

Спектры ионов кислорода в двухэлементной лазерной плазме

М.Р.Бедиллов, Р.Т.Хайдаров, Г.Р.Бердиёров, У.С.Кунишев

Изучены масс-зарядовые и энергетические спектры ионов кислорода в лазерной плазме, полученной при взаимодействии излучения лазера с мишенями, содержащими тяжелые элементы с разной массой (Sc, Ce, Lu) и близкими теплофизическими параметрами. Установлена зависимость максимальной кратности заряда ионов кислорода O^{2+} от интенсивности излучения лазера и независимость кратности от элементного состава двухэлементной мишени. Выявлено, что с ростом массы тяжелого компонента (Sc, Ce, Lu) двухэлементной плазмы изменение энергетического спектра ионов O^+ , O^{2+} и расширение спектра ионов Sc, Ce, Lu с кратностью заряда $Z = 1 - 3$ в сторону больших энергий происходит из-за роста обмена энергией между легкими (O) и тяжелыми (Sc, Ce, Lu) ионами плазмы.

Ключевые слова: ионы кислорода, лазерная плазма, масс-зарядовые спектры.

Интерес к исследованию спектра ионов кислорода в лазерной плазме, полученной при взаимодействии излучения лазера с мишенями, содержащими тяжелые элементы с разной массой и близкими теплофизическими параметрами, связан с возможностями применения кислородосодержащих сред для создания эффективных источников многозарядных ионов и ядер элементов, высокотемпературных сверхпроводников, плазменных лазеров, методов лазерного элементного анализа и нелинейно-оптических сред.

К настоящему времени выполнено большое число теоретических и экспериментальных работ по взаимодействию лазерного излучения с веществом (см., напр., [1–11]). Установлено, что на образование ионов с различными кратностями заряда в лазерной плазме влияют интенсивность, длина волны и условия фокусировки излучения, а также природа вещества, плотность и дефектность структуры мишени [1–8]. Большое число работ посвящено лазерной плазме, полученной на моноэлементных металлических образцах, и мало внимания уделяется изучению многоэлементной лазерной плазмы.

Отметим, что в случае моноэлементной плазмы подробно исследованы масс-зарядовые, энергетические и угловые распределения многозарядных ионов в широком интервале интенсивностей излучения лазера для мишеней разной природы [2]. На базе проведенных экспериментов созданы и эффективно работают на ускорительных комплексах и установках для элементного анализа вещества лазерные источники многозарядных ионов [2]. Установлено, что в моноэлементной плазме образуются высокозарядные ионы с максимальной кратностью заряда Z до 25 и энергией до ~ 40.0 кэВ, а разлет их происходит в узком телесном угле.

В работах [4, 9] исследованы спектры ионов многоэ-

лементной плазмы, содержащей в малых концентрациях ионы золота и серебра. При этом установлено, что элементный состав мишени влиял на формирование многозарядных ионов при ионизации и рекомбинации. Это влияние состоит в селективном уменьшении рекомбинационных потерь высокозарядных ионов золота и серебра в присутствии легких твердых элементов основы. Предложенный на основе этих данных метод анализа многозарядных ионов по масс-спектрам [9] позволяет при сохранении всех преимуществ лазерного масс-спектрометрического анализа по спектрам однозарядных ионов [2] увеличить концентрационную чувствительность в 100 раз.

Заметим, что в литературе [6, 7] мало исследованы спектры ионов газов и роль взаимного влияния ионов различных элементов, одновременно участвующих в ионизации, рекомбинации и «закалке». Авторами [6, 7] подробно рассмотрено образование ионов газов (водород, азот), их энергетические и угловые распределения в зависимости от интенсивности излучения лазера и природы многоэлементной мишени.

В настоящей работе рассматривается образование спектра ионов кислорода, их зарядовые и энергетические распределения в интервале интенсивностей излучения лазера $q = 0.1 - 100$ ГВт/см², а также взаимное влияние легких ионов кислорода и тяжелых ионов Sc, Ce, Lu с близкими теплофизическими параметрами двухэлементной лазерной плазмы.

