

ПОЛУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ КВАНТОВ БОЛЕЕ 1 КИЛОЭЛЕКТРОНВОЛЬТ ПРИ ТОКОВОЙ ИМПЛОЗИИ АЛЮМИНИЕВЫХ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ

Н. Г. Данченко, М. Д. Барышников, Е. Г. Данченко, М. Ш. Ибрагимов, С. Ю. Корнилов, И. М. Маркевцев, А. С. Миронов, А. П. Орлов, В. П. Отмахов, В. С. Покровский, Д. С. Покровский, П. Б. Репин, Б. Г. Репин, А. Г. Репьев, Р. В. Савченко, А. В. Шанин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В настоящее время Z-пинчи рассматриваются как один из перспективных способов реализации инерциального термоядерного синтеза и самого мощного лабораторного рентгеновского источника для проведения исследований в области физики высоких плотностей энергии [1]. За последние 15 лет произошёл значительный прогресс в создании плазменных источников излучения с большим временем имплозии, позволяющих генерировать излучение с энергией квантов 1 кэВ и выше. К 2001 году КПД плазменных источников K-излучения, работающих при больших (200-300 нс) временах имплозии, достиг величины 50 %–70 % по отношению к источникам K-излучения, созданным на 100-наносекундных генераторах. В настоящее время наиболее широко применяются плазменные источники K-излучения с использованием цилиндрических многопроволочных и газоструйных лайнерных нагрузок [2].

Одним из перспективных источников K-излучения являются многопроволочные лайнеры планарной конструкции. Такая конфигурация нагрузки была введена относительно недавно [3].

На установке ГИТ-12 [4] при микросекундном времени имплозии максимальный выход излучения с K-оболочки алюминия в 1,5 раза превысил результаты, полученные ранее в экспериментах по имплозии микросекундных цилиндрических Z-пинчей [5, 6]. В связи с этим возникает вопрос о механизмах нагрева плазмы в дополнение к кинетическому нагреву при генерации излучения с K-оболочки при имплозии нагрузки с избыточной (по сравнению с оптимальным лайнером для данного генератора) массой. Авторы работы [4] рассматривают эти результаты как доказательство того, что не кинетический, а другие дополнительные механизмы нагрева плазмы доминируют в планарных Z-пинчах.

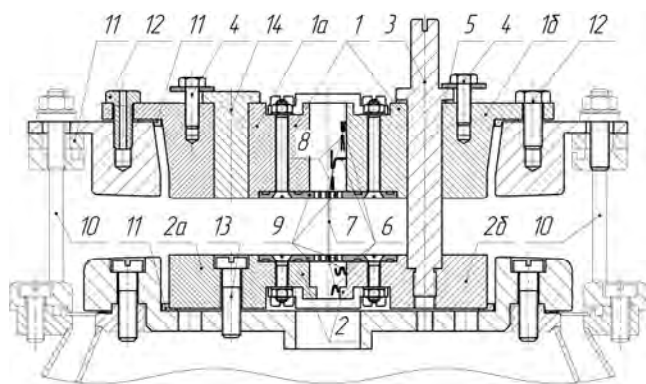
Представляет интерес проведение экспериментальных исследований с лайнерами избыточной массы в плоской геометрии при запитке мегаамперными токами микросекундной длительности с целью повышения КПД генерации $K\alpha$ линии различных элементов.

В настоящей работе представлены результаты разработки в Научно-производственном центре физики многопроволочных лайнеров планарной конструкции и первой серии экспериментов с участиемборок из алюминиевых проволок. Отработаны технологии изготовления и монтажа планарных лайнеров, и регистрации излучения с энергией фотонов более 1 кэВ.

