

УДК 533.951

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/81/02>

## ЭФФЕКТ «НАКОПЛЕНИЯ» В НЕПРОЗРАЧНОМ W ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СКОЛЬЗЯЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА

©*Матназаров А. Р.*, канд. физ.-мат. наук, Ургенчский государственный университет  
г. Ургенч, Узбекистан, [a\\_matnazarov@mail.ru](mailto:a_matnazarov@mail.ru)

©*Сатимова З.*, Ургенчский государственный университет, г. Ургенч, Узбекистан

## THE ACCUMULATION EFFECT IN OPAQUE W UNDER REPEATED EXPOSURE TO GRAZING LASER RADIATION

©*Matnazarov A.*, Ph.D., Urgench State University, Urgench, Uzbekistan, [a\\_matnazarov@mail.ru](mailto:a_matnazarov@mail.ru)  
©*Satimova Z.*, Urgench State University, Urgench, Uzbekistan

*Аннотация.* Лазерная прочность многих материалов в режиме многоимпульсного облучения обычно значительно ниже их лазерной прочности при одноимпульсном облучении. Эффект «накопления» уменьшает примесный состав и массу испаренного вещества с поверхности твердого тела и увеличивает лазерную стойкость твердого тела, максимальную кратность заряда ионов W в допороговой и сверхпороговой области плотности мощности лазера, не требуя дополнительной энергии излучения лазера.

*Abstract.* The laser strength of many materials under multipulse irradiation is usually significantly lower than their laser strength under single-pulse irradiation. The ‘accumulation’ effect reduces the impurity composition and mass of the evaporated substance from the surface of the solid and increases the laser resistance of the solid, the maximum ion charge ratio W in the subthreshold and above the threshold region of the laser power density, without requiring additional laser radiation energy.

*Ключевые слова:* лазерное излучение, ионизация, плотность плазмы, эффект накопления, фотоионизация, кратность заряда.

*Keywords:* laser radiation, ionization, plasma density, accumulation effect, photoionization, charge multiplicity.

Лазерная прочность многих материалов в режиме многоимпульсного облучения обычно значительно ниже их лазерной прочности при одноимпульсном облучении. Такое снижение стойкости к настоящему времени обнаружено в оптических материалах различных типов: в силикатных стеклах, кристаллах и полимерах. Физические причины снижения лазерной прочности в режиме многократного облучения могут быть связаны как с вероятностной природой разрушения, так и с накоплением необратимых изменений в материале под действием излучения. Последнее, как в настоящее время установлено экспериментально, является типичной причиной снижения лазерной прочности большинства оптических материалов. Установлено также, что процессы накопления необратимых изменений связаны с поглощающими включениями и дефектами материалов [1].

Анализ литературных данных показал, что наиболее эффективным механизмом моноимпульсного разрушения в оптических материалах, содержащих поглощающие

включения, является тепловой взрыв включения, обусловленный фотоионизацией окружающей матрицы оптического материала ультрафиолетовым излучением нагретого включения [1-5]. Пороговая интенсивность лазерного излучения инициирования теплового взрыва определяется выражением:

$$q_{ph} = 4\pi \cdot R \cdot \chi_r \left[ \frac{d\sigma(T, R)}{dT} \right]_{T=T_{ph}}^{-1},$$

где  $T_{ph}$  — пороговая температура инициирования теплового взрыва;  $\chi_r$  — теплопроводность диэлектрика,  $R$  — радиус включения;  $\sigma(T, R)$  — сечение поглощения, включения с учетом фотоионизации диэлектрика ультрафиолетовым излучением нагретого включения;  $T_{ph}$  — температура, при которой фотоионизация окружающей матрицы тепловым излучением, является доминирующим источником нарастания поглощения в диэлектрике. Отметим, что при  $T < T_{ph}$  фотоионизации недостаточно для катастрофического роста поглощения и разрушения диэлектрика за один импульс [3]. Но при этом могут происходить необратимые изменения, обусловленные динамическими остаточными термоупругими напряжениями. В поле этих напряжений могут, в частности, рождаться различные точечные дефекты, способные поглощать лазерное излучение. При многократном лазерном воздействии будет происходить необратимое накопление поглощающих и, следовательно, рост области поглощения в окрестности поглощающего включения от импульса к импульсу.

Необходимо отметить, что в данных работах особое место занимает роль сильно и слабо поглощающих включений в процессе накопления, однако, на них не будем останавливаться [2, 5].

Таким образом, анализ эффекта накопления в лазерном разрушении, инициированном поглощающим включением, позволит заключить, что экспериментальные данные хорошо описываются простой феноменологической моделью, основанной на зависимости скорости протекания процессов накопления от температуры. Эта модель дает возможность определить критическую интенсивность лазерного излучения, превышение которой приводит к инициированию необратимых изменений в диэлектрике, критическое число импульсов, приводящих к разрушению, и зависимость последнего от интенсивности падающего излучения.

