

Токовая имплозия квазисферических проволочных лайнеров

Е. В. Грабовский, А. Н. Грицук, В. П. Смирнов⁺, В. В. Александров, Г. М. Олейник, И. Н. Фролов, Я. Н. Лаухин,
А. Н. Грибов, А. А. Самохин, П. В. Сасоров*, К. Н. Митрофанов, С. Ф. Медовщиков

ГНЦ РФ ТРИНИТИ¹⁾, 142190 Троицк, Московская обл., Россия

⁺РНИИ КИ, Москва, Россия

* ГНЦ РФ ИТЭФ, Москва, Россия

Поступила в редакцию 27 января 2009 г.

После переработки 4 марта 2009 г.

С помощью электростатического растягивания цилиндрического проволочного лайнера дополнительным электродом формируются квазисферические лайнеры с радиусом 8–12 мм и массой 200–400 мкг из 30–60 вольфрамовых проволок толщиной 6 мкм. Сжатие Z -пинчей, образованных такими лайнерами, проводилось током 3–4 МА с фронтом нарастания 100 нс на установке Ангара-5-1. Показано, что центральная часть этого лайнера формирует более горячую область, чем края такого лайнера, и более горячую, чем в случае цилиндрических лайнеров.

PACS: 52.58.Lq, 52.59.Gy

Излучающие Z -пинчи предполагается применять при облучении термоядерной мишени для ИТС. В настоящее время рассматриваются две основные схемы облучения микромишени. Первая – двухпинчевый хольраум [1]. В этой схеме облучаемая микромишень расположена вне двух сжимающихся излучающих пинчей. Вторая схема – динамический хольраум [2]. В этой схеме микромишень помещается внутрь цилиндра, по которому производится удар сжимающимся лайнером. Энергия удара преобразуется в энергию излучения внутреннего цилиндра. В обеих схемах критическим является поток мощности излучения на поверхности микромишени. В схеме двойного хольраума этот поток прямо пропорционален энергии, выделяющейся при соударении наружного лайнера о внутренний, и обратно пропорционально площади внутреннего лайнера – хольраума. В экспериментах продемонстрировано сжатие наружного проволочного цилиндрического лайнера в несколько раз и удар его о внутренний лайнер с длительностью единицы наносекунд [3]. В работе [4] показано, что при сжатии квазисферических лайнеров вместо цилиндрических в схеме двойного хольраума возможно повышение потока мощности на мишень в 3–4 раза. Однако экспериментов, в которых производилось бы сжатие сферического или квазисферического лайнера на установках тераваттного класса, не проводилось. Одна из проблем заключается в сложности создания квазисферического лайнера. В работе [5] пред-

ложена технология создания такого лайнера, основанная на микротравлении тонкостенной металлической сферы с толщиной стенки единицы микрон. В работе [6] продемонстрировано сжатие квазисферического лайнера, состоящего из небольшого числа изогнутых проволок. В соответствии с работой [4], поверхностная плотность m сферического лайнера должна удовлетворять выражению $m(\alpha) \sim \sin^{-2}(\alpha)$, где α – угол между осью симметрии магнитного поля и вектором, направленным из центра сферы в точку на ее поверхности. В этом случае лайнер будет сжиматься, оставаясь сферическим, несмотря на различное магнитное давление на разных расстояниях от оси лайнера.

На установке “Ангара-5-1” поставлены эксперименты по сжатию квазисферических лайнеров, состоящих из десятков вольфрамовых проволок. Вследствие длительного плазмообразования в проволочных лайнерах [7, 8], толщина токовой оболочки значительно больше скин-слоя, что приводит к повышенной устойчивости сжатия таких лайнеров. Для создания квазисферического лайнера мы применили дополнительный электрод, помещенный в зазор между основными высоковольтными электродами установки “Ангара-5-1”. Напряжение, поданное на такой кольцевой электрод, вызывает электростатическое притягивание свободно висящих проволок и создает квазисферическую форму проволочного лайнера (рис.1). В экспериментах ставились цели: провести сжатие такого лайнера в условиях высоковольтной вакуумной линии (ВТЛ) с магнитной изоляцией и

