УДК 533.952

ГАЗОВЫЙ Х-ПИНЧ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ*И.А. Барыков¹, Г.С. Волков¹, В.А. Гасилов², Е.В. Грабовский¹, В.И. Зайцев¹, А.С. Болдарев², О.Г. Ольховская²*¹ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, Троицк, Россия²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Представлены результаты исследований излучающего пинча с начальным распределением плотности газа с максимумом плотности в центре разрядного промежутка. Описана методика создания и приводятся результаты газодинамических расчётов способа реализации такого распределения. Сравнение расчётного распределения газа с визуализированным свечением газовой струи иллюстрирует качественное соответствие. Приводятся результаты МГД-моделирования динамики плазмы разряда в Х-образном начальном распределении газа в разрядном промежутке. Экспериментальные исследования показывают, что на определённом этапе разряда возникает плазменное образование размером порядка 100 мкм, что соответствует результатам МГД-моделирования. Предложенная методика может с успехом применяться для создания рентгеновских источников с малым фазовым объёмом пучка.

Ключевые слова: Z-пинч, X-пинч, рентгеновское излучение, газовая струя, распределение плотности.

GAS X-PINCH: MODELING AND REALIZATION*I.A. Barykov¹, G.S. Volkov¹, V.A. Gasilov², E.V. Grabovskij¹, V.I. Zaitsev¹, A.S. Boldarev², O.G. Olkhovskaya²*¹SSC Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Moscow, Troitsk, Russia²Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

Results of researches of the radiating pinch with an initial density distribution of gas with density maximum in the center of a discharge gap are presented. The technique of creation is described and results of gasdynamic calculations of a way of realization of such distribution are given. Comparison of calculated distribution of gas with the visualized luminescence of a gas jet illustrates qualitative compliance. Results of the MHD modeling of plasma dynamics of the discharge are given in X-shaped initial distribution of gas in a discharge gap. The experimental studies shows that at a particular stage of the discharge there are plasma object about 100 microns in size that corresponds to results of the MHD modeling. The offered technique can be applied with success to creation of x-ray sources with a small phase volume of a bunch.

Key words: Z-pinch, X-pinch, x-ray, gas jet, density distribution.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-4-80-85

ВВЕДЕНИЕ

Одним из видов источника рентгеновского излучения является высокотемпературная плазма, образующаяся в нагрузках сильнотоковых разрядов. Спектральный состав, интенсивность и фазовая плотность излучения наряду с величиной тока разряда определяются материалом и геометрией нагрузки. Во многих прикладных задачах, как, например, рентгеновская литография, рентгенография малоплотных объектов, важным параметром является фазовый объём используемого рентгеновского пучка, что заставляет стремиться к уменьшению размера источника. Одним из способов, где размеры источника удалось значительно уменьшить, является Х-пинч, в котором разряд формируется на основе нагрузки, образованной из двух (или больше) скрепленных проволок [1]. Основным препятствием к широкому применению Х-пинча является необходимость установки проволочной конфигурации после каждого разряда, что влечёт за собой разгерметизацию вакуумного объёма, последующую откачку и т.д. Замена проволочной конфигурации газовой струей с определённым пространственным распределением плотности исключает эти трудности, так как обеспечивает более оперативное восстановление начальной конфигурации для следующего разряда. В работе [2] продемонстрирована возможность создания такого разряда. Настоящая работа является дальнейшим развитием данного направления генерации рентгеновского излучения.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ СТРУИ

С целью создания газовой струи Х-образной конфигурации было проведено газодинамическое моделирование. Было понятно, что газовое распределение с высокой плотностью в середине оси разрядно-

го промежутка и сравнительно малой плотностью возле электродов может быть получено путём создания сходящейся струи с большим числом Маха. В трёхмерной постановке это означает, что в одном из электродов имеется кольцевая щель, из которой выходит сходящаяся к оси струя газа. На рис. 1 представлена схема конфигурации сопла, обеспечивающего подобную структуру потока газа. С целью моделирования газодинамического течения в сопле и разрядном промежутке решались двумерные осесимметричные уравнения Эйлера с помощью TVD-аппроксимации (total variation diminishing) метода конечных объёмов на неструктурированных сетках [3].

Использование неструктурированных сеток помогает дискретизировать расчётные области, имеющие сравнительно сложную геометрию, например, если расчётная область включает внутреннюю полость сопла и открытое пространство за его выходным сечением.

Сопло типа показанного на рис. 1, удовлетворяющее технологическим ограничениям, обеспечивает число Маха $M \sim 6$ возле выходного сечения для газов с $\gamma = 5/3$. На рис. 2 представлен вычисленный профиль плотности газа для этого сопла. Моделирование проводилось для неона при начальном давлении 5 бар, уровни плотности в г/см^3 . Видно, что имеется максимум плотности вблизи середины разрядного промежутка. Однако, несмотря на чрезвычайную простоту начальной структуры струи, течение в целом оказывается довольно сложным. Следует отметить следующие его основные особенности.

