

Исследование спектрального состава газо-плазменных лайнеров

А. Жигалин, А. Русских, В. Орешкин*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, Томск

**zhigalin@ovpe2.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В статье описан новый метод формирования газо-плазменной оболочки лайнера. Поскольку формирование плазменной оболочки происходит в течении десятков микросекунд и использование электромагнитных и электродинамических газовых клапанов исключается из-за очень низкой скорости их открытия, был разработан эрозийный клапан, в котором отверстие открывается в процессе испарения алюминиевой фольги электрическим импульсом. Основными требованиями нового метода являлись: 1 – время открытия клапана должно быть существенно меньше времени формирования плазменной оболочки Z-пинча и 2 – газ должен быть ионизированным. Для определения спектрального состава плазмы, поступающей в межэлектродный промежуток ИМПИ-5 мы использовали интегральный оптический спектрометр VISIO2GO VIS-NIR.

Ключевые слова: газовый лайнер, Z-пинч, спектр излучения.

1. Введение

Газовые лайнеры, являющиеся одной из разновидностей Z-пинча, широко используются в настоящее время как источники мягкого рентгеновского излучения и нейтронов [1, 2]. Как указано в работе [1], одним из основных преимуществ газовых лайнеров по сравнению с многопроволочными является то, что первоначальное распределение плотности в газовом лайнере является осесимметричным, что облегчает реализацию равномерного сжатия пинча. Недостатком обычного газового лайнера является то, что изначально, холодный газ оболочки лайнера сам по себе не является проводником тока. Для того, чтобы обеспечить необходимую начальную проводимость, необходимо предварительно его ионизовать. В настоящее время ионизация газовой струи в лайнере традиционно обеспечивается за счет внешней ультрафиолетовой подсветки, однако данный метод малоэффективен и не обеспечивает проводимость среды газовой оболочки достаточной для формирования тонкого скин-слоя. Хорошо известно [3], что на начальном этапе протекания тока по газовому лайнеру с недостаточной начальной проводимостью возникают отдельные ветвящиеся стримеры, постепенно перерастающие в объемные каналы с более высокой степенью ионизации, а значит и проводимостью. Образовавшиеся каналы с током начинают сжиматься, захватывая только часть газовой оболочки, однако по мере сжатия, увеличения индуктивности нагрузки и ионизации оставшегося газа ток начинает переключаться на внешние слои газовой оболочки. Данный сценарий имплозии лайнера существенно усложняет картину сжатия, препятствует устойчивому сжатию пинча и делает сжатие малоэффективным с точки зрения выхода излучения.

Ранее в работе [4] было предложено для получения изначально высокоионизованного плазменного столба использовать металло-плазменный лайнер, в котором металлическая плазма создается благодаря испарению электродов в результате горения дуги. В данной работе нами рассматривается возможность использования дуги, горящей в потоке газа, для создания газо-плазменной оболочки лайнера. Суть данного метода состоит в том, чтобы за достаточно короткое время сформировать газовую плазменную струю наподобие металло-плазменной струи с достаточной начальной проводимостью и необходимой массой на единицу длины лайнера. Использование обычных газовых клапанов (электромагнитных и электродинамических) исключается из-за очень низкой скорости открытия отверстия натекания и малой скорости распространения газа при обычных температурах. Кроме того, распределение вещества, которое получается при работе с холодным газом способствует

развитию РТ-неустойчивостей, чего хотелось бы избежать. Как было показано в работе [5] достаточным условием подавления РТ-неустойчивостей является обеспечение профиля плотности лайнерной оболочки, при котором радиальное распределение плотности описывается степенной функцией со степенью $s \leq -2$. Таким образом, основными требованиями являются: первое – время открытия клапана должно быть существенно меньше времени формирования плазменной оболочки Z-пинча и второе – газ должен быть ионизированным.

2. Методика эксперимента

Эксперименты проводились на установке ИМРИ-5 [4]. На Рис. 1 показана принципиальная схема нового метода формирования газо-плазменной струи, в котором роль клапана играет испаряющаяся мембрана разделяющая вакуумную и газовую камеры (см. Рис. 1). Через верхний стальной электрод, который является катодом дугового разряда, подается газ. В данных экспериментах в качестве рабочего газа использовался неон. На нижнем торце катода расположен поджиг дугового разряда, представляющий собой кабель диаметром 3 мм, с одной стороны разделенный с катодом изолятором шириной 1 мм, а с другой стороны соединенный с высоковольтным конденсатором ёмкостью 0.1 мкФ. При подаче импульсного питания на катод дугового разряда, на его торце возникает пробой на центральную жилу поджига и тем самым создается первичная ионизация, позволяющая уверенно зажечь дугу между катодом и фольгой, которая является анодом. В процессе испарения фольги открывается центральное отверстие диаметром 6 мм через которое газ из форкамеры начинает поступать в вакуумный межэлектродный промежуток сильноточного генератора ИМРИ-5.