Эффект «накопления» в непрозрачном  $W$  при многократном воздействии скольльзящим излучением лазера. Экспериментально получены данные об эффекте «накопления», а также о влиянии эффекта «накопления» на процесс лазерного разрушения  $W$  мишени и образования многозарядных ионов при многократном облучении. При этом эффект «накопления» имеет место как в допороговой ( $q=10^8-10^9$  Вт/см<sup>2</sup>), так и в сверхпороговой ( $q>10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>) областях плотности мощности излучения лазера, а также зависит от угла падения ( $\alpha=18^0-85^0$ ) излучения лазера на поверхность мишени.

Влияние эффекта «накопления» на лазерное разрушение и образование многозарядных ионов в допороговой и сверхпороговой областях плотности мощности излучения лазера более отчетливо проявляется при скольльзящем ( $\alpha=85^0$ ) падении излучения лазера на поверхность твердого тела. В допороговой ( $q=5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) области, независимо от угла падения излучения лазера, эффект «накопления» проявляется с пятого выстрела (с первого по четвертый выстрел лазера ионные сигналы не зарегистрированы) излучения лазера, т.е. на ионизационном составе наблюдается однозарядный  $W^{1+}$  ионный пик слабой интенсивности. С ростом количества

выстрелов, например до десяти,  $W^{1+}$  пик сохраняется и растет их интенсивность. Следовательно, благодаря эффекту «накопления», с появлением на ионизационном составе ионов  $W^{1+}$  плазмы при многократном облучении на поверхности W-мишени наблюдается лазерное разрушение размерами: длина 5 мм, ширина 0,5 мм.

В сверхпороговой области ( $q > 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>) эффект «накопления» сильно зависит от угла падения излучения лазера на поверхность мишени. Из-за эффекта «накопления» при многократном облучении мишени скользящим ( $\alpha=85^\circ$ ) излучением лазера с  $q=5 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> увеличивается максимальная кратность заряда ионов W с  $Z_{\max}=3$  до  $Z_{\max}=4$ . Характерно то, что при последовательном воздействии импульсов излучения лазера на одно и то же место W-мишень под углом  $\alpha=85^\circ$  уменьшается как число, так и интенсивность ионных сигналов элементов-примесей. Одновременно возрастают амплитуда сигналов ионов W и кратность его заряда. Например, после первого импульса лазера в ионизационном составе регистрируются спектры ионов примесных элементов  $O^{1+}$ ,  $O^{2+}$ ,  $C^{1+}$ ,  $N^{1+}$ ,  $Na^{1+}$ ,  $K^{1+}$ ,  $K^{2+}$ ,  $S^{1+}$ ,  $Co^{1+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Co^{3+}$ , а максимальная кратность заряда ионов W не превышает  $Z_{\max}=3$ . После третьего импульса  $Z_{\max}$  ионов W доходит до 4, а из примесных элементов регистрируются лишь ионы C и O. При этом размеры (длина и ширина) лазерного разрушения на поверхности W остаются такими же, как и в допороговой области, однако глубина кратера заметно увеличивается. Необходимо отметить, что в сверхпороговой области при многократном облучении W-мишени излучением лазера, когда угол падения луча равен  $\alpha=18^\circ$ , роль эффекта «накопления» в формировании масс-зарядового спектра ионов W не обнаружена. При этом на протяжении десяти импульсов масс-зарядовый состав спектра ионов W практически идентичен, т.е. максимальная кратность заряда ионов W  $Z_{\max}=6$  и примесный состав  $C^{1+}$ ,  $O^{1+}$  сохраняются. Следовательно, после многократного облучения на поверхности W-мишени образуется локальное разрушение-лунка с диаметром 33 мм при условиях  $\alpha=18^\circ$  и  $q = 5 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. Анализ морфологии лазерного разрушения показал, что по кругу основной лунки четко выражен рельеф с впадинами и выпуклостями. Края основной лунки несколько возвышаются над плоскостью мишени, что вызвано выбросом металла из лунки и его осаждением на её краях. На основе полученных ионизационных составах спектров ионов W и примесей в допороговой и сверхпороговой областях плотности мощности излучения лазера построены их энергетические спектры.

