

## ДИНАМИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ПРИ ИМПЛОЗИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ НА УСТАНОВКЕ С-300

*А.С. Черненко, В.Д. Королев, Г.И. Устроев (ФГУ РНЦ «Курчатовский институт»),  
М.И. Иванов, С.Ю. Александрин (Научный исследовательский институт  
импульсной техники), Ц. Хунчунь (Московский инженерно-физический  
институт (Государственный университет))*

В данной работе исследуется динамика излучения плазмы быстрых  $Z$ -пинчей на установке С-300. С помощью многоканального спектрометра АПХ-10 измерялась временная зависимость спектра сжимающихся многопроволочных лайнеров в диапазоне 50—2000 эВ, где сосредоточены основные радиационные потери. Лайнеры изготавливались из алюминиевых или вольфрамовых проволочек, а также из их комбинаций. Масса лайнеров изменялась от 250 до 560 мкг. Длительность импульса излучения в измерительных каналах уменьшалась с увеличением измеряемой энергии канала от 80—100 нс в канале с энергией 60 эВ до 10—30 нс для энергии 600 эВ. Основная энергия излучения находится в области спектра 60—220 эВ. При этом мощность излучения в области энергии квантов более 500 эВ увеличивается на два порядка в момент максимального сжатия (~ 150—180 нс).

DYNAMICS OF SOFT X-RAY RADIATION SPECTRA OF IMPLODING WIRE ARRAYS ON THE S-300 PULSED POWER GENERATOR. A.S. CHERNENKO, V.D. KOROLEV, G.I. USTROEV, M.I. IVANOV, S.U. ALEKSANDRIN, C. HONGCHUN. The dynamics of radiation spectra of fast  $Z$ -pinch plasmas was studied on the S-300 machine. By means of the polychromator APCH-10, X-ray spectra of imploding wire arrays were measured in the range of 50—2000 eV where the most of the  $Z$ -pinch plasma radiation losses take place. The liners were made of Al or W wires or of their combination. The wire array masses varied from 250 to 560  $\mu\text{g}$ . The emission duration recorded in different spectral channels decreases with the increase of the quanta energies from 80—100 ns for 60 eV to 10—30 ns for 600 eV. The main part of the radiation power falls at the spectral interval 60—220 eV. In the moment of the implosion ~150—180 ns, the radiation power with energy of quanta > 500 eV was increasing up two orders.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование  $Z$ -пинчей на сильноточных ускорителях мегаамперного диапазона вызывает большой интерес как один из вариантов решения проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС) и как источник мощного рентгеновского и нейтронного излучения. В 1997 г. на установке  $Z$  с током более 20 МА проводились эксперименты по обжатию многопроволочных лайнеров. Мощность рентгеновского излучения, полученная при сжатии двойного вольфрамового лайнера, составляла 200 ТВт, а полная энергия 1,8 МДж [1]. Для понимания физики сжатия лайнеров и быстрых  $Z$ -пинчей с временами развития процесса менее  $10^{-7}$  с и определения радиационных потерь плазмы необходима информация о динамике спектра излучения плазмы в процессе имплозии лайнера. Спектральные измерения мягкого рентгеновского излучения во времени являются одной из основных методик измерений параметров высокотемпературной плазмы. Такая методика измерения динамики спектра излучения многопроволочных лайнеров при протекании мегаамперного тока была опробована на установке «Ангара-5-1» [2].

В данной работе описываются эксперименты по генерации и диагностике мощных импульсов рентгеновского излучения плазмы сжимающихся многопроволоч-

ных лайнеров, проведенные на установке С-300 (700 кВ, 4 МА, 70 нс) в РИЦ «Курчатовский институт» [3]. Установка позволяет получать импульсы мягкого рентгеновского излучения тераваттного уровня мощности за счет многокаскадной компрессии электрического импульса и электродинамического сжатия многопроволочных лайнеров. В экспериментах использовались лайнерные сборки из алюминиевых или вольфрамовых проволочек (или из их комбинации) с общим количеством от 24 до 108 штук. Динамические измерения спектров рентгеновского излучения проводились в диапазоне энергий квантов от 60 до 2000 эВ, в котором находятся основные радиационные потери плазмы Z-пинчей. Измерения проводились с помощью рентгенооптического многоканального спектрометра АПХ10, разработанного на основе многослойных интерференционных зеркал (МИЗ) и быстродействующих рентгеновских полупроводниковых детекторов (РППД). Прибор позволял не только проводить спектрально-временной анализ и измерять мощность и энергию излучения плазмы в каждом выделенном диапазоне спектра, но и полную энергию и мощность рентгеновского излучения плазмы сжимающегося лайнера путем интегрирования спектра по энергии и времени.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

