

Исследование двухкаскадного гибридного газового лайнера для эффективной генерации излучения в К-линиях неона при микросекундных временах имплозии

*Р.К. Чердизов**, В.А. Кокшениев, Н.Е. Курмаев, А.В. Шишлов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**rustam.k.cherdizov@gmail.com*

Аннотация. Новый тип нагрузки для формирования плазмы Z-пинча – гибридный газовый лайнер с внешней плазменной оболочкой – опробован в экспериментах на генераторе ГИТ-12 (4.7 МА, 1.7 мкс), для генерации излучения в К-линиях неона. Лайнер состоял из нескольких каскадов. Внутренний неоновый каскад представлял собой сплошную газовую струю на оси системы с малым начальным диаметром и играл роль излучателя. Внешний дейтериевый каскад представлял собой полую газовую оболочку и играл роль стабилизатора имплозии. Третьим компонентом была полая плазменная оболочка, инжектированная на большом начальном радиусе, обеспечивающая начальную проводимость и формирование однородного токового слоя. В описываемых экспериментах диаметр внутренней неоновой струи составлял 10 мм, диаметр полой дейтериевой оболочки – 81 мм, а внешняя плазменная оболочка генерировалась 48 плазменными пушками, расположенными на диаметре 350 мм. Параметры дейтериевой и плазменной оболочек, обеспечивающих стабильную имплозию на временах порядка микросекунды, были определены в более ранних экспериментах и в ходе исследований не менялись. Линейная масса неоновой струи варьировалась в диапазоне от 150 мкг/см до 400 мкг/см с шагом 50 мкг/см, время инжекции составляло ~ 300 мкс. Максимальный выход излучения в К-линиях неона был достигнут при массе неона 300 мкг/см и составил 14 кДж/см при пиковом токе имплозии 2.8 МА. По сравнению с двухкаскадным неоновым газовым лайнером с внешней плазменной оболочкой гибридная нагрузка продемонстрировала лучшую эффективность как плазменный источник излучения, поскольку в тех экспериментах максимальный выход излучения в К-линиях неона (14.7 кДж/см) достигался при значительно более высоком пиковом токе имплозии (3.5 МА).

Ключевые слова: z-пинч, газовый лайнер, излучение в К-линиях

1. Введение

Исследования плазмы Z-пинчей в качестве источника рентгеновского излучения в К-линиях вещества лайнера ведутся с 1970-х годов. За прошедшие десятилетия были проведены эксперименты с разнообразными конфигурациями нагрузки Z-пинча при разных временах имплозии [1]. Проблема эффективной генерации излучения в К-линиях при микросекундном времени имплозии остаётся актуальной задачей [2].

Эксперименты в этом направлении проводились на генераторе ГИТ-12 (4.7 МА, 1.7 мкс). Изначально, эксперименты были проведены с трёхкаскадным газовым лайнером, где две внешние оболочки были полыми, а центральный каскад представлял собой сплошную газовую струю на оси системы. В качестве вещества лайнера были использованы неон и аргон, выход излучения составил 11 кДж/см при токе в 3.6 МА для неона, 0.5 кДж/см при токе в 2.4 МА для аргона [3]. Полученный выход излучения в К-линиях неона соответствовал теоретической оценке [4], тогда как для аргона он составил лишь 35% от ожидаемой величины. Таким образом, для аргона задача эффективной генерации не была решена.

Следующим шагом в развитии многокаскадных лайнеров стало применение внешней плазменной оболочки, которая заменила в трёхкаскадном газовом лайнере внешнюю газовую оболочку. В таком лайнере в центре инжектируется сплошная газовая струя, снаружи полая газовая оболочка и, на большом начальном радиусе, внешняя плазменная оболочка, обеспечивающая начальную проводимость и формирование однородного токового слоя. Для неоновых лайнеров выход излучения в К-линиях достиг 14.7 кДж/см при токе в 3.5 МА, для

аргона – 1.9 кДж/см при токе в 3.1 МА. Полученный результат для неона даже превысил теоретические оценки. Для аргона эффективность плазменного источника излучения выросла в два раза, но всё ещё была ниже 100% [2].

