

УДК 533.952

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ И УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПЕРЕД ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕЙ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ В РАЗРЯДЕ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

С. Н. Полухин¹, А. Е. Гурей¹, А. А. Ерискин¹, В. Я. Никулин^{1,2},
Е. Н. Перегудова¹, П. В. Силин¹, А. М. Харрасов³

Лазерно-интерферометрическим методом на плазменном фокусе зарегистрирована ионизационная волна, бегущая перед ударной волной плазменной струи, распространяющейся в остаточном газе (азот) разряда плазменного фокуса. Измерены радиальные и аксиальные распределения электронных плотностей ударной волны и плазменной струи.

Ключевые слова: плазменная струя, плазменный фокус, диагностика интерферометрии.

Введение. Изучение широчайшего спектра процессов, протекающих в разряде плазменного фокуса, продолжается более полувека, начиная с ярких результатов по генерации нейтронов в рамках нарождавшейся с конца 50-х годов прошлого века проблемы УТС [1]. В основном этой тематике и было посвящено большое число работ на десятках установках плазменных фокусов по всему миру. Отличительной особенностью плазменного фокуса среди Z -пинчевых разрядов является сходящаяся конусообразная токовая оболочка. Считается, что ее форма является причиной образования кумулятивных плазменных струй в процессе схлопывания токовой оболочки [2].

Настоящая работа направлена на экспериментальное изучение структуры плазменной струи, генерируемой плазмофокусным разрядом, в целях изучения ее воздействия на различные материалы в прикладных задачах [3, 4]. Кроме того, привлекает внимание к таким исследованиям стремление моделировать в земных условиях астрономические процессы рождения джетов [5]. Созвучны эти исследования и попыткам обнаружить

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: snpol@lebedev.ru.

² НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: vnik@lebedev.ru.

³ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

зиппер-эффект токовой оболочки плазменного фокуса, когда точка схождения конической оболочки движется непрерывно вдоль оси разряда со значительной ($\sim 10^8$ см/с) скоростью [6]. Нельзя также не отметить близость задач этой работы с традиционными для плазменного фокуса вопросами выбора механизмов генерации нейтронов и сопутствующим осевым вытеканием плазмы из пинча [7, 8].

Ниже между терминами “плазменная струя” и “плазменный сгусток” не делается различия. Первый термин сложился исторически, подразумевая кумулятивную природу образования [2], и как следствие (умозрительное, не подкрепленное экспериментами) его вытянутую узкую форму, простирающуюся от анода до вершины ударной волны. Второй термин на взгляд авторов точнее описывает наблюдаемую в нашем эксперименте компактную форму образования и малую длительность процесса его генерации.

Описание эксперимента. Эксперименты были выполнены на установке ПФ-4 “Тюльпан” (ФИАН), которая представляет собой электроразрядное устройство типа плазменный фокус с мейзеровской геометрией электродов. Схема эксперимента показана на рис. 1. Диаметр внутреннего электрода (анода – 2) составляет 30 мм, катод (11) – медный цилиндр диаметром 50 мм. Электроды разделены керамическим изолятором (12). В аноде конусное углубление на 7 мм и диаметром 9 мм. Полная емкость батареи $C = 48$ мкФ, рабочее напряжение 12 кВ не менялось в течение всех серий выстрелов установки, энергия емкостного накопителя установки при зарядке ее до 12 кВ – 3.5 кДж, характерное время нарастания тока 3 мкс, максимальный ток разряда при данном напряжении – 0.3 МА. В качестве рабочего газа использовался азот при давлении около одного торра.

Плазма зондировалась излучением второй гармоники Nd:YAG лазера с энергией 0.1 Дж, длительностью импульса 5 нс, длиной волны 0.53 мкм. При образовании пинча в токе разряда регистрируется особенность в виде короткого обрыва тока. Интервал между моментом прохождения лазерного излучения через плазму и минимумом такой особенности производной тока определялся по показаниям фотодиода ФК-19 и магнитных зондов. Сигналы регистрировались осциллографом Tektronix TDS 3054C.