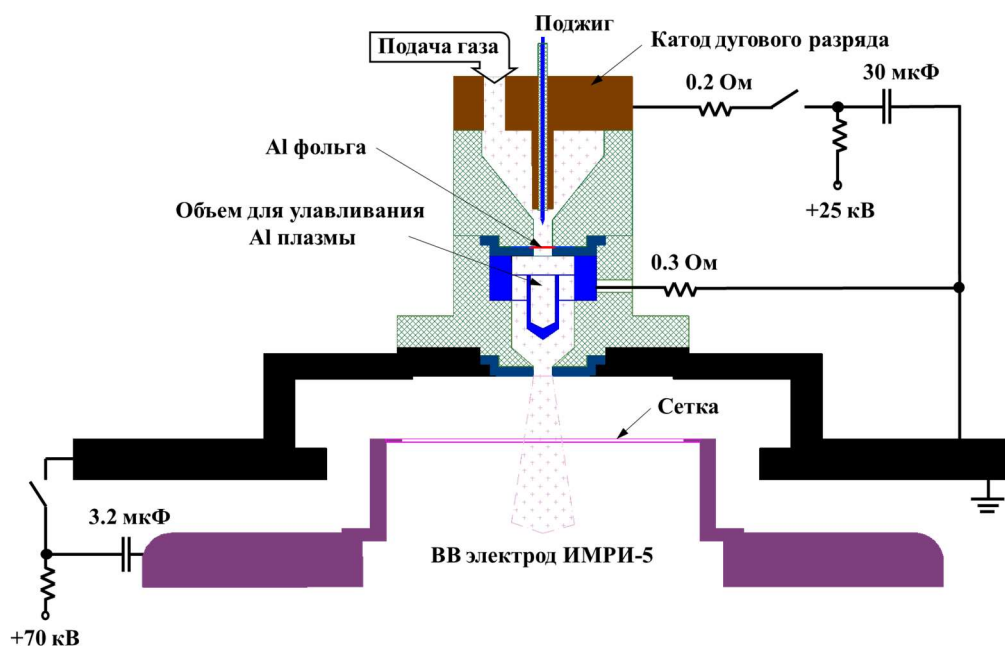


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Необходимо учитывать, что толщина фольги определяет время её испарения, а, следовательно, и время открытия центрального отверстия. Следовательно, толщина фольги должна быть минимально возможной. Для того, чтобы определить зависимость величины давления газа, при котором происходит разрушение фольги в зависимости от её толщины, были проведены калибровочные измерения. В процессе калибровки мы использовали

алюминиевую фольгу толщиной 5.5 мкм, 9 мкм и 14 мкм. На Рис. 2 показана экспериментальная зависимость величины давления газа, при котором происходит разрушение фольги, от её толщины. Для того, чтобы сжатие неоновой оболочки происходило в районе максимума тока ИМРИ-5, необходимо определить давление рабочего газа (неона) в форкамере перед алюминиевой фольгой. Согласно предварительным оценкам, проведенным с учетом оптимальной линейной массы пинча для установки ИМРИ-5 [4], было установлено, что давление неона p в форкамере должно быть около 1 атм. В ходе экспериментов было найдено, что при $p = 1$ атм оптимальной с точки зрения скорости открытия отверстия является алюминиевая фольга толщиной 9 мкм. В то же время согласно кривой, приведенной на Рис. 2, разрушение фольги толщиной 9 мкм происходит при $p = 1.5$ атм, что обеспечивает достаточный запас прочности при рабочем давлении 1 атм.

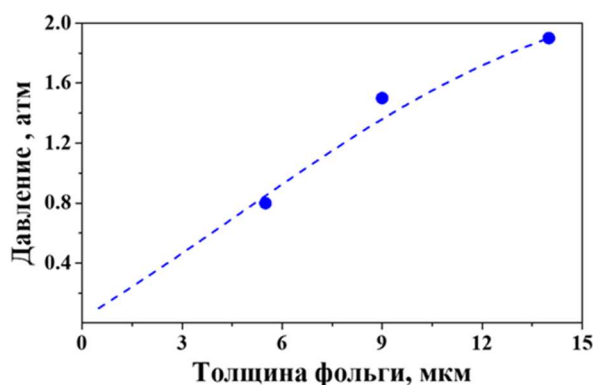


Рис. 2. Экспериментальная зависимость величины давления газа, при котором происходит разрушение фольги, от её толщины.