**Установка С-300.** Установка С-300 является мощным 8-модульным импульсным генератором, позволяющим развивать на физических нагрузках ток до 4 МА с фронтом нарастания  $\sim 100$  нс и энергией  $\sim 100$  кДж при напряжении 700 кВ. Каждый модуль состоит из генератора импульсного напряжения (ГИН), водяной накопительной емкости — промежуточного накопителя (ПН) как первой ступени обострения импульса, водяной формирующей линии, водяных передающих линий. Энергия с 16 транспортирующих линий через цилиндрический диэлектрик (ускорительную трубку), разделяющий водяной и вакуумный объемы, поступает в общую вакуумную камеру, внутри которой находится концентратор энергии, выполненный на основе линий с магнитной самоизоляцией (рис. 1). ГИН, собранный по схеме Аркадьевой—Маркса находится в объеме трансформаторного масла, имеет 20 ступеней и коммутируется газовыми разрядниками с «искажением поля». ПН служат для быстрой зарядки формирующих линий. Время зарядки формирующих линий 130—150 нс. Коммутация ПН производится четырехкаскадными газовыми разрядниками, одновременное срабатывание которых обеспечивает синхронную работу всех восьми модулей. Формирующая система, состоящая из 8 формирующих линий, собрана в одном баке, заполняемом обезгаженной деионизованной водой. Выходной электрический импульс формируется с помощью водяных коммутаторов, работающих в режиме самопробоя. Электроды самопробойных коммутаторов расположены сверху и снизу плоской формирующей



Рис. 1. Структурная схема установки С-300

ма, состоящая из 8 формирующих линий, собрана в одном баке, заполняемом обезгаженной деионизованной водой. Выходной электрический импульс формируется с помощью водяных коммутаторов, работающих в режиме самопробоя. Электроды самопробойных коммутаторов расположены сверху и снизу плоской формирующей

Формирующая система, состоящая из 8 формирующих линий, собрана в одном баке, заполняемом обезгаженной деионизованной водой. Выходной электрический импульс формируется с помощью водяных коммутаторов, работающих в режиме самопробоя. Электроды самопробойных коммутаторов расположены сверху и снизу плоской формирующей

линии с погонным числом 4 коммутатора на метр. Сформированный импульс по системе 32 водяных транспортирующих линий поступает через высоковольтный изолятор (ускорительную трубку) к вакуумному концентратору энергии. Концентратор энергии представляет собой систему радиально сходящихся плоских линий, работающих в режиме магнитной самоизоляции. Ток от отдельных модулей по линиям с магнитной самоизоляцией подводился к общему дисковому концентратору, в центре которого помещалась нагрузка. Индуктивность концентратора вместе с ускорительной трубкой составляла 7 нГн. Суммарный ток модулей может достигать 4 МА на низкоиндуктивную нагрузку. В описываемых экспериментах ток составляет 2—3 МА с фронтом нарастания тока 100 нс. Напряжение на мишенном узле регистрировалось с помощью омического или индуктивного делителя напряжения. Ток в мишенном узле измерялся путем интегрирования сигналов магнитных петель, включенных параллельно и расположенных на диаметре 10 см вокруг оси лайнера.

В данных экспериментах в качестве нагрузки использовались многопроволочные лайнеры из различных материалов. Лайнеры имели одну и ту же геометрию: диаметр 12 мм, высота 10 мм. Лайнерные сборки состояли из алюминиевых или вольфрамовых проволочек или из их комбинации. Алюминиевые проволочки имели диаметр 18 или 15 мкм, а вольфрамовые 5 или 6 мкм. Количество проволочек в сборках варьировалось: для алюминиевых лайнеров — 48, 60, 80, для вольфрамовых — 48, 80, 108, смешанных алюминиево-вольфрамовых проволочек, которые чередовались через одну, — 12Al+12W, 24Al+24W, 30Al+30W. Соответственно массы сборок были равны для Al — 336, 420 и 500 мкг, для W — 264, 370, 420, 500 мкг, для смешанных — 250, 300, 375 мкг.

**Многоканальный спектрометр АПХ10.** Принцип действия прибора основан на спектральном выделении и регистрации квантов за счет использования в каналах рентгеновских МИЗ, настроенных под определенным углом скольжения  $\alpha$  на заданную длину волны излучения, и быстродействующих полупроводниковых детекторов в сочетании с рентгеновскими краевыми фильтрами. Конструктивно спектрометр представляет собой откачную вакуумную камеру размером  $\varnothing 25 \times 17$  см, в состав которой входят десять измерительных модулей, расположенных по окружности, поворотная каретка со сменными фильтрами и центральный канал с мониторинговым детектором. В измерительный модуль входят редукторный механизм, обеспечивающий синхронный поворот осей зеркала и детектора по схеме  $\alpha - 2\alpha$  в пределах угла  $\alpha = 0 - 45^\circ$ . Поворот осуществляется с помощью червячной пары с нониусом, цена деления которого соответствует  $0,1^\circ$ . Регулировка редукторного механизма по установке углов  $\alpha$  и  $2\alpha$  проводится на градуировочном стенде с точностью не хуже  $\pm 0,05^\circ$ , а юстировка модулей на определенное расстояние до источника излучения (в пределах 0,5—5 м) проводится с помощью малогабаритного лазера, размещаемого на месте детектора.