Эксперименты проводились на лазерном времяпролетном масс-спектрометре в сочетании с электростатическим анализатором. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис.1. В опытах использован неодимовый лазер со следующими параметрами: длительность импульса ~ 15 нс, длина волны $\lambda = 1.06$ мкм, энергия излучения ~ 0.5 Дж, угол падения луча на поверхность мишени относительно нормали $\sim 18^\circ$, интенсивность излучения на поверхности мишени $q = 0.1 - 100$ ГВт/см². Ионы плазмы регистрировались масс-спектрометром по нормали к мишени на расстоянии 100 см электростатическим анализатором со щелью

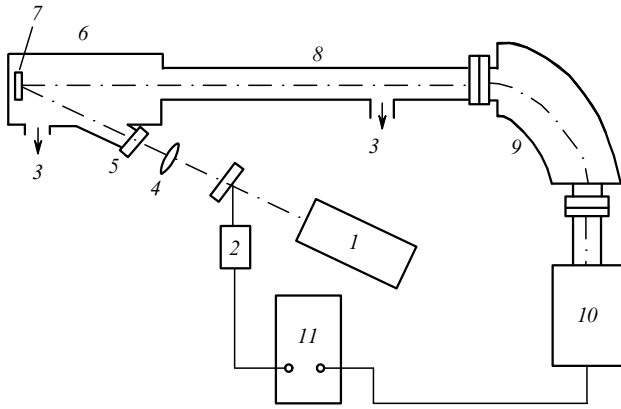


Рис.1. Schematic of the experimental setup: (1) solid-state laser; (2) coaxial photocell; (3) evacuation; (4) focusing lens; (5) entrance window; (6) vacuum chamber; (7) target; (8) time-of-flight tube; (9) electrostatic mass separator; (10) VEU-1B vacuum photomultiplier; (11) double-beam oscilloscope.

шириной 0.4 мм. Исследуемые двухэлементные мишени размещались в камере источника ионов. Камера конструктивно позволяла менять место взаимодействия лазерного излучения с мишенью после каждой одиночной «вспышки». В качестве мишени служили кислородосодержащие материалы Sc_2O_3 , Ce_2O_3 , Lu_2O_3 , которые были изготовлены в виде таблеток диаметром 10 мм и толщиной 5.0 мм. Рабочее давление в установке составляло $\sim 10^{-6}$ Тор. Относительная погрешность измерения при числе измерений $n = 4$ и относительная погрешность определения амплитуды ионного сигнала были равны 15%, относительная погрешность определения полного числа ионов $\Delta N/N$ составляла $\sim 30\%$.

Экспериментально получены масс-зарядовые и энергетические распределения ионов двухэлементной лазерной плазмы, в которой наряду с тяжелыми ионами Sc (Ce, Lu) разлетаются ионы кислорода. Были рассмотрены зависимости интересующих нас характеристик образующейся двухэлементной плазмы от интенсивности излучения лазера и элементного состава мишени. При этом на основе полученных экспериментальных данных был установлен ряд физических особенностей образования и разлета ионов кислорода в двухэлементной плазме. Эти особенности заключаются в характерных изменениях масс-зарядовых и энергетических распределений ионов как кислорода, так и тяжелого компонента, в данном случае Sc, Ce, Lu. Причиной таких изменений является, как нам кажется, обмен энергией между ионами кислорода и тяжелыми ионами Sc (Ce, Lu) [10] в процессе совместного разлета их в составе двухэлементной плазмы.

Анализ экспериментальных результатов, полученных при исследовании масс-спектров двухэлементной плазмы, содержащей ионы кислорода, показал, что вид масс-спектра зависит не только от интенсивности излучения лазера, но и в значительной степени от элементного состава мишени и энергии ионов. Независимо от природы исследуемой двухэлементной мишени, в полученных масс-спектрах четко выделяются ионные пики кислорода в различных ионизированных состояниях. В двухэлементной плазме ионы кислорода с максимальными интенсивностью и кратностью заряда ($Z_{\text{max}} = 2$) образуются при $q = 100$ ГВт/см² и в диапазоне относительно низких энергий ($E = 40 - 120$ эВ). При этом максимальные кратности заряда ионов кислорода $Z_{\text{max}} = 2$ не зависят от