Прежде всего структура плотности не является полностью стационарной, а подвержена некоторым колебаниям, которые, однако, сравнительно малы и не влияют на картину распределения плотности в целом. Кроме того, максимум плотности находится не на оси, а на некотором расстоянии от неё. Это имеет место для различных вариантов с различными размерами выходного отверстия, свойствами газа, числами Маха и т.д. Расчётное полутоновое изображение продольного сечения неоновой газовой струи показано на рис. 3, а. Сравнение с рис. 3, б, где приведена фотография разряда с током 10—15 А в сформированной газовой струе, показывает качественное совпадение.

К сожалению, точность данных измерений не позволяет провести численное сравнение с расчётом.

Рис. 1. Кольцевое сопло и разрядный промежуток

Рис. 2. Расчётное распределение плотности в неоновой струе при начальном давлении $P_0 = 5$ бар

Рис. 3. Течение газовой струи в разрядном промежутке (полутоновое расчётное представление) (а); фотография разряда с током 10—15 А в сформированной газовой струе (б)

МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование процесса электродинамического сжатия плазменной струи проводилось на основе кода MARPLE, разработанного в ИПИМ им. М.В. Келдыша РАН. Код построен на основе двухтемпературной магнитогидродинамической модели с анизотропными диссипативными процессами и радиационным теплопереносом [4] и использует технологию неструктурированных сеток, что позволяет учитывать более точное геометрическое описание расчётной области.

Вычисления уравнения состояния, коэффициентов поглощения и испускания проведены с использованием кода THERMOS [5] для электронных температур от 1 до 400 эВ и плотностей 10^{-8} — 10^{-3} г/см³ с 20 группами энергий фотонов. Вычисления проводились для случая локального термодинамического равновесия (ЛТР), обозначаемого индексом «1», и для оптически тонкого случая, обозначаемого индексом «0».

В МГД-расчётах использовались следующие интерполяции табличных данных:

$$k_{\omega} = k_{\omega}^1 \chi + (1 - \chi) k_{\omega}^0;$$

$$j_{\omega} = j_{\omega}^1 \chi + (1 - \chi) j_{\omega}^0;$$

$$Z_0 = Z_0^1 \chi + (1 - \chi) Z_0^0,$$

где Z_0 — степень ионизации; k_{ω}, j_{ω} — коэффициенты поглощения и испускания для случаев ЛТР и оптически тонкой плазмы соответственно; интерполяционный коэффициент χ (эффективный коэффициент выхода) есть отношение выходящего излучения к излучению «производимому» внутри слоя. Коэффициент равен нулю для

оптически тонкого случая и единице для случая ЛТР.

На рис. 4 показаны результаты МГД-моделирования сжатия конфигурации плотности, представленной на рис. 2, в момент времени, соответствующий максимуму рентгеновского излучения. Можно видеть, что имеется локализованная зона с высокой электронной температурой, но эта зона находится не в середине разрядного промежутка, где был максимум плотности в начальном распределении.

Рис. 4. Результаты МГД-моделирования для начальной конфигурации плотности рис. 2. Рабочий газ неон, время нарастания тока 1 мкс

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Рис. 5. Схема эксперимента

Схема эксперимента показана на рис. 5.

Источником тока являлась конденсаторная батарея ёмкостью 8 мкФ, заряжаемая до напряжения 20 кВ и коммутируемая искровым разрядником. Волновое сопротивление разрядного контура составляло величину $\rho = 0,08$ Ом, что позволяло получать ток разряда с амплитудой до 200 кА, временем нарастания ~ 1 мкс [3]. Максимальная плотность газовой струи соз-

давалась примерно в середине газового промежутка. Масса газа регулировалась величиной задержки в пределах 400—480 мкс между импульсом открытия газового клапана и моментом включения тока разряда. Эксперименты проводились при давлении в форкамере клапана 3,4 атм.

В эксперименте измерялись как электротехнические параметры пинча (ток и напряжение на пинче), так и излучательные характеристики. Рентгеновское излучение регистрировалось полупроводниковым кремниевым PIN-детектором типа СППД-11-04, имеющим временное разрешение около 1,5 нс. Детектор располагался на расстоянии 65 см от пинча и был закрыт алюминиевым фильтром толщиной 6 мкм. Измерения проводились в интервале энергии квантов 0,8—1,5 кэВ, что соответствовало диапазону излучения [H]—[He]-ионов неона. Размеры области излучения определялись с помощью камеры-обскуры с регистрацией излучения прибором с зарядовой связью SONY CCD ICX285AL. Пространственное разрешение по объекту составляло 100 мкм. Все изображения снимались за Al-фильтром (6 мкм Al) и отображались on-line на экране компьютера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В эксперименте основное внимание было уделено измерению излучательных характеристик разряда. Так как газовая струя, выходящая из сопла, имеет определённый фронт плотности, измерения проводились в различные моменты времени после открытия клапана. Учитывая скорость распространения неоновой струи в разрядном промежутке менее 10^5 см/с, за время длительности нарастания импульса тока разряда ~ 1 мкс с достаточно хорошей точностью можно считать струю неподвижной. Небольшим задержкам срабатывания установки относительно запуска электромагнитного клапана $\tau = 400$ —430 мкс соответствует геометрия излучения в виде нескольких коротких излучающих областей плазмы, хаотично расположенных на оси разряда. При задержках 440—460 мкс реализуются режимы сжатия, при которых наблюдается одиночный импульс рентгеновского излучения длительностью менее 5 нс. В этом интервале включается разрядный ток, после чего через 650—700 нс формируется компактный источник излучения размером вдоль оси разряда от 100 до 800 мкм и поперечным менее 200 мкм. Изображение излучательной области пинча при задержке 450 мкс, сформированной камерой-обскурой на ПЗС-матрице, показано на рис. 6.

