

Влияние структуры корунда на характеристики многозарядных ионов лазерной плазмы

М.Р.Бедилов, Х.Б.Бейсембаева, М.С.Сабитов

Исследовано взаимодействие интенсивного лазерного излучения ($\lambda = 1.06 \text{ мкм}$) с облученным корундом. Исследования велись коллекторным способом и методом времепролетной масс-спектрометрии. Совместный анализ электронных и ионных токов, а также зарядовых и энергетических характеристик многозарядных ионов плазмы, образующейся на облученной и исходной мишениах, позволяет утверждать, что предварительное нейтронное облучение образца с флюенсом $10^{15} - 10^{19} \text{ нейтр./см}^2$ способствует образованию более высокотемпературной плазмы.

Ключевые слова: лазерная плазма, корунд, многозарядные ионы.

Интерес к лазерной плазме, являющейся источником излучения в широком спектральном диапазоне, а также заряженных частиц и нейtronов обусловлен рядом ее уникальных свойств – высокой плотностью, огромными температурами и давлением [1–3]. Образование плазмы при умеренных плотностях мощности лазерного излучения на поверхности мишени связано с разрушением последней [4], поэтому существующие в мишени различные статические и динамические дефекты могут, очевидно, влиять на эффективность процессов, происходящих при взаимодействии с ней лазерного излучения [5–7].

В настоящей работе исследуется влияние структурных несовершенств мишени на ее взаимодействие с излучением неодимового лазера ($\lambda = 1.06 \text{ мкм}$). Структурные нарушения в исследуемом образце создавались облучением его реакторным излучением с флюенсом $10^{15} - 10^{19} \text{ нейтр./см}^2$. В качестве объекта исследований был выбран корунд, т. к. на нем можно не только выяснить влияние структурных дефектов, наводимых нейtronами, но и оценить роль γ -составляющей реакторного излучения.

Излучение неодимового лазера (длительность импульса $\tau \sim 50 \text{ нс}$, энергия 3 Дж) фокусировалось на поверхность образца. Интенсивность излучения на поверхности мишени q варьировалась с помощью нейтральных светофильтров в интервале $1 - 100 \text{ ГВт/см}^2$. Изучались электронные и ионные токи, а также зарядовые и энергетические распределения многозарядных ионов, разлетающихся в составе образующейся плазмы. Помимо этого исследовалось влияние предварительного облучения на свойства мишени (теплопроводность, оптическое поглощение, лучевую стойкость).

Измерения электронных и ионных токов велись коллекторным методом, исследование зарядовых и энергетических характеристик ионов – методом времепролетной масс-спектрометрии. После каждого воздействия точка взаимодействия мишени с лазерным излучением

менялась с целью исключения влияния кратерообразования на параметры заряженных частиц [8].

Исследование электронных и ионных токов, а также зарядовых и энергетических характеристик многозарядных ионов плазмы, образующейся при воздействии интенсивного лазерного излучения на поверхность предварительно облученной мишени, показало, что при этом сохраняются основные закономерности, наблюдаемые при взаимодействии светового потока с необлученным твердым телом, т. е. с ростом q увеличивается выход ионов, повышаются их заряд и энергия.

Сравнение зарядового распределения плазмы, эмиттируемой из облученной мишени, с аналогичной характеристикой плазмы, источником которой служили необлученные образцы, показало, что образующиеся при облучении дефекты изменяют эффективность взаимодействия лазерного излучения с исследуемым объектом. Экспериментально установлено, что качественная картина изменения зависит от вида и дозы радиации предварительного облучения.

