

Влияние γ -наведенных дефектов в стекле на процесс лазерного разрушения

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

Научно-исследовательский институт прикладной физики Национального университета Узбекистана,
700174 Ташкент, Узбекистан

E-mail: ravshan@vega.tashkent.su

(Поступила в Редакцию 7 июня 2001 г.)

Комплексным методом в допороговой, пороговой и сверхпороговой областях изучены процессы деградации и выброса плазмы при облучении оптических материалов одиночным лазерным излучением и γ -излучением.

Прогресс в создании мощных твердотельных лазеров, нелинейно-оптических сред, элементов и устройств термоядерного реактора, работающих в экстремальных условиях, во многом определяется разработкой радиационно-лучестойких оптических материалов. В настоящее время установлено, что создание таких материалов в основном зависит от знания механизмов их разрушения под действием мощного луча лазера и ядерного излучения. Известно, что поверхность твердого тела, в том числе и прозрачного диэлектрика, в процессе лазерного облучения разрушается при достижении определенной плотности падающей световой энергии. Несмотря на довольно значительное число работ по исследованию процесса лазерного разрушения поверхности оптических материалов [1–14], вопрос о связи его с дефектностью структуры твердого тела остается малоизученным [15]. Выявлено, что наличие в прозрачных диэлектриках различных динамических (молекулярные колебания, флуктуации плотности, концентрации и т.д.) и статических (инородные примеси и включения) оптических неоднородностей способствует возникновению различных нелинейных эффектов, в том числе и самофокусировки, что снижает лучевую стойкость оптического материала.

В данной работе исследовано влияние γ -наведенных дефектов в стекле на процесс лазерного разрушения под действием излучения лазера с плотностью мощности $q = 0.1 - 1000 \text{ GW/cm}^2$. Эксперименты проводились в широком интервале плотностей мощности лазера, который охватывает допороговую ($10^8 - 10^9 \text{ W/cm}^2$), пороговую ($10^9 - 4 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$) (в зависимости от γ -облученности) и сверхпороговую ($4 \cdot 10^9 - 10^{12} \text{ W/cm}^2$) области разрушения оптических материалов. Отметим, что эксперименты проводились при однократном воздействии излучения лазера на объекты исследования, и поэтому в допороговой области эффект „накопления“ не проявляется. Процесс лазерного разрушения в данном случае взаимосвязан с образованием плотной высокотемпературной плазмы. Поэтому исследования проводились методами масс-спектрометрии и оптической микроскопии [15]. Это давало возможность не только рассматривать морфологию лазерного разрушения в пороговой и сверхпороговой областях плотности мощности лазера,

но и изучить ионную компоненту плазмы, образующуюся при разрушении стекла, определить состав мишени, а также установить элементы, способствующие разрушению. Кроме того, анализ результатов, полученных вышеуказанными методами, позволил выявить корреляцию между процессами поверхностного разрушения твердого тела и характеристиками многозарядных ионов, эмитируемых из него мощным световым потоком.

Мишени (силикатные стекла типа ГЛС) были изготовлены в виде таблеток толщиной $\sim 2 \text{ mm}$, диаметром 10 mm . Радиационные дефекты создавались выдержкой образцов в канале γ -источника мощностью 1500 R/s до дозы 10^9 R . Излучение лазера длительностью 50 ns и мощностью 60 MW фокусировалось на поверхности мишени в виде пятна диаметром $\sim 250 \mu\text{m}$. Для определения порога разрушения, сопровождающегося в данном случае разрушением оптического материала, свечением и выбросом ионизированной массы, производились вспышки лазера с последовательным увеличением интенсивности падающего излучения. Момент начала разрушения фиксировался микроскопическим методом по появлению ионных пиков. Регистрация этих пиков производилась детектором ВЭУ-1А, сигнал с которого подавался на запоминающий осциллограф. Разделение по массе, заряду и энергии ионных компонентов производилось масс-спектрометром. Относительная ошибка измерений амплитуды ионных сигналов не превышала $\sim 8\%$.

