

## Особенности формирования разряда в ускорителе плазмы и структура струи, истекающей в вакуум

© В.Ю. Горяинов,<sup>1</sup> М.Е. Викторов,<sup>2</sup> А.В. Водопьянов,<sup>2</sup> А.В. Воронин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: vgorainov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 8 июля 2020 г.

Принято к публикации 24 июля 2020 г.

Представлены результаты исследования структуры струи, создаваемой коаксиальным ускорителем плазмы с конической вставкой в области формирования разряда. С помощью скоростной электронно-оптической камеры обнаружена неоднородная структура светящихся фракций аргоновой и дейтериевой струй. Обнаружены колебания интенсивности излучения струи с характерной частотой 0.3–0.9 МГц. Струя аргоновой плазмы состояла из расходящихся от оси фрагментов, плазма рекомбинировала через 20  $\mu\text{s}$  после начала тока. Струя дейтериевой плазмы напоминала хлопья. Интенсивность ее излучения значительно уменьшалась к 8  $\mu\text{s}$ . Характерные частоты неоднородностей излучения на оси струи для аргона составляли  $\sim 0.09 \text{ cm}^{-1}$ , для дейтерия  $\sim 0.3 \text{ cm}^{-1}$ . Исследования поведения разряда в ускорителе плазмы показали, что диффузный разряд инициировался у основания конической вставки. Через 0.5  $\mu\text{s}$  разряд выходил на наружную границу вставки, контрагировался и горел между центральным и наружным электродами. Выход разряда из ускорителя наблюдался спустя 3  $\mu\text{s}$  и сопровождался свечением торца центрального электрода. В ходе измерения температуры боковой поверхности наружного электрода с помощью тепловизора выявлена локализация нагрева вблизи края конусной вставки и на выходе ускорителя. Результаты исследований могут быть использованы для ионизации газа, в облучении материалов, а также для моделирования в лабораторных условиях взаимодействия потоков плазмы с магнитным полем в космосе.

**Ключевые слова:** разряд, электронно-оптическая камера, плазма, аргоновая и дейтериевая струи.

DOI: 10.21883/JTF.2021.02.50370.153-20

### Введение

Источники плазменных струй, движущихся с большой кинетической энергией, представляют значительный интерес. С использованием таких струй успешно проводится подпитка топливом установок с магнитным удержанием плазмы, облучение конструкционных материалов, а также лабораторное моделирование взаимодействия потоков плазмы с магнитным полем в космосе [1–3]. Опубликовано большое количество работ по взаимодействию плазменных струй с материалами [4], внешним магнитным полем [2,3,5]. Однако работ, посвященных изучению структуры свободно вытекающей струи в вакуум, мало [6]. Изучение особенностей струи, а также выяснение основных факторов, влияющих на поведение разряда, позволит управлять параметрами и находить наиболее энергетически эффективные режимы работы ускорителя плазмы с максимально возможной энергией потока. Для решения этих задач необходимо применять диагностики с пространственным и высоким временным разрешением.

Целью настоящей работы является изучение структуры струи и поведение разряда в оригинальном коаксиальном ускорителе плазмы [7] с помощью ско-

ростной электронно-оптической и инфракрасной камер. Некоторые результаты таких исследований уже были представлены в работах [4,8]. Отмечалось неоднородное свечение струи, наблюдаемое с помощью стрик-камеры через щель, расположенную вдоль направления потока, с временем экспозиции 10–30  $\mu\text{s}$ , однако пространственная картина излучения была недоступна. Настоящая работа является продолжением ранее начатых экспериментальных исследований ускорителя плазмы. Основные усилия были сконцентрированы на изучении поведения структуры струи и особенностях формирования разряда внутри коаксиального ускорителя с помощью высокоскоростной камеры.

### 1. Эксперимент

Исследования проводились на стенде, который состоял из вакуумной камеры объемом 2.5  $\text{m}^3$  с остаточным давлением  $10^{-5}$  Торг, коаксиального ускорителя плазменной струи и диагностик для измерения ее параметров (рис. 1).

К вакуумному затвору камеры через керамический изолятор присоединялся плазменный ускоритель. Диаметры наружного и внутреннего электродов ускорителя

составляли 46 и 10 mm соответственно. Электроды были выполнены из нержавеющей стали. Длина электродов составляла 110 mm. На начальном участке ускорителя была установлена коническая вставка, соединенная с наружным электродом. С помощью такой конструкции удалось получить струю плазмы с наибольшими энергетическими параметрами [7] (рис. 2).

