

Генерация излучения в К-линиях титана с использованием гибридной нагрузки при микросекундных временах имплозии

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

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**ash@ovpe2.hcei.tsc.ru*

Абстракт. На генераторе ГИТ-12 проведены исследования гибридной нагрузки, состоящей из дейтериевого газового лайнера с внешней плазменной оболочкой и титановыми проводниками, размещенными на оси системы. Целью работы было получение экспериментальных данных об эффективности плазменного источника излучения при генерации квантов с энергией 4.5 кэВ и выше. Эксперименты проводились на генераторе ГИТ-12 (4.7 МА, 1.7 мкс) без использования плазменных прерывателей тока. Параметры дейтериевой оболочки и внешней плазменной оболочки оставались неизменными в ходе экспериментов. Именно они определяли пиковый ток и время имплозии пинча: 2.7 ± 0.1 МА, 740 ± 50 нс. При этом варьировались количество, общая масса и взаимное расположение титановых проводников. Максимальный выход излучения в К-линиях титана составил 220 Дж/см при мощности излучения 60 ГВт/см. Результат получен при использовании сборки из трех проводников диаметром 28 мкм, расположенных на оси без зазора. Эффективность плазменного источника излучения, которая определялась как отношение экспериментального выхода излучения к теоретически ожидаемому выходу, для лучшего выстрела составила лишь 0.29. Для сравнения, в экспериментах с гибридными лайнерами с алюминиевыми проводниками эффективность плазменного источника излучения в К-линиях алюминия для лучшего выстрела составила 1.2. Таким образом, переход к рабочему веществу с большим атомным номером (от 13 к 22) привел к четырехкратному падению эффективности плазменного источника излучения.

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

1. Введение

На протяжении нескольких десятилетий плазма Z-пинча является объектом исследования как мощный лабораторный источник мягкого рентгеновского излучения [1]. Усилия экспериментаторов и теоретиков направлены на понимание процессов, обеспечивающих эффективное преобразование энергии сильноточного генератора в энергию плазмы и далее в энергию излучения заданного спектрального диапазона. Естественным препятствием при создании плазменных источников излучения на основе Z-пинчей являются неустойчивости, которые развиваются в процессе имплозии плазменной оболочки. Следствием этого является резкое снижение выхода и мощности излучения при увеличении времени имплозии лайнера. Решением проблемы стал подход, использующий профилирование распределения газа в межэлектродном зазоре генератора [2, 3]. Двух- и трехкаскадные лайнеры со сплошным внутренним каскадом были успешно применены на различных генераторах для эффективной генерации излучения в К-линиях аргона при временах имплозии порядка 200–300 нс [4–7]. К сожалению, даже при использовании данного вида нагрузки, проблема эффективной генерации излучения в К-линиях при микросекундных временах имплозии (> 500 нс) не решается.

Дальнейшие исследования в этом направлении, проводимые в ИСЭ СО РАН на генераторе ГИТ-12, привели нас к созданию гибридной нагрузки, состоящей из дейтериевого газового лайнера с внешней плазменной оболочкой и рабочего вещества лайнера, размещенного на оси системы. В качестве внутреннего каскада может применяться газовая струя, одиночный проводник или набор проводников. Гибридный лайнер с использованием алюминиевых проводников показал свою перспективность для создания эффективных плазменных источников излучения в К-линиях рабочего вещества лайнера при

микросекундных временах имплозии [8]. Целью представленного в данной работе исследования было получение экспериментальных данных о динамике имплозии и излучательных характеристиках гибридных нагрузок, а также об эффективности плазменного источника излучения при генерации квантов в более жестком спектральном диапазоне (4.5 кэВ и выше).