На рис. 7 показан импульс излучения, синхронизированный с напряжением на пинче. Длительность импульса излучения порядка 5 нс.

Считая, что излучение соответствует линиям [H]-, [He]-неона, где чувствительность детектора СППД-11-04 составляет $1,3 \cdot 10^{-2}$ А·см²/Вт, и учитывая геометрию измерения, получаем оценку выхода излучения ~ 30 мДж. 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).

Рис. 6. Распределение рентгеновского излучения в продольном сечении изображения пинча, полученное на ПЗС-матрице за Al-фильтром толщиной 6 мкм: . . . — сигналы ячеек ПЗС; — — сглаженный сигнал. Разрешение по объекту составляет 100 мкм

Рис. 7. Осциллограмма напряжения (1) на пинче и сигнала рентгеновского излучения (2), измеренного СППД-11-04 с временем разрешения 1,5 нс за Al-фильтром толщиной 6 мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами работы являются следующие:

- сопло, изготовленное на основе газодинамических расчётов, обеспечивает струю газа, имеющую максимум плотности примерно в центре разрядного промежутка;
- МГД-моделирование динамики разряда при данном распределении газовой плотности показало образование «точечного» плазменного образования на определённой стадии разряда, что подтвердилось результатами проведённого эксперимента;
- экспериментально показано, что на определённой стадии разряда в профилированной неоновой струе возникает плазменное образование с параметрами: минимальные геометрические размеры ~ 100 мкм; энергия квантов ~ 1 кэВ; полный энергетический выход в квантах с энергией около 1 кэВ составляет ~ 30 мДж; время вспышки рентгеновского излучения с достаточно хорошей точностью соответствует МГД-расчёту;
- формирование горячей области плазмы вдали от электродов позволяет надеяться на значительное уменьшение эрозии электродов;
- полученные характеристики излучения позволяют рассматривать данный метод как перспективное экспериментальное направление создания «точечных» источников мягкого рентгеновского излучения. Формирование горячей области плазмы вдали от электродов позволяет надеяться на значительное уменьшение эрозии электродов.

Работа поддержана грантом № РНФ-16-23-10487.

REFERENCES

1. Zakharov S.M., Ivanenkov G.V., Kolomenskiy A.A. et al. — Pis'ma v ZhTF (Letters to JTPH), 1982, vol. 8, p. 1060 (in Russian).
2. Zaytsev V.I., Volkov G.S., Barykov I.A., Grabovskiy E.V., Aleksandrov V.V., Boldarev A.S., Gasilov V.A. — Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh), 2008, vol. 88, № 9—10, pp. 673—676 (in Russian).
3. Boldarev A.S., Gasilov V.A., Ol'khovskaya O.G. — Mathematical simulation, 1996, vol. 8, № 3, pp. 51—78 (in Russian).
4. Boldyrev S.N., Boldarev A.S., Ol'khovskaya O.G., D'yachenko S.V., Kartasheva E.L., Gasilov V.A. Parallel computations in problems of radiation magnetohydrodynamics. — In coll.: Proceedings of international scientific conference «Parallel computational technologies PCT-2008 (PaVT-2008)». St-Peterburg, 28 January — 1 February 2008. — Chelyabinsk: Pub. house SUSU, 2008, pp. 306—312 (http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2008/papers/Short_Papers/007.pdf) (in Russian).
5. Nikiforov A.F., Novikov V.G., Uvarov V.B. Quantum-Statistical Models of Hot Dense Matter. Methods for Computation Opacity and Equation of State. Basel, Birkhauser, 2005.

AUTHORS

Barykov I.A. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Volkov G.S. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; volkov@triniti.ru

Gasilov V.A. M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq. 4, 125047 Moscow, Russia

Grabovskij E.V. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Zaitsev V.I. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Boldarev A.S. M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq. 4, 125047 Moscow, Russia

Olkhovskaya O.G. M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq. 4, 125047 Moscow, Russia

Received 7 August 2017
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol.40, issue 4, pp. 80—85.