Энергетический спектр ионов  $W^{1+}$ , образованный в допороговой области благодаря эффекту «накопления», имеет довольно узкий диапазон (50–500 эВ) с одним максимумом распределения. В сверхпороговой области энергетические спектры ионов W и примесей существенно зависят от угла падения излучения на мишень. При скользящем ( $\alpha=85^\circ$ ) падении излучения лазера, диапазон энергетического распределения значительно меньше, чем при острых ( $\alpha=18^\circ$ ) углах падения. Например, энергия  $E_{\max}$  ионов  $W^{1+}$  и  $W^{4+}$ , образующихся при  $\alpha=85^\circ$ , не превышает 500 эВ и 1,0 кэВ, соответственно, в то время как при  $\alpha=18^\circ$  энергия  $E_{\max}$  этих ионов ( $W^{1+}$ - $W^{6+}$ ) достигает  $\sim 4,0$  кэВ. Наряду с энергетическими спектрами ионов W определенный интерес представляют энергетические спектры ионов примесей на поверхности мишени при углах падения излучения лазера  $\alpha=85^\circ$ . Анализ полученных спектров дал возможность установить, что спектры примесных ионов ( $O^{1+}$ ,  $Na^{1+}$ ,  $S^{1+}$ ,  $K^{1+}$ ,  $Co^{1+}$ ) имеют узкий энергетический диапазон (кроме ионов  $C^{1+}$ ) и расположены в области низких энергий, причем спектры ионов с одним максимумом распределения различаются значениями  $E_{\max}$ , а также максимальной интенсивностью. Отметим, что энергетические спектры примесных двухзарядных ионов  $O^{2+}$ ,  $K^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  и трехзарядного иона  $Co^{3+}$  также имеют узкий энергетический диапазон и расположены в низкоэнергетической области.

Максимальные энергии примесных ионов  $E_{\max}$ , как однозарядных, так и двухзарядных, не превышают значения – 1,0 кэВ.

Теперь остановимся на интерпретации полученных результатов. В начале о зависимости эффекта «накопления» от угла падения излучения лазера на поверхность мишени. Когда излучение лазера сфокусировано на поверхности мишени под острым углом ( $\alpha=18^\circ$ ), то при сверхпороговой области ( $q>10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>) и длительности излучения  $10^{-8}$  с слой материала мишени в течение очень малого времени получает энергию, намного превышающую теплоту испарения исследуемого материала. Образованный перегретый слой действует на основу мишени подобно взрывчатому веществу. В глубину мишени со скоростью  $V<10^8$  см/с распространяется ударная волна, приводящая к испарению материала (волна разгрузки). Увеличение температуры пара приводит к его ионизации и быстрому росту коэффициента поглощения. В результате происходит экранирование поверхности мишени от излучения лазера, и при этом внутренняя энергия образующейся плазмы возрастает. На образование слоя плазмы затрачивается очень мало времени, и поэтому весь ход процесса управляется в основном взаимодействием излучения лазера с плазмой. Это явление также экспериментально подтверждается тем, что с ростом плотности мощности и числа импульсов излучения лазера величина испаренной массы оставалась практически неизменной. Следовательно, благодаря этому «экранированию» поверхности мишени плазмы от излучения лазера эффект «накопления» в сверхпороговой области не обнаружен.

При скользком ( $\alpha=85^\circ$ ) падении излучения лазера на поверхность  $W$  как в допороговой, так и в сверхпороговой областях  $q$  лазера наблюдается роль эффекта «накопления» в образовании многозарядных ионов  $W$  и примесей. Также экспериментально установлено, что с ростом плотности мощности излучения лазера из-за отсутствия эффекта «экранирования» поверхности мишени плазмой от излучения лазера, величина испаренной массы с поверхности  $W$  увеличивается. Кроме того, многократное облучение мишени импульсами лазера приводило к образованию дополнительных  $W^{1+}$  ионов в допороговой области, а в сверхпороговой области к образованию ионов  $W^{4+}$  к уменьшению примесных ионов от  $O^{1+}$ ,  $Na^{1+}$ ,  $C^{1+}$ ,  $N^{1+}$ ,  $S^{1+}$ ,  $K^{1+}$ ,  $Co^{1+}$ ,  $O^{2+}$ ,  $K^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Co^{3+}$  до  $C^{1+}$ ,  $C^{2+}$ ,  $O^{1+}$ , а также к необратимым изменениям мишени в области лазерного воздействия (разрушения).

Анализ результатов, полученных микроскопическими и масс-спектрометрическими методами, а также на основе результатов работ, при воздействии излучения лазера с оптически прозрачными (силикатное стекло) и оптически не прозрачными (металлами) твердыми телами показал, что при многократном облучении мощным излучением лазера обоих материалов наблюдается явление эффекта «накопления».

Эффект «накопления» в зависимости от природы твердого тела имеет общие и отличительные стороны. Общие стороны эффекта «накопления» конкретно проявляются, в частности, в следующих характеристиках: наблюдается необратимое разрушение твердого тела лучем лазера; разрушение имеет пороговый характер; изменяется лучевая стойкость, объем и количество испаряемого вещества. Отличительные стороны эффекта «накопления» включают в себя: в случае оптического материала с увеличением количества импульсов лазера (на одно и то же место мишени) увеличивается объем разрушения и количество испаряемого вещества, уменьшается порог разрушения, лучевая стойкость и ионизационный состав плазмы, разрушение по характеру переходит от поверхностного к объемному.

