

“Точечный” источник мягкого рентгеновского излучения на основе газового пинча

В. И. Зайцев, Г. С. Волков, И. А. Барыков, Е. В. Грабовский, В. В. Александров, А. С. Болдарев⁺, В. А. Гасилов⁺

Государственный научный центр РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований
142190 Троицк, Московская обл., Россия

⁺Институт математического моделирования РАН, 125047 Москва, Россия

Поступила в редакцию 10 сентября 2008 г.

Представлены результаты исследований излучающего Z-пинча с профилированным начальным распределением плотности газа вдоль Z. Распределение газа с максимумом плотности и минимальным поперечным размером в центре разрядного промежутка создается импульсным газовым клапаном со специально разработанным соплом. Измерения излучательных характеристик пинча выполнены с токами пинча 200 кА в среде Ne. Экспериментально подобрана плотность газа, при которой в центре разрядного промежутка формируется область с характерными размерами менее 1 мм, излучающая кванты киловольтового диапазона в течение времени менее 5 нс. Обсуждаются перспективы создания источника рентгеновского излучения с использованием данного механизма.

PACS: 52.58.Lq, 52.80.Qj

1. Введение. В последние годы Z-пинчи находят все большее применение в качестве источников рентгеновского излучения в таких приложениях как рентгеновская литография, рентгенография малоплотных объектов, инерциальный термоядерный синтез. В зависимости от задачи используются различные типы нагрузок, например проволочные сборки, газовые струи, определяющие начальное распределение рабочего вещества. В качестве локализованного в пространстве источника рентгеновского излучения малых размеров широкое применение находят нагрузки, образованные из двух (или больше) скрещенных проволок (X-пинч) [1]. Основным препятствием к широкому применению X-пинча является необходимость установки проволочной конфигурации после каждого пуска установки, что влечет за собой разгерметизацию вакуумного объема, последующую откачку и т.д. Замена проволочной конфигурации газовой струей с определенным пространственным распределением плотности, исключает эти трудности, так как обеспечивает более оперативное восстановление начальной конфигурации для следующего разряда. Предварительные расчеты излучательной динамики пинча, образованного из профилированной газовой струи, показали перспективность создания источника излучения малых размеров и послужили основанием для проведения комплексных исследований, включающих как расчетно-теоретические, так и экспериментальные работы, первые результаты которых представлены в данной публикации.

2. Формирование газовой струи. Задача формирования профилированной газовой струи в разрядном промежутке заключалась в создании распределения плотности, достаточно близком к случаю классического проволочного X-пинча. Длина разрядного промежутка определялась конструкцией установки и составляла 1.6 см.

Включению высокого напряжения предшествовало заполнение разрядного промежутка газовой струей (газ Ne), создаваемой электромагнитным клапаном [2] со специально разработанным соплом.

“Тонкий” профиль плотности в газовой струе, входящей в вакуумную камеру, может быть создан струей с максимально возможным числом Маха и, соответственно, соплами с очень высоким отношением площади выходного сечения к площади критического сечения. Однако повышение числа Маха ограничено техническими возможностями изготовления сопла. Малый размер разрядного промежутка приводит к необходимости использования сопел с критическим сечением микронных размеров.

Были рассмотрены различные варианты конструкции сопла, из которых наиболее просто реализуемым является кольцевое коническое сопло. В расчете использовался конечноразностный метод на неструктурированных треугольных сетках для решения уравнений газовой динамики и нахождения распределения плотности в разрядном промежутке. На основе оптимизационных расчетов была разработана конструкция сверхзвукового сопла,

обеспечивающая распределение газа, приведенное на рис.1. Расчетное значение числа Маха составляет

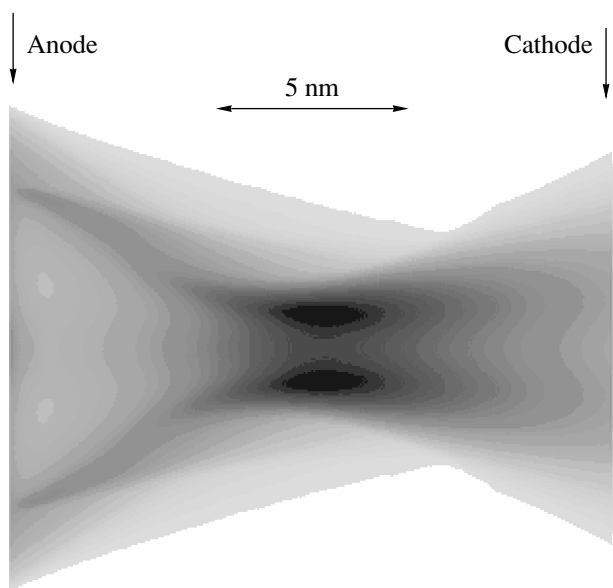


Рис.1. Расчетное полутоновое изображение продольного сечения газовой струи из неона при числе Маха, равном 6

