

Измерение рентгеноспектральными методами параметров высокотемпературной плазмы в пористых мишенях, облучаемых мощными лазерными импульсами

В.В.Гаврилов*, А.Ю.Гольцов*, Н.Г.Ковальский*, С.Н.Коптяев*, А.И.Магунов**, Т.А.Пикуз**, И.Ю.Скобелев**, А.Я.Фаёнов**

В экспериментах по облучению мощными лазерными импульсами ($\lambda = 1.054$ мкм, $\tau = 2.5$ нс, $I \approx 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см²) плоских мишеней на основе агара ($C_{12}H_{18}O_9$)_n со средней плотностью 2 мг/см³ с помощью сферически изогнутых (фокусирующих) кристаллов слюды и кварца регистрировались рентгеновские спектры многозарядных ионов. Измерения проводились с высоким спектральным и пространственным разрешением. Анализ экспериментальных данных, полученных при облучении образцов из агара с примесью Al_2O_3 , позволил определить основные параметры плазмы, образующейся внутри облучаемых мишеней. Впервые получена экспериментальная информация о ионной температуре плазмы в малоплотных пористых мишенях. В исследовавшихся условиях ионная температура превышала электронную в полтора-два раза.

Ключевые слова: мощное лазерное излучение, высокотемпературная плазма, линейчатое рентгеновское излучение многозарядных ионов, пористая среда низкой плотности, рентгеновский кристаллический спектрограф.

1. Введение

Изучение физических процессов, происходящих в плазме, которая образуется при взаимодействии лазерного излучения высокой интенсивности ($10^{13} - 10^{14}$ Вт/см²) с пористыми материалами пониженной плотности ($1 - 100$ мг/см³), представляет большой интерес для целого ряда перспективных фундаментальных научных исследований, таких как лазерный термоядерный синтез (ЛТС), физика высоких плотностей энергии, моделирование в лабораторных условиях астрофизических явлений. На современном этапе исследований по программе ЛТС ключевым вопросом является согласование конструкции мишени с параметрами лазерных импульсов и условиями облучения. Один из перспективных подходов состоит в оптимизации конструкций мишеней путем использования в них объёмно-структурированных малоплотных материалов (например, для выравнивания неоднородностей лазерного облучения и обеспечения устойчивого сжатия термоядерных мишеней [1, 2]). Пористые среды с распределёнными добавками тяжёлых элементов активно исследуются в настоящее время при поиске возможностей управления спектральным составом рентгеновского излучения образующейся плазмы [3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, проведенных на установке «Мишень», которые являются продолжением более ранних исследований

взаимодействия мощного лазерного излучения с пористыми средами [4–8]. Основная цель работы – получение более детальной информации о плазме, образующейся внутри облучаемых малоплотных образцов.

2. Условия экспериментов и диагностический комплекс

Эксперименты проводились на установке «Мишень» [9] в ГНЦ РФ – ТРИНИТИ. Параметры установки: длина волны лазерного излучения 1.054 мкм, энергия лазерного импульса до 100 Дж при длительности ~ 2.5 нс, энергетический контраст не ниже 10^6 . Излучение фокусировалось на мишень линзой с относительным отверстием $1:16$; при диаметре фокального пятна ~ 250 мкм средняя интенсивность света на поверхности мишени составляла $\sim 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см². В вакуумной камере взаимодействия устанавливались плоские мишени толщиной $300 - 500$ мкм, изготовленные из агара ($C_{12}H_{18}O_9$)_n с плотностью 1 мг/см³, в который в качестве примеси вносился мелкодисперсный (с диаметром микрочастиц менее 1 мкм) порошок Al_2O_3 с такой же средней плотностью. Применявшийся в опытах агар представляет собой хаотическую структуру из нитей с твердотельной плотностью диаметром $1 - 2$ мкм при расстоянии между нитями $10 - 50$ мкм. В качестве мишеней использовались также алюминиевые фольги толщиной 6 мкм.