Экспериментально получены данные о разрушении силикатного стекла в допороговой, пороговой и сверхпороговой областях, когда излучение лазера однократно взаимодействует с оптическими материалами, и об образовании многозарядных ионов плазмы в широких интервалах плотностей мощности лазера и доз γ -излучений. Как показали микроскопические исследования, разрушения, полученные в пороговой области на необлученной мишени, представляют собой кратер с оплавленными краями, внутри которого имеются мелкие повреждения в виде углублений размерами в десятые доли микрона и меньше. Причиной появления данных микрократеров в пороговой области, по всей вероятности, являются отдельные примесные включения и оптические неоднородности в образце, приводящие к поглощению излучения лазера в локальных центрах [4]. Величина порога

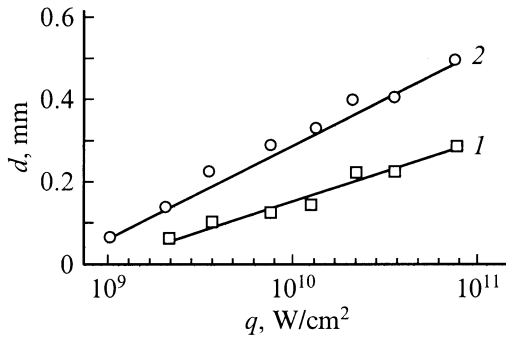


Рис. 1. Зависимость диаметра кратера d , образуемого на поверхности исходного (1) и γ -облученного до дозы 10^9 R (2) стекла, от плотности мощности излучения лазера.

лазерного разрушения поверхности стекла типа ГЛС, определенная по вышеуказанной методике, составляла в данных экспериментальных условиях ~ 4 GW/cm². При этом диаметр кратера d был ~ 50 μ m; с увеличением плотности мощности лазера q размер кратера растет и в сверхпороговой области при $q = 1000$ GW/cm² достигает величины ~ 300 μ m (рис. 1). Между q лазера и размером кратера существует следующая зависимость: $d \sim q^{0.4}$. Дефекты, наведенные в исследуемых стеклах γ -облучением, приводят к снижению порога разрушения. Например, порог разрушения стекла типа ГЛС, облученного дозой 10^9 R, составлял в данных экспериментальных условиях ~ 1 GW/cm², т.е. в 4 раза меньше по сравнению с порогом до облучения. Величина кратера, возникающего на такой облученной поверхности при $q = 1$ GW/cm², достигала ~ 100 μ m. С увеличением облучения размер кратера разрушения значительно растет, и при $q \geq 1$ GW/cm² наступает катастрофическое взламывание поверхности стекла. В этом случае размер кратера на облученной поверхности связан с q лазера соотношением $d \sim q^{0.55}$ (рис. 1). Морфологические исследования картины разрушения показали, что мелкие каверны, существовавшие в исходном кратере, объединяются после γ -облучения в крупные разрушенные области, размеры которых могут достигать десятков микрон. Было выяснено, что разрушения начинаются в мелких изолированных областях, где существует скопление поглощающих дефектов. Таковыми, по нашему мнению, являются инородные примеси и включения, присутствующие в стекле до облучения, и места стока γ -наведенных дефектов. Для подтверждения этого предположения нами было проведено исследование спектра поглощения данных образцов в УФ-, видимой и ИК-областях. Экспериментально было выяснено, что с ростом дозы γ -облучения в рассматриваемых областях поглощение увеличивается. Например, при дозе 10^9 R поглощение данного стекла в видимой области спектра увеличивается на 16%, а в области падающего лазерного излучения — на 7%. Из этого следует, что в γ -облученном образце поглощается больше световой энергии по

сравнению с необлученным, что увеличивает толщину испаряемого материала. Появление же в γ -облученных образцах огромного количества дефектов, поглощающих в УФ- и видимой областях, вызывает увеличение образовавшегося кратера за счет дополнительного нагрева излучением возникающей многозарядной лазерной плазмы.

