УДК 533.92.621.039

Взаимодействие лазерной W/ Mo-плазмы с поверхностью Mo

Г. Р. Бердиёров, У. С. Кунишев, Р. Т. Хайдаров, М. Г. Халмуратов
Научно-исследовательский институт прикладной физики
при Национальном университете Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан

Исследованы зарядовые и энергетические спектры многозарядных ионов, образованных при взаимодействии лазерной W/ Mo-плазмы с вторичной мишенью (Mo) в зависимости от природы мишени и от расстояния между первичной и вторичной мишенями. Экспериментально обнаружено, что при увеличении расстояния L от 2 до 10 мм происходит изменение интенсивности и количества многозарядных ионов по сравнению со свободным их разлетом. Показано, что, используя различные материалы с определенными эмиссионными свойствами при различных L, можно изменить кинематику и динамику разлета плазмы.

В настоящее время экспериментальное моделирование процессов взаимодействия плазмы с материалами реакторной камеры и выбор материалов первой стенки камеры являются одной из ключевых проблем в создании будущего термоядерного реактора [1—3]. В связи с этим важное значение имеет исследование воздействия плазмы на их физико-химические свойства для оценки пригодности этих материалов и сплавов на их основе для применения в термоядерной энергетике с инерциальным удержанием плазмы. Поэтому целью данной работы является исследование изменения зарядовых и энергетических спектров ионов, образованных после взаимодействия плазмы с вторичной мишенью, расположенной от поверхности первичной мишени на расстоянии 2—10 мм.

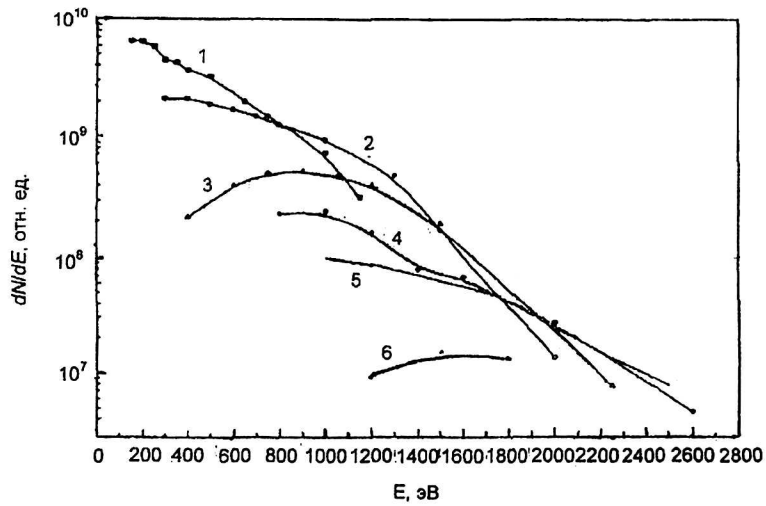
Эксперименты проводились на лазерном масс-спектрометре с разрешающей способностью $m/\Delta m$ ~100, длиной пролетного расстояния l = 100 см [4]. В опытах использован неодимовый лазер ИЛТИ-207, работающий в частотном

© Бердиёров Г. Р., Кунишев У. С., Хайдаров Р. Т., Халмуратов М. Г., 2004

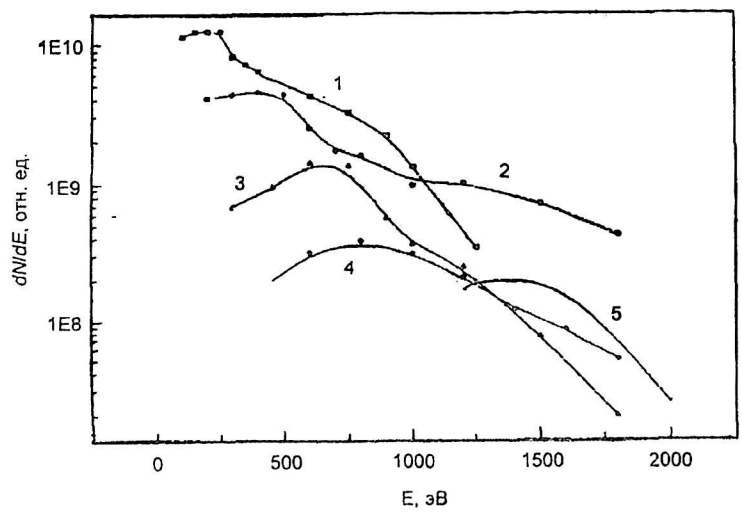
режиме. Излучение лазера направлялось перпендикулярно поверхности мишени. Длительность излучения лазера составляла 215 нс. Плотность мощности излучения на поверхности мишени $q = 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см^2. Пиковая мощность излучения лазера ИЛТИ-207, работающего в частотном режиме, изменялась в пределах 5 %, ее экспериментальное значение является усредненным по пяти импульсам лазерного излучения. Эксперименты проводились при одинаковых начальных условиях (вакуум ~10^{-6} Торр, условия фокусировки излучения, параметры электростатического энергомасс-спектрометра и др.). Мишенная камера конструктивно позволяла расположить 10 мишеней диаметром 10 мм и менять место взаимодействия лазерного излучения с мишенью. Вторичная мишень представляла собой тонкую пластинку из Mo с щелью в середине размером 0,4×20 мм для отвода плазмы на времяпролетный энергомасс-анализатор. Она располагалась параллельно поверхности первичной мишени. Расстояние до поверхности вторичной мишени изменялось в пределах 2—10 мм.