Рентгеновское излучение плазмы анализировалось четырьмя спектрографами со сферически изогнутыми (фокусирующими) кристаллами слюды и кварца [10–12], обеспечивающими высокое спектральное разрешение ($\lambda/\Delta\lambda \geq 5000$) и пространственное разрешение $\sim 20 - 30$ мкм. С помощью трех слюдяных спектрографов спектры ионов алюминия регистрировались во 2-м порядке дифракции, а с помощью кварцевого – в 1-м. Слю-

*ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Россия, 142190 Троицк, Московская обл.; e-mail: vvgavril@triniti.ru; факс: 7 (095) 334 50 56, 7 (095) 334 56 67

**Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Россия, 141570 Менделеево, Московская обл.

данные спектрографы были настроены на линии He_β иона Al XII ($\lambda \sim 6.63 \text{ \AA}$), He_γ иона Al XII ($\lambda \sim 6.31 \text{ \AA}$), Ly_α иона Al XIII ($\lambda \sim 7.17 \text{ \AA}$), а кварцевый спектрограф – на линию He_α иона Al XII ($\lambda \sim 7.76 \text{ \AA}$). Необходимо отметить, что высокая чувствительность фокусирующих спектрографов позволила получить приведенные в работе спектры ионов алюминия за одну вспышку лазера.

Для контроля размеров фокального пятна применялась рентгеновская камера-обскура.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Ранее в работах [4–8] было показано, что при облучении пористой среды поглощение лазерного излучения носит объёмный характер и внутри пористой мишени формируется слой высокотемпературной плазмы. Для мишени с начальной плотностью 2 мг/см^3 размер этого слоя в направлении распространения лазерного пучка составляет $300\text{--}400 \text{ мкм}$, а для мишени с начальной плотностью 10 мг/см^3 он уменьшается до $100\text{--}150 \text{ мкм}$. В направлении, перпендикулярном лазерному пучку, размер области, занятой горячей плазмой внутри пористой мишени, несколько превышает диаметр фокального пятна и слабо зависит от плотности агара.

Длительность рентгеновского импульса, регистрируемого вакуумными диодами и рентгеновской электронно-оптической камерой, равна $3\text{--}4 \text{ нс}$, т. е. практически совпадает с длительностью лазерного импульса. Электронная температура плазмы T_e определялась путём обработки рентгеновских обскурограмм методом фильтров и для пористых мишеней с плотностью 2 мг/см^3 вблизи центра протяженного плазменного образования составляет $0.8\text{--}1 \text{ кэВ}$, несколько уменьшаясь по направлению в глубину мишени – до $0.6\text{--}0.7 \text{ кэВ}$.

В настоящей работе в экспериментах по лазерному облучению образцов из агара со средней плотностью 1 мг/см^3 , в которые вносилась примесь Al_2O_3 также со средней плотностью 1 мг/см^3 , были получены спектры многозарядных ионов алюминия с пространственным разрешением вдоль нормали к поверхности мишени. Примеры спектрограмм приведены на рис.1. Для всех зарегистрированных линий размер зоны свечения внутри малоплотных образцов составлял $0.35\text{--}0.4 \text{ мм}$.

Неожиданным оказался факт регистрации в наших экспериментах линейчатого излучения многозарядных ионов серы и хлора (см. рис.1). По-видимому, эти примеси вносятся в процессе изготовления мишеней из агара. Как будет показано ниже, наличие примесей серы и хлора в пористых мишенях оказалось весьма полезным для решения некоторых задач настоящей работы.

При постановке экспериментов предполагалось, что основные результаты будут получены из анализа спектра иона Al XII (резонансной линии $\text{He}_{\alpha 1}$ (R), интеркомбинационной линии $\text{He}_{\alpha 2}$ (I) и спутников (k, j)). По отношению интенсивностей $I_{k,j}/I_R$ планировалось определение температуры плазмы, а по отношению I_R/I_I – плотности. Однако высокая интенсивность резонансной линии I_R приводила в условиях наших экспериментов к переэкспонированию регистрирующей фотопленки, что исключало возможность реализации такого подхода.

