

УДК 533.9.082

СПЕКТРОМЕТР МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ ПОЛНОГО ВНЕШНЕГО ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ СОКОЛ-П

Д.А. Вихляев, Д.С. Гаврилов, М.В. Елисеев, П.Н. Ефанов, А.Г. Какишин, Е.А. Лобода, А.В. Потапов, К.В. Сафронов (Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия)

В статье обосновывается применение спектрометра мягкого рентгеновского излучения на основе сферических зеркал полного внешнего отражения для исследования плазмы на лазерной установке СОКОЛ-П. Приводятся расчёт, юстировка и калибровка элементов спектрометра. Приведены спектры мягкого рентгеновского излучения, полученные с помощью спектрометра.

Ключевые слова: плазма, спектрометр, мягкое рентгеновское излучение.

SOFT X-RAY SPECTROMETER BASED ON SPHERICAL GRAZING MIRRORS FOR PLASMA INVESTIGATION ON SOKOL-P LASER FACILITY. D.A. VIKHLYAEV, D.S. GAVRILOV, M.V. ELISEEV, P.N. EFANOV, A.G. KAKSHIN, E.A. LOBODA, A.V. POTAPOV, K.V. SAFRONOV. This paper substantiates the use of soft X-ray spectrometer based on spherical grazing mirrors for plasma investigation on SOKOL-P laser facility. Calculation, alignment and calibration of spectrometer are presented. Soft X-ray spectra obtained by spectrometer are shown.

Key words: plasma, spectrometer, soft X-ray.

ВВЕДЕНИЕ

Методы рентгеновской спектроскопии играют важную роль в диагностике высокотемпературной плазмы, образующейся при взаимодействии мощного высокоинтенсивного ($I_L > 10^{16}$ Вт/см²) лазерного излучения с веществом. Мягкое рентгеновское излучение, как непрерывное, так и линейчатое, несёт богатую информацию о параметрах плазмы и протекающих в ней процессах. В РФЯЦ — ВНИИТФ на лазерной установке СОКОЛ-П для регистрации непрерывного спектра в области мягкого рентгеновского излучения 0,3—4,5 кэВ применяется спектрометр на основе К-фильтров, называемый спектрометром Данте [1—3]. Выделение измеряемых участков спектра в этом методе основано на наличии скачка поглощения материала фильтра при энергии, равной энергии К-оболочки. Фильтр также пропускает кванты с энергией выше К-скачка поглощения. Для учёта вклада этих квантов применяется другой детектор с фильтром вычета, пропускающим только кванты с энергией выше К-скачка.

Однако с повышением интенсивности лазерного излучения возрастает выход быстрых электронов из мишени. Кинетическая энергия ε таких электронов при типичных для современных лазерных установок плотностях потока облучения $\sim 10^{17}$ — 10^{19} Вт/см² может достигать десятков, сотен килоэлектрон-вольт и более. Измерения спектров тормозного излучения, выходящего из лазерных мишеней, и расчёты динамики ускорения по методу частиц в ячейках (PIC-коды) показывают, что распределение ускоренных электронов по энергии близко к экспоненциальному: $f(\varepsilon) = \frac{1}{T_h} \exp(-\varepsilon/T_h)$, где T_h — эффективная температура, связанная с плотностью потока облучения следующим интерполяционным соотношением [4]:

$$T_h = 100(I_0(10^{17} \text{ Вт/см}^2) \lambda_{\text{МКМ}}^2)^{1/3} \text{ кэВ},$$

где $\lambda_{\text{МКМ}}$ — длина волны лазерного импульса в микрометрах. Таким образом, для импульса 1-й гармоники Nd-лазера с $I_0 \sim 10^{17}$ — 10^{18} Вт/см² температура $T_h \sim 100$ — 300 кэВ.

Электроны, теряющие кинетическую энергию при торможении на стенках диагностической камеры и конструктивных элементах измерительных методик, испускают жёсткое рентгеновское излучение. Кроме того, спектр тормозного рентгеновского излучения, выходящего из лазерной мишени, характеризуется очень большой протяженностью по энергии, вплоть до нескольких МэВ. При этом вклад жёстких рентгеновских квантов в сигнал детектора с рентгеновским фильтром может составлять 80% и более [5]. Так как методика К-фильтров основана на вычитании двух сигналов, ошибка измерений может составлять недопустимо большую величину — 70—100%.