Экспериментально получены масс-зарядовые спектры ионов и изучены энергетические распределения ионов в зависимости от природы мишени и от расстояния между первичной и вторичной мишенями. Отметим, что характеристики многозарядных ионов плазмы измерялись в двух режимах: с наличием и без вторичной мишени на пути ее разлета. Эксперименты без наличия вторичной мишени на пути разлета плазмы показали, что максимальная кратность заряда (Z_{max}) многозарядных ионов W и Mo составляет 6 и 5, а максимальная энергия (E_{max}) многозарядных ионов 2600 и 2000 эВ, соответственно, при плотности мощности лазерного излучения $q = 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см^2 (рис. 1).

На рис. 2 приведены результаты эксперимента при наличии вторичной мишени на расстоянии 5 мм. При этом максимальная кратность заряда $Z_{max} = 6$ и 5, а максимальная энергия (E_{max}) обоих элементов уменьшилась до 1800 эВ. Сравнительный анализ показал, что присутствие вторичной мишени на расстояниях от 2 до 10 мм изменяет не только энергетические распределения ионов плазмы, но и интенсивности ионов.

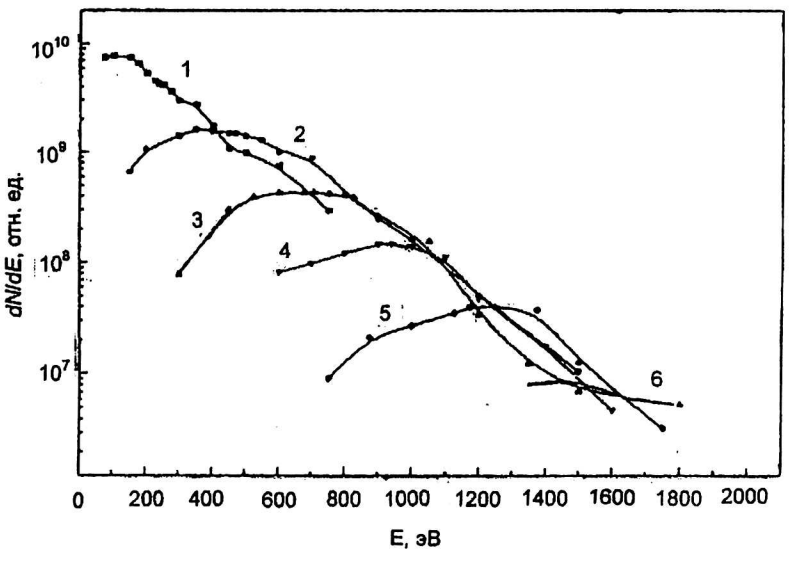


а

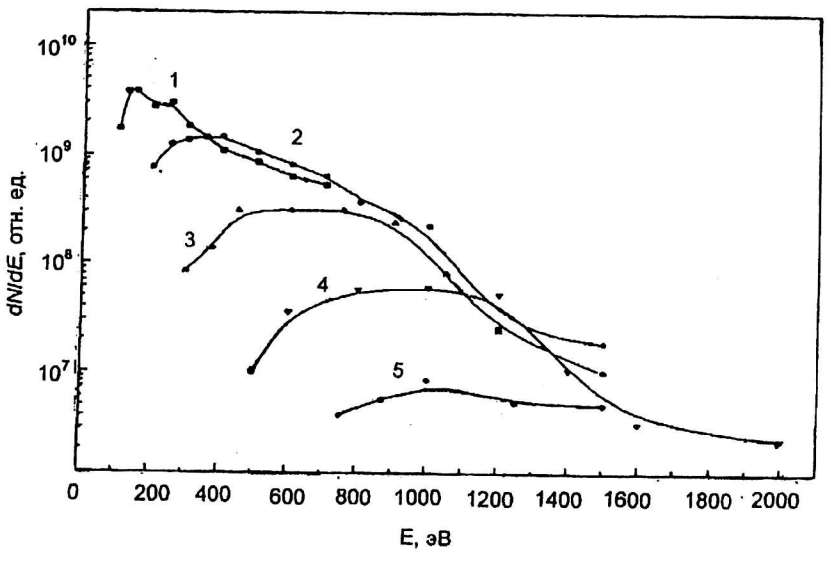


б

Рис. 1. Энергетические спектры без наличия вторичной мишени:
а — ионов W:
1 — W^{1+}; 2 — W^{2+}; 3 — W^{3+}; 4 — W^{4+}; 5 — W^{5+};
6 — W^{6+};
б — ионов Mo:
1 — Mo^{1+}; 2 — Mo^{2+}; 3 — Mo^{3+}; 4 — Mo^{4+};
5 — Mo^{5+}



а



б

Рис. 2. Энергетические спектры с вторичной мишенью Mo на расстоянии L = 5 мм:
а — ионов W:
1 — W^{1+}; 2 — W^{2+}; 3 — W^{3+}; 4 — W^{4+};
5 — W^{5+}; 6 — W^{j+}
б — ионов Mo:
1 — Mo^{1+}; 2 — Mo^{2+}; 3 — Mo^{3+}; 4 — Mo^{4+};
5 — Mo^{5+}

Характеры энергетических спектров с наличием и без вторичной мишени на первый взгляд схожи. Следует отметить, что энергетический спектр с наличием вторичной мишени более полон, чем без нее. Это свидетельствует об изменении рекомбинационных процессов, протекающих при прохождении плазмы через вторичную мишень. В работах [5—11] было