

УДК 52-67

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ СВЕЧЕНИЯ ИОНОВ

© 2020 г. М. А. Ефимов^{1,2,*}, М. С. Руменских^{1,3}, А. А. Чибранов^{1,2},
А. Г. Березуцкий¹, И. Ф. Шайхисламов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский государственный технический университет”, Новосибирск, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

*E-mail: mikle3496@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Экспериментально исследовано бесстолкновительное взаимодействие плазменных потоков с использованием спектральной диагностики. Показано ускорение ионов в процессе разлета лазерной плазмы в замагниченную фоновую плазму. При этом ионы лазерной плазмы показывают торможение, величина которого зависит от заряда. Полученные данные будут полезны при анализе процесса обтекания магнитосфер солнечным ветром.

DOI: 10.31857/S0367676520070091

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторное моделирование процессов в космической плазме является важным инструментом получения экспериментальных данных, труднодоступных для прямых измерений. Лабораторное моделирование основано на принципе физического подобия, согласно которому при масштабировании системы с условием соблюдения равенства главных безразмерных параметров задачи, процессы в системе протекают аналогичным образом. Из большого количества задач в области космической и астрофизической плазмы исследование механизмов бесстолкновительного взаимодействия плазменных потоков в магнитных полях остается фундаментальной и практически важной задачей. Бесстолкновительные ударные взаимодействия наблюдаются на границе магнитосферы Земли при обтекании солнечным ветром, в корональных выбросах массы Солнца, а также в остатках сверхновых (по данным наблюдений телескопов). Непосредственное исследование такого рода взаимодействий является трудновыполнимой задачей. Опыты в лабораторных условиях могут дать важные данные, недоступные для других методов. В настоящее время эксперименты по лабораторному моделированию процессов бесстолкновительного ударного взаимодействия

потоков плазмы проводятся на установке LAPD [1], а также на экспериментальном стенде “КИ-1” ИЛФ СО РАН [2–4] в сотрудничестве с группой из ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ” [5].

С 80-х гг. прошлого века [6, 7] и по настоящее время [8, 9] проводятся эксперименты по исследованию ионосферы и магнитосферы путем выброса искусственных облаков различных химических элементов. При взаимодействии с солнечным излучением такое облако ионизируется и генерирует излучение в видимой области спектра, которое затем регистрируется оптическими приборами на поверхности Земли. Далее по динамике облака можно изучать взаимодействие плазмы с геомагнитной плазмой и солнечным ветром, оценивать магнитные и электрические поля и скорости течения ионосферы. Для верификации полученных данных эксперименты по выбросу плазменных потоков в замагниченную среду проводятся в лабораторных условиях. Так же, как и в ионосфере, в лабораторных опытах оптические и спектральные методы позволяют получить информацию о взаимодействии взаимопроникающих потоков плазмы с учетом различных ионных компонент как плазменного потока, так и фоновой плазмы [10].

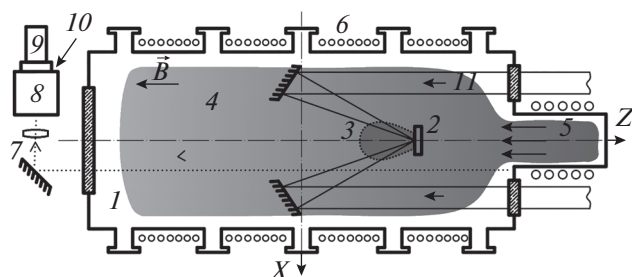


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – вакуумная камера; 2 – полиэтиленовая (C_2H_4) мишень; 3 – лазерная плазма; 4 – фоновая плазма; 5 – θ -пинч (источник фоновой плазмы); 6 – катушки для создания однородного магнитного поля (поле на рисунке соответствует $B_0 = +200$ Гс); 7 – поворотное зеркало и фокусирующая линза; 8 – монохроматор МДР-12; 9 – ФЭУ, 10 – ПЗС-матрица, 11 – лазерные лучи. Пунктирная линия, проходящая через зеркало и линзу 7, показывает оптическую трассу спектральных измерений.

Плазма, создаваемая мощным импульсным лазерным излучением, является уникальной по свойствам и наиболее подходящей для задач моделирования космической плазмы по таким параметрам, как скорость потоков, плотность энергии, степень ионизации. Основными методами диагностики лабораторной и космической плазмы являются зондовая и оптическая. Для многокомпонентной лазерной плазмы диагностика свечения спектральных линий особенно актуальна для измерения отдельных сортов атомов и ионов. Применение зондовой и спектральной диагностики на стенде “КИ-1” в предыдущих экспериментах описано в работах [4, 11–15].