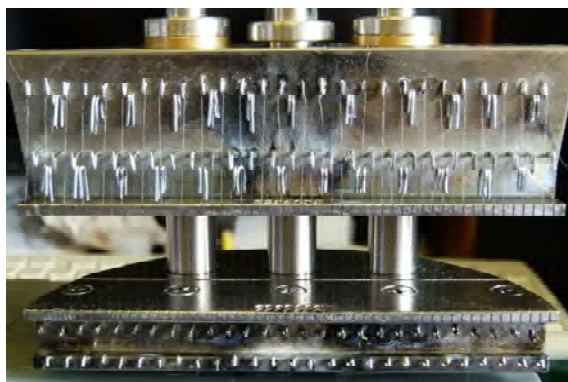
Планарный лайнер

Результаты исследования, представленные в данном докладе, получены на электрофизической установке, обеспечивающей в нагрузке ток амплитудой ~2 МА при времени нарастания ~1 мкс. Подробное описание установки представлено в докладе [7, 8]. Масса многопроволочной лайнерной сборки подбиралась на основании данных полученных в работе [4]. Пересчет оптимальной (с точки зрения выхода $K\alpha$) массы 2,21 мг/см для амплитуды тока 3,5 МА установки ГИТ-12 под амплитуду тока 2,1 МА дал значение массы 0,796 мг/см. По данному параметру подходила имеющаяся алюминиевая проволока $\varnothing 25,4$ мкм, которая в количестве 54 штук обеспечивала погонную массу планарного лайнера 0,739 мг/см.

Для проведения опытов потребовалась разработка электродной системы планарной конструкции с доработкой нагрузочного узла установки. Электродная система планарного лайнера (рис. 1) состоит из двух цилиндрических электродов 1, 2 образованных двумя разборными половинами 1а, 1б, 2а, 2б, в плоскости примыкания которых располагается многопроволочный лайнер. Данная электродная система позволяет суммарно разместить 109 проволок, крайние из которых располагаются на диаметре 135 мм. При этом меж проволочный интервал равен 1,25 мм. В проводимых экспериментах использовались лайнеры из 54 проволок $\varnothing 25,4$ мкм, при этом расстояние между крайними составляло 132,5 мм, а меж проволочный интервал 2,5 мм. Высота лайнера составляет во всех экспериментах 24,6 мм.



а



б

Рис. 1. Электродная система планарного лайнера: а – конструкция лайнера в нагрузочном узле установки; б – фотография лайнера на технологической оснастке

В нижний электрод 2 ввернуто шесть технологических стержней 3 (по три на каждую разборную половину) через верхний электрод 1. При помощи болтов 4 и шайб 5 осуществляется фиксация межэлектродного зазора на требуемой высоте.

В каждом из электродов размещены крючки 6 для зацепа проволоки 7. Малый меж проволоочный интервал (gap) обеспечивается расположением крючков в два ряда объединенных в две группы разнесенных по высоте. При этом, загиб крючков выполнен на разном удалении от плоскости электродов, что позволяет изготавливать лайнер в два прохода. Первый проход – зацеп проволоки между верхними крючками верхнего и нижнего электродов; второй соответственно между нижними крючками. На прямых участках проволоки, между крючками, размещены грузики 8 обеспечивающие натяжение проволоочек и электрический контакт с пластинами 9 в риках, выполненных электроэрозионным методом с использованием не профилированного электрода-инструмента (проволоки) на станке, оснащённом системой числового программного управления. В пластинах предусмотрены отверстия для вывода излучения в осевом направлении. Провисание проволоки под грузиком дает запас на растяжение при монтаже в нагрузочный узел.

Монтаж лайнера в нагрузочный узел осуществляется следующим образом. На токоподводящие части установки монтируются обратный токопровод, образованный 32 стержнями 10 $\varnothing 8$ мм, расположенных на $\varnothing 236$ мм, и доработанные электроды нагрузочного узла под высоковольтный и заземленный электроды планарного лайнера.

Высота лайнера обеспечивается толщиной контактных колец 11. Затем помещается лайнер на технологической оснастке. Положение верхнего электрода лайнера фиксируется болтами 12, после чего поочередно удаляются стержни, а через освободившиеся отверстия нижний электрод лайнера притягивается к высоковольтному электроду винтами 13.