исследовано влияние твердотельного препятствия на динамику разлета лазерной плазмы и показано, что твердотельные препятствия влияют на характер свечения плазмы посредством изменения гидродинамических параметров, таких как плотность и температура электронов. Существенную роль при этом играют эффекты, связанные с возникновением ударной волны, распространяющейся в плазме, с замедленным характером обмена энергией между ионами и электронами, а также с большей подвижностью электронов, чем обусловливается их высокая теплопроводность по сравнению с теплопроводностью ионов.

В работе [11] исследовано влияние вторичных мишеней на характеристики плазмы. При этом на масс-спектрах были обнаружены однозарядные ионы вторичной мишени (Al) в узком низкоэнергетическом диапазоне энергии. Интенсивность этих сигналов зависит от природы плазмы и от расстояния между мишенями. Следует отметить, что из-за большого потенциала ионизации атомов Mo относительно Al ионы от поверхности вторичной мишени в нашем случае не обнаруживаются.

Авторы работы [7] указывают, что наличие твердотельного препятствия на пути разлета лазерной плазмы на расстоянии L = 10—15 мм, где формируется стационарное сверхзвуковое течение и создаются ударные волны, на их взгляд, эффективно влияет на формирование характеристик плазмы. Наблюдаемые изменения характеристик многозарядных ионов (МЗИ) лазерной плазмы при наличии твердотельных препятствий на пути разлета объясняются сущест-

венным понижением скорости рекомбинационных процессов вследствие повышения температуры электронов в ударной волне и перед ее фронтом.

На рис. 3, *а*, *б* приведены зависимости количества ионов от Z при расстояниях L = 5 и 10 мм от поверхности вторичной мишени. Сравнительный анализ количества ионов при этих расстояниях показывает, что:

на расстоянии L = 2 мм количество ионов с зарядностью Z = 3 остается практически постоянным, а с $Z > 3$ — уменьшается;

на расстоянии L = 10 мм уменьшается количество ионов всех зарядностей.