¹⁾e-mail: angara@triniti.ru

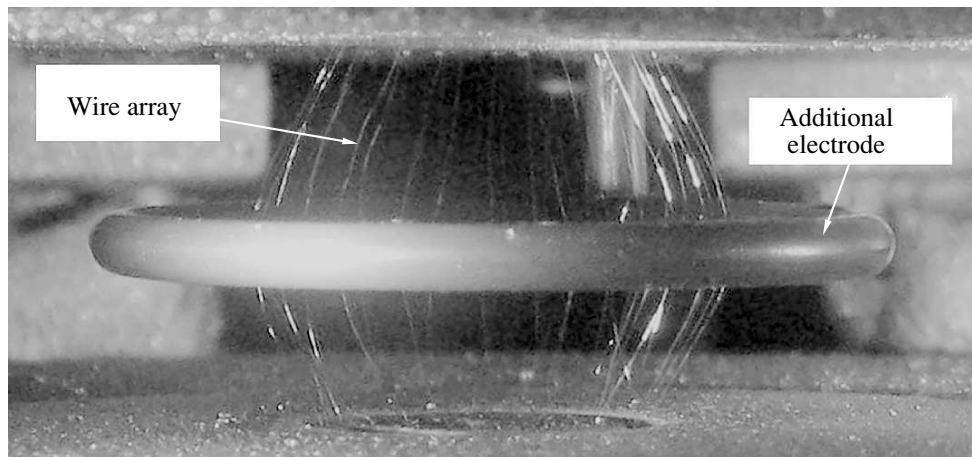


Рис.1. Фотография многопроволочного квазисферического лайнера в концентраторе тока установки Ангара-5-1. Зазор между основными электродами 15 мм, катод внизу, 40 вольфрамовых проволок диаметром 6 мкм длиной 17 мм. Дополнительный тороидальный электрод: малый диаметр 2.4 – мм, большой диаметр – 27.2 мм

увеличить плотность потока мощности вблизи центра квазисферического лайнера.

В экспериментах на установке “Ангара-5-1” [9] происходило сжатие проволочных лайнеров с массой 250–350 мкг, высотой 15 мм, представляющих собой часть квазисферической поверхности радиусом 6 мм на поверхности электродов вблизи полюсов и 10 мм – на экваторе. В качестве внешнего растягивающего электрода использовались кольца, полукольца и спирали, на которые подавалось постоянное напряжение 3–10 кВ. Во всех случаях дополнительный электрод находился в зазоре ВТЛ с магнитной изоляцией,

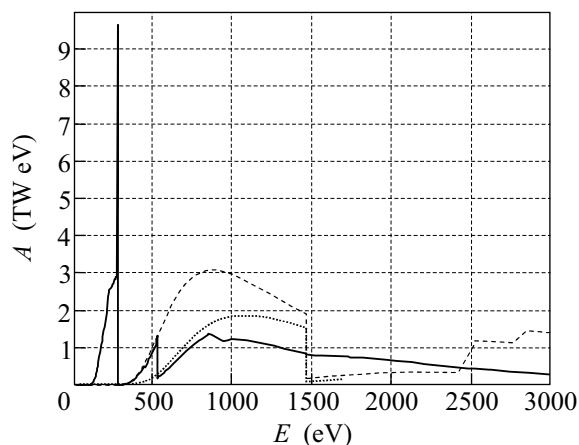


Рис.2. Спектральные чувствительности вакуумных рентгеновских диодов ВРД1, ВРД4 и рентгеновского кадрового регистратора РЭОП. ВРД1 – сплошная линия (катод – углерод, фильтр – лавсан 316 мкг/см²) и ВРД4 – пунктир (катод – молибден, фильтр – 3 мкм алюминия). РЭОП – точки (отн. ед., катод – золото, фильтр – 3 мкм алюминия)

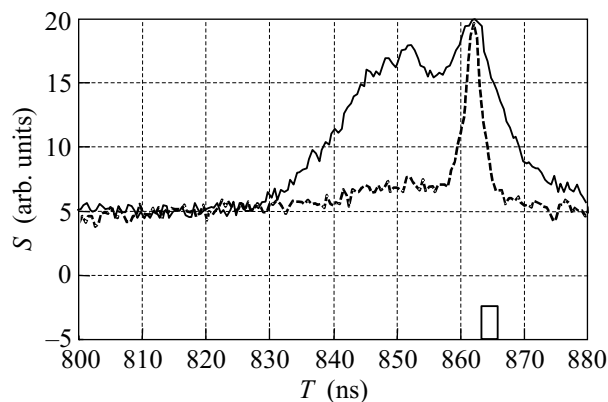


Рис.3. Рентгеновские сигналы S с датчиков ВРД1 и ВРД4. ВРД1 – сплошная линия, ВРД4 – пунктир. Нагрузка лайнера из 40 вольфрамовых проволок диаметром 6 мкм. Амплитуда тока 3 МА. Амплитуда напряжения между основными электродами концентратора тока в месте расположения дополнительного электрода 500 кВ. Прямоугольник соответствует моменту экспозиции всех кадров на рис.4