Питание ускорителя осуществлялось с помощью емкостного накопителя  $160\ \mu\text{F}$ , напряжением 5 kV. Разряд производился после импульсной подачи напряжения на электроды ускорителя с максимальным значением тока до 120 kA и длительностью около  $15\ \mu\text{s}$ . Параметры разряда были выбраны экспериментально при условии минимального поступления примесей с электродов. Подводимая к электродам ускорителя энергия в однократном импульсе составляла 2 kJ. Типичная форма сигналов тока, протекающего по электродам ускорителя, а также напряжения, приведены на рис. 3.

В качестве рабочих газов, с помощью которых инициировался разряд в ускорителе, использовались легкий — дейтерий и тяжелый — аргон. Напуск рабочего газа осуществлялся через боковую поверхность наружного электрода на начальном участке ускорителя с помощью клапана электродинамического типа. Длительность открытого состояния клапана составляла  $250\text{--}400\ \mu\text{s}$ . Оптимальная задержка между началом напуска газа и инициацией разряда составляла  $400\ \mu\text{s}$ . Давление рабочего газа над клапаном варьировалось от 1.7 до 3 bar. Генерируемая струя имела температуру электронов около 1 eV, энергию направленного потока около 300 J на расстоянии 0.5 m [7].

Регистрация свечения разряда внутри ускорителя (положение B, рис. 1), а также излучения струи плазмы

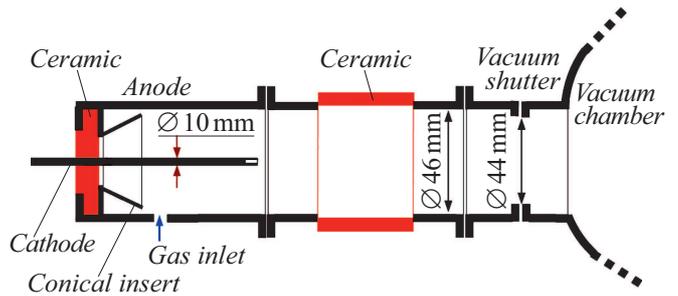


Рис. 2. Схема коаксиального ускорителя плазмы, присоединенного к вакуумной камере.

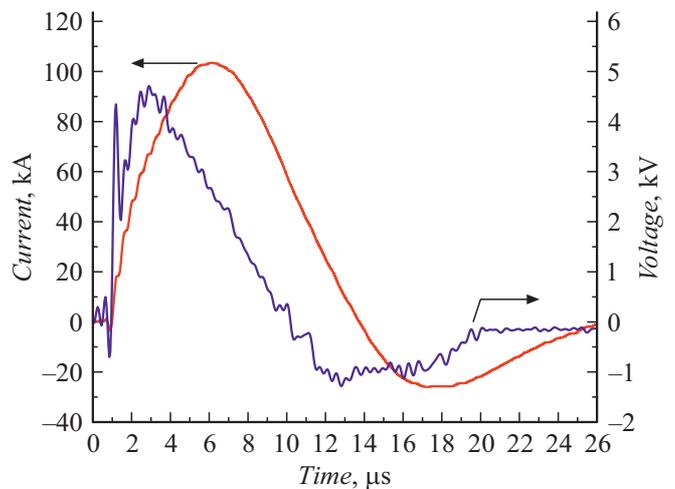


Рис. 3. Зависимости тока и напряжения ускорителя от времени.

