

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ МАГНИЯ, СОЗДАВАЕМОЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ СО₂-ЛАЗЕРА ВБЛИЗИ МИШЕНИ И ПРИ РАЗЛЕТЕ НА БОЛЬШОЕ РАССТОЯНИЕ

К.Н.Макаров⁺, С.Г.Нищук⁺, В.К.Перих⁺, Ю.А.Сатов⁺, И.Ю.Скобелев*,
Ю.Б.Смаковский⁺, А.Н.Старостин⁺, А.Е.Степанов¹⁾, Т.А.Пикуз*,
А.Я.Фаенов*, С.В.Хоменко⁺

⁺Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований
142092 Троицк, Московская обл., Россия

*ВНИИФТРИ, 141570 Менделеево, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 19 мая 2000 г.

Исследуется эволюция ионного состава лазерной плазмы в ходе ее разлета на большое расстояние. Для создания плазмы использовался СО₂-лазер ТИР с энергией импульса до 100 Дж и длительностью – 20 нс. Вблизи от поверхности мишени применялась рентгеновская диагностика как с использованием спектрографа, так и с помощью рентгеновских рpн-диодов. На больших расстояниях от поверхности мишени применялась времяпролетная корпускулярная диагностика с использованием электростатического анализатора и ионного коллектора. Расчеты, проведенные с использованием программы GIDRA-1, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

PACS: 29.25.Ni, 52.70.-m

Получение сильноточных пучков многозарядных ионов из лазерной плазмы в настоящее время актуально в связи с их использованием в ускорителях тяжелых частиц, исследованиях по тяжелоионному термоядерному синтезу, материаловедческими и медицинскими приложениями. В связи с этим требуется хорошее понимание всей совокупности явлений, сопровождающих эволюцию плазмы от процесса нагревания лазерным излучением до разлета на большое расстояние, где возможна экстрекция ионов. В частности, не вполне ясно, в какой мере плазма рекомбинирует в ходе разлета. В связи с этим требуется определять основные параметры плазмы, в том числе ее ионный состав, как вблизи поверхности мишени, так и на большом удалении от нее. В силу чрезвычайно большой разницы в плотности вблизи критической поверхности и на расстоянии порядка одного метра эту задачу невозможно выполнить с помощью единственной диагностики. В данной работе ионный состав лазерной плазмы определен одновременно с помощью комбинации рентгеноспектральной диагностики с пространственным разрешением и времяпролетной методики (рис.1).

Результаты, представленные в настоящей работе, получены в ТРИНИТИ на установке ТИР [1]. ТИР – это СО₂-лазер с выходной энергией до 100 Дж. В настоящее время установка работает в схеме “задающий генератор + усилитель”, что позволяет получать импульсы гладкой временной формы с длительностью 13–80 нс. Длительность импульса варьируется изменением режима работы задающего генератора и варьированием состава ячеек с насыщающимся поглотителем (SF₆ в смеси с воздухом). Излучение фокусируется на мишень с помощью объектива с $F = 60$ см, размер

¹⁾ e-mail: andreist@mtu-net.ru

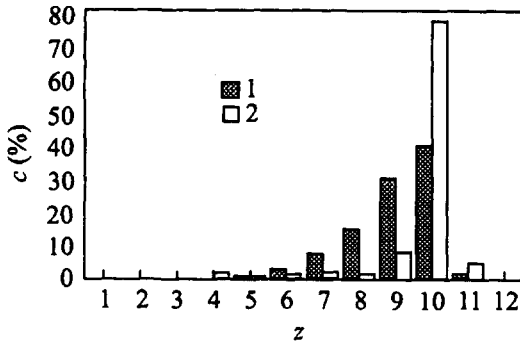


Рис.1. Распределение ионов по кратностям ионизации на расстоянии 3 м от поверхности мишени: 1 – эксперимент; 2 – расчет

фокусного пятна около 65 мкм в положении оптимальной фокусировки. Эксперименты, описанные в настоящей работе, были выполнены при длительности импульса, равной 20 нс на полувысоте.

Мягкое рентгеновское излучение плазмы регистрировалось спектрографами со сферически изогнутыми кристаллами слюды. Кристаллы, слюды, плазма и фотопленка располагались в соответствии со схемой FSSR-1D [2]. Спектры получались с высоким спектральным ($\lambda/\Delta\lambda \approx 10000$) и пространственным разрешением ($\Delta x \approx 20$ мкм) вдоль направления разлета плазмы. На рис.2 показан участок спектра вблизи резонансных линий He-подобного иона магния, а также денситограммы на различных расстояниях от поверхности мишени.