Отверстия в верхнем электроде, через которые проходили технологические стержни, закрывается вставками 14 из материала электрода.

Диагностическое оснащение

Для диагностики работы устройства в экспериментах использовались индукционные дифференцирующие токовые датчики, расположенные в различных сечениях подводящей линии нагрузочного узла и на выходе каждого ГИНа в отдельности. Осуществлялась регистрация спектральных и амплитудно-временных параметров видимого и мягкого рентгеновского излучения (до и свыше 1кэВ) лайнерной плазмы в результате её токовой имплозии. Контролировалось остаточное давление в лайнерной камере.

Параметры импульсов МРИ регистрировались при помощи вакуумных рентгеновских диодов (ВРД) [9], сцинтилляционных детекторов (СД) и полупроводниковых фотодиодов (ППД). Интегральная по спектру и времени энергия импульса МРИ измерялась болометрами двух различных конструкций: проволоочными и плёночными [10]. Для исследования пространственных параметров области генерации МРИ лайнерной плазмы, ее изображение в рентгеновских лучах формировалось камерой-обскура (КО) и регистрировалось на фотопленку. Кроме того, при помощи многоканальной методики [11, 12], велась регистрация оптического излучения лайнерной плазмы из разных областей по высоте пинча. Использование методик, основанных на разных физических принципах, повышает достоверность измерений.

Методики, диагностирующие процессы в лайнерной плазме, расположены в шести радиальных диагностических каналах, как показано на рис. 2. Внутренний диаметр каждого канала составляет 80 мм. Многоканальная методика регистрации оптического излучения расположена внутри вакуумной камеры у откачного канала.

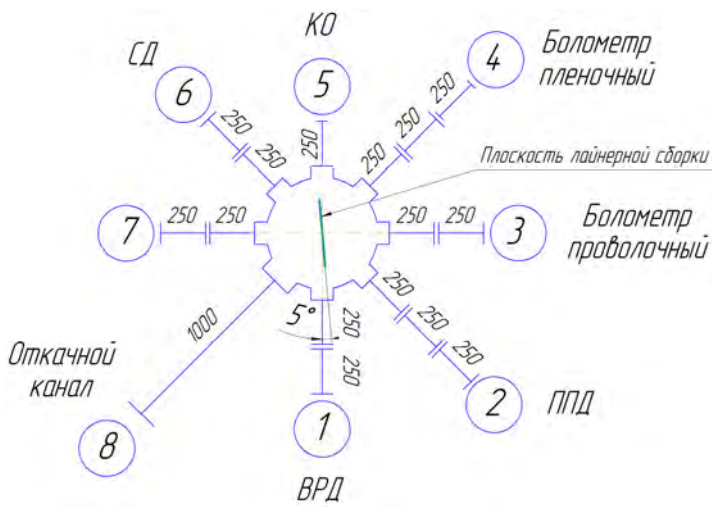


Рис. 2. Схема расположения методик регистрации

Спектральное пропускание фильтров, использованных в различных экспериментальных методиках, представлено на рис. 3. В данной серии экспериментов на ряду со штатным алюминиевым фильтром для регистрации методиками ВРД, СД и ППД спектра излучения выше 1 кэВ использовали комбинированный фильтр, в состав которого входят следующие пленочные материалы: 0,46 мкм меди, 0,3 мкм серебра, 0,27 мкм палладия и 9 мкм лавсана. Состав комбинированного фильтра подбирался с учетом спектрального пропускания фильтра, состоящего из 0,2 мкм алюминия, 2 мкм поликарбоната и 30 мкм полипропилена, который применялся на установке ГИТ-12 для детектирования K_{α} линии алюминия [4].

Для болометров потребовался фильтр более «прозрачный», поскольку тела болометров рассчитывались для регистрации всего спектра излучения.