Методики, основанные на селекции рентгеновского излучения только фильтрами (К-фильтры, серые фильтры [6]), не могут применяться для измерения спектра мягкого рентгеновского излучения. Поэтому

для исследования лазерной плазмы на установке СОКОЛ-П необходимо было разработать и изготовить спектрометр, в котором вклад в сигнал жёстких рентгеновских квантов не будет превышать 10—20%. Для такого спектрометра можно использовать следующие эффекты:

- дифракции рентгеновских лучей на кристаллах, многослойных интерференционных зеркалах или дифракционных решётках [7—9];
- полного внешнего отражения (ПВО).

Создание спектрометра, основанного на дифракции рентгеновского излучения, не представляется возможным из-за:

- проблемы больших порядков;
- большого вклада фонового излучения, возникающего при рассеянии жёстких рентгеновских квантов и торможении электронов на диспергирующих элементах спектрометра.

Таких недостатков нет в спектрометре, основанном на эффекте ПВО. Селекция рентгеновского излучения в таком спектрометре производится зеркалом и фильтром [3]. Основное назначение зеркал ПВО — эффективное подавление высокоэнергетической части спектра с энергиями квантов выше скачка поглощения селективного фильтра. Выбором материала и угла падения излучения на зеркало обеспечивается эффективная энергия квантов отсечки высокоэнергетичной части спектра. В методиках, основанных на селекции рентгеновского излучения, только фильтрами нельзя эффективно подавить жёсткий компонент. Применение плоских зеркал ПВО не повышает точность измерений из-за большого вклада рассеянных на них жёстких рентгеновских квантов. Для уменьшения фонового сигнала можно использовать сферические зеркала ПВО. Основное преимущество сферических зеркал по отношению к плоским — возможность установки диафрагмы в меридиональной (сагиттальной) фокальной плоскости (кроссовер) для уменьшения вклада рассеянных квантов.

РАСЧЁТ СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛ ПВО

Схема одного из каналов спектрометра приведена на рис. 1. Селекция рентгеновского излучения производится с помощью зеркала 2 и рентгеновского фильтра 4. Диафрагма 3 располагается в меридиональном фокусе сферического зеркала.

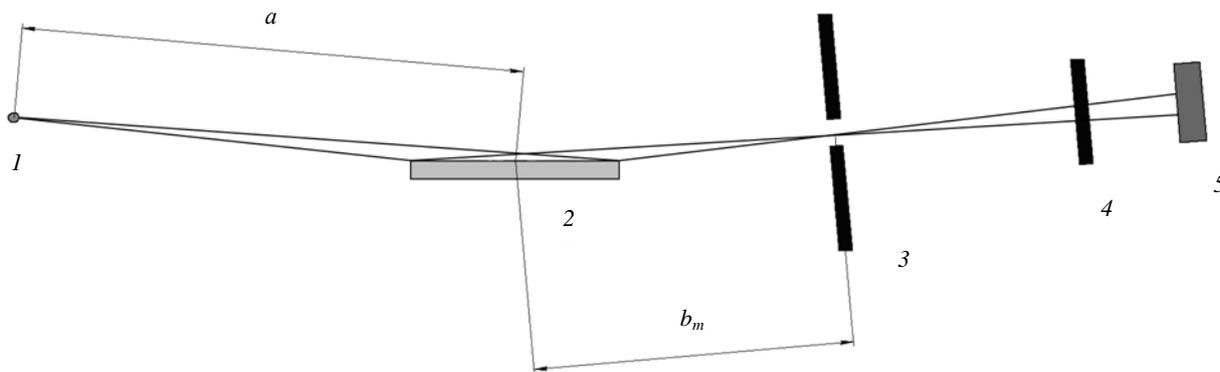


Рис. 1. Схема спектрометра: 1 — лазерная плазма; 2 — зеркало ПВО; 3 — диафрагма; 4 — фильтр; 5 — детектор

Для расчета радиуса кривизны зеркала R необходимо задать расстояния a и b_m . Исходя из конструктивных особенностей диагностической камеры, было выбрано: $a = 327$ мм, $b_m = 153$ мм. Радиус кривизны R определяется из соотношения

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b_m} = \frac{2}{R \sin(\theta)},$$

где θ — угол падения излучения на зеркало.

Предлагаемый спектрометр должен регистрировать кванты с энергией $E = 0,3—4,5$ кэВ. Для регистрации квантов с энергией ниже 1,5 кэВ угол падения должен быть $\theta = 2^\circ$, для квантов с большей энергией $\theta = 1^\circ$. Это связано с уменьшением коэффициента отражения (для фиксированного угла падения) при

увеличении энергии квантов. Результаты расчёта приведены в табл. 1. Инструментальная оснастка оптического участка позволяет изготовить зеркала с радиусами $R_{\text{инстр}}$, близкими к расчётным.