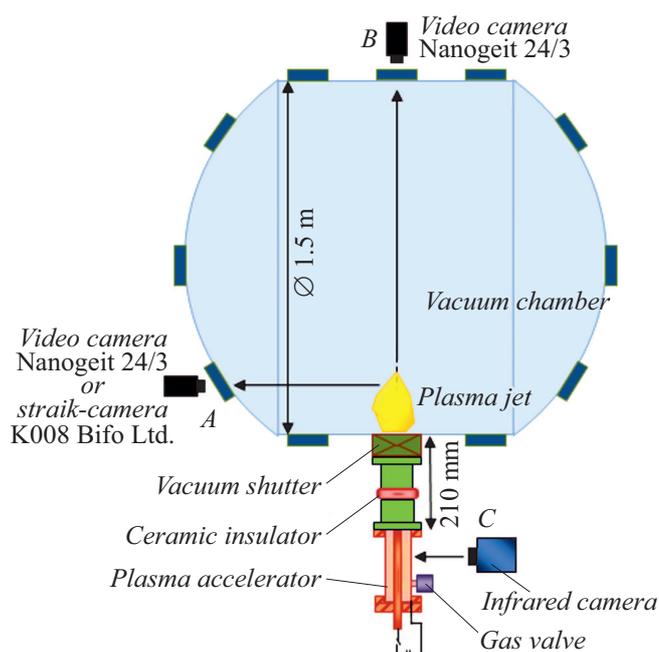
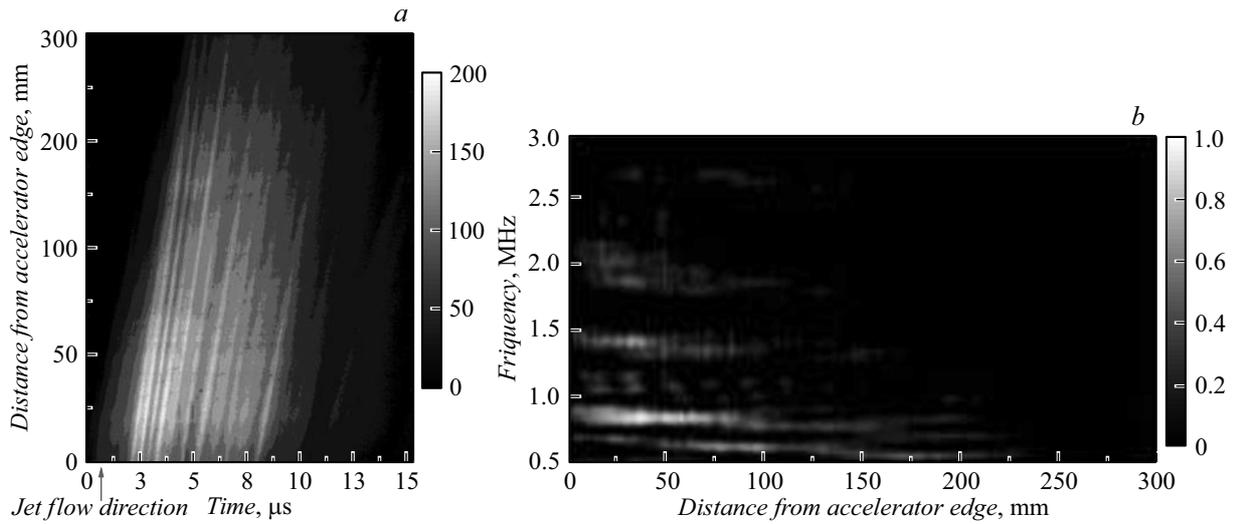


Рис. 1. Схема стенда ускорителя плазмы с диагностикой.

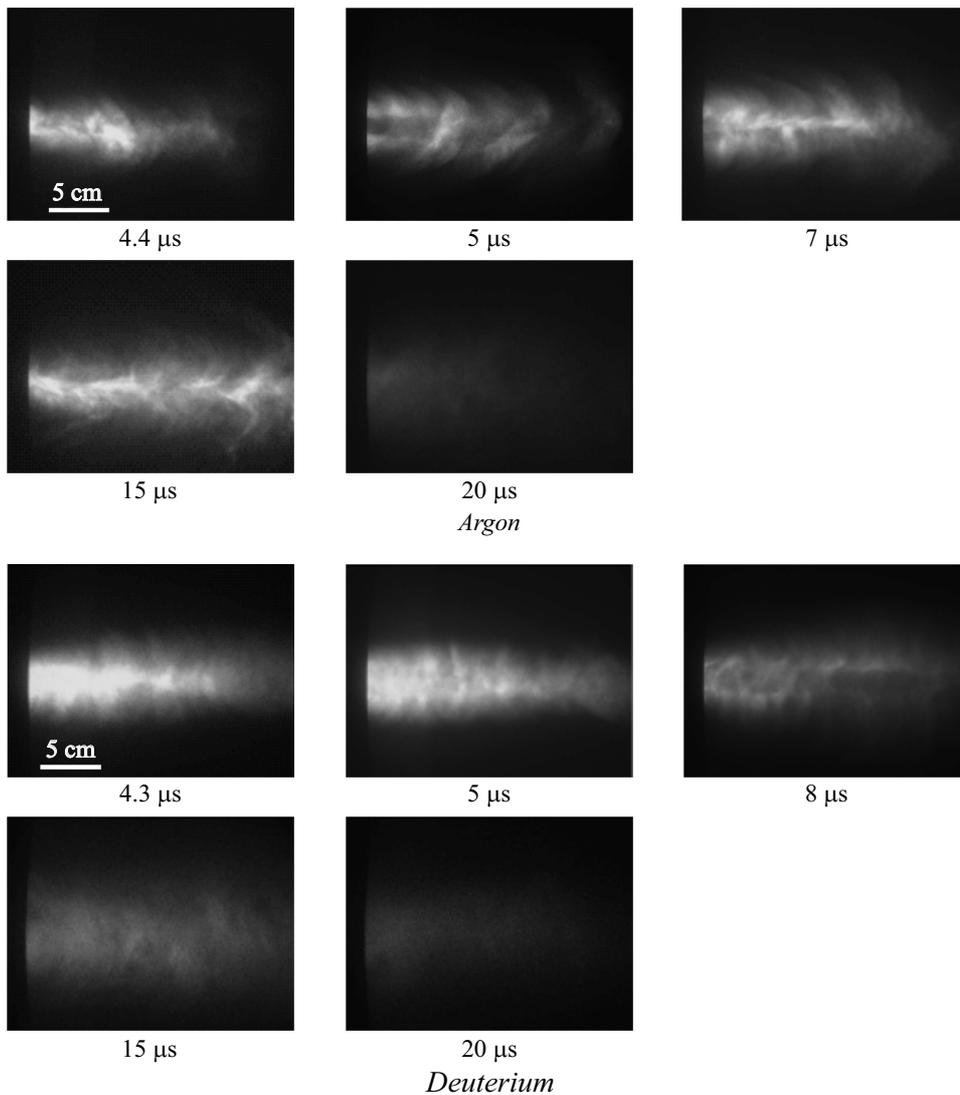
мы на выходе (положение A, рис. 1) проводилась с помощью однокадровой электронно-оптической камеры Наногейт-24/3 (НПК ВидеоСКАН, Россия) с минимальным временем экспозиции 20 ns и диапазоном длин волн 400–800 nm. Эволюция структуры струи при одинаковых физических условиях эксперимента была получена в течение серии последовательных разрядов. Запуск камеры производился по сигналу с датчика тока ускорителя плазмы с управляемой величиной временной задержки. Распределение температуры на стенке наружного электрода ускорителя измерялось с помощью инфракрасной камеры в диапазоне  $3.7\text{--}4.3\ \mu\text{m}$  (положение C, рис. 1). Исследования движения фронта ионизации в ускорителе проводились с помощью оптической стрик-камеры K008 (Bifo Comp., Россия) с длительностью экспозиции  $10\text{--}30\ \mu\text{s}$  (положение A, рис. 1).