В спектрометре используются плоские рентгеновские зеркала размером  $7 \times 25$  мм, которые представляют собой многослойную ( $N = 20 - 80$ ) периодическую ( $d = 2 - 20$  нм) структуру, состоящую из чередующихся слоев из материалов с высоким и низким атомным номером [4]. Угол скольжения излучения относительно поверхности зеркала  $\alpha$ , при котором наблюдается максимум отражения, длина волны  $\lambda$  и пе-

риод структуры  $d$  связаны соотношением Брегга:  $2d \sin(\alpha) = m\lambda$  ( $m = 1, 2, \dots$  — порядок дифракции). Материалы слоев и параметры зеркал оптимизированы так, чтобы при  $m = 1$  их коэффициенты отражения достигали максимального значения для своего рабочего диапазона, а их сочетание при минимальном количестве позволяло перекрыть диапазон энергий в пределах от 0,05 до 1,5 кэВ.

Полупроводниковые детекторы выполнены на основе кремниевых чувствительных элементов (ЧЭ) типа СППД11-04, размещенных в малогабаритном корпусе на отрезке тонкого коаксиального кабеля с высокочастотным разъемом [5]. Входное окно ЧЭ диаметром 2,5 или 6 мм представляет собой мелкозалегающий ( $\sim 0,3$  мкм)  $p$ - $n$ -переход, повторяющий профиль квазиглубокого ( $\sim 50$  мкм)  $p$ - $n$ -перехода, с эффективной толщиной «мертвого» слоя менее 0,1 мкм (Si). На входные окна наносится светозащитный слой из различных (в зависимости от энергетического диапазона) контактных материалов (Al, Ag и др.) толщиной 0,1 мкм. Конструкция ЧЭ позволяет создавать большую напряженность поля в полностью обедненном чувствительном слое ( $\sim 5 \cdot 10^4$  В/см), что обеспечивает быстрый сбор заряда и линейность выходных токов свыше 1,5 А на нагрузку 50 Ом при напряжении питания  $\sim 400$  В. Временное разрешение детекторов составляет 1,5 нс для диаметра элементов 2,5 мм и 3 нс для диаметра 6 мм, энергетическая чувствительность в диапазоне 0,05—1,5 кэВ колеблется в пределах  $10^{-3}$ — $10^{-1}$  А·см<sup>2</sup>/Вт.

Калибровка абсолютной чувствительности детекторов проводилась на рентгеновском стенде СС224 в режимах генерации характеристических линий С— $K_\alpha$  (0,28), Fe—L (0,62), Co—L (0,75), Cu—L (0,93) и Al— $K_\alpha$  (1,5 кэВ) с погрешностью не более 12% [5]. Относительный ход спектральных характеристик детекторов в диапазоне энергий 0,05—1,5 кэВ определялся расчетным путем с использованием результатов калибровки и данных работы [6] по формуле  $S(E) = [1 - \exp(-\mu_{Si}d_{Si})] \exp(-\mu_z d_z - \mu_{Si}d_{эф})$ , где  $\mu_{Si}$  и  $\mu_z$  — коэффициенты поглощения кремния и материала контактного покрытия,  $d_{Si}$  и  $d_z$  — толщина чувствительного слоя и покрытия соответственно,  $d_{эф}$  — усредненное по результатам калибровки значение эффективной толщины «мертвого» слоя. Типичные спектральные характеристики кремниевых РППД с эффективной толщиной «мертвого» слоя 0,06 мкм и разными контактными покрытиями входного окна приведены на рис. 2.

Рентгеновские краевые фильтры для диапазона энергий  $E < 1$  кэВ изготавливались на основе металлических сеток прозрачностью 75% с нанесением на их поверхность пленки из различных материалов толщиной 0,2—0,5 мкм с погрешностью контроля не хуже  $\pm 50$  Å. Для диапазона энергий  $E > 0,9$  кэВ использовалась алюминизированная пленка типа «майлар» толщиной 1 мкм. Материал и толщина фильтра для каждого канала спектрометра выбирались из условия, чтобы пропускание излучения в области энергий их К (или L, М)-скачков составляло не менее 10%. Для расчета пропускания фильтров использовались данные работы [7], отдельные образцы фильтров калибровались на рентгеновском стенде. Основные характеристики измерительных каналов АПХ10 приведены в таблице.