Новая конфигурация нагрузки была найдена благодаря экспериментам с алюминиевыми металлоплазменными лайнерами [5] и дейтериевыми газовыми лайнерами с алюминиевой проволокой в центре системы [6] для генерации излучения в К-линиях алюминия (все эксперименты проведены на ГИТ-12). В обеих конфигурациях нагрузки присутствовала внешняя плазменная оболочка. Эти лайнеры имели сходную конфигурацию: в центре узла нагрузки концентрировалось вещество излучателя (плазменная струя или алюминиевые проводники), на периферию распространялась более лёгкая фракция (вещество испаряемого полимерного изолятора или дейтерий). Более лёгкая фракция, заполняя межэлектродный зазор со спадающим к его периферии профилем плотности (который способствует подавлению Рэлей-Тейлоровских неустойчивостей [7]), позволяла эффективно передавать энергию генератора к веществу излучателя с минимальными потерями. В такой нагрузке важно, чтобы вещество излучателя было локализовано в центральной зоне узла нагрузки и не распространялось дальше к периферии, увеличивая массу более лёгкой фракции. Эти нагрузки показали себя эффективными плазменными источниками излучения, продемонстрировав стабильное сжатие и высокий выход [5, 6]. Оценив полученные экспериментальные результаты, было принято решение применить сходную конфигурацию нагрузки для генерации излучения в К-линиях аргона.

Двухкаскадный аргоновый лайнер с внешней плазменной оболочкой был преобразован следующим образом: во внешнем каскаде лайнера аргон был заменён на дейтерий. Логика такого решения следующая. Внутренний каскад играет роль излучателя, а функция внешней оболочки – стабилизировать имплозию и передать энергию генератора во внутренний каскад с минимальными потерями. Выбор дейтерия объясняется тем, что эксперименты с дейтериевыми газовыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой показали, что такой тип нагрузки обеспечивает стабильную динамику сжатия в микросекундном режиме [8] и высокий выход излучения в К-линиях алюминия [6]. Применяв такую гибридную конфигурацию нагрузки, нам удалось повысить эффективность плазменного источника излучения в К-линиях аргона [9, 10]. Соответственно, возник вопрос, удастся ли, используя новый тип нагрузки, повысить и без того высокую эффективность генерации излучения в К-линиях неона.

Статья посвящена исследованию и оптимизации гибридного (неон/дейтерий) газового лайнера с внешней плазменной оболочкой как источника излучения в К-линиях неона.

2. Экспериментальное оборудование и диагностика

Эксперименты были проведены на сильноточном мегаджоульном генераторе ГИТ-12. При зарядном напряжении 50 кВ, запасаемая энергия генератора составляет 2.6 МДж. В описываемых экспериментах генератор работал в режиме прямого вывода энергии, в котором максимальный ток составляет 4.7 МА при времени нарастания 1.7 мкс.

Для формирования газовых оболочек использовался быстрый электромагнитный клапан с раздельными объёмами, что позволяет наполнять каскады разными газами и менять их массы независимо друг от друга. Внутренний каскад – сплошная неоновая газовая струя на оси системы – формировался с помощью прямого газоведа с диаметром 10 мм. Внешний каскад представлял собой полуо дейтериевую газовую оболочку, которая инжестировалась в межэлектродный зазор через сопло с внешним диаметром 81 мм. Плазменная оболочка, состоявшая из ионов водорода и углерода, формировалась 48 плазменными пушками, расположенными на диаметре 350 мм. Узел нагрузки изображён на Рис. 1.