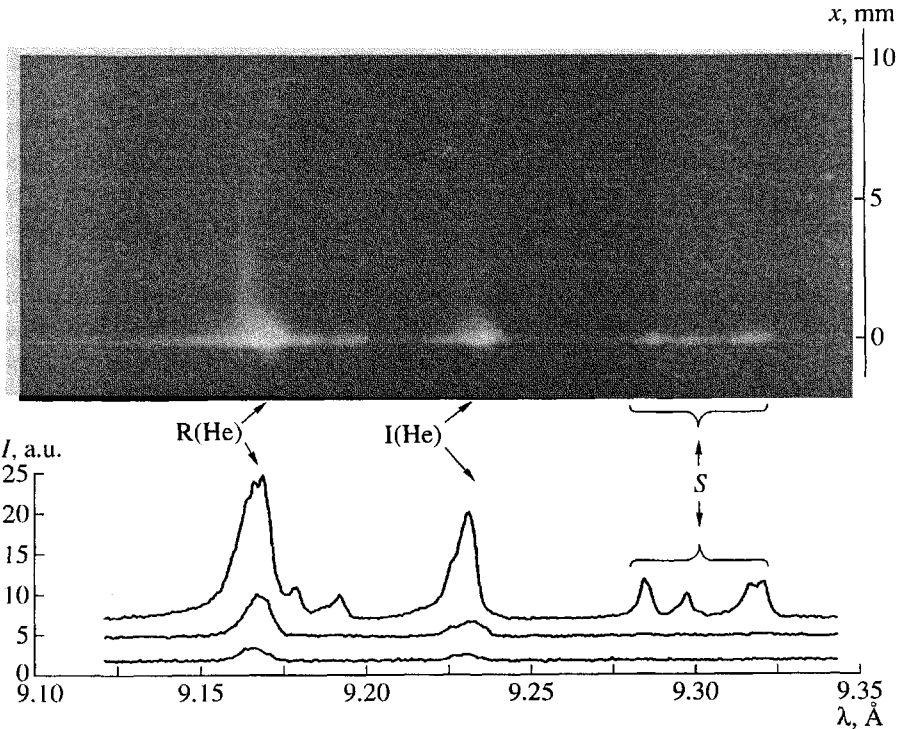


Рис.2. Участок спектра вблизи резонансных линий He-подобного Mg (вверху) и его денситограммы на различных расстояниях от мишени (внизу): 1 – 0 мм, 2 – 0.5 мм, 3 – 1 мм

Измерения рентгеновского спектра проводились при смещении мишени на 3 мм от оптимального фокуса. Если мишень находилась в фокусе, то интенсивная фоновая засветка рентгеновской фотопленки надтепловыми электронами не позволяла получать качественные спектрограммы. В результате смещения мишени от положения оптимального фокуса диаметр пятна фокусировки можно оценить как $D_f = 200 - 300$ мкм, а соответствующую плотность мощности излучения $P_0 = 10^{12} - 10^{13}$ Вт/см².

Расчеты проводились по одномерной программе GIDRA-1. Подробный анализ спектральных измерений для мишени из магния, облучаемой импульсами ХеСl- и Nd-лазеров, а также описание физической и численной модели были даны в работах [3, 4]. В настоящей работе все расчеты были выполнены в сферической геометрии, что, как было показано ранее, обеспечивает качественное согласие расчетных и экспериментальных данных. Полное количество состояний в атомной модели для магния было равно 77. Эффект самопоглощения излучения в спектральных линиях учитывался в приближении вероятностей вылета фотонов. Значения вероятностей вылета рассчитывались в приближении Соболева [5].

Оптическая схема спектрографа и процедура обработки спектров были таковы, что приводимые зависимости интенсивностей спектральных линий по нормали к поверхности мишени являлись интегральными как по времени, так и по поперечному сечению плазменного факела. Таким образом, регистрируемая интенсивность на расстоянии x от мишени в пределах малого участка dx была пропорциональна интегралу по времени от мощности излученной плазменным слоем такой толщины:

$$P_{exp}(x) = \int_0^{\infty} dt \int_{-\infty}^{+\infty} L_{exp}(x, y, t) dy. \quad (1)$$

Предполагая, что плазма разлетается в некотором конусе, нужно иметь в виду, что регистрируемая интенсивность излучения в линиях пропорциональна объемной мощности излучения, умноженной на x^2 . Для учета этой особенности при обработке результатов одномерных расчетов, проводившихся в сферической геометрии, использовалась формула

$$\bar{P}_{sim}(r) = \int_0^{\infty} r^2 L_{sim}(r, t) dt, \quad (2)$$

которая качественно учитывает указанный геометрический фактор. Кроме того, производилось дополнительное усреднение интенсивности в пределах расстояния 40 мкм для учета пространственного разрешения спектрографа, фотопленки и сканера.