Доминирующая роль структурных дефектов, влияющих на эффективность взаимодействия, в изменении свойств исследованных мишеней наглядно прослеживается на результатах, полученных в случае мишени из Al_2O_3 (корунд). Например, если γ -облучение корунда до доз 10^{10} Р , не вызывающее в нем структурных нарушений [9], не отразилось на заряде Z_{\max} ионов Al и O, то в плазме, образующейся при воздействии излучения с идентичным q на реакторно-облученный образец, ионы Al и O имеют большее зарядовое распределение, нежели до облучения. Так, в случае воздействия на необлученный Al_2O_3 излучения с $q = 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ заряд Z_{\max} ионов O и Al не превышал 4 и 3 соответственно; в случае же предварительного облучения мишени потоком нейtronов с флюенсом $2 \cdot 10^{18} \text{ нейтр./см}^2$ интенсивность сигналов от ионов, зафиксированных в плазме, повысилась по сравнению с плазмой необлученного образца, а сам зарядовый спектр пополнился линиями ионов $\text{O}^{5+} - \text{O}^{7+}$, Al^{4+} (рис.1).

Влияние структурных нарушений подтверждается и результатами, полученными при восстановительном отжиге реакторно-облученного корунда. В случае воздействия на Al_2O_3 , облученный нейtronами с указанным

Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан, 702132 Ташкент, пос. Улугбек

Поступила в редакцию 21 сентября 1999 г.

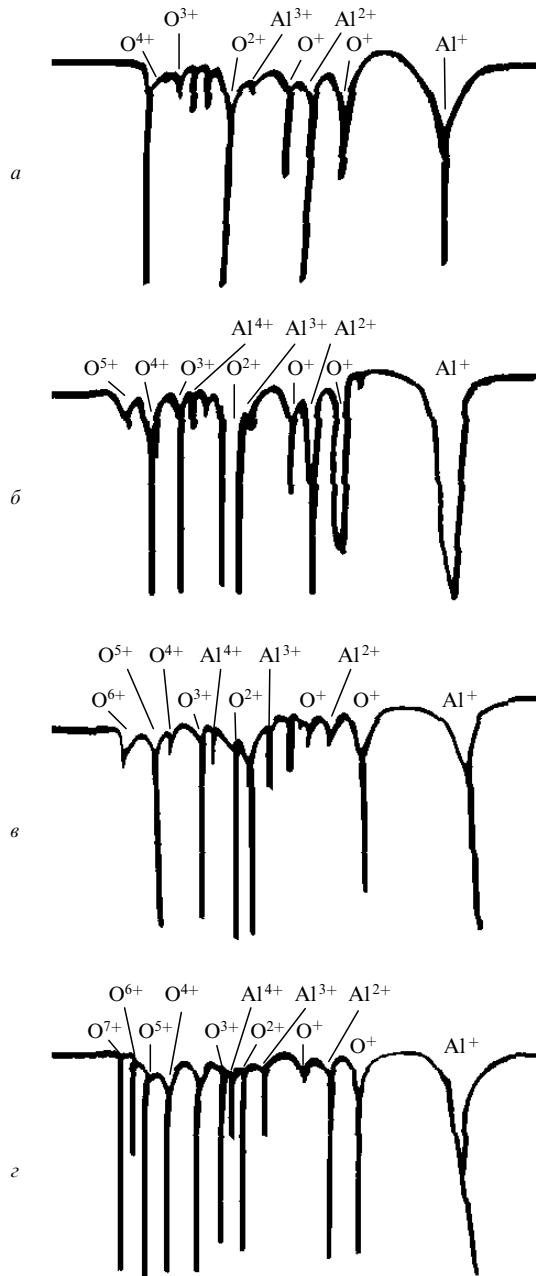


Рис.1. Зарядовые спектры ионов плазмы, образующейся при воздействии лазерного излучения с $q = 10^{11}$ Вт/см² на Al_2O_3 , после облучения потоком нейтронов с флюенсом $2 \cdot 10^{18}$ нейтр./см² (а), после облучения потоком нейтронов с флюенсом $2 \cdot 10^{18}$ нейтр./см² и последующего отжига при 600°C (б), γ -облучения с дозой 10^8 Р после предварительного облучения потоком нейтронов с флюенсом $2 \cdot 10^{18}$ нейтр./см² и отжига при 600°C (в), а также до облучения (г).

