

05;07;10;12

Формирование спектров многозарядных ионов в плазме, возникающей при воздействии излучения неодимового лазера на стекло, активированное ионами Nd

© М.Р. Бедиллов, Х.Б. Бейсембаева, И.Ю. Давлетов

Научно-исследовательский институт прикладной физики Национального университета Узбекистана им. М. Улугбека, 700174 Ташкент, Узбекистан
e-mail: bedilov@iaph.post.tps.uz

(Поступило в Редакцию 18 января 2000 г. В окончательной редакции 11 февраля 2002 г.)

Масс-спектрометрическими и микроскопическими методами исследовано влияние ионов Nd на лазерное разрушение стекла и формирование спектров ионов лазерной плазмы. Установлено, что под действием лазерного излучения с ростом концентрации Nd увеличиваются размеры и уменьшается порог разрушения силикатного стекла, уменьшаются Z_{\max} , E_{\max} ионов и деформируются энергетические спектры ионов мишени; это связывается с совпадением линий генерации лазера с линиями поглощения ионов Nd и ростом рекомбинационных процессов в многоэлементной лазерной плазме.

Физические процессы, происходящие при взаимодействии лазерного излучения с веществом, привлекают все большее внимание исследователей. Известно, что при воздействии на твердое тело лазерного излучения с плотностью мощности излучения $q \geq 0.1 \text{ GW/cm}^2$ образуется плазменный сгусток, являющийся источником излучения в широком спектральном интервале, а также электронов, многозарядных ионов и нейтронов. Процесс образования плазмы при воздействии интенсивного лазерного излучения на твердое тело связан с процессом разрушения последнего. Поэтому существующие в мишени различные статистические и динамические дефекты, очевидно, могут влиять на процесс лазерного разрушения, а в итоге и на спектры ионов плазмы. Экспериментальные исследования физических процессов (ионизация, рекомбинация и др.) в многоэлементной лазерной плазме при $q = 0.1 - 100 \text{ GW/cm}^2$ показывают [1–6], что имеется ряд особенностей, связанных с формированием и разлетом отдельных сортов ионов тяжелых элементов, введенных в состав исследуемой мишени в качестве примеси. Выявлена зависимость кратности заряда, энергии и интенсивности пучков ионов плазмы не только от q лазера, но и от элементарного состава мишени. Например, при малых концентрациях золота [1] и серебра [2] в многоэлементной мишени ($\sim 10^{-2} - 10^{-3} \%$) обнаружено, что интенсивность однозарядных ионов золота и серебра в многокомпонентной плазме существенно меньше, чем в случае моноэлементной плазмы. Необходимо отметить, что исследование влияния малых примесей в мишени на формирование спектров ионов лазерной плазмы находится на начальном этапе.

В настоящей работе исследуется влияние ионов Nd на формирование масс-зарядовых, энергетических спектров многозарядных ионов лазерной плазмы. В качестве мишени использовано силикатное лазерное стекло типа ГЛС без и с примесями Nd. Концентрация Nd в стекле регулировалась в пределах $C = 0 - 5.6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Мишени изготовлялись в виде таблетки диаметром 1.0 см

и толщиной $\sim 0.5 \text{ cm}$ без и с известным содержанием Nd. При этом место локального воздействия лазерного излучения на мишень обновлялось от выстрела к выстрелу, что позволило получить данные относительно разрушения поверхности образца. Экспериментальные данные получены при одинаковых начальных условиях: мишенная камера заправлялась более 10 образцами с Nd и без него. Исследования проводились на время-пролетном масс-спектрометре в сочетании с электростатическим анализатором [3]. В опытах использован неодимовый лазер с параметрами: длина волны излучения $\lambda = 1.06 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$, длительность импульса 50 ns, энергия импульса 3.0 J, угол падения излучения на поверхность мишени составляет 18° относительно нормали мишени, плотности мощности излучения на поверхности мишени q варьировались с помощью нейтральных светофильтров в интервале $1 - 100 \text{ GW/cm}^2$. Для определения порога разрушения исследуемого стекла последовательно осуществлялся ряд выстрелов лазера с постепенным увеличением интенсивности излучения лазера до тех пор, пока не наступало разрушение, которое сопровождается свечением и образованием плазмы. При этом по появляющимся ионным сигналам можно установить не только порог разрушения мишени, но и определить состав поглощающих примесей, играющих существенную роль в процессе лазерного разрушения и образовании плазмы. Образование повреждений на поверхности исследуемых стекол контролировалось методом оптической микроскопии.

