

УДК 533.952.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.3.3

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛО-ПЛАЗМЕННОГО ЛАЙНЕРА С ВНЕШНЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБОЛОЧКОЙ

© В. А. Кокшенев*, Н. Е. Курмаев, А. В. Шишлов,
Р. К. Чердизов, А. Г. Русских

Институт сильноточной электроники, Сибирское отделение РАН
Россия, Томская обл., 634055 г. Томск, пр. Академический, 2/3.

*Email: vak@oit.hcei.tsc.ru

Исследована возможность увеличения энергии, подводимой к алюминиевому металло-плазменному лайнеру с внешней плазменной оболочкой путем изменения условий распространения в межэлектродном зазоре плазмы дугового источника. В эксперименте варьировалась прозрачность катодной сетки, на которую инжектируется плазменный поток дугового разряда, используемого для формирования металло-плазменного лайнера. Получено, что при переходе от сетки с прозрачностью 85% к сплошному электроду масса лайнера возросла в ~3 раза, а величина подводимой к лайнеру энергии в ~1.7 раза и достигла 100 кДж/см. Показано определяющее влияние внешней плазменной оболочки на формирование компактного и однородного по азимуту токового слоя, стабилизирующего процесс сжатия лайнера с больших диаметров в микросекундной моде.

Ключевые слова: Z-пинч, металло-плазменный лайнер, токовая оболочка.

Введение

Сжатие плазменных лайнеров под действием мощного импульса тока на протяжении многих десятилетий используется для генерации мягкого рентгеновского и нейтронного излучений. Анализ процессов и подробный обзор последних достижений в исследовании Z-пинч нагрузок дан в работе [1]. В качестве лайнеров обычно используются либо многопроволочные сборки (типа «белые колеса»), либо газовые лайнеры, формируемые с помощью сверхзвуковых сопел Лавала. Устойчивая имплозия для эффективной генерации излучения потребовала применение сильноточных генераторов со временем нарастания тока порядка 100 нс и ограничения величины начального радиуса до 2–3 см. При больших начальных радиусах и/или увеличении времени ввода энергии в нагрузку, имплозия лайнера становится нестабильной и выход излучения снижается в несколько раз. Переход к мультимегаамперному диапазону токов и возможному использованию более простых по конструкции микросекундных источников тока связан с увеличением как погонной массы лайнера, так и начального радиуса плазменной оболочки. В этих режимах одной из задач по согласованию генератора с нагрузкой для увеличения энерговклада и выхода излучения является реализация стабильной имплозии. Для снижения уровня неустойчивостей было предложено профилирование распределения газа в межэлектродном зазоре [2–3]. Для подавления наиболее существенных Релей-Тейлоровских неустойчивостей эффективна стабилизация по механизму снежного плуга (snow plow стабилизация), при котором начальное радиальное распределение вещества обеспечивает процесс сжатия практически с постоянной скоростью. Профилированные нагрузки в виде трехкаскадного газового лайнера были успешно использованы на генераторах Double Eagle [4–5], Decade Quad [6–8] и Saturn [9–10] для эффективной генерации излучения в K-линиях аргона при временах имплозии порядка 200 нс и пиковом токе 3–6 МА. Увеличение времени имплозии в субмикросекундный диапазон привело к снижению эффективности данного типа нагрузки. Так, в экспериментах на генераторе Sphinx [11] при времени имплозии аргонового лайнера 500 нс и пиковом токе 3.6 МА выход излучения составил только 2.3 кДж/см, в то время как на генераторе Double Eagle [4] при времени имплозии аргонового лайнера 205 нс и пиковом токе 3.5 МА выход излучения составил 5.5 кДж/см.

