

УДК 533.951;621.373.826

**ЭФФЕКТ «НАКОПЛЕНИЯ» В НЕПРОЗРАЧНОМ ВОЛЬФРАМЕ ПРИ
МНОГОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СКОЛЬЗЯЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА**
**ACCUMULATION EFFECT IN THE OPAQUE TUNGSTEN WITH A MULTIPLE
IMPACT SLIDING RADIATION OF LASER**

©*Матназаров А. Р.*

канд. физ.-мат. наук

*Ургенчский государственный университет
г. Ургенч, Узбекистан, a_matnazarov@mail.ru*

©*Matnazarov A.*

*Ph.D., Urgench State University (USU),
Urgench, Uzbekistan, a_matnazarov@mail.ru*

Аннотация. В связи с развитием работ по исследованию лазерной плазмы как источника МЗИ в ускорительной технике и инерциальному термоядерному синтезу лазеров на многозарядных ионах, плазменных лазеров, нелинейных оптических сред актуальным вопросом современной оптики и лазерной физики является исследование механизма нагрева и образования плазмы при взаимодействии излучения лазера с твердыми телами.

К настоящему времени выполнено большое число теоретических и экспериментальных работ, дающих представление о физических процессах, протекающих в лазерной плазме. Установлено, что процесс ее образования зависит не только от плотности мощности светового потока на поверхности мишени, но и от других начальных параметров, как от длины волны, угла падения — так и от энергии связи дефектности структуры и элементного состава мишени.

В данной работе изучены особенности формирования спектра многозарядных ионов W при многократном воздействии скользящего излучения лазера.

Abstract. In this article the plate of tungsten (W), multi-charged plasma obtained by laser radiation. The investigations of features produced multi-charged ions spectra of tungsten at single and multiply influence of sliding laser radiation. All results were investigated by mass-spectrometry, collector, laser and optical methods.

Features of produced multi-charged ions spectra of tungsten obtaining at interaction of sliding laser radiation for the first time are investigated; it was found that, mass-charge spectra of plasma ions formed sliding single laser radiation, contain not only W ions peaks, but also peaks of the ions present in a sample as superficial inclusions; dependence of absorption of laser radiation from an angle of incidence on a target surface is shown; the effect of accumulation in opaque W dependence on multiply irradiation it was found.

Ключевые слова: лазер, лазерная плазма, ионизация, рекомбинация, угол падения излучения лазера, многозарядные ионы, спектры ионов, масс-зарядовые спектры.

Keywords: a laser, laser plasma, ionization, recombination, angle of incidence laser radiation, ion spectra, mass-charge spectra.

Масс-спектрометрическим методом изучены особенности формирования спектра и влияние эффекта «накопления» на оптически непрозрачное твердое тело в зависимости от числа и угла падения лазерных импульсов. Установлено, что в допороговой (10^8 – 10^9 Вт/см²) области q лазера, независимо от угла падения ($\alpha=18^0$ – 85^0) излучения лазера, и в

сверхпороговой ($q > 10^{10}$ Вт/см²) области при только скользящем падении ($\alpha=85^\circ$) излучения лазера, отчетливо наблюдаются роль эффекта «накопления» и особенности формирования спектра в увеличении максимальной кратности заряда (Z_{max}) ионов W , а также в уменьшении количества и интенсивности примесных ионов. При острой фокусировке ($\alpha=18^\circ$) излучения лазера в сверхпороговой области его роль не обнаружена. На основе скользящего падения излучения лазера разработан лабораторный прибор «Лазерный многозарядный масс-спектрометр для элементного анализа твердых тел» [1].

Экспериментально установлен эффект «накопления» в непрозрачном W при многократном воздействии скользящим 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/см²), так и в сверхпороговой ($q>10^{10}$ Вт/см²) областях плотности мощности излучения лазера, а также зависит от угла падения ($\alpha=18^\circ-85^\circ$) 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 скользящем ($\alpha=85^\circ$) падении излучения лазера на поверхность твердого тела. В допороговой ($q=5 \cdot 10^8$ Вт/см²) 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 (рис.1). 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/см²) 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/см² увеличивается максимальная кратность заряда ионов W с $Z_{max}=3$ до $Z_{max}=4$ (Рисунок). 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/см². 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 ее краях. На основе полученных ионизационных составах спектров ионов W и

примесей в допороговой и сверхпороговой областях плотности мощности излучения лазера построены их энергетические спектры.

