

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9.082

Исследование импульсного рентгеновского излучения плазменного фокуса в широком энергетическом диапазоне

А. С. Савелов, Г. Х. Салахутдинов, М. В. Колтунов, Б. Д. Лемешко,
Д. И. Юрков, П. П. Сидоров

Приведены результаты экспериментальных исследований спектрального состава импульсного рентгеновского излучения плазменного фокуса в диапазоне энергий квантов $1,5 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 400 \text{ кэВ}$. В спектре излучения выделены три участка, в пределах каждого из которых спектр излучения носит квазипепловой характер с соответствующей эффективной температурой.

PACS: 52.38.Ph

Ключевые слова: рентгеновское излучение, плазменный фокус, плазма, метод серых фильтров, сцинтилляционный спектрометр.

Введение

Рентгеновская диагностика плазменных объектов является одним из основных методов получения информации о параметрах излучающей плазмы и протекающих в ней процессах в экспериментах по исследованию плазмы на различных плазмогенерирующих установках [1, 2].

Измерение спектров импульсного рентгеновского излучения плазмы имеет ряд сложностей, связанных с тем, что при импульсе излучения малой длительности (от единиц до сотен наносекунд) возникает большое число квантов рентгеновского ($\approx 10^{16}$) и нейтронного ($\approx 10^7$) излучений сопровождаемое сильной электромагнитной наводкой. При таких условиях эксперимента раздельная регистрация частиц, а следовательно, и их раздельная спектрометрия становятся невозможны. Как правило, применяют различные многоканальные

спектрометрические системы с предварительным разделением квантов по энергиям с помощью фильтров Росса или рентгеновских фильтров поглощения (метод "серых" фильтров) [1].

В данной работе приведены результаты исследования спектров импульсного рентгеновского излучения плазмы, образующейся на установке "Плазменный фокус" (ПФ) [3] в широком диапазоне энергий регистрируемых квантов $1,5 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 400 \text{ кэВ}$ и сделана попытка связать результаты измерений с параметрами излучаемого физического объекта.

Экспериментальная методика и результаты

Исследования плазмы на ПФ проводятся во многих крупных лабораториях мира [4, 5], однако физическая картина явлений в плазме ПФ далека еще от полного понимания и является предметом интенсивных исследований. Общая схема эксперимента и камеры плазменного фокуса представлены на рис. 1. Используемая в работе камера является камерой ПФ с эллиптическими электродами мейзеровского типа и рассчитана на работу с разрядным током до 360 кА. Энергозапас конденсаторной батареи порядка 3 кДж. Разрядная камера снабжена разборным диагностическим окном и сконструирована таким образом, что во время измерений в "поле зрения" диагностических устройств оказывается вся область пинчевания плазменной оболочки. Диагностическое окно закрыто алюминиевой пластиной толщиной 200 мкм.

Савелов Александр Сергеевич, профессор.
Салахутдинов Гаяр Харисович, доцент.
Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ".
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.
Тел.: 8 (495) 344-14-99. E-mail: saip07@mail.ru
Колтунов Михаил Васильевич, младший научный сотрудник.
Лемешко Борис Дмитриевич, ведущий научный сотрудник.
Юрков Дмитрий Игоревич, зам. начальника отдела.
Сидоров Павел Павлович, начальник группы.
ФГУП "ВНИИ автоматики им. Н. Л. Духова".
Россия, 101000, Москва, а/я 918.
Тел.: 8 (495) 972-83-78. E-mail: vniiia@vniiia.ru

Статья поступила в редакцию 26 января 2010 г.