Таблица 1. Результаты расчёта

E , кэВ	θ , град	R , мм (расчёт)	$R_{\text{инстр}}$, мм
1,5—4,5	1	11 941	12 134
0,3—1,5	2	5829	5970

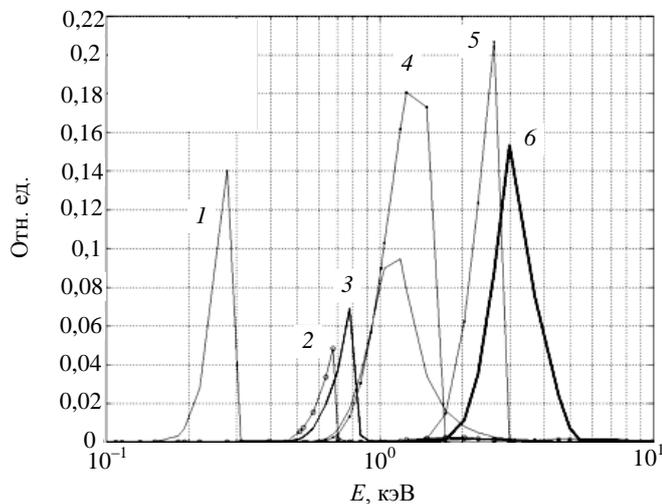


Рис. 2. Спектральные функции каналов спектрометра (на графике приводятся материал зеркала, угол падения, материал и толщина фильтра): 1 — $\text{Ti } 2^\circ + \text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$ 5,5 мкм; 2 — $\text{Ti } 2^\circ + \text{Fe}$ 1 мкм; 3 — $\text{Ti } 2^\circ + \text{Cu}$ 1 мкм; 4 — $\text{Cr } 2^\circ + \text{Al}$ 5,6 мкм; 5 — $\text{Cr } 1^\circ + \text{C}_6\text{H}_8\text{Cl}_4$ 50 мкм; 6 — $\text{Ni } 1^\circ + \text{Ti}$ 10 мкм

В области мягкого рентгеновского излучения от 0,3 до 4,5 кэВ наиболее подходящими материалами для зеркал являются SiO_2 , Ti , Cr , Ni , Mo , Au . У этих материалов относительно большой коэффициент отражения в данном интервале энергий. Спектральные функции рентгенооптического тракта (рис. 2), равные произведению коэффициента пропускания фильтра на коэффициент отражения зеркала ПВО, рассчитывались с использованием оптических констант материалов из [10]. Материал зеркала и толщина фильтров выбирались так, чтобы вклад квантов с энергией выше характеристического скачка фильтров был минимальным. На рис. 3 представлен внешний вид рентгеновского спектрометра.

Отраженное от сферических зеркал излучение предлагается регистрировать полупроводниковыми детекторами СППД-11-02 (диаметр входного окна 10 мм). На время юстировки и наладки спек-

