

УДК 533.9.08

РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ ГОРЯЧЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ДИАПАЗОНАХ 8-10 Å И 30-90 Å

© 2013 В.А. Бураков, А.А. Кологривов, М.В. Осипов, В.Н. Пузырёв,
А.Н. Стародуб, А.А. Фроня, О.Ф. Якушев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 15.01.2013

На установке “Канал-2” ЛВЛИ ФИАН разработаны и реализованы диагностические каналы для исследования излучения лазерной плазмы в мягким (30-90 Å) и жестким (8-10 Å) рентгеновских спектральных диапазонах на основе спектрографа скользящего падения и спектрографа по схеме Иоганна. Проведенные эксперименты позволили зарегистрировать спектры излучения мишени из B_4C , Mg , Al при плотностях потока лазерного импульса на мишени $\sim 10^{13}$ - 10^{14} Вт/см².

Ключевые слова: лазерная плазма, взаимодействие излучения с веществом, рентгеновские спектры.

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерная плазма (ЛП) представляет огромный интерес для исследований как источник электромагнитного излучения различных спектральных диапазонов и различных частиц [1]. При воздействии лазерного излучения с плотностью от 10^{12} Вт/см² формируется ЛП, для которой характерен большой диапазон изменения, как плотности, так и температуры: плотность меняется от твердотельной плотности до вакуума, температура же варьируется в пределах от единиц эВ до нескольких кэВ. При таких параметрах плазмы, максимум ее излучения лежит в рентгеновском диапазоне длин волн, вследствие чего разработка и совершенствование рентгеновской диагностики плазмы является важным направлением исследований.

Рентгеновское излучение плазмы несет в себе информацию о таких параметрах плазмы, как температура электронной и ионной компонент плазмы, плотность и ионизационный состав плазмы, пространственное распределение температу-

ры и плотности плазмы и их эволюция во времени и пр. Одним из видов рентгеновской диагностики [2] являются спектроскопические методы исследования [3]. Однако рентгеновские спектры многозарядных ионов характеризуются чрезвычайным обилием линий, а регистрация их происходит в ограниченном спектральном интервале. В силу этого при разработке спектрографов и диагностической аппаратуры на их основе требуется решение таких задач, как установление механизмов возбуждения спектров, расчет спектроскопических характеристик многозарядных ионов с точностью, гарантирующей надежную идентификацию экспериментальных данных.

В настоящей работе представлены результаты разработки и создания диагностических каналов на основе рентгеновских спектрографов, и результаты экспериментов по изучения рентгеновских спектров лазерной плазмы твердотельных мишеней в диапазонах 30-90 Å и 8-10 Å. Анализ линий рентгеновского спектра излучения лазерной плазмы в указанных выше диапазонах позволяет определить электронную плотность и температуру лазерной плазмы, кратность ионизации.

Бураков Владимир Алексеевич, аспирант.

E-mail: vburakov@inbox.ru

Кологривов Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

E-mail: kilogramm49@mail.ru

Осипов Михаил Владимирович, ведущий научный сотрудник.

E-mail: mosipoff@yandex.ru

Пузырёв Виктор Николаевич, научный сотрудник.

E-mail: puz@sci.lebedev.ru

Стародуб Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией.

E-mail: starodub@sci.lebedev.ru

Фроня Анастасия Андреевна, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник.

E-mail: nastya708@yandex.ru

Якушев Олег Феликович, старший научный сотрудник.

E-mail: yakush@sci.lebedev.ru

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КАНАЛЫ

2.1. Канал на основе спектрографа скользящего падения (GIS-S)

GIS-S представляет собой специально разработанный в отделении Оптики ФИАН компактный ВУФ спектрограф скользящего падения [4]. Для регистрации интегральных по времени спектров использовалась ПЗС-линейка TCD1304A с люминофором на базе P-46, размер зерна которой составлял 3 мкм, а размер ячейки – 8x200 мкм. Использование внеруландовской схемы регистрации позволило значительно упростить