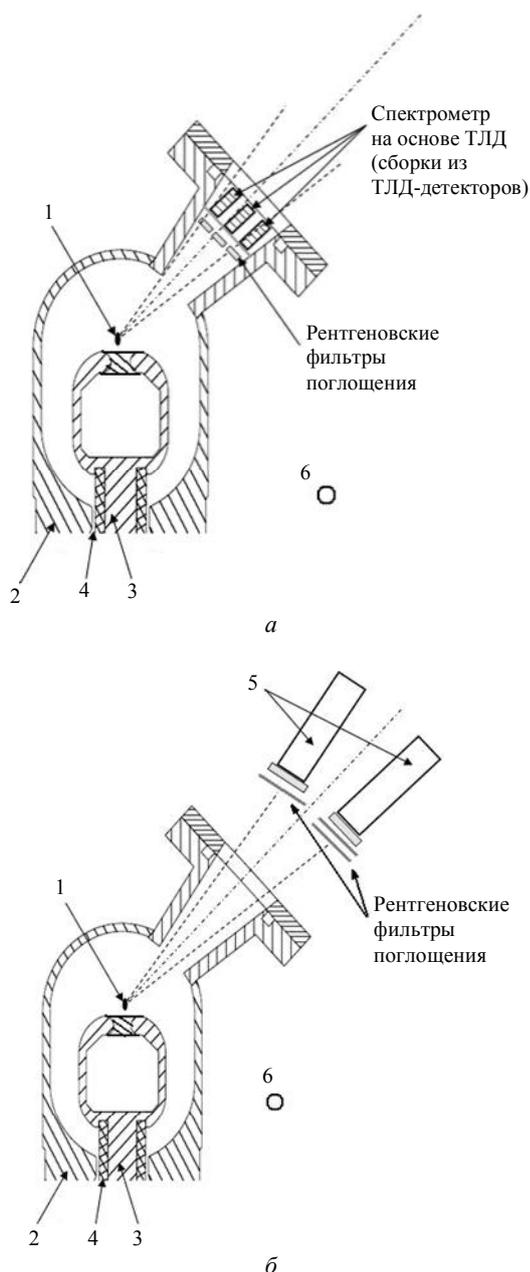


Рис. 1. Схема эксперимента:

а — со спектрометром на основе ТЛД; б — на основе сцинтилляционного спектрометра:
 1 — область ПФ; 2 — катод камеры ПФ; 3 — анод камеры ПФ со вставкой из вольфрама; 4 — изолятор; 5 — сцинтилляционные детекторы; 6 — сигнал пояса Роговского

В ходе эксперимента камера наполнялась аргонном (давление ≈ 2 Торр), дейтерием (давление 10 Торр) или смесью этих газов.

При генерации плазмы в разрядной камере ПФ, заполненной дейтерием, наряду с рентгеновским излучением возникает интенсивное нейтронное излучение ($\approx 10^7 - 10^9$) [3].

При проведении исследований параметров плазмы была использована комплексная диагностика, включающая:

- спектрометр на основе термолуминесцентных детекторов;

- многоканальные сцинтилляционные спектрометры рентгеновского излучения;

- систему измерения выхода нейтронов на основе регистрации β -распадов атомов серебра в результате активизации нейтронами;

- временные сцинтилляционные детекторы, работающие совместно с токовой диагностикой установки (пояс Роговского).

В качестве регистратора сигналов со сцинтилляционных детекторов и пояса Роговского служил многоканальный осциллограф.

Для исследования спектрального состава импульсов рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов 1,5—25 кэВ использовались термолуминесцентные детекторы (ТЛД) на основе LiF, представляющие собой набор калиброванных детекторов, каждый диаметром 5 и толщиной 1 мм.

Для регистрации рентгеновского излучения плазмы собирались сборки из пяти детекторов ТЛД, расположенных один за другим, было собрано семьборок. Сборки крепились в камере за фильтрами поглощения (см. рис. 1, а) из различного материала (Be, Al, Cu) и толщиной от 6 мкм (Al) до 350 мкм (Cu).

В ходе измерения спектра рентгеновского излучения использовались различные методы регистрации рентгеновского излучения в течение одного разряда. Использовались метод "серых" фильтров (сигналы с семиборок за фильтрами различной толщины), метод поглощенной энергии (анализ сигналов детекторов ТЛД одной сборки), метод фильтров Росса (анализ сигналов соборок, расположенных за фильтрами из различных материалов). Данные измерения позволяли получить спектры рентгеновского излучения в области 1,5—25 кэВ для различных наполнителей камеры установки ПФ.