Вообще говоря, для определения плотности плазмы можно было бы использовать отношение интенсивностей линий $I_{k,j}/I_I$, но оно зависит не только от плотности, но и от температуры. Это означает, что спектр He_α иона Al XII мог быть использован для определения плотности лишь при независимых измерениях температуры плазмы.

Определить температуру плазмы оказалось возможным именно благодаря наличию примесей серы и хлора в пористой мишени. На рис.2 приведен пример денсито-

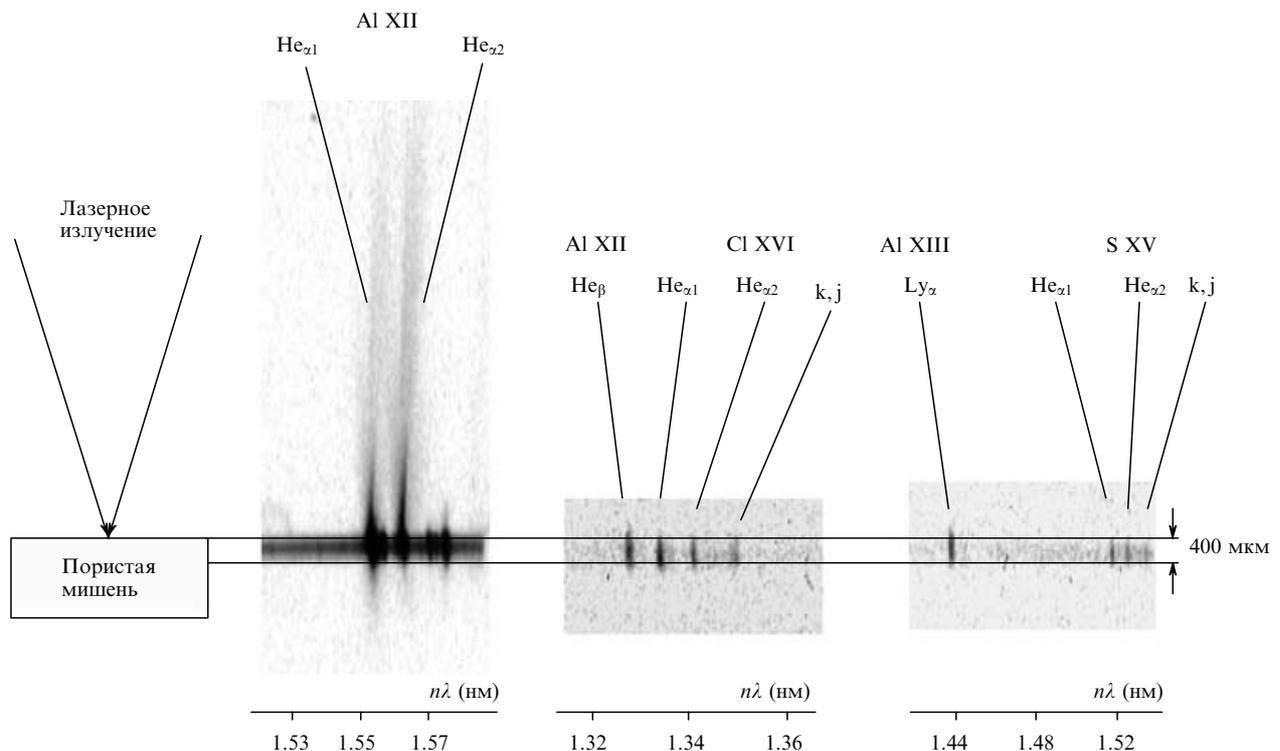


Рис.1. Спектрограммы многозарядных ионов алюминия, хлора и серы, зарегистрированные с помощью щелевого спектрографа, в случае лазерного облучения образцов из агара с примесью Al_2O_3 при порядке дифракции $n = 2$ для линейчатого излучения ионов алюминия и $n = 3$ для излучения ионов хлора и серы.