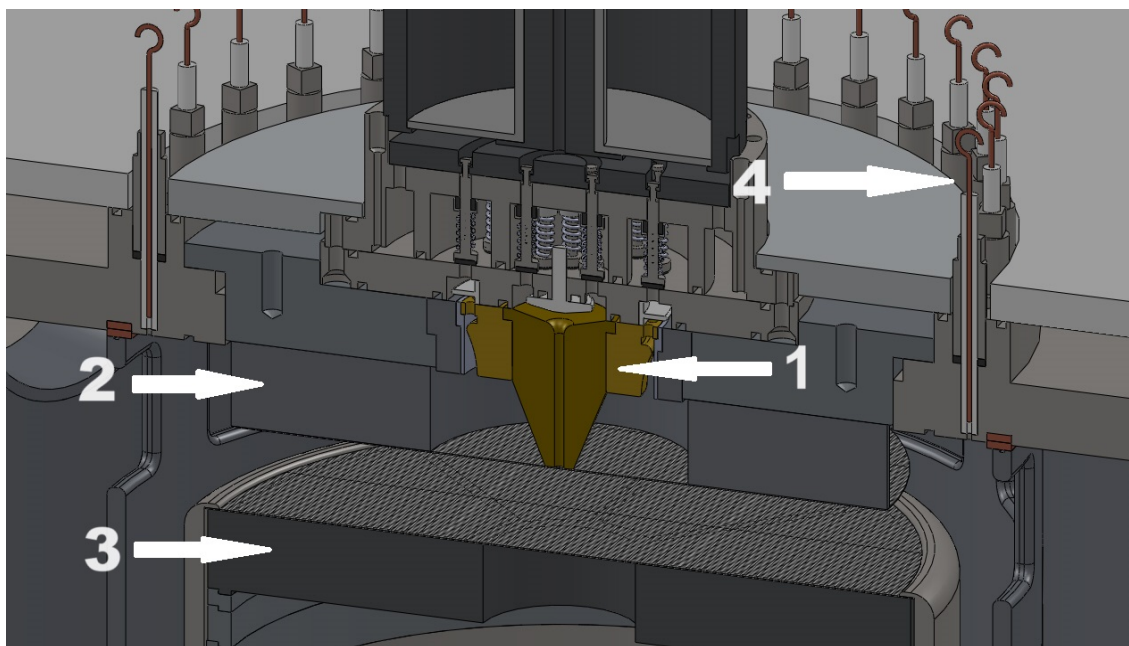


Рис. 1. Узел нагрузки генератора ГИТ-12 (1 – сопла для напуска газа; 2 – анодный электрод; 3 – катодный электрод; 4 – плазменные пушки). Величина анодно-катодного промежутка (межэлектродного зазора) 20 мм.

При проведении экспериментов использован следующий набор диагностической аппаратуры. Индуктивный делитель напряжения и индуктивные токовые канавки позволяли измерить напряжение на межэлектродном зазоре и ток лайнера. Вакуумно-рентгеновские диоды (XRD) использовались для регистрации рентгеновского излучения в К-линиях неона с погрешностью в 15%. Для регистрации оптического изображения сжимающегося лайнера использовался четырёхкадровый электронно-оптический комплекс HSFC с экспозицией 3 нс.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Эксперименты были посвящены оптимизации двухкаскадного гибридного газового лайнера с внешней плазменной оболочкой с точки зрения выхода излучения в К-линиях неона. Было проведено сканирование по массе внутреннего неоновой каскада и для каждой точки измерен выход излучения и определена эффективность плазменного источника излучения. Для оценки эффективности нагрузки по генерации излучения в К-линиях использовалось отношение экспериментального выхода излучения к теоретическому, рассчитанному для заданного уровня тока с использованием двухуровневой модели [4].

Большая трудность реализации имплозии с большого начального радиуса состоит в том, что развитие Рэлей-Тейлоровских неустойчивостей приводит к уменьшению выхода излучения в К-линиях. На изображениях, полученных оптической камерой HSFC с выдержкой 3 нс (Рис. 2), видно стабильное сжатие. Такой результат был ожидаем: эксперименты с гибридным аргоновым лайнером также показали стабильную имплозию [9, 10]. Следует отметить, что стабильность сама по себе не является самоцелью экспериментов. Она лишь одно из необходимых условий для эффективной генерации излучения в К-линиях.