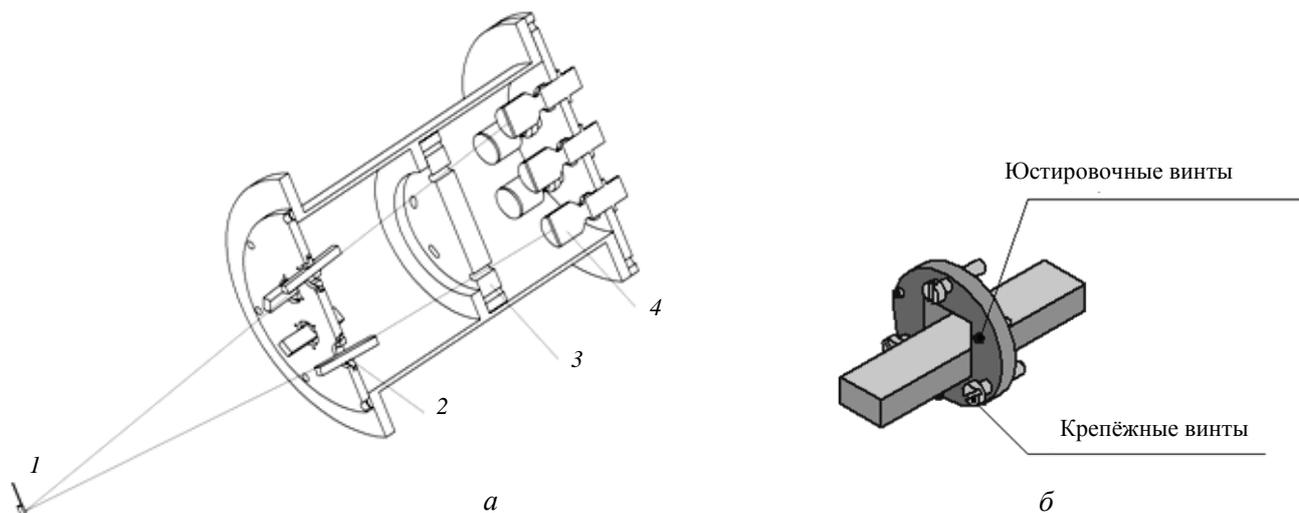


Рис. 3. Спектрометр на основе сферических зеркал ПВО (а) и крепеж зеркал (б): 1 — лазерная мишень; 2 — крепеж с зеркалами ПВО; 3 — свинцовая защита с диафрагмами; 4 — детекторы с фильтрами

трометра регистрацию излучения необходимо производить на фотоплёнку. В случае, если фотоплёнка будет прокалибрована в интервале энергий 0,3—4,5 кэВ, полученные с помощью неё результаты можно использовать для определения абсолютного выхода рентгеновского излучения из лазерной плазмы. Фотоплёнка должна располагаться в одной плоскости с входными окнами детекторов. Применение фотоплёнки позволит определить и откорректировать расположение изображения на входном окне детектора. Это связано с тем, что входное окно детектора круглое и смещение изображения от центра окна приводит к уменьшению количества регистрируемых квантов.

КАЛИБРОВКА ЭЛЕМЕНТОВ СПЕКТРОМЕТРА

Для регистрации мягкого рентгеновского излучения (РИ) в СССР были разработаны несколько типов фотоплёнок и фотопластинок — УФ-4, УФ-ВР, УФШ-0, УФШ-С, выпускавшихся ранее небольшо-

ми партиями в ГОСНИИхимфотопроекте. Эти плёнки характеризовались большим содержанием серебра в эмульсии, что обуславливало их высокую чувствительность, а также очень тонким защитным желатиновым слоем, практически не поглощающим мягкое РИ. В настоящее время выпуск этих плёнок прекращён. Следует отметить, что и зарубежные аналоги этих плёнок, выпускавшиеся фирмой Kodak, такие, как Kodak DEF (Direct Exposition Film), Kodak NC (No Screen), также в настоящее время сняты с производства. На рынке предлагается несколько других типов рентгеновских плёнок, в основном предназначенных для медицинских целей и рентгеноструктурного анализа. В частности, по сообщениям из сети Internet, неплохими характеристиками обладают плёнки Agfa Structurix D7 FW. Однако сведений о чувствительности этой плёнки и, в особенности, к мягкому рентгеновскому излучению в научной литературе не найдено. В то же время проведение количественных измерений с помощью рентгеновской фотоплёнки требует её калибровки.

Калибровка проводилась на двух источниках рентгеновского излучения: при энергиях свыше 2 кэВ на установке ФИЛИПС, при энергиях менее 2 кэВ — на установке КРУС [11]. В диапазоне энергий 0,274—1,47 кэВ (установка КРУС) использовалось характеристическое излучение: $K_{\alpha}C$ — 0,27 кэВ, $L_{\alpha}Fe$ — 0,71 кэВ, $L_{\alpha}Cu$ — 0,93 кэВ, $K_{\alpha}Al$ — 1,48 кэВ, выделяемое зеркалами ПВО и селективными фильтрами. Для энергии 4 кэВ использовалось квазимонохроматическое рентгеновское излучение, выделяемое из непрерывного спектра вольфрамового анода рентгеновской трубки селективным Ti-фильтром.

Абсолютные измерения плотности потока рентгеновских квантов проводились с помощью ионизационной камеры, заполненной воздухом. Точность измерений 5%.

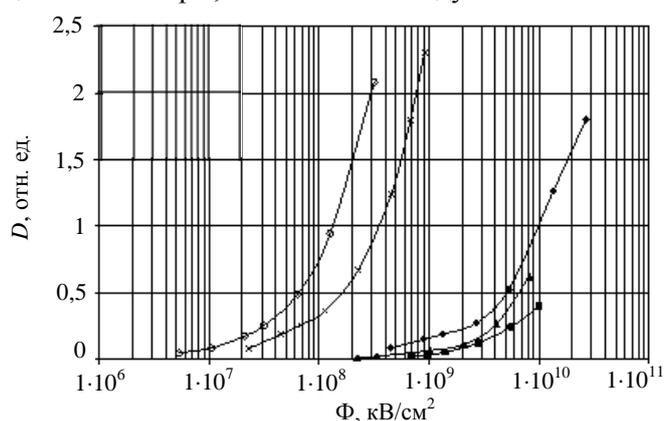


Рис. 4. Характеристические кривые фотоплёнки Agfa Structurix D7 FW: \blacklozenge — 0,274, \blacksquare — 0,703, \blacktriangle — 0,925, \times — 1,47, \circ — 4,4 кэВ

Экспонированная плёнка проявлялась в проявителе КЦ-1 5 минут при 20 °С, после промывки в проточной воде фиксировалась 3 мин. Оптические плотности почернения проявленных плёнок считывались двухлучевым микрофотометром ИФО-451. На рис. 4 представлены характеристические кривые фотоплёнки Agfa Structurix D7 FW.