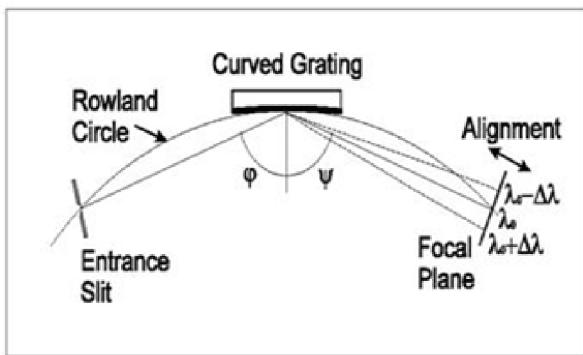


Рис.1. Схема работы спектрографа GIS-S

процедуру установки и юстировки прибора. В используемой схеме спектрограф был съюстирован таким образом, чтобы центральная длина волны составляла $\lambda_0 = 80 \text{ \AA}$. Спектральный интервал, в котором дефокусировка была пренебрежимо мала, был не меньше 50 \AA .

2.2. Канал на основе спектрографа по схеме Иоганна

Спектрограф состоит из цилиндрического корпуса высотой $h = 20 \text{ см}$, радиусом $R = 14 \text{ см}$, в боковой стенке которого имеется входное отверстие круглого сечения; крышкой спектрографа служит одна из торцевых стенок цилиндра.

В качестве материала кристалла использована слюда ($2d = 19,84 \text{ \AA}$). Кристалл изогнут в сагиттальном и меридиональном направлениях по радиусу $R = 100 \text{ мм}$. В наших экспериментах расстояние от мишени до кристалла составило $l = 520 \text{ мм}$.

Выбор геометрии расположения кристалла относительно источника диктуется условиями эксперимента (необходимостью размещения одновременно нескольких приборов диагностического комплекса вблизи мишени). Расположение источника вне круга фокусировки приводит к некоторому снижению светосилы спектрографа по сравнению со значением, когда источник расположен точно на круге. Но в нашем случае эффекты дефокусировки, связанные с отклонением поверхности кристалла от круга Роуланда несущественны, и разрешающая способность спектрографа в этом случае определяется в основном шириной кривой отражения кристалла.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты по воздействию лазерного излучения на вещество выполнялись на установке “Канал-2” [5, 6] ЛВЛИ ФИАН. В качестве греющего излучения использовалось излучение Nd-лазера наносекундной длительности с плотностью потока на мишени $10^{13}\text{-}10^{14} \text{ Вт}/\text{см}^2$. Лазерному воздействию подвергались твердотельные

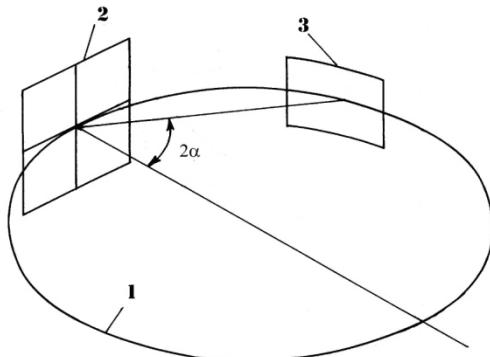


Рис. 2. Принцип работы спектрографа по схеме Иоганна:

- 1 – круг Роуланда,
- 2 – кристалл слюды,
- 3 – плоскость регистрации

мишени из магния – Mg , карбида бора – B_4C , и алюминия – Al .

Наибольшее внимание было уделено получению и идентификации спектров магния, т.к. одной из основных задач была однозначная градуировка спектрографа скользящего падения GIS-S, а резонансные линии магния в диапазоне длин волн $l = 40\text{-}70 \text{ \AA}$ определяются однозначно. Данный тип мишней представлял собой металлические фольги толщиной от 100 мкм до 200 мкм.

Приведенные спектры (рис. 3) получены с использованием спектрографа скользящего падения. В спектре, представленном на рис. 3а, удалось однозначно идентифицировать наиболее интенсивные, резонансные линии. Энергия лазерного импульса в данном выстреле равнялась 20 Дж. Восстановленные значения длин волн совпали с табличными значениями [7]. На рис. 3б представлен спектр, идентичный предыдущему, но с большей энергией импульса ($E_u = 35 \text{ Дж}$) и, как следствие этого, с большим набором линий. Используя предварительные результаты (рис. 3а), и табличные значения [7], были установлены две серии линий, по 4 в каждой, принадлежащие соответственно [He]- и [Li]-подобным ионам.

