

04

Экспериментальный стенд для исследования взаимодействия плотных сверхзвуковых потоков плазмы с магнитным полем арочной конфигурации

© М.Е. Викторов^{1,2}, А.В. Водопьянов^{1,2}, С.В. Голубев¹,
Д.А. Мансфельд¹, А.Г. Николаев³,
В.П. Фролова³, Г.Ю. Юшков³

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: mikhail.viktorov@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 21 апреля 2015 г.

Предложен новый экспериментальный подход, позволяющий исследовать в лабораторных условиях взаимодействие сверхзвуковых (ионное число Маха до 2.7) плазменных потоков высокой плотности (концентрация до 10^{15} cm^{-3}) с неоднородным магнитным полем (магнитные ловушки арочной конфигурации с полем до 3.3 Т в пробке), что предоставляет широкие возможности для моделирования процессов в околоземной и космической плазме.

Взаимодействие плотных сверхзвуковых потоков плазмы с неоднородным магнитным полем арочной конфигурации является одной из ключевых проблем физики околоземной и космической плазмы, определяющей формирование энергичной электронной компоненты в магнитосфере Земли [1], движение плазменных потоков в магнитосферах планет [2], энерговыделение при пересоединении магнитных силовых линий [3,4], генерацию электромагнитного излучения и выбросов энергичных частиц при солнечных вспышках [5]. Лабораторное исследование такого взаимодействия представляет интерес для определения физических механизмов процессов в космической плазме и их детального изучения в воспроизводимых условиях.

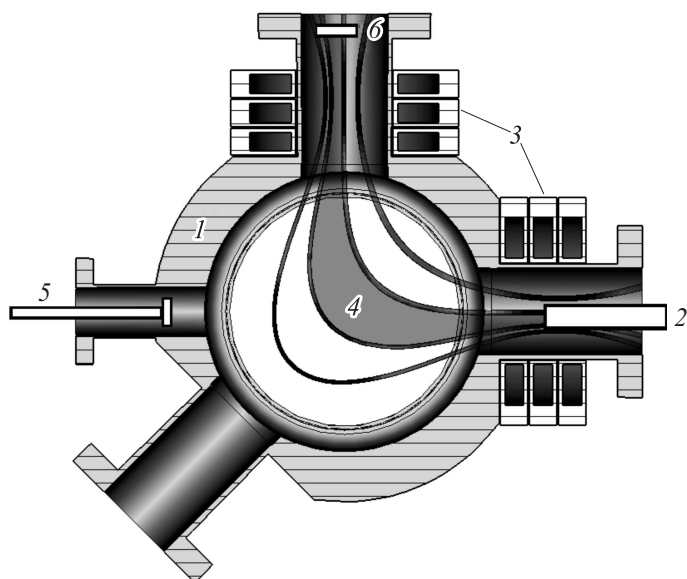


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1 — разрядная камера, 2 — плазмодгенератор, выполненный на стандартном фланце CF DN63, 3 — магнитные катушки, 4 — плазма, 5 — ленгмиоровский зонд на манипуляторе в диагностическом фланце камеры, 6 — ленгмиоровский зонд в магнитосопряженной относительно плазмодгенератора точке.

Плотные потоки плазмы для лабораторного моделирования создаются, как правило, путем испарения и ионизации материала твердотельной мишени мощным импульсом лазерного излучения [6,7], а также они могут быть сформированы в Z - и θ -пинчах [2,8]. В данной работе описывается новый экспериментальный подход, в котором поток плазмы создается с помощью импульсного вакуумного дугового разряда, что позволяет получать сверхзвуковые потоки плазмы с высокой степенью ионизации и высокой плотностью. Созданные плазменные потоки направляются в открытую магнитную ловушку с арочной конфигурацией магнитного поля.

Схема установки приведена на рис. 1. Основой стенда является вакуумная камера, оснащенная тремя фланцами для крепления ге-

нератора плазмы и катушек, создающих магнитное поле, а также диагностическими и откачным фланцами. Откачка разрядной камеры турбомолекулярным насосом TV-301 Navigator обеспечивает остаточное давление газа на уровне единиц 10^{-7} Torr.