В настоящей работе спектральная диагностика, состоящая из монохроматора и фото-электронного умножителя (ФЭУ), была дополнена прибором с зарядовой связью (ПЗС-линейкой). Это позволяет совмещать возможности регистрации ФЭУ с высоким временным разрешением (< 0.1 мкс) и ПЗС-линейки с высоким пространственным и соответственно спектральным разрешением (~ 0.3 Å). Необходимость в совмещенном приборе связана с тем, что ФЭУ предназначен для регистрации динамики светового потока в течение всего времени существования плазмы (~ 100 мкс) за одно срабатывание установки, в то время как измерение профиля спектральной линии с помощью ФЭУ требует сканирования монохроматором и большого количества срабатывания установки. При этом появляется значительная неточность в профиле линии из-за разброса параметров от выстрела к выстрелу. ПЗС-линейка позволяет с большей точностью зарегистрировать профиль спектральной линии за одно срабатывание установки. При этом ПЗС-матрица, в от-

личие от ФЭУ, обладает низким временным разрешением (40 мкс). Разделение светового потока на выходной щели монохроматора на ФЭУ и на ПЗС-линейку позволяло регистрировать за одно срабатывание временную динамику свечения линии и с помощью этого привязывать открытие затвора ПЗС-линейки и запись профиля спектральной линии в определенной и регулируемой части плазменного потока.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Стенд “КИ-1” лаборатории энергетики сверхмощных лазеров ИЛФ СО РАН включает крупногабаритную ($\varnothing 1.2 \times 5$ м) высоковакуумную (10^{-6} торр) камеру из нержавеющей стали, а также CO_2 -лазерную систему с выходной энергией излучения до 1 кДж. Камера снабжена источником однородного магнитного поля величиной до 1000 Гс. Стенд “КИ-1” также снабжен индукционной плазменной пушкой (θ -пинч) для заполнения камеры высокоионизованной фоновой плазмой с концентрацией до 10^{14} см $^{-3}$, движущейся со скоростью до 100 км \cdot с $^{-1}$.

Схема стенда представлена на рис. 1. Излучение от CO_2 лазера с энергией в импульсе ~ 200 Дж и длительностью импульса $\tau = 100$ нс фокусируется на полиэтиленовую мишень 2 в камере 1. В результате абляции на поверхности мишени образуется лазерная плазма, состоящая из ионов водорода и углерода 3, которая адиабатически расширяется вдоль оси камеры либо в вакуум, либо в фоновую плазму 4, созданную θ -пинчем 5. Скорости различных ионов лазерной плазмы варьируются от 100 до 200 км \cdot с $^{-1}$, температура на расстоянии более 10 см от мишени составляет порядка 10 эВ. В настоящих опытах фоновая плазма генерировалась из газообразного аргона и имела скорость движения в камере примерно 20 км \cdot с $^{-1}$. Величина магнитного поля в камере составляла 200 Гс, а вектор поля был направлен вдоль оси разлета как фоновой, так и лазерной плазмы. При такой величине поля разлет лазерной плазмы в фоне был сверхзвуковой и сверх-Альфвеновский. Стенд “КИ-1” позволяет сочетать различные режимы срабатывания: фоновая плазма (работает только θ -пинч); лазерная плазма (только лазер); “лазер + фон” (взаимодействие лазерной и фоновой плазм).

ОПИСАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРИБОРА

Свечение различных ионов лазерной плазмы спектрально разделялось на отдельные линии монохроматором МДР-12 со спектральным разре-