Сравнение экспериментальных результатов, полученных при исследовании различных многозарядных ионов, эмитированных плазмой, показало, что с увеличением кратера, образующегося на необлученной поверхности, растут количество N , кратность заряда Z и энергия E ионов. Например, в сверхпороговой области при $q = 20$ GW/cm² диаметр кратера достигает величины ~ 150 μ m. При этом в составе возникающей плазмы были зафиксированы все элементы, составляющие основу стекла (Li, O, Na, Si, K), а также неконтролируемые примеси (H, Be, B, C и др.). Максимальные кратности заряда ионов матрицы стекла, полученные в данном случае, имеют следующие значения: ионы Si имели $Z_{\max} = 4$, у ионов Nd и O $Z_{\max} = 3$, у ионов Li, Na, K $Z_{\max} = 2$. Все ионные составляющие имели широкий энергетический спектр с одним максимумом распределения. При этом максимальная энергия ионов Li⁺¹, O⁺¹, Na⁺¹, Si⁺¹, K⁺¹ и Nd⁺¹ равнялась 300, 400, 800, 900, 950

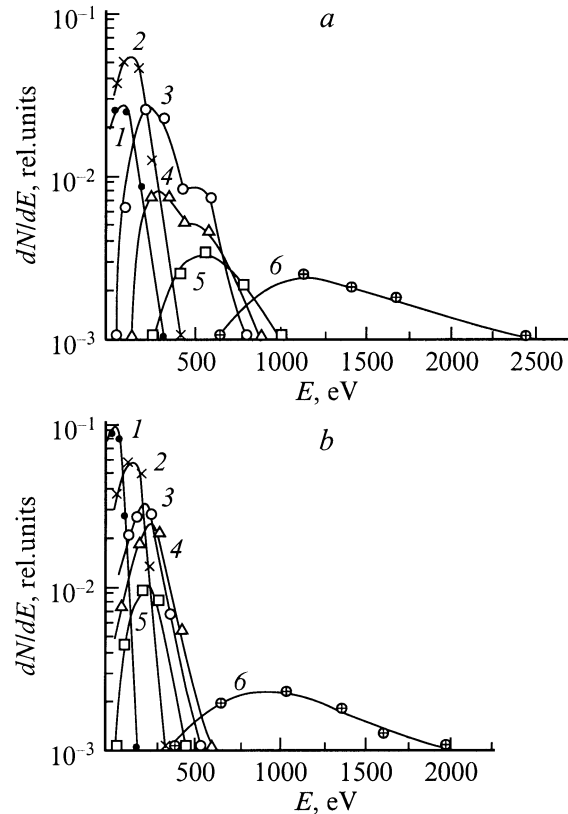


Рис. 2. Типичные энергетические спектры однозарядных ионов Li⁺¹ (1), O⁺¹ (2), Si⁺¹ (3), Na⁺¹ (4), K⁺¹ (5) и Nd⁺¹ (6) плазмы исходного (a) и γ -облученного дозой 10^9 R (b) стекла ГЛС-1 при $q = 20$ GW/cm².

и 2500 eV соответственно (рис. 2). При увеличении q лазера (сверхпороговая область) до 90 GW/cm^2 (размер кратера $280 \mu\text{m}$) в образующейся плазме зафиксированы ионы Li и K с $Z_{\text{max}} = 3$, ионы Si и Nd с $Z_{\text{max}} = 4$, ионы O и Na с $Z_{\text{max}} = 5$ (см. рис. 3 при 20 GW/cm^2 и табл. 2 при 90 GW/cm^2). При этом максимальная энергия E_{max} ионов Li^{+1} , O^{+1} и K^{+1} увеличивается в 3.0–3.5, а Na^{+1} , Si^{+1} и Nd^{+1} — в 2.9–2.5 раза. Значительно растет и интенсивность ионных пучков. Например, увеличение q лазера от 20 до 90 GW/cm^2 приводит к росту числа ионов всех зарядностей Li, O, Na и Si в 1.5–2.0 раза и возрастанию интенсивности многозарядных ионов K и Nd в 4–5 раз. Указанный факт увеличения с ростом q лазера параметров многозарядных ионов образуемой плазмы объясняется тем, что по мере увеличения размера кратера плазма быстрее достигает своей критической плотности и, следовательно, большая доля излучения лазера идет на нагрев и ионизацию плазменного сгустка.