## 2. Результаты измерений структуры струи

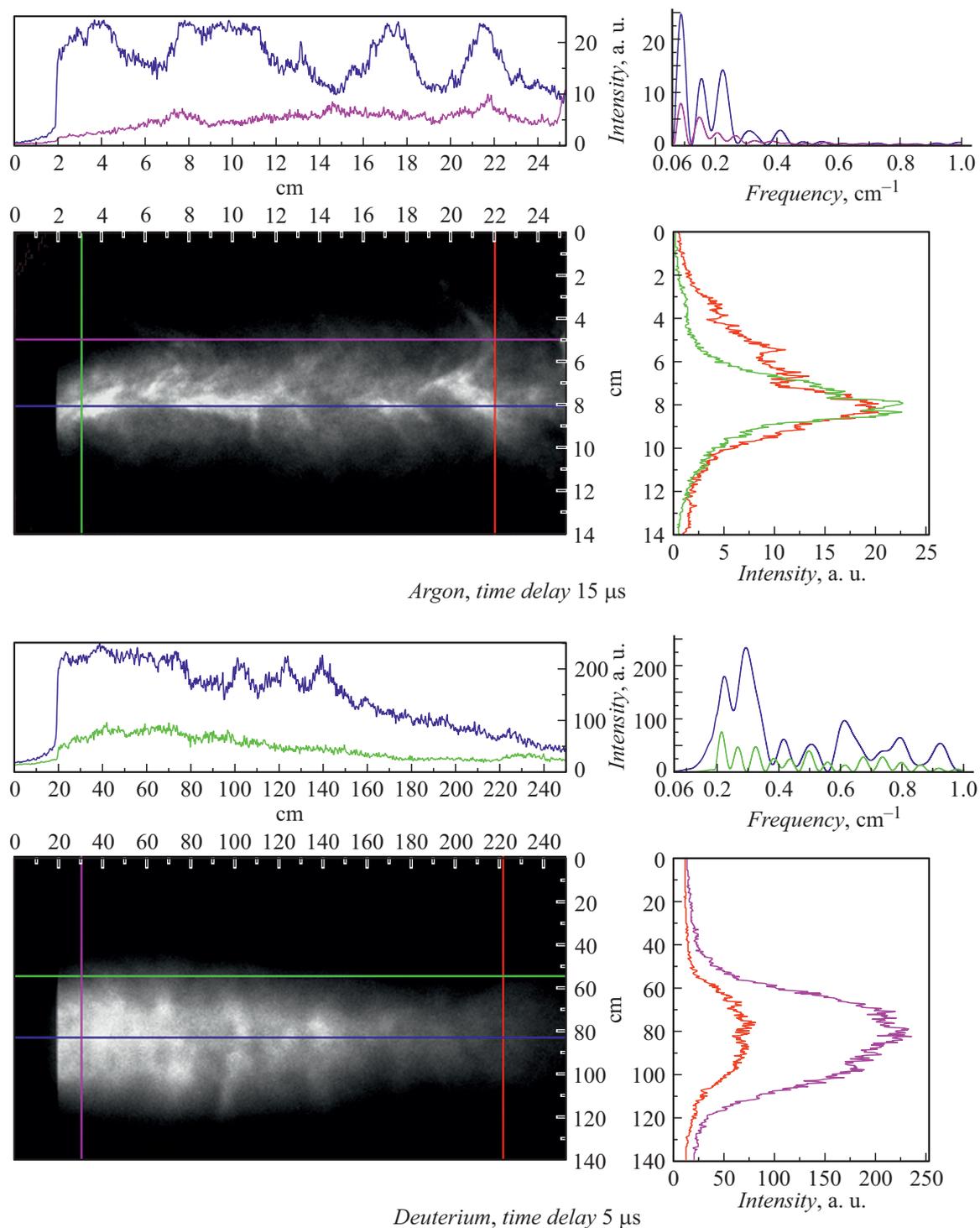
Неоднородная структура струи на выходе ускорителя плазмы наблюдалась ранее и была представлена в работе [8]. С помощью оптической стрик-камеры, распо-