2. Экспериментальное оборудование и диагностика

Генератор ГИТ-12 представляет собой генератор импульсов тока с промежуточным индуктивным накопителем и микросекундным плазменным прерывателем тока (МППТ) [9]. Эксперименты проводились при зарядном напряжении первичного накопителя 50 кВ, при этом энергозапас генератора составляет 2.6 МДж. Генератор эксплуатировался в режиме прямого вывода энергии в нагрузку, т.е. без использования МППТ для обострения фронта тока. В этом режиме амплитуда тока в короткозамкнутой нагрузке составляет 4.7 МА при фронте тока 1.7 мкс.

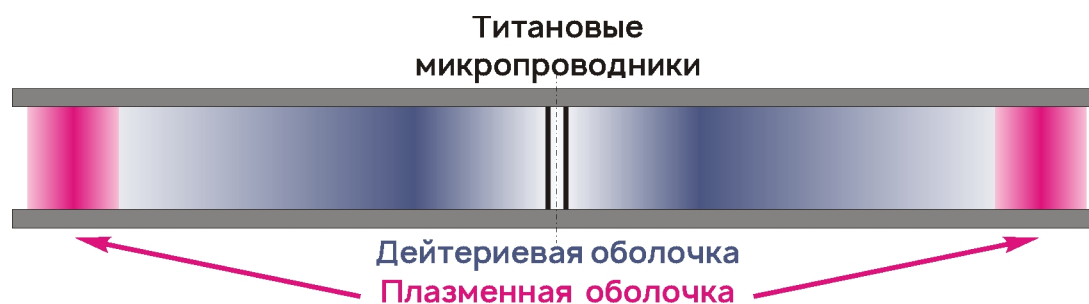


Рис. 1. Схематичное изображение гибридной нагрузки.

Гибридная нагрузка состояла из трех каскадов: внешняя плазменная оболочка, промежуточная дейтериевая оболочка и титановые микропроводники на оси системы. Схематическое изображение нагрузки показано на Рис. 1. Плазменная оболочка, состоящая из ионов водорода и углерода, создавалась на диаметре 350 мм с помощью 48 плазменных пушек, расположенных на анодном фланце. Задержка между срабатыванием плазменных пушек и пуском генератора тока составляла 1.7 ± 0.16 мкс. Линейная масса плазменной оболочки составляет порядка 5 мкг/см. Формирование промежуточной дейтериевой оболочки осуществлялось с помощью электромагнитного клапана [10], также расположенного со стороны анода. Напуск газа в межэлектродный зазор генератора осуществлялся через кольцевое сопло диаметром 80 мм. Определение линейной массы газового лайнера производилось перед каждым экспериментом после сборки клапана по методике, описанной в [11]. Межэлектродный зазор генератора ограничивался сеткой из нержавеющей стали с коэффициентом пропускания 71% и составлял 20.3 ± 0.3 мм. Внутренний каскад на оси системы представлял собой либо одиночный титановый микропроводник, либо набор таких проводников. В нашем распоряжении имелись микропроводники диаметром 28, 50 и 125 мкм.

Для измерения токов и напряжения использовался стандартный комплекс электрофизической диагностики генератора ГИТ-12. Набор диагностических средств для исследования имплозии гибридного лайнера включал в себя следующее. Изображение пинча в оптическом диапазоне регистрировалось с помощью высокоскоростной камеры HSFC-Pro с экспозицией кадра 3 нс. Для записи временной развертки процесса имплозии в видимой части спектра использовался фотоэлектрический регистратор ФЭР-7. Скорость развертки составляла 250 нс/см, поле зрения регистратора позволяло фиксировать процессы внутри

радиуса 2 см от оси пинча. Изображение плазменного столба в финальной стадии имплозии регистрировалось с помощью интегральной камеры-обскуры с пространственным разрешением 200 мкм. Отверстие камеры-обскуры располагалось за фильтром Ве 25 мкм + Teflon 20 мкм, то есть на пленке регистрировались фотоны с энергией 2 кэВ и выше. В некоторых выстрелах в камеру-обскуру устанавливалась стопа из двух пленок так, что первая пленка служила фильтром для второй пленки, которая в этом случае регистрировала фотоны с энергией выше 3 кэВ.