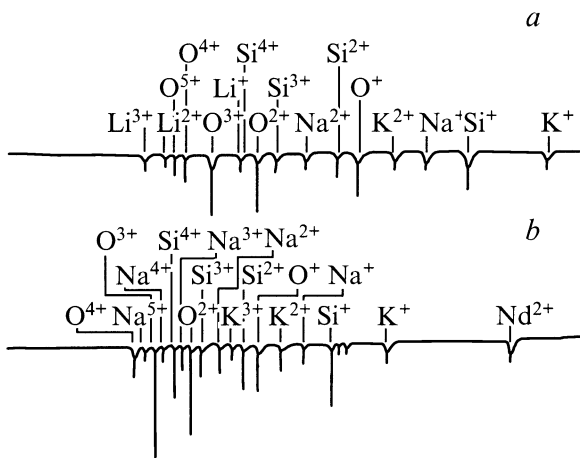


Рис. 3. Типичные масс-зарядовые спектры ионов плазмы стекла ГЛС-1, образованные излучением лазера с $q = 20 \text{ GW/cm}^2$. Энергия ионов $E/Z = 200$ (a) и 400 eV (b).

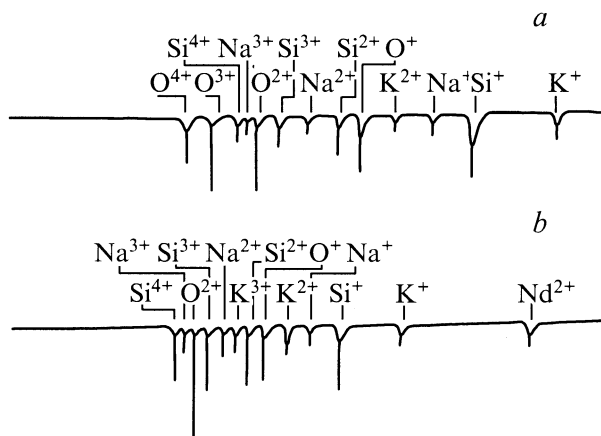


Рис. 4. Типичные масс-зарядовые спектры ионов плазмы γ -облученного дозой 10^9 R стекла ГЛС-1, образованные излучением лазера с $q = 20 \text{ GW/cm}^2$. Энергия ионов $E/Z = 200$ (a) и 400 eV (b).

Таблица 1. Влияние γ -облучения на характеристики регистрируемых многозарядных ионов при $q = 20 \text{ GW/cm}^2$

Характеристика	Доза, R	Элементы					
		Li	O	Na	Si	K	Nd
Z_{max}	0	2	3	2	4	2	3
	10^9	1	2	1	2	2	2
$E_{\text{max}}, \text{eV}$ ($Z = 1$)	0	300	400	800	900	950	2500
	10^9	150	300	500	550	600	2000
$\left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{max}}$, rel. units ($Z = 1$)	0	2.6	6.0	0.8	2.8	0.4	0.2
	10^9	10.0	6.5	2.0	3.0	1.0	0.1

Таблица 2. Влияние γ -облучения на характеристики регистрируемых многозарядных ионов при $q = 90 \text{ GW/cm}^2$

Характеристика	Доза, R	Элементы					
		Li	O	Na	Si	K	Nd
Z_{max}	0	3	5	5	4	3	4
	10^9	3	4	3	4	3	4
$E_{\text{max}}, \text{eV}$ ($Z = 1$)	0	800	1400	2000	2200	3000	3900
	10^9	600	1200	2000	2100	3000	3900
$\left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{max}}$, rel. units ($Z = 1$)	0	3.7	9.0	2.5	10.0	2.0	1.0
	10^9	3.9	10.0	4.2	10.0	4.0	1.0