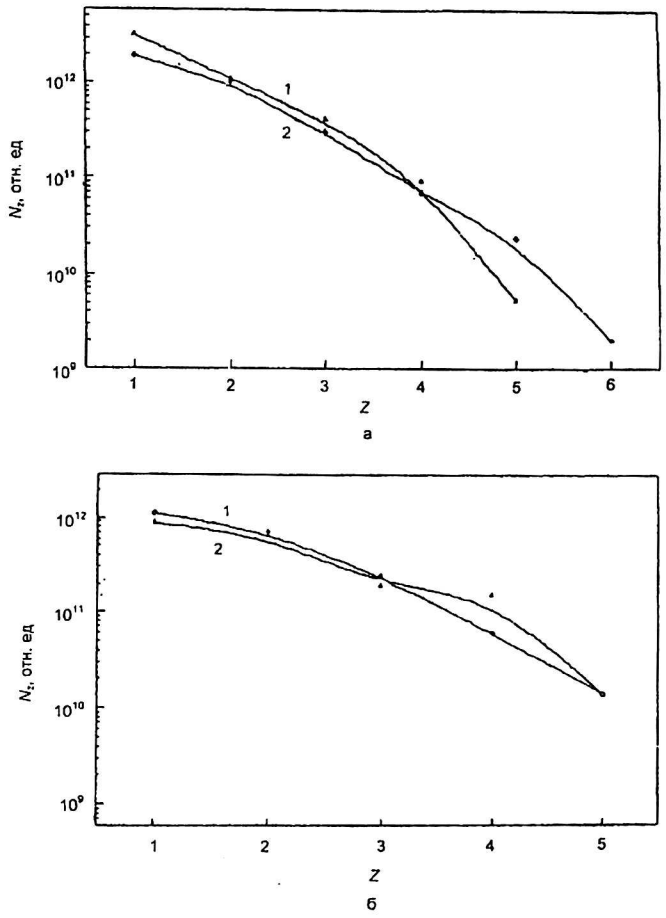


Рис. 3. Зависимость общего количества ионов Mo и W от Z с вторичной мишенью (Mo) на расстоянии:
а — L = 5 мм; *б* — L = 10 мм
1 — Mo; 2 — W

Уменьшение количества ионов от 10^{12} до 10^{11} частиц за импульс всех зарядностей обусловлено, на наш взгляд, ростом рекомбинационных потерь на многозарядных ионах в основном в дальней зоне.

Полученные экспериментальные результаты и сравнение их с данными работ [7—11] показывают, что наличие вторичной мишени на пути разлета лазерной плазмы изменяет кинематику разлета, что приводит к уменьшению рекомбинационных процессов и, следовательно, к увеличению температуры плазмы на начальных стадиях инерциального разлета. Эти изменения влияют на динамику формирования масс-зарядового и энергетического спектров многозарядных ионов. Следует отметить, что с изменением природы мишени слабо изменяются характеристики многозарядных ионов.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что взаимодействие W, Mo-плазмы с поверхностью вторичной мишени изменяет параметры рекомбинирующей плазмы, вносит существенный вклад в формирование энергетического распределения многоразрядных ионов на всей стадии инерциального разлета плазмы.

Результаты данного исследования указывают на то, что, используя различные материалы с определенными эмиссионными свойствами при различных L, можно изменить кинематику и динамику разлета, что весьма важно для выбора материала первой стенки будущих реакторов на основе инерциального термоядерного синтеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного агентства по атомной энергии (N B5-UZB-29827-1537)

Литература

1. Energy from Inertial Fusion. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 1995.

2. *Голубев А. А., Латышев С. В., Рудской И. В., Шарков Б. Ю.*// Письма в ЖТФ, 1986. V. 12. № 9. — 513 с.

3. *Perlado J. M., Malerba L., Diar de la Rubia T.*// Fusion Technology, 1998. № 34/3. P. 840.

4. *Бедилов М. Р., Хайдаров Р. Т., Якубов Б. Х., Куншев У. С.*// Квантовая электроника, 1996. V 23. № 9. — 835 с.

5. *Бедилов М. Р., Хайдаров Р. Т., Куншев У. С.*// Физика плазмы, 1999. V. 25. № 11.

6. *Бедилов М. Р., Хайдаров Р. Т., Куншев У. С.*// Там же, 2000. V. 26. — 862 с.

7. *Бойко В. А., Брунеткин В. А. и др.*// Квантовая электроника, 1985. V. 12. № 11. — 2340 с.

8. *Nagel R., Weyrich K., Hoffman D. H. H., Balogh A. G.*// GSI Report 1999, GSI-2000-2. P. 26.

9. *Nagel R., Hahn H., Balogh A. G.*// Nucl. Instr. Meth, 1999. B 148. P. 930.

10. *Бедилов М. Р., Бердиёров Г. Р., Хайдаров Р. Т., Куншев У. С.*// Квантовая электроника, 2001. V. 31. № 4. С. 321—324.

11. *Хайдаров Р. Т., Шарков Б. Ю.* и др.// Узбекский физический журнал, 2002. № 1. С. 30—33.

Interaction of laser-produced W/ Mo plasmas with the surface of Mo

G. R. Berdiyorov, U. S. Kunishev, R. T. Khaydarov, M. G. Khalmuratov
Scientific-Research Institute of Applied Physics at the National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Charge and energy spectra of multiply charged ions, formed at the interaction of laser-produced W/ Mo plasmas with the secondary Mo targets were investigated as a function target nature and the distance between primarily and secondary targets. It was found experimentally that the increase of the distance from 2 mm till 10 mm leads to changing of intensity and the amount comparably to their free flight. It has been shown the possibility of changing the kinematics and the dynamics of plasma expansion usng various materials with determined emission features at different the distance, as well as changing the focusing conditions of laser radiation.