

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

© 2010 П. Е. Тимченко, В. Л. Маринин

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Проведено экспериментальное исследование масс-спектроскопическим и рентгеноспектральным методами лазерной плазмы, создаваемой при воздействии излучения лазера с управляемой функцией взаимной когерентности. Показано, что рентгеноспектральный метод обеспечивает надёжное получение информации с высокой скоростью её обработки.

Масс-спектрокопия, рентгеноспектральный анализ, лазерная плазма, диагностика, спектроскопия.

В настоящее время в энергетике остро стоит проблема истощения природного топливного сырья. Перед человечеством поставлена глобальная задача – поиск альтернативных источников энергии. Одним из таких источников является управляемый лазерный термоядерный синтез. Исследования по лазерному термоядерному синтезу на сегодняшний день характеризуются интенсивным развитием работ по созданию лазерных установок мегаджоульного масштаба, предназначенных для осуществления «вспышки» термоядерного топлива, при которой термоядерная энергия, выделяемая из плазмы, значительно превысит уровень энергии, затраченной на её создание. При разработке подобных систем одной из важных задач является корректный контроль характеристик лазерной плазмы.

На данный период времени проводятся эксперименты по получению и исследованию лазерной плазмы с термоядерными параметрами. Плазма создаётся при фокусировке на мишень излучения лазерного импульса от лазера на неодимовом стекле с управляемой функцией взаимной когерентности [1], параметры которого имеют следующие значения: длительность $\tau = 2,5$ нс, энергия импульса $E \sim$

100 Дж, диаметр пучка $\varnothing 45$ мм, длина волны $\lambda = 1,06$ мкм. Преимущества данного лазера заключаются в возможности практически полного подавления спекл-структуры в распределении интенсивности излучения на поверхности нагреваемой мишени, что является важнейшим условием для реализации высокого сжатия термоядерного топлива в режиме прямого нагрева мишени. Другим важным его достоинством является возможность управления распределением интенсивности, что открывает широкие перспективы для экспериментального изучения развития различного рода неустойчивостей в нагреваемой плазме, моделируя возмущения различного пространственно-временного масштаба, при исследованиях кумулятивных явлений в плазменной короне мишени сложных конструкций и пр. В таких экспериментах получение спектрально-энергетических характеристик разлетающихся ионов даёт возможность получить важную информацию о процессах, происходящих в лазерной плазме.

Важной задачей при исследовании лазерной плазмы является оперативный контроль в экспериментах параметров создаваемой плазмы. Высокотемпературная плазма, создаваемая мощным лазер-

ным излучением на поверхности твёрдой мишени [2], представляет собой уникальный физический объект, время жизни которого определяется скоростью инерциального разлета под действием сил газодинамического давления. Характерные температуры и плотности такой плазмы имеют высокие значения ($T_e \approx 1$ кэВ, $n_e < 10^{22}$ см⁻³), средние скорости разлета ионов находятся в интервале $10^7 < v_i < 10^8$ см/с. На границе разлетающейся плазмы с вакуумом на расстояниях порядка дебаевского радиуса оказывается существенным влияние амбиполярного электрического поля [3], которое сообщает относительно небольшой массе испаренного вещества дополнительную кинетическую энергию. Таким образом, характерный энергетический спектр ионов состоит из тепловой части (соответствующей разлету основной массы ионов) и группы быстрых ионов со скоростями $v_i \gg 10^8$ см/с.

В настоящей работе проведено сравнительное исследование масс-спектроскопического и рентгеноспектрального методов диагностики лазерной плазмы, создаваемой при воздействии излучения лазера с управляемой функцией взаимной когерентности на различные мишени.

В масс-спектрометрических исследованиях лазерной плазмы тип применяемого анализатора определяется направленностью эксперимента (продукты реакции синтеза, тепловые и быстрые ионы, нейтральные атомы). Сочетание широкого энергетического диапазона с удовлетворительным энергетическим и зарядовым разрешением в одном приборе, к тому же обладающем возможностью проведения абсолютных количественных измерений, представляется сложной задачей. Наиболее универсальным прибором, применяемым в данном случае, является масс-спектрограф Томсона [4]. Он состоит из трёх основных элементов: апертурной системы, камеры отклонения и системы регистрации.

Схема измерительной системы на основе масс-спектрографа Томсона представлена на рис.1. Основные характеристики системы: разность потенциалов отклоняющих пластин $U = 10$ -20 В, напряжение магнитного поля $B = 20$ -25 мТл, диаметр формирующей диафрагмы 190 мкм, расстояние от диафрагмы до мишени 500 мм. При данных параметрах могут регистрироваться ионы со скоростями $10^6 - 10^8$ см/с.