На мегаджоульном генераторе ГИТ-12 проводятся исследования по реализации стабильной имплозии газоплазменных лайнеров в микросекундном режиме при амплитудах тока до 4 МА [12]. Предложенная нами схема Z-пинч нагрузки с внешней плазменной оболочкой [13] успешно протестирована в экспериментах с дегериевыми и другими газовыми лайнерами [14–15]. В экспериментах с аргоновыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой абсолютный выход излучения в K-линиях аргона был увеличен почти в четыре раза по сравнению с трехкаскадным лайнером. При времени имплозии аргонового лайнера 800 нс и пиковом токе 3.1 МА выход излучения составил 2 кДж/см. Использование металло-плазменных лайнеров [16] с внешней плазменной оболочкой на генераторе ГИТ-12 [17] показало, что в настоящее время этот тип нагрузки является наиболее эффективным для генерации излучения в K-линиях алюминия при микросекундных временах имплозии. Максимальный выход излучения в K-линиях алюминия составил 10.9 кДж/см при времени имплозии 900 нс и пиковом токе 3.3 МА.

В экспериментах с аргоновым двухкаскадным лайнером с внешней плазменной оболочкой [15] было установлено, что увеличение прозрачности сетки привело к существенному снижению выхода излучения, а уменьшение прозрачности сетки на всей площади катода дало небольшое увеличение выхода. В настоящей работе представлены результаты дополнительных исследований металло-плазменных лайнеров с внешней плазменной оболочкой. Проверена возможность увеличения погонной массы металло-плазменного лайнера за счет изменения режима распространения плазмы дугового источника в межэлектродном зазоре при изменении прозрачности катода с $\sim 85\%$ (сетка) до 0 (сплошной электрод). Получены дополнительные данные о влиянии внешней плазменной оболочки на процесс имплозии в этом режиме.

Экспериментальное оборудование и диагностика

Эксперименты проведены на мегаджоульном генераторе ГИТ-12 в микросекундном режиме вывода энергии в нагрузку. При зарядном напряжении генератора Маркса 50 кВ ток в короткозамкнутой нагрузке достигает амплитуды 4.7 МА с фронтом 1.8 мкс. Схема эксперимента с металло-плазменным лайнером с внешней плазменной оболочкой приведена на рис. 1. Внешняя плазменная оболочка формировалась 48 плазменными пушками (ПП), установленными на диаметре 350 мм. При задержке между срабатыванием 48 ПП и срабатыванием генератора Маркса 1.8 мкс масса плазменной оболочки не превышала 5 мкг/см. Металло-плазменный лайнер формировался вакуумным дуговым разрядом с алюминиевыми электродами. Лайнер представлял собой инжектированный в межэлектродный промежуток плазменный поток испаренного с электродов ионизованного металла. Источником питания служила конденсаторная батарея емкостью $C_{arc} = 20$ мкФ, которая заряжалась до напряжения $U_{arc} = 25-35$ кВ ($I_{arc} \sim 140$ кА, с временем нарастания ~ 5.5 мкс) и коммутировалась управляемым разрядником тригatronного типа. Задержка срабатывания генератора Маркса относительно начала тока дугового разряда составляла 6–8 мкс. Схема синхронизации позволяла регулировать времена инъекции плазмы дугового источника, 48 ПП и включения генератора Маркса с точностью ≤ 0.1 мкс. Исследовано влияние трех видов поверхности катодного электрода Z-пинч нагрузки диаметром 320 мм: сетка с прозрачностью $\sim 85\%$, сетка с прозрачностью $\sim 70\%$ и сплошной металлический диск.

Для измерения тока использовались индуктивные канавки, сигнал с которых пропорционален производной тока в месте измерения. Датчик I_z установлен на входе Z-пинч нагрузки. Делитель напряжения регистрировал напряжение $U_i(t)$ на сборном электроде центрального узла ГИТ-12. Для измерения динамики ТС использованы магнитные зонды (B-dot). Зонды устанавливались на катоде внутри отверстий на радиусах 3, 6, 9 и 13 см. Для регистрации движения оболочки в оптическом диапазоне использованы хронограф ФЭР-7 и 4-х кадровая камера HSFC-Pro с временем экспозиции 3 нс.