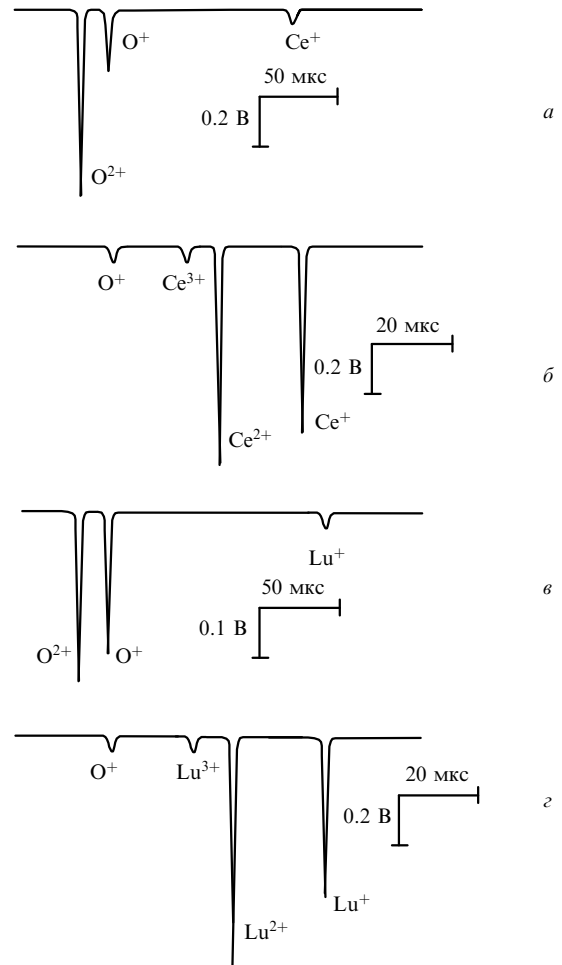


Рис.2. Mass-charge ion spectra of two-elemental plasmas of Ce_2O_3 (a, b) and Lu_2O_3 (c, d) produced by laser radiation with $q = 100$ ГВт/см²; $E/Z = 25$ (a, c) and 150 эВ (b, d).

природы исследуемой двухэлементной мишени в интервале $q = 0.1 - 100$ ГВт/см².

На рис.2 показаны типичные масс-зарядовые спектры ионов двухэлементной плазмы, образованной излучением лазера с $q = 100$ ГВт/см² из Ce_2O_3 и Lu_2O_3 при $E/Z = 25$ и 150 эВ. Видно, что пики ионов кислорода с $Z = 1, 2$ и Ce, Lu с $Z = 1$ при $E/Z = 25$ эВ и пики ионов кислорода с $Z = 1$ и Ce, Lu с $Z = 1 - 3$ при $E/Z = 150$ эВ, эмиттируемых из двухэлементной плазмы, проявляются достаточно четко и хорошо разрешены. Характерно то, что увеличение q в пределах $0.1 - 100$ ГВт/см² приводит к увеличению интенсивности пучка ионов, кратности заряда и энергии ионов, образованных в двухэлементной плазме.

Экспериментально был установлен наиболее оптимальный энергетический интервал (25 – 50 эВ), при котором возможна одновременная регистрация ионов кислорода с максимальной кратностью заряда ($Z_{\text{max}} = 2$) и ионов тяжелых элементов (Sc, Ce, Lu) с кратностью заряда $Z = 1$ двухэлементной плазмы. При относительно больших энергиях ионов (более 150 эВ) пики ионов кислорода с кратностью заряда $Z \geq 2$ исчезают, а пики ионов тяжелых элементов (Sc, Ce, Lu) с $Z = 1 - 3$ отчетливо наблюдаются.