**Рис. 4.** *a* — свечение струи, наблюдаемое с помощью стрик-камеры через щель, расположенную вдоль направления распространения струи. *b* — зависимость амплитуды частот следования фрагментов струи от расстояния до ускорителя. Газ — аргон, давление над клапаном 1 atm. Длина электродов — 220 mm.



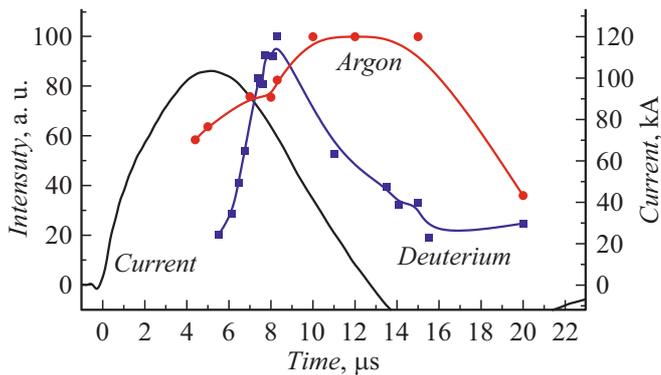
**Рис. 5.** Вид сбоку свечения плазменной струи на выходе коаксиального ускорителя, измеренного с различным временем задержки относительно начала тока ускорителя. Длительность экспозиции 20 ns. Давление над клапаном 3 atm. Длина электродов — 110 mm.



**Рис. 6.** Профили интенсивности излучения струи и фурье-спектр, измеренные вдоль выделенных направлений на фотографиях. Длительность экспозиции 20 ns.

ложенной в положении А, рис. 1, был обнаружен периодический характер интенсивности излучения струи. Периодическое свечение, наблюдаемое через щель, расположенную вдоль направления распространения струи, представлено на рис. 4, а. По горизонтальной оси отложено время от начала тока ускорителя, а по верти-

кальной — расстояние от конца ускорителя. Видимые на рисунке наклонные полосы соответствовали отдельным фракциям струи, а их наклон определял скорость распространения каждой фракции. Скорость движения ионизационного фронта вычислялась по тангенсу угла наклона полос и составляла от 100 до 200 km/s. На



**Рис. 7.** Зависимости интегральной по пространству, ограниченному размерами изображения, интенсивности свечения струи от времени задержки относительно начала тока.

рис. 4, *b* представлено изменение частоты следования вылетающих фрагментов струи по мере ее удаления от ускорителя. Видно, что основная частота излучения  $\sim 0.9$  MHz на большом отдалении уменьшается, что может говорить о том, что со временем фракции излучения отстают друг от друга и расходятся. Основная частота колебаний излучения в зависимости от разряда ускорителя варьировалась в диапазоне 0.3–0.9 MHz.

Регистрация пространственной картины излучения плазменной струи производилась с помощью видеокамеры Наногейт-24/3. Фотографии свечения плазмы на выходе коаксиального ускорителя с различным временем задержки относительно начала тока представлены на рис. 5. Видно, что примерно к 5–7 μs длина струи превышала 0.25 m. Фотографии были получены в течение серии последовательных разрядов, при этом наблюдаемая неоднородная структура излучения повторялась. Видеокадры подтвердили прерывистую структуру струи, обнаруженную ранее с помощью стрик-камеры. Наблюдалось заметное отличие между характером излучения струй аргона и дейтерия. Видно, что излучение дейтериевой плазмы значительно уменьшилось к 8 μs, однако аргоновая плазма полностью рекомбинировала лишь к 20 μs. Отличие в длительности видимого излучения для разных сортов газа может быть связано с преобладанием тройной рекомбинации в наблюдаемых процессах, поскольку характерное время тройной рекомбинации зависит от массы частицы иона как  $\tau_{triple\ recomb} \sim \sqrt{m_i}$  [9].