Измерение коэффициентов отражения сферических зеркал проводилось на рентгеновской установке КРУС-УКРОП [12]. Калибровка проводилась на характеристических линиях $K_{\alpha}C$ — 0,27 кэВ, $L_{\alpha}Fe$ — 0,71 кэВ, $L_{\alpha}Cu$ — 0,93 кэВ, $K_{\alpha}Al$ — 1,48 кэВ, $K_{\alpha}Ti$ — 4,51 кэВ. Для выделения квазимонохроматического участка спектра, содержащего характеристическую линию материала анода рентгеновской трубки и часть тормозного спектра со средней энергией квантов, близкой к энергии характеристической линии, применяются селективный фильтр и зеркала ПВО. Для учёта вклада высокоэнергетической части спектра с энергиями квантов выше скачка поглощения селективного фильтра применялся фильтр «вычета».

В табл. 2 представлены измеренные и теоретические коэффициенты отражения рентгеновского излучения от сферических зеркал при различных углах падения θ .

Т а б л и ц а 2. Измеренные и теоретические коэффициенты отражения

Зеркало	R, мм	θ , град	ϵ , эВ	$R_{\text{эксперимент}}$	$R_{\text{теория}}$
Ti	5970	$2,0 \pm 0,1$	274	$0,90 \pm 0,05$	0,85
Ti	5970	$2,0 \pm 0,1$	703	$0,40 \pm 0,02$	0,47
Ti	5970	$2,0 \pm 0,1$	925	$0,44 \pm 0,03$	0,46
Cr	5970	$2,0 \pm 0,1$	1470	$0,30 \pm 0,01$	0,32
Ni	12 134	$1,00 \pm 0,05$	4510	$0,05 \pm 0,01$	0,04

Как видно из таблицы, измеренный коэффициент отражения хорошо совпадает с теоретическим. Относительно большая погрешность с Ni-зеркалом связана с ошибкой в определении угла падения θ . Экспериментальный коэффициент отражения не может превышать теоретический, поэтому для никелевого зеркала коэффициент отражения принимался 0,04. В ходе этих экспериментов также определялись коэффициенты пропускания рентгеновских фильтров.

ЮСТИРОВКА СПЕКТРОМЕТРА

Юстировка спектрометра — достаточно трудоёмкая процедура, требующая точного выставления всех зеркал под необходимыми углами падения излучения. Допустимые отклонения углов падения излучения на сферические зеркала составляют $\pm 0,05^\circ$. Это обусловлено тем, что коэффициент отражения сильно зависит от угла падения излучения на зеркало.

Юстировка зеркал спектрометра, установленного на диагностическую камеру, чрезвычайно трудна, поэтому необходимо было юстировать зеркала на оптическом стенде с помощью He—Ne-лазера (рис. 5).

После выставления всех зеркал была проведена проверка правильности юстировки. Для этого через диафрагму был запущен расходящийся лазерный луч, имитирующий выходящее из лазерной плазмы рентгеновское излучение, а вместо кроссовера установили диафрагму из оргстекла. На рис. 6 представлено полученное изображение в плоскости детекторов.

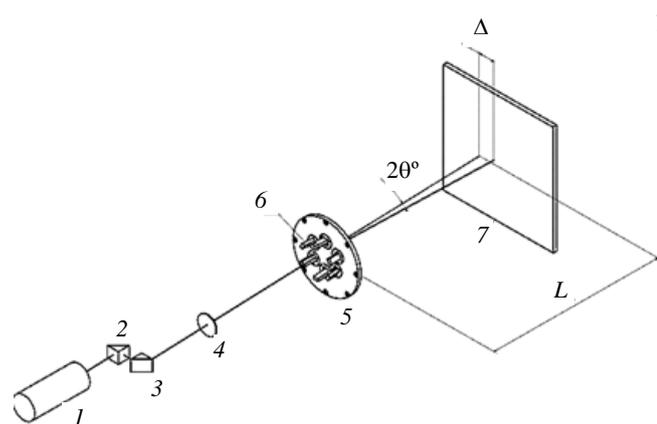


Рис. 5. Схема юстировки зеркал спектрометра: 1 — лазер; 2, 3 — призмы; 4 — диафрагма; 5 — держатель зеркал; 6 — зеркало; 7 — экран