На рис.3 приведены типичные энергетические спектры ионов O^+ и O^{2+} , разлетающихся в составе двухэлементной плазмы, полученной из Sc_2O_3 , Ce_2O_3 , Lu_2O_3 . Видно, что характер и ширина энергетического спектра ионов

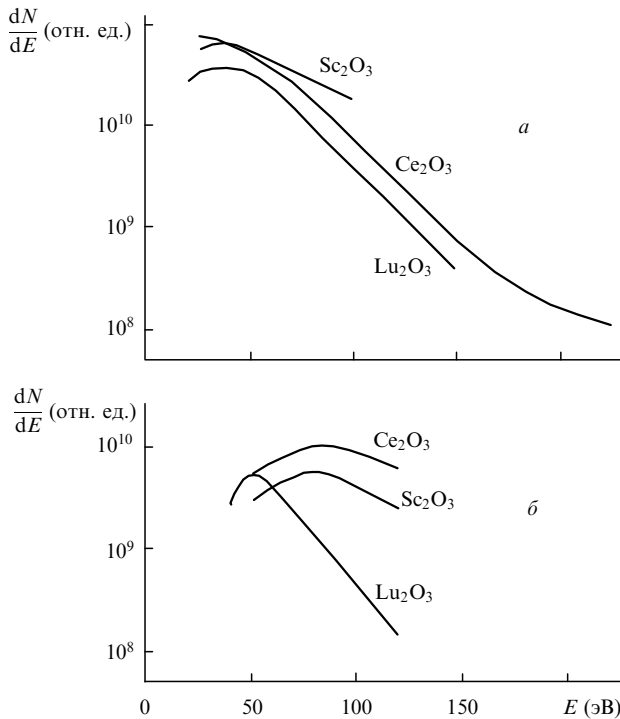


Рис.3. Energy spectra of the O^+ (a) and O^{2+} (b) ions accelerated in two-elemental plasmas of Sc_2O_3 , Ce_2O_3 , and Lu_2O_3 recorded for $q = 100 \text{ GW cm}^{-2}$.

O^+ , O^{2+} и их E_{\max} зависят от природы двухэлементной мишени. Для всех исследуемых нами кислородосодержащих мишеней наибольшая ширина энергетического спектра ионов кислорода с $Z = 1, 2$ наблюдается при $q = 100 \text{ ГВт/см}^2$. Как видно из приведенных данных, наибольшую ширину имеют энергетические спектры ионов кислорода с $Z = 1$ в случае плазмы, получаемой из Ce_2O_3 , наименьшую – ионы кислорода с $Z = 1$ для плазмы из Sc_2O_3 .

Максимальная энергия E_{\max} , которую имеют однозарядные ионы O^+ в двухэлементной плазме, зависит от массы ионов второго компонента двухэлементной плазмы (Sc, Ce, Lu). Например, в случае мишени из Ce_2O_3 , ионы кислорода O^+ имеют E_{\max} в два раза большее, чем E_{\max} данных ионов, образующихся из Sc_2O_3 при такой же интенсивности лазера. Всесторонний анализ энергетических спектров ионов O^{2+} , полученных на мишенях различной природы, показал, что спектры имеют один максимум распределения и энергетический диапазон E_{\max} не зависит от dN/dE , а зависит от природы второго компонента (Sc, Ce, Lu) двухэлементной мишени (см. рис.3,б). Особенно отчетливо зависимость dN/dE ионов O^{2+} от природы мишени проявляется в энергетическом диапазоне 60–120 эВ, где усиливаются рекомбинационные потери, незначительные в интервале 40–60 эВ, в котором доминирующими являются ионизационные процессы.

На рис.4 приведены типичные полученные при $q = 100 \text{ ГВт/см}^2$ энергетические спектры ионов кислорода O^+ , O^{2+} , разлетающихся в составе двухэлементной плазмы из Sc_2O_3 и Lu_2O_3 . Видно, что спектры группируются в два «пакета» ионов, которые расположены в различных энергетических диапазонах. Ионы кислорода с кратностью заряда $Z = 1, 2$ находятся в диапазоне низких энергий, а ионы Sc (Lu) – в диапазоне высоких энергий. Отметим, что при переходе от Sc_2O_3 к Lu_2O_3 в двухэлементной плазме отчетливо проявляются изменения характера спек-