$M \approx 6$. В типичном случае область с максимальным значением плотности имеет цилиндрическую форму диаметром около 2 мм и длиной 4–5 мм, что определяется структурой газодинамического течения.

3. Схема эксперимента. Схема эксперимента приведена на рис.2. Ток в разрядном промежутке создавался при разряде конденсаторной батареи емкостью 8 мкФ, заряженной до напряжения 20 кВ через вакуумный коммутирующий разрядник. Волновое сопротивление разрядного контура составляло величину $\rho = 0.08$ Ом, что позволяло получать ток разряда через пинч с амплитудой до 200 кА с временем нарастания ~ 1 мкс [3]. Максимальная плотность сходящейся газовой струи создавалась примерно в середине разрядного промежутка. Масса газа регулировалась величиной задержки срабатывания установки относительно момента времени открытия электромагнитного клапана, напускающего газ в форкамеру сопла. Величина задержки регулировалась от 400 до 480 мкс. Эксперименты проводились при постоянном давлении над клапаном 3.4 атм.

В эксперименте измерялись как электротехнические характеристики пинча (ток пинча и напряжение на пинче), так и его излучательные свойства. Рентгеновское излучение регистрировалось полупроводниковым кремниевым $p-i-n$ детектором типа

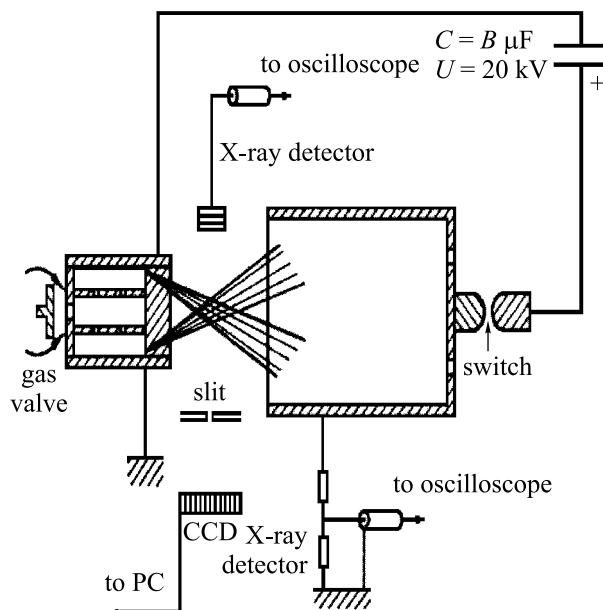


Рис.2. Схема эксперимента: Gas valve – газовый клапан; switch – коммутирующий управляемый разрядник; X-ray detector – полупроводниковый детектор типа СППД-11-04; slit – щель; CCD X-ray detector – линейный ПЗС

СППД-11-04, имеющим временное разрешение порядка 1.5 нс. Детектор располагался на расстоянии 65 см от пинча и был закрыт алюминиевым фильтром толщиной 6 мкм. Измерения проводились в спектральном интервале 0.8–1.5 кэВ, что соответствовало диапазону излучения $[H]-[He]$ -ионов неона. Размеры области излучения определялись с помощью камеры-обскуры с регистрацией излучения на пленку РФ-3 с уменьшением 1:2. Одновременно формировались два изображения камерами-обскурами с различными диаметрами отверстий (70 и 140 мкм) на одну пленку. Сделано это было из-за того, что излучающий объект часто имел сравнительно малый размер, и с помощью одной камеры-обскуры было трудно отличить изображение пинча от дефекта в виде точки на пленке. Пространственное разрешение по объекту составляло 200 мкм.