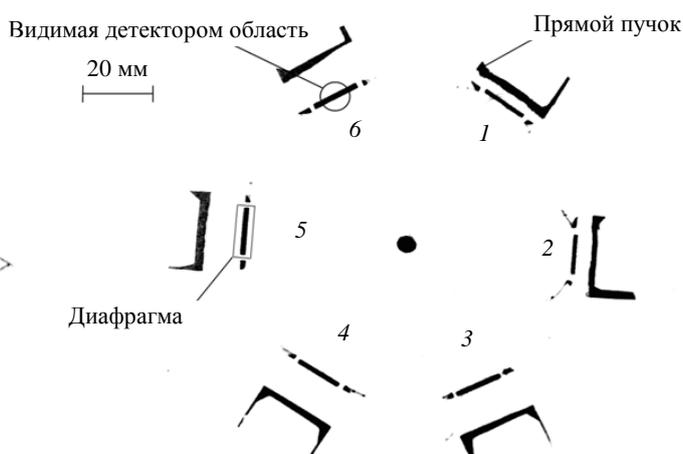


Рис. 6. Изображение в плоскости детекторов: 1, 2 — зеркала, установленные под углом падения 1° ; 3—6 — 2°

Как видно на рис. 6, отражённое от зеркал излучение хорошо проходит через диафрагму. Пучок рентгеновского излучения расходится и на детекторе будет представлять собой линию длиной 17,4 мм и шириной 0,6 мм ($\theta = 1^\circ$) либо 1,2 мм ($\theta = 2^\circ$).

В результате юстировки были установлены зеркала под требуемыми углами падения $2 \pm 0,05^\circ$ и $1 \pm 0,05^\circ$ относительно фокального пятна.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На лазерной установке СОКОЛ-П с помощью рентгеновского спектрометра были проведены исследования спектральных характеристик плазмы. В экспериментах лазерная установка обеспечивала следующие параметры облучения мишени: энергия лазерного импульса $E = 6\text{—}9$ Дж, длительность $\tau = 0,7\text{—}1$ пс, диаметр фокального пятна $\delta_{1/2} = 6\text{—}125$ мкм. Ось спектрометра располагалась под углом 40° к оси лазерного излучения. Параметры каналов спектрометра приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Параметры каналов спектрометра

№ канала	Зеркало	Фильтр, размер, мкм	Средняя энергия, кэВ
1	Ni (1°)	Ti, 8,7	3,12
2	Ni (1°)	Ti, 8,7	3,12
3	Cr (2°)	Al, 12	1,38
4	Cr (2°)	Al, 12	1,38
5	Ti (2°)	Cu, 1,0	0,77
6	Ti (2°)	Fe, 1,0	0,68

Каналы 2, 4 и 6 использовались для измерения вклада рассеянных рентгеновских квантов. Вместо фильтров Ti, Al и Fe ставились фильтры вычета: Al 65 мкм, лавсан 150 мкм и 30 мкм соответственно. Лавсан покрывался светозащитным алюминиевым слоем толщиной 0,15 мкм. Эксперименты с фильтрами вычета показали, что вкладом высокоэнергетической части спектра с энергиями квантов выше скачка поглощения селективного фильтра можно пренебречь.

Спектрометр использовался в экспериментах с медными мишенями толщиной 35 мкм. При облучении мишеней в опытах варьировался только размер фокального пятна, а энергия и длительность лазерного импульса поддерживались приблизительно на одном уровне. Регистрация изображений осуществлялась на рентгеновскую фотоплёнку Agfa Structurix D7 FW. На рис. 7 показаны рентгеновские изображения в различных каналах спектрометра. Контраст измерений мягких квантов по отношению к жестким >10.