Для измерения спектрального состава жесткой составляющей рентгеновского излучения (20—500 кэВ) был использован помехоустойчивый многоканальный сцинтилляционный спектрометр на основе миниатюрных ФЭУ-60 (см. рис. 1, б).

Каналы были построены по схеме: диафрагма + фильтр поглощения + сцинтилляционный детектор + ФЭУ. Сцинтилляционные кристаллические детекторы имеют диаметр 15 и высоту 20 мм. Порог регистрации в каждом канале составляет 30 кэВ для кристаллов CsI(Tl). Динамический диапазон семиканального спектрометра достигает 10^4 . Для расширения динамического диапазона между сцинтиллятором и ФЭУ могут быть установлены корректирующие оптические фильтры.

В зависимости от экспериментальной задачи кристаллы CsI(Tl) можно заменять на кристаллы NaI(Tl) и $Bi_4Ge_3O_{12}$ в детектирующей части прибора

(для увеличения чувствительности или эффективности регистрации спектрометра при соответствующей замене кристалла). Конструкция спектрометра на основе ФЭУ-60 позволяет использовать каждый его канал в качестве самостоятельного сцинтилляционного спектрометра энергий квантов на диапазон > 30 кэВ.

Абсолютная калибровка каждого канала обоих спектрометров проводилась на стенде, в котором использовались импульсная рентгеновская трубка с набором флюоресцентных эмиттеров и комплект радиоизотопных источников рентгеновского излучения [6].

Восстановление спектров рентгеновского излучения по результатам измеренной в эксперименте кривой ослабления проводилось методом эффективных энергий [7, 8] с последующим моделированием методом Монте-Карло. Наличие в каждом спектрометре по одному идентичному каналу позволило проводить совместную обработку результатов измерений, сделанных на двух спектрометрах.

Подробно исследования спектра в жесткой части проводилось также с использованием трехканального сцинтилляционного спектрометра на основе кристаллов NaI(Tl), CsI(Tl) и $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ с ФЭУ-85.

На основе проведенных измерений были получены спектры импульсного рентгеновского излучения плазмы.

На рис. 2 показан типичный спектр импульсного рентгеновского излучения плазмы камеры ПФ при наполнении ее дейтерием до давления в камере 12 Торр и при заполнении аргоном. Вид спектров свидетельствует о наличии двух "максвеллизированных" компонент в электронной составляющей излучающей плазмы, которые условно назовем низко- (d) и высокотемпературными (up). Температуры $T_d^D \approx 2$ кэВ, $T_{up}^D \approx 7$ кэВ, $T_d^{Ar} \approx 2$ кэВ,

$T_{up}^{Ar} \approx 7$ кэВ оказались близкими. Вероятнее всего несмотря на различные возможности потери энергии ионами Ar и D в пинчующейся плазме за счет линейчатого рентгеновского излучения, динамика плазмы тем не менее не претерпевает существенных изменений, например, из-за развития значительного аномального тепловыделения, превышающего кулоновский джоулев нагрев при сравнительно неглубоком сжатии плазмы.

В ходе экспериментов по исследованию спектров импульсного рентгеновского излучения был подтвержден пороговый характер спектра рентгеновского излучения плазмы от тока разряда при определенном давлении газа в камере. При токах < 50 кА не было зарегистрировано излучения более жесткого, чем $h\nu = 12$ кэВ. При токах более

чем 60 кА, когда было пинчевание плазмы, регистрировалось излучение в интервале энергий квантов вплоть до $h\nu = 400$ кэВ, причем дальнейшее возрастание разрядного тока не приводило к заметному изменению вида спектра (изменялась интенсивность излучения). Установлены оптимальные сочетания давления газа и разрядного тока, при которых интенсивность спектра оптимальна.