шением $20 \text{ \AA} \cdot \text{мм}^{-1}$, а затем регистрировалось фотоэлектронным умножителем δ в паре с ПЗС-линейкой 9 (рис. 1). ПЗС-линейка представляет собой сборку фотодиодных ячеек (2048 ячеек на 29 мм) и использовалась с целью регистрации профиля спектральных линий на выходной щели монохроматора. Программное обеспечение позволяет варьировать время накопления светового сигнала (экспозиция), а также время начала экспозиции (открытия затвора). Значение экспозиции в данном эксперименте составляло 40 мкс, что сопоставимо с временной длительностью сгустка лазерной плазмы. По этой причине полученные результаты представлены интегральными по времени данными. Спектральное разрешение данного прибора в совокупности с монохроматором с ПЗС-линейкой составило $0.334 \text{ \AA}/\text{пиксель}$. Примерно половина свечения из выходной щели монохроматора направлялось на ФЭУ. Регистрация динамики свечения линии с помощью ФЭУ позволяет точно определить, в каком временном интервале потока плазмы происходит запись профиля линии на ПЗС-матрице. Рис. 2 показывает пример одновременной регистрации осциллограммы сигнала ФЭУ и импульса затвора ПЗС-линейки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Линия наблюдения оптических измерений была параллельна оси распространения плазмы и смещена на расстояние $x = 7\text{--}10$ см от лазерной мишени (см. рис. 1). Такое смещение луча наблюдения было сделано для того, чтобы избежать прямого попадания излучения от источника газоразрядной плазмы и от лазерного фокуса на мишени. Выбор и идентификация линий свечения лазерной плазмы была основана на предыдущих опытах на стенде «КИ-1» [9], а линий свечения аргона на основе стандартных справочников [16]. Как известно из предыдущих исследований [12], в условиях, когда температура электронов значительно меньше потенциала возбуждения соответствующих уровней, основным механизмом свечения ионов является рекомбинация с накачкой верхних уровней и каскадным девозбуждением. Это означает, что свечение иона заряда Z отражает концентрацию ионов с зарядом $Z+1$. В условиях настоящих экспериментов рекомбинационное свечение является главным механизмом для всех рассматриваемых линий, кроме некоторых атомарных (H, C, Ar), для которых также возможна накачка ударным возбуждением электронов.

Сравнение спектров в различных режимах позволило обнаружить, что при взаимодействии лазерной плазмы с фоном линии ионизованного аргона претерпевают смещение в синюю область

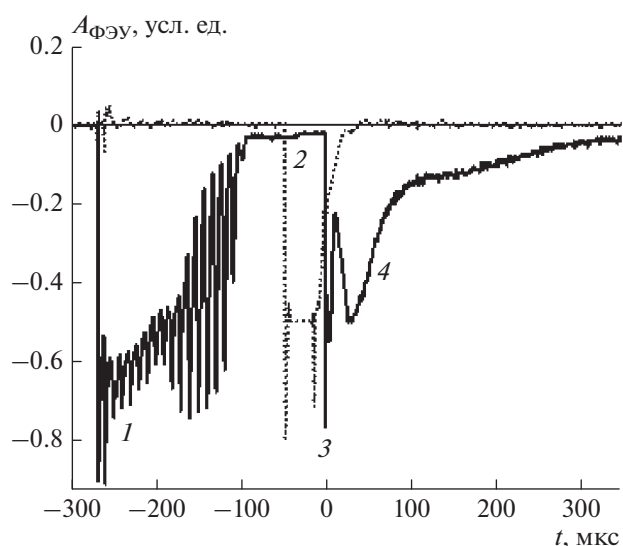


Рис. 2. Осциллограмма, демонстрирующая работу совмещенного прибора: сигнал ФЭУ (сплошная линия) показывает временную динамику свечения в выбранном спектральном интервале. Наблюдается фаза срабатывания θ -пинча (1), приход фоновой плазмы в область взаимодействия (2), образование лазерной плазмы (3, нулевой момент времени соответствует приходу лазерного импульса на мишень), фаза взаимодействия (4). Пунктирная линия показывает импульс затвора ПЗС-линейки и временной интервал, в течение которого ПЗС-линейка накапливает спектр. $A_{\text{ФЭУ}}$ — амплитуда сигнала ФЭУ.

спектра (рис. 3а). Это вызвано ускорением ионов фона за счет передачи импульса от лазерной плазмы. Вычисленное по формуле Доплера изменение скорости аргона при воздействии потока лазерной плазмы достигает не менее $200 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

Измерения также показали смещение линий ионов углерода в красную область при взаимодействии лазерной плазмы с плазмой θ -пинча, что означает замедление. При этом величина эффекта зависит от зарядности ионов. В частности, линии трижды ионизованного углерода C^{3+} смещались в красную область на величину 0.7 \AA , или $50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, как показано на рис. 3б. Для иона C^{2+} смещение линии составило 2 \AA , или $150 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно. При этом для линии атомарного углерода смещение линии не зарегистрировано (рис. 3в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор, совмещающий возможности ФЭУ и ПЗС-матрицы, был реализован и успешно применен в опытах по взаимодействию взаимопроницающих потоков плазмы. Спектральная диагностика подтвердила факт взаимодействия в продольном магнитном поле, которое в аналогич-