Энергетическая чувствительность  $k$ -го канала регистрации спектрометра  $S_{k(E)}$  (А·см<sup>2</sup>·эВ/Вт) определяется из соотношения:  $S_{k(E)} = T(E)R(E)E\partial E s(E)$ , где  $T(E)$  — пропускание фильтра,  $R(E)$  и  $\partial E$  — коэффициент отражения и энергетическое

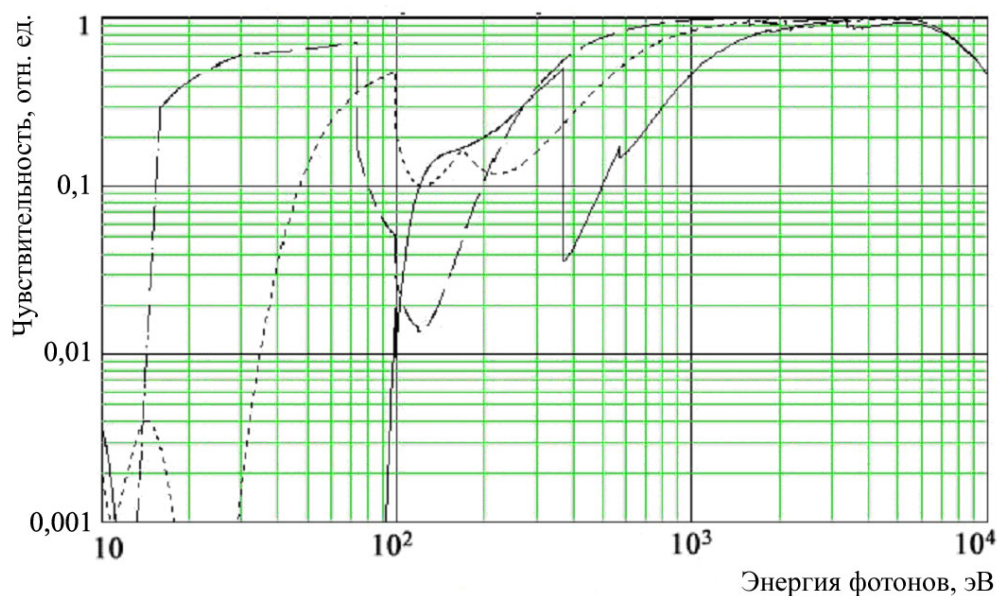


Рис. 2. Спектральные характеристики кремниевых РППД с различными покрытиями входного окна: — · — · — Al (0,1 мкм); - - - - - Y (0,1 мкм); — — — — Ag (0,1 мкм)

разрешение зеркала,  $s(E)$  — чувствительность детектора ( $\text{А} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$ ). При измерении спектра импульсного МРИ значения спектральной плотности потока энергии  $J_{k(E)}$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2 \cdot \text{эВ}$ ) в момент времени  $t$  для каждого канала рассчитываются по формуле  $J_{k(E)} = i_{k(t)} / S_{k(E)}$ , где  $i_{k(t)}$  (А) — амплитуда тока РППД. Для ранжирования чувствительности каналов в области малых энергий квантов, где интенсивность излучения на несколько порядков выше, использовались дополнительные рентгеновские фильтры или сетчатые фильтры с прозрачностью 25 и 50%.

#### Основные характеристики измерительных каналов спектрометра АПХ10

Характеристика	Номер канала					
	1	2	3	4	6, 7	8, 9, 10
Диапазон энергий, эВ	50—70	80—180	180—280	280—400	550—900	900—1500
Фильтр/толщина, мкм	Al/0,3	Zr/0,2	Ag/0,2	Sn/0,2	Cu/0,3	Al/5,0
Прозрачность фильтра, %	30—40	10—30	20—25	25—35	15—50	15—50
Тип зеркала	Mo/Si	Mo/B <sub>4</sub> C	Cr/C	Cr/Sc	W/Si	W/C
Угол скольжения $\alpha$ , град.	40—30	45—20	30—20	30—20	25—15	15—10
Коэффициент отражения, %	30—50	10—30	14—40	12—45	10—20	13—25
Спектральное разрешение, %	20—15	7—10	4—6	3—5	1,5—2	1,5—2

В качестве монитора в спектрометре используется вакуумный рентгеновский диод с алюминиевым ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или золотым катодом диаметром 16 мм, выполненный на основе высокочастотного разъема типа CP50. Временное разрешение детектора не превышает 0,2 нс, максимальный линейный ток при напряжении питания 1000 В составляет величину не менее 1,5 А. Максимальная чувствительность детекторов такого типа соответствует области энергии от 10 до 20 эВ и составляет величину  $\sim (10^{-1}—10^{-2}) \text{А} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$ , с увеличением энергии квантов чувствительность спадает до величины  $\sim (10^{-4}—10^{-5}) \text{А} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$  для энергии  $\sim 2 \text{кэВ}$  [7]. Использование в спектро-

метре монитора в сочетании с различными краевыми фильтрами позволяло с более высоким временным разрешением контролировать форму импульса и интенсивность излучения в разных спектральных диапазонах.