Плазма создается специально разработанным плазмогенератором, особенностью которого является получение потока плазмы материала металлического катода в катодных пятнах импульсного вакуумного дугового разряда [9]. Катодные пятна вакуумного дугового разряда функционируют на торцевой поверхности катода, ограниченной трубчатой керамической вставкой. Инициирование разряда осуществляется искровым пробоем по поверхности торца керамической вставки при приложении высоковольтного импульса напряжения 7 kV между катодом и кольцевым поджигающим электродом, охватывающим внешнюю поверхность вставки. Далее вакуумный дуговой разряд длительностью $20 \mu\text{s}$ между катодом и анодом обеспечивается разрядом высоковольтного конденсатора емкостью $20 \mu\text{F}$. Амплитуда тока разряда регулируется величиной напряжения зарядки емкости. При максимальном напряжении на емкости 1.5 kV ток достигает 3.5 kA. Варьируя амплитуду импульса тока разряда при изменении напряжения зарядки конденсатора вакуумной дуги от сотен вольт до 1.5 kV, можно регулировать концентрацию плазмы в катодной области разряда в диапазоне от 10^{13} до 10^{15}cm^{-3} . При длительности тока дуги $20 \mu\text{s}$ длина генерируемого плазменного сгустка составляет около 40 см, что более чем в 2 раза превосходит продольный размер магнитной ловушки. Плазмогенератор собран на стандартном фланце, что позволяет устанавливать его в любом из 3 рабочих фланцев разрядной камеры.

Сверхзвуковой поток плазмы с плотностью до 10^{15}cm^{-3} и степенью ионизации более 80% (последнее особенно важно для моделирования процессов в космической плазме) инжектируется в магнитное поле с различной конфигурацией силовых линий, создаваемое током двух катушек. При размещении катушек под прямым углом друг к другу создается магнитное поле арочной конфигурации в форме изогнутой открытой магнитной ловушки. Каждая магнитная катушка состоит из трех последовательно соединенных секций, охлаждаемых через специальные каналы потоком воздуха, и позволяет получать в импульсно-периодическом режиме магнитное поле с индукцией в центре катушки вплоть до 3.3 Т. Установка позволяет исследовать взаимодействие потоков плазмы с магнитным полем при продольной и поперечной по отношению к магнитному полю инжекции плазмы.

Первые демонстрационные эксперименты проводились при инжекции плазмы через пробку магнитной ловушки. При этом генератор плазмы размещался в одном из фланцев разрядной камеры, где были установлены магнитные катушки, так что поверхность катода находилась в пробке магнитной ловушки (рис. 1). Целью проведенных экспериментов было исследование заполнения плотной плазмой магнитной ловушки арочной конфигурации, необходимое для дальнейшего изучения процесса „разрыва“ потоком плотной плазмы магнитных силовых линий поля такой конфигурации.

В работе использовался катод плазмогенератора, выполненный из алюминия. В этом случае скорость потока плазмы V_0 составляла порядка $2 \cdot 10^6$ cm/s, средний ионный заряд $Z = 2.5$, температура электронов $T_E = 6$ eV, кинетическая энергия направленного движения ионов $T_i = 60$ eV [10]. Для такого потока плазмы ионное число Маха $M_S = V_0/C_S = 2.7$, где $C_S = \sqrt{ZT_e/m_i}$ — скорость ионного звука. Для концентрации ионов $n_i \sim 10^{15}$ cm $^{-3}$ отношение газокINETического давления к магнитному $\beta = 8\pi nT/B^2$ может изменяться в пределах от 6 до 0.01 при изменении магнитного поля от 0.02 до 0.5 Т. Такой разброс параметра β означает, что в разрядной камере для заданного потока плазмы могут быть реализованы условия для разрыва магнитных силовых линий.

На рис. 2 представлена интегральная фотография оптического свечения плазмы, заполнившей магнитную ловушку. В этом случае ток дуги разряда равен 2.5 кА, концентрация плазмы около 10^{15} cm $^{-3}$. Ток в катушках, создающих магнитное поле, равен 5.6 кА, что соответствует индукции магнитного поля в центре разрядной камеры 0.13 и 2.83 Т в пробке магнитной ловушки. Видно, что область, заполненная плазмой, имеет четкие границы. При этом пространственное положение заполненной плазмой магнитной силовой трубки определяется радиальным положением катода генератора плазмы.