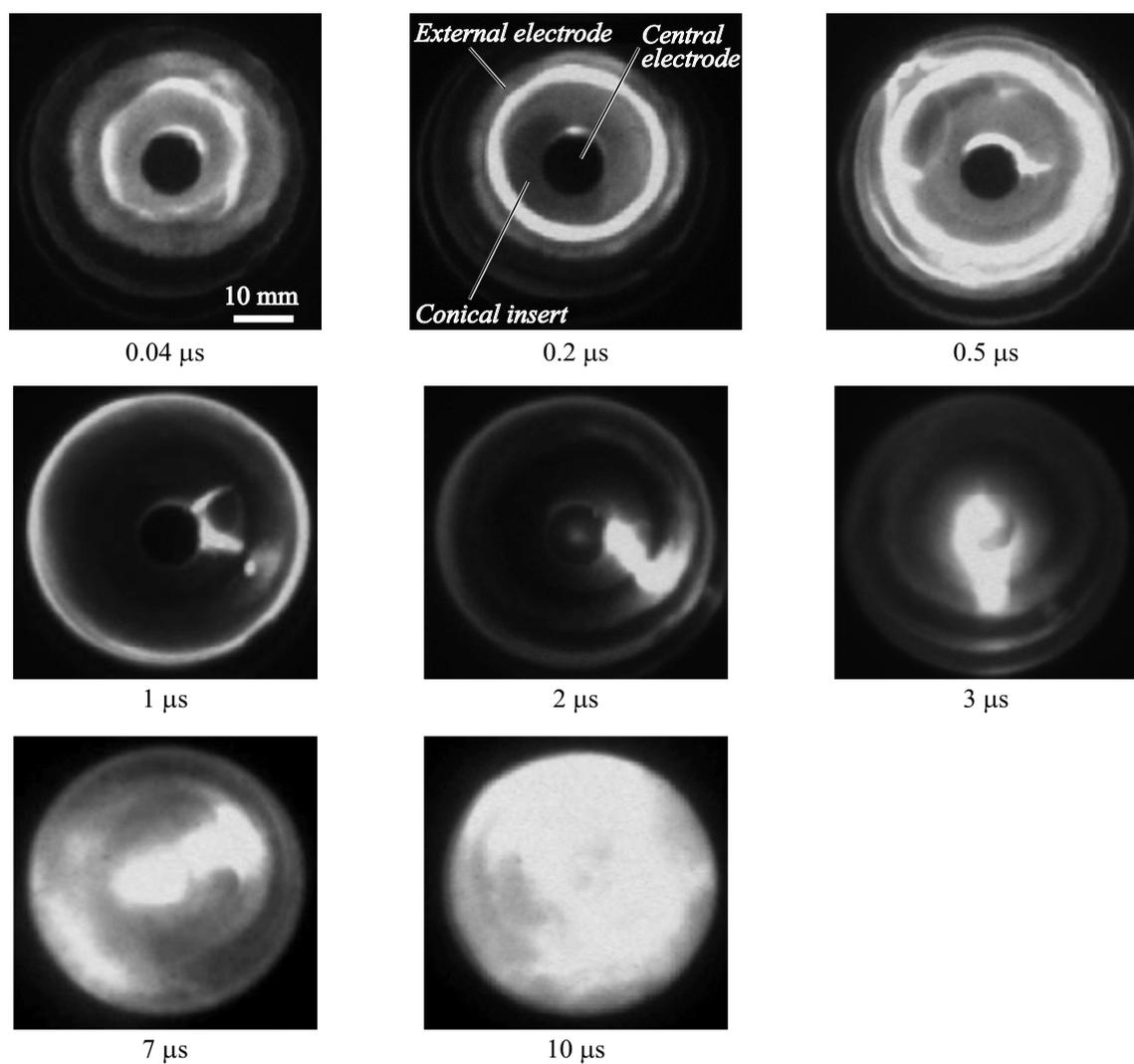
Профили интенсивности излучения и фурье-спектр, измеренные вдоль оси и по радиусу струи для различных родов газа, представлены на рис. 6. Наблюдалась прерывистая картина излучения. В струе аргона видны неоднородности в виде отдельных фрагментов, расходящихся от оси направленного движения. Размеры неоднородностей излучения дейтериевой струи были меньше размеров неоднородностей, наблюдаемых в аргоне. Видно, что наибольшая модуляция интенсивности прослеживалась вблизи оси струи для аргона и дейтерия. При удалении от оси на расстояние 2.5 cm модуляция

интенсивности излучения практически исчезала. В струе аргона наблюдалась характерная модуляция свечения на частотах 0.09, 0.15 и 0.23  $cm^{-1}$ , в струе дейтерия — 0.2 и 0.3  $cm^{-1}$ .