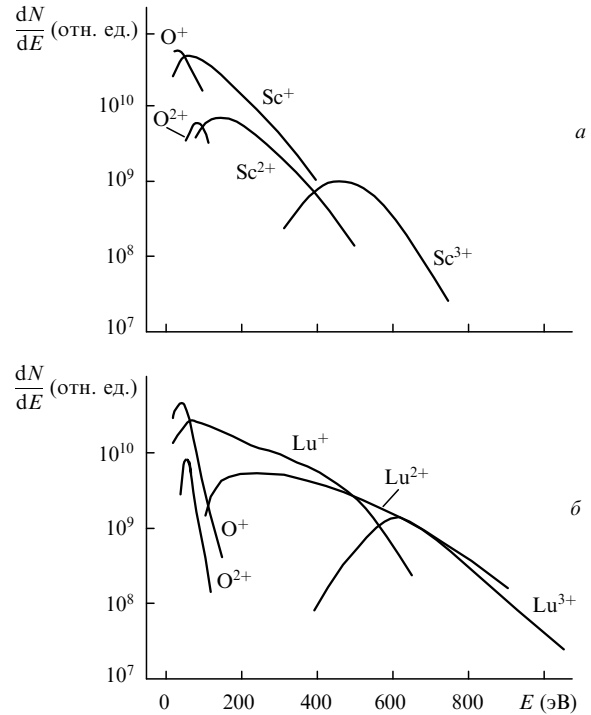


Рис.4. Energy spectra of O and Sc (Lu) ions accelerated in two-elemental plasmas of Sc_2O_3 (a) and Lu_2O_3 (b) obtained for $q = 100 \text{ GW cm}^{-2}$.

тра ионов кислорода O^+ , O^{2+} и смещение энергетического спектра ионов Lu^+ , Lu^{2+} (относительно спектра ионов Sc^+ , Sc^{2+}) в сторону больших энергий. Для всех исследуемых кислородосодержащих двухэлементных мишеней наибольшая ширина энергетического спектра как ионов O, так и ионов Sc (Ce, Lu) достигается при $q = 100 \text{ ГВт/см}^2$. Уменьшение интенсивности излучения лазера на поверхности исследуемой кислородосодержащей мишени ведет к сужению энергетического распределения ионов O и Sc (Ce, Lu), разлетающихся в составе двухэлементной плазмы.

Сравнение масс-спектров и энергетических спектров ионов O и Sc (Ce, Lu), формирующихся и разлетающихся в двухэлементной лазерной плазме, показывает, что образование и разлет ионов как O^+ , O^{2+} , так и Sc^+ – Sc^{3+} (Ce^+ – Ce^{3+} , Lu^+ – Lu^{3+}) в плазме двухэлементного состава определяются элементарным составом мишени. Заметим, что использованные в опытах мишени из Sc_2O_3 , Ce_2O_3 , Lu_2O_3 и их элементы Sc, Ce, Lu по некоторым своим теплофизическим параметрам (таким как работа выхода, электропроводность, теплота плавления, теплоемкость, потенциалы ионизации атомов Sc, Ce, Lu с кратностью заряда до $Z = 4$) довольно близки, однако сильно различаются по массам второго компонента двухэлементной мишени (массы атомов Sc, Ce и Lu соответственно в 3, 9 и 11 раз больше массы атома кислорода). Этот фактор играет заметную роль в формировании двухэлементной плазмы и, следовательно, в обмене энергией между ионами O и Sc (Ce, Lu). Из рис.4 видно, что спектры ионов O^+ , O^{2+} в узком энергетическом диапазоне перекрываются со спектрами ионов Sc^+ – Sc^{3+} , Ce^+ – Ce^{3+} , Lu^+ – Lu^{3+} . Характерно, что увеличение массы второго компонента двухэлементной плазмы приводит к росту обмена энергией между ионами O и Sc (Ce, Lu), и в итоге с ростом массы второго компонента мишени (Sc, Ce, Lu) энергетические спектры ионов рас-

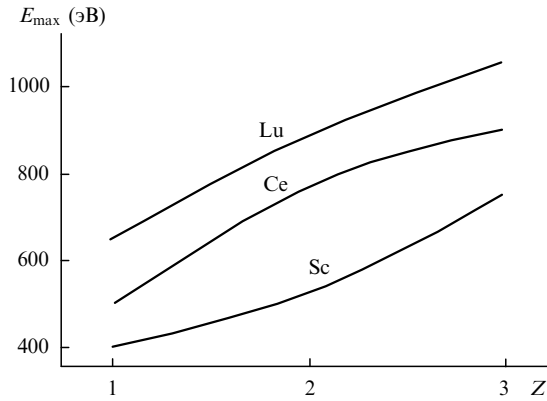


Рис.5. Dependences of E_{\max} for Sc, Ce, and Lu ions on the ion multiplicity obtained for $q = 100 \text{ GW cm}^{-2}$.