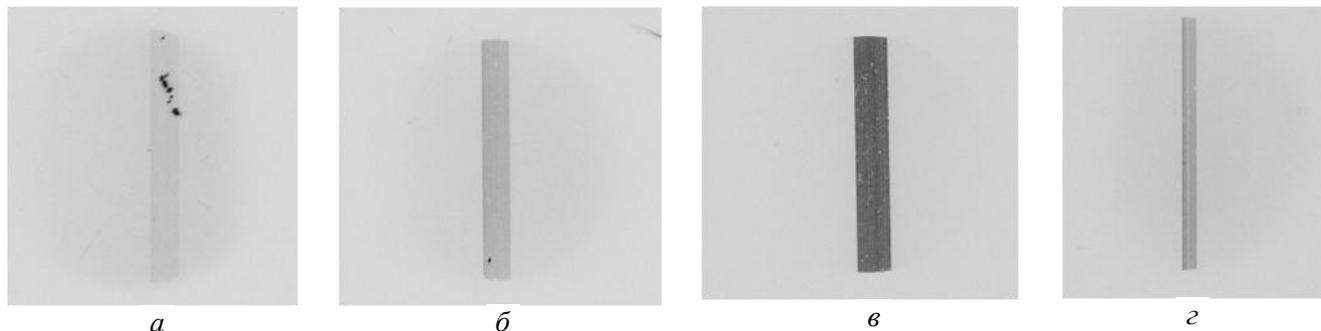


Рис. 7. Рентгеновские изображения в различных каналах: а — 0,6 кэВ; б — 0,8 кэВ; в — 1,3 кэВ; г — 3,0 кэВ

Среднеквадратичная ошибка измерений для плотностей потока лазерного излучения $\Phi > 10^{17}$ Вт/см² составляет 15%. Основные величины, влияющие на неё: коэффициент отражения зеркал, коэффициент пропускания рентгеновских фильтров, они определены с точностью 5, 10% соответственно. Для плотностей потока лазерного излучения $\Phi < 10^{17}$ Вт/см² среднеквадратичная ошибка измерений возрастает до 60%, что обусловлено погрешностью в калибровке фотоплёнки при малых потоках. Точность определения эффективной электронной температуры для $\Phi > 10^{17}$ Вт/см² составляет 27%, для $\Phi < 10^{17}$ Вт/см² — 64%.

Условия экспериментов и результаты обработки приведены в табл. 4. Данные рассчитаны в предположении изотропного выхода мягкого рентгеновского излучения из мишени в 4π стерадиан.

Таблица 4. Условия экспериментов и результаты обработки

№ канала	E/τ, Дж/пс	δ _{1/2} , мкм	Φ, Вт/см ²	dE/dεd, кэВ/кэВ			
				0,68 кэВ	0,77 кэВ	1,38 кэВ	3,12 кэВ
1	8,37/0,73	6,5	1,7·10 ¹⁹		1,51·10 ¹⁶	9,79·10 ¹⁴	6,44·10 ¹³
2	8,59/0,73	25	1,2·10 ¹⁸		1,45·10 ¹⁶	7,99·10 ¹⁴	1,20·10 ¹³
3	9,23/0,73	51	3,1·10 ¹⁷		9,83·10 ¹⁵	5,00·10 ¹⁴	4,69·10 ¹¹
4	7,47/0,75	70	1,3·10 ¹⁷		6,72·10 ¹⁵	3,86·10 ¹⁴	1,25·10 ¹¹
5	6,53/0,8	90	6,4·10 ¹⁶	8·10 ¹⁵	4,06·10 ¹⁵	2,37·10 ¹⁴	5,60·10 ¹⁰
6	6,41/1,31	125	2,0·10 ¹⁶	7,53·10 ¹⁵	3,40·10 ¹⁵	1,51·10 ¹⁴	4,78·10 ¹⁰

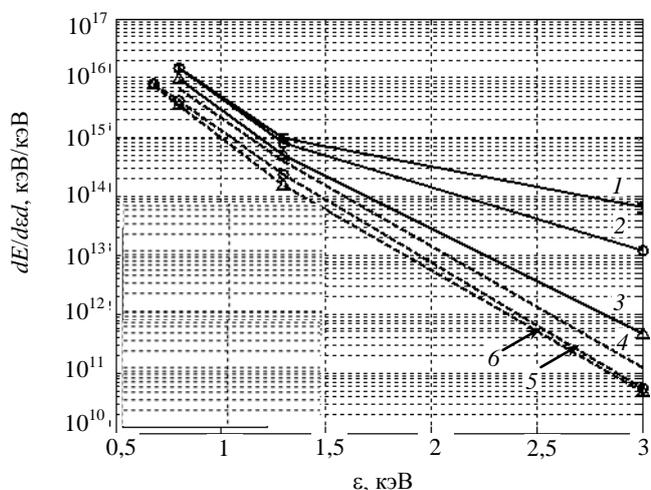


Рис. 8. Измеренный спектр мягкого рентгеновского излучения из медных мишеней при различной интенсивности лазерного излучения: 1 — 1,7·10¹⁹; 2 — 1,2·10¹⁸; 3 — 3,1·10¹⁷; 4 — 1,3·10¹⁷; 5 — 6,4·10¹⁶; 6 — 2,0·10¹⁶

На рис. 8 показаны спектры мягкого рентгеновского излучения из медных мишеней. Как видно на рисунке, при интенсивностях меньше 3·10¹⁷ Вт/см² электронная температура остаётся примерно постоянной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для регистрации тормозного спектра лазерной плазмы на лазерной установке СОКОЛ-П в диапазоне энергий 0,3—4,5 кэВ был изготовлен рентгеновский спектрометр на основе сферических зеркал полного внешнего отражения. В сочетании с зеркалами используются рентгеновские фильтры, что позволяет регистрировать излучение в шести узких областях энергий рентгеновских квантов.