В то же время экспериментально установлено, что γ -облучение исследуемых образцов существенно изменяет в пороговой и сверхпороговой областях параметры многозарядных ионов, входящих в состав плазмы. Отметим, что с ростом дозы γ -облучения по мере увеличения размера кратера наблюдается возрастание интенсивности ионов, а значения Z_{max} и E_{max} регистрируемых многозарядных ионов при этом уменьшаются (рис. 2–4, табл. 1, 2). Необходимо подчеркнуть, что степень изменения рассматриваемых характеристик многозарядных ионов (N , Z , E) в значительной мере зависит от q лазера. Как видно из табл. 1, 2, при $Q \geq 10 \text{ GW/cm}^2$ (на порядок больше порога разрушения) наблюдается менее существенное изменение N и E ионов. Это может быть связано с частичным отжигом γ -наведенных дефектов (при больших q лазера). Значительное изменение характеристик многозарядных ионов плазмы, образовавшихся при разрушении γ -облученной мишени, объясняется нарушением соотношения между начальным размером плазмы d и характерной длиной рекомбинации $l(Z)$. Это наглядно проявляется при рассмотрении зависимости между размером кратера, возникающего на γ -облученной мишени, и параметрами многозарядных ионов, эмитируемых плазмой. Установлено, что с увеличением кратера на данной поверхности (с увеличением d), т. е. при переходе от пороговой к сверхпороговой области деградации оптического материала, происходит более

существенное изменение характеристик выбрасываемой плазмы. При этом наблюдается более резкое уменьшение значений Z и E ионов плазмы, а количество низкочargedных ионов растет. С ростом дозы γ -облучения возрастает деградация оптического материала и вместе с тем выбрасывается низкочargedная, плотная лазерная плазма.

Деградация поверхности оптических материалов исследовалась независимо тремя методами (микроскопическим, спектроскопическим и масс-спектрометрическим) в пределах плотности мощности лазера $q = 10^8 - 10^{12}$ W/cm². Экспериментально установлены допороговые, пороговые и сверхпороговые области деградации оптических материалов под действием лазерного и ядерного излучений. Выявлены также характер разрушения, дефекты и элементы, ответственные за начало деградации в области порога разрушения оптических материалов и особенно за образование плотной, многоэлементной, низкочargedной плазмы в сверхпороговой области разрушения γ -облученного объекта. В опытах порог разрушения исследуемого объекта без γ -облучения составлял $\sim 4 \cdot 10^9$ W/cm², а после γ -облучения он уменьшался в 4 раза. Необходимо отметить, что определенный интерес представляют исследования при многократном облучении оптических материалов в допороговой области мощности лазера, где проявляется эффект „накопления“. Мы специально провели опыты по выявлению деградации исследуемого объекта в зависимости от количества „выстрелов“ лазера в одно и то же место (излучение лазера $q = 5 \cdot 10^8$ W/cm², допороговая область) и установили, что при 12 „выстрелах“ лазера благодаря эффекту „накопления“ происходит разрушение поверхности объекта. Характер и размер разрушения, наблюдаемые в допороговой области, довольно близки к результатам, полученным в пороговой области q лазера. Заметим, что используемые методы (особенно микроскопический и масс-спектрометрический) чувствительны к эффекту „накопления“, позволяют получить данные о спектрах поглощения, картине деградации объекта, пороге разрушения, а также информацию о массовом, зарядовом, энергетическом составе продуктов после каждого акта воздействия лазерного и ядерного излучения на поверхность оптического материала. Применяемые методы исследования дополняли друг друга и давали возможность изучать деградацию поверхности объектов не только в пороговой и сверхпороговой областях, но и в допороговой области q лазера.

Сравнение деградации оптических материалов и выброса заряженных частиц в пороговой и сверхпороговой областях q лазера показало, что эти области различаются характером, размерами деградации поверхности объекта и природой выброса заряженных частиц с места разрушения мишени. Действительно, природа деградации оптических материалов в допороговой, пороговой и сверхпороговой областях различается; информация об этих различиях необходима для установления механизма разрушения объекта в широком интервале плотностей