Измерение мощности излучения в К-линиях титана осуществлялось с помощью двух фотопроводящих детекторов (PCD) и вакуумного рентгеновского диода (XRD) с медным фотокатодом. Для выделения нужного спектрального диапазона регистрации, датчики излучения располагались за фильтрами: PCD1 и PCD2 – Teflon 30 мкм + Polypropylene 20 мкм; XRD1 – Teflon 80 мкм. Еще один вакуумный рентгеновский диод (XRD3) с алюминиевым фотокатодом располагался за фильтром из Mylar 3 мкм и имел чувствительность в более широком диапазоне квантов. Данные о квантовой эффективности фотокатодов и коэффициентов пропускания фильтров для расчета средневзвешенной по спектру чувствительности детекторов были взяты в [12, 13]. Общая погрешность измерения выхода К-излучения титана оценивается в 15%, что включает в себя неопределенность квантовой эффективности, неопределенность коэффициентов пропускания фильтров и изменение рентгеновских спектров титана при различных параметрах плазмы. Интегральный выход нейтронов измерялся с помощью серебряного активационного детектора, расположенного на расстоянии 4.55 м от оси пинча.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В гибридной нагрузке каждый из трех каскадов выполняет определенную функцию. Внешняя плазменная оболочка позволяет сформировать однородный токовый слой на большом начальном радиусе. Дополнительным бонусом является отсутствие необходимости в дополнительной системе предыонизации, которая обычно используется при работе с газовыми лайнерами. Газовая оболочка из дейтерия формируется на диаметре 80 мм, но за время напуска газа в межэлектродный зазор вещество оболочки успевает распространиться вплоть до диаметра плазменной оболочки. Важную роль при этом играют катодная и анодная сетки, на которых происходит переотражение газа. При этом в межэлектродном промежутке формируется спадающий по радиусу профиль плотности вещества, который в дальнейшем обеспечивает стабилизацию процесса имплозии лайнера [2, 3]. Наконец внутренний каскад, рабочее вещество на оси системы, обеспечивает генерацию излучения в интересующем спектральном диапазоне.

В общем случае необходимо проводить оптимизацию всех трех каскадов для обеспечения согласования нагрузки с током генератора, стабильности процесса имплозии и максимально возможного выхода излучения при данном пиковом токе имплозии. В ходе ранее проведенных экспериментов с дейтериевыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой [14, 15] нами уже были найдены оптимальные параметры дейтериевой и внешней плазменной оболочки. На начальном этапе было выполнено два выстрела с дейтериевым лайнером с внешней плазменной оболочкой. По результатам этих выстрелов мы могли убедиться, что параметры плазменной и дейтериевой оболочки обеспечивают оптимальный режим имплозии, который характеризуется наличием двойного пика на осциллограмме производной тока, пиковым напряжением на межэлектродном зазоре генератора порядка 1 МВ и выше, а также выходом нейтронов на уровне $2 \cdot 10^{12}$ нейтронов за импульс. В ходе дальнейших экспериментов параметры двух внешних каскадов не изменялись, а варьировались лишь параметры внутреннего каскада, расположенного на оси системы.