По схожим причинам были выбраны мишени, содержащие углерод C – это простота идентификации линий. Мишени из B_4C – бруски, размером $3 \times 2 \times 0.5 \text{ см}$. Спектр, полученный в результате выстрела по данному веществу, представлен на рис. 4. По полученным данным (рис. 3-4) построен градуировочный график GIS-S (рис. 5), ставящий отсчетам шкалы ПЗС-линейки прибора в соответствие длины волн в ангстремах.

С помощью спектрографа по схеме Иоганна был зарегистрирован спектр [He]-подобных ионов Mg (рис. 6). Зафиксировано наличие диэлектронных сателлитов j, k (применяются общепринятые обозначения сателлитов, приведенные, например, в [6]). По отношению интенсивностей линий диэлектронных сателлитов j, k к резонан-

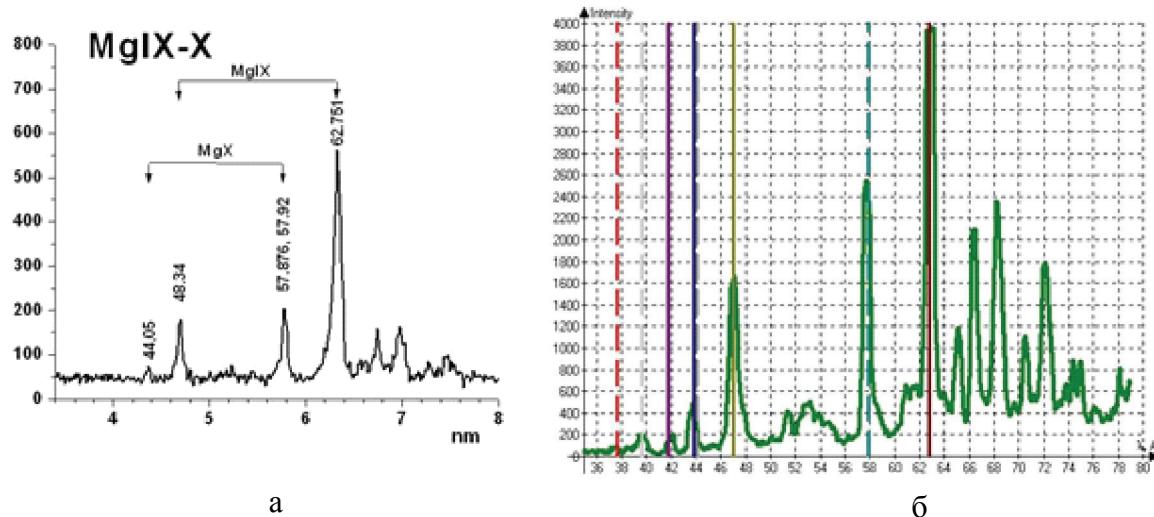


Рис. 3. Спектры плазмы Mg в диапазоне 35-80 Å для энергий импульса 20Дж (а) и 35Дж (б)