Экспериментально получены пороги лазерного разрушения стекла и формирования масс-зарядового, энергетического спектра ионов плазмы в интервале $C = 0 - 5.6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ концентрации Nd и $q = 0.1 - 100 \text{ GW/cm}^2$. Установлена зависимость порогов лазерного разрушения стекол и формирования спектров многозарядных ионов лазерной плазмы от концентрации Nd в стекле и q лазера.

На рис. 1 приведены типичные масс-зарядовые спектры многозарядных ионов лазерной плазмы, получен-

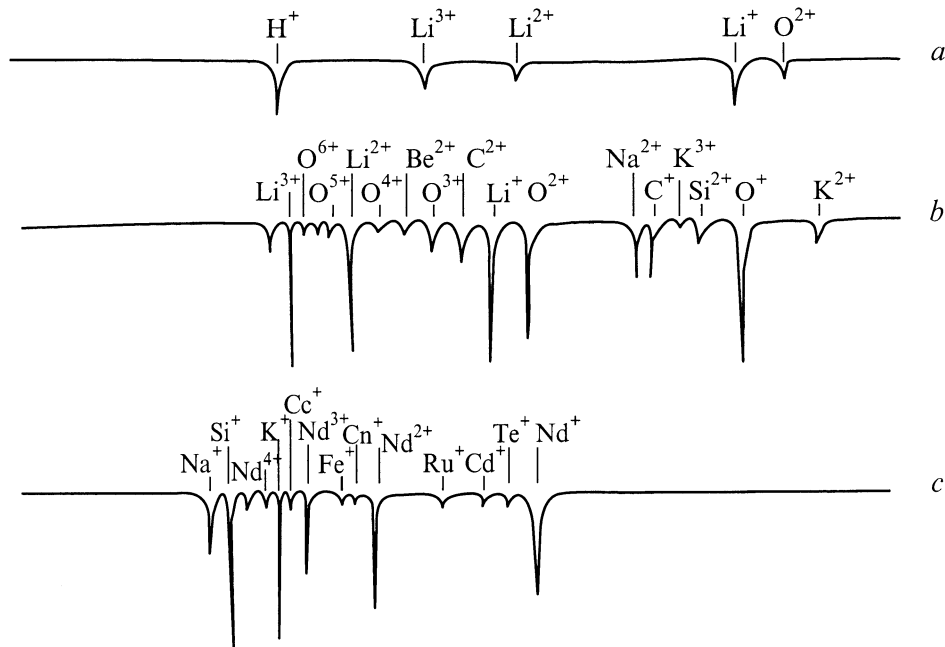


Рис. 1. Типичные масс-зарядовые спектры ионов, образованных из стекла с Nd под действием излучения лазера с $q = 90 \text{ GW/cm}^2$ при различных значениях энергии $E/Z = 50$ (a), 100 (b) и 400 (c) eV.

ные при $q = 90 \text{ GW/cm}^2$ из стекла с концентрацией $C = 1.9 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ Nd. Анализ полученных масс-зарядовых спектров ионов лазерной плазмы показал, что элементный и зарядовый состав плазмы зависит не только от q лазера, но также от концентрации Nd в стекле. Например, при $q = 9 \text{ GW/cm}^2$ масс-зарядовые спектры ионов лазерной плазмы в основном содержат ионные сигналы элементов матрицы стекла и некоторых примесей (Be, B, C). С увеличением q лазера масс-зарядовые спектры пополняются пиками новых ионизованных атомов и при $q = 90 \text{ GW/cm}^2$, наряду с ионами матрицы стекла (Li, O, Na, Si, K, Ca) и активатора Nd, отчетливо наблюдаются ионные пики некоторых примесей H, Be, B, C, Fe, Cu, Se и изотопов кремния. При q лазера, близкой к пороговой, в масс-зарядовых спектрах ионов плазмы зарегистрированы ионные пики матрицы и примесей B и C. Данный факт свидетельствует о том, что присутствие в стекле примесей B и C в определенной мере способствует лазерному разрушению поверхности. Как показали микроскопические исследования, разрушения, полученные на мишени без Nd, представляются собой кратер с оплавленными краями, внутри которого имеются мелкие повреждения в виде углублений размерами в десятые доли микрона и меньше. Причиной появления данных микрократеров, по всей вероятности, являются отдельные примесные включения и оптические неоднородности в образце, приводящие к поглощению излучения лазера в локальных центрах. Величина порога лазерного разрушения поверхности стекла типа ГЛС составляла в данных экспериментальных условиях $\sim 7 \text{ GW/cm}^2$. При этом диаметр d составлял $\sim 5.0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$, с