Линейная масса неоновой струи менялась от 150 мкг/см до 400 мкг/см с шагом в 50 мкг/см, время инжекции неона практически не менялось и составляло 290 ± 10 мкс. Выбор линейных масс обусловлен экспериментами с двухкаскадными неоновыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой [2] и определёнными в них оптимальными массами. Мы стремились избежать большего времени инжекции неона, так как по опыту экспериментов с

гибридным газовым лайнером с аргоном в качестве излучателя был сделан вывод, что не следует допускать распространения вещества излучателя из центральной области узла нагрузки [9, 10]. Параметры дейтериевой и плазменной оболочек, обеспечивающих стабильную имплозию на временах порядка микросекунды (линейная масса дейтерия 90 мкг/см, время инъекции 300 ± 20 мкс, линейная масса внешней плазменной оболочки 5 мкг/см), были определены в более ранних экспериментах [6, 8] и не менялись в ходе исследований. Для каждой массы было сделано минимум два выстрела. Основные экспериментальные данные (линейная масса неона, время инъекции неоновой струи, пиковый ток, максимальное напряжение на межэлектродном зазоре, время имплозии, выход и эффективность плазменного источника излучения) приведены в Таблице 1.

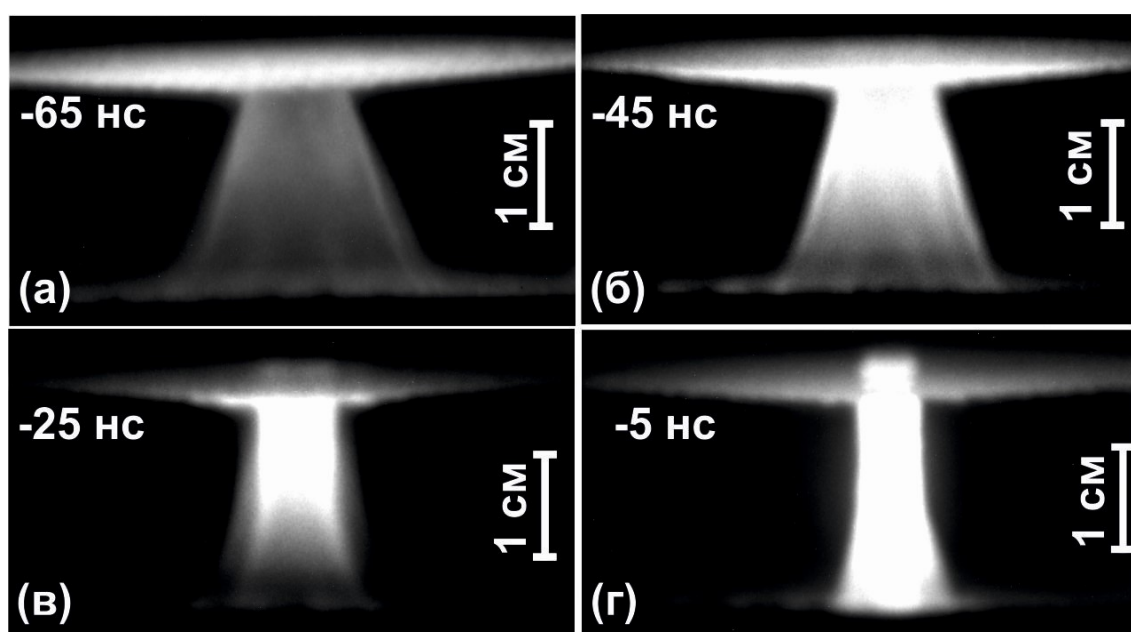


Рис. 2. Изображения сжимающегося пинча, полученные при помощи электронно-оптического комплекса HSFC (разрешение 3 нс). Выстрел 3278 (а–г). Время указано до пика излучения в К-линиях неона.

Таблица 1. Экспериментальные данные.