Для того, чтобы алюминиевая плазма не могла попасть в межэлектродный промежуток ИМРИ-5, непосредственно за открывающимся центральным отверстием расположена некоторая цилиндрическая полость, в которую и попадает материал испаренной алюминиевой фольги. Алюминиевая плазма не может вылететь из данной полости до тех пор, пока существует газо-плазменный поток, толкающий её по направлению внутрь данной полости. Иными словами, поток газа не позволяет алюминиевой плазме вылететь из центрального объема, предназначенного для улавливания алюминиевой плазмы.

После того, как данный объем заполнится, ионизованный газ начнет огибать данный объем и вытекать через боковые отверстия в область расположения центрального нижнего отверстия диаметром 4 мм. Далее плазма поступает в межэлектродный промежуток сильноточного генератора ИМРИ-5. Кроме того, в данной схеме предусмотрена зона дополнительной ионизации газового потока за счет того, что промежуточный электрод соединён с земляным электродом через сопротивление 0.3 Ома. До тех пор, пока плазма не замкнула промежуточный электрод на землю, ток дугового разряда протекает в цепи с сопротивлением 0.3 Ома. Как только плазма долетит до нижнего отверстия и замкнет промежуточный электрод непосредственно на землю, то большая часть тока дуги будет гореть в нижнем объеме непосредственно перед отверстием 4 мм и тем самым производить дополнительную ионизацию газа. После того, как необходимая нам нагрузка создана, включается сильноточный генератор ИМРИ-5, и подготовленная плазменная нагрузка сжимается собственным магнитным полем протекающего тока генератора.

Для определения состава плазмы, поступающей в межэлектродный промежуток ИМРИ-5 мы использовали интегральный оптический спектрометр VISIO2GO VIS-NIR. Данный прибор

чувствителен в спектральном диапазоне 200–1000 нм со спектральным разрешением 1 нм (полная ширина по полувысоте реакции прибора на монохроматическое воздействие).

На Рис. 3 приведен интегральный спектр газо-плазменной струи, из которого можно сделать вывод, что плазма, поступающая в межэлектродный зазор ИМРИ-5 состоит из ионизованного неона и водорода с небольшими примесями железа (материал электродов в области ионизации газа). Таким образом, учитывая, что длина волны наиболее чувствительных линий Al равна 396.1 нм и 394.2 нм [6], можно утверждать, что в данной модификации плазменного инжектора отсечка алюминиевой плазмы происходит достаточно эффективно.

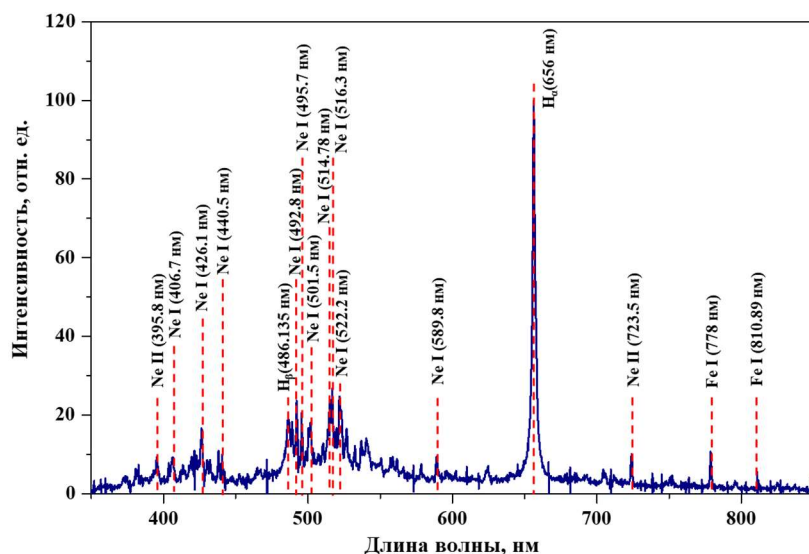


Рис. 3. Интегральный спектр газо-плазменной струи.