увеличением плотности мощности лазера размер кратера растет и при $q = 1000 \text{ GW/cm}^2$ достигает величины $\sim 3.0 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$. Увеличение концентрации Nd в стеклах от 0 до $5.6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ приводит к уменьшению порога разрушения до 2 GW/cm^2 , т.е. в 3.5 раза, а величина кратера при этом достигает $1.0 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$. Порог поверхностного лазерного разрушения стекол в зависимости от концентрации Nd $C = 0 - 5.6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ показан на рис. 2. Из рис. 2 видно, что порог поверхностного лазерного разрушения стекла сильно зависит от концентрации Nd в мишени, так как в пределах концентрации Nd $C = 0 - 5.6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, порог поверхностного лазерного разрушения уменьшается в 3.5 раза. Кроме этого, в случае стекла без Nd на масс-зарядовых спектрах происходит уменьшение выхода ионов (Li^{1+} , O^{1+} , Si^{1+}) матрицы в 1.5–2 раза. Установленный факт снижения порога разрушения стекла с ростом концентрации Nd коррелирует с результатами, полученными при исследовании спектра поглощения исследуемых стекол. Было выявлено, что у стекла с Nd поглощение (общий фон) в области $1.06 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \sim$ в 7 раз больше по сравнению со стеклом без Nd. Существенное возрастание фона поглощения у стекла с Nd в области генерации неодимового лазера, по всей вероятности, связано с различными дефектами (дислокациями, неоднородностями и др.), возникающими в стекле при введении в него Nd. Наличие в стекле и на его поверхности этих дефектов способствует росту поглощения света.

Анализ полученных зарядовых спектров ионов плазмы, образованных при взаимодействии излучения лазера со стеклами с концентрацией Nd $C = 0 - 5.6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, показал, что зарядовый состав плазмы сильно зависит

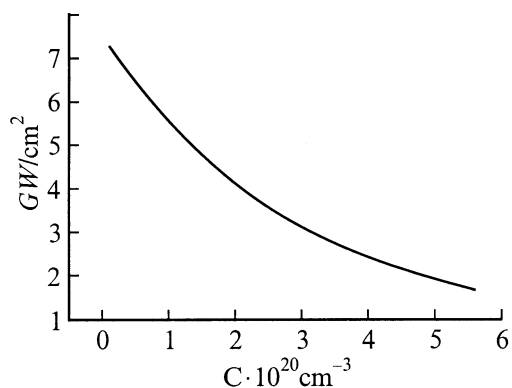


Рис. 2. Зависимость порога лазерного разрушения (q_{thr}) стекла от концентрации Nd в исследуемой мишени.

от концентрации Nd в стекле. Так, результаты показали, что включение в стекло Nd приводит к существенной перестройке зарядового спектра ионов плазмы, так как происходит перераспределение кратности заряда Z между ионами атомов мишени. Типичные масс-зарядовые спектры ионов плазмы, образованные из стекла без Nd под действием излучения лазера при $q = 9\text{--}90 \text{ GW/cm}^2$ и $E/z = 400 \text{ eV}$, приведены на рис. 3. Из данного спектра видно, что кратности заряда Z ионов мишени зависят не только от q лазера, но также от вводимого элемента (в частности, от Nd) в состав данного стекла. Так, например, на зарядовых спектрах плазмы, полученных при $q = 9 \text{ GW/cm}^2$ при различных значениях E/z ионы O и Si зафиксированы с $z_{\text{max}} = 3$, а ионы K, Ca, Na — с $z_{\text{max}} = 1.2$. С ростом q лазера z_{max} ионов плазмы увеличивается; в спектрах начинают появляться ионы H, Al, Li изотопов Si и других примесей, и при $q = 100 \text{ GW/cm}^2$ зафиксированы следующие ионы элементов, входящих в стекло без Nd: H^{1+} ; $\text{Li}^{1+}\text{--Li}^{3+}$; $\text{O}^{1+}\text{--O}^{6+}$; $\text{Na}^{1+}\text{--Na}^{5+}$; Al^{1+} , Al^{2+} ; $\text{Si}^{1+}\text{--Si}^{4+}$; $\text{K}^{1+}\text{--K}^{4+}$; $\text{Ca}^{1+}\text{--Ca}^{2+}$; Be^{1+} ; B^{1+} ; C^{1+} ; Fe^{1+} ; Cu^{1+} .