по которой протекал ток амплитудой 2.5–3.5 МА. Напряжение в районе дополнительного электрода имело индуктивный характер, его амплитуда составляла 500–600 кВ. Сжатие проволочной сборки контролировалось диагностикой установки “Ангара-5-1” [10]. Рентгеновское излучение измерялось набором из 4-х вакуумных рентгеновских диодов (ВРД) с различными фильтрами и фотокатодами. Спектральные чувствительности этих ВРД представлены на рис.2. Ранее проведенные измерения на цилиндрических лайнерах показали, что спектр имеет характер, близкий к планковскому с температурой 60–90 эВ [11]. В

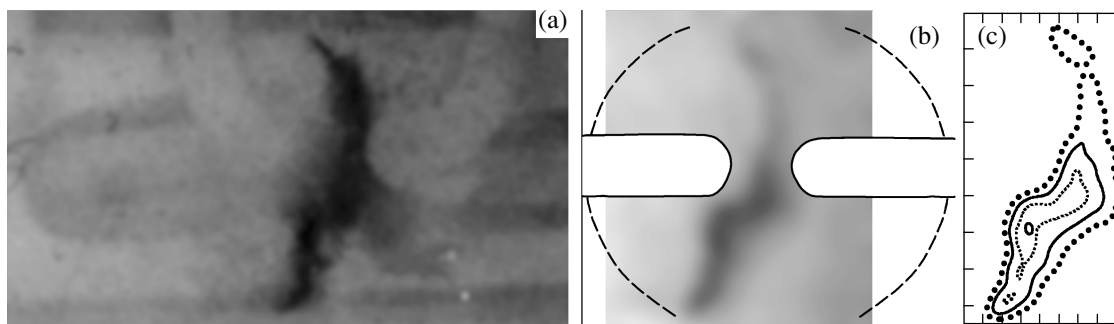


Рис.4. (a) и (b) – кадровые рентгеновские изображения сжимающегося квазисферического лайнера в том же эксперименте, что на рис.3: (a) – за фильтром 10 мкм лавсана, (b) – за фильтром 3 мкм Al. На кадр наложены контуры электродов, контур начального положения лайнера. (c) – линии уровня почернения пленки после вычитания постоянного фона кадра (b). Момент, соответствующий изображению, показан прямоугольником на рис.3

экспериментах также производилась 4-кадровая регистрация рентгеновского изображения сжимающегося лайнера с экспозицией кадра 2 нс в области энергий квантов свыше 200 эВ. Проводились измерения напряжения и тока на расстоянии 6 см от лайнера [10]. Предварительные эксперименты на конических и биконических лайнерах, сопровождавшиеся двумерным РМГД расчетом, показали, что для таких нагрузок рентгеновский импульс имеет 2-пиковый характер. Первый пик соответствует сжатию более узкой части конуса, а второй – более широкой [12]. В экспериментах с квазисферическими лайнерами также наблюдались два пика на рентгеновском сигнале. Первый из них соответствует сжатию частей лайнера, близких к его полюсам, а второй – сжатию экваториальной части. Характерный рентгеновский сигнал, полученный датчиками ВРД1 и ВРД4, показан на рис.3. Как видно из рис.2, сигнал датчика ВРД4 вызывается более жесткими квантами, чем сигнал датчика ВРД2. Отношение этих сигналов является характеристикой жесткости излучения. Для определения зоны, из которой исходят более жесткие кванты на рентгеновский кадровый регистратор (РЭОП, [10]), устанавливался набор рентгеновских фильтров. Один из фильтров совпадал с фильтром датчика ВРД4. Спектральная чувствительность этого кадра также приведена на рис.2. Все 4 кадра РЭОП регистрировались одновременно в момент, близкий к максимуму пика сигнала датчика ВРД4. На рис.4 показаны два рентгеновских изображения сжимающегося квазисферического лайнера в том же выстреле, что и сигналы рис.3. Изображение рис.4b получено с той же спектральной чувствительностью, что и сигнал ВРД4 на рис.3. Лайнер представлял собой часть квазисферической поверхности радиусом 9,2 мм. Моменты регистрации этого изображения показаны на