Обработка изображений, полученных на пленке, показала, что излучающий объект состоит из отдельных точек, расположенных вдоль оси пинча, или выглядит как микропинч малого поперечного размера, вытянутый вдоль оси пинча. Фотографическая методика регистрации размеров излучателя требует достаточно много времени, так как связана с разгерметизацией вакуумного объема, обработкой пленки и последующей откачкой. Поэтому в качестве

ве детектора рентгеновского излучения был применен линейный рентгеночувствительный прибор с зарядовой связью (ПЗС), расположенный позади щели, которая строила одномерное изображение излучателя, что позволяло оперативно регистрировать его продольные размеры. Размер ячеек составлял 8×200 мкм. Масштаб изображения составлял 1:1 при размере щели 45 мкм, что соответствовало разрешению по объекту ~ 90 мкм. Все изображения снимались за фильтром (лавсан $2.4 \text{ мкм} + 0.85 \text{ мкм Al}$). Сигнал с ПЗС в реальном масштабе отображался на экране компьютера.

4. Основные результаты. Основными исследованиями являлись измерения параметров излучения пинча в зависимости от концентрации газа в струе. При относительно небольших задержках срабатывания установки относительно запуска электромагнитного клапана ($\tau = 400\text{--}430$ мкс) излучение представляет серию коротких импульсов с большим разбросом по времени между ними. На обскурограмме наблюдается серия точечных излучателей, вытянутых на расстояние порядка 3 мм вдоль оси пинча.

При задержках 440–460 мкс реализуются режимы сжатия, при которых наблюдается одиночный импульс рентгеновского излучения с длительностью менее 5 нс. В месте схождения струи образуется компактный источник излучения с размером вдоль оси разряда от 100 до 800 мкм и поперек – менее 200 мкм.

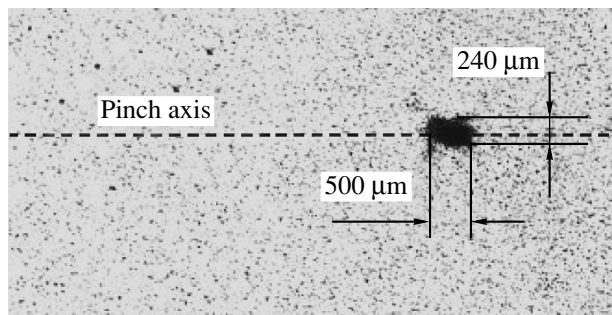


Рис.3. Обскурограмма пинча: изображение пинча, полученное с отверстием обскуры 70 мкм. Фильтр – 6 мкм Al. Разрешение по объекту 200 мкм

На рис.3 приведено изображение пинча, снятое двойной камерой-обкурой при задержке 450 мкс. На рис.4 приведен импульс излучения, синхронизованный с напряжением на пинче. Длительность импульса излучения порядка 5 нс (рис.5). Считая, что излучение соответствует линиям [H]–[He]-неона, получаем оценку по выходу излучения ~ 30 мДж. На рис.6 приведено изображение пинча, снятое на ПЗС-линейку за щелью с пространственным разрешением

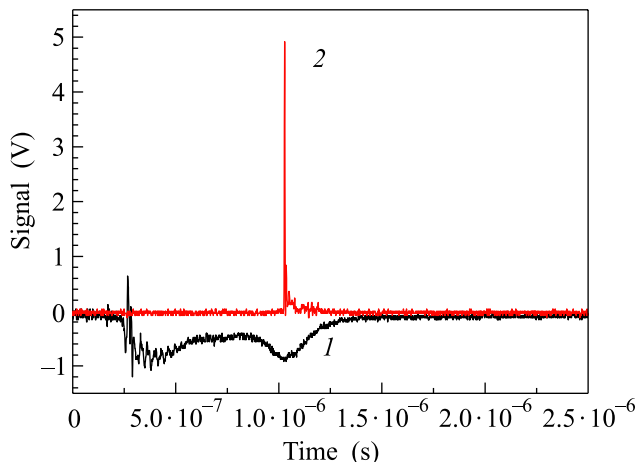


Рис.4. Осциллограммы напряжения на пинче (нижняя осциллограмма) и сигнала мягкого рентгеновского излучения (верхняя осциллограмма)