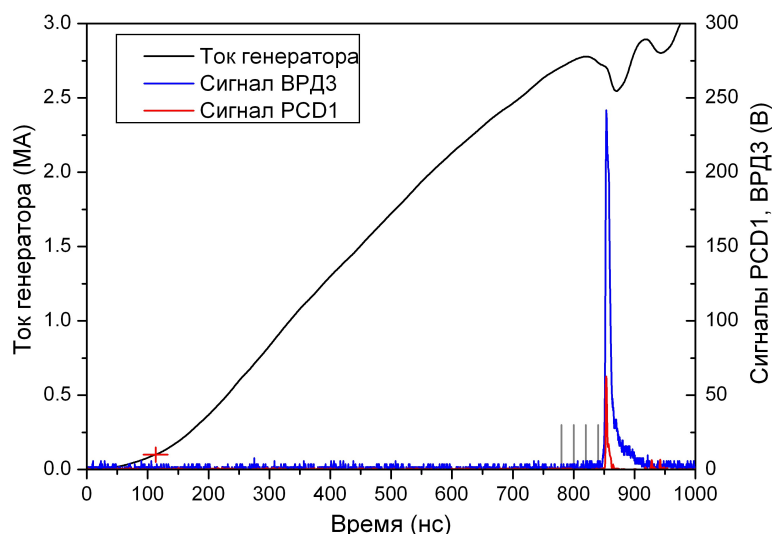


Рис. 2. Ток генератора и сигналы датчиков излучения PCD1 и XRD3. Серыми вертикальными линиями на графике отмечены время регистрации изображений высокоскоростной камерой HSFC-Pro (см. Рис. 3). Выстрел №3231.

Параметры дейтериевой и внешней плазменной оболочек определяют время и пиковый ток имплозии. На Рис. 2 показана осциллограмма тока и сигналы датчиков излучения в выстреле №3231, которые достаточно типичны для всей серии экспериментов. Время имплозии определялось как интервал времени между моментом достижения тока генератора амплитуды 100 кА (отмечено на Рис. 2 красным крестом) и пиком сигнала детектора, регистрирующего излучение в К-линиях титана. Среднее время имплозии составило 744 ± 60 нс (в выстреле №3231, приведенном на рисунке – 741 нс). Разброс во времени имплозии определялся разбросом срабатывания плазменных пушек, а также параметрами дейтериевой оболочки. Указанное время имплозии соответствует пиковому току имплозии 2.72 ± 0.1 МА.

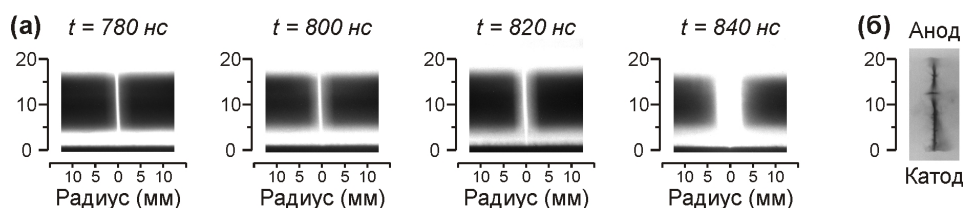


Рис. 3а. Изображения, полученные с помощью высокоскоростной камеры HSFC-Pro. Время соответствует меткам, отмеченным серыми вертикальными линиями на Рис. 2б Интегральное изображение пинча, полученное с помощью камеры обскуры. Выстрел №3231.

Изображения, полученные с помощью высокоскоростной камеры (Рис. 3а), фиксируют интересную особенность процесса имплозии гибридных нагрузок. Свечение проводника начинается за 110–120 нс до пика излучения в К-линиях титана. Это можно интерпретировать, как раннее проникновение части тока на ось системы. Кадры высокоскоростной камеры фиксируют типичный процесс электрического взрыва проводников (ЭВП): свечение зерна проводника, образование плазменной шубы вокруг проводника, увеличение ее диаметра. По всей видимости, на последнем кадре ($t = 840$ нс) регистрируется приход дейтериевой оболочки с основным током, так как проводник и плазменная шуба ярко вспыхивают. В дальнейшем происходит их совместная имплозия и формирование компактного пинча с диаметром менее миллиметра (Рис. 3б).