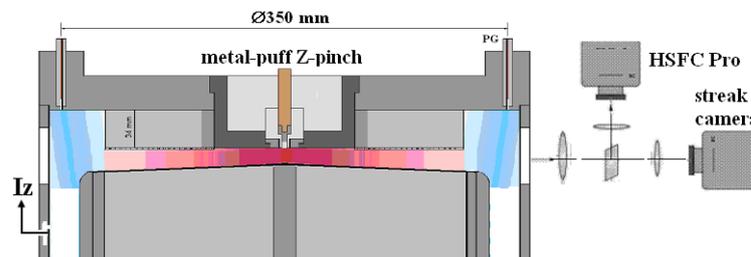


Рис. 1. Схема эксперимента.

Результаты эксперимента

Величина подводимой к лайнеру энергии пропорциональна квадрату пикового тока имплозии I_{zm} : $E_d = 0.5 * \int (\partial L_z / \partial t) \cdot I_z^2(t) dt$. Эксперименты на генераторе ГИТ-12 с алюминиевыми металло-плазменными лайнерами с внешней плазменной оболочкой [18] показали, что изменение условий по параметрам вакуумной дуги, с помощью которой происходит формирование плазменного лайнера, не приводит к значимому увеличению пикового тока имплозии. Так, с увеличением зарядного напряжения на источнике дугового разряда с 25 кВ до 35 кВ при задержке между зажиганием дуги и пуском генератора тока ~ 6 мкс амплитуда тока увеличилась с 2 МА до 2.2 МА – увеличение $E_d \sim$ в 1.2 раза. Увеличение задержки с 6 мкс до 8 мкс привело к увеличению тока до 2.4 МА. При этом величина подводимой к лайнеру энергии E_d увеличилась \sim в 1.4 раза, что и соответствует квадратичной зависимости от пикового тока имплозии I_{zm} .

Рост амплитуды тока в микросекундном режиме имплозии требует существенного увеличения как массы лайнера M , так и начального радиуса R_0 имплозии, так как $I_{ztimp} \sim R_0(M)^{1/2}$. Проверена возможность увеличения тока I_{zm} за счет перераспределения плазмы дугового источника в межэлектродном зазоре при изменении прозрачности поверхности катода. В аналогичном режиме работы плазменных источников и генератора Маркса при замене на катоде сетки с прозрачностью 86% на сетку с прозрачностью 70%, ток возрос с 2.1 МА до 2.4 МА. При установке сплошного электрода амплитуда тока имплозии выросла до 3.1 МА, подводимая к лай-

неру энергия с ~ 60 кДж/см до ~ 100 кДж/см. На *рис. 2* приведен результат выстрела #2562 со сплошным электродом. Как это видно по оптической регистрации, у катода формируется обширная плазменная область (облако), не вовлеченная в основной процесс ускорения вещества к центру. Влияние фактора прозрачности катода и внешней плазменной оболочки на формирование металло-плазменной Z-пинч нагрузки и на стабильность ее имплозии можно оценить по снимкам, полученным с помощью 4-х кадровой камеры HSFC-Pro со временем экспозиции 3 нс (*рис. 3а,б*). При одинаковых условиях работы генератора ГИТ-12, схем формирования внешней плазменной оболочки и металло-плазменного лайнера в случае сетчатого катода имплозия устойчива (*рис. 3а*). В случае сплошного катода (*рис. 3б*), начиная с радиуса ~ 3 см, внешняя видимая граница лайнера неустойчива – формируются плазменные языки, приводящие к потере части массы лайнера. В этом режиме при отсутствии внешней плазменной оболочки нестабильности начинают развиваться уже на начальной стадии имплозии (*рис. 3с*). Имеет место расслоение оболочки с формированием плазменных крыльев. Аналогичные явления имели место в экспериментах с газовыми лайнерами, когда инжектируемая масса превышала некоторую оптимальную величину. Росли амплитуда пикового тока имплозии, подводимая к лайнеру энергия, но падали характеристики К-излучения. Таким образом, рост подводимой к лайнеру энергии является необходимым, но не достаточным условием для получения больших выходов К-излучения вещества лайнера.