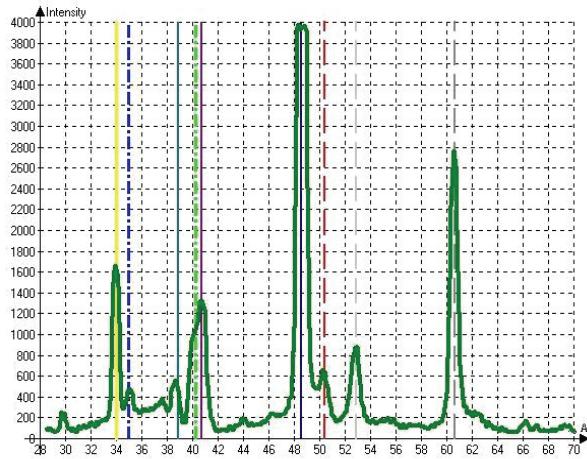


Рис. 4. Спектр плазмы B₄C в диапазоне 35-70 Å для энергии импульса 30Дж

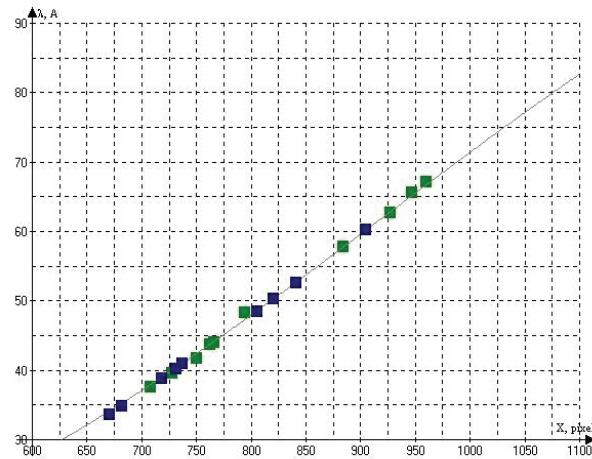


Рис. 5. Градуировочный график спектрографа GIS-S

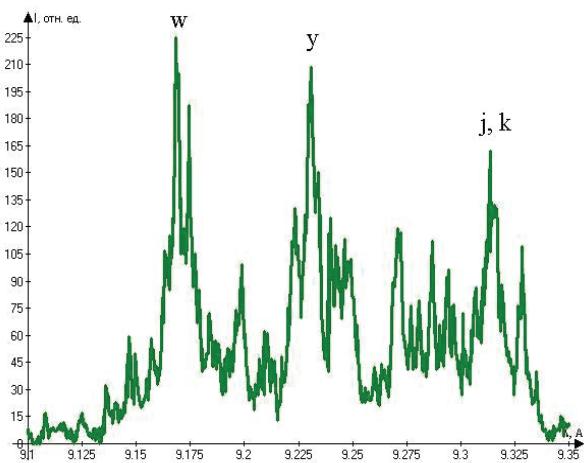


Рис. 6. Спектр плазмы Mg в диапазоне 9.1-9.4 Å для энергии импульса 25Дж

сной линии ω оценивается электронная температура. В нашем случае при энергии лазера 25 Дж она составила ~ 180 эВ.

Отношение интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий (w и y) позволяет определить электронную плотность; по оценкам

она составила 2×10^{19} см⁻³. Восстановленные значения электронных температуры и плотности получены усредненными по объему плазмы.

В качестве альтернативной методики определения параметров лазерной плазмы применялся метод восстановления спектра по кривым ослабления [8]. Обработка кривых ослабления излучения, прошедшего сквозь бериллиевые фильтры, осуществлялась по методу минимизации функционала направленных расхождений, описанному в [8]. На рис. 7 представлен спектр алюминиевой мишени при энергии лазерного излучения 20 Дж. В области энергий квантов выше 7 кэВ кривая соответствует максвелловскому спектру при $T_e = 400$ эВ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработаны диагностические каналы на основе двух рентгеновских спектрографов. Созданные каналы взаимно дополняют друг друга, поскольку позволяют получать рентгеновские спектры излучения плазмы в двух информа-

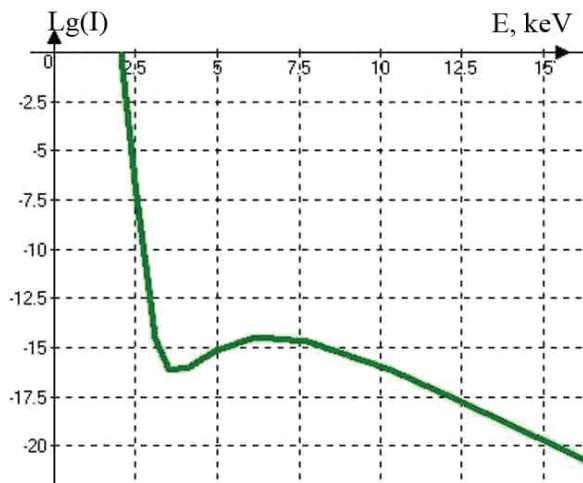


Рис. 7. Восстановленный спектр плазмы Al в диапазоне для энергии импульса 25Дж

тивных диапазонах длин волн 30-90 Å (GIS-S) и 8-10 Å (спектрографа по схеме Иоганна).