рис.3 вертикальным прямоугольником. Из рис.3 и 4 видно, что второй пик излучения, зарегистрированный ВРД2, и основной пик, зарегистрированный ВРД4, соответствуют фазе, когда формирование пинчей вблизи полюсов квазисферического лайнера завершено. На рис.4c показаны линии уровня почернения фотопленки, соответствующей изображению 4b после вычитания постоянного фона. Кадр соответствует времени на 1.5 нс позже максимума сигнала датчика ВРД4. Длительность кадра 3 нс. Из рис.4 видно, что излучение в момент пика связано с яркой областью в центре рентгеновского изображения квазисферического лайнера. Отношение амплитуд сигналов ВРД4 к ВРД2 заметно выше во втором пике (рис.3). Это свидетельствует о сферическом характере сжатия части вещества, составляющего лайнер.

Жесткость излучения во втором пике, которое характеризуется отношением сигналов ВРД4 к ВРД2, выше, чем жесткость излучения при сжатии цилиндрических лайнеров. По сравнению с цилиндрическими вольфрамовыми лайнерами радиуса 9–10 мм той же погонной массы амплитуда сигнала ВРД2 уменьшается примерно в два-три раза, а амплитуда сигнала ВРД4 увеличивается в 2–3 раза. Это указывает на более высокую температуру вещества в центре квазисферического лайнера.

Напомним, что для достижения высокой степени сферически-симметричного сжатия необходимо профилирование плотности вещества на поверхности сферы и применение электродов в виде направленных к центру усеченных конусов. Такое сжатие в условиях, когда материал лайнера не переходит в плазменное состояние, экспериментально продемонстрировано в [13].

Таким образом, в нашей работе в условиях линии с магнитной изоляцией при потоке мощности в не-

сколько ТВТ показана возможность имплозии квазисферического лайнера, созданного с помощью дополнительного электрода, электростатически растягивающего проволоки. Повышение жесткости рентгеновского излучения из центра такого квазисферического лайнера указывает на увеличение потока мощности по сравнению с цилиндрическими лайнерами. Более сложные схемы электродов с распределенным на них напряжением могут обеспечить более сложную форму поверхности многопроволочного лайнера.

1. M. Keith Matzen, *Phys. Plasmas* **4**, 1519 (1997).
2. V. P. Smirnov, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **33**, 1697 (1991).
3. S. A. Slutz, J. E. Bailey, G. A. Chandler et al., *Phys. Plasmas* **10**, 1875 (2003).
4. В. П. Смирнов, С. В. Захаров, Е. В. Грабовский, Письма в ЖЭТФ **81**, 556 (2005).
5. T. J. Nash, D. H. McDaniel, R. J. Leeper et al., *Phys. Plasmas* **12**, 052705 (2005).
6. S. V. Lebedev, D. J. Ampleford, S. N. Bland et al., *Recent Wire Array Experiments on the MAGPIE Generator, Dense Z-Pinches: 6th Intern. Conf. on Dense Z-Pinches*, Ed. J. Chittenden, 2006, CP808, pp. 69–72.
7. И. К. Айвазов, В. Д. Вихарев, Г. С. Волков и др., Письма в ЖЭТФ **45**, 28 (1987).
8. В. В. Александров, А. В. Браницкий, Г. С. Волков и др., *Физика плазмы* **27**, 99 (2001).
9. З. А. Альбикив, Е. П. Велихов, А. И. Веретенников и др., *Атомная энергия* **68**, 26 (1990).
10. Г. М. Олейник, Г. С. Волков, Е. В. Грабовский и др., *ПТЭ* № 2, 74 (2004).
11. Г. М. Олейник, А. В. Браницкий, *ПТЭ* № 4, 58 (2000).
12. Е. В. Грабовский, В. В. Александров, Г. М. Волков и др., *Физика плазмы* **34**, 885 (2008).
13. В. Н. Мохов, В. К. Чернышев и др., *ДАН СССР* **247**, 83 (1979).