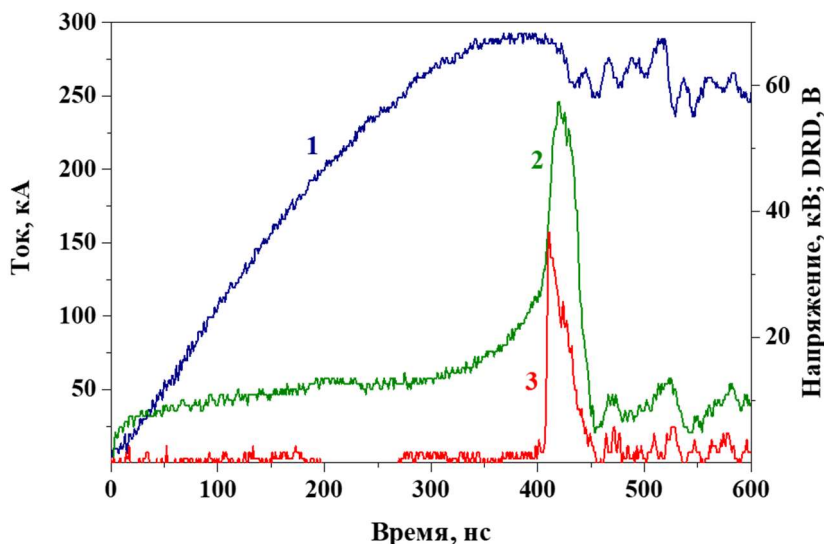


Рис. 4. Типичные осциллограммы, полученные на установке ИМРИ-5, при сжатии неоновой плазменной лайнера: ток – 1, напряжение – 2 и сигнал DRD – 3.

Еще одним важным параметром, определяющим время сжатия неоновой оболочки, является задержка запуска сильноточного генератора относительно начала протекания тока дугового разряда. Для того, чтобы определить оптимальную задержку при давлении неона $p = 1$ атм было произведено несколько выстрелов, в которых измерялись такие параметры как

ток, протекающий через лайнер, его производная, напряжение на высоковольтном электроде ИМРИ-5, мощность излучения лайнера за такими фильтрами как алюминизированный кимфойл толщиной 3 мкм кимфола и 2 мкм алюминия и полипропилен толщиной 6 мкм. На Рис. 4 приведены типичные осциллограммы тока, напряжения и сигнала, зарегистрированного вакуумным диодом DRD.

Отметим, что величина падения напряжения ~ 60 кВ, полученная при сжатии неоновой плазменной лайнера, близка к величинам напряжения, полученным ранее при сжатии металло-плазменных лайнеров на установке ИМРИ-5 [4, 7].

3. Заключение

В работе описана разработка нового принципа создания плазменной нагрузки для Z-пинчей. Эксперименты проведены с Ne пинчем. Основным элементом формирования Ne плазменной нагрузки является клапан мембранного типа с испаряющейся Al мембраной. При открытии клапана продукты испарения Al мембраны задерживаются с помощью специально сконструированной ловушки, в то время как одно- и двукратно-ионизованный поток Ne попадает в высоковольтный зазор генератора, обеспечивающего сжатие Ne пинча. Спектральная съёмка показала, что в образовавшемся плазменном столбе следы Al отсутствуют. Также показано, что сжатие образовавшегося Ne пинча происходит в режиме, соответствующему штатному режиму работы генератора ИМРИ-5.

Признательность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00686, <https://rscf.ru/project/22-19-00686/>.

4. Ссылки

- [1] J.L. Giuliani and R.J. Comisso, A Review of the Gas-Puff Z -Pinch as an X-Ray and Neutron Source, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. **43**(8), 2385, 2015; doi: 10.1109/TPS.2015.2451157
- [2] D. Klir, A.V. Shishlov, V.A. Kokshenev, P. Kubes, K. Rezac, S. Buryskova, R.K. Cherdizov, J. Cikhardt, B. Cikhardtova, G.N. Dudkin, J.T. Engelbrecht, F.I. Fursov, S.L. Jackson, J. Krasa, J. Kravarik, N.E. Kurmaev, V. Munzar, V.N. Padalko, N.A. Ratakhin, O. Sila, K. Turek, V.A. Varlachev and R. Wagner, Acceleration of protons and deuterons up to 35 MeV and generation of 10^{13} neutrons in a megaampere deuterium gas-puff z-pinch, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. **61**(1), 014018, 2019; doi: 10.1088/1361-6587/aadc99
- [3] Y.P. Raizer, J.E. Allen, *Gas discharge physics*, Berlin: Springer, 1997.
- [4] A.G. Rousskikh, A.S. Zhigalin, V.I. Oreshkin, N.A. Labetskaya, S.A. Chaikovsky, A.V. Batrakov, G.Yu. Yushkov, and R.B. Baksht, Study of the stability of Z-pinch implosions with different initial density profiles, *Physics of Plasmas*, vol. **21**, 052701, 2014; doi: 10.1063/1.4874323
- [5] A.L. Velikovich, F.L. Cochran and J. Davis, Suppression of Rayleigh-Taylor Instability in Z-Pinch Loads with Tailored Density Profiles, *Phys. Rev. Lett.*, vol. **77**, 853, 1996; doi: 10.1103/PhysRevLett.77.853,1996
- [6] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team, NIST Atomic Spectra Database, [online], 2023; <https://physics.nist.gov/asd>
- [7] R.B. Baksht, V.I. Oreshkin, A.G. Rousskikh, A.S. Zhigalin, Energy balance in a Z pinch with suppressed Rayleigh–Taylor instability, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. **60**(3), 035015, 2018; doi: 10.1088/1361-6587/aaa79b