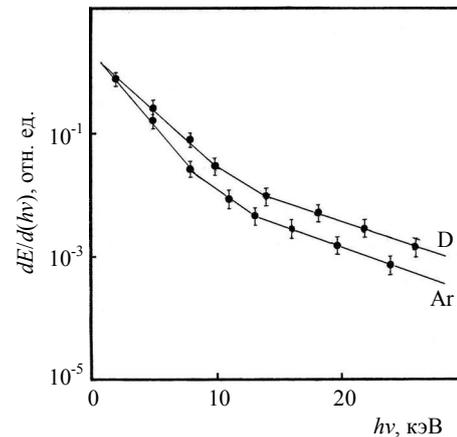


Рис. 2. Типичные спектры излучения плазмы ПФ в диапазоне $1,5 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 25 \text{ кэВ}$, полученные с помощью спектрометра на основе ТЛД

В спектре рентгеновского излучения плазмы ПФ в области энергий $1,5 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 400 \text{ кэВ}$ по результатам измерений можно выделить три участка, в каждом из них спектр тормозного излучения носит квазитепловой характер с соответствующей температурой (рис. 3). В диапазонах энергий квантов $1,5 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 20 \text{ кэВ}$, $T_e \approx (2,0 \pm 0,5) \text{ кэВ}$ и $20 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 100 \text{ кэВ}$ — $T_e \approx (8 \pm 2) \text{ кэВ}$ спектр излучения обладает высокой степенью повторяемости; в диапазоне $100 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 400 \text{ кэВ}$ эффективная температура меняется случайным образом от разряда к разряду в широком интервале $T_e \approx 30\text{--}80 \text{ кэВ}$.

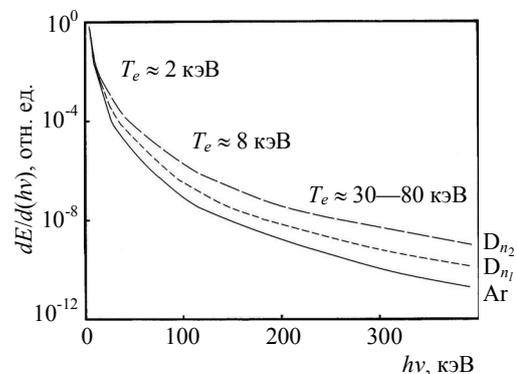


Рис. 3. Типичные спектры излучения плазмы ПФ в диапазоне $1,5 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 400 \text{ кэВ}$, полученные в различных сериях измерений для камеры, заполненной аргоном Ar или дейтерием D (при различном выходе нейтронного излучения $n_1 = 10^6$, $n_2 = 10^7$)

Плазма, образованная в разрядной камере, заполненной Ag, обладает достаточно устойчивой картиной спектра рентгеновского излучения в отличие от плазмы, образованной в дейтерии. Вид спектра рентгеновского излучения в случае с последним зависит от выхода нейтронного излучения: чем выше абсолютный выход нейтронного излучения, тем выше электронная температура различных участков спектра рентгеновского излучения (см. рис. 3).

Проведенные временные измерения импульсного рентгеновского излучения по методике, описанной в работе [9], позволяют сделать предположение, что область с $T_e \approx 1,5\text{—}3$ кэВ соответствует фазе максимального сжатия; область с $T_e \approx 7\text{—}10$ кэВ — фазе аномального нагрева плазмы (момент начала развала плазменного объекта); область с $T_e = 30\text{—}80$ кэВ — фазе генерации и развития ускорительных процессов (конечный момент развала).

Обсуждение результатов

Полученные результаты в диапазоне 1,5—100 кэВ зарегистрированного спектра импульсного рентгеновского излучения плазмы ПФ не противоречат с тем, что предсказывает теоретическая модель для сильноизлучающей плазмы [3, 10]. Объяснимы с точки зрения модели и те экспериментально обнаруженные факты, что, во-первых, переход к режиму образования пинчевания не вызывает качественного изменения спектра рентгеновского излучения разряда и, во-вторых, характер спектра рентгеновского излучения плазмы ПФ практически оказался слабозависящим от элементного состава плазмы в регистрируемом диапазоне.