Спектрометр был расположен на установке С-300 и настроен на центр многопроволочной сборки. Прибор устанавливался на расстояниях 2,4 и 3,4 м от оси нагрузки. Схема эксперимента приведена на рис. 3. Регистрация синхронизованных во

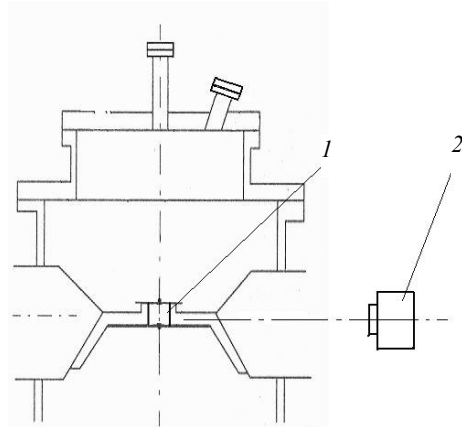


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 — лайнерная сборка; 2 — спектрометр АПХ10

времени сигналов детекторов и выходного тока, текущего через лайнер, осуществлялась с помощью многоканальных цифровых осциллографов типа ТЕК и НР с полосой пропускания не менее 250 МГц, позволяющих проводить компьютерную обработку спектров для любого момента времени импульса излучения. При этом одновременно рассчитывались максимальная мощность ( $P$ ) и полная энергия ( $W$ ) рентгеновского излучения для каждого импульса путем интегрирования спектра по энергии и времени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Типичные осциллограммы импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ), зарегистрированных в каналах спектрометра, и осциллограмма выходного тока для нагрузки из 80 алюминиевых проволочек приведены на рис. 4. Максимумы импульсов излучения во всех каналах совпадают с моментом времени появления высокочастотных колебаний на спаде импульса тока, когда и происходит сжатие лайнера. Для разных типов исследованных нагрузок этот момент соответству-

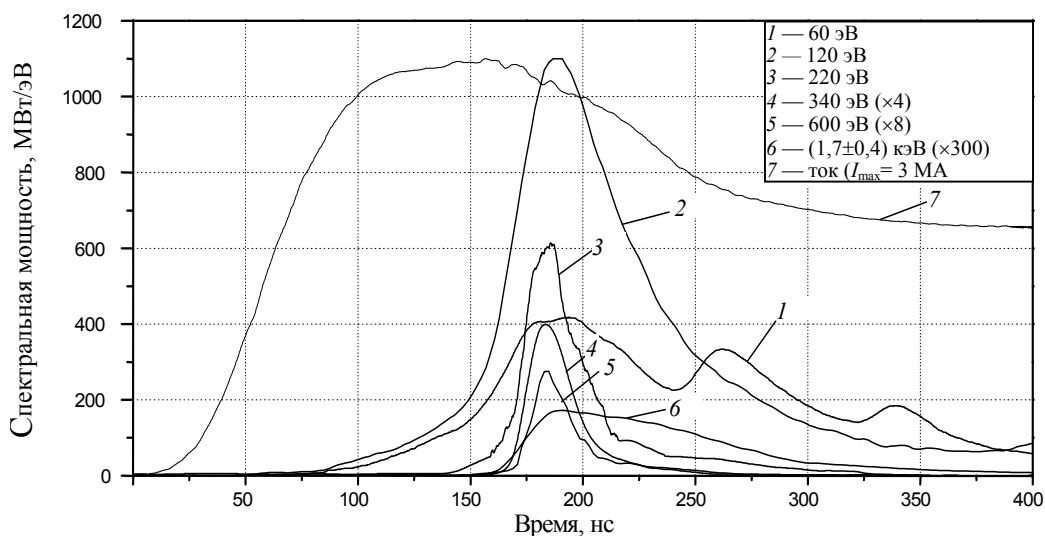


Рис. 4. Осциллограммы тока (7) и импульсов МР-излучения с разных каналов спектрометра АПХ10 (1—6) в эксперименте с нагрузкой из 80 алюминиевых проволочек