Несмотря на компактность финального пинча, в целом его качество далеко от идеального. В большинстве выстрелов области вблизи электродов слабо излучают в К-линиях титана, либо излучение отсутствует. При увеличении массы центрального каскада наблюдается формирование участков пинча в виде цепочки горячих точек иногда разделенными неизлучающими областями. Такая картина, скорее всего, свидетельствует о недостаточном энергокладе в плазму Z-пинча.

На первом этапе экспериментов в качестве внутреннего каскада использовались одиночные титановые микропроводники. Как указывалось выше, в нашем распоряжении имелись микропроводники с диаметром 28, 50 и 125 мкм, которые имели линейную массу 27.6, 88.5 и 553 мкг/см, соответственно. Мощность и выход излучения в К-линиях титана измерялись с помощью фотопроводящих детекторов (PCD) и вакуумного рентгеновского диода (XRD). Эти данные достаточно хорошо коррелируют между собой. Однако величины выхода излучения в К-линиях титана, определяемые с помощью XRD, систематически превышали выходы изучения, регистрируемые PDC, на 50–60 Дж/см. Возможно, это связано с тем, что чувствительность PCD начинает падать при увеличении энергии квантов выше 4–5 кэВ [16]. Далее по тексту и на рисунках приведена более консервативная оценка мощности и выхода излучения в К-линиях титана, полученная с помощью фотопроводящих детекторов.

Зависимость выхода излучения в К-линиях титана от линейной массы микропроводников показана на Рис. 4. Максимальный выход излучения получен при использовании проводника диаметром 50 мкм с массой 88.5 мкг/см (выстрел №3231). Выход изучения несколько снижается при массе проводника 27.6 мкг/см и падает в два раза при увеличении массы до 553 мкг/см. Формирование компактного пинча, которое фиксируется на обскурограммах, подразумевает достаточно короткий импульс излучения (см. Рис. 2). Действительно, ширина импульса излучения в К-линиях титана составила 2.4 нс, 2.0 нс и 1.6 нс при массах проводника 27.6, 88.5 и 553 мкг/см, соответственно. В более мягком спектральном диапазоне, регистрируемом XRD3, ширина импульса излучения наоборот растет с увеличением массы проводника: 3.6 нс, 8 нс и 16 нс. Соответственно, увеличивается и выход излучения в более мягком спектральном диапазоне. Это является логичным наблюдением, так как при одинаковом энергокладе существенно увеличивается количество излучающих частиц при росте массы внутреннего каскада.

В наших ранних экспериментах с гибридной нагрузкой, где в качестве внутреннего каскада использовались алюминиевые проводники [8], наблюдалось увеличение выхода излучения в К-линиях алюминия при использовании в качестве центрального каскада набора из нескольких проводников. Этот же подход был использован в экспериментах с титановыми микропроводниками на втором этапе экспериментов. В качестве центрального каскада использовались наборы из двух, трех или четырех микропроводников диаметром 28 мкм. Использовались два варианта установки набора проводников. В первом варианте проводники устанавливались с зазором 1 мм. В случае трех проводников они образовывали треугольник, в случае четырех проводников – квадрат. Выстрел №3241 был произведен с тремя проводниками, установленными в ряд. Во втором варианте проводники устанавливались по центру системы без зазора. Результаты этих экспериментов также представлены на Рис. 4.

Интересным является то, что полученные зависимости выхода излучения в К-линиях титана от линейной суммарной массы проводников существенно отличаются для двух вариантов расположения проводников. При расположении микропроводников с зазором максимум излучения наблюдается при использовании набора из двух проводников с суммарной массой 55 мкг/см. Увеличение количества проводников и, соответственно, их общей массы ведет к резкому падению выхода излучения в К-линиях титана. В случае установки набора проводников на оси системы без зазора, максимум выхода излучения

наблюдался в диапазоне масс от 55 до 83 мкг/см. При увеличении массы до 110.5 мкг/см наблюдалось снижение выхода излучения, но не такое радикальное, как в случае набора проводников с зазором. Представляет интерес использовать проводники с меньшим диаметром, но титановые микропроводники с диаметром менее 20 мкм не выпускаются мировой промышленностью.