В рамках существующих моделей трудно указать конкретный механизм образования ускоренных электронов в диапазоне $100 \text{ кэВ} < h\nu < 400 \text{ кэВ}$. Наиболее вероятно, что появление этого участка спектра связано с развитием ускорительных и турбулентных процессов. Набор возможных механизмов рождения надтепловых частиц в Z-пинчевом разряде весьма обширен [10, 11]. В данных работах отмечено, что генерация жесткого рентгеновского

излучения коррелирует с распадом пинча в финальной фазе сжатия пинча и обусловлена эмиссией тормозного излучения быстрыми электронами.

Непостоянство спектра рентгеновского излучения в данной области вероятнее всего зависит от ряда факторов, складывающихся случайным образом:

- конфигурации разряда;
- плотности плазмы, окружающей область пинчевания;
- степени сжатия плазменного шнура (столба).

Проведенные измерения энергопотери на импульсное рентгеновское излучение в диапазоне 1,5—400 кэВ составляют порядка 0,7 % от вкладываемой в разряд энергии.

Заключение

Экспериментальные исследования спектрального состава импульсного рентгеновского излучения плазменного фокуса позволили выделить три участка, в пределах каждого из которых спектр излучения носит квазитепловой характер с соответствующей эффективной температурой.

Литература

1. Долгов А. Н., Кириченко Н. Н., Ляпидевский В. К. и др. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. С. 97.
2. Александров В. В., Грабовский Е. В., Грибов А. Н. и др. // Там же. 2009. Т. 35. № 2. С. 161.
3. Боголюбов Е. П., Иванов Ю. П., Лемешко Б. Д. Импульсные нейтронные генераторы ВНИИА на основе камер плазменного фокуса // Сб. матер. Междунар. науч.-техн. конф. "Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе". — М., 2004. С. 95—98.
4. Dubrovsky A. V., Gribkov V. A. Ivanov Y. P. et al. // Nukleonika. 2006. No. 51(1). P. 21.
5. Бурцев В. А., Грибков В. А., Филиппова Т. И. Высокотемпературные пинчевые образования // Итоги науки и техники. Физика плазмы. — М.: ВИНТИ. 1981. Т. 2. С. 80.
6. Аверкиев В. В., Ляпидевский В. К., Салахутдинов Г. Х. // ПТЭ. 1990. № 4. С. 80.
7. Долгов А. Н., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х.; Препринт № 006-2007. — М.: МИФИ, 2007.
8. Ляпидевский В. К., Салахутдинов Г. Х., Самойлова Л. Б.; Препринт № 004-90. — М.: МИФИ, 1990.
9. Аверкиев В. В., Долгов А. М., Ляпидевский В. К. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 724.
10. Вихрев В. В. // Там же. 1977. Т. 3. С. 981.
11. Долгов А. Н., Вихрев В. В. // Там же. 2005. Т. 31. С. 290.

Dense plasma focus wide energy range pulsed X-ray radiation investigation

A. S. Savelov, G. Kh. Salakhutdinov

Moscow Engineering Physics Institute, 31 Kashirskoye highway, Moscow, 115409, Russia

E-mail: saip07@mail.ru

M. V. Koltunov, B. D. Lemeshko, D. I. Yurkov, P. P. Sidorov

All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA), a/c 918, Moscow, 101000, Russia

E-mail: vnii@vniia.ru

Results of experimental investigations of the spectrum of the X-ray radiation from the plasma focus in the energy range of 1.5—400 keV are presented. It is shown that there are three regions in the spectra with three quasi-thermal distributions and their own temperatures within the regions.

PACS: 52.38.Ph

Keywords: X-ray radiation, plasma focus, plasma, method of grey filters, scintillation spectrometer.

Bibliography — 11 references.

Received 26 January 2010