На рис.3а показано распределение интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий по нормали к поверхности мишени, полученных сканированием спектра. Особенностью рентгеновского спектра в данных условиях являются практически одинаковые интенсивности резонансной и интеркомбинационной линий на значительном удалении от мишени. Такое поведение интенсивностей этих двух линий нетипично. В условиях облучения как неодимовым лазером (SATELLITE, ВНИИФТРИ [6]), так и эксимерным лазером (HERCULES, $\lambda = 0.308$ мкм, ENEA, Frascati, Италия [7]) характерной чертой является преобладание интенсивности интеркомбинационной линии на больших расстояниях от мишени и даже вторичный максимум излучения на расстоянии 1–2 мм от мишени. Физические причины, вы-

зывающие его появление, проанализированы в [3] – это образование волны сжатия, в процессе разлета плазмы, а также, по-видимому, недостаточно высокий вакуум в камере взаимодействия, что приводило к усилению эффекта волны сжатия. В условиях настоящих экспериментов интенсивности линий спадают монотонно с удалением от мишени.

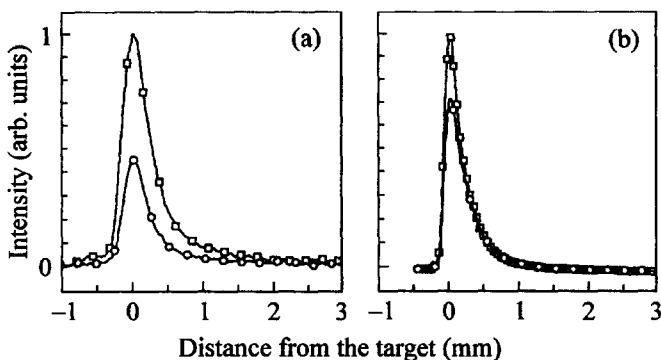


Рис.3. Распределение интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий по нормали к поверхности мишени. а) – эксперимент; б) – расчет

На рис.3а показаны экспериментальные, а на рис.3б – расчетные интегральные распределения интенсивностей резонансных линий He-подобного иона магния по нормали к поверхности мишени. Несколько меньшая ширина пиков в расчете связана, с одной стороны, с тем, что была использована одномерная газодинамическая модель, а с другой стороны, с тем, что экспериментальный спектр получался за несколько выстрелов. Отметим, что в расчете отношение пиков интенсивностей в резонансных линиях возрастает с ростом плотности мощности лазерного импульса, поэтому можно предположить наличие горячих областей на поверхности мишени.

На рис.4 представлены пространственные распределения параметров плазмы на момент максимума мощности лазерного импульса для пиковой плотности мощности лазерного излучения на поверхности твердой мишени $P_0 = 6.25 \cdot 10^{12}$ Вт/см² при начальном радиусе твердой мишени, равном 200 мкм, что качественно соответствует степени дефокусировки лазерного пучка. Временная форма лазерного импульса соответствовала реальной. Отметим ряд особенностей этих кривых. Во-первых, как резонансная, так и интеркомбинационная линии имеют максимум при электронной плотности, значительно превосходящей критическую. С этим связана высокая интенсивность мягкого рентгеновского излучения, зафиксированная в ходе экспериментов. Во-вторых, излучение в резонансных линиях и сателлитах выходит из разных областей плазмы. Так, максимум свечения резонансных линий наблюдается при температуре электронов 200 эВ, в то время как пик населенности Li-подобного иона лежит существенно глубже, при температуре около 50 эВ. Область существования Li-подобных ионов очень узка, ~ 20 мкм, что хорошо согласуется с тем, что в эксперименте сателлиты резонансных линий He-подобного иона Mg видны лишь на поверхности мишени (рис.2). Отметим, что на интенсивность сателлитов наряду с сильной неоднородностью плазмы влияет также присутствие надтепловых электронов [8, 9]. Интенсивность резонансной линии водородоподобного иона как в эксперименте, так и в расчете была на уровне 10^{-2} от интенсивности резонансных линий He-подобного иона. Это позволяет сделать вывод о том, что вблизи мишени подавляющая часть ионов находится в He-подобном состоянии.