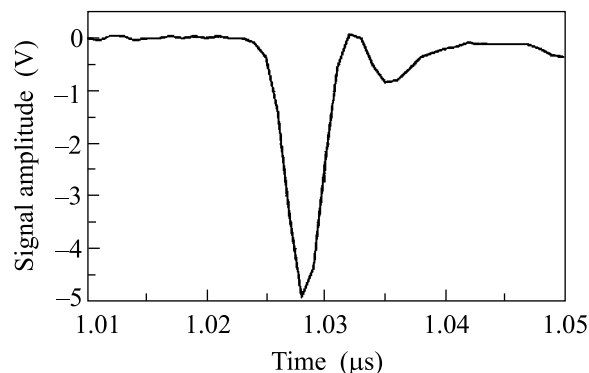


Рис.5. Осциллограмма сигнала мягкого рентгеновского излучения. Полупроводниковый детектор типа СПД-11-04 с временным разрешением 1.5 нс. Фильтр – 6 мкм Al

вдоль оси пинча при задержке 450 мкс. Характерный размер излучателя вдоль оси пинча составляет 400 мкм. Минимальный размер источника, полученный в эксперименте, не превышает 100 мкм и фактически соответствует пространственному разрешению методики измерений. При задержках 440–460 мкс разброс в положении источника излучения вдоль оси разряда от выстрела к выстрелу составляет 700 мкм.

Увеличение задержки до 470 мкс приводит к существенным изменениям формы тока и напряжения на пинче и исчезновению области горячей плазмы (излучение не регистрируется).

Необходимо отметить разброс параметров излучения пинча (геометрический размер, временные характеристики излучателя) от пуска к пуску. Выяснение причин разброса является предметом дальнейших исследований.

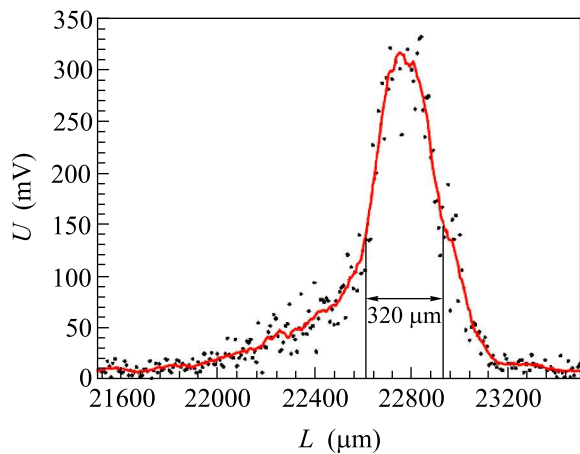


Рис.6. Распределение интенсивности рентгеновского излучения в продольном сечении изображения пинча, полученное с помощью открытой ПЗС-линейки за рентгеновским фильтром. Фильтр – 0.85 мкм Al + 2.4 мкм лавсан. Разрешение по объекту 100 мкм. Точки – амплитуда сигнала в пикселях ПЗС-линейки. Непрерывная кривая – сглаженная кривая сигнала

5. Заключение. Основными результатами работы являются следующие.

1. Путем оптимизации формы газового сопла удается создать распределение газа с максимумом плотности и минимальным поперечным размером в центре разрядного промежутка.

2. Подбором параметров (давление газа в клапане, напряжение на пинче) удается получить в центре разрядного промежутка компактную область горя-

чей плазмы, излучающую одиночный импульс киловольтового диапазона энергий квантов со следующими параметрами:

- длительностью импульса излучения менее 5 нс;
- полным выходом излучения в квантах с энергией около 1 кэВ 30 мДж;
- минимальным размером горячей области плазмы не выше 100 мкм.

3. Полученные характеристики излучения позволяют рассматривать данный метод как перспективное экспериментальное направление создания “точечных” источников мягкого рентгеновского излучения.

4. Формирование горячей области плазмы вдали от электродов позволяет надеяться на значительное уменьшение эрозии электродов.

Авторы благодарны С.В. Захарову за теоретическую поддержку на стадии подготовки проекта и С.А. Пикузу за обсуждение и поддержку идеи работы. Финансовая поддержка работы осуществлялась Российским фондом фундаментальных исследований, грант # 06-08-00472-а.

1. С. М. Захаров, Г. В. Иваненков, А. А. Коломенский и др., Письма в ЖТФ **8**, 1060 (1982).
2. Г. С. Волков, В. П. Гигиберия, С. А. Комаров и др., ЖТФ **62**, 172 (1992).
3. В. И. Зайцев, Г. С. Волков, ПТЭ №4, 85 (2004).