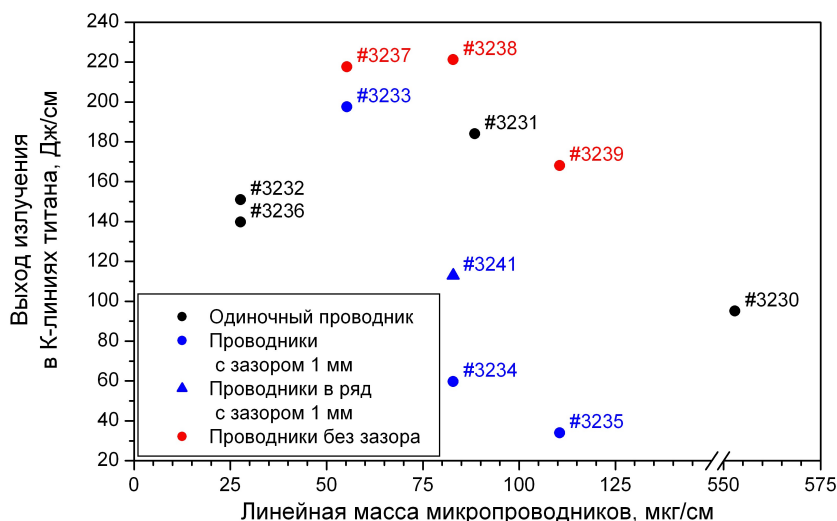


Рис. 4. Зависимость выхода излучения в К-линиях титана от линейной массы титановых проводников.

Максимальный выход излучения в К-линиях титана был зарегистрирован в выстреле №3238: 220 Дж/см, при мощности излучения 60 ГВт/см. Пиковый ток и время имплозии в данном выстреле составили 2.67 МА и 710 нс, соответственно. Для всех выстрелов проведенной серии экспериментов был произведен расчет эффективности плазменного источника излучения. Этот показатель определяется как отношение экспериментально зарегистрированного выхода излучения в К-линиях титана к теоретически ожидаемому выходу излучения при данном уровне тока генератора. Для расчета теоретического выхода излучения в К-линиях титана использовалась двухуровневая модель [17]. Такой подход позволяет сравнивать результаты экспериментов, проведенные с разными нагрузками, на разных генераторах и при разных уровнях тока. Для выстрела №3238, который продемонстрировал максимальный выход излучения в К-линиях титана, эффективность плазменного источника излучения составила 0.29. Для сравнения, в экспериментах с гибридными лайнерами с алюминиевыми проводниками эффективность плазменного источника излучения в К-линиях алюминия для лучшего выстрела в серии экспериментов составила 1.2. Таким образом, переход к рабочему веществу с большим атомным номером (от 13 к 22) привел к четырехкратному падению эффективности плазменного источника излучения.

4. Заключение

На генераторе ГИТ-12 проведены исследования гибридной нагрузки, состоящей из дейтериевого газового лайнера с внешней плазменной оболочкой и титановыми проводниками, размещенными на оси системы. В ходе экспериментов были получены данные о динамике имплозии и излучательных характеристиках гибридного лайнера. Регистрируемая динамика имплозии является типичной для гибридной нагрузки и уже наблюдалась ранее в экспериментах с гибридными лайнерами, где в качестве излучателя использовались алюминиевые проводники. Максимальный выход излучения в К-линиях

титана составил 220 Дж/см, что соответствует примерно 30% от теоретически ожидаемого выхода излучения. Имеющиеся в настоящее время данные не позволяют сделать однозначный вывод о причинах резкого снижения эффективности плазменного источника излучения при использовании в качестве излучателя вещества с большим атомным номером. Возможно, что дальнейшие эксперименты по оптимизации гибридной нагрузки позволят увеличить эффективность плазменного источника излучения. С другой стороны, наблюдаемое снижение эффективности может быть следствием объективных физических причин, например, увеличением радиационных потерь в более мягком спектральном диапазоне при переходе к химическим элементам с большим атомным номером. Ответы на эти вопросы будут получены в ходе дальнейших исследований.