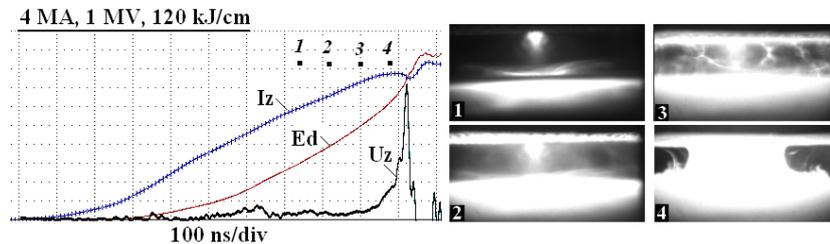


Рис. 2. Выстрел #2562 с металло-плазменным лайнером с внешней плазменной оболочкой, сплошной катод из нержавеющей стали. Осциллограмма тока I_z в Z-пинч нагрузке, напряжения на нагрузке U_z и подводимая к лайнеру удельная энергия $E_d = 0.5(\partial L_z / \partial t) \cdot I_z^2(t) dt$.

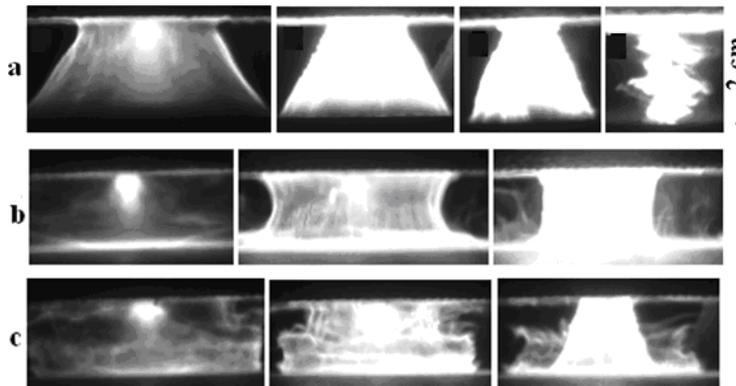


Рис. 3. Влияние начальных условий формирования Z-пинч нагрузки на процесс имплозии при неизменных параметрах генератора ГИТ-12 и источника питания вакуумно-дугового разряда, формирующего металло-плазменный лайнер: а – сетчатый катод с прозрачностью $\sim 85\%$, б, с – катод сплошной, с – внешняя плазменная оболочка отсутствует.

По импульсу ускоряющей силы и средней скорости v_r токовой оболочки, вычисленной по показаниям магнитных датчиков $B\text{-dot}$ и оптическим измерениям, оценена погонная масса $m(t)$ ускоряемого вещества лайнера в зависимости от времени – $\int F_m dt \sim mv_r$. На *рис. 4* приведены результаты расчетов погонной массы лайнера в процессе имплозии: график 1 показывает изменение массы лайнера для сетчатого катода с прозрачностью $\sim 70\%$, 2 – катод сплошной. За счет отражения плазменного потока от сплошной катодной поверхности имеет место увеличение погонной массы лайнера примерно в 3 раза. Как видно из графиков, увеличение погонной массы происходит в области диаметром до 200 мм. В результате пиковый ток имплозии вырос с 2.4 МА до 3.1 МА, а величина полного действия $\int I_z^2(t) dt$ с $1.6 \cdot 10^6$ А²с до $3.4 \cdot 10^6$ А²с.