Динамика заполнения плазмой ловушки исследовалась с помощью плоских ленгмюровских зондов, расположенных в разных местах разрядной камеры. Один из зондов был размещен на торце фланца соленоида, свободного от плазмогенератора (за второй пробкой магнитной ловушки). Второй зонд располагался на манипуляторе в диагностическом фланце напротив плазмогенератора. Измерения, проведенные зондами, показали изменение амплитуды зондовых сигналов и наличие задержки в приходе плазмы на зонды, свидетельствующее о перераспределении

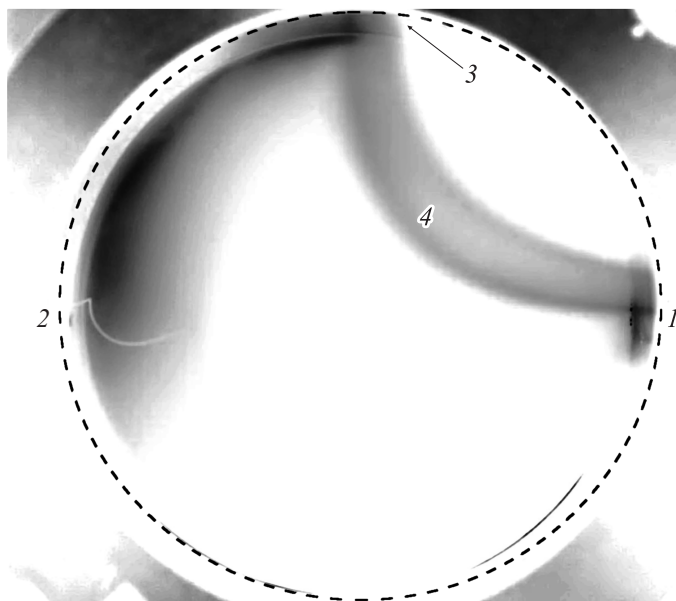


Рис. 2. Изображение (инvertированное) оптического свечения плазмы, заполняющей магнитную силовую трубку. Пунктиром показаны границы диагностического окна. 1 — плазмогенератор, 2 — лэнгмюровский зонд на манипуляторе, 3 — лэнгмюровский зонд в магнитосопряженной относительно плазмогенератора точке, 4 — плазма. Более детально расположение частей установки указано на рис. 1.

потока плазмы при изменении магнитного поля. Характерные осциллограммы изменения сигналов на зонды при увеличении магнитного поля показаны на рис. 3. Зонды работали в режиме ионного тока насыщения. При этом на них подавалось одинаковое отрицательное относительно разрядной камеры напряжение -50 V .

В отсутствие магнитного поля (рис. 3, *a*), как и ожидалось, есть только ток на зонд, расположенный напротив плазмогенератора. На начальной стадии разряда (стадия инициации) создается плазма с энергией электронов более 50 eV . Такие электроны способны преодолеть тормозящий потенциал зонда и регистрируются как характерные отри-