ширяются в сторону больших энергий. Заметим, что E_{\max} ионов в интервале $Z = 1 - 4$ увеличивается с ростом массы атомов второго компонента (Sc, Ce, Lu) двухэлементной плазмы (рис.5).

Поскольку ионы двухэлементной плазмы имеют широкий энергетический спектр с одним максимумом, можно говорить о том, что процессы, протекающие в двухэлементной плазме, разделяются на два этапа. На первом этапе (до максимума распределения) наблюдается интенсивная ионизация, сопровождающаяся увеличением вероятности образования многозарядных ионов как O, так и Sc (Ce, Lu), находящихся в мишени. Второй этап (после максимума распределения) характеризуется увеличением скорости рекомбинации, т. е. обмена энергией между легкими (O) и тяжелыми (Sc, Ce, Lu) ионами двухэлементной плазмы, что качественно согласуется с теоретическим расчетом разлета двухэлементной плазмы в вакууме [10].

Эксперимент показал, что формирование зарядового и энергетического спектров многозарядных ионов O и Sc (Ce, Lu) двухэлементной плазмы определяется не только ионизацией, рекомбинацией, «закалкой» ионизационного состояния и ускорением ионов, но и взаимным влияни-

ем присутствующих в плазме ионов, различающихся по массе и заряду. При этом трудно определить, какой из ионов играет наиболее существенную роль в данном процессе. Согласно [11] в бесстолкновительной многоэлементной плазме энергия E_k ионов сорта k определяется законом подобия $E_k \sim Z_k^2/M_k$, где Z_k и M_k – заряд и масса иона.

Авторами [10] было показано, что в «столкновительном» пределе скорости всех компонентов становятся одинаковыми, зависимость энергии ионов от заряда исчезает и возникает пропорциональность между массой и энергией, т. е. $E_k \sim M_k$. Таким образом, можно говорить о качественном согласии наших экспериментальных результатов с теорией [10, 11]. И в эксперименте и в теории максимальная кратность заряда ионов кислорода O^{2+} не зависит от элементного состава двухэлементной мишени, энергетический спектр ионов O^+ , O^{2+} изменяется, а энергетический спектр ионов Sc, Ce, Lu с кратностью заряда $Z = 1 - 3$ расширяется в сторону больших энергий с ростом массы второго компонента (Sc, Ce, Lu) двухэлементной плазмы. Кроме того, E_{\max} ионов увеличивается с ростом Z и массы ионов тяжелого компонента плазмы.

1. Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Рупасов А.А. и др. *Диагностика плотной плазмы* (М., Наука, 1989, с.368).
2. Быковский Ю.А., Неволин В.Н. *Лазерная масс-спектрометрия* (М., Энергоатомиздат, 1985, с.128).
3. Анисимов С.И., Имас Я.А. и др. *Действие излучения большой мощности на металлы* (Л., Наука, 1970, с.274).
4. Бедилов М.Р., Быковский Ю.А., Курамаев Д. *Квантовая электроника*, **18**, 79 (1991).
5. Бедилов М.Р., Бейсембаева Х.Б., Сабитов М.С. *Квантовая электроника*, **30**, 48 (2000).
6. Бедилов М.Р., Быковский Ю.А., Бейсембаева Х.Б. *Квантовая электроника*, **16**, 2117 (1989).
7. Бедилов М.Р., Сабитов М.С. *Физика плазмы*, **13**, 585 (1987).
8. Бедилов М.Р., Хайдаров Р.Т., Кунишев У.С. *Физика плазмы*, **26**, 862 (2000).
9. Бедилов М.Р., Хаитбаев К. *ПТЭ*, №6, 139 (1996).
10. Анисимов С.И., Иванов М.Р., Медведов Ю.В. и др. *Физика плазмы*, **8**, 1045 (1982).
11. Гуревич А.В., Питаевский Л.П. *Вопросы теории плазмы* (М., Атомиздат, 1980, с.2).