Оптимальным с точки зрения пропускания стал 2-х слойный фильтр, состоящий из 0,46 мкм меди и 0,27 мкм палладия, так же представленный на рис. 3. Используемая в экспериментах камера-обскура фильтровалась двумя слоями меди по 0,46 мкм.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В первых экспериментах с алюминиевыми лайнерами зарегистрированы параметры токовых импульсов в нескольких сечениях передающей линии, сигналы с детекторов МРИ, обскурограммы излучающей в рентгеновском диапазоне области пинча и оптические сигналы в видимом диапазоне спектра из разных по высоте областей межэлектродного промежутка. Амплитуда тока лайнера от импульса к импульсу варьировалась в пределах от 2,0 до 2,1 МА.

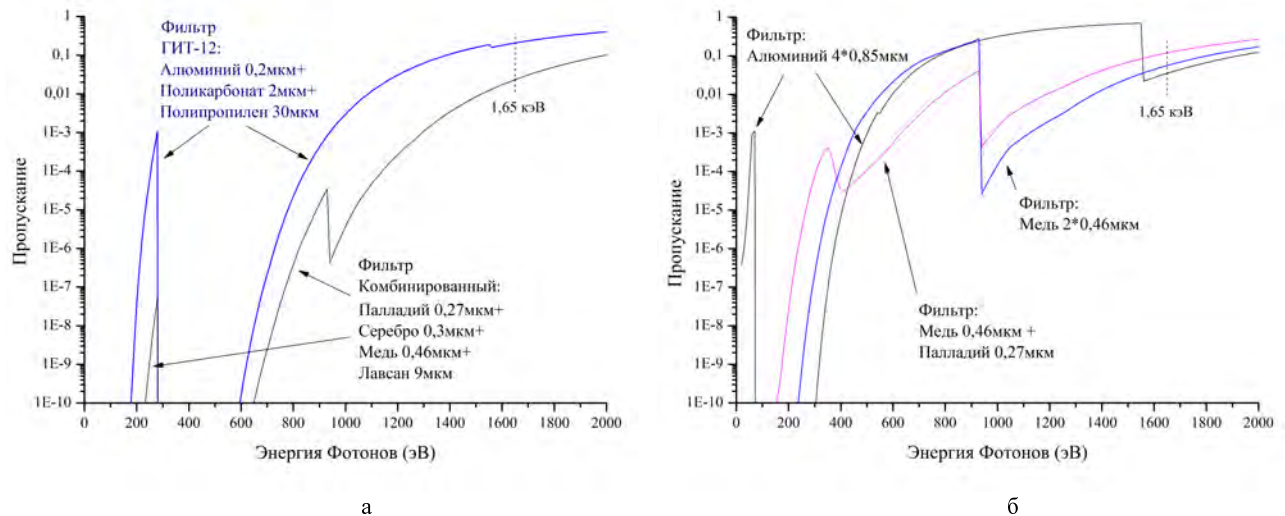


Рис. 3. Пропускание фильтров: а – сравнение пропускания комбинированного фильтра с фильтром, применяемым на установке ГИТ-12 для детектирования K_{α} линии алюминия; б – пропускание фильтров, используемых методиками регистрации МРИ в экспериментах