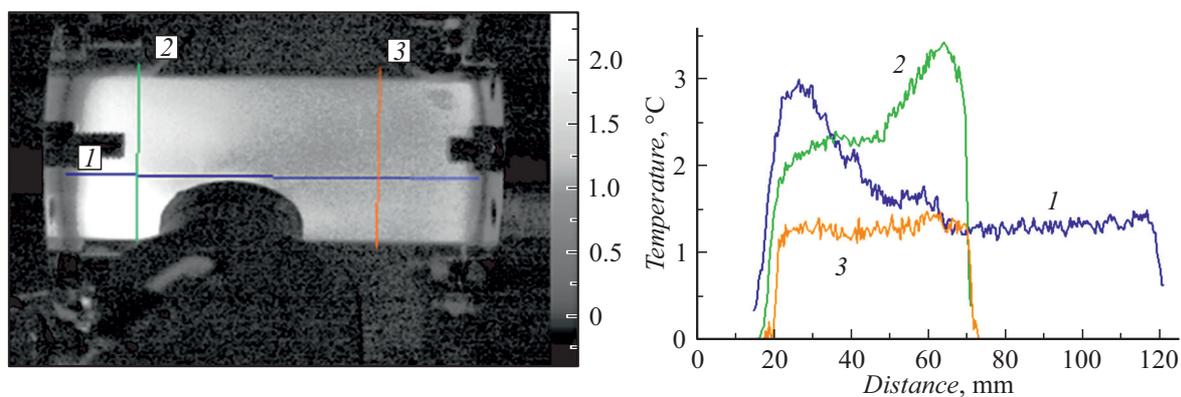
На рис. 7 представлена зависимость интегральной интенсивности свечения струи по пространству, ограниченному размерами изображения, от времени задержки. Видно, что для аргоновой и дейтериевой плазмы характер зависимости интегрального свечения соответствовал зависимости тока ускорителя с задержкой в несколько микросекунд. Однако в аргоне времена нарастания и спада излучения плазмы оказались существенно больше, чем в дейтерии. Это может быть следствием различия характерных времен ионизации и рекомбинации используемых газов.

Регистрация свечения разряда внутри ускорителя (вид с торца) проводилась с помощью видеокамеры Наногейт-24/3, находящейся в положении *B*, рис. 1. Свечение разряда внутри коаксиального плазменного ускорителя с различным временем задержки относительно начала тока представлено на рис. 8. Длительность экспозиции составляла 20 ns. Видно, что диффузный разряд инициировался у основания конической вставки. Спустя 0.5 μs разряд выходил на наружную границу конусной вставки, контрагировался и в виде токовой перемычки горел между центральным и наружным электродами. Выход разряда из ускорителя наблюдался приблизительно через 3 μs после начала роста тока и сопровождался свечением торца центрального электрода. Сорт рабочего газа не влиял на поведение разряда. С целью исследования вращения токовой перемычки была произведена регистрация разряда с длительностью экспозиции 3 μs. В этих условиях не было обнаружено размытия разряда в азимутальном направлении. Следовательно, можно сделать вывод об отсутствии вращения токовой перемычки в ускорителе за время импульса тока.

Термограмма наружного электрода с большой достоверностью могла характеризовать наиболее вероятное положение разряда в ускорителе. С этой целью были проведены измерения температуры боковой поверхности наружного электрода с помощью тепловизора в спектральном диапазоне 3.7–4.8 μm, временем интегрирования 1 ms и частотой кадров 200 Hz. Схема съемки боковой поверхности ускорителя показана на рис. 1, тепловизор располагался в положении *C*. Внешний диаметр наружного электрода из нержавеющей стали составлял 50 mm, толщина стенки — 2 mm. Для устранения бликов боковая поверхность электрода была зачернена сажей. На рис. 9 представлена термограмма боковой поверхности наружного электрода и зависимость изменения температуры вдоль выделенного направления, отмеченного на термограмме. Виден значительный нагрев наружной стенки электрода на начальном участке ускорителя. Разница температур до и после прохождения единичного импульса составляла 3.5°C. Наружный электрод в области отрыва плазменного сгустка от электродов нагревался менее, чем на 1.2°C. Такая картина прогрева



**Рис. 8.** Вид спереди свечения дейтериевого разряда внутри коаксиального плазменного ускорителя с различным временем задержки относительно начала тока. Длительность экспозиции 20 ns.



**Рис. 9.** Термограмма боковой поверхности ускорителя после разряда спустя 5 ms.

электродов повторялась регулярно для струи плазмы с высокой кинетической энергией.