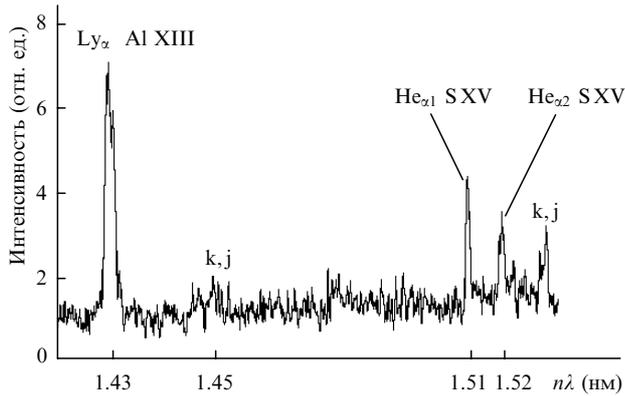


Рис.2. Относительные интенсивности линейчатого излучения ионов Al XIII, зарегистрированного во 2-м порядке дифракции, и линейчатого излучения ионов S XV, зарегистрированного в 3-м порядке.

граммы спектра линии He_{α} иона S XV, зарегистрированного в 3-м порядке дифракции на кристалле слюды. По отношению интенсивностей линий $I_{k,j}/I_R$ на этой денситограмме было найдено $T_e = 800$ эВ. Использование полученных температуры и отношения интенсивностей линий $I_{k,j}/I_I$ иона Al XII приводит к плотности плазмы $N_e = 6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Зарегистрированные спектры содержали также информацию о пространственном распределении параметров плазмы в зоне свечения. Анализ отношений интенсивностей линий $I_{k,j}/I_R$ позволил определить электронную температуру плазмы в областях внутри пористого образца, значения которой на расстояниях 190, 220 и 250 мкм от облучаемой поверхности мишени составили 750, 800 и 650 эВ соответственно. К сожалению, из-за низкой интенсивности спектральных линий хлора погрешность измерения T_e оказалась сравнимой с вариацией T_e по пространству. В результате измерение пространственного распределения плотности плазмы с достаточной точностью по линиям иона Al XII оказалось невозможным. Приведенные в табл.1 параметры плазмы относятся к пространственной области, расположенной в глубине пористого образца на расстоянии ~ 220 мкм от поверхности мишени.

Полученные спектры позволили оценить ещё один весьма важный параметр, а именно ионную температуру плазмы T_i . Ионная температура определялась из измерений доплеровского уширения наблюдаемых спектральных линий. Для переходов 2–1 He-подобного иона Cl XVI при электронной плотности менее 10^{21} см^{-3} штарковское уширение заведомо очень мало. Ввиду низкой концентрации хлора в мишени оптическая толщина плазмы не превышает единицы даже для резонансной линии. В этих условиях ширина линии определяется только движением ионов.

Табл.1. Параметры плазмы, определяемые разными диагностическими методами.

Ион	Линии, отношение интенсивностей которых используется в работе	N_e (см^{-3})	T_e (эВ)
Cl XVI	R/I	$< 10^{21}$	–
S XV	R/I	$< 10^{21}$	–
Cl XVI	k, j/R	–	650–800
S XV	k, j/R	–	600–800
Al XII	k, j/I	$6 \cdot 10^{20}$	–

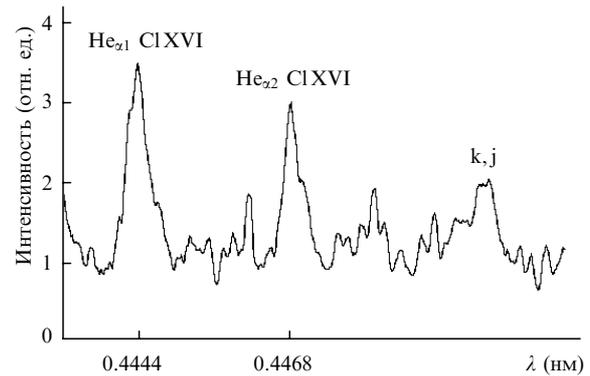


Рис.3. Относительные интенсивности линейчатого излучения ионов Cl XVI, эмиттируемого из области внутри малоплотного образца, расположенной на расстоянии ~ 220 мкм от облучаемой поверхности.