мощности в течение одного акта действия светового потока. Все эти процессы взаимосвязаны; следовательно, с ростом плотности мощности лазера в пределах $10^8 - 10^{12}$ W/cm² механизм деградации оптического материала усложняется. Поэтому в допороговой области доминирующим процессом является эффект „накопления“, который в конечном итоге приводит к разрушению оптического материала. В пороговой области определяющими процессами разрушения объекта становятся тепловой нагрев, плавление, испарение и эмиссия частиц. В сверхпороговой области основную роль играет лазерный тепловой взрыв с образованием кратеров и многоэлементной плазмы, содержащей различные ионы в широком интервале кратности заряда и энергии. Масс-спектрометрические исследования показали, что в зависимости от плотности мощности лазера деградацию оптического материала вызывают различные дефекты и элементы матрицы объекта. В допороговой области при возникновении эффекта „накопления“ основную роль играют радиационные дефекты и неконтролируемые примеси, в пороговой области — также радиационные дефекты и часть элементов матрицы, а в сверхпороговой области — все дефекты и элементы, входящие в состав оптического материала. Как нам представляется, в разрушении лазерной системы последовательно при взаимодействии мощного колоколообразного моноимпульса лазера с оптическими материалами проявляются три процесса деградации (допороговый, пороговый, сверхпороговый). В сверхпороговой области деградации объекта в течение одного импульса излучения лазера происходят различные процессы: от эффекта „накопления“ до лазерного теплового взрыва с образованием кратера и выбросом многоэлементной, низкочargedной плазмы. В заключение отметим, что полученные в настоящей работе данные о характеристике и размерах разрушения в зависимости от дозы γ -излучения, о природе деградации в трех областях q лазера, а также об образовании плазмы с известными массовыми, зарядовыми, энергетическими параметрами (особенно в пороговой и сверхпороговой областях деградации оптического материала) полезны при создании мощных твердотельных лазеров и установили причины выхода из строя оптических лазерных систем под действием мощного лазерного и ядерного излучения.

Список литературы

- [1] Р. Абдупатаев, М.Р. Бедиллов, Х.Б. Бейсембаева, П.К. Хабибуллаев. ДАН СССР **286**, 4, 857 (1986).
- [2] Н.Г. Басов, Ю.А. Захаренков, А.А. Рупасов, Г.В. Склизков, А.С. Шиканов. Диагностика плотной плазмы. Наука, М. (1989). 368 с.
- [3] М.Р. Бедиллов, П.К. Хабибуллаев, Х.Б. Бейсембаева. Радиационно-стимулированные процессы в твердотельных оптических квантовых генераторах. Фан, Ташкент (1988). 208 с.

- [4] З.Т. Азаматов, П.А. Арсеньев, М.Р. Бедилов, Х.С. Богдасаров, А.А. Евдокимов, В.М. Циханович. Дефекты в материалах квантовой электроники. Фан, Ташкент (1991). 260 с.
- [5] Н.Г. Басов, Ю.А. Захаренков, Н.Н. Зорев, А.А. Рупасов, Г.В. Склизков, А.С. Шиканов. Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. Радиотехника **26**, 4, 1; 304 (1982).
- [6] М.Р. Бедилов, А.Н. Ишмуратов. ФТТ **38**, 6, 1649 (1996).
- [7] В.В. Артемьев, А.М. Бонч-Бруевич, И.Е. Моригев, Н.Л. Иванова, А.Г. Виноградский. ЖТФ **47**, 1, 183 (1977).
- [8] Б.М. Ашкинадзе, В.И. Владимиров, В.А. Лихачев, И.А. Иванов. ЖЭТФ **55**, 5, 1187 (1966).
- [9] П.И. Балькявичюс, Е.К. Костенко, И.П. Лукошюс, Э.К. Малдугис. Квантовая электрон. **5**, 9, 2032 (1978).
- [10] А.М. Бонч-Бруевич, И.В. Алешин, Я.А. Имас, А.В. Павшуков. ЖТФ **41**, 3, 617 (1971).
- [11] И.М. Бужинский, А.Е. Поздняков. Квантовая электрон. **2**, 7, 1550 (1975).
- [12] Ю.К. Донилейко, А.А. Маненков, В.С. Нечитайло. Квантовая электрон. **5**, 7, 194 (1978).
- [13] Ю.И. Кызыласов, В.С. Старунов, И.А. Фабелинский. ФТТ **12**, 1, 233 (1970).
- [14] А.Г. Молчанов. ФТТ **12**, 3, 954 (1970).
- [15] М.Р. Бедилов, Х.Б. Бейсембаева, М.С. Сабитов. Квантовая электрон. **30**, 2, 201 (2000).