Экспериментально установлено, что в зарядовых спектрах ионов плазмы, образованных при воздействии излучения лазера на стекло, активированное Nd, происходит перестройка кратности заряда Z ионов плазмы. Например, при $q = 100 \text{ GW/cm}^2$ Z_{max} у ионов кислорода уменьшается до 5, у натрия — до 4. Ионы Nd при данной q лазера зафиксированы в плазме с $Z_{\text{max}} = 4$. Характерно то, что с уменьшением q лазера также уменьшаются кратности заряда ионов Nd. Уменьшение Z_{max} ионов ряда элементов, входящих в состав стекла с Nd, обусловлено тем, что наличие в образующейся плазме тяжелых ионов Nd приводит к заметному увеличению продолжительности рекомбинационных процессов, так как с введением Nd в стекло средняя масса ионизованного сгустка существенно возрастает; это приводит к значительному уменьшению скорости его разлета.

Изучены энергетические спектры ионов стекла в интервале концентрации Nd $C = 0\text{--}5.6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $q = 1\text{--}100 \text{ GW/cm}^2$ лазера и установлены следующие особенности.

1. Энергетические спектры ионов, входящие в состав стекла и образованные излучением лазера, имеют широкие спектры с максимумом распределения, и их ширина, интенсивность и расположение максимума в спектре зависят от присутствия ионов Nd в лазерной плазме.

2. Энергетические спектры ионов легких элементов расположены в более низкоэнергетической области по сравнению с энергетическими спектрами ионов тяжелых элементов Nd.

3. Энергетические спектры ионов стекла с Nd на стадии разлета из-за взаимного влияния ионов легких и тяжелых элементов сильно деформируются.

4. Присутствие в составе разлетающейся плазме ионов тяжелых (Nd) элементов приводит к уменьшению E_{max} и E_{min} ионов более легких элементов стекла, E_{max} и E_{min} ионов тяжелых (Nd) элементов при этом значительно возрастают.

На рис. 4 приведены энергетические спектры ионов Si стекла с Nd и без него, образованные под действием излучения лазера с $q = 100 \text{ GW/cm}^2$. Как видно из приведенных спектров, характер энергетического распределения не меняется; ионы имеют широкий энергетический спектр с одним максимумом распределения. С ростом кратности заряда ионов максимумы сдвигаются в сторону больших энергий. Однако ширина энергетического спектра каждой кратности заряда ионов Si в плазме, образованной в стекле с Nd под действием излучения лазера сужается, максимумы их распределения смещаются в сторону низких энергий, величины E_{max} и E_{min} уменьшаются; чем больше q лазера, тем сильнее деформируется энергетический спектр. Аналогичные изменения энергетических спектров наблюдаются и у других ионов элементов, составляющих основу стекла (Li, O, Na, Al, K, Cu). Влияние ионов Nd на формирование спектра ионов других элементов (Li, O, Na, Si, K) стекла особенно отчетливо можно наблюдать, если сравнивать спектры, полученные из стекла с Nd и без него. При $q = 9 \text{ GW/cm}^2$ энергетические спектры этих ионов в обоих случаях имеют один максимум. Эти максимумы в энергетическом спектре ионов указанных элементов в случае стекла без Nd равны $155 \pm 20 \text{ eV}$, а в случае стекла с Nd они уменьшаются (\sim в 2 раза) и составляют $80 \pm 10 \text{ eV}$. При этом наблюдается не только сдвиг максимума энергетического распределения в сторону меньших энергий, но также уменьшение E_{max} и E_{min} ионов. На рис. 5 приведены энергетические спектры однозарядных ионов стекла с Nd и без него, образованные излучением лазера с $q = 90 \text{ GW/cm}^2$. Из приведенных спектров видно, что введение в стекло Nd приводит к перераспределению Z_{max} ионов Li^{1+} , O^{1+} , Na^{1+} , Si^{1+} , K^{1+} . Так, например, интенсивность Z_{max} ионов Li^{1+} , O^{1+} , Si^{1+} возрастает в 1.5–2.0 раза, в то время как интенсивность Z_{max} ионов Na^{1+} , K^{1+} уменьшается примерно во столько же раз. На рис. 6 приведены зависимости E_{max} однозарядных ионов матрицы (1, 2, 3, 4, 5) с Nd и без него (6, 7, 8, 9, 10) от q лазера. Отсюда видно, что в случае ионов матрицы с Nd уменьшаются E_{max} ионов.