В результате серии проведенных экспериментов получены следующие результаты. С помощью спектрографа скользящего падения GIS-S были зарегистрированы ВУФ-спектры мишеней различного состава. Используя сводные данные, была построена градуировочная кривая в основном рабочем диапазоне спектрографа.

С помощью спектрографа, использующего схему Иоганна, были зарегистрированы рентгеновские спектры металлических мишеней. По отношению относительных интенсивностей сателлитных линий j, k и резонансной линии ω оценена электронная температура. Её значение составило ~ 180 эВ.

Восстановлены рентгеновские спектры по

данным, полученным с помощью метода поглотителей. Оцененная электронная температура ЛП составила ~ 400 эВ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-31441).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика плотной плазмы / Н.Г. Басов, Ю.А. Захаренков, А.А. Рунаков, Г.В. Склизков, А.С. Шиканов [под ред. Н.Г. Басова]. М.: Наука. 1989.
2. Лазерная плазма. Физика и применения / О.Б. Ананьев, Ю.В. Афанасьев, Ю.А. Быковский, О.Н. Крохин. М.: Наука, 2003.; Диагностика плотной плазмы [под ред. Н.Г. Басова]. Москва: Наука, 1989.
3. Пресняков Л.П. Рентгеновская спектроскопия высокотемпературной плазмы // УФН, 19(1). 1976. С.49-73.
4. Шевелько А.П. ВУФ-спектроскопия плазмы, создаваемой в конечном анод-катодном промежутке сильноточного импульсного генератора "Z-Machine" (SNL) // Препринт ФИАН, 2008.
5. Lasers for ICF with a Controllable Function of Mutual Coherence of Radiation / С.И. Федотов, Л.П. Феоктистов, М.В. Осипов, А.Н. Стародуб // Journal of Russian Laser Research, 25(1), 2005.
6. Комплекс рентгеновской диагностики на установке "Канал-2" / В.А. Бураков, Б.Л. Васин, А.А. Кологриков, М.В. Осипов, В.Н. Пузырев, А.Н. Стародуб, А.А. Фроня, М.Л. Чернодуб, О.Ф. Якушев // Препринт ФИАН, 2012.
7. Kelly R.L. Atomic and Ionic Spectrum Lines Below 2000 Angstroms, 1982
8. Восстановление спектра непрерывного рентгеновского излучения лазерной плазмы по кривым ослабления / А.А. Кологриков, Г.В. Склизков, А.С. Шиканов // Препринт ФИАН, 1981.

REGISTRATION OF SPECTRUM FROM LASER INDUCED PLASMA IN 8-10 Å AND 30-90 Å WAVELENGTHS

© 2013 V.A. Burakov, A.A. Kologrivov, M.V. Osipov, V.N. Puzyryov,
A.N. Starodub, A.A. Fronya, O.F. Yakushev

P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

Diagnostic channels for research of the laser plasma in the soft (30-90 Å) and hard (8-10 Å) X-ray spectral wavelengths, based on the grazing incidence spectrograph and Johann's scheme spectrograph, were developed and implemented at the "Channel 2" LVLI LPI. Our experiments allowed to register the emission spectra of targets of B_4C , Mg , Al for flux density of the laser pulse on the target $\sim 10^{13}\text{-}10^{14}$ W/cm².

Keywords: laser plasma, interaction of radiation with matter, X-ray spectrum.

Vladimir Burakov, Graduate Student.

E-mail: vburakov@inbox.ru

Andrey Kologrivov, Candidate of Physics and Mathematics,
Research Fellow. E-mail: kilogramm49@mail.ru

Mikhail Osipov, Leading Research Fellow.
E-mail: mosipoff@yandex.ru

Victor Puzyrev, Research Fellow. E-mail: puz@sci.lebedev.ru

Alexander Starodub, Candidate of Physics and Mathematics,
Head at the laboratory. E-mail: starodub@sci.lebedev.ru

Anastasiya Fronya, Candidate of Physics and Mathematics,
Associate Research Fellow. E-mail: nastya708@yandex.ru

Oleg Yakushev, Senior Research Fellow.
E-mail: yakush@sci.lebedev.ru