Неон лин. масса, мкг/см	Выстрел №	Неон время инъекции, мкс	I, MA	U, kV	Время имплозии, нс	$Y_{K-shell}$, кДж·см ⁻¹	Эфф., отн.ед.
150	3281	285	2.69	700	729	4.5	0.76
150	3303	230	2.80	639	761	4.5	0.71
200	3280	280	2.55	1070	672	10.8	2.07
200	3306	280	2.82	731	778	9.0	1.38
250	3278	280	2.74	815	728	12.9	2.13
250	3304	280	2.63	866	708	12.6	2.27
300	3279	300	2.70	1090	711	13.0	2.21
300	3307	285	2.76	679	840	14.1	2.28
300	3310	300	2.73	1010	746	14.5	2.41
350	3282	300	2.79	857	754	12.2	1.93
350	3305	280	2.78	699	752	14.4	2.30
400	3283	305	2.63	688	702	9.5	1.70
400	3308	290	2.79	643	764	11.1	1.75

На Рис. 3 показаны усреднённые значения выхода излучения в К-линиях и эффективности плазменного источника излучения в зависимости от линейной массы неона. Как видно на Рис. 3, имеется выраженный оптимум выхода и эффективности для масс в

300±50 мкг/см, где усреднённый выход излучения в К-линиях достиг 14 кДж/см при токе 2.75 МА, что соответствует усреднённой эффективности примерно 2.30. Интересно, что в прошлых экспериментах с двухкаскадными неоновыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой, оптимальная масса для неона также составила 300 мкг/см, выход излучения достиг 14.7 кДж/см, однако при гораздо большем токе – 3.5 МА (эффективность 1.46, более чем в полтора раза ниже) [2]. При заметном отходе от массы в 300 мкг/см падает как выход, так и эффективность плазменного источника излучения.

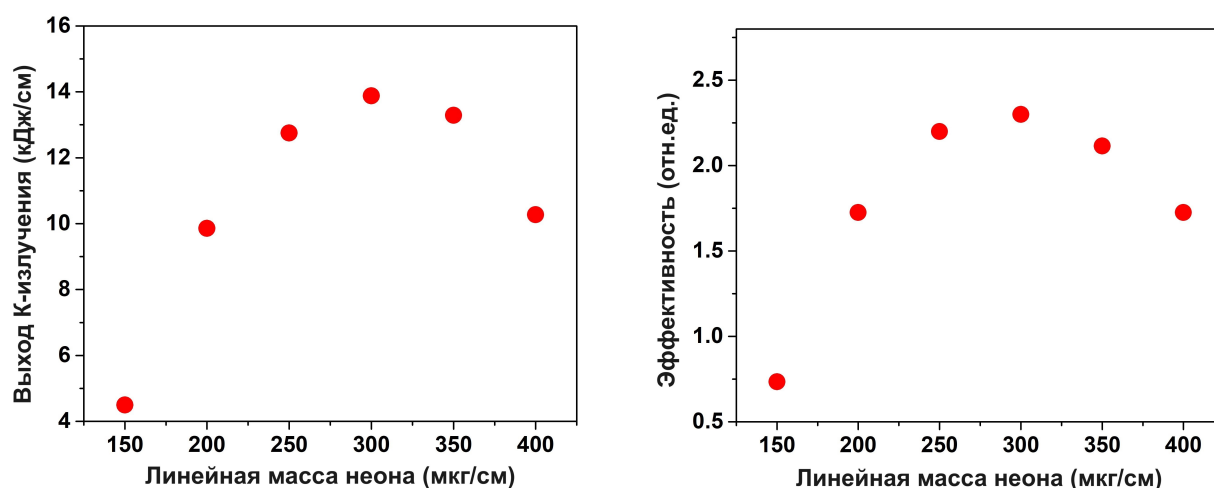


Рис. 3. Зависимость выхода излучения в К-линиях и эффективности от линейной массы неона.