Для определения абсолютного выхода рентгеновского излучения из лазерной плазмы были откалиброваны фотоплёнка Agfa Structurix, зеркала ПВО и рентгеновские фильтры.

Приведены спектры мягкого рентгеновского излучения, полученные с помощью спектрометра.

Благодаря тому, что в рентгеновском спектрометре на основе сферических зеркал ПВО вклад в сигнал жёстких рентгеновских квантов практически сведён к нулю, он позволит проводить исследования лазерной плазмы с большей точностью, чем прежде.

REFERENCES

1. **Mochizuki T., Yabe T., Okada K. et al.** — Phys. Rev. A., 1986, vol. 33, № 1, pp. 525—539.
2. **Kornblum H.N., Kauffman R.L., Smith J.A.** — Rev. Sci. Instrum., 1986, vol. 57 (8), pp. 2179—2181.
3. **Kauffman R.L.** Laser Program Annual Report, 1985, Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-50021-85, 1986, pp. 4.5—4.8.
4. **Hall T.A., Ellwi S., Batani D. et al.** Fast electron deposition in laser shock compressed plastic targets. — Phys. Rev. Lett., 1998, vol. 81, № 5, pp. 1003—1006.
5. **Tolstoukhov P.A., Vikhlyaev D.A., Gavrilov D.S. et al.** Investigation of the spectrum of brake-like and characteristic radiation of laser targets irradiated by ultrashort laser pulses with intensities up to about $\sim 10^{19}$ W/cm². — In coll.: Abstracts of XXXVII International conference on plasma physics and CTF. Zvenigorod, 2010, p. 114 (in Russian).
6. **Iahoda F.C., Little E.M., Quinn M.E. et al.** — Phys. Rev., 1960, vol. 119, pp. 843—852.
7. **Vergunov G.A., Kologrivov A.A., Rozanov V.B. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1987, vol. 13, issue 3, pp. 342—349 (in Russian).
8. **Eidman K., Kishimoto T.** — Appl. Phys. Lett., 1986, vol. 49(7), pp. 377—378.
9. **Alexandrov Yu.A., Koshevoi M.O., Murashova V.A. et al.** — Laser and Particle Beams, 1988, vol. 6, № 3, pp. 561—567.
10. **Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C.** Atomic Data and Nuclear Data Tables. Academic Press, Inc. № 2, July 1993.
11. **Zapysov A.L., Izrailev I.M., Nikitin V.P. et al.** — In coll.: Plasma diagnostics, issue 6. Edited by M.I. Pergament — M.: Energoatomizdat, 1989, p. 47 (in Russian).
12. **Ostashev V.I.** The effect of the whispering gallery in experiments with IRI beams. Edited by A.V. Lukin — Snezhinsk: Pub. house of RFNC— All-Russian Research Institute of Technical Physics, 2008 (in Russian).

AUTHORS

Vikhlyaev D.A. E. I. Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russian Federal Nuclear Center, P.O. Box 245, 456770 Snezhinsk, Russia; vikhlyaev@mail.vega-int.ru

Gavrilov D.S. E. I. Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russian Federal Nuclear Center, P.O. Box 245, 456770 Snezhinsk, Russia

Eliseev M.V. E. I. Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russian Federal Nuclear Center, P.O. Box 245, 456770 Snezhinsk, Russia

Efanov P.N. E. I. Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russian Federal Nuclear Center, P.O. Box 245, 456770 Snezhinsk, Russia

Kakshin A.G. E. I. Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russian Federal Nuclear Center, P.O. Box 245, 456770 Snezhinsk, Russia

Loboda E.A. E. I. Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russian Federal Nuclear Center, P.O. Box 245, 456770 Snezhinsk, Russia

Potapov A.V. E. I. Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russian Federal Nuclear Center, P.O. Box 245, 456770 Snezhinsk, Russia

Safronov K.V. E. I. Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russian Federal Nuclear Center, P.O. Box 245, 456770 Snezhinsk, Russia