Измерение электронной плотности плазменных объектов осуществлялось с помощью интерферометра Маха–Цендера. Вклад ионной компоненты в показатель преломления плазмы считался незначительным из-за высокой температуры плазмы (> 10 эВ). В случае осесимметричных плазменных объектов использовалась стандартная вычислительная процедура абелевских преобразований методом ступенчатой аппроксимации [10]. Длиннофокусный объектив “Калейнар-3б” сопрягал с уменьшением 3:1 плоскость

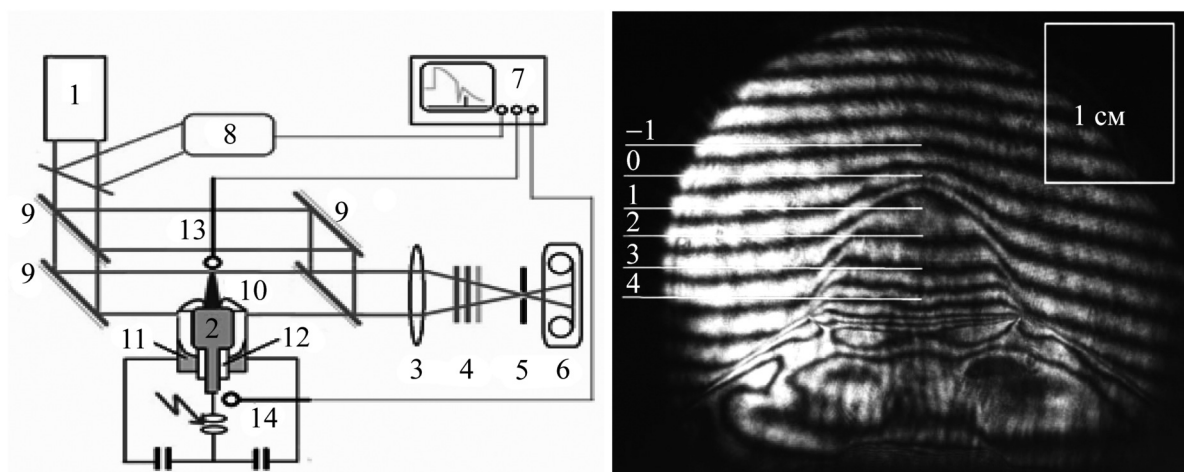


Рис. 1: Слева схема эксперимента. 1 – лазер, 2 – анод, 3 – объектив, 4 – фильтры, 5 – диафрагма, 6 – фотоаппарат, 7 – осциллограф, 8 – фотодиод, 9 – зеркала интерферометра, 10 – плазма, 11 – катод, 12 – изолятор, 13, 14 – магнитные зонды. Справа интерферограмма разряда.

объекта (плазму) с плоскостью изображения, где стоял цифровой зеркальный фотоаппарат Canon EOS 650D. Его затвор был открыт в течение всего разряда установки. Подавление собственного излучения плазмы производилось тремя светофильтрами: ОС11, СЗС20, ЖЗС17. Пространственное разрешение оптической системы – лучше 100 мкм.

Результаты эксперимента. На рис. 1 справа представлена интерферограмма разряда, снятая через 60 ± 5 нс после “особенности”. В верхней половине интерферограммы – куполообразная расходящаяся ударная волна, скорость ее распространения вверх в диапазоне 50–60 нс после особенности тока около $2 \cdot 10^7$ см/с. Скорость определяется сравнением положения вершины купола на аналогичных интерферограммах с разной задержкой относительно особенности.

Обработка интерферограмм в сечениях $-1, 0, 1, 2, 3, 4$ дает радиальные распределения электронной плотности, показанные на рис. 2. Как видно из графиков, электронная плотность плазмы в ударной волне достигает величины $4 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, после прохождения волны средняя электронная плотность порядка $2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, что в 3 раза выше начальной атомарной плотности невозмущенного рабочего газа. Из этого можно сделать вывод о 3-кратной ионизации атомов азота в этой области и температурах в десятки эВ.