Благодарность

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.J. Commisso, A Review of the Gas-Puff Z-Pinch as an X-Ray and Neutron Source, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **43**, 2385, 2015; doi: 10.1109/TPS.2015.2451157
- [2] S.M. Gol'berg, and A.L. Velikovich, Suppression of Rayleigh–Taylor instability by the snowplow mechanism, *Phys. Fluids B: Plasma Phys.*, vol. **5**, 1164, 1993; doi: 10.1063/1.860974
- [3] 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
- [4] A.V. Shishlov, et al., Formation of tight plasma pinches and generation of high-power soft x-ray radiation pulses in fast Z-pinch implosions, *Laser Physics*, vol. **16**, 183, 2006; doi: 10.1134/s1054660x06010178
- [5] H. Sze, et al., Efficient radiation production in long implosions of structured gas-puff Z pinch loads from large initial radius, *Phys. Rev. Lett.*, vol. **957**, 105001, 2005; doi: 10.1103/PhysRevLett.95.105001
- [6] J.S. Levine, et al., Implosion dynamics and radiative characteristics of a high yield structured gas puff load, *Phys. Plasmas*, vol. **13**, 082702, 2006; doi: 10.1063/1.2221660
- [7] R. J. Commisso, et al., Energetics of a long-implosion-time, 12-cm-diameter argon-gas-puff Z pinch at 6.5 MA, *2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference*, Albuquerque, USA, 1773, 2007; doi: 10.1109/ppps.2007.4652535
- [8] 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
- [9] S.P. Bugaev, et al., GIT16: A megajoule pulse generator with plasma switch for a Z-pinch load, *Russ. Phys. J.*, vol. **40**, 1154, 1997, doi: 10.1007/bf02524303
- [10] R.B. Baksht et al., Electromagnet valve for a multilayer-puff nozzle, *Instrum. Experim. Techn.*, vol. **41**, 536, 1998.
- [11] A.Yu. Labetskii, A.G. Russkikh, A.V. Fedyunin, and A.V. Shishlov, Determination of the mass of an imploding gas puff, *Russ. Phys. J.*, vol. **42**, 1048, 1999, doi: 10.1007/bf02512418.
- [12] R.H. Day, P. Lee, E.B. Saloman, and D.J. Nagel, Photoelectric quantum efficiencies and filter window absorption coefficients from 20 eV to 10 KeV, *J. Appl. Phys.*, vol. **52**, 6965, 1981, doi: 10.1063/1.328653

- [13] B.L. Henke, E.M. Gullikson, and J.C. Davis, X-Ray Interactions: Photoabsorption, Scattering, Transmission, and Reflection at $E = 50\text{-}30.000$ eV, $Z = 1\text{-}92$, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, vol. **54**, 181, 1993, doi: 10.1006/adnd.1993.1013.
- [14] D. Klir, *et al.*, Efficient Neutron Production from a Novel Configuration of Deuterium Gas-Puff Z-Pinch, *Phys. Rev. Lett.*, vol. **112**, 095001, 2014, doi: 10.1103/PhysRevLett.112.095001
- [15] D. Klir et al., Efficient generation of fast neutrons by magnetized deuterons in an optimized deuterium gas-puff z-pinch, *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. **57**, 044005, 2015, doi: 10.1088/0741-3335/57/4/044005
- [16] R.B. Spielman, Diamond photoconducting detectors as high power z-pinch diagnostics (invited), *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **66**, 867, 1995, doi: 10.1063/1.1146188
- [17] 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**, 1052, 1998, doi: 10.1109/27.700887