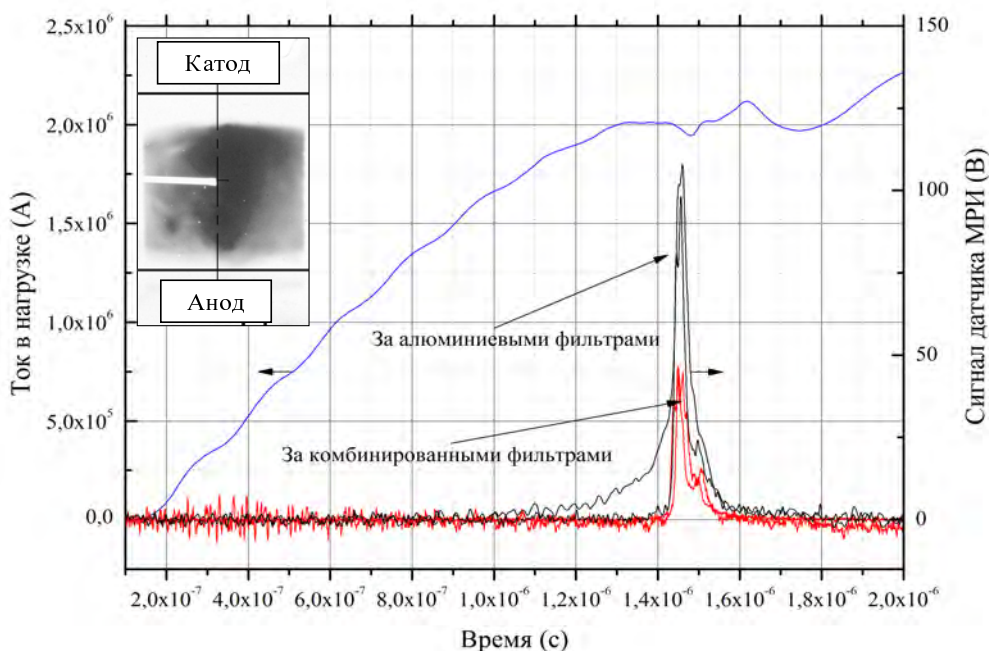


Рис. 4. Типичные осциллограммы тока в нагрузке и импульсов МРИ (основной рисунок) и обскурограмма области пинча в рентгеновском диапазоне (левый верхний угол)

На осциллограммах тока за провалом после импюзии сборки регистрировался подъем до уровня 2,1–2,5 МА. Время импюзии относительно начала токового импульса в экспериментах варьировалось от 1,24 до 1,31 мкс.

Ниже приведена типичная осциллограмма тока в нагрузке и импульсы МРИ, зарегистрированные методиками ВРД и СД, (рис. 4) и обскурограмма области пинча в рентгеновских лучах (рис. 4, левая верхняя часть).

Отношение амплитуд сигналов за алюминиевыми фильтрами к амплитудам за комбинированными фильтрами (рассчитанными на излучение свыше 1 кэВ), регистрируемых в экспериментах каждой спектрально-временной методикой, составило от 1,6 до 2,4 раз. Здесь следует отметить тот факт, что отношение пропускания алюминиевого 3,4 мкм фильтра к пропусканию комбинированного в области 1,65 кэВ (K_{α} линии алюминия) составляет 1,5 раза.

Типичная полуширина импульсов МРИ по всем методикам, полученным как за алюминиевыми, так и за комбинированными фильтрами, составляет 30–34 нс, что связано, по всей видимости, с наличием большой доли жёсткой компоненты в генерируемом алюминиевой плазмой излучении. Фронт нарастания (по уровню 0,1–0,9) импульсов МРИ, зарегистрированных датчиками как за комбинированными, так и алюминиевыми фильтрами, составил 9–18 нс.

Энергия генерируемого импульса МРИ по показаниям болометров: 24–42 кДж – в полном спектре и 0,7–1,6 кДж – в диапазоне энергий квантов более 1 кэВ.

Заключение

В Научно-производственном центре физики разработан и успешно апробирован многопроволочный лайнер планарной конструкции. Отработаны технологии изготовления и монтажа планарных лайнеров. Проведена первая серия экспериментов с участием сборок из 54-х алюминиевых проволочек диаметром 25,4 мкм. Были получены следующие данные, свидетельствующие о факте регистрации в проведённых экспериментах излучения K линии алюминия:

1. Все используемые методики ВРД, СД и ППД зарегистрировали сигналы в диапазоне энергий квантов более 1 кэВ, соответствующих K_{α} линии алюминия.