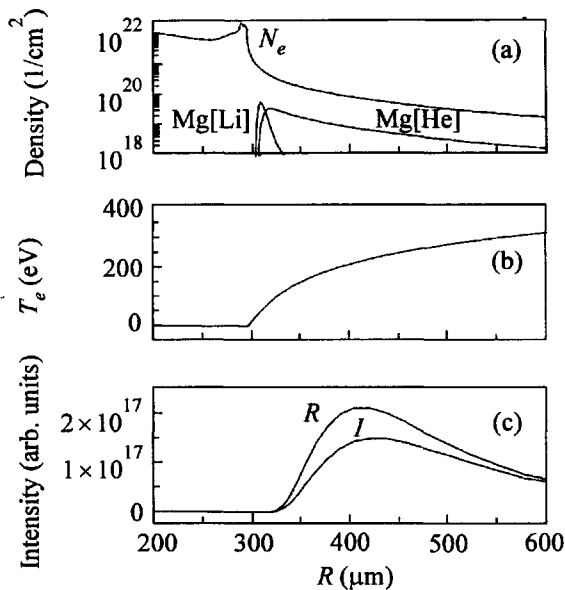


Рис.4. Пространственное распределение параметров плазмы на момент максимума мощности лазерного импульса для $R_0 = 200 \mu\text{м}$, $P_0 = 6.25 \cdot 10^{12} \text{ Вт/см}^2$. а) – плотность электронов N_e , плотности [Li] и [He]-подобных ионов магния; б) – температура электронов T_e ; в) – объемные мощности излучения в резонансной линии He-подобного Mg ($R[\text{He}]$) и интеркомбинационной линии He-подобного Mg ($I[\text{He}]$)

На рис.1 показаны распределения ионов по кратностям ионизации, восстановленные из энергетического спектра, полученного на расстоянии 3 м от мишени с помощью электростатического анализатора, а также полученные в расчете. Как в эксперименте, так и в расчете максимально представлен He-подобный ион магния. Различие в распределении ионов для младших кратностей может быть связано с не изотропным угловым распределением плотности ионов, влиянием “крыльев” распределения интенсивности лазерного излучения и рекомбинацией плазмы в дрейфовом пространстве.

Таким образом, комбинация рентгеноспектральной диагностики с пространственным разрешением и времяпролетной методики позволила одновременно определить ионный состав лазерной плазмы как вблизи поверхности мишени, так и на значительном удалении от нее.

Работа выполнена при поддержке INTAS в рамках проекта # 2090-97.

1. S.V.Khomenko, R.N.Makarov, V.C.Roerich et al., Preprint TRINITY – 0045 –A, 1998.
2. I.Yu.Skobelev, A.Ya.Faenov, B.A.Bryunetkin et al., ZhETF **107**, 1263 (1995); D.A.Pikuz, A.Ya.Faenov, S.A.Pikuz et al., Journal of X-Ray Science and Technology **5**, 323 (1995); A.Ya.Faenov, S.A.Pikuz, A.I.Erko et al., Physica Scripta **50**, 333 (1994).
3. A.E.Stepanov, A.N.Starostin, V.C.Roerich et al., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **58**, 937 (1997).
4. A.L.Godunov, V.A.Mahrov, A.Yu.Sechin et al., ZhETF **109**, 2064 (1996).
5. G.B.Raybiki and D.G.Hummer, Astrophys. J. **274**, 380 (1983).
6. J.Nilsen, P.Beiersdorfer, S.R. Elliot et al., Phys. Rev. **A50**, 2143 (1994).
7. S.Bollanti, P.Di Lazzaro, F.Flora et al., Physica Scripta **51**, 326 (1995).
8. J.Abdallah, Jr., A.Ya.Faenov, D.Hammer et al., Physica Scripta **53**, 705 (1996); J.Abdallah, Jr., A.Ya.Faenov, T.A.Pikuz et al., JQSRT **62**,1(1999); J.Abdallah, Jr., R.E.H.Clark, A.Ya.Faenov et al., JQSRT, **62**, 85 (1999).
9. F.B.Rosmej, JQSRT **51**, 319 (1994); F.B.Rosmej, and O.N.Rosmej, AIP **290**, 560 (1994); F.B.Rosmej, A.Ya.Faenov, T.A.Pikuz et al., JETP Lett. **65**, 708 (1997).