флюенсом и отожженный в течении 1 ч при 600°C , образуется плазма, зарядовое состояние ионов в которой несколько ниже, чем до отжига, но выше по сравнению с дооблученным состоянием. Если в дальнейшем отожженный образец подвергнуть дополнительному γ -облучению дозой до 10^8 Р, то в плазме, образующейся при $q = 10^{11}$ Вт/см², вновь регистрируются ионы O^{5+} – O^{7+} . На разных этапах подобной обработки аналогично ведет себя полоса дополнительного поглощения с максимумом при 305 нм, приписываемая структурному дефекту [10], связанному с разрывом связи Al и его смещением со своего места в решетке. Следует отметить, что наиболее эффективно это проявляется при $q \sim 10^{10}$ Вт/см².

Сравнение энергетических спектров ионов плазмы, образующейся из облученной мишени, и плазмы исходного (необлученного) образца показало, что радиационная обработка исследуемого объекта отражается на закономерностях формирования спектров. Энергетическое распределение ионов Al и O, получаемых при воздействии на γ -облученный корунд, идентично распределению, наблюдаемому в случае необлученного Al_2O_3 . Исследование энергетических спектров ионов плазмы, источником которой была реакторно-облученная мишень, показало, что с ростом дозы облучения для ионов с любым Z характерно расширение диапазона распределения за счет расширения спектра в сторону как низких, так и высоких энергий (рис.2). Помимо этого происходит уменьшение минимальной энергии E_{\min} , необходимой иону с данным Z для выхода из зоны плотной плазмы.

Подобный характер изменения динамики формирования и диапазона распределения энергетических спектров ионов плазмы, образующейся при воздействии лазерного излучения на реакторно-облученный образец, свидетельствует о том, что она прогрета до более высоких температур и в ней меньше вероятность рекомбинационных процессов. Экспериментальные параметры, полученные при исследовании электронных ионных токов плазмы, образующейся из облученных тел, были больше, чем параметры в случае необлученной мишени.

Изучение свойств мишени показало, что реакторное облучение приводит к ухудшению ее теплопроводности и лучевой стойкости. Результаты исследования спектра оптического поглощения нейтронно-облученного корунда свидетельствовали о появлении не только дефектов, обусловленных смещением кристаллообразующих частиц, но и дефектов, увеличивающих фон в интервале 240–1200 нм.

Ухудшение теплопроводности и увеличение оптического поглощения мишени приводят к тому, что время начала ее испарения под действием интенсивного светового потока уменьшается, причем скорость движения фронта испарения растет, поскольку увеличивается поглощенная энергия [4, 11]. В то же время известно, что интенсивность испарения твердого тела определяется энергией связи [5]. Согласно теории абсолютных скоростей [12], вероятность элементарного акта испарения

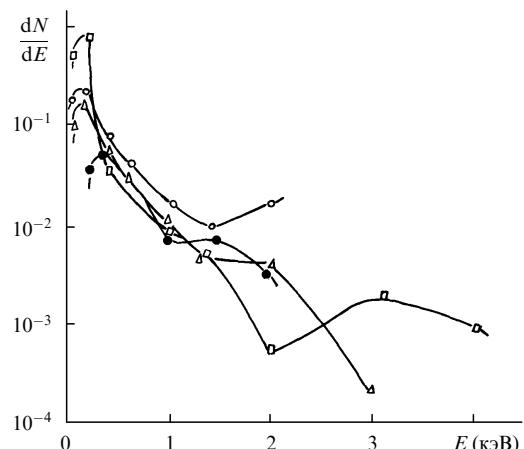


Рис.2. Энергетические спектры ионов Al^{2+} , образующихся при воздействии лазерного излучения с $q = 10^{11}$ Вт/см² на моноэлементную мишень, до облучения (●) и после облучения потоком нейтронов с флюенсом $2 \cdot 10^{15}$ (○), $2 \cdot 10^{17}$ (△) и $2 \cdot 10^{18}$ нейтр./см² (□).

$$\omega = \frac{kT}{h} \frac{f^*}{f} \exp\left(-\frac{\lambda_1}{kT}\right),$$

где f^* – статистическая сумма активированного комплекса, в которой не учитывается вклад «реакционной» координаты; f – статистическая сумма связанного в кристаллической решетке атома; λ_1 – энергия активации, равная энергии, необходимой для испарения одного атома при абсолютном нуле; T – температура слоя, из которого идет испарение.