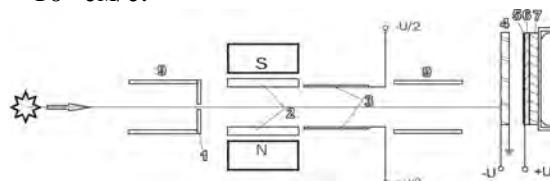


Рис. 1. Схема измерительной системы на основе масс-спектрографа Томсона

- 1 – формирующая диафрагма;
- 2 – отклоняющие пластины магнитного поля;
- 3 – отклоняющие пластины электрического поля;
- 4 – микроканальная пластина;
- 5 – алюминиевое напыление;
- 6 – люминофорный экран;
- 7 – волоконно-оптическая пластина;
- 8 – фотокасета;
- 9 – экранирующие цилиндры

Анализ ионов, пролетающих через апертурную систему, по энергиям и по заряду (точнее, по отношению заряда к атомной массе z/A) происходит в камере отклонения. Внутри вакуумной камеры из нержавеющей стали изолированно от корпуса помещены пластины из мягкого железа (2 и 3), служащие при включении электромагнита и источника постоянного напряжения полюсами магнитного (B) и электрического (E) полей, направленных параллельно друг другу.

Для ограничения области магнитного поля внутри камеры отклонения перед формирующей диафрагмой апертурной системы был установлен экранирующий цилиндр из магнитно-мягкой стали. На выходе из камеры отклонения также устанавливался специальный экран, что обеспечивало движение ионов по прямым траекториям вплоть до системы регистрации.

Масс-спектрограф Томсона не обладает способностью фокусировки ионного пучка, поэтому его разрешение по обеим

координатам (x и y) зависит главным образом от размера сечения пучка ионов, которое формируется апертурной системой и затем расширяется под действием сил, обусловленных пространственным зарядом. В связи с этим качество регистрируемых масс-спектрограмм существенным образом зависит от правильности выбора характеристик апертурной системы.

Апертурная система масс - спектрографа обеспечивает формирование пучка ионов из разлетающейся квазинейтральной плазмы. При этом необходимо, чтобы ионный пучок с диаметром поперечного сечения, согласующимся со значением энергетического разрешения масс-спектрографа, был сформирован непосредственно перед входом в анализирующую камеру. В используемой измерительной системе апертурная система масс-спектрографа состояла из формирующей диафрагмы диаметром 190 мкм, расположенной на входе в камеру отклонения.

Система регистрации измерительной системы на основе масс-спектрографа Томпсона состоит из микроканальной пластины (МКП) размером 90×65 мм и электронно-оптического преобразователя. На вход МКП подаётся отрицательный потенциал порядка 1 кВ, что предотвращает попадание на нее электронов, находящихся в потоке. Далее за МКП на расстоянии 3 мм устанавливалась волоконно-оптическая пластина (ВОП). На поверхность пластины посредством вакуумного напыления нанесено алюминиевое покрытие (толщина слоя составляет 700 нм), образующее люминофорный экран с высокой квантовой эффективностью. При подаче на экран положительного относительно выхода МКП потенциала $U_3 \approx 4 \div 5$ кВ вылетающие из МКП электроны ускоряются до скоростей, необходимых для высвечивания экрана. Изображение парабол Томсона передается на широкоформатную пленку, находящуюся в непосредственном контакте с ВОП. Энергия ионов и степень ионизации получаемой плазмы

определяется по регистрируемым параболам Томпсона [2].

После сборки, отладки и предварительной юстировки системы были проведены тестовые эксперименты, направленные на проверку работоспособности созданной масс-спектроскопической измерительной системы. Для этого были использованы плоские медные мишени. Проведенная серия экспериментов показала, что применительно к исследуемой задаче данный метод обладает рядом трудноустраняемых недостатков. Главным из них является очень низкая скорость съема и обработки получаемых данных в связи с большим временем оснащения масс-спектрографа широкоформатной пленкой, а также низкая эффективность, обусловленная высокой чувствительностью измерительной системы к погрешностям установки кассеты с пленкой – вплоть до потери информации.

Напротив, рентгеноспектральный метод свободен от данных недостатков и обладает высокой оперативностью обработки информации. В связи с этим основное внимание было сосредоточено на разработке и создании измерительной системы на основе кристаллического рентгеновского спектрографа.