Следует отметить, что в наших экспериментальных условиях продолжительность начальной стадии испарения отдельных структурных элементов пористой среды и заполнения пор гидродинамическими потоками плазмы составляет всего 0.2–0.3 нс [4], тогда как длительность лазерного импульса равна 2.5 нс. По этой причине в полученных интегральных по времени спектрах вкладом в доплеровское уширение, обусловленным макроскопическими потоками плазмы, можно пренебречь, и по ширине спектральных линий оценить ионную температуру плазмы.

Обработка спектра, приведенного на рис.3, показала, что наблюдаемая ширина интеркомбинационной линии иона Cl XVI на половине интенсивности составляет $\Delta\lambda/\lambda = 4.9 \cdot 10^{-4}$, что дает $T_i \approx 1.4$ кэВ, т. е. ионная температура плазмы в полтора-два раза больше электронной температуры. Необходимо отметить, что существенное превышение ионной температуры над электронной в плазме, образующейся при облучении малоплотных пористых сред мощным лазерным излучением, было теоретически предсказано в работах [13, 14]. В них подробно анализируется образование неравновесной плазмы в пористой среде.

Таким образом, в настоящей работе впервые проведена оценка ионной температуры плазмы, генерируемой при лазерном облучении мишеней из пористых материалов. В условиях наших экспериментов ионная температура примерно в два раза превышала электронную.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 01-02-17336 и 01-02-17361). Авторы признательны С.Ф.Медовщикову за изготовление пористых мишеней, а также А.Э.Бугрову, И.Н.Бурдонскому, Е.В.Жужукало, В.Н.Кондрашову, В.Г.Николаевскому и В.М.Петрякову за помощь в проведении экспериментов.

1. Гуськов С.Ю., Змитренко Н.В., Розанов В.Б. *ЖЭТФ*, **108**, 548 (1995).
2. Desselbeger M., Jones M.W., Edwards J. et al. *Phys. Rev. Letts*, **74**, 2961 (1995).
3. Lindl J. *Phys. Plasmas*, **2**, 3933 (1995).
4. Бугров А.Э., Бурдонский И.Н., Гаврилов В.В. и др. *ЖЭТФ*, **111**, 903 (1997).
5. Burdonsky I.N., Bugrov A.E., Gavrilov V.V. et al. *Rev.Sci.Instrum.*, **68**, 810 (1997).
6. Бугров А.Э., Бурдонский И.Н., Гаврилов В.В. и др. *ЖЭТФ*, **115**, 805 (1999).
7. Bugrov A.E., Burdonsky I.N., Gavrilov V.V. et al. *Laser and Particle*

- Beams*, **17**, 415 (1999).
8. Bugrov A.E., Burdonsky I.N., Gavrilov V.V. et al. In: *Inertial fusion sciences and applications*. Eds by Ch.Labaune, W.Hogan, K.A.Tanaka (Paris, Elsevier, 2000, p.355–358).
 9. Bolotin V.A., Burdonsky I.N., Gavrilov V.V. et al. *Rev.Sci.Instrum.*, **61**, 3259 (1991).
 10. Bryunetkin B.A., Pikuz S.A., Skobelev I.Yu. et al. *Laser and Particle Beams*, **10**, 849 (1992).
 11. Faenov A.Ya., Agafonov Yu.A., Bryunetkin B.A. et al. *Proc. SPIE*, **2015**, 64 (1993).
 12. Брюнеткин Б.А. и др. *Квантовая электроника*, **21**, 142 (1994).
 13. Гуськов С.Ю., Розанов В.Б. *Квантовая электроника*, **24**, 715 (1997).
 14. Гуськов С.Ю., Змитренко Н.В., Розанов В.Б. *Письма в ЖЭТФ*, **66**, 521 (1997).