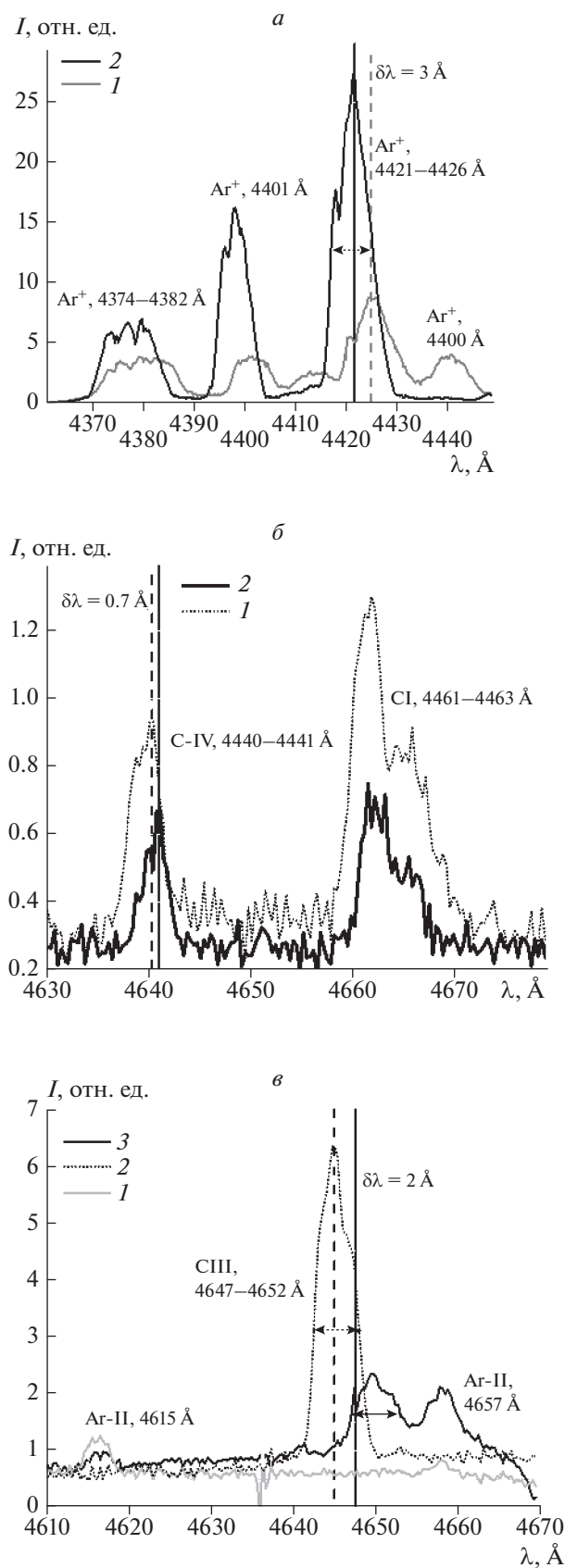


Рис. 3. (а) Участок спектра с линиями аргона: 1 – спектр в случае одной фоновой плазмы, 2 – в случае взаимодействия лазерной и фоновой плазмы. (б) Участок спектра с линиями ионов углерода: 1 – спектр в случае одной лазерной плазмы, 2 – в случае взаимодействия лазерной и фоновой плазмы. Смещение линий ионизованного (C^{+3}) углерода при взаимодействии лазерной и фоновой плазмы. Тонкой линией обозначен спектр лазерной плазмы без фона. (в) Участок спектра с линиями ионов углерода и аргона: 1 – спектр в случае одной фоновой плазмы, 2 – в случае одной лазерной плазмы, 3 – в случае взаимодействия лазерной и фоновой плазмы.