Исследование рентгеновского спектра является одним из информативных способов изучения лазерной плазмы, обеспечивающих определение таких важных параметров лазерной плазмы, как температура электронов и ионизационный состав плазмы. Схема расположения измерительной системы на основе рентгеновского спектрографа представлена на рис. 2., а его принципиальная схема - на рис. 3. Данный спектрограф представляет собой модифицированный вариант классического рентгеновского спектрографа Иоганна [5]. В отличие от классической схемы вместо цилиндрического кристалла используется сферический кристалл (слюда) с радиусом кривизны кристалла $R=100$ мм, двойным межплоскостным расстоянием $2D = 19.88$ Ангстрем. Сферический

кристалл фокусирует излучение не только по горизонтальной составляющей, но и по вертикальной. В лабораторных условиях проводились измерения ширины спектра и его интенсивности при изменении расстояния между источником (мишенью) и кристаллом. Были получены следующие результаты:

- при увеличении расстояния увеличивается ширина спектра, но уменьшается его интенсивность;
- при уменьшении расстояния увеличивается интенсивность, но уменьшается ширина.

И, наконец, можно получить изображение источника в рентгеновском излучении при определённом расстоянии между источником и кристаллом.

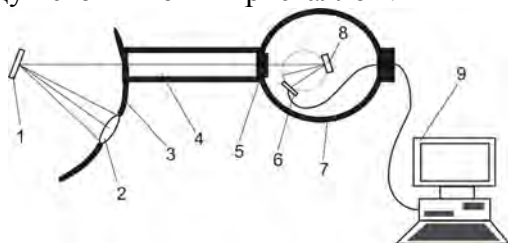


Рис. 2. Схема расположения кристаллического рентгеновского спектрографа

- 1- мишень,
- 2- асферическая линза,
- 3- малая экспериментальная камера,
- 4- соединительный узел,
- 5- фильтр,
- 6- ПЗС линейка,
- 7- корпус спектрографа,
- 8- сферический кристалл,
- 9- ПК

Схема эксперимента выглядит следующим образом. Пучок греющего излучения мощного лазера фокусируется асферической линзой на Ti мишень. Излучение лазерной плазмы регистрируется при помощи рентгеновского кристаллического спектрографа, расположенного на одном из выходных окон камеры. Видимое излучение отсекается майларовым фильтром с алюминиевым напылением. Толщина майлара – 20 мкм, толщина алюминиевого напыления порядка 500 Ангстрем. После этого излучение падает на сферический кристалл, главная ось которого ориентирована на первый порядок

дифракции. Отразившись, излучение попадает на детектор, который с помощью юстировочной системы устанавливается таким образом, что обеспечивает регистрацию в последующих порядках дифракции. Подобная юстировка проводится для различных материалов мишени отдельно в зависимости от выбранного спектра.

В качестве детектора в измерительной системе на основе рентгеновского спектрографа использовалась ПЗС - линейка открытого типа, без стекла, класса TCD1304A производства TOSHIBA. ПЗС - линейка располагалась по касательной к кругу Роланда. Регистрируемый спектр излучения лазерной плазмы записывался в компьютер, что позволяло оперативно обработать его и получить необходимую информацию.

Однако стоит отметить тот факт, что геометрическая схема спектрографа, к сожалению, не обеспечивает идеальной фокусировки. Это связано, в том числе, с расположением ПЗС - матрицы на круге Роланда и с неоднородностями в кристалле.

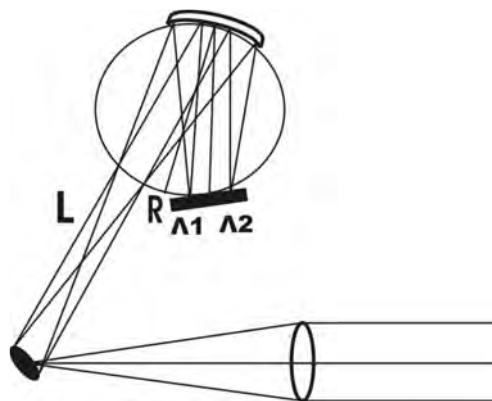


Рис. 3. Схема кристаллического спектрографа: расстояние от источника до кристалла $L = 500$ мм; радиус кривизны кристалла $R = 100$ мм; двойное межплоскостное расстояние кристалла слюды $2d = 19,88 \text{ \AA}$

Для отработки методики измерения спектрального состава лазерной плазмы были проведены пилотные эксперименты по облучению мишени из Ti.

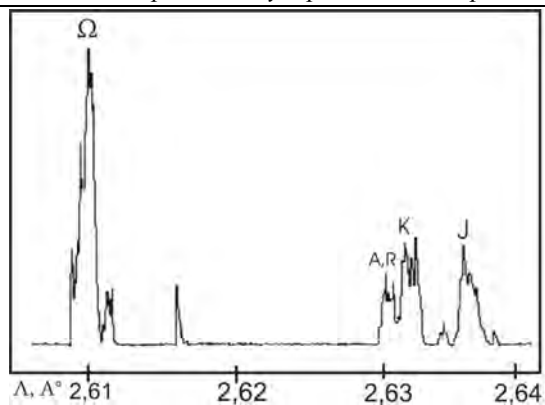


Рис. 4. Спектр излучения лазерной плазмы, измеренный в пятом порядке дифракции, полученный при облучении Ti мишени при плотности потока $4 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$

На рис. 4. приведён характерный спектр излучения лазерной плазмы, измеренный в пятом порядке дифракции. Расшифровка спектра, выполненная с учётом работы [6], позволила четко идентифицировать резонансную линию (Ω) гелиеподобного иона Ti, а также её сателлитов A, R, K и J.