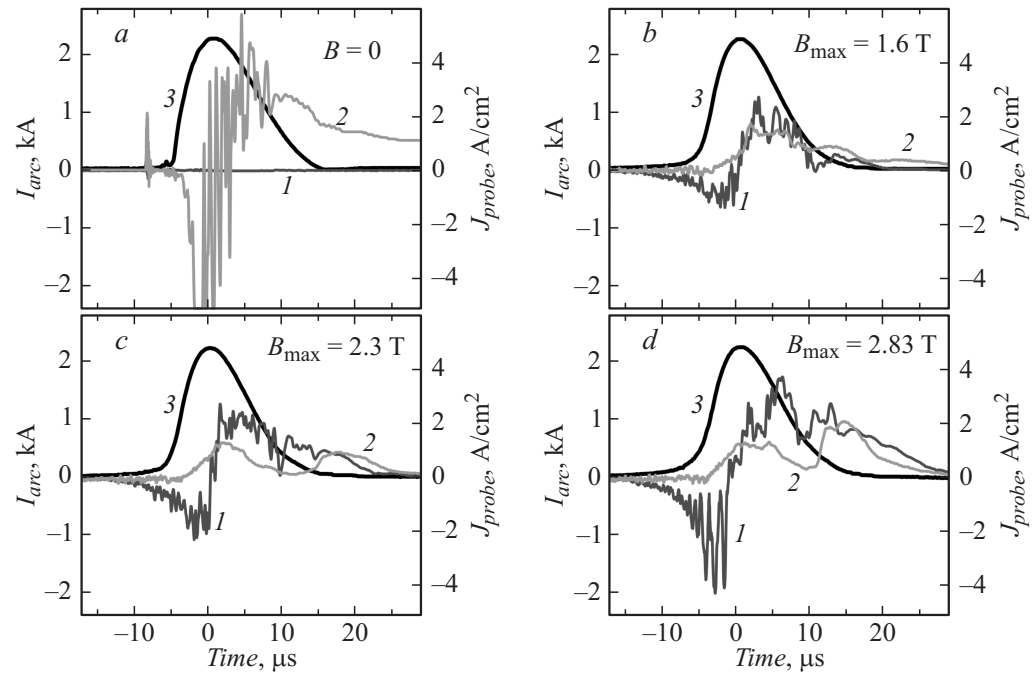


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с электрических зондов в зависимости от магнитного поля ловушки. 1 — плотность тока на верхний зонд, расположенный в сопряженной относительно плазмогенератора вершине силовой трубки; 2 — плотность тока на зонд, расположенный напротив плазмогенератора, увеличенная в 10 раз; 3 — ток дуги разряда. На панелях указаны значения индукции магнитного поля в пробке магнитной ловушки. Ноль временной шкалы соответствует максимуму тока дуги.

цательные всплески тока на зонд. Далее наблюдается положительный сигнал, соответствующий приходу основной плазмы дуговой стадии разряда. Временная задержка около $10\mu\text{s}$ здесь соответствует газодинамическому времени пролета плазмы от плазмогенератора до зонда.

При наличии магнитного поля распределение токов на зонды кардинально меняется (рис. 3, *b-d*). Плотность тока на зонд, расположенный в магнитосопряженной точке ловушки, отлична от нуля и более чем на порядок превосходит плотность тока на зонд напротив плазмогенератора. При наличии магнитного поля форма сигнала тока на зонд в магнитосопряженной точке имеет тот же вид, что и ток на зонд напротив плазмогенератора в отсутствие магнитного поля: также на начальной стадии разряда наблюдаются отрицательные всплески тока, соответствующие энергичным электронам. При увеличении магнитного поля сигнал с зонда напротив плазмогенератора в момент максимального тока дуги практически не изменяется. Образуется второй максимум тока на этот зонд, сдвинутый вправо на $15-20\mu\text{s}$ относительно максимума тока дуги разряда. В то же время сигнал с зонда в верхнем фланце разрядной камеры увеличивается пропорционально магнитному полю.

Существенное перераспределение плотностей токов на зонды, расположенные в разных местах разрядной камеры, означает, что более 90% потока плазмы из плазмогенератора эффективно удерживается магнитным полем ловушки. Наличие второго максимума тока на зонд, расположенный напротив генератора плазмы, после окончания импульса тока дуги может, по-видимому, означать, что наблюдается прорыв силовых линий магнитного поля ловушки, заполненной плазмой.

Таким образом, создан экспериментальный стенд для изучения взаимодействия плотных квазистационарных сверхзвуковых плазменных потоков с магнитными полями арочной конфигурации. Конструкция стенда позволяет как проводить исследования при заполнении плазмой открытой ловушки вдоль силовых линий магнитного поля, так и обеспечивать направление потока плазмы поперек магнитного поля при изменении положения генератора на разрядной камере за счет использования другого фланца. Стенд обеспечивает варьирование параметров плазмы и магнитного поля в широком диапазоне и предназначен для проведения лабораторного моделирования астрофизических процессов, в которых потоки плазмы взаимодействуют с магнитными полями небесных тел.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 14.Z50.31.0007), программы ОФН-15 „Плазменные процессы в космосе и в лаборатории“ и Совета по грантам президента Российской Федерации (СП-4857.2013.3).

Список литературы

- [1] *Fu H.S., Khotyaintsev Yu.V., Vaivads A.* et al. // *Nature Physics*. 2013. V. 9. P. 426.
- [2] *Shaikhislamov I.F., Zakharov Yu.P., Posukh V.G.* et al. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2014. V. 56. P. 125007.
- [3] *Yamada M., Kulsrud R., Ji H.* // *Rev. Mod. Phys.* 2010. V. 82. P. 603.
- [4] *Katz N., Egedal J., Fox W.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. P. 255004.
- [5] *Masuda S.* et al. // *Nature (London)*. 1994. V. 371. P. 495.
- [6] *Tripathi S.K.P., Gekelman W.* // *Solar Phys.* 2013. V. 286. P. 479.
- [7] *Plechaty C., Presura R., Esaulov A.A.* // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P.185002.
- [8] *Кичигин Г.Н., Строчкин Н.А.* Процессы энерговыведения в космической плазме: Монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 396 с.
- [9] *Месяц Г.А.* // *УФН*. 1995. Т. 165. С. 601.
- [10] *Anders A., Yushkov G.Yu.* // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 91. P. 4824.