

## ГИБРИДНАЯ НАГРУЗКА КАК ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Р.К. Чердизов, А.В. Шишлов, В.А. Кокшенев, Н.Е. Курмаев  
*Институт сильноточной электроники СО РАН,  
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,  
rustam.k.cherdizov@gmail.com, ash@ovpe2.hcei.tsc.ru,  
vak@oit.hcei.tsc.ru, kurmaev@oit.hcei.tsc.ru*

На генераторе ГИТ-12 (4.7 МА, 1.7 мкс) проведены исследования плазменного источника К-излучения в виде многокаскадной гибридной нагрузки, состоящей из внешнего дейтериевого газового каскада с плазменной оболочкой и внутренним каскадом, состоящим из вещества излучателя, размещенным на оси системы. Параметры дейтериевой и внешней плазменной оболочек обеспечивали стабильную имплозию в течение нескольких сотен наносекунд, подавляя развитие неустойчивостей. В качестве центрального каскада использовались неон и аргон, а также алюминий и титан. Эффективность плазменного источника излучения определялась как отношение экспериментального выхода излучения к теоретически ожидаемому для данного уровня тока [1]. Результаты экспериментов показали, что гибридная нагрузка является эффективным плазменным источником К-излучения (энергия квантов 0.9 – 6.0 кэВ) [2–6]. Полученные результаты свидетельствуют, что конструктивно более простые и дешевые микросекундные генераторы тока могут быть использованы для генерации К-излучения с целью исследования взаимодействия излучения с веществом в научных и прикладных целях.

**Ключевые слова:** Z-пинч; плазменные источники излучения; излучение в К-линиях; микросекундный режим имплозии.

## HYBRID GAS-PUFF AS A SOFT X-RAY PLASMA RADIATION SOURCE

Rustam Cherdizov, Alexander Shishlov, Vladimir Kokshenev, Nikolay Kurmaev  
*Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
2/3 Akademicheskyy Ave., 634055 Tomsk, Russia,  
rustam.k.cherdizov@gmail.com, ash@ovpe2.hcei.tsc.ru,  
vak@oit.hcei.tsc.ru, kurmaev@oit.hcei.tsc.ru*

Studies of Z-pinch plasma as an X-ray source were carried out on the GIT-12 generator (4.7 MA, 1.7  $\mu$ s) in the IHCE SB RAS, Tomsk. The main purpose of the research was optimization of load parameters for efficient generation of the K-shell radiation in the microsecond implosion regime. A new type of a Z-pinch load, a hybrid gas-puff with an outer plasma shell, was tested. The hybrid gas-puff consists of several cascades. The inner cascade consists of the emitter material, such as neon, argon (solid gas jet), aluminum and titanium (individual wires or wire-array). An outer cascade (hollow deuterium shell) plays the role of an implosion stabilizer for the inner cascade. The third component is the outer plasma shell, which provides the initial conductivity. The combined use of the deuterium shell and the outer plasma shell has proven its effectiveness in previous experiments, providing stable implosion at times on the order of a microsecond. The efficiency of the plasma radiation source was determined as the ratio of the experimental radiation yield to the theoretically expected radiation yield calculated using the two-level model [1]. For all emitter materials studied, except titanium, the experimental K-shell radiation yield corresponded to or even exceeded theoretical expectations. The experimental results showed that the hybrid gas-puff is an effective plasma radiation source of K-shell X-rays [2–6], which allows it to be used for irradiating solid materials for scientific and applied purposes.

**Keywords:** z-pinch; K-shell radiation; plasma radiation source; pulse power; microsecond implosion regime.

### Введение

На протяжении нескольких десятилетий плазма Z-пинча является объектом исследования как мощный лабораторный источ-

ник излучения в К-линиях вещества лайнера. Такие источники способны заполнить спектральный диапазон от одного до нескольких десятков кэВ.

Использованию в качестве драйвера конструктивно более простых и дешевых генераторов со временем нарастания тока порядка микросекунды препятствуют неустойчивости, которые развиваются в процессе имплозии пламенной оболочки с большого начального радиуса. Следствием этого является резкое снижение выхода и мощности излучения.

Исследования в этом направлении, проводимые в ИСЭ СО РАН на генераторе ГИТ-12, привели к созданию гибридной нагрузки, состоящей из дейтериевого газового лайнера с внешней плазменной оболочкой и рабочего вещества лайнера (неон, аргон, алюминий, титан), размещенного на оси системы. Применение этой нагрузки позволило подавить развитие неустойчивостей. Целью экспериментов было получение максимального выхода излучения в К-линиях для каждого каскада-излучателя.

### 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. Максимальный ток составляет 4.7 МА при времени нарастания 1.7 мкс.

Для формирования газовых оболочек использовался быстрый электромагнитный клапан с раздельными объемами, что позволяет наполнять каскады разными газами и менять их массы независимо друг от друга.

Внешний каскад представлял собой полую газовую дейтериевую 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. В ходе экспериментов параметры этих оболочек не менялись. Эти оболочки определяют пиковый ток и время имплозии пинча ( $2.70 \pm 0.15$  МА,  $740 \pm 50$  нс), а также обеспечивают подавление неустойчивостей.

Внутренний каскад представлял собой или сплошную газовую струю диаметром 6 мм (аргон) и 10 мм (неон), или же проволоочные каскады из алюминия и титана.

Для регистрации излучения в К-линиях использовался широкий набор диагностический аппаратуры [2-6].