ных условиях наблюдалось также по зондовым измерениям [12]. При этом, в отличие от зондовых измерений, которые регистрируют усредненный по ионам поток, спектральная диагностика показала дифференцированный эффект взаимодействия различных ионов фоновой и лазерной плазмы. В частности, установлено, что ионы фона ускоряются практически до скорости фронта потока лазерной плазмы. Максимальное торможение наблюдалось для ионов C^{2+} – фактически ионов C^{3+} , учитывая рекомбинационный характер свечения зарегистрированной линии. Именно эти ионы являются основной компонентой лазерной плазмы при используемых интенсивностях облучения мишени [8]. Более высокозарядные ионы C^{4+} показали меньшее торможение, что, по-видимому, связано с тем, что они находятся на самом фронте потока лазерной плазмы. Низкозарядные ионы C^{1+} вообще не показали торможения, поскольку имеют наименьшую скорость, и находятся в глубине потока. Эти данные полностью соответствуют электродинамической природе взаимодействия.

Другое проявление взаимодействия, зарегистрированное спектральной диагностикой – изменение интенсивности свечения линий. Линии ионов углерода при наличии фоновой плазмы показывают двух-трехкратное уменьшение свечения. Это объясняется нагревом лазерной плазмы в результате взаимодействия с фоном и торможения. Увеличение температуры приводит к уменьшению рекомбинации – основного механизма накачки уровней ионов. При этом свечение линий ионов аргона в случае взаимодействия увеличивается. Этот эффект связан с тем, что в присутствии лазерной плазмы концентрация электронов существенно больше, чем в фоне, что приводит к относительному увеличению рекомбинации ионов аргона.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117021750017-0) а также при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00080)

и РФФИ (проекты №№ 18-29-21018 мк, № 18-32-00029 и № 18-42-543019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Niemann C., Gekelman W., Constantin C.G. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 7413.
2. *Геворкян Л.Б., Оришич А.М., Пономаренко А.Г. и др.* // *Физическая газодинамика: Сб. науч. тр. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1976. С. 192.*
3. *Захаров Ю.П., Антонов В.М., Бояринцев Э.Л. и др.* // *Физ. плазмы.* 2006. Т. 32. № 3. С. 207; *Zakharov Yu.P., Antonov V.M., Boyarintsev E.L. et al.* // *Plasma Phys. Rep.* 2006. V. 32. № 3. P. 183.
4. *Шайхисламов И.Ф., Захаров Ю.П., Посух В.Г. и др.* // *Физ. плазмы.* 2015. Т. 41. № 5. С. 434; *Shaikhislamov I.F., Zakharov Yu.P., Posukh V.G. et al.* // *Plasma Phys. Rep.* 2015. V. 41. № 5. P. 399.
5. *Захаров Ю.П., Терехин В.А., Пономаренко А.Г. и др.* // *Тр. междунар. конф. "XVIII Харитоновские тематические научные чтения"* (Саров, 2016). С. 374.
6. *Paschmann G., Carlson C.W., Baumjohann W. et al.* // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. № A2. P. 1271.
7. *Lui A.T.Y., Goodrich C.C., Mankofsky A., Papadopoulos K.* // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. № A2. P. 1333.
8. *Дробышев А.И., Мокров А.А., Кукушкин И.К. и др.* // *Вестн. СамГУ. Естеств. сер.* 2012. № 3/1(94). С. 137.
9. *Ступицкий Е.Л., Ренин А.Ю., Холодов А.С., Холодов Я.А.* // *Матем. моделир.* 2004. Т. 16. № 7. С. 43.
10. *Bondarenko A.S., Schaeffer D.B., Everson E.T. et al.* // *Phys. Plasmas.* 2017. V. 24. № 8. Art. № 082110.
11. *Антонов В.М., Бояринцев Э.Л., Мелехов А.В. и др.* // *ПМТФ.* 2009. Т. 50. № 3 (295). С. 36; *Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V. et al.* // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2009. V. 50. № 3. P. 389.
12. *Шайхисламов И.Ф.* Лабораторное моделирование магнитосферных процессов. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИЛФ СО РАН, 2014. 240 с.
13. *Chibrarov A., Efimov M., Romanchenko I. et al.* // *AIP Conf. Proc.* 2019. V. 2098. № 1. Art. № 020005.
14. *Rumenskikh M.S., Efimov M.A., Berezutsky A.G., Chibrarov A.A.* // *AIP Conf. Proc.* 2019. V. 2069. № 1. Art. № 030005.
15. *Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Бояринцев Э.Л. и др.* // *Квант. электрон.* 2017. Т. 47. № 9. С. 849; *Tishchenko V.N., Berezutskiy A.G., Boyarintsev E.L. et al.* // *Quant. Electron.* 2017. V. 47. № 9. P. 849.
16. https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.