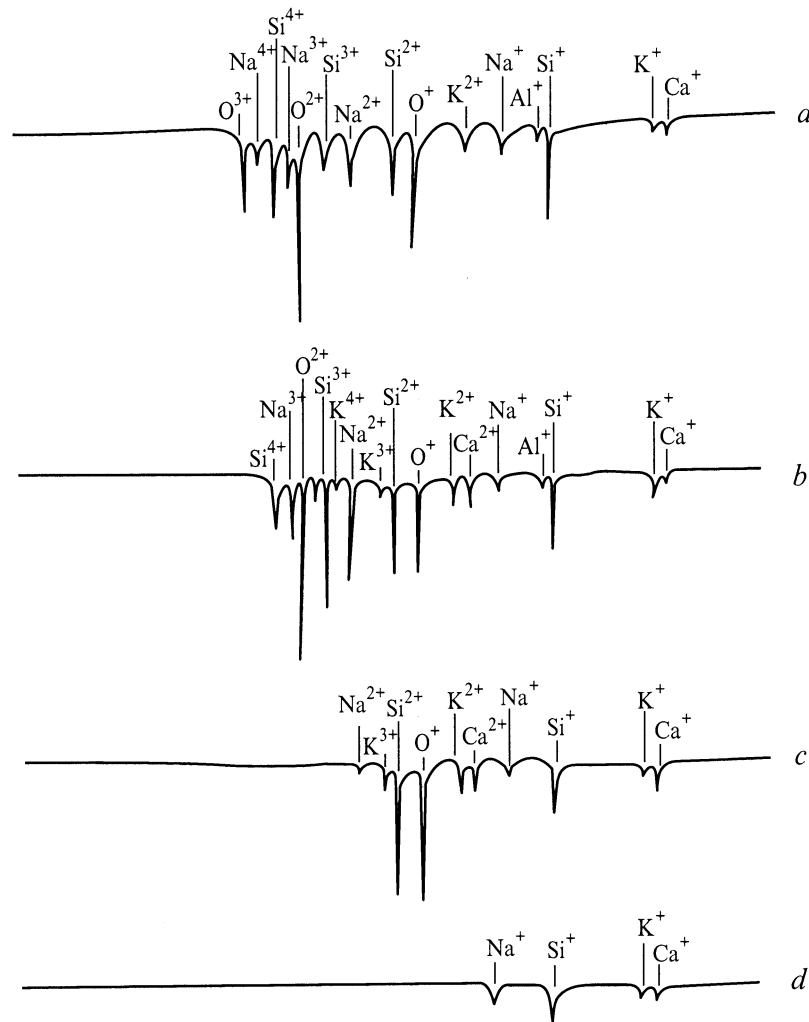


Рис. 3. Типичные масс-зарядовые спектры ионов стекла без Nd, образованные излучением лазера с $q = 90$ (a), 60 (b), 20 (c) и 9 GW/cm^2 (d) при $E/Z = 400 \text{ eV}$.