В сечении видно приосевое значительное увеличение электронной плотности, что свидетельствует о существовании плазменной сгустка в этой области. Чтобы оценить

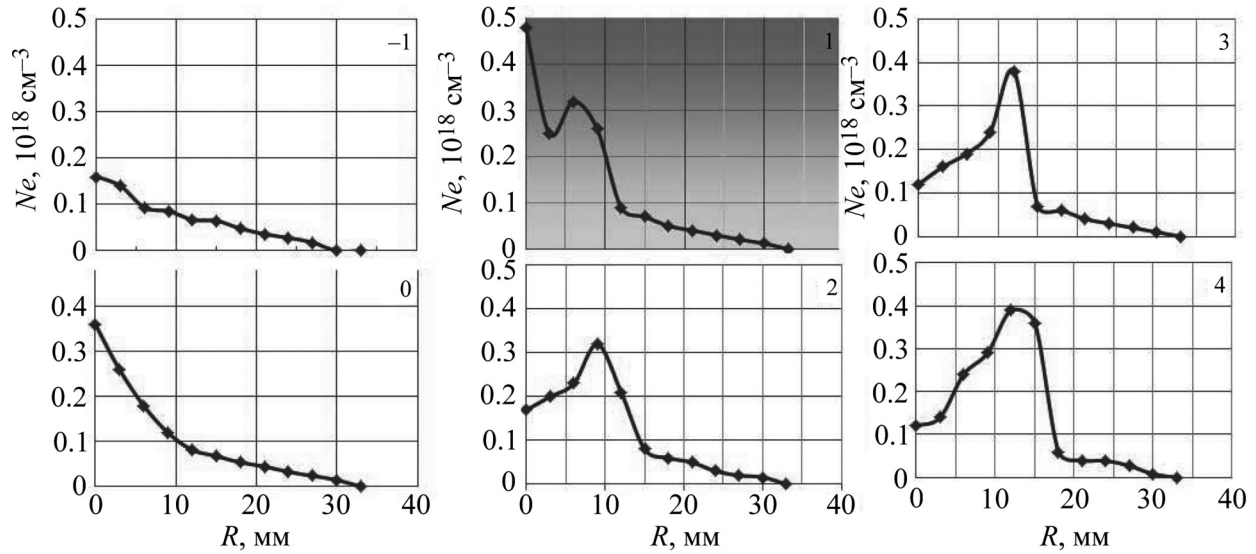


Рис. 2: Радиальные распределения электронной плотности в ударной волне и струе.

его размеры, следует учесть, что при обработке интерферограмм каждое сечение разбивалось на зоны шириной по 3 мм, сечения отстоят друг от друга на такую же величину. В других сечениях приосевого подъема плотности не наблюдалось. Таким образом, можно собрать всю имеющуюся информацию о плазменном сгустке: размеры сгустка менее $l = 3$ мм, его электронная плотность порядка $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, кратность ионизации более $Z = 3$, температура – десятки эВ, скорость распространения $v = 2 \cdot 10^7 \text{ см/с}$. Можно оценить также время формирования сгустка $t = l/v = 15$ нс, его кинетическую энергию $E = l^3 \cdot n \cdot M \cdot v^2 / 2Z \sim 2$ Дж, где M – атомная масса азота.

Как видно на рис. 1, интерференционные волны искривляются уже перед ударной волной, что говорит о процессах ионизации остаточного газа. Чтобы нагляднее показать этот процесс, в рамках компьютерной программы “Adobe Photoshop CS4” числовой массив интерферограммы был “сложен” с массивом “нулевой”, т.е. без плазмы, интерферограммой. В результате в местах искривления полос на величину половины волны зондирующего излучения образовалась размытая полоса (рис. 3), которую можно интерпретировать как волну ионизации, впервые на плазменном фокусе обнаруженной в работе [13].