А в случае металла  $W$  (оптически непрозрачного) уменьшается объем разрушения, количество испаряемого вещества и количество ионизационного состава примесей, увеличивается порог разрушения, лучевая стойкость (из-за лучевой и тепловой закалки

вещества) и максимальная кратность заряда материала мишени, а разрушение по характеру переходит от объемного к поверхностному. Исходя из полученных данных, когда в качестве материала служит металл, эффект «накопления» можно назвать эффектом «закалки» твердого тела при многократном облучении излучением лазера, т.е. в зоне действия излучения лазера вещество закаливается лучем и теплом с ростом количества импульсов лазера. Следовательно, благодаря эффекту «накопления» при многократном облучении  $W$ -мишени излучением лазера, происходит уменьшение объема и количества испаряемого вещества, которое приводит к росту плотности и температуры ионизованного вещества. В конечном итоге, эти процессы, протекающие за счет эффекта «накопления», увеличивают ионизационный состав  $W$  (т.е. приводят к росту  $Z_{\max}$  ионов  $W$ ).

В заключении отметим, что эффект «накопления» уменьшает примесный состав и массу испаренного вещества с поверхности твердого тела и увеличивает лазерную стойкость твердого тела, максимальную кратность заряда ионов  $W$  в допороговой и сверхпороговой области плотности мощности лазера, не требуя дополнительной энергии излучения лазера.

#### Список литературы:

1. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Механическое разрушение прозрачных твердых тел лазерными импульсами разной длительности // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. №4. С. 335–340.
2. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Теоретический анализ эффекта накопления в лазерном разрушении прозрачных диэлектриков при многократном облучении // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. №7. С. 701–705.
3. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Эффективность различных механизмов лазерного разрушения прозрачных твердых тел // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. №7. С. 623–628.
4. Гуськов С. Ю., Бородзюк С., Калал М., Касперчик А., Краликова Б., Кроуски Е., Уллшмид Й. Генерация ударных волн и образование кратеров в твердом веществе при кратковременном воздействии лазерного импульса // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. №11. С. 989–1003.
5. Бедиллов М. Р., Бейсембаева Х. Б., Давлетов И. Ю. Влияние  $\gamma$ -наведенных дефектов в стекле на процесс лазерного разрушения // Физика твердого тела. 2002. Т. 44. №6. С. 1048.

#### References:

1. Koldunov, M. F., Manenkov, A. A., & Pokotilo, I. L. (2002). Mekhanicheskoe razrushenie prozrachnykh tverdykh tel lazernymi impul'sami raznoi dlitel'nosti. *Kvantovaya elektronika*, 32(4), 335-340. (in Russian).
2. Koldunov, M. F., Manenkov, A. A., & Pokotilo, I. L. (1995). Teoreticheskii analiz effekta nakopleniya v lazernom razrushenii prozrachnykh dielektrikov pri mnogokratnom obluchenii. *Kvantovaya elektronika*, 22(7), 701-705. (in Russian).
3. Koldunov, M. F., Manenkov, A. A., & Pokotilo, I. L. (2002). Effektivnost' razlichnykh mekhanizmov lazernogo razrusheniya prozrachnykh tverdykh tel. *Kvantovaya elektronika*, 32(7), 623-628. (in Russian).
4. Guskov, S. Yu., Borodzyuk, S., Kalal, M., Kasperchik, A., Kralikova, B., Krouschi, E., ... & Ullshmid, I. (2004). Generatsiya udarnykh voln i obrazovanie kraterov v tverdom veshchestve pri kratkovremennom vozdeistvii lazernogo impul'sa. *Kvantovaya elektronika*, 34(11), 989-1003. (in Russian).

5. Bedilov, M. R., Beisembaeva, Kh. B., & Davletov, I. Yu. (2002). Vliyanie  $\gamma$ -navedennykh defektov v stekle na protsess lazernogo razrusheniya. *Fizika tverdogo tela*, 44(6), 1048. (in Russian).

*Работа поступила  
в редакцию 17.06.2022 г.*

*Принята к публикации  
21.06.2022 г.*

---

*Ссылка для цитирования:*

Матназаров А. Р., Сатимова З. Эффект «накопления» в непрозрачном W при многократном воздействии скользящим излучением лазера // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. №8. С. 14-19. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/81/02>

*Cite as (APA):*

Matnazarov, A., & Satimova, Z. (2022). The Accumulation Effect in Opaque W Under Repeated Exposure to Grazing Laser Radiation. *Bulletin of Science and Practice*, 8(8), 14-19. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/81/02>