ет  $170 \pm 20$  нс от начала импульса тока. Длительность импульсов излучения  $\tau_{0,5}$ , зарегистрированная в разных спектральных каналах, резко уменьшается с увеличением энергии квантов. Для проволочек вольфрама сжатие лайнера более быстрое и излучение более интенсивное. Так, длительность импульсов тока монитора без фильтров, который имеет максимальную чувствительность в области ВУФ-излучения, колеблется в пределах от 180 нс для алюминиевой сборки до 120 нс для вольфрамовой. Длительности импульсов излучения в первом канале (энергия квантов 60 эВ) составляет для разных нагрузок  $120 \pm 20$  нс, затем уменьшается до  $\sim 35$  нс для  $E \approx 150$  эВ и далее практически не изменяется. Максимальная интенсивность излучения приходится на каналы № 2 и 3, что соответствует области энергий квантов 90—120 эВ.

Измеренные для разных моментов времени спектральные распределения рентгеновского излучения, типичный вид которых представлен на рис. 5, наглядно де-

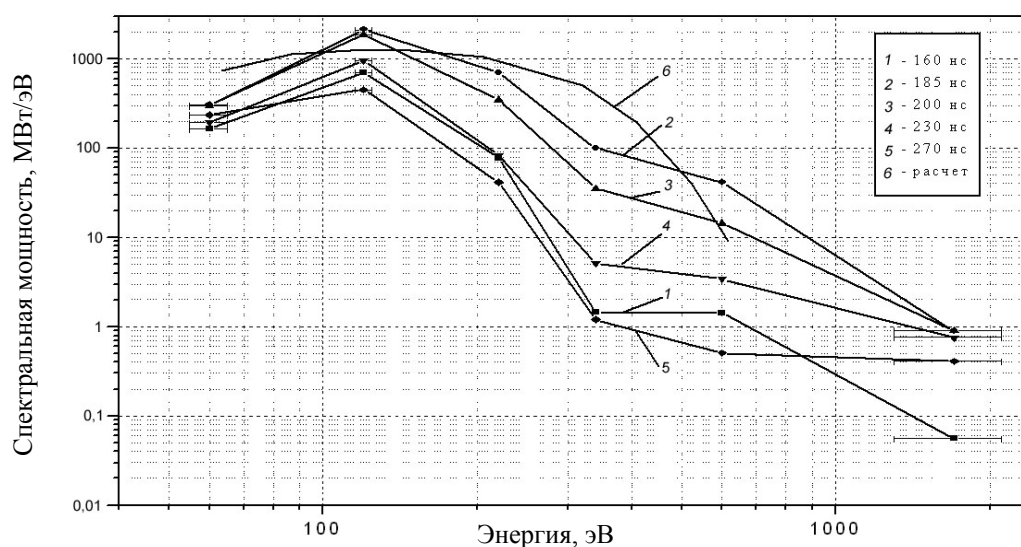


Рис. 5. Энергетические спектры МР-излучения для разных моментов времени, полученные при сжатии лайнера Al-80: 1—5 — экспериментальные кривые; 6 — чернотельное излучение с температурой 50 эВ

монстрируют динамику процесса сжатия лайнера в эксперименте с нагрузкой из 80 алюминиевых проволочек. Как видно из рисунка, в начальной (до 150 нс от начала тока) и конечной (с момента времени 250 нс) стадии сжатия спектр включает практически только мягкую часть, спектральная мощность жесткой части на порядок меньше. Максимум спектра РИ ограничен в диапазоне 60—110 эВ. С момента времени  $\sim 150$  нс жесткая часть резко растет, но мягкая часть увеличивается не значительно. Основная доля излучения приходится на спектральную область 60—220 эВ, а максимум спектра находится в области 120 эВ, что соответствует спектру излучения «черного» тела с температурой около 40 эВ. При этом абсолютные значения спектральной мощности излучения в приближении модели «черного» тела рассчитывались для цилиндрического излучателя диаметром 2 мм при длине 10 мм, что соответствует интегральному по времени изображению плазмы, полученному с помощью камеры-обскуры без фильтра. Картина динамики сжатия лайнера, полученная с помощью щелевой развертки, согласуется с поведением во времени спектров излучения.