Если считать, что в облученном образце λ_1 и f не меняются, то поскольку T в этом случае больше, чем в необлученном образце, вероятность испарения должна быть выше. Учитывая при этом существование областей, в которых часть атомов имеет разорванные связи, можно предположить, что эти факторы увеличивают эффективность испарения. Наличие оптимальной интенсивности лазерного излучения ($q_{\text{opt}} \approx 10^{10}$ Вт/см²), при которой эффект проявляется наиболее сильно, свидетельствует о верности нашего предположения, т. к. при данных q испарение твердого тела под действием электромагнитного излучения обусловлено тепловым механизмом [4].

В результате увеличения плотности выброшенного вещества время экранирования поверхности мишени от воздействующего светового потока сокращается, что приводит к увеличению доли энергии, идущей на нагрев и ионизацию плазменного сгустка.

Стремление облученного образца избавиться от напряженности (возникшей в нем при образовании структурных нарушений) в волне разгрузки, протекающей в мишени при выходе ударной волны на поверхность, приводит к увеличению гидродинамического ускорения. Этим, а также образованием более плотной плазмы объясняется экспериментально наблюдаемое уменьшение E_{\min} для ионов, образующихся из облученной мишени. Поскольку сама плазма при этом прогрета до более высоких температур, очевидно, что вышеперечисленные факторы увеличивают скорость ее разлета. В результате сокращения времени пребывания плазмы в зоне реком-

бинации эффективность рекомбинационных процессов снижается и ионы выходят из зоны плотной плазмы с меньшими потерями как по заряду, так и по числу.

Полученные результаты могут быть использованы при создании лазерных источников многозарядных ионов.

1. Быковский Ю.А., Неволин В.Н. *Лазерная масс-спектрометрия* (М., Энергоатомиздат, 1985).
2. Быковский Ю.А., Сильнов С.М., Шарков Б.Ю. и др. *Физика плазмы*, 2, 248 (1976).
3. Быковский Ю.А., Сильнов С.М., Шарков Б.Ю. и др. *Физика плазмы*, 3, 1153 (1977).
4. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов С.Г., Ходыко Ю.В. *Действие излучения большой мощности на металлы* (М., Наука, 1970).
5. Моин М.Д. *ФТТ*, 26, 2742 (1984).
6. Бедилов М.Р., Бейсембаева Х.Б., Абдулатаев Р., Хабибуллаев П.К. *ДАН СССР*, 283, 857 (1986).
7. Бедилов М.Р., Бейсембаева Х.Б., Карамышева С.А., Сабитов М.С. *Квантовая электроника*, 15, 1610 (1988).
8. Бедилов М.Р., Хабибуллаев П.К., Цой Т.Г. *ДАН УзССР*, № 1, 24 (1981).
9. Выдрик Г.А., Костюков Н.С., Харитонов Ф.Я. *Радиация и коррозионная стойкость электрокерамики* (М., Атомиздат, 1973).
10. Turner J.J. *Phys.Rev.B*, 13, 1735 (1976).
11. Делоне Н.Б. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом* (М., Наука, 1982).
12. Penner S.S. *J.Phys.Chem.*, 65, 702 (1961).

M.R.Bedilov, Kh.B.Beisembaeva, M.S.Sabitov. Influence of corundum structure on the characteristics of multiply charged ions in a laser-produced plasma.

An investigation was made of the interaction of intense laser radiation ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) with previously irradiated corundum. The studies were performed in the collecting mode employing time-of-flight mass spectrometry. Electron and ion currents were considered simultaneously with charge-state and energy characteristics of multiply charged ions of the plasmas produced at the source and previously irradiated targets. The combined consideration allows the conclusion that the prior neutron irradiation of a sample by a fluence of $10^{15} - 10^{19}$ neutr./cm² makes for production of a higher-temperature plasma.