Несмотря на то, что гибридный неоновый лайнер по сравнению с двухкаскадным неоновым лайнером оказался более эффективным плазменным источником излучения, полученный результат может быть улучшен. В экспериментах с аргоновым гибридным лайнером для инъекции аргона использовался газовод диаметром 6 мм. Для неона, из-за конструктивных особенностей клапана, нам пришлось увеличить этот размер до 10 мм, чтобы инжектировать требуемые массы за оптимальное время. Как уже было сказано выше, необходимо добиваться максимальной локализации вещества излучателя в центральной зоне узла нагрузки, а время инъекции очень сильно влияет на распространение газа в межэлектродном зазоре [9, 10]. Применяв усовершенствованную конструкцию клапана и более узкий газовод для центрального каскада-излучателя, мы надеемся увеличить эффективность плазменного источника излучения.

4. Заключение

Эксперименты по оптимизации гибридного газового лайнера с внешней плазменной оболочкой в качестве источника излучения в К-линиях неона проведены на генераторе ГИТ-12 в микросекундном режиме имплозии. Результаты экспериментов показали, что выход излучения в К-линиях неона достиг 14 кДж/см при токе в 2.7–2.8 МА. По сравнению с двухкаскадным неоновым газовым лайнером с внешней плазменной оболочкой, гибридная нагрузка продемонстрировала лучшую эффективность как плазменный источник излучения, поскольку в тех экспериментах максимальный выход излучения в К-линиях неона (14.7 кДж/см) достигался при значительно более высоком пиковом токе имплозии (3.5 МА).

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRM-2021-0001).

5. Список литературы

- [1] J.L. Giuliani and R. Comisso, A Review of the Gas-Puff Z -Pinch as an X-Ray and Neutron Source, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **43**(8), 2385, 2015; doi: 10.1109/TPS.2015.2451157
- [2] A.V. Shishlov, et al., Generation of K-Shell Radiation of Noble Gases in the Microsecond Implosion Regime, *Russ. Phys. Journal*, vol. **62**, 1243, 2019; doi: 10.1007/s11182-019-01841-6
- [3] A.V. Shishlov, et al., K-shell radiation of multiple shell gas puff microsecond implosions, *Plasma Devices and Operations*, vol. **13**(2), 81, 2005; doi: 10.1134/S1054660X06010178
- [4] D. Mosher, N. Qi, and M. Krishnan, A Two-Level Model for K-Shell Radiation Scaling of the Imploding Z-Pinch Plasma Radiation Source, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **26**(3), 1052, 1998; doi: 10.1109/27.700887
- [5] A.V. Shishlov, 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), Tomsk, Russia*, 61, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242061
- [6] D. Klir, et al., K-shell radiation and neutron emission from z-pinch plasmas generated by hybrid gas-puff implosions onto on-axis wires, *Phys. Plasmas*, vol. **28**, 062708, 2021; doi: 10.1063/5.0054683
- [7] A. Velikovich, F. Cochran and J. Davis, Suppression of Rayleigh-Taylor Instability in Z-Pinch Loads with Tailored Density Profiles, *Phys. Rev. Letters*, vol. **77**(5), 1996; doi: 10.1103/PhysRevLett.77.853
- [8] D. Klir, et al., Ion acceleration mechanism in mega-ampere gas-puff Z-pinches, *New J. Phys.*, vol. **20**(5), 053064, 2018; doi: 10.1088/1367-2630/aac545
- [9] A.V. Shishlov, R.K. Cherdizov, V.A. Kokshenev, N.E. Kurmaev, S.A. Vagaytsev, Generation of Ar K-shell radiation using a hybrid gas puff with an outer plasma shell, *8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, 2022; doi: 10.56761/EFRE2022.S2-O-011601
- [10] R.K. Cherdizov, A.V. Shishlov, V.A. Kokshenev, N.E. Kurmaev, S. A. Vagaytsev, Optimization of double shell hybrid gas-puff with outer plasma shell for efficient generation of K-shell radiation in the microsecond implosion regime, *8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, 2022; doi: 10.56761/EFRE2022.S2-O-019901