

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ УСТАНОВОК ППЧ ИЗМЕННЫЙ ФОКУС

М.Г. Белков*, П.А. Беляев*, И.В. Волобуев, Е. Воловский**, В.А. Грибков,
С. Денус**, А.В. Дубровский, В.М. Зайцев*, Ю.Ф. Игонин*, А.И. Исаков,
Н.В. Калачев, Т.А. Козлова, Е.Д. Короп*, О.Н. Крохин, С.Г. Кузнецов*,
В.Я. Никулин, С. Следзиньский**, С. Чекай**

Приведены результаты исследования мягкого рентгеновского излучения (МРИ) на четырех установках плазменный фокус с энергозапасом батарей от 20 до 250 кДж. Получена зависимость полного выхода МРИ от энергозапаса батареи и содержания примесей к дейтерию. Приводится распределение по оси пинча электронной температуры плазмы.

В настоящей работе исследовалось мягкое рентгеновское излучение (МРИ) на установках плазменный фокус (ПФ) мейзеровской и филипповской геометрии при энергозапасе конденсаторных батарей от 20 до 250 кДж. Исследования проводились методом многодырочных камер-обскур с разрешением во времени до 10 нс и интегрально, а также с применением быстрых (3 нс) сильноточных фотоумножителей с тонким (до 10 мкм) сцинтиллятором и полупроводниковых детекторов с временным разрешением 1 нс для регистрации временного хода МРИ.

Определена зависимость выхода МРИ в полный телесный угол от энергозапаса установок и содержания примесей в рабочем газе. Методом фильтров получено распределение электронной температуры плазмы по высоте пинча для различных установок.

В табл. 1 указаны характеристики четырех установок ПФ, на которых авторами проводились измерения. Диапазон регистрируемых квантов везде был одинаков, определялся фильтрами и составлял от 1,5 до 15 кэВ. Типичные обскурограммы, полученные на установке ПФ-30, приведены на рис. 1а (чистый дейтерий) и 1б (дейтерий с примесями).

Характеристики установок плазменный фокус

Таблица 1

Установка	Рабочее напряжение, кВ	Энергозапас, кДж	Геометрия	Рабочее давление дейтерия, торр	Нейтронный выход (средний)	Выход МРИ в 4π, Дж	Объем излучающей области, см
ПФ-30 /1/	20	20	Мейзер	0,5-7	$5 \cdot 10^8$	0,1-0,4	0,1-0,5
ФЛОРА /2/	25	35	Филиппов	0,3-2	10^9	0,5-1*	0,2-0,6
ПФ-150 /3/	30	50	Мейзер	3-11	$3 \cdot 10^9$	1-5	0,3-0,9
ПЛАМЯ /4/	30	250	Мейзер	1-10	$7 \cdot 10^{10}$	100-1000	5-9

* При лазерном воздействии 600 Дж.

* ОКБ "Горизонт", Москва.

** Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза им. С.Калиского, Варшава, ПНР.

В таблице первая цифра показывает выход МРИ на чистом дейтерии, вторая — с добавкой аргона от 1 до 5% по объему, либо при работе ПФ в начальных разрядах, когда камера не была хорошо оттренирована. Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод о том, что абсолютный выход МРИ в полный телесный угол пропорционален энергии батареи в третьей степени.

Измерения временного хода МРИ на установках ПФ показали, что длительность импульса МРИ превышает длительность нейтронного и жесткого рентгеновского излучений. На установке ФЛОРА наблюдаются импульсы МРИ длительностью 300–400 нс, имеющие два и более максимумов. Выполненные одновременно пятикадровые интерферограммы ПФ показывают, что генерация МРИ начинается примерно за $40 \div 70$ нс до сжатия токовой оболочки. На установке ПФ-150 установлено, что МРИ генерируется (в случае сплошного анода) в виде двух импульсов длительностью около 60 нс, разделенных интервалом 60 нс, после которых через 60 нс начинается свечение паров анодного материала продолжительностью около 250 нс. Сравнение литературных данных по длительности импульса МРИ на различных установках ПФ показывает, что эта длительность изменяется от 40 до 300 нс, практически не зависит от энергетики ПФ, а определяется режимом работы установки, примесями и геометрией электродов.