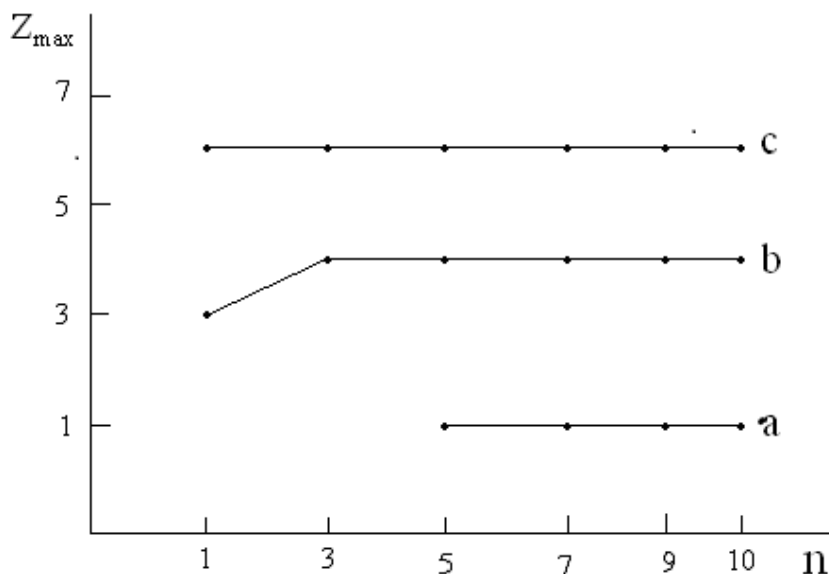


Рисунок. Зависимость максимальной кратности заряда Z_{max} ионов W от количества выстрелов излучения лазера, где а – допороговая область $q=5 \cdot 10^8$ Вт/см² при $\alpha=18^\circ$ и $\alpha=85^\circ$; б – сверхпороговая область $q=5 \cdot 10^{11}$ Вт/см² при $\alpha=85^\circ$; с – сверхпороговая область $q=5 \cdot 10^{11}$ Вт/см² при $\alpha=18^\circ$.

Энергетический спектр ионов W^{1+} , образованный в допороговой области благодаря эффекту «накопления», имеет довольно узкий диапазон (50–500эВ) 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/см²) 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 скользшем ($\alpha=85^\circ$) 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 [2–6], 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).

Заключение

В заключение отметим, что эффект «накопления» уменьшает примесный состав и массу испаренного вещества с поверхности твердого тела и увеличивает лазерную стойкость

твёрдого тела, максимальную кратность заряда ионов W в допороговой и сверхпороговой области плотности мощности лазера, не требуя дополнительной энергии излучения лазера.

Полученные результаты могут быть использованы в области плазменной оптики, физики лазера и плазмы, ядерной и физической электроники, метеорологии.

Список литературы:

1. Бедиллов М. Р., Бедиллов Р. М., Матназаров А. Р., Сабитов М. М. Лазерный масс-спектрометр для элементного анализа твёрдых тел // Приборы и техника эксперимента. 2005. №2. С. 160-161.
2. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Механическое разрушение прозрачных твёрдых тел лазерными импульсами разной длительности // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. №4. С. 335-340.
3. 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.
4. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Эффективность различных механизмов лазерного разрушения прозрачных твёрдых тел // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. №7. С. 623-628.
5. Гуськов С. Ю., Борозюк С., Калалс М., Касперчик А., Краликова Б., Кроуски Е., Лимпоухс И., Машек К., Писарчик Т., Писарчик П., Пфейфер М., Рохлена К., Скала Й., Уллшмид Й. Генерация ударных волн и образование кратеров в твёрдом веществе при кратковременном воздействии лазерного импульса // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. №11. С. 989-1003.
6. Бедиллов М. Р., Бейсимбаева Х. Б., Давлетов И. Ю. Влияние Гамма-наведенных дефектов в стекле на процесс лазерного разрушения // Физика твёрдого тела. 2002. Т. 44. №6. С. 1048-1052.

References:

1. Bedilov, M. R., Bedilov, R. M., Matnazarov, A. R., & Sabitov, M. M. (2005). Lazernyi mass-spektrometr dlya elementnogo analiza tverdykh tel. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, (2), 160-161.
2. Koldunov, M. F., Manenkov, A. A., & Pokotilo, I. L. (2002). Mechanical damage in transparent solids caused by laser pulses of different durations. *Quantum Electronics*, 32, (4), 335-340. doi:10.1070/QE2002v032n04ABEH002194
3. Koldunov M. F., Manenkov A. A., Pokotilo I. L. (1995). Theoretical analysis of the accumulation effect in laser damage to transparent dielectrics under repeated irradiation conditions. *Quantum Electronics*, 22, (7), 674-678. doi:10.1070/QE1995v025n07ABEH000442
4. Koldunov, M. F., Manenkov, A. A., (2002). Pokotilo, I. L. Efficiency of various mechanisms of the laser damage in transparent solids. *Quantum Electronics*, 32, (7), 623-628. doi:10.1070/QE2002v032n07ABEH002258
5. Guskov, S. Yu., Borodziuk, S., Kalal, M., Kasperczuk, A., Kralikova, B., Krousky, E., Limpouch, J., Masek, K., Pisarczyk, T., Pisarczyk, P., Pfeifer, M., Rohlena, K., Skala, J. & Ullschmied, J. (2004). Generation of shock waves and formation of craters in a solid material irradiated by a short laser pulse. *Quantum Electronics*, 34, (11), 989-1003. doi:10.1070/QE2004v034n11ABEH002695
6. Bedilov, M. R., Beisimbaeva, Kh. B., & Davletov, I. Yu. (2002). Effect of γ -radiation-induced defects in glass on laser destruction. *Physics of the Solid State*, 44, (6), 1093-1097. doi:10.1134/1.1485013

Работа поступила
в редакцию 01.08.2017 г.

Принята к публикации
04.08.2017 г.

Ссылка для цитирования:

Матназаров А. Р. Эффект «накопления» в непрозрачном вольфраме при многократном воздействии скользящим излучением лазера // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017. №8 (21). С. 22-27. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/matnazarov> (дата обращения 15.08.2017).

Cite as (APA):

Matnazarov, A. (2017). Accumulation effect in the opaque tungsten with a multiple impact sliding radiation of laser. *Bulletin of Science and Practice*, (8), 22-27