Таким образом, измерение температуры боковой поверхности наружного электрода позволило определить

наиболее продолжительное положение разряда в ускорителе. Можно предположить, что на начальном участке ускорителя происходит локализация разряда вблизи края конусной вставки, а на выходе ускорителя горит диффузный дуговой разряд. Средний участок электрода разряд проходил быстро, из-за чего эта область не успевала сильно нагреваться.

## Заключение

Проведено исследование структуры струи, создаваемой коаксиальным ускорителем плазмы. С помощью скоростной электронно-оптической камеры обнаружена неоднородная структура струи плазмы. Фурье-анализ проявил колебания интенсивности излучения с характерными частотами 0.3–0.9 МГц. Наблюдалось заметное отличие между характером излучения струй аргона и дейтерия. Струя аргоновой плазмы состояла из расходящихся от оси фрагментов, плазма рекомбинировала через 20  $\mu\text{s}$ . В дейтериевой струе была обнаружена неоднородная структура без расходящихся от оси потоков. Интенсивность свечения дейтериевой плазмы значительно уменьшилась к 8  $\mu\text{s}$ . Частоты неоднородностей вблизи оси струи для плазмы в аргоне составляли  $\sim 0.09 \text{ cm}^{-1}$ , а в дейтерии —  $\sim 0.3 \text{ cm}^{-1}$ . Характер зависимости интегрального свечения от времени соответствовал зависимости тока ускорителя с задержкой в несколько микросекунд.

Исследования формирования и эволюции движения разряда в ускорителе плазмы с помощью высокоскоростной оптической камеры показали, что диффузный разряд инициировался у основания конической вставки. К концу 0.5  $\mu\text{s}$  разряд выходил на наружную границу вставки, контрагировался и горел между центральным и наружным электродами. Выход разряда из ускорителя наблюдался к началу 3  $\mu\text{s}$  и сопровождался свечением торца центрального электрода. Сорт рабочего газа не влиял на поведение разряда.

Измерение температуры боковой поверхности наружного электрода позволило определить наиболее продолжительное расположение разряда в ускорителе. На начальном участке ускорителя происходила локализация разряда вблизи края конусной вставки, а на выходе ускорителя наблюдался однородный нагрев внешнего электрода — горел диффузный дуговой разряд. Средний участок электрода разряд проходил быстро, из-за чего эта область не успевала сильно нагреваться.

Результаты исследований могут быть использованы для разработки технологии пробоя и ионизации газа, а также в технологиях получения новых материалов с помощью плазменной струи.

## Финансирование работы

Экспериментальный образец коаксиального ускорителя плазменной струи был изготовлен и испытан в

рамках соглашения с Минобрнауки РФ (идентификатор проекта RFMEFI58519X0007). Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект # 18-29-21037, поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № 0784-2020-0020.

## Благодарности

Экспериментальный стенд для проведения испытаний плазменной пушки создан и поддерживается ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M. Viktorov, S. Golubev, A. Vodopyanov. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **61**, 035001 (2019).
- [2] C. Hsu Scott C., Paul M. Bellan. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **334** (2), 257 (2002).
- [3] S. Yun Gunsu, You Setthivoine, Paul M. Bellan. *Nucl. Fusion*, **47** (3), 181 (2007).
- [4] А.В. Анкудинов, А.В. Воронин, В.К. Гусев, Я.А. Герасименко, Е.В. Демина, М.Д. Прусакова, Ю.В. Судьенков. *ЖТФ*, **84** (3), 36 (2014). [A.V. Ankudinov, A.V. Voronin, V.K. Gusev, Ya.A. Gerasimenko, E.V. Demina, M.D. Prusakova, Yu.V. Sud'enkov. *Techn. Phys.*, **59** (3), 346 (2014).]
- [5] H. Alfvén, L. Lindberg, P. Mitlid. *J. Nucl. Energy, Part C Plasma Phys.*, **1**, 116 (1960).
- [6] J. Wiechula, C. Hock, M. Iberler, T. Manegold, A. Schonlein, J. Jacoby. *Phys. Plasmas*, **22**, 043516 (2015).
- [7] А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, В.К. Гусев. *ЖТФ*, **90** (6), 1028 (2020). [A.V. Voronin, V.Yu. Goryainov, V.K. Gusev. *Tech. Phys.*, **65** (6), 987 (2020).]
- [8] А.В. Воронин, В.К. Гусев, Е.В. Демина, Г.С. Курские, В.Б. Минаев, А.Н. Новохацкий, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, Ю.В. Судьенков, С.Ю. Толстяков. В сб. *Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах, материалах и технических системах*. Вып. 1 под ред. Ю.В. Петрова (Политехника, Санкт-Петербург, 2017), с. 110.
- [9] А.М. Прохоров (ред.). *Физический энциклопедический словарь* (Советская энциклопедия, М., 1983)