2. Отношение амплитуд сигналов зарегистрированных в широком диапазоне спектра к амплитудам сигналов зарегистрированных в диапазоне энергий квантов свыше 1 кэВ составляет более чем 1,5 раза, что согласуется с отношением пропусканий фильтров в области 1,65 кэВ.

3. Длительность на полувысоте импульсов МРИ, зарегистрированных за алюминиевым и комбинированным фильтрами, одинаковая, что свидетельствует о наличии существенной доли жесткой компоненты свыше 1 кэВ в генерируемом излучении.

4. Энергия K_{α} алюминия составила 0,7–1,6 кДж.

Литература

1. Matzen M. K., Sweeney M. A., Adams R. G. et al. Pulsed-power-driven high energy density physics and

inertial confinement fusion research // *Phys. Plasmas* 2005, 12, 055503.

2. Giuliani J. L. and Comisso R. J. A Review of the Gas-Puff Z-Pinch as an X-Ray and Neutron Source // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, vol. 43, № 8, P. 2385-2453.

3. Kantsyrev V. L., Safronova A. S., Fedin D. A. et al. Radiation properties and implosion dynamics of planar and cylindrical wire arrays, asymmetric and symmetric, uniform and combined X-pinch on the UNR 1-MA Zebra generator // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, vol. 34, P. 194–212.

4. Shishlov A., Chaikovsky S., Fedunin A. et al. Microsecond planar wire array implosions on the GIT-12 generator // in *Digest of Technical Papers. 16th IEEE International Pulsed Power Conference*, Omnipress, 2007, P. 649-653.

5. Calamy H., Hamann F., Lassalle F. et al. Wire Array Z-pinch on Sphinx Machine: Experimental Results and Relevant Points of Microsecond Implosion Physics // in *AIP Conf. Proc. (6th Int. Conf. On Dense Z-pinch*, Oxford, United Kingdom, 2005), 2006. Vol. 808, P. 15–20.

6. Shishlov A. V., Baksht R. B., Chaikovsky S. A. et al. Gas-Puff-on-Wire-Array Z-Pinch Experiments on the GIT-12 Generator at Microsecond Implosion Times // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007. Vol. 35. P. 592–600.

7. Ибрагимов М. Ш. Экспериментальное исследование влияния слаботочного предимпульса тока на имплозию многопроволочных лайнеров // *Сборник докладов XVIII Нижегородской сессии молодых*

ученых (естественные и математические науки), Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2013, С. 32-35.

8. Данченко Н. Г., Репин П. Б., Репьев А. Г. и др. Система оптического пуска и синхронизации измерительного оборудования на установке «СарМАТ» // *Сборник докладов XII научно-технической конференции «Молодёжь в науке»*, 2013, С. 140-142.

9. Данченко Н. Г., Пылаев Н. А., Юсупов Р. Р. Текущий статус разработки полихроматора мягкого рентгеновского излучения для экспериментов с взрывными источниками тока // *Сборник докладов XIV научно-технической конференции «Молодёжь в науке»*, 2015, С. 147-153.

10. Репин П. Б., Маркевцев И. М., Корнилов С. Ю. Быстродействующий болометр для измерения энергии мягкого рентгеновского излучения сильнотоочного Z-пинча // *Приборы и техника эксперимента*, 2014, № 2, С 97-102.

11. Данченко Н. Г., Репин П. Б., Репьев А. Г., Барышников М. Д. Возможности многоканальной методики регистрации оптического излучения для исследования процессов лайнерной плазмы // *Сборник докладов XIV научно-технической конференции «Молодёжь в науке»*, 2015, С. 94-99.

12. Барышников М. Д., Данченко Н. Г., Репин П. Б., Репьев А. Г. Результаты экспериментов, полученные с помощью многоканальной методики регистрации оптического излучения при исследовании процессов лайнерной плазмы // *XXI Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки: материалы докладов: НГИЭУ*, 2016, С. 5-8.