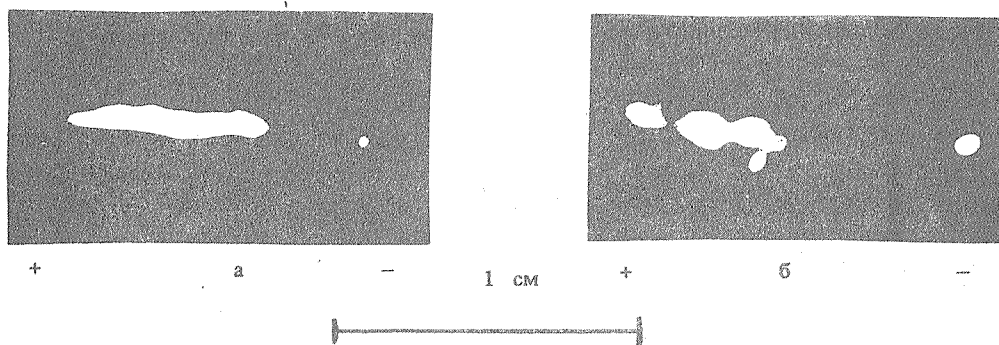


Рис. 1. Обскурограммы плазменного фокуса, полученные на установке ПФ-30, через отверстие ϕ 200 мкм, закрытое бериллием толщиной 100 мкм в случаях: а) чистый дейтерий, б) дейтерий с примесью аргона.

На данных установках ПФ проводились измерения распределения электронной температуры по оси Z методом фильтров с помощью многодырочных камер-обскур. Использовались фильтры из бериллия (от 25 мкм) и алюминия (от 6 мкм), для которых с помощью ЭВМ были построены номограммы, учитывающие реальную чувствительность рентгеновской пленки. Обработка обскурограмм ПФ, полученных в МРИ, показала, что плазменное образование состоит из так называемых "горячих точек" и "диффузных областей". Плазма в "горячих точках" имеет электронную температуру T_e от 0,7 до 1,8 кэВ и размеры от 0,1 до 1 мм в диаметре в зависимости от давления дейтерия и количества примесей, тогда как "диффузные области" имеют T_e от 150 до 300 эВ и размеры от 0,3 до 1,5 см в диаметре. Зависимости T_e от энергетики установки не установлено.

Таким образом, экспериментально установлено:

- 1) абсолютный выход МРИ в диапазоне 1,5 \div 15 кэВ пропорционален энергии батареи E в третьей степени;
- 2) объем излучающей плазмы растет пропорционально первой степени E;
- 3) диаметр пинча растет примерно пропорционально току ПФ, т.е. $\propto E^{1/2}$;
- 4) температура плазмы практически не зависит от E.

Из вышесказанного с учетом соотношения Беннета $NkT = N^2/8\pi \sim (J/R)^2$ следует, что плотность в пинче ПФ не зависит от E (что также подтверждается рядом экспериментальных работ по интерферометрии ПФ).

Учитывая, что $E_{\text{МРИ}} \propto N_e N_+ T_e^{\alpha} Z^{\beta} V_p \tau$, (где V_p — объем излучающей плазмы; τ — время ее жизни; Z — заряд ионов; $\beta = 2$ для тормозного, $\beta = 4$ для рекомбинационного, $\beta = 6$ для линейчатого МРИ; N_+ , N_e — плотность ионов и электронов), можно сделать вывод, что удельный выход МРИ (количество энергии, излучаемой единицей объема)

$$E_{\text{МРИ}}/V_p \propto Z^{\beta} \tau \propto E^2.$$

Если время жизни τ не зависит от энергетики ПФ, это означает, что с ростом E растет число примесей в ПФ, обуславливающих рост $E_{\text{МРИ}}$. Если же предположить, что с ростом E растет τ (в данном случае $\propto E^2$), о чем высказано предположение в работе /6/, то это означает, что при $Z = \text{const}$ будет увеличиваться термоядерный параметр $n\tau$.

Все вышесказанное относится к основной части пинчевой плазмы (не к "горячим точкам"). Отсюда следует вывод о том, что КПД преобразования запасенной в источнике питания энергии в МРИ для исследованных установок ПФ растет с ростом энергии батареи линейно и достигает в лучшем случае (установка "ПЛАМЯ") $\cong 0,4\%$. Резкого увеличения КПД можно достигнуть воздействием мощного лазерного излучения на анод ПФ за 150–200 нс до максимального сжатия /5/. Быстрый впрыск горячей лазерной плазмы с большим эффективным зарядом внутрь сжатого пинча увеличивает в нашем случае КПД до 2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волобуев И. В., Гранаткин Б. В., Исаков А. И. Труды ФИАН, 127, 89 (1980).
2. Грибков В. А. и др. Труды ФИАН, 127, 32 (1980).
3. Kaliski S. et al. J. Tech. Phys., 16, 387 (1975).
4. Bashilov V. A. et al. Proc. IV Intern. Workshop on Plasma Focus and Z-pinch Research, Warsaw, 1986, p. 55.
5. Грибков В. А. и др. Физика плазмы, 11, 117 (1985).
6. Herold H., Haud A. Proc. III Intern. Workshop on Plasma Focus Res., p. 131, 1983, Stuttgart, FRG, IPF-83-6.

Поступила в редакцию 28 апреля 1987 г.