.9,б. Видно, что область поглощения имеет колоколообразный вид, ее ширина равна 80 мкм. Сравнение прописи с расчетными профилями теневых изображений области, имеющей гауссов профиль поглощения с различными ширинами, при регистрации этих изображений с помощью щелевой диафрагмы шириной 20 мкм и с увеличением $M = 3.2$ (как в условиях эксперимента) показывает, что в эксперименте в момент зондирования толщина слоя Al составляла 14 ± 3 мкм. Следовательно, при исходной толщине слоя 0.24 мкм плотность нагретого слоя в момент зондирования была равна $(4.6 \pm 1.0) \times 10^{-2}$ г/см³.

Результаты расчетно-теоретического моделирования показали, что в момент времени $\Delta t = 0.7$ нс, близкий к моменту зондирования, электронная температура плазмы слоя алюминия составляет 65 эВ, а плотность $\sim 2.34 \times 10^{-2}$ г/см³. Экспериментально определенная плотность нагретого слоя Al примерно в два раза превышает расчетное значение в близкий момент времени. Следует отметить, что в расчете энергия ЛИ, введенного в иллиминаторы, задавалась равной 900 Дж, что больше, чем в эксперименте, следовательно образец нагревается более интенсивно и его плотность должна быть ниже. Таким образом, экспериментально определенная плотность нагретого образца алюминия и ее расчетное значение неплохо согласуются друг с другом.

Подробное описание расчетно-теоретического моделирования нагрева исследуемых слоев и сравнение результатов расчета спектральных коэффициентов поглощения с результатами экспериментов будут представлены в отдельной публикации.

6. Заключение

Таким образом, разработана методика экспериментов для исследования спектральных коэффициентов поглощения РИ в материалах, объемно нагретых мягким РИ.

Изготовлены мишени и проведены эксперименты с тонкопленочными образцами Al и Ge толщиной 0.05–0.15 мкм. В спектральном диапазоне $h\nu \sim 1.1–1.6$ кэВ зарегистрированы линии поглощения на 1s–2p-переходах в атоме Al и на 2p–3d-переходах в атоме Ge.

В дополнительных экспериментах определена плотность образца алюминия, нагретого до температуры ~ 65 эВ, которая составила $(4.6 \pm 1.0) \times 10^{-2}$ г/см³.

Разработанные методика экспериментов и метод измерения спектров поглощения позволяют проводить на лазерной установке «Искра-5» исследования пробегов РИ в материалах, объемно нагретых мягким РИ.

Авторы выражают благодарность С.Г.Гаранину, Г.Г.Кочемасову, С.А.Белькову и А.В.Бессарабу за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения ее результатов, В.М.Изгородину и Б.С.Зималину за помощь в изготовлении элементов мишеней, М.А.Бариннову, В.Ф.Ермоловичу и В.А.Карепову за проведение численного моделирования экспериментов, О.О.Шарову за предоставленные результаты предварительных расчетов, В.И.Анненкову, С.В.Калипанову, В.П.Коваленко, А.Г.Кравченко, В.А.Кротову, С.И.Петрову и Г.В.Тачаеву, а также всему коллективу лазерной установки «Искра-5» за подготовку и проведение экспериментов.

1. Perry T.S., Budil K.S., Cauble R., et al. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **54**, 317 (1995).

2. Eidmann K., Schwanda W., Foldes I.B., et al. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **51**, 77 (1994).
3. Foster J.M., Hoarty D.J., Smith C.C., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 3255 (1991).
4. Chenais-Popovics C., Gilleron F., Fajardo M., et al. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **65**, 117 (2001).
5. Baohan Zhang, Guohong Yang, Wenhai Zhang, et al. *Phys. Plasmas*, **9**, 678 (2002).
6. Bailey J.E., Rochau G.A., Iglesias C.A., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 265002 (2007).
7. Chenais-Popovics C., Merdji H., Missalla T., et al. *The Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **127**, 275 (2000).
8. Hoarty D.J., Harris J.W.O., Graham P., et al. *High Energy Density Physics*, **3**, 325 (2007).
9. Merdji H., Mißalla T., Blenski T., et al. *Phys. Rev. E*, **57**, 1042 (1998).
10. Анненков В.И., Багрецов В.А., Безуглов В.Г. и др. *Квантовая электроника*, **18**, 536 (1991).
11. O'Neill D.M., Lewis C.L.S., Neely D., et al. *Phys. Rev. A*, **44**, 2641 (1991).
12. Springer P.T., Field D.J., Wilson B.G., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 3735 (1992).
13. Chenais-Popovics C., Fajardo M., Gilleron F., et al. *Phys. Rev. E*, **65**, 016413 (2001).
14. Renaudin P., Blancard C., Bruneau J., et al. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **99**, 511 (2006).
15. Perry T.S., Springer P.T., Fields D.F., et al. *Phys. Rev. E*, **54**, 5617 (1996).
16. Бельков С.А., Долголева Г.В. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*, **1**, 59 (1992).
17. Annenkov V.I., Bel'kov S.A., Suslov N.A., et al. *J. Phys. IV France*, **133**, 139 (2006).
18. Perry T.S., Davidson S.J., Serduke F.J.D., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 3784 (1991).
19. Chenais-Popovics C., Thais F., Eidmann K., et al. *Proc. Second Int. Conf. «Inertial Fusion Science and Applications»* (Kyoto, Japan, 2001, p.451).
20. Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. *At. Data Nucl. Data Tables*, **54**, 181 (1993).
21. Perry T.S., Bedil K.S., Cauble R., et al. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **54**, 317 (1995).
22. Back C.A., Perry T.S., Bach D.R., et al. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **58**, 415 (1997).