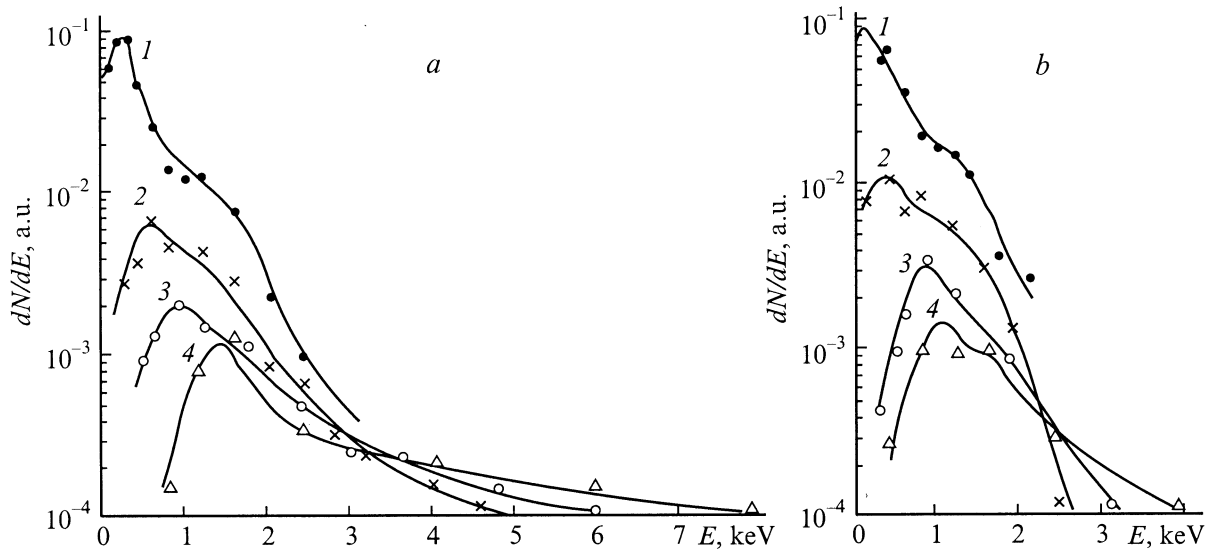


Рис. 4. Энергетические спектры ионов Si, образованные из стекла без Nd (a) и из стекла с Nd (b) под действием излучения лазера с $q = 90 \text{ GW/cm}^2$. Кривые 1–4 соответствуют кратностям заряда ионов Si с $Z = 1-4$.

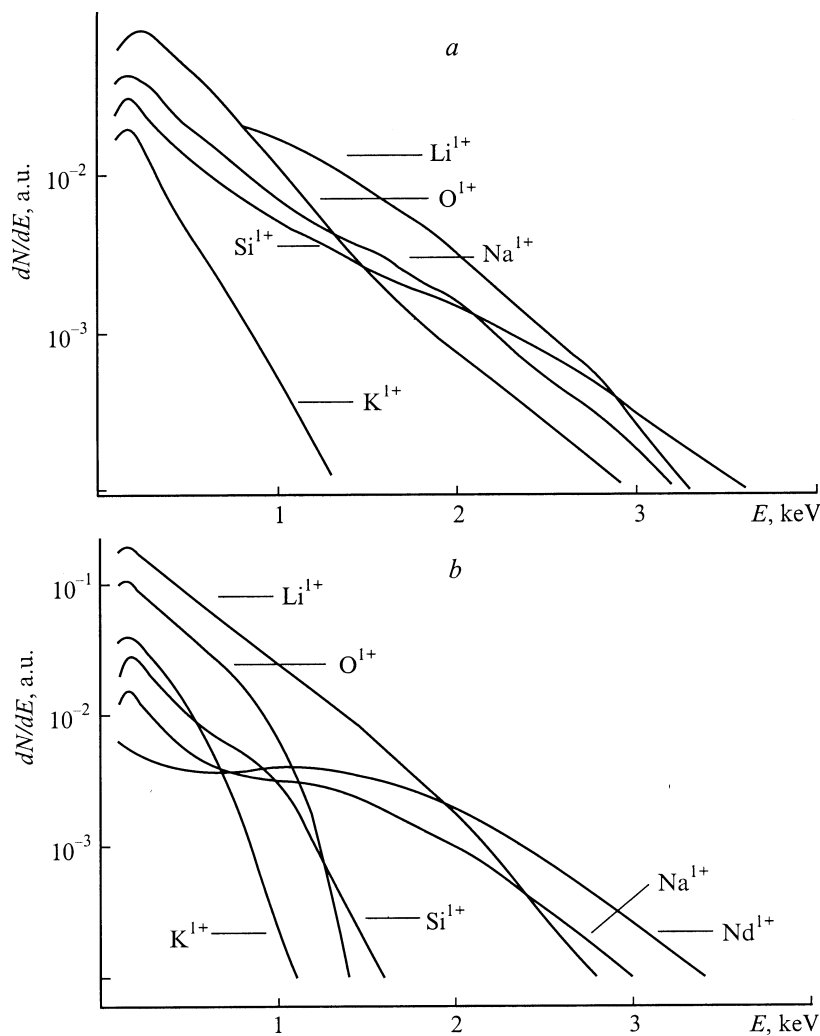


Рис. 5. Энергетические спектры однозарядных ионов стекла без Nd (Li^{1+} , O^{1+} , Na^{1+} , Si^{1+} , K^{1+}) (a) и стекла с Nd (b), полученные при $q = 90 \text{ GW/cm}^2$.