Схематично гибридная нагрузка изображена на рис. 1.



Рис. 1. Схематичное изображение гибридного лайнера с внешней плазменной оболочкой

### Результаты экспериментов

Варьируя параметры внутреннего каскада, были определены максимальные выход излучения в К-линиях и эффективность плазменного источника излучения (ПИИ) для каждого каскада-излучателя. Эффективность ПИИ определялась как отношение экспериментального выхода излучения к теоретически ожидаемому для данного уровня тока [1].

Полученные результаты для каждого вещества каскада-излучателя показаны в таблице 1.

Табл. 1. Экспериментальные данные

Излучатель	Энергия, кэВ	Ток, МА	$Y_{K-Shell}$ , кДж/см	Эфф., отн.ед.
Ne	0.9 – 1.3	2.73	14.50	2.41
Al	1.6 – 2.0	2.67	5.10	1.16
Ar	3.1 – 4.0	2.77	2.15	0.99
Ti	4.8 – 6.0	2.67	0.22	0.29

Как видно из таблицы 1, с ростом энергии квантов выход К-излучения и эффективность ПИИ падают. Более наглядно изобразим эту закономерность на рис. 2.

Возможно, причиной пониженной эффективности плазменного источника излучения в К-линиях титана является недостаточная скорость ввода энергии в плазму пинча, которая не может компенсировать

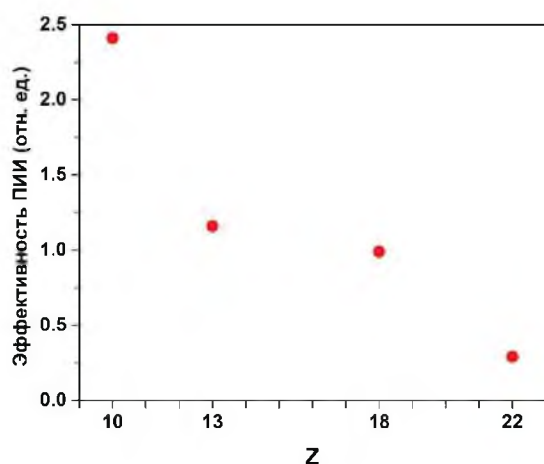


Рис. 2. Зависимость эффективности ПИИ от атомного номера вещества излучателя

возрастающие радиационные потери в более мягком спектральном диапазоне при переходе к элементам с большим атомным номером. Генерация К-излучения элементами с достаточно высоким атомным номером является сложной задачей, даже при малых ( $\sim 100$  нс) временах имплозии [5]. Вполне вероятно, что зависимость, показанная на рис. 2, является фундаментальной закономерностью.

Тем не менее, гибридная нагрузка, имея хорошую воспроизводимость, показала себя как многообещающий и перспективный плазменный источник излучения.

## Заключение

Полученные результаты свидетельствуют, что конструктивно более простые и дешевые микросекундные генераторы тока могут быть использованы для генерации К-излучения с целью исследования взаимодействия излучения с веществом в научных и прикладных целях.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федера-

ции (тема № FWRM-2021-0001), исследования гибридного аргонового лайнера проводились в рамках гранта Российского научного фонда № 22-29-01554 [2, 3].

## Библиографические ссылки

1. Mosher D., Qi N., Krishnan M. A two-level model for K-shell radiation scaling of the imploding Z-pinch plasma radiation source. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1998; 26(3): 1052-1061.
2. Shishlov A.V., Cherdizov R.K., Kokshenev V.A., Kurmaev N.E., Vagaytsev S.A. Generation of Ar K-shell radiation using a hybrid gas puff with an outer plasma shell. Edited by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (October 2–8, 2022), Tomsk. Tomsk: TPU Publishing House, 2022, p. 140.
3. Cherdizov R.K., Shishlov A.V., Kokshenev V.A., Kurmaev N.E., Vagaytsev S.A. Optimization of double shell hybrid gas-puff with outer plasma shell for efficient generation of K-shell radiation in the microsecond implosion regime. Edited by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (October 2–8, 2022), Tomsk. Tomsk: TPU Publishing House, 2022, p. 148.
4. Klir D., Cherdizov R.K., Cikhardt J., Kokshenev V.A., Kurmaev N.E., Shishlov A.V., et al. K-shell radiation and neutron emission from z-pinch plasmas generated by hybrid gas-puff implosions onto on-axis wires. *Phys. Plasmas*. 2021; 28: 062708.
5. Шишлов А.В., Чердилов Р.К., Кокшенев В.А., Курмаев Н.Е. Генерация излучения в К-линиях титана с использованием гибридной нагрузки при микросекундных временах имплозии. В кн.: Сорокин Д.А., ред. Материалы 9-ого Междунар. конгресса «Потоки энергии и радиационные эффекты» (16-21 сент. 2024), г. Томск. Томск: Издательство «Академиздат»; 2024. С. 129-136.
6. Чердилов Р.К., Кокшенев В.А., Курмаев Н.Е., Шишлов А.В. Исследование двухкасадного гибридного газового лайнера для эффективной генерации излучения в К-линиях неона при микросекундных временах имплозии. В кн.: Сорокин Д.А., ред. Материалы 9-ого Междунар. конгресса «Потоки энергии и радиационные эффекты» (16-21 сент. 2024), г. Томск. Томск: Издательство «Академиздат»; 2024. С. 137-142.