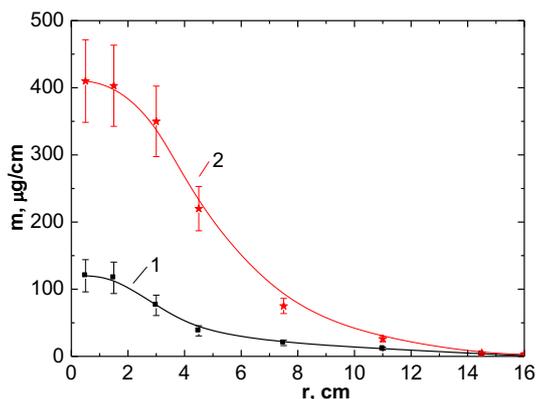


Рис. 4. Изменение погонной массы лайнера в процессе имплозии при неизменных параметрах генератора ГИТ-12 и источника питания вакуумно-дугового разряда, формирующего металло-плазменный лайнер: 1 – сетчатый катод с прозрачностью 70%, 2 – катод сплошной.

Выводы

Проверена возможность увеличения максимального тока имплозии металло-плазменного лайнера при замене на катоде сетки на сплошной электрод. За счет увеличения до ~ 3 раз массы лайнера увеличены амплитуда тока с 2.4 МА до 3.1 МА и более чем в 2 раза величина полного действия и, соответственно, подводимая к лайнеру энергия с 60 кДж/см до 100 кДж/см. Устойчивость сжатия металло-плазменного лайнера обусловлена механизмом snow plow стабилизации, который реализуется за счет начального распределения плотности вещества в межэлектродном зазоре. В случае сплошного катода реализуется такое распределение плотности по радиусу, при котором механизм snow plow стабилизации нарушается, приводя к развитию крупномасштабных неустойчивостей с потерей вещества и энергии в финальной стадии имплозии. При этом отсутствие внешней плазменной оболочки не приводит к формированию компактного и однородного по азимуту токового слоя, стабилизирующего процесс сжатия лайнера с больших диаметров в микросекундной моде, и неустойчивости начинают развиваться уже на начальной стадии имплозии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-29-01554. URL: <https://rscf.ru/project/22-29-01554/>

ЛИТЕРАТУРА

- Giuliani J. L. and Comisso R. J. A Review of the Gas-Puff Z-Pinch as an X-Ray and Neutron Source // IEEE Transactions. Plasma Science. 2015. Vol. 43(8). Pp. 2385–2453.
- Cochran F. L., Davis J. and Velikovich A. L. Stability and radiative performance of structured Z-pinch loads imploded on high-current pulsed power generators // Physics of Plasmas. 1995. Vol. 2(7). Pp. 2765–2772.
- Velikovich A. L., Cochran F. L. and Davis J. Suppression of Rayleigh–Taylor instability in Z-pinch loads with tailored density profiles // Physical Review Letters. 1996. Vol. 77(5). Pp. 853–856.
- Sze H., Banister J., Failor B.H. et al. Efficient radiation production in long implosions of structured gas-puff Z pinch loads from large initial radius // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. 105001-1-105001-4.
- Sze H. et al. Magnetic Rayleigh–Taylor instability mitigation and efficient radiation production in gas puff Z-pinch implosions // Physics of Plasmas. 2007. Vol. 14(5). 056307-1-056307-8.
- Levine J. S., Banister J. W., Failor B. H. et al. Implosion dynamics and radiative characteristics of a high yield structured gas puff load // Physics of Plasmas. 2006. Vol. 13(8). 082702-1-082702-11.
- Levine J. S., Failor B. H., Sze H. M. and Bell D. Mixed gas Z pinch experiments using a shell-on-shell nozzle on double-EAGLE // IEEE Transactions. Plasma Science. 2002. Vol. 30(2). Pp. 512–516.
- Levine J. S. et al. Long implosion time (240 ns) Z-pinch experiments with a large diameter (12 cm) double-shell nozzle // Physics of Plasmas. 2004. Vol. 11(5). Pp. 2054–2059.
- Comisso R. J., Apruzese J. P., Mosher D. et al. Energetics of a long-implosion-time, 12-cm-diameter argon-gas-puff Z pinch at 6.5 MA // Proc. 16th IEEE Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, USA. 2007. Pp. 1773–1779.
- Comisso R. J. et al. Overview of 12-cm-diameter, argon gaspuff experiments and analyses with implosion times > 200 ns and 3- to 6-MA peak currents // Proc. 7th Int. Conf. on Dense-Z Pinches, AIP Conf. Proc. Alexandria, USA: American Institute of Physics, 2009. 1088. Pp. 233–238.
- Zucchini F., Calamy H., Lassalle F. et al. First argon gas puff experiments with 500 ns implosion time on the Sphinx driver // Proc. 7th Int. Conf. on Dense-Z Pinches, AIP Conf. Proc. Alexandria, USA: American Institute of Physics, 2009. 1088. Pp. 247–250.
- Shishlov A. V., Baksht R. B., Chaikovskiy S. A. et al. K-shell radiation of multiple shell gas puff microsecond implosions // Plasma Devices Oper. 2005. Vol. 13(2). Pp. 81–85.
- Kokshenev V. A., Labetsky A. Yu., Kovalchuk B. M. et al. Multi-Shell Plasma Flow Switch Experiments on the GIT12 Generator // Proc. 14th Symp. on High Current Electronics. Tomsk. 2006. Pp. 272–275.
- Klir D. et al. Efficient neutron production from a novel configuration of deuterium gas-puff Z-pinch // Physical Review Letters. 2014. Vol. 112(9), 095001-1–095001-5.
- Шишлов А. В., Кокшенев В. А., Курмаев Н. Е., Лабетская Н. А., Фурсов Ф. И., Чердизов Р. К. Генерация излучения в К-линиях инертных газов в микросекундном режиме имплозии // Известия ВУЗов. Физика. 2019. №62(7). С. 137–146.