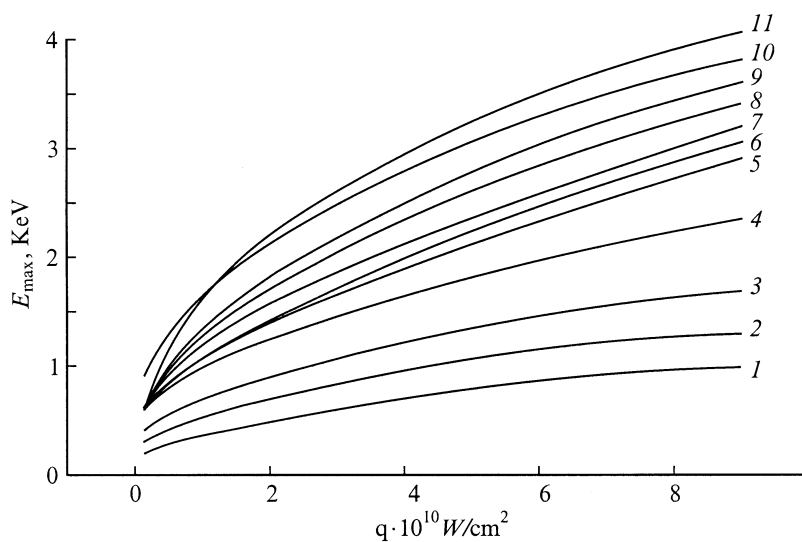


Рис. 6. Зависимость максимальной энергии (E_{max}) ионов стекла с Nd (1 — Li^{1+} , 2 — O^{1+} , 3 — Na^{1+} , 4 — Si^{1+} , 5 — K^{1+} , 11 — Nd^{1+}) и стекла без Nd (6 — Li^{1+} , 7 — O^{1+} , 8 — Na^{1+} , 9 — Si^{1+} , 10 — K^{1+}) от q лазера.

Заметим, что при разлете плазмы, содержащей ионы с различной массой, происходит сильное ускорение ионов тяжелой примеси Nd (рис. 6, кривая *II*), причем чем больше q лазера, тем больше и ускорение. Подобное ускорение ионов тяжелых элементов объясняется, по всей вероятности, возрастанием столкновительных процессов, происходящих в многоэлементной плазме. В результате этого ионы легких элементов передают свою энергию тяжелым ионам. С ростом q лазера происходит более интенсивное образование многозарядных ионов, в результате чего интенсифицируется процесс столкновения между ионами. В итоге ионы тяжелых элементов (в частности, Nd) приобретают еще большее ускорение.

Таким образом, установлено влияние ионов Nd на пороги и размеры лазерного разрушения силикатного стекла и формирование спектров ионов многоэлементной лазерной плазмы. Выявлено, что увеличение концентрации Nd увеличивает размеры и уменьшает пороги разрушения силикатного стекла под действием излучения лазера, а также уменьшает Z_{\max} , E_{\max} ионов и деформирует энергетические спектры ионов мишени. Анализ многочисленных экспериментальных данных, полученных с Nd и без него, дает возможность говорить о том, что имеется связь наблюдаемых эффектов с наличием, свойственным именно ионам Nd полос поглощения, возможно перекрывающихся с линиями генерации неодимового лазера.

Список литературы

- [1] Бедилов М.Р., Быковский Ю.А., Курамов Д. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. С. 1675–1677.
- [2] Бедилов М.Р., Быковский Ю.А., Курамов Д. // Квантовая электрон. 1991. Т. 21. С. 79–81.
- [3] Бедилов М.Р., Хаитбаев К. // ПТЭ. 1996. № 6. С. 139.
- [4] Быковский Ю.А., Неволин В.Н. // Лазерная масс-спектрометрия. М.: Энергоатомиздат. 1985. 128 с.
- [5] Бедилов М.Р., Бейсембаева Х.Б., Сабитов М.С. // Квантовая электрон. 2000. Т. 30. № 1. С. 48–50.
- [6] Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Рупасов А.А. и др. // Диагностика плотной плазмы. М.: Наука, 1989. 368 с.