В области, занятой полосой, электронная плотность рабочего газа разряда оказалась достаточна, чтобы изменить фазу зондирующей волны на 180° или полволны. В нашем случае для $\lambda = 0.53$ мкм и длины оптического пути L порядка 1 см эта плотность около $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что соответствует 3-кратной ионизации в этой области, и близка

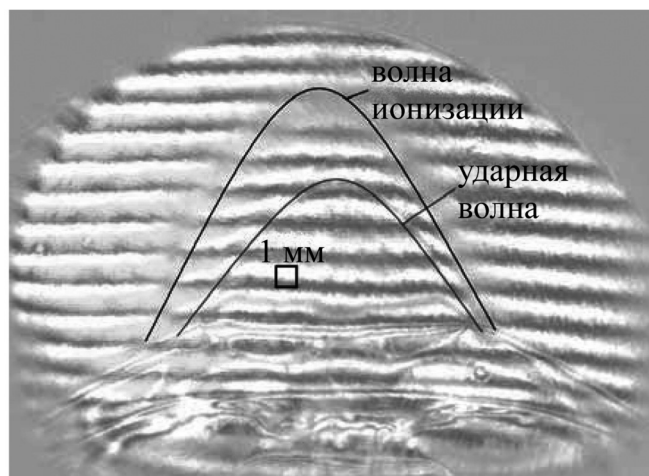


Рис. 3: Волна ионизации.

кратности ионизации внутри ударной волны (см. выше). Кроме того, волна ионизации с некоторым опережением повторяет форму ударной волны. Из этих фактов можно заключить, что волна ионизации образовалась в результате прогрева газа набегающим фронтом ударной волны. В упомянутой работе [13], для дейтериевой плазмы авторами делается иное заключение о природе волны ионизации, по их мнению, она рождена релаксирующей струей дейтонов из пинча с энергией порядка 10 кэВ. Из их объяснения трудно понять, почему волна ионизации повторяет форму ударной волны.

Заключение. Обнаружены плазменный сгусток, порождаемые им ударная волна и волна ионизации в плазменном фокусе после развала пинча. Измерены их параметры, важные для интерпретации результатов материаловедческих экспериментов.

Следует обратить внимание на короткое время формирования плазменного сгустка, сравнимое с временем развития неустойчивостей пинча ~ 10 нс, и меньшее на порядок по сравнению с характерным временем сжатия токовой оболочки на оси. Это ставит под сомнение влияния кумулятивных процессов сжатия конической токовой оболочки на образование плазменных струй в плазменном фокусе [2] и говорит в пользу “выдавливания плазмы из перетяжки до ее полного обрыва как из пипетки” [8], или другими словами “высокое давление плазмы в перетяжке приводит к вытеканию плазмы из перетяжки” [7].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10351).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Л. А. Арцимович, *Управляемые термоядерные реакции* (М., Атомиздат, 1961.)
- [2] Н. В. Филиппов, М. А. Каракин, В. И. Крауз и др., *Прикладная физика*, № 5, 43 (1999).
- [3] Б. П. Михайлов, Л. И. Иванов, И. В. Боровицкая и др., *ДАН* **442**(5), 614 (2012).
- [4] Л. И. Иванов, И. В. Боровицкая, Г. Г. Бондаренко и др., *Перспективные материалы*, № 3, 77 (2009).
- [5] К. Н. Митрофанов, В. И. Крауз, В. В. Мьялтон, Е. П. Велихов, *ЖЭТФ* **146**, вып. 5(11), 135 (2014).
- [6] V. I. Krauz, K. N. Mitrofanov, V. V. Myalton, et al., *IEEE Trans. on Plasma Science* **38**(2), 92 (2010).
- [7] В. В. Вихрев, В. Д. Королев, *Физика плазмы* **33**(5), 397 (2007).
- [8] Б. А. Трубников, *УФН* **167**(3), 345 (1997).
- [9] С. Н. Полухин, А. М. Джаманкулов, А. Е. Гурей и др., *Физика плазмы* **42**(12), 54 (2016).
- [10] Г. И. Асеев, *Использование интерферометра Маха–Цендера. Учебно-методическое руководство* (Изд-во Саратовского ун-та, 2005).
- [11] Leopoldo Soto, Cristian Pavez, and Jose Moreno, *Phys. Plasmas* **21**, 122703 (2014).
- [12] Я. Б. Зельдович, *Теория ударных волн и введение в газодинамику* (М., изд-во АН СССР, 1946).
- [13] A. Bernard, A. Coudeville, A. Jolas, et al., *Phys. Fluids* **18**(2), 180 (1975).

Поступила в редакцию 3 ноября 2016 г.