На рис. 6 для момента времени, соответствующего максимальным значениям амплитуд импульсов мягкого рентгеновского излучения, зарегистрированных в раз-

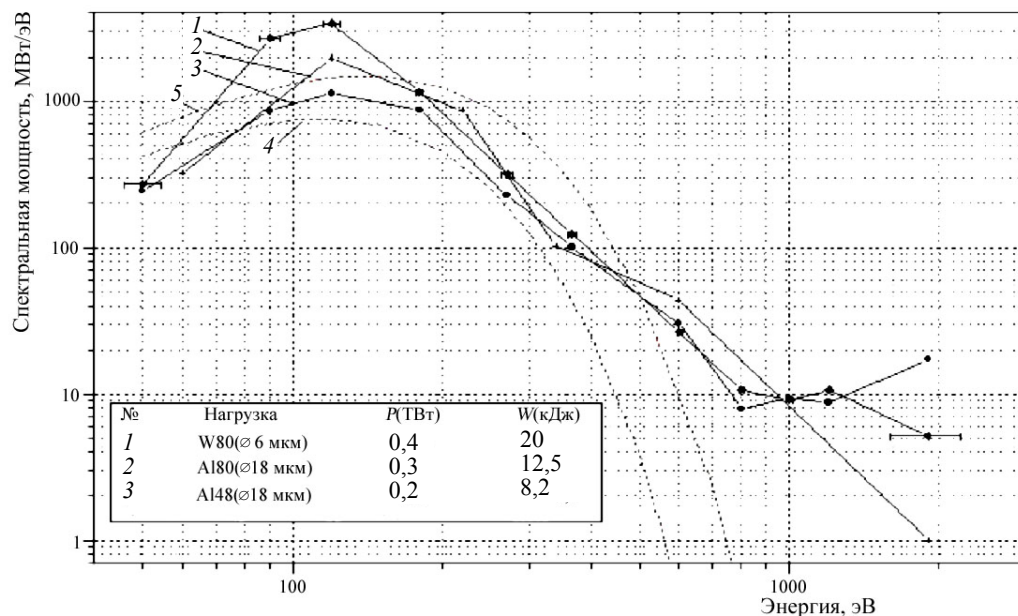


Рис. 6. Энергетические спектры МР-излучения при имплозии различных нагрузок в момент максимальной интенсивности (4, 5 — расчет для  $T_e = 40$  и 50 эВ соответственно)

личных каналах спектрометра, представлены спектральные распределения для разных типов лайнера при токах на нагрузке в пределах от 2 до 3 МА. Максимумы спектров излучения лежат в диапазоне энергий от 120 до 150 эВ, а вид спектров в области энергий до 500 эВ близок к спектру излучения «черного тела» с температурой около 40—50 эВ. Для энергии свыше 0,5 кэВ наблюдается значительное отклонение от расчетного спектра, что можно объяснить появлением горячих точек (ГТ), а также наличием группы характеристических линий в области энергии 1,5—2 кэВ, фиксируемых также с помощью спектрографа, а также вкладом тормозного излучения ускоренных электронов. По оценкам, полная энергия излучения в области характеристических линий К-серии для алюминия в отдельных выстрелах достигает величины до 120 Дж.

По результатам проведенных спектральных измерений были определены максимальная мощность и полная энергия рентгеновского излучения Z-пинча в диапазоне энергий фотонов от 50 эВ до 2 кэВ, максимальные значения которого в данных экспериментах составили соответственно 0,4 ТВт и 20 кДж для вольфрамового лайнера.

Результаты измерений, выполненных с помощью 3-дырочной камеры-обскуры с диаметрами отверстий 50 мкм, 2 из которых экранировались различными фильтрами, показали, что наилучшее сжатие было получено в экспериментах с лайнером из вольфрамовых проволочек. На рис. 7 показаны рентгеновские обскурограммы трех экспериментов с разными нагрузками (все за майларовым фильтром толщиной 12 мкм). Вольфрамовый лайнер состоял из 80 проволочек диаметром 6 мкм, алюминиевый лайнер — из 80 проволочек диаметром 18 мкм, смешанный лайнер — из 30 вольфрамовых (6 мкм) и 30 алюминиевых (18 мкм).



В этом случае зарегистрированы наименьший размер пинча  $\sim 400$  мкм (за майларовым фильтром толщиной 12 мкм с отсечкой по энергии 1,5 кэВ) и более однородное свечение, состоящее из достаточно большого количества ГТ (до 20), равномерно расположенных вдоль оси пинча. Аллюминиевые и комбинированные лайнеры имели более неоднородную структуру. Количество горячих точек было значительно меньше, а их размер больше, и они неоднородно располагались вдоль оси пинча. Количество ГТ с характерным диаметром 1 мм (за фильтром 12 мкм) достигало 5—6. При этом наблюдались выбросы на периферии пинча. В некоторых выстрелах наблюдались отдельные светящиеся выбросы вне сжатого образования.