16. Rousskikh A. G., Zhigalin A. S., Oreshkin V. I., Chaikovskiy S. A., Labetskaya N. A. and Baksht R. B. Use of vacuum arc plasma guns for a metal puff Z-pinch system // *Physics of Plasmas*. 2011. Vol. 18(9). 092707-1–092707-7.
17. Shishlov A., Kokshenev V., Rousskikh A. et al. Radiative Characteristics of Al Metal-Puff Z-Pinches in Experiments on the GIT-12 Generator at a Microsecond Implosion Regime // *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020)*. Tomsk, Russia. 2020. Pp. 61–66. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242061.
18. Kokshenev V., Rousskikh A., Shishlov A. et al. Formation and dynamics of the current sheath in the plasma shell of a Z-pinch in the microsecond implosion regime // *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020)*. Tomsk, Russia. 2020. Pp. 217–221. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241970.

Поступила в редакцию 17.09.2023 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.3.3

**INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE FORMATION
OF METAL-PUFF Z-PINCHES WITH THE OUTER PLASMA SHELL**

© **V. A. Kokshenev***, **N. E. Kurmaev**, **A. V. Shishlov**,
R. K. Cherdizov, **V. I. Oreshkin**

*Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
2/3 Akademicheskoy Avenue, 634055 Tomsk, Russia.*

**Email: vak@oit.hcei.tsc.ru*

The possibility of increasing the energy supplied to an aluminum metal-plasma puff with outer plasma shell by changing the propagation conditions of the arc source plasma in the interelectrode gap has been studied. In the experiment, the transparency of the cathode grid was varied, onto which the plasma flow of the arc discharge, which is used to form the metal-plasma puff, is injected. It was found that when the grid transparency changed from 85% to a solid electrode, the metal-puff mass increased by ~3 times, and the energy supplied to the liner by ~1.7 times and reached 100 kJ/cm. The decisive influence of the outer plasma shell on the formation of a compact and azimuthally uniform current sheet, which stabilizes the process of metal-puff compression from large diameters in the microsecond regime, is shown.

Keywords: z-pinch, metal-puff, current sheet.

Received 17.09.2023.