Выводы

Сравнение двух рассмотренных методов диагностики лазерной плазмы (масс-спектроскопического и рентгеноспектрального) показало, что по результативности и скорости получения информации, а также по надёжности рентгеноспектральный метод является более эффективным и менее ресурсно-затратным.

Библиографический список

1. Осипов, М.В. Лазеры для ЛТС с управляемой функции взаимной когерентности излучения [Текст] / М. В. Осипов А.Н. Стародуб, С. И. Федотов, Л. П. Феоктистов // Труды ФИАН. - 2002. - №35.
2. Афанасьев, И. В. Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой [Текст] / И. В. Афанасьев, Н. Г. Басов, О.Н. Крохин и др. // Итоги науки и техники. Радиотехника - М.: ВИНТИ, 1978. - V.17. - P.298.
3. Брагинский, С. И. Явление переноса в плазме [Текст] / С. И. Брагинский // Сбор. вопросов теории плазмы. - М.: Атомиздат, 1963. - №1. - P.183-272.

4. Воловски, Е. Масс-спектрограф для исследования лазерной плазмы [Текст] / Е. Воловски, Э. Волина, С. Денус // ЖТФ. 1982. -Т.52. - С. 366-373.

5. Басов, Н.Г. Диагностика плотной плазмы [Текст] / Н.Г. Басов, Ю.А. Захаренков, А.А. Рупасов и др. - М.: Наука, 1989. - 368с.

6. Мазинг, М. А. Спектры гелиеподобных ионов CaXIX и TiXXI в лазерной плазме [Текст] / М. А. Мазинг, А. П. Шевелько // Труды ФИАН. - 1987. - т.179. - С.15-38.

References

1. Osipov, M.V. Laser for LTS with controllable function mutual coherence - a pre-print [Текст] / M.V. Osipov, A.N. Starodub, S.I. Fedotov, L.P. Feoktistov // Works FIAN. - 2002. - № 35.
2. Afanasjev, J.V. Interaction of powerful laser radiation with plasma [Текст] / J.V. Afanasjev, N.G. Basov, O.N. Krohin, etc. // Results of a science and technics. A radio engineering - М.: VINITI, 1978. - V.17. - P.298.
3. Braginsky, S.I. Transfer phenomena in plasma [Текст] / S.I. Braginsky // Collect.: Plasma theory issues. - Atomizdat, 1963. - N1. - P.183-272.
4. Volowski, E. Mass spectrograph for study laser plasma [Текст] / E. Volowski, E. Vorina, I. Denus // Technical Physics. - 1982. - V.52. - N2. - P.366-369.
5. Basov, NG Diagnostics of dense plasmas [Текст] / N.G. Basov, Y.A. Zakharrenkov, AA Rupasov etc. - Moscow: Nauka, 1989. - 368p.
6. Mazing, M.A. Spectr of heliey-similar ions CaXIX and TiXXI in laser plasma [Текст] / M.A. Mazing, A.P. Шевелько // Works FIAN. - 1987. - V.179. - P.15-38.

MEASUREMENT OF CHARACTERISTICS AND SPECTRAL STRUCTURE OF LASER PLASMA

© 2010 P. Ye. Timchenko, V. L. Marinin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The results of mass-spectroscopic and X-ray spectrometry methods of diagnostics of laser plasma produced by the radiation of a laser with a controlled function of mutual coherence are presented. The comparison of these two methods shows that the X-ray spectrometry method yields the most reliable information and high speed of its processing.

Mass-spectroscopy, X-ray spectrometry, laser plasma, diagnostics, spectroscopy.

Информация об авторах

Тимченко Павел Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры радиотехнических устройств. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: оптические методы диагностики, 3х-мерная визуализация многократно рассеивающих сред. E-mail: Timpavel@mail.ru.

Маринин Владимир Леонидович, соискатель кафедры радиотехнических устройств. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: спектроскопия, лазерная техника, диагностика и контроль характеристик плазмы. E-mail: marininwl@mail.ru.

Timchenko Pavel Yevgenyevich, candidate of physical and mathematical sciences, research worker, assistant. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: optical diagnostics methods, 3D-visualisation of multi-scattering media. E-mail: Timpavel@mail.ru.

Marinin Vladimir Leonidovich, post-graduate student. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: spectroscopy, laser equipment, diagnostics and control of gas plasma characteristics. E-mail: marininwl@mail.ru.