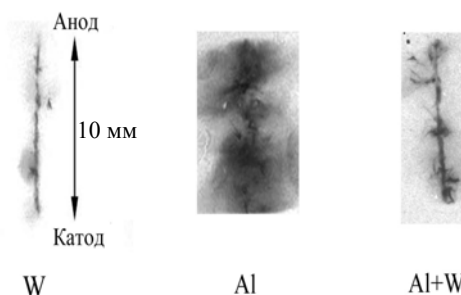


Рис. 7. Рентгеновские обскурোগраммы трех экспериментов с разными нагрузками (все за майларовым фильтром толщиной 12 мкм). Вольфрамовый лайнер состоял из 80 проволочек диаметром 6 мкм, аллюминиевый лайнер состоял из 80 проволочек диаметром 18 мкм, смешанный лайнер состоял из 30 вольфрамовых (6 мкм) и 30 аллюминиевых (18 мкм)

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использование полихроматора позволяет детально исследовать временные характеристики спектра источников мягкого рентгеновского излучения и определить такие важные характеристики, как спектральная мощность и энергия в каждом выделенном диапазоне спектра, а также интегральные во времени полную мощность и энергию. Эксперименты по излучению многопроволочных лайнеров показали, что спектр излучения в момент максимального сжатия приблизительно описывается законом Планка для излучения черного тела с температурой 40—50 эВ. Для более жесткой части спектра энергией свыше 0,5 кэВ наблюдается значительное отклонение от планковского спектра. При этом энергия излучения в области энергии квантов более 500 эВ увеличивается на два порядка в момент максимального сжатия. Что можно объяснить появлением на оси лайнера областей плазмы размером  $\sim 1$  мм с более высокой температурой — горячих точек, что приводит к появлению характеристических линий в области энергии 1,5—2 кэВ, получаемых с помощью спектрографа, и возможным вкладом тормозного излучения ускоренных электронов [8]. Наилучший результат по степени сжатия и по генерации рентгеновского излучения был получен на сборках из 80 шестимикронных вольфрамовых проволочек. Мощность излучения  $W \sim 0,4$  ТВт, минимальный диаметр  $\sim 0,2$ —0,4 мм, длительность излучения в спектральном максимуме  $h\nu \sim 220$  эВ составляла 24 нс. В полтора-два раза уменьшается полная мощность излучения в экспериментах с 80 аллюминиевыми проволочками диаметром 18 мкм —  $W \sim 0,2$  ТВт. Но при этом возрастает длительность излучения в спектральном максимуме до  $\Delta t \sim 54$  нс, сдвигается спектральный максимум ( $h\nu \sim 120$  эВ) и сжатие осуществляется только до диаметра  $d \sim 1$  мм. Сама форма аллюминиевой плазмы в сжатом состоянии не шнурообразная, как в случае вольфрамовой сборки, а совершенно нерегулярная с характерным поперечным размером 1—3 мм (см. рис. 7).

Авторы выражают благодарность С.Л. Недосееву и С.Ф. Медовщикову за помощь в изготовлении многопроволочных лайнеров.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 02-02-16840.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Spielman R.B., Deeney C., Chandler G.A. et al.** — Phys. Plasmas, 1998, vol. 5, p. 2105.
2. **Ахсахалиян А.Д., Бобашев С.В., Волков Г.С., Голубев А.В., Зайцев В.И., Забродин И.Г., Краснов А.К., Онейник Г.М., Шамаенок Л.А.** Измерения спектра излучения плазмы с помощью многослойных рентгеновских зеркал. — Физика плазмы, 1992, т. 18, вып. 4, с. 509.
3. **Chernenko A.S., Gorbulin Yu.M., Kalinin Yu.G. et al.** S-300, New Pulsed Power Installation in Kurchatov Institute. Investigation of Stable Liner Implosion. — Presented at 11th Intern. Conf. on High Power Particle Beams. Prague, Czech Republic, 1996, p. 154—157.
4. **Гапонов С.В., Гусев С.А., Платонов Ю.Я., Салашеко Н.Н.** Искусственные многослойные отражающие и селективные элементы для мягкого рентгеновского излучения. — ЖТФ, 1984, т. 54, № 4, с. 755.
5. **Средства диагностики** однократного импульсного излучения. Под ред. А.И. Веретенникова и К.Н. Даниленко. — В кн.: Сборник трудов НИИИТ. — М.: ИздАТ, 1999.
6. **Henke V.L., Lee P. et al.** — Atomic Data and Nuclear Data Tables 27, 1982, p. 1—144.
7. **Young F.C., Stephanakis S.J., Scherrer V.E.** Filtered X-ray diodes for imploding plasma experiments. — Rev. Sci. Instrum., 1986, vol. 57, p. 2174.
8. **Vikhrev V.V., Baronova E.O.** — Proc. of BEAM's 98, Haifa, Israel, 1998, vol. 2, p. 666.

Статья поступила в редакцию 23 марта 2004 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 2, с. 25—34.